



دراسة تأثير التشويب بدقائق الكربون النانوية على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT واستخدامه في تصنيع ترانزستور تأثير المجال OFET.

رسالة مقدمة من قبل:

ناظم عبد الجليل عبد الله الخمسين.

إلى قسم الفيزياء في كلية التربية للعلوم الصرفة في جامعة البصرة
كجزء من متطلبات نيل درجة الدكتوراه فلسفة في الفيزياء.

2018 م.

1440 هـ.

”بسم الله الرحمن الرحيم”

﴿الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ
جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ
وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَاطِلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا
عَذَابَ النَّارِ﴾

”صدق الله العلي العظيم”

(آل عمران 191)

الإهداء

إلى روحِ كُلِّ مَنْ كَانَ لِلطَّافُوتِ فِي حَيَاتِهِ بِصِمَةٍ... إِلَى عِزِّنا وَفَخْرنا... شُهدائنا
الأبرار...

إلى روحِ مَنْ جَرَعَ الكَأْسَ فارغاً لِيُسْقِينَا قَطْرَةَ حُبٍّ...
إلى روحِ مَنْ كَلَّتْ أُنَامِلُهُ لِيَقْدِمَ لَنَا لَحْظَةً سَعَادَةٍ...
إلى روحِ مَنْ حَصَدَ الْأَشْوَكَ عَنْ دُرِيِّي لِيُمَهِّدَ لِي طَرِيقَ الْعِلْمِ...
إلى القلبِ الكبيرِ المفقود ... أبي

إلى روحِ ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب...إلى معنى الحنان والتفاني ...
إلى روحِ مَنْ كَانَ دُعَاؤُهَا سِرّاً نَجَّاهِي وَحَنَانُهَا بَلَسَمَ جِراحِي...

إلى روحِ أغلى الحبايب ... أُمِّي

إلى مَنْ تَقَاسَمُوا مَعِيَ عِبَاءَ الْحَيَاةِ... إِخْوَتِي
إلى مَنْ شَارَكْتَنِي حُلُومَ الْحَيَاةِ وَمُرَهَا... زَوْجَتِي

إلى مَنْ أَرَى التَّفَاوُلَ بَعَيْنِهِمْ .. وَالسَّعَادَةَ فِي ضَحِكْتِهِمْ
إلى الوجهِ المُنْعَمِ بِالْجَبَّارَةِ...إلى مَنْ بِهِمْ أَزْهَرَتْ أَيَّامِي...
بِرَاعِمِ اللِّغْدِ... أَطْفَالِي

أهدي ثَمَرَةَ جُهْدِي المتواضع...

ناظم

شكر و عرفان

الحمدُ لله مستحق الحمد حتى الانقطاع، وموجب الشكر بأقصى ما يُستطاع، وصلواتُ الله وسلامهُ على محمدٍ خيرٍ مَنْ افْتُتِحَتْ بذكره الدعوات، واستُنْجِدَتْ بهِ الطالبات، وعلى آلهِ القادةِ الهداةِ وسفينةِ النجاةِ.

يسرني أن أتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى أستاذي ومشرفي الأستاذ الدكتور وليد علي حسين والأستاذ الدكتور حسين فالح حسين لما بذلاه من جهود مخلصه في اقتراح البحث، ومتابعتهم وتوجيهاتهم القيمة في إنجاح هذا المشروع، ولتحملهما عناء الإشراف والمتابعة. كما أتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى عمادة كلية التربية للعلوم الصرفة ورئاسة وأساتذة قسم الفيزياء لإتاحتهم الفرصة لي لإكمال دراستي والدعم المتواصل طيلة مدة البحث.

كما وأتقدم بشكري و عرفاني إلى منتسبي مركز أبحاث البوليمر لتقديم الدعم للمشروع. ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر إلى الأستاذ الدكتور حميد عبد الواحد العطار والدكتور جلال جبار والدكتور مازن عوني والدكتورة سندس جمعة فاخر والأستاذ أمجد جاسم الشاوي لمساعدتهم القيمة.

ولا يفوتني أن أشكر أفراد عائلتي وإخوتي وأقاربي وأصدقائي لتحملهم العناء ومساعدتهم ودعمهم المتواصل لي في أثناء مدة البحث، ولما بذلوه من أجلي. مع شديد اعتذاري لمن فاتني ذكرهم في هذه الأسطر القليلة، داعياً الله أن يجزيهم جميعاً أفضل جزاء المحسنين.

والله ولي التوفيق.

ناظم



توصية الأستاذين المشرفين

نشهد أن إعداد هذه الرسالة قد تم تحت إشرافنا في قسم الفيزياء/ كلية التربية للعلوم
الصرفة/ جامعة البصرة، وهي جزء من متطلبات نيل درجة الدكتوراه في علوم الفيزياء.

التوقيع: 

الاسم: د. حسين فالح حسين

المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: كلية التربية للعلوم للعلوم الصرفة -
جامعة البصرة

التاريخ: ٢٠١٩/ ١ / ٣

التوقيع: 

الاسم: د. وليد علي حسين

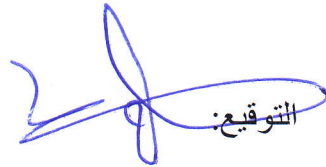
المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: كلية التربية للعلوم الصرفة - جامعة
البصرة

التاريخ: ٢٠١٩/ ١ / ٣

توصية رئيس قسم الفيزياء

إشارة إلى التوصية المقدمة من قبل الأستاذين المشرفين أ.د. وليد علي حسين وأ.د. حسين فالح
حسين أحيل هذه الرسالة إلى لجنة المناقشة لدراستها وبيان الرأي فيها.

التوقيع: 

الاسم: د. جبار منصور خلف

المرتبة العلمية: أستاذ

التاريخ: ٢٠١٩/ ١ / ٣

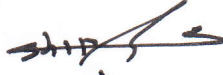
إقرار لجنة المناقشة

نحن أعضاء لجنة المناقشة الموقعون أدناه نشهد بأننا قرأنا الأطروحة الموسومة " دراسة تأثير التشويب بدقائق الكربون النانوية على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT واستخدامه في تصنيع ترانزستور تأثير المجال OFET "، المقدمة من قبل الطالب (ناظم عبد الجليل عبد الله)، استكمالاً لمتطلبات نيل درجة الدكتوراه فلسفة في الفيزياء، وبعد إجراء المناقشة وجدت اللجنة أن الأطروحة مستوفية لمتطلبات الشهادة المذكورة، وعليه توصي اللجنة بقبول الأطروحة بمجال (فيزياء البوليمر).

رئيس اللجنة

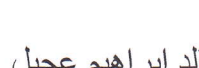
التوقيع : 
الاسم : د. جنان مجيد عبد السادة
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية التربية للعلوم
الصرفة - جامعة البصرة.
التاريخ: 2019/ /

عضو اللجنة

التوقيع : 
الاسم : د. محمد هادي شنين
الدرجة العلمية: أستاذ مساعد
العنوان: كلية التربية الأساسية-
جامعة بابل.
التاريخ: 2019/ /
عضو اللجنة/مشفرف ثاني

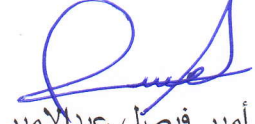
التوقيع : 
الاسم : د. علي قاسم عبدالله
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية العلوم- جامعة
البصرة.
التاريخ: 2019/ /
عضو اللجنة/مشفرف أول

عضو اللجنة

التوقيع : 
الاسم : د. خالد إبراهيم عجيل
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية التربية للعلوم
الصرفة - جامعة البصرة.
التاريخ: 2019/ /
عضو اللجنة

التوقيع : 
الاسم : د. حسين فالح حسين
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية التربية للعلوم الصرفة
- جامعة البصرة.
التاريخ: 2019/ /

التوقيع : 
الاسم : د. وليد علي حسين
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية التربية للعلوم
الصرفة - جامعة البصرة.
التاريخ: 2019/ /

التوقيع : 
الاسم : د. أمير فيصل عبدالامير
الدرجة العلمية: أستاذ مساعد
العنوان: كلية العلوم- جامعة
بغداد.
التاريخ: 2019/ /

توصية عميد الكلية

أصادق على ما جاء في إقرار اللجنة أعلاه.

التوقيع:
الاسم: د. فالح حسين خضير
الدرجة العلمية: أستاذ
العنوان: كلية التربية للعلوم الصرفة - جامعة البصرة.
التاريخ: 2019/ /

الخلاصة

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT ودراسة تأثير التشويب بدقائق الكربون النانوية (CNPs) عليها، وتحضير متطلبات تصنيع ترانزستورات تأثير المجال العضوي، ومن ثم دراسة خصائصه الكهربائية، والعمل على تحسين خصائصها وتشخيص الأفضل منها، ولكي يحقق هذا الهدف، خضعت الدراسة الى سلسلة من الدراسات التحضيرية والتجريبية والتشخيصية التي يمكن استعراضها في الفقرات الآتية.

تم دراسة تأثير نوع القاعدة وعملية تشويب البوليمر PVA بـ CNPs بالنسب (1%, 5%) على الصفات التركيبية للأغشية الرقيقة المصنعة، وذلك من خلال نتائج فحوصات حيود الاشعة السينية (XRD). إذ زادت عملية التشويب من الحجوم البلورية وتعيد انتشار البلورات المتشكلة، ويزداد هذا التأثير بزيادة نسبة المادة الشائبة CNPs. إن عملية تشويب البوليمر بـ P3HT بـ CNPs بنسبتين مختلفتين (1%, 5%) تؤثر على الصفات التركيبية للأغشية الرقيقة المصنعة، إذ تقلل من الحجوم البلورية وتزيد من عدد البلورات المتشكلة وتعيد انتشار البلورات المتشكلة، وتشكل في الحالات النقية والمشوبة أغشية شبه بلورية، ويقل كل من خشونة السطح و R_q عند نسبة المضاف 1% وتزداد عند النسبة 5% من CNPs، وذلك حسب نتائج فحوصات AFM. وأظهرت نتائج قياس السمك باستخدام تقنية الالبسومير، ان سمك الأغشية الرقيقة للبوليمر P3HT المحضرة يقل بزيادة سرعة الدوران عند زمن دوران ثابت قدره (1 min.) باستخدام طريقة الطلاء بالبرم لتحضير الأغشية النقية والمشوبة بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5% من CNPs). وان عملية التشويب تقود الى زيادة قليلة جدا في سمك الأغشية الرقيقة، وذلك بإتباع الإجراءات العملية نفسها بطريقة الترسيب بالبرم من سرعة وزمن الدوران ومعالجة التلدين الحراري ونسبة التشويب.

وبينت دراسة الخواص البصرية للبوليمر P3HT تأثير زيادة كل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5% من CNPs) في زيادة الامتصاصية وتقليل النفاذية، ويزداد هذا التأثير بزيادة كل من سمك الغشاء ونسبة المضاف CNPs. ويعمل التشويب على تقليص فجوة الطاقة البصرية بين (1.96-1.92eV).

أظهرت دراسة الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT تأثير كل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بالنسب المختلفة من CNPs ودرجة الحرارة (30-70°C) في زيادة التوصيلية الكهربائية (5.15x10⁻⁵-7.58x10⁻⁴ S/cm) وتقليل طاقة التنشيط للأغشية الرقيقة المحضرة

بين (0.46-0.0872eV)، ويزداد هذا التأثير بتقليل سمك الغشاء وزيادة كل من درجة الحرارة ونسبة المضاف CNPs.

بينت نتائج دراسة الخواص العازلية للنبيطة Al/(PVA+%CNPs)/Al ازدياد ثابت العزل الكهربائي للأغشية النقية المحضرة بالتركيب معدن-عازل-معدن (MIM) عند تشويبها بالنسب المختلفة من CNPs، إذ ازداد ثابت العزل الكهربائي بين (9.6-10.45)، ويزداد بزيادة نسبة المادة الشائبة CNPs. كما أن هناك تأثيراً لكل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة المتسعة الكهربائية المصنعة بالتركيب Al/(PVA+CNPs%)/Au، ويزداد هذا التأثير بتغيير كل من هذه المؤثرات. كذلك أسهمت دراسة الخواص العازلية للتركيب معدن-عازل-شبه موصل (MIS) طبيعة تأثير تغيير التردد من خلال ميزة (C_i -F) وكذلك تأثير تغيير الجهد المسلط من خلال ميزة (C_i -V) على السعة الكهربائية لوحدة المساحة للتركيب (Al/PVA/P3HT/Au). بينت دراسة ميزة (C -F) انخفاض C_i مع التردد في الترددات العالية، وأوضحت دراسة ميزة (C_i -V) في الترددات الواطئة والعالية قابلية البوليمرين على تشكيل السطوح التي تمكن من تصنيع OFET منها.

تم تصنيع الأقنعة والأدوات مختبرياً لغرض تصنيع ترانزستورات تأثير المجال العضوي والنبائط الأخرى. فقد تم دراسة تأثير طول قناة التوصيل في الترانزستور (PVA/P3HT-OFET) المصنع مختبرياً، وبعرض قناة توصيل ثابت (1mm)، وعند سرعة دوران (2000 rpm) للطبقة الفعالة P3HT، وعند سرعة دوران (1000rpm) لعازل البوابة، ان جميع الترانزستورات المصنعة للدراسة بالتركيب TG-BC هي من النوع التعزيزي (او التجميعي).

أظهرت دراسة تأثير طول قناة التوصيل بين (40-120 μ m) في الترانزستور (PVA/P3HT-OFET) ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان طول قناة التوصيل يساوي 60 μ m، لان تقليل طول قناة التوصيل يؤدي الى تقليل مقاومتها وبالتالي زيادة كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وزيادة جهد العتبة، فيما اظهر طول القناة 40 μ m تأثير القناة القصيرة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=5.43 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-23 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=447), (R_{\text{ch}}=1.05 \text{ M } \Omega)$$

أظهرت دراسة تأثير سمك الطبقة الفعالة (P3HT) من خلال تغيير سرعة الدوران بترسيب الغشاء بطريقة الطلاء بالبرم بين (177-334 nm) في الترانزستور (PVA/P3HT-OFET)، ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان سمك الطبقة الفعالة يساوي

203 nm. وان تقليل سمك الطبقة الفعالة يؤدي الى تقليل مقاومة قناة التوصيل وبالتالي زيادة كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وتقليل جهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=5.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-23\text{V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=753), (R_{\text{ch}}=1 \text{ M } \Omega)$$

أظهرت دراسة تأثير سمك طبقة عازل البوابة PVA بدلالة تغيير سرعة الدوران في المدى (1000-3000rpm) في الترانزستور (PVA/P3HT-OFET) ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان سمك الطبقة العازلة المقابل الى 2000 rpm. بينت الدراسة ان تقليل سمك طبقة عازل البوابة يقود الى الانتقال من الترانزستورات التي تعمل في الجهد العالي الى ترانزستورات الجهد المنخفض، ويؤدي بصورة عامة الى زيادة ونقصان مقاومة قناة التوصيل وزيادة تحركية حاملات الشحنة وتقليل جهد العتبة للترانزستور. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.16 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-0.9 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=477), (R_{\text{ch}}=1.96 \text{ M } \Omega)$$

أظهرت دراسة تأثير تشويب الطبقة الفعالة P3HT بـ CNPs بالنسب المختلفة في الترانزستور (PVA/(P3HT+%CNPs)-OFET) ان عملية التشويب تقود الى تقليل مقاومة قناة التوصيل وبالتالي تغيير كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.41 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-1.2 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=199), (R_{\text{ch}}=2.82 \text{ M } \Omega)$$

أظهرت دراسة تأثير تشويب طبقة عازل البوابة PVA بـ CNPs بالنسب المختلفة في الترانزستور ((PVA+%CNPs)/P3HT-OFET) ان عملية التشويب تقود الى زيادة مقاومة قناة التوصيل وتغير كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.53 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-1.1 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=131), (R_{\text{ch}}=5.28 \text{ M } \Omega)$$

أظهرت دراسة تأثير تشويب كل من الطبقة الفعالة P3HT وطبقة عازل البوابة PVA بـ CNPs بشكل مشترك بالنسب المختلفة في الترانزستور ((PVA+%CNPs)/P3HT-OFET) ان عملية التشويب تقود الى تغيير كل المعاملات الكهربائية للنبيطة مقاومة قناة التوصيل وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة. حيث كان الترانزستور

هو الترانزستور الذي يمتلك المعاملات الآتية:

$$(\mu=2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-1.4 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=116), (R_{\text{ch}}=1.77 \text{ M}\Omega)$$

من خلال مقارنة مجمل نتائج دراسة ترانزستورات تأثير المجال العضوية المحضرة بالتركيب (PVA/(P3HT)-OFET، وجد ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في دراستنا هو الترانزستور الذي يمتلك التحركية ($\mu=2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)، وذلك عند تشويب الطبقة الفعالة بالنسبة 5% والطبقة العازلة بالنسبة 2% بـ CNPs، وعند طول قناة التوصيل $60 \mu\text{m}$.

الصفحة	المحتويات	التسلسل
I	الآية القرآنية	
II	الإهداء	
III	شكر وتقدير	
VI	الخلاصة	
X	المحتويات	
XIV	الرموز والمصطلحات	
	الفصل الأول: المقدمة ونظرة تاريخية	
2	تمهيد	-1
5	مراحل تطور علم الإلكترونيات	-1-1
7	أشباه الموصلات العضوية	-2-1
11	الإلكترونيات العضوية	-3-1
13	ترانزستور تأثير المجال العضوي	-4-1
14	ترانزستور تأثير المجال	-5-1
16	مبدأ عمل ترانزستور تأثير المجال	-6-1
19	الدراسات السابقة	-7-1
27	الخطوط العامة لتنظيم الأطروحة	-8-1
28	الهدف من الدراسة	-9-1
	الفصل الثاني: الأساس النظري	
30	تقنية التشويب	-1-2
31	آليات التشويب في المواد العضوية	-2-2
31	آلية التشويب الفيزيائي	-1-2-2
32	آلية التشويب الكيميائي	-2-2-2
32	التنشيط الحراري للتشويب العضوي	-3-2
33	المواد العازلة البوليمرية	-4-2
36	الصفات الكهربائية المتناوبة	-5-2
36	التركيب معدن-عازل-معدن	-1-5-2
38	التركيب معدن-عازل-شبه موصل	-2-5-2
40	التركيب MIS المثالي	-2-5-2
42	سطح منطقة شحنة الفراغ	-1-3-5-2
44	منحنيات التركيب MIS المثالية	-2-3-5-2
45	السعة عند الترددات المنخفضة	-3-3-5-2
46	السعة عند الترددات العالية	-4-3-5-2
48	الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي	-6-2
52	التوصيف الكهربائي للترانزستور OFET	-7-2
53	خصائص الخرج	-1-7-2

الصفحة	المحتويات	التسلسل
54	خصائص التحويل	2-7-2
55	المعاملات الرئيسية لترانزستور تأثير المجال العضوي.	2-8
55	التحريكية تحت تأثير المجال	2-8-1
55	النسبة بين تيارى التشغيل والإطفاء	2-8-2
56	جهد العتبة	2-8-3
56	الميل تحت العتبة (او جهد الاشباع الجزئي)	2-8-4
57	مقاومة الاتصال	2-8-5
57	مصائد الشحنة	2-9
59	أهمية سطوح الاتصال بين المواد المختلفة	2-10
62	سطح اتصال (معدن-شبه موصل)	2-10-1
63	الاتصال الاومي	2-10-1.1
65	اتصال شوتكي	2-10-2
66	سطح اتصال (شبه موصل-عازل)	2-10-2
	الفصل الثالث: المواد الكيميائية والطرق العملية	
69	تمهيد	3-1
70	المواد الكيميائية	3-2
70	البوليمر بولي هكسايل ثايوفين P3HT	3-2-1
71	البوليمر بولي كحول الفاينيل PVA	3-2-2
73	جسيمات الكربون النانوية CNPs	3-2-3
75	المذيبات	3-2-4
76	المواد المعدنية المستخدمة لترسيب الأقطاب الكهربائية	3-2-5
76	ارضيات الترسيب	3-2-6
76	تحضير النماذج	3-3
76	عملية تنظيف الركائز	3-3-1
77	تقنية الطلاء بالبرم	3-3-2
78	تقنية التبخير الحراري تحت الضغط المخلخل	3-3-3
80	عملية الإذابة والتشويب	3-3-4
81	الأقنعة المصنعة لغرض ترسيب الأقطاب الكهربائية	3-3-5
83	تحضير النماذج	3-4
83	تحضير النماذج الخاصة بالخواص البصرية والسمك للبوليمر P3HT	3-4-1
84	تحضير النماذج الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT	3-4-2
85	تحضير النماذج المتعلقة بدراسة التركيب (معدن-عازل-معدن) (MIM)	3-4-3
86	تحضير النموذج الخاص بدراسة التركيب (معدن-عازل-شبه موصل) (MIS)	3-4-4

الصفحة	المحتويات	التسلسل
87	تحضير نماذج ترانزستور تأثير المجال العضوي (OEFT)	3-4-5
89	أجهزة القياس	3-5
90	جهاز الالبسوميتر	3-5-1
90	جهاز مطيافية الامتصاصية والنفاذية	3-5-2
90	تقنية حيود الاشعة السينية XRD	3-5-3
90	مجهر القوة الذرية AFM	3-5-4
91	دائرة قياس مميزة التيار - الفولتية (I-V)	3-5-5
91	دائرة قياس الخواص العازلية	3-5-6
92	دائرة قياس ميزة (C-V)	3-5-7
93	دائرة قياس الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال	3-5-8
	الفصل الرابع: نتائج الخواص الفيزيائية العامة للمواد	
95	تمهيد	4-
95	نتائج الفحوصات التركيبية للأغشية الرقيقة المحضرة	4-1-
96	نتائج الفحوصات باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD)	4-1-1-
100	نتائج الفحوصات باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM)	4-1-2-
103	نتائج قياس سمك الاغشية للبوليمر P3HT	4-2-
105	نتائج قياس الخواص البصرية للبوليمر P3HT	4-3-
108	- نتائج قياس الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT	4-4-
110	دراسة تأثير التشويب مع الحرارة على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT	4-4-1-
112	حساب طاقة التنشيط لأغشية P3HT المحضرة	4-4-2-
114	دراسة تأثير سمك الغشاء على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT	4-4-3-
117	نتائج قياس تأثير التشويب على خواص البوليمر PVA بالتركيب MIM	4-5-
117	تأثير إضافة CNP على ثابت العزل للبوليمر PVA	4-5-1-
119	دراسة تأثير التشويب بـ CNPs وسمك الغشاء ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA	4-5-2-
123	نتائج التركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA	4-6-
123	دراسة ميزة (C-V) للتركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA	4-6-1-
125	نتائج دراسة ميزة (C-F) للتركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA	4-6-2-
	الفصل الخامس: خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	
127	تمهيد	5-
128	دراسة تأثير طول القناة على ترانزستور تأثير المجال العضوي P3HT/PVA	5-1-
136	تأثير سمك الطبقة الفعالة على الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي	5-2-
142	تأثير سمك عازل البوابة على الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير	5-3-

الصفحة	المحتويات	التسلسل
	المجال العضوي	
147	دراسة تأثير تشويب البوليمر P3HT بـ CNP على ترانزستور تأثير المجال العضوي	-4-5
154	دراسة تأثير تشويب الطبقة العازلة PVA بـ CNP على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-5-5
160	دراسة تأثير تشويب كل من الطبقة الفعالة والعازلة بـ CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-6-5
161	تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 1% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-1-6-5
161	تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 2% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-2-6-5
162	تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 3% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-3-6-5
162	تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 4% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-4-6-5
163	تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 4% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي	-5-6-5
	الفصل السادس: الاستنتاجات والعمل المستقبلي	
166	الاستنتاجات	-1-6
170	العمل المستقبلي	-2-6
171	المصادر المستخدمة	
198	البحوث المنشورة والمقبولة للنشر	
	Abstract	

قائمة الرموز والمختصرات

الرمز	المصطلح
A	الامتصاصية
a-Si:H	السيلكون غير المتبلور المهدرج
OLED	الثنائي العضوي الباعث للضوء
TFT	ترانزستور الأغشية الرقيقة
PT	البولي ثيوفين
CNPs	دقائق الكربون النانوية
0D	عديم الأبعاد
1D	ذات بعد واحد
2D	ذات بعدين
MIM	معدن-عازل-معدن
MIS	معدن-عازل-شبه موصل
OFET	ترانزستور تأثير المجال العضوي
RFID	بطاقات التعريف بالتردد الراديوية
HOMO	المدار الجزيئي المشغول الأعلى
LUMO	المدار الجزيئي الفارغ الأدنى
π^*, π	مستويات الطاقة
ϵ	ثابت العزل
MOSFET	ترانزستورات تأثير المجال ذي الأوكسيد المعدني
S	قطب المصدر (المنبع)
D	قطب المصرف
G	قطب البوابة
L	طول قناة التوصيل
W	عرض قناة التوصيل
V_{th}	جهد العتبة
V_{gs}	فرق الجهد بين البوابة والمصدر
V_{ds}	فرق الجهد بين المصرف والمصدر
I_{off}	تيار الإطفاء
I_{on}	تيار التشغيل
I_{ds}	التيار المار بين المصدر والمصرف (تيار قناة التوصيل)
I_{gs}	التيار المار بين المصدر والبوابة (تيار التسرب)
BG	تركيب البوابة السفلى
TG	تركيب البوابة العليا
BC	تركيب أقطاب التوصيل السفلى
TC	تركيب أقطاب التوصيل العليا

الرمز	المصطلح
SAMs	الطبقة الأحادية ذاتية التنظيم
P3HT	البوليمر بولي هكساييل-ثيوفين
PVA	البوليمر بولي فينيل الكحول
E_g	فجوة الطاقة
CR-PVA	البوليمر بولي فينيل الكحول المتشابك
C_i	سعة المتسعة الكهربائية لوحدة المساحة
μ	تحركية حاملات الشحنة
μ_{sat}	تحركية حاملات الشحنة عند الاشباع
MEH-PPV	ميثوكسي-إثيل-هكسيلوكسي بولي (فينيلين فاينالين)
PMMA	بولي ميثايل بولي اكريليت
PVP	بولي فينيل الفينول
PVT	البولي (1-فينيل-2،4،1-تريازول)
PET	بولي اثلين ترفتاليت
PS	بولي استايرين
CYEPL	سيانو ايثيل بوليولان
PVC	البولي فينيل الكلوريد
F8T2	بولي ديوكتايل فلورين-التا ثيوفين
PBTTT	بولي بس تتر ثيوفين-بي ثيوفين
P(VDF-TrFE)	بولي فينالايدين فلوريد-كو تريفلورو اثلين
P(VDF-TrFE-CTFE)	بولي فينالايدين فلوريد-كو تريفلورو اثلين-كلورو ترفلواتلين
QDs	نقاط كمية
DCB	الكلوروبانزين
VC	فيتامين C
PTCDI-C8	بولي (ن-دايواكتايل-برلين داي كار بوكسمايد)
C-V	ميزة السعة-الفولتية
C-F	ميزة السعة-التردد
d	البعد بين قطبي المتسعة الكهربائية
ϵ_0	السماحية الكهربائية للفراغ
SWCNTs	الأنابيب الكربون النانوية أحادية الجدار
XRD	جهاز حيود الأشعة السينية
AFM	مجهر القوة الذرية
G	سرعة البرم في تقنية الطلاء بالبرم
t	سمك النموذج
R	الانعكاسية
ν	التردد
λ	الطول الموجي

الرمز	المصطلح
T	النفاذية
ω	التردد الزاوي
c	سرعة الضوء بالفراغ
θ	زاوية سقوط الأشعة السينية
R_q	Root Mean Square
R_{ch}	مقاومة قناة التوصيل
R_p	مقاومة اتصال القطب
P-OFET	ترانزستور تأثير المجال العضوي موجب القناة
N-OFET	ترانزستور تأثير المجال العضوي سالب القناة
I_{ds-sat}	تيار القناة عند حالة الاشباع
SS	الجهد تحت العتبة
DI-water	الماء المقطر منزوع الايونات
PS	البولي استايرين
SiO_2	ثنائي اوكسيد السليكون
n_p	كثافة الالكترونات
p_p	كثافة الفجوات
n_{po}	كثافة الالكترونات في حالة الاتزان
p_{po}	كثافة الفجوات في حالة الاتزان
Q_M	الشحنة لوحدة المساحة
Q_S	الشحنة الكلية لوحدة المساحة
V	الجهد المار خلال العازل
C_D	سعة منطقة الاستنزاف
N_A	تركيز الشحنات
C_{FB}	السعة في الحالة المستوية
$C_{min.}$	القيمة الصغرى للسعة
W_D	سمك منطقة الاستنزاف
ψ_{ms}	الفرق بين دالة شغل المعدن وشبه الموصل
rr-P3HT	البوليمر P3HT المنظم فراغيا
NR-P3HT	البوليمر P3HT غير المنظم فراغيا
SAMs	الطبقة الأحادية ذاتية التشكيل
AD	ثنائي كرومات الامونيا
P-doping	المادة الشائبة الموجبة
N-doping	المادة الشائبة السالبة
FTM	Floating film transfer method
F4TNQ	Tetrafluoro-tetracyano quinodimethane

الفصل الأول

المقدمة ونظرة تاريخية

المقدمة ونظرة تاريخية

1-تمهيد:

تركز اهتمام الباحثين في العقود القليلة الماضية على إمكانية توظيف المواد العضوية واستخدامها في دراسة ترانزستور تأثير المجال بسبب تطبيقاتها الفعالة في الدوائر المتكاملة منخفضة الكلفة والتي يمكن تصنيعها بمساحات واسعة على قواعد مختلفة وحتى المرنة منها. وقد تسارعت البحوث في مجال تصنيع المواد شبه الموصلة العضوية وتطوير طرائق تصنيع الأجهزة الالكترونية العضوية. بدأت الدراسات بالبحث في تحسين خصائص أشباه الموصلات العضوية مثل زيادة التوصيلية الكهربائية لهذه المواد، نتج عن تلك الجهود تصنيع ترانزستور تأثير المجال العضوي ذي تحركية ونسبة تيار تشغيل الى تيار إطفاء عالية وجهد التشغيل الواطئ [1-3]. استخدمت المواد العضوية في تصنيع الكثير من الأجهزة الإلكترونية مثل شاشات العرض المرنة وأجهزة الخزن والمعالجة (Processors & Memories) والالكترونيات القابلة للارتداء (Electronic Textiles) وبطاقات التعريف باستخدام الترددات الراديوية (Radio Frequency Identification (RFID)) وأجهزة الاستشعار (sensors)، إضافة الى أجهزة الكشف الكيميائية والحيوية (Biochemical Detectors) وبطاريات الأغشية الرقيقة (Thin Films Batteries) وترانزستورات تأثير المجال العضوية الباعثة للضوء (Organic Light Emitting Field Effect Transistors (OLE-FET)) وغيرها من التطبيقات [4-8].

عندما نقارن بين ترانزستورات تأثير المجال العضوية مع مثيلاتها الترانزستورات التقليدية غير العضوية، يلاحظ أن الترانزستورات العضوية بحاجة مستمرة إلى تحسين خصائصها بصورة مستمرة، مثل جهد التشغيل العالي والأداء المنخفض مقارنة مع الترانزستورات غير العضوية والسبب في ذلك يعود بصورة أساسية الى التحركية المنخفضة نسبياً لأشباه الموصلات العضوية، بسبب المقاومة العالية لهذه المواد من جهة وطبيعة السطوح البينية في بنية الأجهزة من جهة أخرى. وقد اتخذت العديد من الطرق المختلفة في محاولة لتحسين أداء الترانزستورات العضوية ليس فقط من ناحية الخصائص الكهربائية لأشباه الموصلات العضوية ولكن أيضاً على صعيد تحسين هياكل النبيطة [9].

أظهرت بعض اشباه الموصلات العضوية صفات ممتازة لتحركية حاملات الشحنة (الإلكترونات أو الفجوات) مقارنة بواحدة من أشباه الموصلات غير العضوية الأكثر استخداماً على نطاق واسع وهو السيليكون غير المتبلور المهدرج (a-Si:H). في الواقع، أن كلاً من عملية حقن الشحنات وتحركية حاملات الشحنة تؤدي دوراً هاماً جداً في تحديد أداء النبيطة في الثنائيات العضوية

الباعثة للضوء ((Organic Light Emitting Diode(OLED)) وترانزستورات الأغشية الرقيقة ((Organic Thin Film Transistor (OTFT)). [10-12] طرحت فكرة تصنيع أول ترانزستور تأثير المجال في عام 1930م من قبل ليلينفيلد، حيث صنع في عام 1960م أول ترانزستور تأثير مجال لا عضوي من أوكسيد أشباه الموصلات القائم على السيليكون من قبل عطا الله وزملائه في معهد كارنيغي التكنولوجي في بنسلفانيا. والذي كان من أبرز النتائج العلمية في الإلكترونيات الدقيقة في ذلك العصر. وعلى الرغم من أن الأوصاف الأولى لخاصية تأثير المجال في أشباه الموصلات العضوية تعود إلى عام 1970م، كعناصر فعالة في الأجهزة الإلكترونية من قبل كوزوكا وزملائه، في عام 1987م تم تصميم أول ترانزستور OFET بطريقة البلورة الكهروكيميائية والقائم على البولي ثيوفين (PT). ان أول من صنع OFET باستخدام P3HT هو باوزيمان عام 1996م. [11, 13-14]

شهدت ترانزستورات تأثير المجال العضوي المصنعة بطرائق ترسيب الأغشية الرقيقة من محاليل المواد شبه الموصلة العضوية تقدم هائل في الآونة الأخيرة لغرض تقليل كلفة الإنتاج للأجهزة الإلكترونية. ان أفضل المواصفات لأداء التشغيل للنبيطة هو كفاءة النبيطة لزمن عمر التشغيل وانخفاض جهد التشغيل، وهما الصفتان الرئيستان المرجوتان للتطبيقات الإلكترونية للأجهزة القائمة على أساس هذه النبائط. ومع ذلك لا تزال هناك العديد من الجوانب الفيزيائية والتكنولوجية التي يتعين مواجهتها لتحسين تلك التطبيقات. [15-16]

برزت الإلكترونيات العضوية في السنوات الأخيرة كمجال نابض بالحياة في مجال البحث والتطوير، وهي تجمع علوم الكيمياء والفيزياء وعلوم المواد والهندسة. فكان النمو السريع فيها هو ثمرة الاهتمام من قبل الأوساط الأكاديمية والصناعية بالمواد المترافقة بشكل عام وأشباه الموصلات العضوية على وجه الخصوص. فقد اكتشف عدد من الباحثين أن المواد المترافقة تكون نظاماً مهماً غنية بمجموعة متنوعة من المفاهيم الجديدة بسبب تركيبها الإلكتروني الفعال وسهولة تشكيلها في هيكلية بناء الأجهزة الإلكترونية. وعلى صعيد البحوث التطبيقية إضافة إلى أن أشباه الموصلات العضوية حلت محل أشباه الموصلات التقليدية في التقنيات القائمة على السيليكون، فقد أسهمت بظهور الكثير من التطبيقات الحديثة، وأصبحت الشركات الكيميائية الكبرى في جميع أنحاء العالم تشارك الآن في تطوير المواد الكيميائية الفعالة كمصادر للتطبيقات الإلكترونية العضوية. حيث أن الأجهزة الإلكترونية بصورة عامة تشترك بسمة مشتركة، وأداؤها يعتمد بشكل حرج على كفاءة انتقال حاملات الشحنة (الإلكترونات و الفجوات) داخل المواد المترافقة، من هنا جاء الاهتمام بالتركيب الكيميائي وهيكل بناء الأجهزة وطرق الترسيب المستعملة والمعالجات الصناعية الأخرى، كون حاملات الشحنة إما أن تحقق في أشباه

الموصلات العضوية من الأقطاب المعدنية أو أقطاب أكسيد موصلة كما في حالة الثنائيات الباعثة للضوء أو ترانزستورات تأثير المجال، وإما أنها تتولد داخل المواد في حالة الخلايا الشمسية عن طريق فصل الشحنات التي يسببها الفوتون في السطح البيني بين مكونات المانح الإلكتروني والقابل للإلكترون [12, 17].

إن الخواص الميكانيكية والكهربائية والبصرية المميزة للمواد العضوية جعلت المجتمع العلمي يسعى للاستفادة منها ودمجها في التطبيقات الإلكترونية والبصريات وخاصة في الأنظمة المرنة ميكانيكياً. كما إن توافر البوليمرات في الحالات الصلبة والسائلة وطرق بناء التراكيب البوليمرية من الجزيئات البسيطة هي أمور مطلوبة دائماً للدراسات في العلوم الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. إن البحث في الخصائص الكهربائية والبصرية للمواد شبه الموصلة العضوية أمر ضروري لتقليل خسائر القدرة وتحسين خرج الجهاز بصورة عامة. الترانزستورات العضوية OFET توفر إمكانية تطوير خصائص انتقال حاملات الشحنة في أشباه الموصلات العضوية في كل من الأغشية شبه الموصلة النقية وكذلك في مزيج من المواد شبه الموصلة [18-19].

تم في هذه الدراسة رصد التغيرات في الخصائص الكهربائية في الأغشية الرقيقة لشبه الموصل العضوي (poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl (P3HT)) والعازل العضوي Polyvinyl Alcohol (PVA) والتي تنشأ بسبب تشويب هذه المواد بنسب مختلفة من دقائق الكربون النانوية (Carbon Nanoparticles (CNPs)، وكيف تؤثر هذه الإضافة بشكل مباشر في كثافة حاملات الشحنة وفي خواص انتقالها خلال المزيج. ودراسة الخواص الكهربائية والعازلية لها من خلال التراكيب Metal-Insulator-Metal(MIM), Metal-Insulator-Semiconductor (MIS). ثم تصنيع ترانزستورات تأثير المجال من المواد العضوية النقية، وبعد تشويب كل منها بنسب مختلفة على حده كمرحلة ثانية، وفي المرحلة الأخيرة يتم تشويبها معاً. ودراسة الخواص الكهربائية لجميع الترانزستورات المصنعة، وباستخراج المعاملات المهمة التي تمكننا من مقارنتها مع دراسات أخرى سبقتها وتحديد أفضلية التشويب لأي من المواد المستخدمة في التصنيع والنسبة المثلى من المضاف، إضافة إلى مقارنات أخرى من تأثير كل من سمك الأغشية الرقيقة لتلك الأغشية وأبعاد قناة التوصيل، وتركز الدراسة على الترانزستورات التي تعمل بجهد تشغيل واطئ أقل من 1 V. وكل ذلك تم بعد تصميم وتصنيع الأدوات والأقنعة وبناء الدوائر وأنظمة القياس الضرورية لبناء وقياس هياكل جميع النبائط قيد الدراسة داخل المختبر.

1-1-مراحل تطور علم الالكترونيات:

مر تأريخ علم الالكترونيات بحقبة طويلة ومعقدة ابتدأت من الصمامات المفرغة. ان المهتمين بالصناعات الالكترونية الذين كان اهتمامهم منصباً حول الصمامات المفرغة، أصبح لهم توجهاً جديداً عند ظهور جهاز ترانزستور الحالة الصلبة والنبائط الأخرى. وكان على المهتمين في مجال تصنيع الترانزستورات تحسين كفاءة التصنيع من خلال تحسين مقاومة الكسر وخفة الوزن واستغلاله مساحة اقل داخل الجهاز وعمر التشغيل الأطول نسبياً وعدم استخدام الفتيل جعلته يتفوق على الصمامات التقليدية، فهو لا يتطلب التسخين ويعمل بحدود قيم الجهد المنخفض. أن أشباه الموصلات التقليدية قفزت بمجال الالكترونيات أبعد من أي شيء يمكن أن يتصور من قبل.[20-21] وتتلخص مراحل هذا التطور بإطلاق عبارة أشباه العوازل التي تغيرت إلى أشباه الموصلات فيما بعد وذلك من قبل اليساندرو فولتا في 1782م عندما لاحظ نقصان مقاومة المعادن بالتسخين.[22] واكتشاف خصائص شبه الموصلات مثل السلوك غير الخطي للتيار لاتصال معدن-شبه موصل وانحرافه عن السلوك الاومي عام 1876م والذي أطلق عليه بحاجز شوتكي نسبة الى العالم الذي أثبتته عام 1929م. ان اكتشاف ظاهرة التحفيز الضوئي عام 1876م من قبل الكسندر ادموند، وظهور أول وصف للفجوات الى جنب الالكترونيات كحاملات شحنة، والذي أدالى بناء أول خلية شمسية من قبل تشارلز فريتس عام 1883م. وكان اكتشاف انحراف الشحنة بوجود مجال مغناطيسي عام 1879م ويدعى تأثير هول نسبة للشخص المكتشف. اكتشاف مقومات من السليكون للكشف عن الموجات الراديوية عام 1906م من قبل بيكارد والتي طورت واستخدمت في الاتصالات والرادار في الحرب العالمية الثانية. وكان اول نشر لفكرة وجود حزم وفجوة الطاقة في المواد في عام 1930م من قبل رودولف بيرلز وتفسير حاجز الجهد في وصلة تتكون من نوعين متغايرين من أشباه الوصلات من قبل والتر نيفيل عام 1977م[23-25].

ان التطور السريع لتكنولوجيا أشباه الموصلات بدأت في النصف الثاني من القرن الماضي، ففي عام 1947م تم تصنيع الثنائيات البلورية من قبل روزل، وان هذا الاكتشاف أدى الى ثورة في صناعة الإلكترونيات وسمح لها بالتطور في مجال الترانزستور (ثنائية القطبية) الذي اكتشف في عام 1947 من قبل باردين وبراتين، إضافة إلى أعمال لاحقة في الموضوع نفسه، حصل باردين و براتين و شوكلي على جائزة نوبل في الفيزياء في عام 1956م. إن التطور الخطى السريع الذي خلق الصناعات الالكترونية والضوئية كان مصدره تحقيق صناعة الترانزستور. إذ إن المنتجات التي تأسست على أساس أجهزة أشباه الموصلات مثل أجهزة الكمبيوتر من وحدات المعالجة المركزية والذاكرة ووسائل التخزين البصري والبنية التحتية للاتصالات وأشعة الليزر وأجهزة الكشف الضوئي وتكنولوجيا الألياف البصرية والكترونيات ذات الترددات العالية الشائعة، كل

ذلك كان نتاج البحث في مجال أشباه الموصلات وفيزياء وكيمياء وهندسة المواد العضوية، والتي ساهمت بشكل بناء الأجهزة وأدائها إلى حد كبير وفرض وجود التكنولوجيا الحديثة. [26-28]

وقد تلقت المواد العضوية ذات الخصائص الإلكترونية الفريدة الكثير من الاهتمام كمادة أساسية للأجهزة الإلكترونية الجديدة. وحتى الآن، كان هناك الكثير من الدراسات عن الأجهزة التي يعتمد في تصنيعها أشباه الموصلات العضوية والصبغات العضوية المختلفة، وخاصة في المجالات الإلكترونية والكهروضوئية. ومع ذلك فإن أداءها لا يزال يحتاج إلى تحسين مقارنة بالأجهزة المصنوعة من أشباه الموصلات غير العضوية التقليدية. لقد أصبحت إمكانية الجمع بين المركبات العضوية والإلكترونيات ممكنة في السبعينات من القرن الماضي، ويمكن القول إن الإلكترونيات العضوية ولدت مع اكتشاف وتطوير البوليمرات الموصلة من قبل مجموعة من الباحثين في جامعة بنسلفانيا في عام 1977م، ونتيجة لهذا العمل حصل هؤلاء العلماء الثلاثة على جائزة نوبل في الكيمياء عام 2000م، [27, 29-30] وبعد هذه الاكتشافات لم تتوقف البحوث في مجال الإلكترونيات. ففي عام 1985م قامت مجموعة العلماء التي شكلها تسوموراوكوزوكا وأندو بتصنيع أول ترانزستور تأثير المجال العضوي (OFET) من بوليمر البولي ثايوفين، إذ كانت جهود العقدين الماضيين مثمرة جداً في تصميم أجهزة أشباه الموصلات العضوية وتصنيعها على أساس المواد الجزيئية والبوليمرات في الحالة الصلبة. الأجهزة التي تم تصنيعها تقليدياً من أشباه الموصلات غير العضوية قد تم استبدالها واستحداث أخرى مع هذه التكنولوجيا الجديدة مثل الثنائيات الباعثة للضوء والخلايا الشمسية وترانزستورات تأثير المجال والخلايا الكهروكيميائية الباعثة للضوء وأجهزة المعالجة والخزن وأجهزة الاستشعار عن بعد والكواشف وشاشات العرض وأجهزة الاتصال المحمولة وغيرها [11, 14, 31-32].

منذ ذلك الحين أعطي الفيزيائيون والكيميائيون والمهندسون مهمة تحقيق الفائدة من المواد شبه الموصلة العضوية أو المواد المترافقة في مجموعة واسعة من التطبيقات. نظراً لقدرة هذه المواد على نقل الشحنات الكهربائية أصبحت تستخدم على نطاق واسع مع إمكانية ترسيبها في درجات حرارة واطئة هذه الميزة جعلتها في اهتمام المختصين، والتي تؤدي إلى انخفاض كبير في تكاليف التصنيع مقارنة بالصناعة القائمة على المواد التقليدية في الأجهزة بالإضافة إلى الميزات الكثيرة الأخرى. إن الترانزستورات المصنوعة من المواد العضوية قد تصل قيم التمريرية لحاملات الشحنة لقيم مقاربة أو حتى تتجاوز قيم التمريرية لترانزستورات الأغشية الرقيقة على أساس السيليكون غير متبلور المستخدمة في الشاشات المستوية من شاشات البلورات السائلة الحالية. الدور الأساس للإلكترونيات العضوية هو تحديد التطبيق الصحيح لبعض المواد والعثور عليها، وبعضها الآخر يساهم في تحديد الخصائص المناسبة لبعض التطبيقات، والتي لا يمكن تصنيعها من النبائط

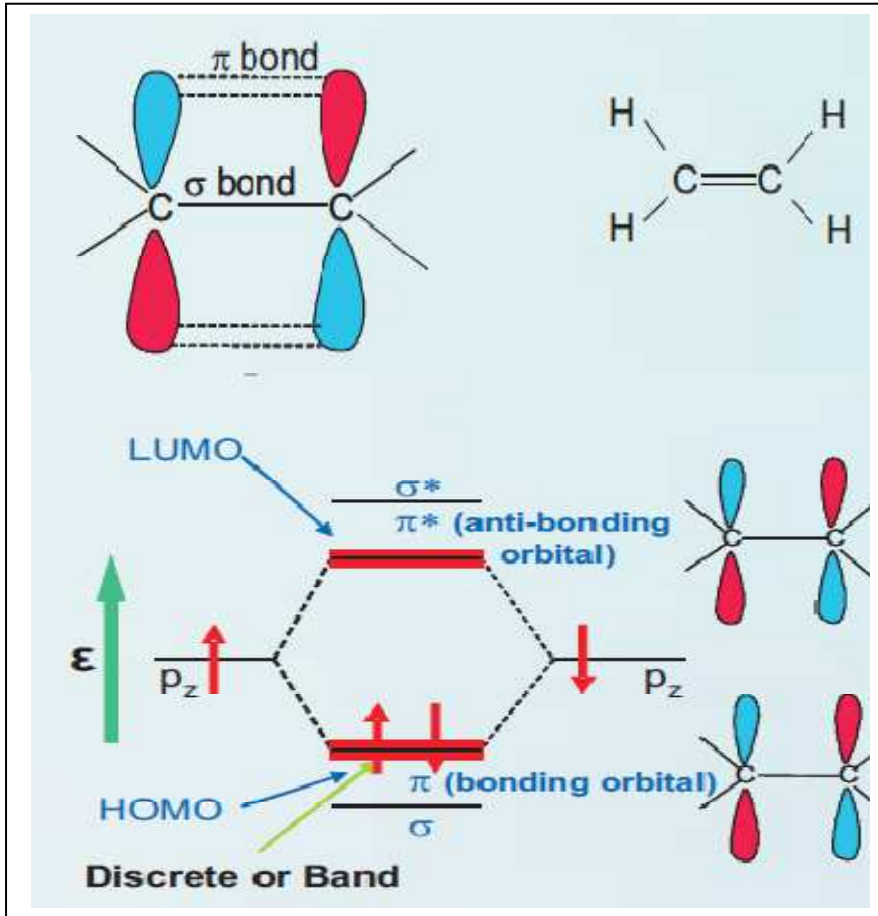
المصنعة من المواد غير العضوية التقليدية. الاكتشافات الرئيسية المتعلقة بالترانزستور العضوي ابتداء من عام 1995م تركزت على استخدامها كمعالجات نقطية على الشاشات المرنة، واستخدامها كعناصر ذاكرة لبطاقات تعريف الهوية بالترددات الراديوية (RFID). واستخدمت الترانزستورات العضوية أيضاً ككواشف للغازات وأجهزة استشعار كيميائية وحيوية بوصفها تطبيقات ممكنة للمواد شبه الموصلة العضوية [33-35].

2-1- أشباه الموصلات العضوية: (Organic Semiconductor)

إن المواد العضوية الصلبة مثل البلورات الجزيئية والأغشية الجزيئية غير المتبلورة أو الأغشية البوليمرية هي مواد مصنوعة من وحدات جزيئية فرعية. أشباه الموصلات العضوية هي جزيئات هيدروكربونية مع سلسلة من ذرات الكربون. تستند أشباه الموصلات العضوية بصورة عامة إلى مركبات الكربون، وتختلف عن أشباه الموصلات غير العضوية بالبنية الهيكلية الرئيسية بوجود حزم على أساس التهجين sp^2 كما هو الحال في البنزين والجرافيت. إلا أن الماس على الرغم من أنه يتكون 100٪ من الكربون، لا يعد من أشباه الموصلات العضوية. ومن الملاحظ أن الكربون يمكن أن يشكل مزيد من التراكيب المثيرة للاهتمام القائمة على حزم sp^2 ، مثل الأنابيب النانوية الكربونية أو فوليرين C_{60} الكروي. [36-37]

الأواصر القوية التي تشكل العمود الفقري الجزيئي تنشأ من المدارات الذرية SP^2 من ذرات الكربون المتجاورة التي تتداخل بقوة مما يؤدي إلى الترابط القوي بين المدارات الجزيئية σ و σ^* . المدارات الذرية المتبقية P_z تتداخل إلى درجة أقل بحيث المدارات الجزيئية الناتجة π و π^* ذات قوة ترابط أقل ومن ثم تشكيل الحدود المدارية للجزيئة. في الحالة الأرضية للجزيئة كل مدارات الترابط تصل إلى المدار الجزيئي المشغول الأعلى (High Occupied Molecular Orbit- HOMO)، مملوءة بزواج من الإلكترونات متعاكسة البرم، بينما المدارات مضادة الارتباط (anti-binding) من المدار الجزيئي الفارغ الأدنى (Low Unoccupied Molecular Orbit- LUMO) فصاعداً تكون فارغة، كما هي الحالة في أشباه الموصلات اللاعضوية، إذ تقابل هذه المدارات حزم التكافؤ والتوصيل. يمكن أن تتشكل المستويات المثارة المتعادلة على سبيل المثال عن طريق امتصاص الضوء في الجزيئة عندها يتم انتقال الإلكترون من HOMO إلى LUMO. الميزة الكبيرة للمواد العضوية هي العيوب التي تؤدي إلى تكون مستويات تتكون من المدارات غير المرتبطة تنتهي عادة بوجود σ متشعبة بدلاً من مستويات π المتشعبة. إن العيوب تحدث مستويات في فجوة الطاقة لـ σ المتشعب، على عكس تشعب π وهي فجوة الطاقة الحقيقية للمادة كما مبين بالشكل (1-1)، الذي يوضح حزم الطاقة للآيثان (أبسط شكل لنظام مترافق)

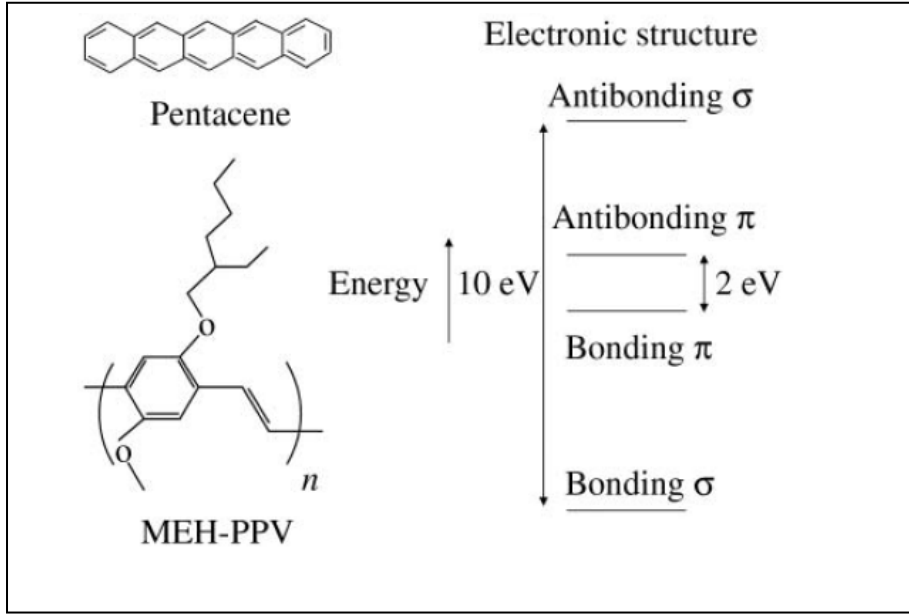
والإثارة الضوئية للإلكترون بين المدارين π و π^* [38-39] إن أشباه الموصلات العضوية حساسة نسبياً للعيوب، ومع ذلك يمكن صنع الأجهزة الكهربائية المفيدة منها لأن العيوب لا يكون لها الضرر نفسه على الخصائص الإلكترونية كما هو الحال في أشباه الموصلات غير العضوية. وإن أي تغيير يحدث بإضافة إلكترون في مدار مضاد للارتباط وفقدان إلكترون من مدار مترابط -أي فجوة- يتوافق مع الحالة المثارة المتعادلة. ويرجع ذلك إلى الانخفاض النسبي لثابت العازل في أشباه الموصلات العضوية ($\epsilon \sim 3$)، وقوة جذب كولوم عالية بين الإلكترون والفجوة، مما أدى إلى طاقة ترابط إكسيتون (Exciton) تتراوح من 0.5 eV إلى أكثر من 1 eV [38, 40].



الشكل (1-1): يبين حزم الطاقة للإيثان. [40]

لذا فإن أشباه الموصلات العضوية هي فئة جديدة من المواد الإلكترونية على أساس المواد المترافقة. يمكن أن تكون أشباه الموصلات العضوية إما جزيئات صغيرة (Small Molecular) يتم ترسيبها بواسطة التبخير والترسيب في الفراغ لتصنيع أغشية رقيقة كونها غير قابلة للذوبان في المذيبات، وإما البوليمرات (Polymers) والتي يتم ترسيبها بطرق ترسيب المحاليل لتصنيع الأغشية الرقيقة لأنها تذوب بالمذيبات. تمتلك الجزيئات الصغيرة والبوليمرات شبه الموصلة فجوات طاقة تتراوح بين 1.5-3.5 eV عادة للمواد النقية، وبالتالي ليس لديها ناقلات شحنة حرة

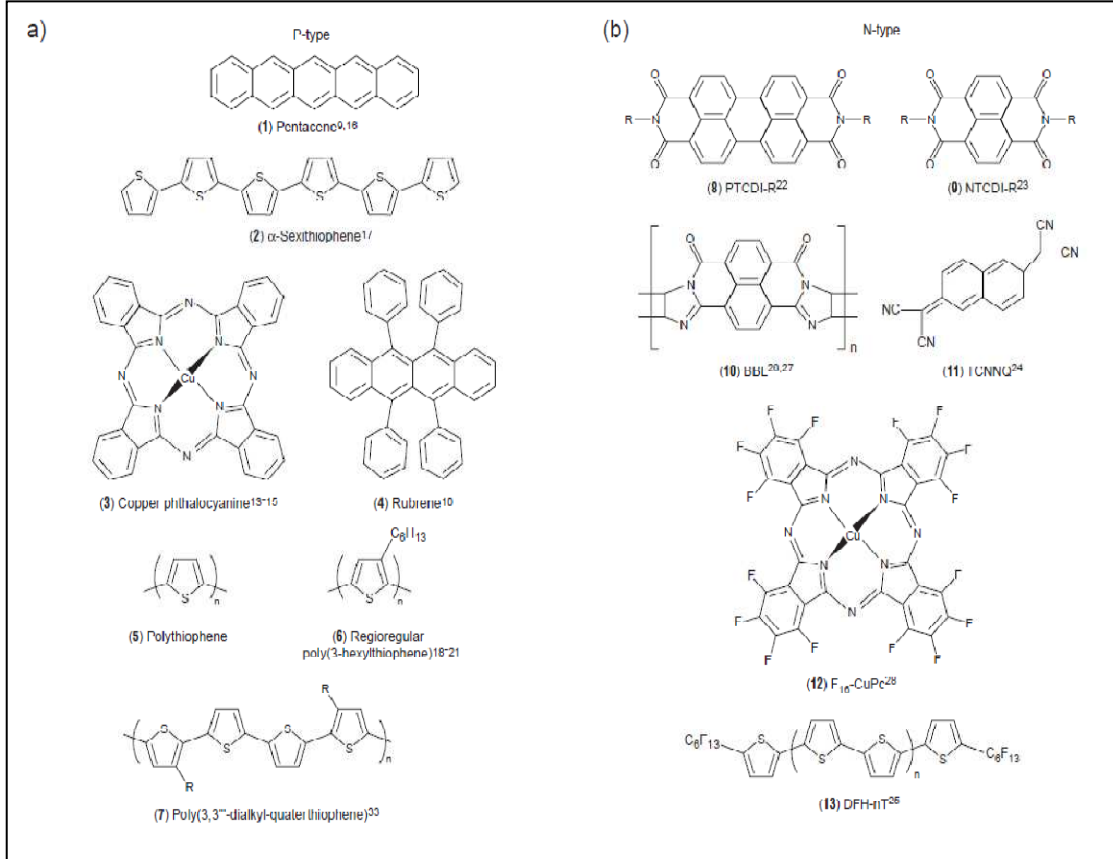
في درجة حرارة الغرفة. الصفة الأساسية للمواد المترافقة هو أن لديها أوامر كربون-كربون مزدوجة أو ثلاثية. الأوامر المزدوجة الهجينة هي sp^2-p والأوامر الثلاثية هي $sp-p^2$. يوضح الشكل (2-1) التراكيب الكيميائية والالكترونية لكلا نوعي المواد المترافقة: الجزيء الصغير (البنتاسين) والبوليمر (ميثوكسي-إثيل-هكسيلوكسي بولي (فنيولين فاينالين) MEH-PPV). [36,39,41](PPV).



الشكل (2-1): التراكيب الكيميائية والالكترونية للبنتاسين و (MEH-PPV). [39]

ازداد الاهتمام بأشباه الموصلات العضوية النقية في الثمانينات بسبب ظهور الخلايا الضوئية الكفاءة بدمج المواد العضوية المتغيرة (وصلة النوعين p, n)، وكذلك أول تصنيع ناجح لترانزستورات الأغشية الرقيقة من البوليمرات المترافقة والجزيئات الصغيرة. بيد أن الزخم الرئيسي جاء عند ظهور الأداء العالي للثنائيات الباعثة للضوء من الأغشية الرقيقة المصنعة من الجزيئات الصغيرة والبوليمرات المترافقة. [42] لقد تم دراسة الصفات البصرية الضوئية للبوليمرات المترافقة بشكل مكثف خلال العقود الثلاثة الماضية. تشكل هذه المركبات العضوية فئة جديدة من مواد أشباه الموصلات الإلكترونية للتطبيقات الفعالة مثل الثنائيات العضوية الباعثة للضوء OLED وترانزستورات الأغشية الرقيقة (Thin Film Transistor- TFT) والخلايا الكهروضوئية العضوية والمفاتيح والمعدلات البصرية (optical switches and modulators). إن أشباه الموصلات العضوية لها تركيب إلكتروني ببعد واحد تقريباً، ويكون متباين الخواص إلى حد كبير وهذا يختلف جوهرياً عن تراكيب أشباه الموصلات التقليدية غير العضوية. وهذا يقود إلأن التركيب الخطي للسلسلة يؤدي إلى اقتران قوي بين المستويات الإلكترونية مطابق للتراكيب المثارة في نظام أحادي البعد، وأيضاً فإن ضعف الروابط البينية

نسبياً يسمح بانتشار جزيئات التشويب في الهيكل التركيبي (بين سلاسل)، في حين أن الترابط البيني القوي لأصرة كاربون-كاربون يحافظ على سلامة البوليمر. ويوضح الشكل (3-1) التركيب الكيميائي لبعض أشباه الموصلات العضوية.[43-45]



الشكل (3-1): التركيب الكيميائي لبعض أشباه الموصلات العضوية.

توفر البوليمرات القابلة للإذابة بديلاً مرغوباً في التطبيقات التي تستخدم أشباه موصلات في تصنيع أجهزة ترانزستور تأثير المجال العضوي بسبب فعالية التكلفة وتقنيات التصنيع السهلة. لقد مكنت هذه الإمكانيات وغيرها من دمج البوليمرات شبه الموصلة في تطبيقات الأجهزة الإلكترونية الحديثة مثل بطاقات التعريف الذكية (RFID) والثنائي الباعثة للضوء (OLED) التي تستخدم في شاشات العرض، والأعمال البحثية مستمرة لتحسين التحويلية الفعالة للترانزستور العضوية، حيث تقدر متطلبات التحويلية في التطبيقات الحديثة بحدود (5-10 cm²/Vs). في حين أن التحويلية باستخدام السليكون مهדרج البلورة يمكن أن تصل إلى (20-50 cm²/Vs). لذلك، من أجل التحول إلى شاشات مرنة، فإن الخصائص الميكانيكية للبوليمرات شبه الموصلة جعل منها أفضل مرشح لأن تكون بديلاً في اللوحات الإلكترونية المتكاملة.[46-47]

3-1- الإلكترونيات العضوية:

الإلكترونيات العضوية هي فرع من الإلكترونيات تقوم على استخدام المواد العضوية شبه الموصلة والموصلة كوسط فعال في تصنيع الأجهزة الإلكترونية وتدعى أيضا الإلكترونيات البلاستيكية، وتتصف بالمرونة والشفافية وخفة الوزن وكبر المساحة ورخص الكلفة. ان استخدام المواد العضوية لبناء الأجهزة الإلكترونية كان السبب في نمو عالمنا الإلكتروني، وقد كانت اغلب منتجاتها صديقة للبيئة وقليلة الاستهلاك للطاقة في التصنيع والتشغيل على حد سواء. وان الشكل (4-1) يوضح بطاقة التعريف بالترددات الراديوية RFID، إحدى التطبيقات المهمة للإلكترونيات العضوية وهي مصنوعة من المواد العضوية المرنة المطبوعة. [39, 48-49]

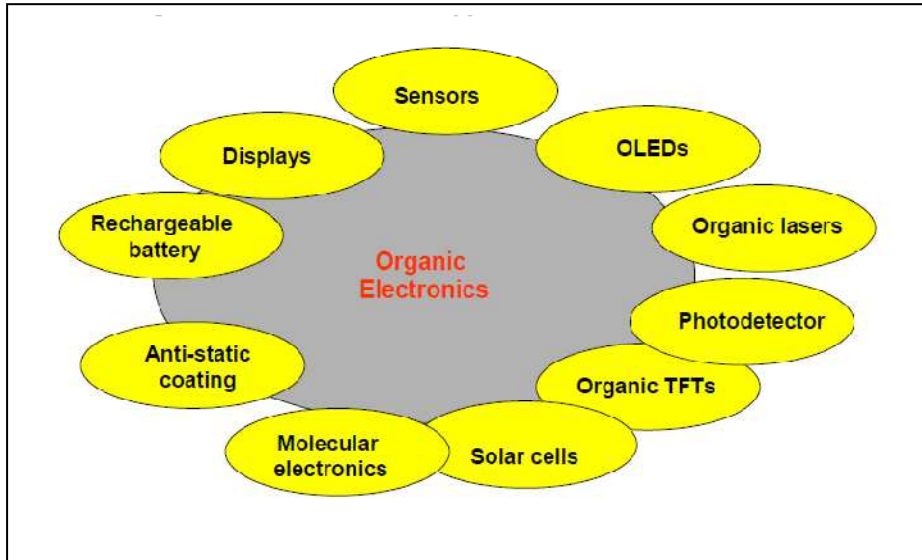


الشكل (4-1) توضح RFID إحدى تطبيقات الإلكترونيات العضوية المرنة. [48]

كانت الإلكترونيات العضوية محور عملٍ متنامٍ بفضل الاكتشاف في مجالات الفيزياء والكيمياء لأكثر من خمسين عاماً. منذ زمن قصير كانت الإلكترونيات العضوية والظواهر الضوئية ذات مجالات بحثية بحتة، تقتصر بعض الشيء الى التطبيق ذات الإنتاج التجاري. وكانت جاذبية هذا المجال في القدرة على تعديل التركيب الكيميائي بطرق يمكن أن تؤثر مباشرة في خصائص المواد وعملية ترسيبها بشكل طبقة رقيقة. إن العديد من الخصائص الإلكترونية للمواد العضوية والأجهزة المرتبطة بها هي متماثلة، والطرق المستخدمة لتصنيع الأجهزة العضوية وغير العضوية هي مختلفة إلى حد كبير. وان دخول المركبات العضوية كمواد فعالة في الأجهزة الإلكترونية والإلكترونيات الضوئية فتح الباب على مصراعيه أمام عدد كبير من الطرق الفعالة والكفاءة ومنخفضة الكلفة والطاقة في عملية التصنيع، وفي بعض الحالات، التراكيب المعقدة التي لا يمكن الوصول إليها بالطرق التقليدية باستخدام أشباه الموصلات التقليدية أمكن تحقيقها باستخدام المواد العضوية. فمثلاً، التقنيات المتاحة لتحضير وتشكيل المواد العضوية مثل الطلاء بالطرق المختلفة التي تمكن من تصنيع مساحات واسعة مقارنة بالطرق القديمة التي تصنع بها

الأجهزة غير العضوية. وهذا يفتح إمكانيات جديدة للتطبيقات والمنتجات خصوصاً ونحن نعيش في عالم الكتروني. يعتمد الأمن الاقتصادي والصحي والوطني على التكنولوجيا الإلكترونية ويتأثر بها إيجابياً. ومع ذلك فإن الموارد والطرق المستخدمة لتصنيع الأجهزة الإلكترونية تثير تساؤلات عاجلة حول الآثار البيئية السلبية لصنع الأجهزة الإلكترونية واستخدامها والتخلص منها. إن استخدام المواد العضوية لبناء الأجهزة الإلكترونية قد توفر بيئة صديقة لمائة نمو عالمنا الإلكتروني، وأن الجزيئات الصغيرة العضوية والبوليمرات وغيرها من المواد العضوية تجعل للبناء الإلكتروني خصائص فريدة من نوعها من المستحيل الحصول عليها باستخدام السيليكون وحده، وقد خلقت صفات جديدة لم تكن موجودة من قبل. [50-53]

إن التطبيقات المتعلقة بالإلكترونيات العضوية يمكن تقسيمها أساساً إلى مجالات مختلفة، على سبيل المثال الثنائيات العضوية الضوئية وترانزستورات تأثير المجال العضوي والخلايا الشمسية العضوية والمتحسسات وغيرها، على الرغم من انخفاض الكفاءة مقارنة مع أجهزة السيليكون، لكنها توفر مميزات منها إنها تؤدي إلى استخدام فعال من حيث التكلفة، الثنائي العضوي الباعث للضوء لديه حتى الآن أكبر تأثير في مجال الإلكترونيات العضوية. أجريت العديد من البحوث المكثفة على مدى العقود القليلة الماضية، وقد تمكنت هذه التجارب من دخول السوق العالمية حيث تعرض مختلف السلع والأجهزة، مثل الهاتف المحمول وشاشات العرض وغيرها. ويبين الشكل (5-1) مخططاً لاستخدام المواد الإلكترونية العضوية في مختلف التطبيقات. [54-55]



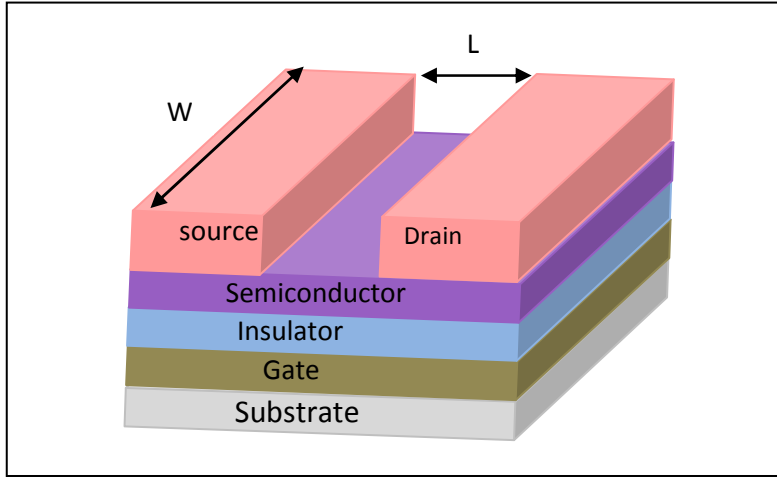
الشكل (5-1) يبين مخططاً لاستخدام الكترونييات المواد العضوية في مختلف التطبيقات.

1-4- ترانزستور تأثير المجال العضوي:**(Organic Field Effect Transistors-OFETs)**

ترانزستور الأغشية الرقيقة (Thin Film Transistors-TFTs) هو الجهاز الذي يستخدم المجال الكهربائي لتعديل التوصيل الكهربائي في قناة التوصيل التي تقع على السطح البيني بين الطبقة العازلة وطبقة شبه الموصل الرقيقتين. لذلك فهو ترانزستور تأثير المجال (FET) على غرار ترانزستورات تأثير المجال القائمة على أكسيد المعادن (MOSFET) المعروفة. إن تاريخ تطور كل من TFTs و MOSFETs متوازية في وقت واحد. ترانزستورات تأثير المجال العضوية (OFETs) هي ترانزستورات تأثير المجال التي تصنع فيها طبقة أشباه الموصلات من أشباه الموصلات العضوية. اليوم تصنع ترانزستورات الأغشية الرقيقة العضوية على قواعد مختلفة وحتى على المرنة منها. ويعد الترانزستورات اللبنة الأساسية لبناء الدوائر المتكاملة الحديثة، وتستخدم كأداة تضخيم أو مفتاح تبديل. إذ تدخل الترانزستورات في صناعة الكثير من الأجهزة مثل أجهزة الفيديو وشاشات العرض المرنة والشاشات الصغيرة على قواعد الزجاج التقليدية للهاتف المحمول وتطبيقات أخرى تنمو بسرعة كشاشات البلورات السائلة للعرض والبطاقات الذكية وبطاقات الذاكرة والنسيج الإلكتروني وغيرها. إن تكنولوجيا ترانزستور تأثير المجال العضوي يمكن أن تكون مثالية للبنية التحتية لهذه التطبيقات وتطبيقات أخرى بسبب التوافق الوثيق للمواد التي يصنع منها كل من OLED و OFET وخصائصها الميكانيكية الجيدة. إن تأثير المجال هي الظاهرة التي يتم فيها تغيير التوصيلية الكهربائية لأشباه الموصلات بتطبيق مجال كهربائي على سطحها، إذ يطبق المجال الكهربائي عبر بوابة معدنية في الجهاز.

تتكون ترانزستورات تأثير المجال من ثلاثة أقطاب هي المصدر (او المنبع) (Source-S) والمصرف (Drain-D) والبوابة (Gate-G)، فضلا عن طبقة من أشباه الموصلات وطبقة عازلة بين شبه الموصل والبوابة. الشكل (1-6) يوضح التركيب العام لترانزستور تأثير المجال. يعتبر ترانزستور تأثير المجال العضوي (OFET) تركيب ثنائي الأبعاد لكون الطبقات العازلة وشبه الموصلة تتشكل على صورة أغشية رقيقة ثنائية الأبعاد تقريبا، ويرجع ذلك إلى التركيب الخطي للعديد من المواد العضوية شبه الموصلة المستخدمة.

إضافة إلى استخدام أشباه موصلات عضوية ومادة عازلة عضوية يمكن استبدال جميع مكونات الترانزستور بالمواد العضوية. [56-58]



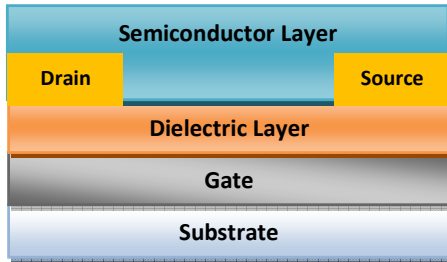
الشكل (6-1) يوضع التركيب العام لترانزستور تأثير المجال.

5-1-تركيب ترانزستور تأثير المجال: (OFET Structures)

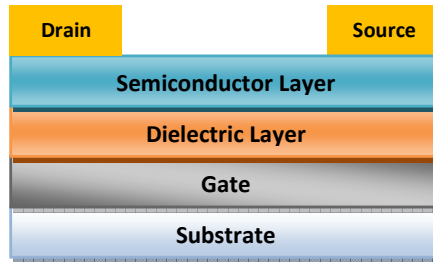
إن لترانزستور تأثير المجال العديد من التركيبات الهيكلية الممكنة والفعالة، وكل من هذه التركيبات له مميزات وعيوب. إذا كان موقع قطب البوابة في الأسفل، يسمى تركيب البوابة السفلى (BG, Bottom Gate)، وله تركيبان ضمنيان متعلقان بموقع أقطاب الاتصال (S, D)، عندما يكونان في أعلى التركيب يدعى ((Bottom Gate-Top Contact, (BG-TC)) وعندما يرسان بين الطبقة العازلة وشبه الموصل يدعى التركيب ((Bottom Gate-Bottom Contact, (BG-BC)) كما مبين في الشكل (7-1-A, B). في الواقع هذا التركيب غير مرغوب فيه في الدوائر المتكاملة ولكنه يحد من تيار التسرب إذ يمكن من العمل على الترانزستورات بشكل فردي، هذا النوع من التكوين هو مناسب خاصة لإنتاج أجهزة الاستشعار عن بعد المبنية على أساس المواد العضوية. قطب البوابة الأعلى هو التركيب الأفضل (TG, Top Gate) لأنه يسمح لدراسة أشباه الموصلات غير المستقرة في الهواء، وله تركيبان ضمنيان متعلقان بقطبي الاتصال (S, D)، عندما يكونان في أسفل التركيب (على القاعدة بصورة مباشرة) يدعى ((Top Gate- Bottom Contact, (TG-BC)) وعندما يرسان بين الطبقة العازلة وشبه الموصل يدعى التركيب ((Gate- Top Contact, (TG-TC)) كما مبين في الشكل (7-1-C, D). في هذه التركيبات الطبقة العازلة تغطي الطبقة الفعالة وتحميها من الأوكسجين والماء والمؤثرات الأخرى الموجودة في البيئة المحيطة، ومع ذلك في هذا التركيب تكون طريقة ترسيب العازل أمراً بالغ الأهمية، فإذا تم ترسيبه بإحدى طريق ترسيب المحاليل يجب أن لا يؤثر المذيب في طبقة شبه الموصل وهو ما يدعى تعامد المذيبات، وبما إن شبه الموصل هو الطبقة التي تحمل الشحنات لذا لا يجب أن تتلف بسبب ارتفاع درجات الحرارة خلال ترسيب الطبقة العازلة. [59-60]

بالنظر إلى الهشاشة الميكانيكية للجزيئات الصغيرة المرسبة عن طريق التبخير تحت الفراغ، هذا التركيب أكثر ملائمة وشيوعاً للبوليمرات شبه الموصلة. إن وضع الأقطاب بطريقة بحيث تكون تغطية غير كاملة للقناة التي يحددها أقطاب المصدر والمصرف ومقاومة موضع اتصال جهات الأقطاب هو أيضاً معامل يؤثر على طريقة الصنع ومن ثم في أداء OFET. على الرغم من أن بنية (BC) تقلل من تعقيد التصنيع، لكنها في الغالب تسبب انخفاض التمريرية لوجود المقاومة وقد لوحظت نتائج مهمة في هذا النوع من التركيب وانخفاض الأداء يمكن أن تجد له العديد من التفسيرات. السبب الرئيسي هو بسبب كسر في استمرارية غشاء أشباه الموصلات في السطح البيني مع القطب، والكثافة العالية للمصائد بسبب وجود دقائق صغيرة في هذا الموقع يفسر انخفاض التمريرية وعدم خطية التيار من المصدر- المصرف (I_{ds}) في جهد منخفض للفولتية V_{ds} . يمكن تعديل الحالة السطحية للطبقة العازلة باستخدام الطبقة الأحادية ذاتية التنظيم (Self Assumption Monolayer-SAMs) من البوليمرات التي يمكن أن تحل هذه المشكلة جزئياً وتحسن عملية ترسيب أشباه الموصلات إلى هذا السطح [61-63].

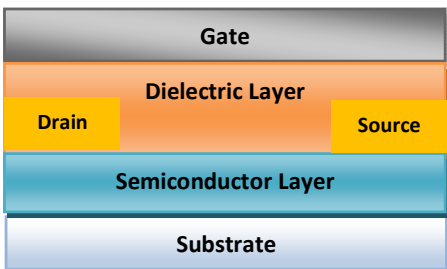
(A) BG-BC



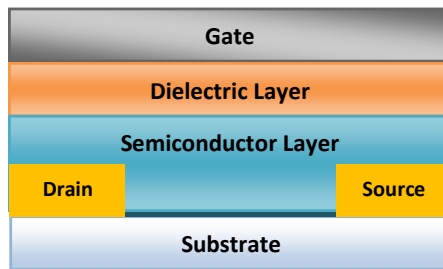
(B) BG-TC



(C) TG-TC



(D) TG-BC



الشكل (7-1): يوضح التراكيب الهيكلية المختلفة للـ OFET.

إضافة إلى ذلك، في التركيب BC يكون سطح الاتصال بين القطب وشبه الموصل هو أقل من سطح القطب وقد تكون هناك نقاط لعدم الاتصال بين شبه الموصل والقطب. على العكس من ذلك، في تكوين (TC)، فإن انتشار المعدن في شبه الموصل بالأبعاد النانوية قد يغير عملية حقن

الشحنة وان هذا الانتشار من الصعب السيطرة عليه، وان التركيبات TC توفر منطقة حقن أكبر. على الرغم من أن تركيب TC أكثر كفاءة على الأرجح بسبب الاتصال الكهربائي بين قطب-شبه موصل أفضل، فإنه يحد من دقة القناة. يتم تحسين الاتصالات باستخدام القناع المعدني والتبخير تحت الضغط المخلخل والتي لا يمكن أن تكون أبعاد القناة أقل من 30 ملم. في الأنواع الأربعة من التركيبات، نوعان منها يمكن أن تسمى بالتركيب متحد المستوي (المستوية) (Coplanar Structure)، وهي التركيبات التي يكون فيها قطبا S و D والقناة على الجانب نفسه من شبه الموصل وهي (TG-TC) و (BG-BC)، في المقابل يدعى النوعان الآخران بالتركيب المتحول (او المتداخل) (Staggered Structure) وتكون أقطاب التوصيل S و D والقناة تقع على جانبي طبقة أشباه الموصلات في هذه التركيبات، وفي هذه الحالة، يجب أن تعبر الشحنات سمك طبقة شبه الموصل بالكامل لكي يتعين جمعها أو ضخها، لذا يلاحظ تيار أضعف، فضلا عن ان جهد العتبة V_{th} أعلى مقارنة بالتركيب المستوية. [64-68]

6-1- مبدأ عمل ترانزستور تأثير المجال: (Operation Principle Of OFET)

إن كثافة حاملات الشحنة في أشباه الموصلات العضوية هي بطبيعة الحال منخفضة جداً بسبب فجوة الطاقة التي لا تسمح بالانتقال الحراري للشحنة في درجة حرارة الغرفة، وبالتالي فإن لها سلوك المواد العازلة. لذلك، في غياب الانحياز بين المصدر والبوابة V_{gs} ، أي ($V_{gs}=0$) يكون الجهاز في حالة الإطفاء، وانخفاض التوصيلية لأشباه الموصلات العضوية يسمح بمرور فقط I_{off} وهو تيار منخفض جداً، لا يكاد يذكر ويتم إهماله في الحالة المثالية. هذا التيار يحدث بسبب الشوائب الموجودة في تركيب الترانزستور المصنع. من ناحية أخرى، عند تطبيق جهد على قطب البوابة اكبر أو يساوي جهد العتبة V_{th} والذي يمثل الجهد اللازم لوضع الجهاز في حالة التشغيل، أي عند ($V_{gs} \geq V_{th}$) يكون الجهاز عند حالة التشغيل، تنجذب الشحنات إلى السطوح البينية (عازل-شبه الموصل) و(عازل-بوابة)، وبالتالي فإن القناة الموصلة تتشكل بين قطبي المصدر S والمصرف D عن طريق تجمع هذه الشحنات، ويرمز لطول القناة بالرمز L وهي المسافة بين قطبي المصدر والمصرف وعرضها W وهي المسافة المقابلة لعرض القطبين. بالنسبة إلى الترانزستور ذو القناة الموجبة (P-OFET)، حيث المادة الفعالة مؤكسدة (P-Type)، يجب تطبيق فولتية بوابة سالبة لتكون قادرة على إنشاء قناة التوصيل الموجبة عند السطح البيني بين أشباه الموصلات العضوية والعازل الكهربائي. في المقابل، في حالة الترانزستور ذي القناة السالبة (N-OFET) حيث يتم اختزال المادة (N-Type)، يتم تطبيق فولتية بوابة موجبة لإنشاء قناة توصيل سالبة. هناك العديد من المعاملات الضرورية لتوصيف أداء الترانزستور. منها التحركية لحاملات الشحنة وتدل على سرعة تحركها في السطح البيني عازل-شبه موصل تحت

تأثير المجال، والنسبة بين تيار التشغيل والإطفاء (I_{on}/I_{off})، ونصف تدفق الشحنة في اللحظة التي يكون فيها الترانزستور قيد التشغيل، وأيضا الحد الأدنى للتيار في حالة وصول الجهد المسلط إلى جهد العتبة، والتي تمثل الحد الأدنى لجهد البوابة التي يتم تطبيقها للحصول على تيار القناة I_{ds} بين المصدر والمصرف، ويجب أن تكون V_{th} منخفضة قدر الإمكان لأن إمكانية تشغيل الجهاز في جهد منخفض وثابت صفة مفضلة في التطبيقات الالكترونية. إن تحقيق هذين الشرطين يؤدي إلى انخفاض تكلفة تشغيل الترانزستور. وتتألف المواصفات الكهربائية للترانزستور من قياس تيار المصرف-المصدر (I_{ds}) كدالة لجهد المصدر-المصرف المطبق (V_{ds}) لمختلف قيم جهد المصدر-البوابة (V_{gs}). [69-72]

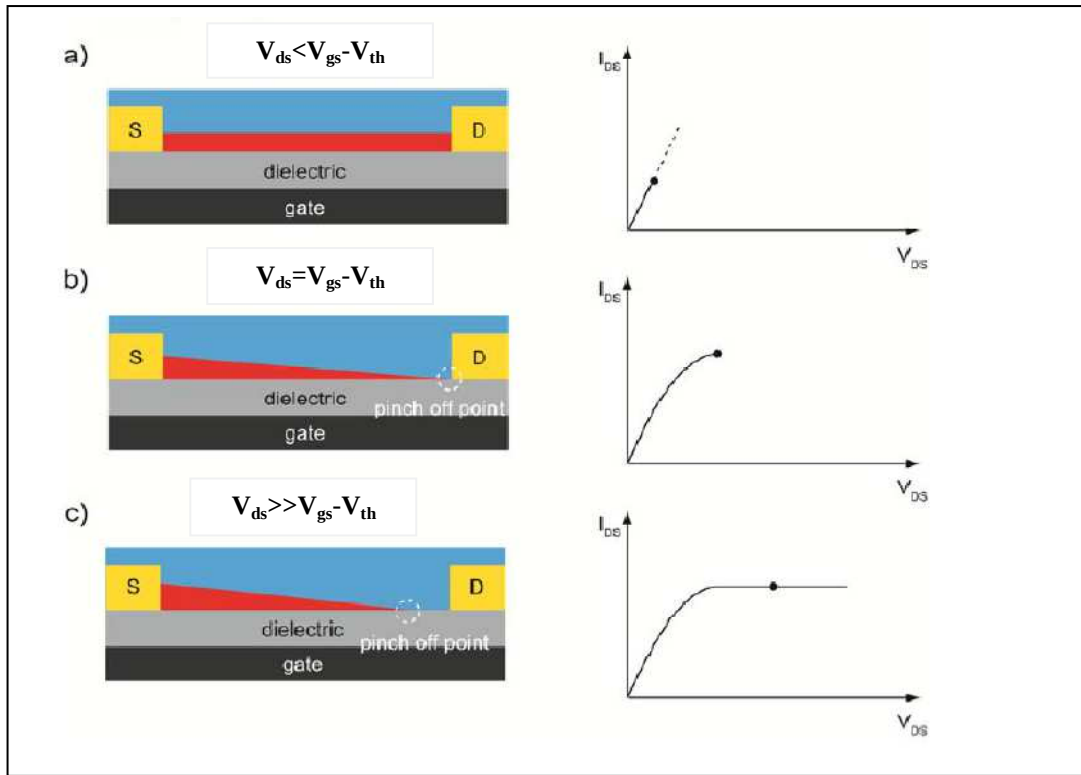
أنظمة التشغيل الأساسية لترانزستور تأثير المجال والمرتبطة بميزة ($I-V$) للنبيلة OFET هي الأقرب إلى التركيب الثنائي (معدن-عازل-شبه موصل) (MIS) مع عدم وجود فرق بالجهد بين المصدر والمصرف، مع تسليط الجهد V_{gs} على قطب البوابة، إذا كان جهد البوابة موجب فسوف يعمل على تجميع شحنات سالبة (الإلكترونات) في السطح البيني الفاصل (عازل-شبه موصل) والتي يتم حقنها من القطب المشترك (المصدر). عند تسليط جهد بوابة سالب، فإن الشحنة الموجبة (فجوات) سوف تتراكم في القناة. عدد الشحنات المتراكمة يتناسب مع جهد البوابة والسعة الكهربائية للمادة العازلة. مع ذلك، ليس كل الشحنات المحتثة تشارك بالتيار في ترانزستور تأثير المجال، فهناك مصائد عميقة يجب أن يتم ملؤها بالشحنات أولاً، بعدها يمكن أن يتكون التيار. وهذا يحدث عندما يرتفع جهد البوابة ليصل إلى جهد العتبة V_{th} ، وبالتالي جهد البوابة الفعال هو ($=V_{gs}-V_{th}$)، من ناحية أخرى فإن المستويات المانحة (القناة السالبة) أو القابلة (القناة الموجبة) والوصلة البينية يمكن أن تخلق ثنائيات قطب داخلية عند السطح البيني، وبالتالي تسبب تراكم الشحنات في القناة عندما ($V_{gs}=0$) بحيث في بعض حالات الجهد المعاكس يؤدي إلى تحويل القناة لحالة الإطفاء (turn-off). [73-74]

أنماط عمل ترانزستور تأثير المجال عندما ($V_{gs}>V_{th}$) هي بتأثير الفولتية بين المصدر والمصرف V_{ds} كما يلي:

- 1- عندما $V_{ds}=0$ يكون هناك كثافة شحنة متجمعة في القناة، وعند تسليط جهد بين المصدر والمصرف $V_{ds}<<V_{gs}$ يبدأ تيار I_{ds} بالنمو بشكل خطي يتناسب طردياً مع V_{ds} وتدعى هذه المنطقة بالخطية linear، كما في الشكل (8-1-a).
- 2- عند زيادة V_{ds} إلى القيمة ($V_{ds}=V_{gs}-V_{th}$) يصل الجهاز عند هذه النقطة التي تدعى قرصة (ضيق) القناة (Pinch-off point)، والمنطقة هي منطقة الاستنزاف لان ($V_{th}>V_{ds}-V_{gs}$)،

وتيار الإشباع المحدد بشحنات الفراغ يمر من المنطقة الضيقة قرب منطقة الاستنزاف الى المصرف، ينتج هذا التيار من شحنات منطقة القرصة بتأثير المجال الكهربائي المرتفع نسبياً في منطقة الاستنزاف، تبدأ عندها منطقة الإشباع، كما في الشكل (8-1-b).

3- عند زيادة V_{ds} إلى حد كبير ($V_{ds} \gg V_{gs} - V_{th}$) يؤدي إلى توسع منطقة الاستنزاف وبالتالي يقصر طول القناة، وبما أن الجهد نقطة القرصة لا تزال قائمة ($V_{ds} = V_{gs} - V_{th}$)، بالتالي انخفاض الجهد بين تلك النقطة وقطب المصدر يبقى تقريبا نفسه، ويستقر التيار بالقيمة عند مستوى الإشباع $I_{ds.sat}$ ، أي إن تيار القناة لا يعتمد على الجهد V_{ds} وتسمى هذه المنطقة بمنطقة الإشباع (Saturation) كما في الشكل (8-1-c). [73, 75-77]



الشكل (8-1): يبين أنماط عمل ترانزستور تأثير المجال. [77]

1-7-الدراسات السابقة:

إنّ التطور الجذري لعلوم المواد في العقدين الماضيين، كان بفضل التقدم في مجال التكنولوجيا النانوية الذي ساهم في صقل مواصفات المواد شبه الموصلة العضوية، إحدى هذه المواد هو البوليمر بولي هكساييل-ثايوفين (P3HT) وهو شبه موصل من النوع الموجب، والذي يصنف من بين المواد الأكثر دراسة لتصنيع الخلايا الشمسية والكواشف العضوية الضوئية، وهو بوليمر شبه موصل قابل للتحويل (ينوب في المذيبات)، وقابل للترسيب بتقنيات ترسيب المحاليل، كالطلاء بالبرم والصب والطباعة النافثة للحبر وغيرها، و P3HT يمكن أن يوفر طبقة فعالة في ترانزستورات الأغشية الرقيقة OTET. وفي نفس الوقت كعنصر قابل للاتصال المباشر مع المحاليل، حتى لو كانت في وسط مائي، والطبقة الفعالة في الترانزستورات القائمة على السيليكون لا تمثل الازدواجية السابقة [78-81]. هذه المواصفات دفعتنا لاختيار هذا البوليمر في هذه الدراسة باعتباره العنصر ذات التركيب الفعال الذي تقوم عليه دراستنا (إضافة الى البوليمر بولي فينايل الكحول PVA كمادة عازلة للبوابة) والمحاولة في تحسين خواص الترانزستور المصنع مختبرياً ضمن الإمكانيات المتاحة.

يتم بذل العديد من الجهود لتحسين أداء الأجهزة من خلال العمل على مستوى التركيب الجزيئي، والسطوح البينية بين مركبات الجهاز، وطرق الترسيب والمعالجة وغيرها، كلها عوامل تؤثر بشكل مباشر على المعاملات الرئيسية التي يعرف بها كل جهاز مثل تحركية حاملات الشحنة (μ)، وجهد العتبة (V_{th}) والنسبة (I_{on}/I_{off}) والهسترة (H) (hysteresis) [57,82-83]. نستعرض فيما يلي بعض الدراسات السابقة حول OFET والتي تقوم على أساس مؤثرات متنوعة في السلوك وبعض التطبيقات لهذه النبيطة:

1- صُنعت ترانزستور تأثير مجال عضوي من أغشية رقيقة في عام 1987م، وهو قائم على البوليمر بولي ثايوفين كطبقة فعالة باستخدام SiO_2 لعزل البوابة وكان يملك المعاملات ($\mu=2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) و ($V_{th}=-15 \text{ V}$) و ($I_{on}/I_{off}=10^2$) [84].

2- في عام 1988م تم دراسة تأثير الحرارة على أداء الترانزستور المصنع من البوليمر P3HT و SiO_2 كعازل بوابة، ووجدت الدراسة إن التحركية تقل من ($\mu=10^{-5}-10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) الى ($10^{-7} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) مع ازدياد درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة الى 50°C [85].

3- في عام 1994م تم دراسة استخدام العوازل العضوية CYTOP, PVA, PVC كعازل بوابة لأول مرة في تصنيع OFET مع البوليمر الفاسداسي ثاينيل، ووجدت الدراسة ان المعاملات

- الكهربائية هي ($\mu=1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $V_{th}=-0.8\text{V}$), ($\mu=2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $V_{th}=-1\text{V}$) ($\mu=4 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $V_{th}=-0.8\text{V}$)، على التوالي. [86]
- 4- في عام 2000م تم دراسة تأثير تعرض P3HT كطبقة فعالة تم ترسيبها بطريقة (Langmuir-Blodgett, LB) لثلاث أطوال موجية UV-VIS, X-RAY, IR، وبينت الدراسة إن التحركية على التوالي هي $2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [87].
- 5- في عام 2004م تم دراسة تأثير سمك طبقة البنتناسين على خواص الترانزستورات باستخدام عازل البوابة ثنائي الطبقة PVA,PVP وكانت النتائج كما في الجدول (1-1): [88]
- الجدول (1-1) يبين تأثير سمك طبقة البنتناسين على معاملات OFET.

t_{sc} (nm)	V_{th} (V)	μ (cm^2/Vs)	I_{on}/I_{off}
175	-1.55	2.6	1×10^3
250	-1.53	1.2	6×10^3
350	-1.45	1.2	5×10^3
400	-1.79	0.8	8×10^3

- 6- في عام 2004م تم دراسة تأثير نوع العازل وسرعة القياس (سرعة تدرج الفولتية) لترانزستور البنتناسين على الهسترة (Hysteresis) والتحركية للترانزستورات وكانت النتائج كما في الجدول (2-1): [89]

الجدول (2-1) يبين تأثير نوع المادة العازلة وسرعة القياس على معاملات OFET.

Gate dielectric	C_i (nF/cm ²)	Fast sweep		Slow sweep	
		μ (cm^2/Vs)	ΔHys (V)	μ (cm^2/Vs)	ΔHys (V)
CR-V	30.4	0.44 ± 0.03	1.6	0.53 ± 0.02	0.5
PS/CR-V	27.7	1.05 ± 0.04	0.5	1.13 ± 0.04	0.2

- 7- عام 2006م تم دراسة تأثير المعالجة الحرارية على ترانزستور P3HT، التحركية ازدادت الى ($\mu=0.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) بعد معالجتها حرارياً بعد التصنيع في 150°C ، تظهر زيادة في تأثير التحركية المجال لأن عملية المعالجة الحرارية تزيد من تبلور P3HT وتحسن الاتصال بين الأقطاب و P3HT والعازل. [90]

- 8- في عام 2006م تم دراسة السيطرة على جهد العتبة للترانزستورات المصنعة من البنتناسين والتي يمكن ضبطها من خلال المعالجة الكيميائية لطبقة البرلين المستخدم كعازل للبوابة،

وتبين أن المعالجة ببلازما الأكسجين يدخل المصائد في سطح شبه الموصل-عازل والتي تؤثر بقوة على أداء OFET، يتم تقديم نموذج لحساب تأثير شحنة المصائد المحتثة بشحنة ثابتة ($2 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$)، إذ تغير جهد العتبة بين $V(116) - (-17)$ والشحنات المتحركة ($1.1 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$) التي تزيد الموصلية السالبة الدخيلة. [91]

9- في عام 2007م تم دراسة خواص الترانزستورات P3HT/PMMA وأثبتت الدراسة أن P3HT يزيد من التوصيلية عندما يتعرض للهواء أو الأوكسجين. ودرس التغيير في التوصيلية للطبقات P3HT في درجات حرارة مختلفة في الهواء وإثبات أن الزيادة في التوصيلية للطبقات P3HT بعد التعرض الطويل للهواء و N_2 ، ويمكن إرجاعها إلى قيمتها الأصلية بعد تصلب شبه الموصل في 363°K بواسطة O_2 عند ضغط (39.99 Pa) لمدة نصف ساعة. [92]

10- في عام 2009م تم دراسة خواص الترانزستورات لثلاثيوليميرات بولي ثايوفينات شبه موصلة مع أغشية متشابكة رقيقة جداً متعددة العوازل للبوابة و PMMA وكذلك PVP وبسمك (30-50 nm) ولنسب مختلفة من أبعاد القناة بتيار تسرب ($10-100 \text{ nA/mm}^2$) وكانت النتائج كما مبين بالجدول (3-1): [93]

الجدول (3-1) يبين تغير معاملات OFET لثلاثة بولي ثايوفينات مختلفة.

Gate dielectric	L/W	Semiconducting polymer	$\mu_{\text{sat}}(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$V_{\text{th}}(\text{V})$
C-MMA	20 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	F8T2	0.005-0.001	0 to -2
	10 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	P3HT	0.008-0.015	1 to -2
	5 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	P3HT	0.007-0.01	0 to -3
	5 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	PBTtT	0.1-0.2	-1 to -4
C-PVP	20 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	F8T2	0.005-0.001	-1 to -2
	5 $\mu\text{m}/1\text{mm}$	F8T2		

11- في عام 2010م تم دراسة خواص ترانزستور P3HT/PVA بالتركيب TG-BC ودراسة تأثير توزيع السلاسل البوليميرية في الطبقة الفعالة بصورتين -موازي وعمودي- على القناة ومقارنتها مع التوزيع العشوائي للسلاسل. وكانت نتائج التوزيع الموازي هي الأفضل حيث امتلك الترانزستور المعاملات ($\mu = 6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) و ($V_{\text{th}} = -13\text{V}$) و ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}} = 10^5$). [94]

12- في عام 2010م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/PMMA مع أقطاب توصيل Pt، وبتركيب TG-BC، أظهرت النتائج تحركية عالية ($\mu=0.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) وبمقاومة توصيل واطئة ($20 \text{ K}\Omega/\text{cm}$). [95]

13- عام 2010م تم دراسة ترانزستور P3HT/PVA كجهاز واعد للاستشعار عن بعد للغازات والأيونات والجزيئات الحيوية. تم مناقشة عدم الاستقرار التشغيلي للبيئة والناجم عن حركة الأيونات الموجودة في بولي (3-هيكساي-ثيوفين) عندما (أ) الأيون موجود بالسطح بوابة-عازلة وهو يطبق على تركيب البوابة العليا TG و (ب) اضافة الأيونات عمداً إلى أشباه الموصلات العضوية في البوابة السفلى BG، والآليات الكامنة وراء تغير تيار القناة وأثبتت عدم الاستقرار للجهاز هو بسبب الأيونات الموجودة داخل العازل في OFET المرن المرسب بطريقة شفرة الطباعة على قواعد مرنة والذي يمكن من تحقيق أنظمة الاستشعار الذكية المنخفضة الكلفة [96].

14- عام 2011م تم دراسة تأثير إضافة طبقة أحادية (P(VDF-TrFE)) لترانزستور البنتاسين وأظهرت النتائج في الجدول (4-1) بالمقارنة مع عينة مرجعية [97]

الجدول (4-1) يبين تغير معاملات OFET بتأثير وجود طبقة أحادية.

Interface monolayer	$\mu_{\text{eff}} (\text{cm}^2/\text{Vs})$	$V_{\text{th}} (\text{V})$	SS (V.decade)	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$
No	9.85 ± 0.51	-2.1 ± 3.6	2.0	10^6
P(VDF-TrFE)	0.42 ± 0.12	6.6 ± 4.2	3.8	10^5

15- في عام 2011م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/SiO₂ المشوب بـ CNPs بنسب (0.1%, 1%, 10%) وكانت النتائج حسب الترتيب ($V_{\text{th}} = -9.5, -13, -15 \text{ V}$) و ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}} = 8.24 \times 10^4, 1.6 \times 10^4, 4.76 \times 10^4$) و ($\mu = 0.0016, 0.0017, 0.006 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). [98]

16- في عام 2011م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/SiO₂ المشوب بدقائق الكربون النانوية (حبر مطبوع) بنسب إضافة (0w%, 1w%, 5w%, 7w%, 10w%) ودراسة تأثير التشويب وكانت النتائج حسب الترتيب ($V_{\text{th}} = -11.1, -8.8, -8.1, -7.8, 3.6 \text{ V}$) و ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}} = 2.27 \times 10^6, 1.9 \times 10^5, 8.89 \times 10^4, 6.29 \times 10^4, 3.79 \times 10^2$) و ($\mu = 0.005, 0.0061, 0.0104, 0.0251 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). [99]

17- في عام 2011م تم مقارنة الخواص الكهربائية الترانزستور الهجين والترانزستورات P3HT/SiO₂ و Graphene/SiO₂. وجد أن ترانزستور P3HT يعطي نسبة $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ عالية وانخفاضاً بالتحركية، على العكس من ترانزستور الكرافين، أما الترانزستور من النوع الهجين

تزداد فيه التحركية بحدود عشرين ضعف بالمقارنة مع الترانزستورات المصنعة من أشباه الموصلات. [100]

18- في عام 2011م تم دراسة تأثير الطبقة العازلة بولي بروبيلين القابل للذوبان في الماء (البولي (1-فينيل-2،4،6-تريازول) (PVT) على نوعين متغايرين من الطبقة الفعالة، البنثاسينا الموجب والفلورين السالب، وأوضحت المواصفات أن تيار التسرب منخفض والانهيال عند الجهد العالي لكل من القناة n والقناة P العضوية على حد سواء للترانزستور مع عدم وجود الهسترة، عتبة الفولتية منخفضة جدا وارتفاع النسبة I_{on}/I_{off} . [101]

19- في عام 2013م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/SiO₂ وتأثير نوع المذيب والمعالجة الحرارية عليها، وأظهرت النتائج أن الكلوروبانزين DCB أعطى تحركية أعلى من الكلوروفورم CF وهسترة أقل خاصة بعد المعالجة الحرارية. [102]

20- في عام 2013م تم دراسة خواص الترانزستورات P3HT/SiO₂ و CNT/SiO₂ كأجهزة استشعار للصفة الحامضية PH باستخدام تركيب البوابة الالكتروليتية والبوابة الخلفية للجهاز الأول، وقد أظهرت جميع الترانزستورات نتائج جيدة في الاستشعار الحامضي وخاصة P3HT والتي يمكن ان ترسب على قواعد مرنة او سليكونية متعددة الاستخدام. [103]

21- في عام 2013م تم دراسة ترانزستورات هجينة للبوليمر (P3HT) التي تحتوي على نقاط كمية (QDs- CdSe). وبدراسة تأثير تركيز QDs على نقل الشحنة في المواد الهجينة، وعلى معاملات نقل الشحنة عن طريق استبدال ثلاثي أكسيد تيل-فوسفين التقليدي (TOPO) السطحي والبيريدين لتوفير اتصال مباشر بين المكونات العضوية وغير العضوية. التحركية ارتفعت بوجود الخليط P3HT:QDs لتصل إلى $(1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs})$. وان التغطية بطبقة TOPO انخفضت حركة الناقلات في حين لم تتغير بشكل كبير باستخدام البيريدين [104].

22- في عام 2014م تم دراسة خواص ترانزستور P3HT/PVA ودراسة تأثير تركيز العازل (0.7%, 0.8%, 0.9%, 0.10%) على خشونة السطح والتحركية. وأوضحت نتائج التحركية كالاتي $(0.016, 0.31, 0.17, 0.035) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ والخشونة (2.24, 1.42, 1.6, 1.97) nm على التوالي. [105]

23- في عام 2014م تم دراسة خواص ترانزستور P3HT/PVA ودراسة تأثير الوزن الجزيئي للعازل (ثابت العزل) ومذيب العازل (DI-water, DMSO) وكانت النتائج $(I_{on}/I_{off}=2, 5)$ على التوالي بالنسبة للمذيب والهسترة أقل في حالة المذيب الأول. و $(I_{on}/I_{off}=180, 50)$ بزيادة الوزن الجزيئي والهسترة أقل بزيادة الوزن الجزيئي. [106]

24- في عام 2014م تم دراسة الخواص الكهربائية لترانزستورات P3HT/SiO₂ عند تصنيع أسلاك نانوية من P3HT ومقارنتها بترانزستور الأغشية الرقيقة من P3HT، بعد تجربة عدة

مذيبات لهذه العملية كان المذيب الأفضل هو ثنائي-كلوروبانزين وكانت نتائج الترانزستور الأول ($V_{th} = -13V$) و ($I_{on}/I_{off} = 10^4$) و ($\mu = 0.06 \text{ cm}^2/Vs$) أما في حالة الأغشية الرقيقة ($V_{th} = -3V$) و ($I_{on}/I_{off} = 10^2$) و ($\mu = 0.01 \text{ cm}^2/Vs$). [107]

25- عام 2015م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/PVA المصنع على قاعدة مرنة من بولي اثلين ترفتاليت PET، ودراسة تأثير التراكيب (BC، TC) وطريقة الترسيب (طريقة الطلاء بالبرم، طريقة الطلاء بالصب) على خواصه الكهربائية. وكانت نتائج التحركية (2×10^{-2} , 4×10^{-4}) cm^2/Vs و ($V_{th} = -13, -2$)V للطريقة على التوالي بالتركيب الأول. أما التركيب الثاني فالتحركية ($7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/Vs$) وجهد العتبة ($-5V$) والمقاومة بين الأقطاب والطبقة الفعالة اكبر في التركيب الثاني. [108]

26- في عام 2015م تم دراسة خواص ترانزستور P3HT/PVA كجهاز خزن للذاكرة ودراسة تأثير النسبة بين أبعاد القناة (W/L) على أداء النبيلة، وأظهرت النتائج انها تعمل دون 5V وان مقدار الهسترة يعتمد على النسبة بين أبعاد القناة، ومن ناحية الذاكرة فالنسبة الأصغر من الأبعاد تحتفظ بذاكرة اكبر. [109]

27- في عام 2015م تم دراسة خواص ترانزستورات تأثير المجال باستخدام خليط شبه موصل/عازل في تشكيل القناة [(P3HT-PS)/SiO₂] وتبين أن الهسترة وجهد العتبة يمكن ضبطها بسهولة من خلال تطبيق انحياز البوابة عند المعالجة الحرارية 130°C وذلك بسبب حقن الشحنة حرارياً من P3HT إلى مصفوفة البولي ستايرين (PS). [110]

28- في عام 2015م تم دراسة الهسترة في ترانزستورات البنثاسين و PVA كأجهزة ذاكرة عضوية. وقد وجد أن توجيه مجاميع الهيدروكسيل في عازل البوابة PVA ترتبط مع هسترة خصائص النقل في ترانزستور البنثاسين وتوجيه مجاميع الهيدروكسيل عمودي على القاعدة، وان الهسترة تحدث بسبب ثنائيات القطب السطحية التي يسببها في السطح البيني كمصائد شحنة. معالجة PVA بالمذيبات اللامائية يزيل الرطوبة المتبقية في طبقة العزل، مما يسمح لسيطرة أكثر فعالية على ثنائيات القطب الناجمة عن طريق انحياز البوابة لتقلل V_{th} بقيمة 35.7 V بين السطح المعالج والسطح غير المعالج. [111]

29- في عام 2015م تم دراسة تأثير نوع العازل (PVA, PMMA) ونوع معدن القطب المستخدم (Al, Cu) وعرض القناة على صفات ترانزستورات P3HT. عند استخدام اقطاب Al كانت النتائج باستخدام PVA و ($W=5\text{mm}$) كالآتي ($V_{th} = -9.9V$) و ($I_{on}/I_{off} = 1.1785$) و ($\mu = 4.802 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/Vs$)، وعند استخدام العازل PMMA وعرض القناة ($W=4\text{mm}$) كانت المعاملات ($V_{th} = -4.43V$) و ($I_{on}/I_{off} = 6.648$)

و($\mu=2.297 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) وبثبيت ($W=5\text{mm}$) للعازل PVA وتغيير نوع الأقطاب الى Cu و($W=5\text{mm}$) كانت ($V_{th} = -86.435\text{V}$) و ($I_{on}/I_{off} = 1.3647$) و($\mu=4.5167 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) [112].

30- في عام 2015م تم دراسة خواص الترانزستورات P3HT/cr-PVA وتأثير تشويب المادة العازلة PVA بفيتامين C عليها, وكانت النتائج كما في الجدول (5-1): [113]

الجدول (5-1) يبين تغير معاملات OFET بتأثير وجود طبقة أحادية.

Sample	C_i (nF/cm ²)	μ (cm ² /Vs)	V_{th} (V)	I_{on}/I_{off}	SS (V/decade)
cr-PVA/rr-P3HT	17.81	0.09±0.04	-1.78	61	-1.08
cr-PVA;VC/rr-P3HT	19.19	0.37±0.03	-1.96	539	-0.76

31- عام 2016م تم دراسة خواص الترانزستور P3HT/SiO₂ دراسة تأثير استخدام طرق مختلفة لتشكيل الطبقة الفعالة، وأثبتت النتائج إن التحركية تزداد بأكثر من مرتبة، من ($1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) الى ($3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) بين عمليتي التبخير السريع والبطيء للمذيب وتكون الأسلاك النانوية في الطبقة الفعالة حسب الترتيب، فيما بقيت ($I_{on}/I_{off}=10^4$). [114]

32- في عام 2016م تم دراسة خواص الترانزستورات موجب القناة (البنتاسين) وسالب القناة (PTCDI-C8) ومواد عازلة متعددة الطبقات من PMMA, PVA, PVP وكانت النتائج للترانزستور الموجب القناة كما في الجدول (6-1): [115]

الجدول (6-1) يبين تغير معاملات P-OFET بتغيير تركيب الطبقة العازلة.

Dielectric Layer	μ (cm ² /Vs)	V_{th} (V)	I_{on}/I_{off}	SS(V/decade)
PMMA	0.17±0.005	-16±4	2.4×10^3	5±0.2
PMMA/PVP/PMMA	0.45±0.2	-10±2	1.1×10^4	3.8±0.2
PMMA/PVA/PMMA	0.51±0.15	-2±0.5	3.5×10^5	1.5±0.2

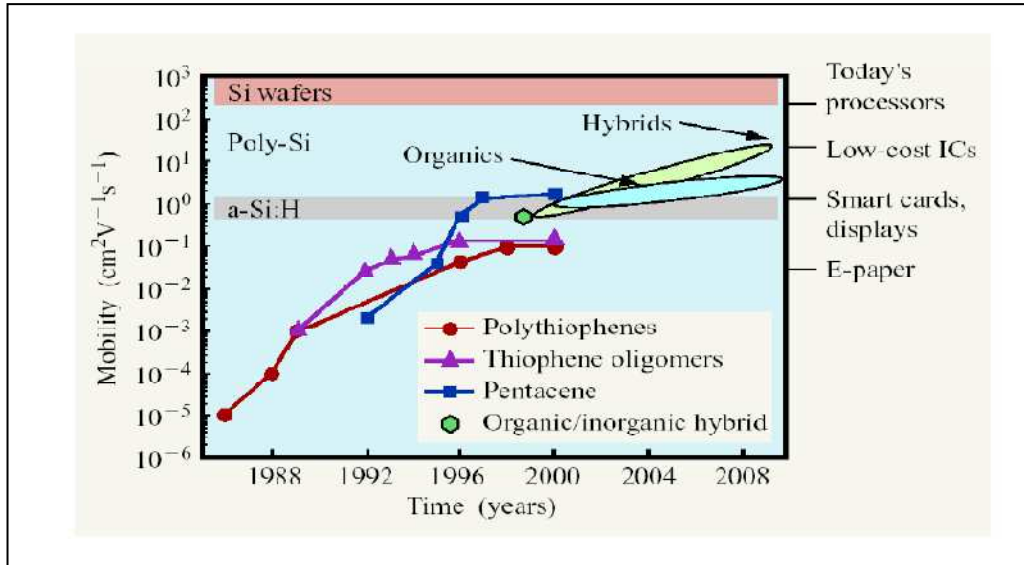
ونتايج الترانزستور السالب القناة مبينة في الجدول (7-1):

الجدول (7-1) يبين تغير معاملات N-OFET بتغيير تركيب الطبقة العازلة.

Dielectric Layer	μ (cm ² /Vs)	V _{th} (V)	I _{on} /I _{off}	SS (V/decade)
PMMA	0.03±0.01	25±5	5×10 ²	6±0.2
PMMA/PVP/PMMA	0.11±0.02	18±4	2.1×10 ³	5±0.2
PMMA/PVA/PMMA	0.43±0.11	10±2	2.1×10 ⁴	4±0.2

33- في عام 2017م أثبتت دراسة تحسن التكرية باستخدام البوليمر CR-PVA كعازل بوابة، وطريقة (floating film transfer method FTM) لترانزستورات [non-regioregular (NR-P3HT)] وبقيمة تفوق التي استحصل عليها باستخدام طريقة الطلاء بالبرمبمربتبتين وهي (3.4×10⁻³ cm²/Vs). اما عند تطبيق طريقة FTM لترسيب Defect Free-P3HT لتصنيع OFET تم تحقيق تكرية بقيمة (8 cm²/V.s)، والتي هي الأعلى من أي وقت مضى لبنائات P3HT-FETs [116].

تنتج الكثير من الدراسات الحديثة الى اعتماد عملية التشويب لبوليمرات الأغشية الرقيقة من البوليمرات شبه الموصلة للتحكم في صفاتها الكهربائية.⁽¹¹⁶⁾ ويوضح الشكل (9-1) مسيرة تحسين واحدة من أهم المعاملات لترانزستورات الاغشية الرقيقة العضوية وهي التكرية خلال فترة العمل على تحسين الاداء لهذه النبيطة. [117]



الشكل (9-1): تحسين التكرية خمسة مراتب خلال خمسة عشر عام. [36, 118]

وصلت التكرية في ترانزستورات P3HT-OFET الى (2.8 cm²/Vs) عام 2016، اما 2017 فقد وصلت الى (8cm²/Vs). [116,119].

8-1- الخطوط العامة لتنظيم الاطروحة:

انصب الاهتمام في هذه الدراسة على ترانزستورات تأثير المجال العضوي كونه مرغوباً أكثر في التطبيقات الالكترونية لما يملكه من مميزات كخفة الوزن ورخص الكلفة التصنيعية وسهولة التصنيع وغيرها، ولكن ضعف أدائه مقارنة بالترانزستورات المحضرة من أشباه الموصلات غير العضوية والذي يمكن السيطرة والتغلب عليه من خلال عمليات تحسين غير مكلفة وبسيطة، مثل عملية استخدام الشوائب لغرض تحسين التحركية والمعاملات الأخرى، إضافة العمل عند الفولتيات المنخفضة واستقرارية التيار وزمن البقاء (Life Time).

تنقسم هذه الدراسة إلى ستة فصول، ويخصص الفصل الأول لعرض بعض المفاهيم الأساسية عن أشباه الموصلات العضوية والالكترونيات العضوية والترانزستورات العضوية إضافة الى عرض لنتائج بعض الدراسات السابقة. في الفصل الثاني، سوف نناقش أساليب تشغيل OFET و MIS ومميزات وتأثير أجزاء التركيب، وعرض الأساس النظري للعمل وكذلك المعاملات الضرورية لفهم مواصفات هذه النماذج، ومناقشة التحديات الكامنة في التصميم والتصنيع. وسيتم وصف المستلزمات الضرورية المصنعة محليا والمواد الكيميائية وطرق التصنيع والمعالجة لنماذج الدراسة، ووسائل استحصال النتائج وطرائقها والمراحل التي تم تنفيذها على نماذج العمل لتطوير أجهزتنا المصنعة في الفصل الثالث. الفصل الرابع سوف يقدم عرض لنتائج دراسة الخصائص الكهربائية العامة وتأثير بعض المتغيرات عليها، كدراسة سعة متسعة المادة العازلة MIM مع تغيير نسبة المضاف CNPs وتغيير سمك الغشاء ودرجة الحرارة، والتي تعد مهمة لإيجاد المعاملات الخاصة بجهاز OFET الذي سيصنع منها فيما بعد. أيضا سيتعرض هذا الفصل دراسة الثنائي MIS المصنع من المواد المختارة من خلال نتائج دراسة مميزة C-V له.

يعرض الفصل الخامس مناقشة النتائج المستحصلة الخاصة بترانزستورات تأثير المجال المصنعة كمميزة الخرج ومميزة التحويل والمعاملات المهمة لتعريف مواصفاته وكيفية تغير هذه المواصفات بتغيير المتغيرات التصميمية والتصنيعية وعمليات المعالجة المرافقة لها، واثار التشويب بدقائق الكربون النانوية لكل من المادة العازلة والمادة شبه الموصلة على انفراد بواقع خمس نسب حجمية، وأيضاً تشويب المادتين بالنسب نفسها من المضاف في آن واحد.

وسيتم في الفصل السادس عرض الاستنتاجات بشأن النتائج وآثار إضافة CNPs للبوليمرات PVA و P3HT من خلال نتائج قياسات MIS و MIM المصنعة منهما، وكذلك النتائج المستحصلة من قياس OFETs والمعاملات المهمة المحسوبة منها مثل التحركية وفولتية العتبة

وغيرها، وإدراج الاستنتاجات عن هذه النتائج وأسبابها، وعرض الأفكار المقترحة لإكمال مسيرة تحسين OFETs وتطويره من خلال التحكم بعمليات التصميم والتصنيع والمعالجة والقياس.

9-1- الهدف من الدراسة:

إن أغلب الباحثين يستخدمون أدوات وأجهزة تجريبية جاهزة مصنعة في شركات متخصصة ومعروفة، فعلى سبيل المثال إنهم يستخدمون الأقنعة الشبكية المايكروية لغرض تصنيع أقطاب المصدر والمصرف والبوابة في عملية تصنيع الترانزستورات المختلفة. إلا أننا ارتأينا في هذه الدراسة تصميم وتصنيع جميع هذه الأدوات مختبرياً، إضافة إلى تصميم دوائر القياس الخاصة بالترانزستور ونبیطة معدن-عازل-شبه موصل لأول مرة في قسمنا.

في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة أولاً إلى تصميم المستلزمات الضرورية وتصنيعها محلياً (مختبرياً) لتصنيع نبیطة ترانزستور تأثير المجال العضوي OFET ونبیطة MIS -كونها دراسة تمثل مضماراً بحثياً جديداً محلياً-، بالإضافة إلى بناء الدائرة الخاصة بقياس خواصها الكهربائية، وذلك بعد دراسة الخصائص الكهربائية العامة والضرورية للمواد العازلة المتمثلة بالبوليمر بولي فينيل الكحول PVA، والمادة شبه الموصلة بولي هكسا-ثايوفين P3HT والتي تم اختيارها لانجاز هذا العمل، يتم العمل على تعديل وتحسين المواصفات العامة لهذه النبائط من خلال استخدام تقنية التشويب بمادة نانوية متمثلة بدقائق الكربون النانوية Carbon Nanoparticles. تعتمد الدراسة أيضاً على استخدام مواصفات تصنيع مختلفة مثل تغيير سمك الأغشية الرقيقة للعازل وشبه الموصل وتغيير نسب المضاف CNPs لكل من المادتين على انفراد وبصورة مشتركة إضافة إلى التحكم بأبعاد القناة الموصلة وتأثيرها في الحصول على مميزات خرج وتحويل جيدة والتحكم بفولتية التشغيل والحد من تيار التسريب وغيرها.

تشخص أفضل النتائج المميزة لكل ترانزستور بعد التحكم بطول القناة وسمك الأغشية الرقيقة المكونة للنبیطة والمتمثلة بالطبقة شبه الموصلة والطبقة العازلة، ومن ثم يتم اعتماده في المرحلة اللاحقة بهدف تحسين مواصفاته أكثر.

الفصل الثاني

الأساس النظري

الأساس النظري

1.2- تقنية التشويب:

لا يكاد يوجد بوليمر مترافق بصورة نقية تماماً، ويعود ذلك غالباً إلى وجود بعض الشوائب المتبقية في المادة والناجمة عن عملية البلمرة. لذا فإن مستوى طاقة فيرمي للبوليمر ليست خاصية جوهرية للبوليمر ولكنها تعتمد على كمية الشوائب الموجودة. فعادة ما يكون هنالك تركيز صغير من الشوائب الموجبة في المادة، والتي تنقل طاقة فيرمي إلى الأسفل مقارنة بالبوليمر الأصلي. [120] الشوائب في أشباه الموصلات العضوية خلال عملية التركيب المعقدة أو العيوب في التركيب الجزيئي نفسه يمكن أن يؤدي بشدة إلى سوء أداء تأثير المجال من خلال تشكيل كمية كبيرة من مواقع مصائد الشحنة في الطبقة الفعالة أو تؤثر كمود تشويب للمادة شبه الموصلة. وهناك طريقتان تستخدمان للحصول على مواد عالية النقاوة هي: (i) تبسيط الطرق التركيبية للمواد، وتحسين تتابع التركيب الصناعي والبدء بمواد نقية، (ii) تنقية المنتجات عدة مرات ولها عدة طرق، مثل التقطير أو الإذابة بمذيب مناسب يتبعه ترسيب أو فلترة الشوائب غير الذائبة لتنقية البوليمرات وغيرها، بالإضافة إلى حفظها في أماكن خالية من الملوثات مثل الضوء والغبار والرطوبة وغيرها. إن التشويب لأشباه الموصلات اللاعضوية أدى إلى نقلة كبيرة في الخواص وأنواع التطبيقات المصنعة منها. عند مقارنة تطور الإلكترونيات العضوية مع الإلكترونيات السليكونية الكلاسيكية، نلاحظ التأثير المدهش للتشويب، وهي إضافة الشوائب لتعديل مستوى فيرمي ورفع التوصيلية للمواد، والتي تم تجاهلها تماماً بداية في المواد العضوية. وعادة ما تمتلك المواد العضوية تراكيز شوائب عالية إلى حد ما، ولها فجوة طاقة أكبر من 2 eV، مما جعلها غير مرغوبة بشدة، وأن مستوى فيرمي للمواد النقية يقع في وسط هذه الفجوة. [121-123]

على الرغم من أن التشويب يعد من أرخص وأبسط الطرق للتحكم والتعديل لخواص المواد البوليمرية. إلا أن عدد قليل من الدراسات في المراحل الأولى للإلكترونيات العضوية تشير إلى تشويب المواد العضوية، مثل استخدام الغازات المؤكسدة كبخار البروم أو اليود لتشويب الفثالو-سيانين (phthalocyanines). على الرغم من أن هذه العملية لها تأثير التشويب، إلا أن الأغشية المصنعة غير مستقرة. ولكن عند تشويب هذه المواد بجزيئات عضوية قابلة مثل ortho-chloranil أو tetracyano-quinodimethane أو dicyano-dichloro-quinone تم الحصول على نتائج ذات كفاءة عالية وأكثر استقراراً بالمقارنة مع العينات النقية. أصبحت أهمية التشويب واضحة في زيادة استقرار وكفاءة الخلية الشمسية وكذلك في أداء الثنائي الباعث للضوء OLED، حيث إن إضافة التشويب للطبقة الفعالة أدى إلى انخفاض كبير في فولتية التشغيل. وقد تم تطوير هذه التقنية على نطاق واسع وصقلها، حيث تستخدم اليوم أكثر الأجهزة

كفاءة باستخدام تقنية التشويب. أن الآثار الرئيسية التي جعلت التشويب ناجح في الأجهزة العضوية هما اثنان، أولهما: إن طبقات التشويب لها توصيلية أعلى بكثير، الأمر الذي يقلل من الخسائر الاومية الحجمية ويسمح بمرور تيار اكبر في الطبقات الأكبر سمكا، وهو مهم للتحسين البصري وتجنب اختصار المسارات. والثاني: إن طبقات التشويب تخلق طبقات رقيقة من شحنة الفراغ عند أقطاب التوصيل، مما يسمح باتصال فعال حتى في حالة حواجز الجهد الإلكترونية بسبب عدم تطابق دالة الشغل. ولقد أظهرت الدراسات أن استخدام تقنية التشويب أدت الى تحسين أداء الترانزستورات العضوية على مستوى الطبقة الفعالة او الطبقة العازلة لقطب البوابة. ويمكن استخدامها بشكل مفيد لضبط خصائص ترانزستورات الأغشية الرقيقة العضوية وزيادة استقرارها. [124-129]

2.2-آليات التشويب في المواد العضوية:

هناك آليتين رئيسيتين للتشويب في المواد العضوية هما:

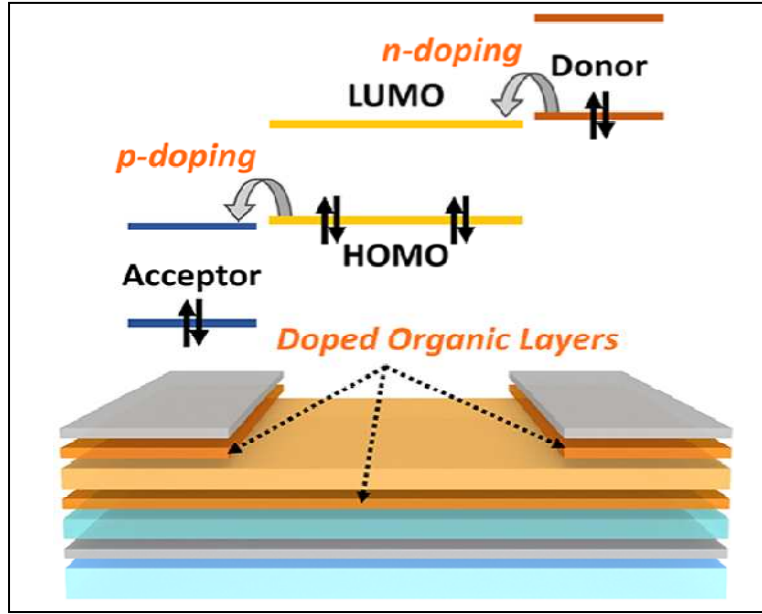
1.2.2- آلية التشويب الفيزيائي:

ان عملية التشويب العضوية مشابهة الى حد كبير الى التشويب في أشباه الموصلات غير العضوية في العديد من الجوانب. إذ يتم إضافة المادة المشوبة إلى المادة المستضيفة، والتي إما تتبرع بالإلكترون إلى المضيف (n-doping) وإما تقبل الإلكترون من المضيف، وتترك وراءه فجوة (p-doping)، ويوضح الشكل (1-2) آلية تأثير الشويب على الخواص الفيزيائية للمواد العضوية. ويمكن تشويب الأغشية العضوية المحضرة بثلاث طرق رئيسية وهي:

(a) الطريقة الصلبة وتتم عن طريق تبخير المادة المستضيفة والمادة الشائبة وتتم العملية تحت ضغط مخلخل او الترسيب بطريقة الليزر النبضي (Pulsed Laser Deposition-PLD) وغيرها.

(b) الطريقة السائلة وتتم عن طريق الخلط البوليمرية او إضافة محددة من الشوائب الى محلول أشباه الموصلات المضيضة وتصنيع الغشاء بطرق تصنيع المحاليل، مثل الطلاء بالبرم.

(c) الطريقة الغازية وهي تعريض الأغشية شبه الموصلة أو البلورة إلى غاز او بخار المادة الشائبة. وقد تتم عملية التشويب بشكل خلط بوليمرية أو إضافة طبقة شائبة.



الشكل (1-2) تأثير آلية الشويب على الخصائص الفيزيائية للمواد العضوية. [130]

2.2.2- آلية التشويب الكيميائي:

يمكن تصنيف المواد الشائبة الموجبة إلى عدة مجاميع تتضمن الجزيئات الصغيرة والمحاليق الالكتروليتيّة البوليمرية (polyelectrolytes) والمواد الصلبة التساهمية وأحماض برونستد-لوري (Bronsted Lowry acid) والعناصر الأولية (Elemental species).

إن انخفاض طاقات التأين لمواد التشويب السالبة العالية الاختزال، والجذور الأيونية المضيفة تجعل منها غير مستقرة بالهواء. لذلك فإن الكثير من العمل على تطوير مواد تشويب سالبة جديدة قد ركزت على تعزيز الاستقرار في الهواء إما كمعالجة للمادة الشائبة أو مستوى نقل الشحنات الشائبة. لقد ظهرت عدة أنواع من مواد التشويب السالبة، بما في ذلك التشويب بالعناصر الأولية والمواد الصلبة غير العضوية والجزيئات المانحة ذات طاقات التأين المنخفضة، والأملاح العضوية، والشوائب الأنيونية وجزيئات الهيدريد المانحة والدايمرات (dimers).

3.2- التنشيط الحراري للتشويب العضوي:

إن عملية التشويب بشكل بديهي هي عملية نقل عدد صحيح من الإلكترونات من المضيف إلى الشائب (p-doping)، أو من الشائب إلى المضيف (n-doping). ولجعل هذا الانتقال فعالاً، يجب أن تتجاوز الألفة الإلكترونية (electron affinity) للشائب جهد التأين للمضيف في حالة (p-doping)، أو يجب أن يكون جهد التأين للشائب أصغر من الألفة الإلكترونية للمضيف في حالة (n-doping)، يجب أن يلاحظ أنه يجب قياس الألفة الإلكترونية وجهد التأين في الحالة الصلبة، والتي عادة ما تكون أصغر من مستويات الطاقة في الحالة الغازية. وقد يكون انتقال

الإلكترون بين المادتين المستضيئة والشائبة غير تلقائي، أي أن الإلكترون يحتاج الى طاقة إضافية للانتقال. إن بعض الالكترونات يمكن إثارتها حراريا من HOMO من المصفوفة الى المستوي غير المترابط للمادة الهجينة، تاركا خلفه فجوة. [123, 130-132]

لا يزال هناك نقص في الفهم الشامل لبعض العمليات الأساسية في المواد العضوية المترافقة، مثل طبيعة نقل الشحنة والتوصيل الكهربائي المرتبط بالأكسدة والاختزال (التشويب) للمركبات الجزيئية العضوية. تطبيقا ان تحقيق الدوائر المطبوعة بالكامل يتطلب طبقات عضوية عالية التوصيل يمكن تصنيعها بطرق ترسيب المحاليل، يمكن أن تكون حتى بمثابة أسلاك موصلة. إن تصنيع الأغشية البوليمرية عالية التوصيل والخالية من الماء من خلال التشويب المقصود بالجزئيات والمركبات العضوية للبوليمرات المترافقة أمر واعد في تحسين الأداء والاستقرارية. كان من الملائم مزج الأنظمة المانحة والقابلة للإلكترونات والقابلة للذوبان، والذي يمكن أن يؤدي الى الإثارة في الحالة الأرضية وزيادة التوصيلية الكهربائية بشكل كبيرة مقارنة بالمواد النقية. في الآونة الأخيرة، أمكن الوصول الى التوصيلية العالية (1 S/cm) في الأغشية الرقيقة عند أكسدة (p-type doping) البوليمر (P3HT) في محلول القابل القوي (Tetrafluoro-tetracyano quinodimethane-F4TCNQ) والتشويب عملية فعالة لزيادة التوصيلية والحقن عبر السيطرة على حواجز الجهد. وهناك الكثير من الشوائب العضوية وغير العضوية لزيادة كثافة الشحنة وتحسين التمريرية. اذ تتم ضبط عملية حقن الفجوة والإلكترون عن طريق تعديل المعادن باستخدام طبقة التجميع الذاتي الاحادية (SAMs) التي توضع بين المعدن والطبقة شبه الموصلة، أو تشويب المادة شبه الموصلة بطريقة فعالة. وتساعد عملية التشويب في زيادة التوصيلية للبوليمرات وتحسين عملية حقن الشحنة وبالتالي يتم استخدام التشويب لتحسين أداء أجهزة الأغشية الرقيقة. اذ تم زيادة التمريرية ثلاثون ضعفا لنبيطة مصنعة من P3HT المشوب بنسبة 2% فقط مقارنة بتمريرية نبيطة P3HT النقي. [131, 133-138]

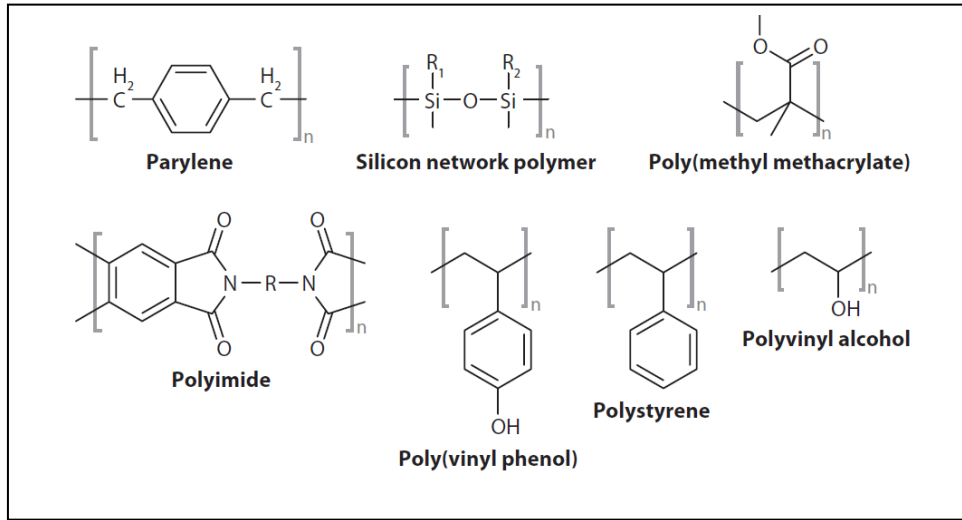
4.2- المواد العازلة البوليمرية: Dielectric Polymers

يتمثل الدور الأبرز للبوليمرات العازلة في الأجهزة العضوية بطبقة عازل البوابة (G) في ترانزستورات تأثير المجال العضوية. والتي تسيطر مواصفاتها على أداء النبيطة بصورة عامة، وذلك من خلال تأثير ثابت عزل المادة البوليمرية (سعة عازل البوابة) وطبيعة سطح الغشاء العازل ووجود الثنائيات القطبية وطبيعة التأثير المتعاكس بين مذبذبات المواد العازلة وشبه الموصلة وغيرها من العوامل. توجد العديد من البوليمرات العازلة التي أثبتت بجدارتها على أداء هذا الدور المهم في المشاركة بالأداء الجيد لهذه النبيطة. ان مميزات العوازل البوليمرية

الفريدة مثل الاستقطابية والزوجة وكراهية الماء والخشونة كل منها له دور في نوعية الأغشية شبه الموصلة التي يتم ترسيبها. إضافة الى إمكانية تصنيع النبائط حسب البنية الهندسية لتراكيب الطبقات المتعددة المختلفة من مادة شبه موصلة وأقطاب باستخدام أقنعة الترسيب، فقد أسهمت البوليمرات العازلة القابلة للإذابة بالمذيبات والتي يمكن ان تشكل أغشية متشابكة بطرق ترسيب المحاليل بتسهيل تلك المهمة وبدرجات حرارة واطئة تتوافق مع أنواع القواعد حتى المرنة منها. وقد تستخدم عدة بوليمرات في تشكيل عازل البوابة متعدد الطبقات يمكن من خلال احدها العمل على تحسين قوة العزل أو السعة والحد من تيارات التسرب، في حين أن البوليمر الآخر مصمم لتقديم سطح أفضل لنمو الطبقة شبه الموصلة.

إن خطوات تصنيع أغشية البوليمرات العازلة باستخدام الأقنعة تمثل التحدي العملي الأكبر، وقد استخدمت طرق فعالة للحفاظ على الصفات المادية والميزات الإلكترونية التي تؤدي إلى ترانزستورات عالية الأداء. وإن طريقة الترسيب بواسطة طريقة الطباعة لإنتاج دوائر الترانزستور بما في ذلك البوليمرات العازلة كعازل بوابة تمثل الطريقة الفعالة ذات المواصفات الحديثة في هذا المجال. ويتم الحصول على أجهزة ودوائر الكترونية عالية الأداء بالطباعة الأكثر دقة، وبين الشكل (2-2) التراكيب الكيميائية لمجموعة من البوليمرات العازلة التي تستخدم كعازل بوابة في الترانزستورات العضوية.

وأيضاً هناك حاجة إلى مزيد من طرق تصنيع معقدة باستخدام الأقنعة الشبكية المايكروية المعدنية لترسيب الأغشية في الدوائر متعددة الطبقات. إن الاتصال بين الطبقات يحدث عند حدوث فتحات خلال الطبقات العازلة. إن التطبيق الأكثر سلبية للبوليمرات العازلة هو استخدامها في نطاق ضيق في نقل الطاقة الكهربائية، وانحسار استخدامها في اغلب الأحيان كعوازل في متسع الخزن. يتم في بعض الأحيان اختيار البوليمرات الكارهة للماء بسبب قوة الانهيار العالية جداً، في حين توفر البدائل القطبية ثوابت عزل أعلى. وغالباً ما تستخدم المواد المضافة غير العضوية والمواد ذات التراكيب النانوية مثل الأكاسيد الفيروكهربائية (ferroelectric oxides) وأنابيب الكربون النانوية، والتي يتم إضافتها الى البوليمرات العازلة لإنتاج مركبات ذات ثوابت عزل أعلى. كما ان بعض التحسينات في هذه الأنظمة العضوية قد ينشأ من إضافة طبقات تشويب في البنية التركيبية بين الطبقات البوليمرية. [139-144]



الشكل (2-2) يوضح التراكيب الكيميائية لمجموعة من البوليمرات العازلة. [143]

إن تقليل سمك عازل البوابة يمكن من التشغيل في الجهد المنخفض، اذ يقلل من جهد العتبة كما انه يقلل من تأثير الشحنات الموجودة في السطح الداخلي. بالإضافة إلى ذلك ان الطبقة الرقيقة لعازل البوابة أمر ضروري لتجنب آثار القناة القصيرة. ان المجال العمودي في ترانزستور تأثير المجال هو المسؤول عن خلق قناة تجميع يجب أن يكون أكبر من المجال المستعرض الذي يقود التيار في القناة، ويجب أن يكون سمك عازل البوابة أصغر بكثير من طول القناة. يتوقع بعض الخبراء في مجال الالكترونيات الدقيقة ان يكون الشرط تقريبا لهذه الحالة هو $(d < (L/10))$ ، وقد آخرون ان تكون $(d < (L/4))$. وقد يستخدم سمك أعلى من هذا الشرط للتخلص من تيارات التسرب والدوائر القصيرة حسب صفات المادة العازلة المستخدمة. [145-146]

تم تصنيع ترانزستورات الأغشية الرقيقة من شبه الموصل العضوي ($\alpha 6\text{T}-\alpha$ -sexithienyl) مع مجموعة متنوعة من العوازل البوليمرية العضوية وعوازل البوابة هي البوليسترين (PS) و بولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) إن التيار المعزز بالمجال ضعيف مع استخدام البولي كلوريد الفايثيل (PVC)، ولكن أقوى بكثير باستخدام البولي فينايل الكحول (PVA) وسيانو ايثيل بوليولان (CYEPL)، الذي يمتلك ثابت عازل عالٍ يبلغ 18.5، باستخدام المادتين الأخيرتين تجاوزت تحركية تأثير المجال مثيلاتها للترانزستور المصنوع على الطبقة العازلة SiO_2 وبالتالي تم العثور على ارتباط قوي بين ثابت العزل للطبقة العازلة وتحركية تأثير المجال. [147]

إضافة إلى أبعاد القناة فان من أهم المعاملات الحرجة لترانزستور تأثير المجال العضوي هي نسبة سعة متسعة المادة العازلة الى وحدة المساحة $(C_i = \epsilon \epsilon_i / d)$ ، والتي تشمل مواصفات الطبقة العازلة من سمكها (d) وثابت العزل إضافة الى الشكل التركيبي للغشاء واختيار أفضل طرق الترسيب وغيرها. ولان الجهد المطلوب للتشغيل يعتمد على سمك عازل البوابة، ولكون تطبيقات

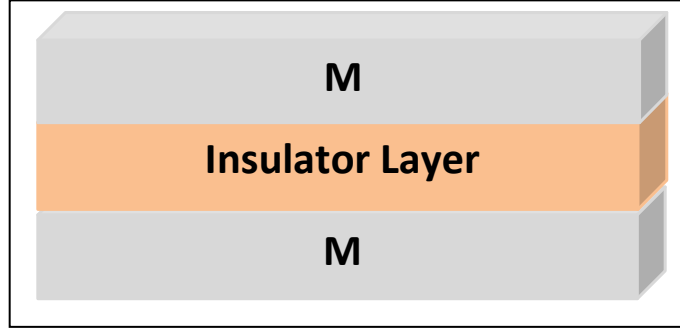
OFET هي في الغالب الالكترونيّات واسعة المساحة، ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار أن هناك حداً أدنى من سمك عازل البوابة، التي تفرضها الاعتبارات الموثوقية مثل اشتراط الأغشية المتجانسة والخالية من العيوب الفراغية والانخلاعات البينية وانخفاض تيارات التسرب. قد يكون من غير العملي الحد من سمك العازل أقل من 100 nm. تم دراسة اعتماد التحركية على جهد البوابة في أجهزة البنتناسين واستخدامها لإيجاد أداء عالي للترانزستور وبتحركية $0.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ في جهد تشغيل منخفضة ($\sim 5\text{V}$). [148-149]

5.2- الصفات الكهربائية المتناوبة: (AC Electrical Properties)

لقياس التيارات المتناوبة خلال الغشاء العازل من الضروري أن يكون هذا العمل محدداً بأنواع من التراكيب الهندسية التصميمية للعينات. بشكل عام هناك نوعان من التراكيب المستخدمة لتوصيف الأغشية العازلة. احد هذه التراكيب هو معدن-عازل-معدن ويرمز له بالرمز (Metal-Insulator-Metal, MIM) السؤال المثير للاهتمام في مثل هذه الحالة هو في حالة استخدام أقطاب مختلفة. حيث ان الأقطاب المعدنية المختلفة عادة ما تكون مرتبطة مع دالة شغل مختلفة، وبالتالي ينتج عنها حواجز جهد مختلفة لكل سطح مع العازل وهذا يظهر في التركيب معدن-عازل-شبه موصل (Metal-Insulator-Semiconductor, MIS).

1.5.2- التركيب معدن-عازل-معدن: (Metal-Insulator-Metal (MIM) Structure)

إن عملية تصنيع ترانزستور الأغشية الرقيقة العضوي (Organic Thin Film Transistor, OTFT) فيها الكثير من التحديات من أهمها هو اختيار المواد العازلة وشبه الموصلة ومعادن الأقطاب، إضافة الى طرق التصنيع وظروفه. إن مواصفات الأداء الجيدة للنبيطة تعتمد مبدئياً على المواصفات الجوهرية لكل من المواد العازلة وشبه الموصلة والأقطاب كل على انفراد، ومواصفات جمع هذه المكونات في نموذج واحدة تمثل البنية الهندسية للجهاز. وعلى الرغم من استخدام العديد من العوازل العضوية كعازل بوابة، فمن الصعب اختيار احدها من دون الاعتماد على دراسة مسبقة تغطي توصيف خواص العزل الكهربائي بشكل يشمل اختيار طريقة الترسيب والمذيب والمعالجة الحرارية والسمك وغيرها، والتي تؤثر على خصائص الجهاز بصورة مباشرة. ويوضح الشكل (2-3) نموذج تركيب المتسعة MIM.



الشكل (3-2) يوضح نموذج تركيب المتسعة MIM.

إن البنية الهندسية الشائعة لتركيب OFET يلعب السطح البيني بين الطبقتين العازلة وشبه الموصلة فيها دوراً حاسماً في أداء النبيلة، مما جعل من اختيار المواد العازلة البوليمرية من المتطلبات الحرجة في عملية التصنيع. فإذا كانت A هي مساحة المتسعة، و ϵ_0 هي سماحية الفراغ و ϵ ثابت العزل الكهربائي للمادة العازلة و C هي سعة المتسعة فإن السعة لوحدة المساحة C_i تعطى على النحو التالي:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{or} \quad C_i = \epsilon_0 \frac{\epsilon}{d} \dots \dots \dots (2 - 1)$$

حيث d هو سمك العازل، فمن الواضح أن قيمة السعة تعتمد على ثابت العزل وهو صفة جوهرية للمادة.

وقد بينت العديد من الدراسات منذ بداية القرن العشرين الارتباط الوثيق بين قيمة ثابت العزل وتحركية تأثير المجال للترانزستور العضوي. والتي قادت الى تصنيع الترانزستور العضوي عالي الأداء باستخدام البولي اميد كعازل بوابة وبتركيبية تتراوح بين $(0.01-0.03 \text{ cm}^2/\text{Vs})$. تحققت إنجازات تطوير التصنيع الى أن أصبح العمل على سمك يقدر ببعض العشرات من النانومتر لتكون السعة بحدود $(11-12 \text{ nF}/\text{cm}^2)$ من (poly (vinylpyrrolidone-PVP) المتشابه للحصول على الأداء العالي بتركيبية تصل الى $(3 \text{ cm}^2/\text{Vs})$. [144, 150-152].

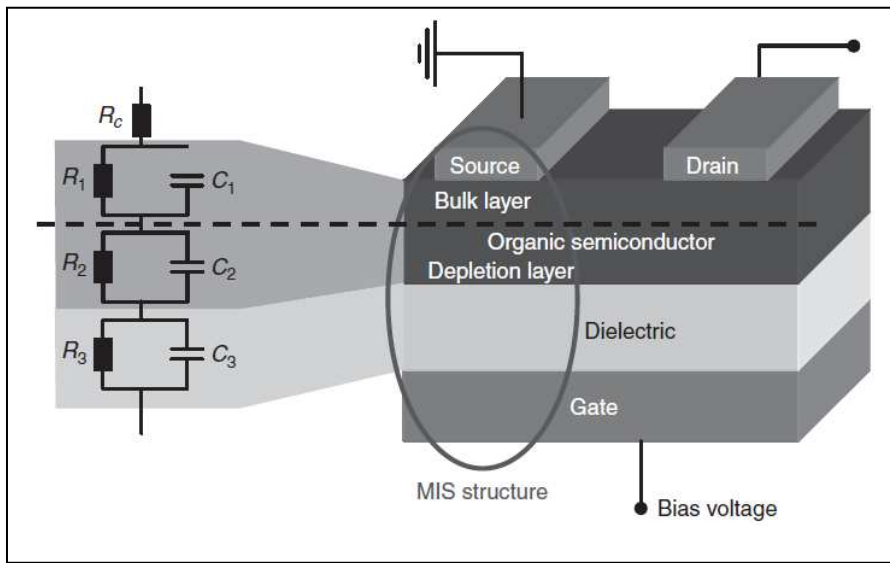
إن طبيعة التأثير المتبادل بين العوازل وأشباه الموصلات يؤدي دوراً في عملية انتقال الشحنة وأن استخدام عازل ذي سماحية أكبر يساهم في تموضع حاملات الشحنة عند سطح العازل. أي ان كثافة الشحنة المتراكمة تتناسب طردياً مع ثابت العزل للمادة المستخدمة. وقد تم التغلب على الكثير من الصعوبات ومشكلات الطبقة العازلة البوليمرية مما قاد الى تحسين أداء الجهاز باتجاه معين وذلك باستخدام عدة طرق، منها استخدام طبقة عازلة مزدوجة او متعددة الطبقات كعازل بوابة، وفيها يتكون عازل البوابة من طبقات متعددة من مواد عازلة مختلفة يتم ترسيبها تباعاً. مثل استخدام العازل متعدد الطبقات [CYTOP-PVA-(P(VDF-TrFE-CTFE))] لتحسين أداء

الترانزستور. وهناك طريقة تحويل الطبقة العازلة من طبقة بوليمرية عشوائية الى طبقة متشابكة ذات مواصفات جديدة تماماً باستخدام مواد مساعدة ومعالجات ضوئية او حرارية او كلاهما، كتحويل طبقات العزل للبوليمرات PMMA, PVP, PVA الى بوليمرات متشابكة، حيث تصبح غير قابلة للذوبان لتجنب تأثير مذيب المادة شبه الموصلة، إضافة إلى تحسين كل من خاصية المرونة والاستقرار الحراري والكهربائي فهي طريقة فعالة للتعديل صفات العزل للطبقة العازلة. وطريقة التشويب أيضاً من الطرق التي تستخدم لتعديل الخواص العازلية لعوازل البوابة البوليمرية، وفيها تستخدم مواد عضوية او لاعضوية كمضافات بنسب معينة الى المادة العازلة لخلق طبقة عازلة بمواصفات جديدة تساهم في تحسين الأداء او تسهيل عملية التصنيع للجهاز، كما في استخدام المواد اللاعضوية مثل اوكسيدات بعض المعادن ذات ثابت العزل العالي والتي لا يمكن ترسيبها بطرق ترسيب المحاليل ولا تملك المرونة لتصنيع الأجهزة المرنة.[153-162]

2.5.2- التركيب معدن-عازل-شبه موصل: (Metal-Insulator-Semiconductor,MIS)

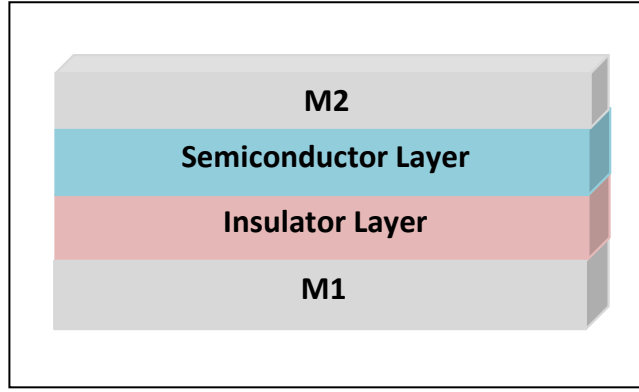
يمثل التركيب MIS عنصر مهم في دراسة خواص التبديل للترانزستور العضوي. إذ يكون الترانزستور في حالة التشغيل بفعل حالة تجميع حاملات الشحنة وتشكيل قناة التوصيل، ويعتبر في حالة إطفاء عند استنزاف حاملات الشحنة من القناة. وتحدث هذه الحالات بتأثير تسليط فولتية بوابة V_{gs} مناسبة. إن الانحياز السالب كفيلاً بتشغيل الترانزستور العضوي المصنع باستخدام أشباه الموصلات من النوع الموجب، وانحياز موجب صغيرة يحوله الى حالة الإطفاء. يمكن ان تتجمع حاملات الشحنة الأقلية في القناة في النبيطة اللاعضوية (الانعكاس-inversion) بتسليط جهد موجب كبير بما فيه الكفاية. يتصرف نموذج MIS المثالي كمتسعة فيها سمك طبقة العازل تتغير مع الجهد المسلط. في منطقتي التجميع والانعكاس فان السمك يناظر سمك الطبقة العازلة بينما في منطقة الاستنزاف يجب أن يضاف اليه سمك منطقة الاستنزاف. إن الخصائص المرتبطة بمنحنى (C-V) تعطي المعلومات حول سمك طبقة الاستنزاف، إضافة الى عدة معاملات للمادة شبه الموصلة مثل كثافة حاملات الشحنة. هذه الطريقة من التوصيف أنشأت لوصف نبائط السيليكون، ولا يمكن تطبيقها على تركيب MIS العضوية بسبب كثافة حاملات الشحنة الأقل ولا يمكن حدوث حالة الانعكاس في التحركية في الأخير. كذلك إن طبقة أشباه الموصلات لها خصائص اتصال معقدة مقارنة بالسيليكون. إضافة إلى إن اغلب العوازل المستخدمة في الترانزستورات العضوية لا تملك الخصائص المثالية لأكسيد السيليكون فيما يتعلق بتيار التسرب وكثافة الأيونات المتحركة وغيرها. ولهذه الأسباب فان قياس خصائص (C-V) لتركيب MIS العضوية أكثر تعقيداً.

يتكون MIS العضوية تحت الانحياز بصورة أساسية من ثلاث طبقات سعوية. تقابل الطبقة الأولى الطبقة العازلة والطبقة الثانية ترتبط مع منطقة الاستنزاف والأخيرة هي الحجمية لشبه الموصل العضوي، كما موضح بالشكل (4-2). بما أن جميع الطبقات الثلاث يمكن أن تظهر تسرب بالتيار إلى حد ما، فإنه يتم تصميم كل نموذج في تقريب أول بشكل متسعة بالتوازي مع مقاومة. وإذا كانت الطبقة لا تظهر أي تيار تسرب، فإن المقاومة الموازية هي لانهاية القيمة ويمكن حذفها، كما هو الحال بالنسبة للعوازل المثالية ومنطقة الاستنزاف. وتظهر هذه الطبقات كأنها طبقة واحدة ولا يمكن التمييز بينها. ان الطبقة الحجمية لشبه الموصل العضوية المتبقية تتميز بمقاومة تسرب منخفضة نسبياً. [163]



الشكل (4-2) يوضح المتسعات المكافئة لتركيب MIS من OFET. [163]

إن الكفاءة في ترانزستورات تأثير المجال العضوية تعتمد بشدة على نوع الطبقة العازلة المستخدمة. إذ إن تحسين خصائص الترانزستور مرتبطة بخصائص هذه الطبقة مثل انخفاض تيار التسرب في النظام لتحقيق نسبة I_{on}/I_{off} عالية، كذلك فإن السعة الكبيرة لوحدة المساحة تحد من ارتفاع جهد التشغيل للجهاز، والتي يمكن الوصول إليها باستخدام طبقة عازلة رقيقة ذات ثابت عزل كهربائي عالي، وتعد خشونة السطح المنخفضة عنصر مساعد على تحسين حركية حاملات الشحنة في قناة التجميع بين المصدر والمصرف، وإن انخفاض كثافة المصائد في السطوح البينية يقلل جهد العتبة ويزيد من استقراريتها. ان التركيب معدن-عازل-شبه الموصل (MIS) والمبين بالشكل (5-2)، هو البنية الهندسية الأنسب لدراسة وتحديد مدى ملائمة المواد المكونة والتوافق بين طبقات العازل وشبه الموصل إضافة الى طرق الترسيب والمعالجة قبل تصنيع الترانزستور العضوي. [164]



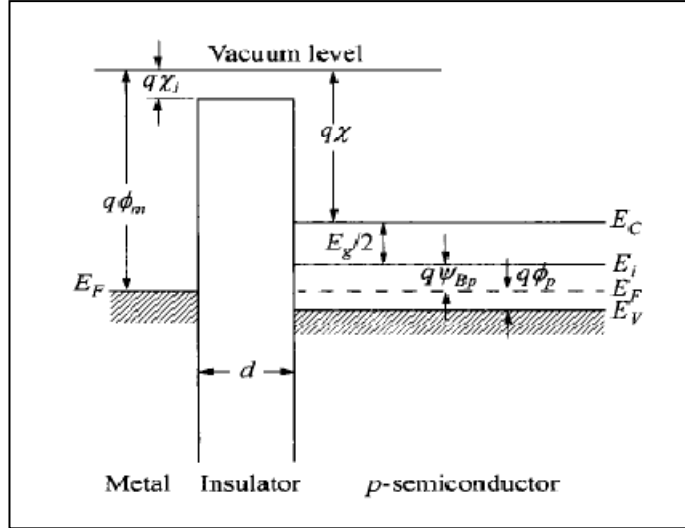
الشكل (5-2) يوضح التركيب الهندسي لنبيطة معدن-عازل-شبه موصل.

كذلك يعد التركيب معدن-عازل-شبه موصل من أكثر النماذج فائدة لدراسة السطوح الداخلية بين العوازل وأشباه الموصلات. إن الصفات الإلكترونية لتشغيل الثنائي تعتمد على خصائص الطبقة الرقيقة العازلة وخصائص السطح الداخلي بين المعدن وشبه الموصل والمقاومة وعدم التجانس تشكل حواجز شوتكي المرتفعة. إن عوازل البوابة البوليميرية هي خيار طبيعي للتطبيقات التي تمتاز بالمرونة والمساحة الكبيرة والكلفة الواطئة وغيرها من الميزات الخاصة، وفيها مجموعة واسعة من الخيارات المتنوعة. إن تطوير طرق صناعة البوليميرات ساهم في تسويق الإلكترونيات البوليميرية ومن ضمنها OFET. لقد مكنت طرق ترسيب المحاليل للبوليميرات من السيطرة على السمك والتصنيع بمساحات كبيرة. ويرافق استخدام هذه الطرق بعض الصعوبات والمشكلات في التراكيب ذات البنية متراكبة الطبقات مثل تأثير مذبذب الطبقة العليا المراد ترسيبها على غشاء الطبقة السفلى، والتي يمكن تجاوزها باستخدام المواد متعامدة المذيبات. وكذلك التأثير المتبادل لخشونة السطوح، ونقاوة المحاليل ومقدار الشوائب الموجودة أمر يصعب التحكم فيه، لذلك من الصعب التنبؤ بالشحنات والمصادم الموجودة في السطح البيني بين عازل البوابة وشبه الموصل والتي تؤثر في أداء الجهاز المصنع. إن تأثيرات السطح البيني الذي ينشأ في بنية MIS هي معقدة إلى حد كبير. وعلى الرغم من أن هناك العديد من هذه التأثيرات سنركز على تلك التي تسيطر على عمل ترانزستور تأثير المجال بصورة مثالية. وسنناقش الحالات من وجهة فيزياء الكترونيّات أشباه موصلات الحالة الصلبة. [165-167]

(Ideal MIS Structure)

3.5.2- التركيب المثالي MIS:

يبين الشكل (6-2) البنية الهندسية للتركيب معدن-عازل-شبه موصل ومخطط حزم الطاقة لنبيطة MIS المثالية من دون انحياز لشبه موصل من النوع الموجب حيث تمثل d سمك العازل و V الجهد المسلط.



الشكل (6-2) يبين مخطط حزم الطاقة لبنية MIS المثالية بدون انحناء (Flat Band). [168]

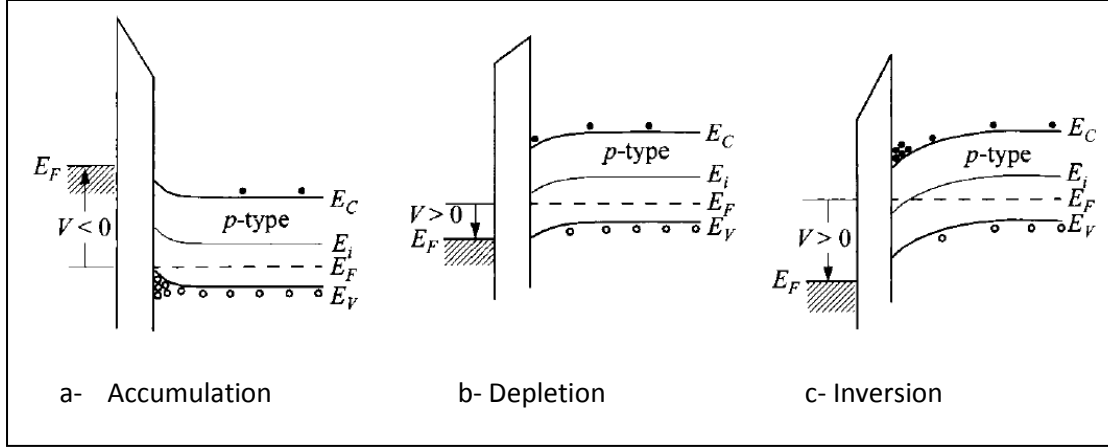
ويتم تعريف متسعة MIS المثالية على النحو التالي: (i) الشحنة الوحيدة التي يمكن أن تتواجد في الهيكل تحت أي شروط للانحناء هي تلك الموجودة في أشباه الموصلات وتلك التي لها كمية مساوية لكن مغايرة بالإشارة على سطح قطب البوابة، بمعنى أنه لا توجد مصائد السطح البيني أو أي نوع من الشحنة. (ii) لا يوجد انتقال تيار خلال العازل تحت شروط الانحناء المستمر، أي ان مقاومة العازل لانهاية. إضافة إلى ذلك للسهولة نفترض أن المعدن يتم اختياره بحيث يكون الفرق بين دالة شغل المعدن Φ_m وشبه الموصل هو صفر، أو ان $(\Phi_{ms}=0)$.

وبعبارة أخرى فإن حالة الحزمة المستوية (Flat Band case) تحدث عندما لا يكون هناك جهد مسلط. وعند الانحناء العكسي لتركيب MIS مثالي، بصورة أساسية ستكون هناك ثلاث حالات محتملة على سطح شبه الموصل الموجب وهي:

أولاً/ عندما يتم تسليط الجهد السالب ($V < 0$) إلى اللوح المعدني، سيؤدي هذا إلى انحناء حافة حزمة التكافؤ E_v إلى الأعلى قرب السطح مقتربة إلى مستوي فيرمي، كما هو مبين في الشكل (a-7-2). ولمتسعة MIS المثالية لا يوجد تدفق تيار في الهيكل أي أن $(dE_F/dx=0)$ ، لذلك يبقى مستوي فيرمي ثابتاً في أشباه الموصلات. حيث ان كثافة حاملات الشحنة تعتمد بشكل كبير على فرق الطاقة $(E_F - E_v)$. إن هذا الانحناء في الحزمة يتسبب بتجميع حاملات الشحنة الأغلبية (الفجوات) بالقرب من سطح شبه الموصل، وتدعى بحالة التجميع (Accumulation Case).

ثانياً/ عندما يتم تسليط جهد موجب واطئ ($V > 0$)، فإن الحزم تنحني إلى الأسفل قرب السطح، ويتم استنزاف حاملات الشحنة الأغلبية، كما مبين بالشكل (b-7-2)، وهي حالة الاستنزاف (Depletion Case).

ثالثاً/ عند زيادة الجهد الموجب بصورة كبيرة ($V \gg 0$)، سيتسبب ذلك بانحناء الحزم بصورة أكبر إلى الأسفل بحيث يتقاطع المستوى الداخلي E_i عند السطح فوق مستوى E_F ، كما هو مبين بالشكل (c-7-2). عند هذه النقطة يكون كثافة الإلكترونات (حاملات الشحنة الأقلية) على السطح أكبر من الفجوات، وبالتالي فإن السطح معكوس وهذه هي حالة الانعكاس (Inversion Case). ويمكن الحصول على نتائج مماثلة لشبه موصل من النوع السالب باستخدام انحيازات جهد معكوسة عن الحالة السابقة. [168]



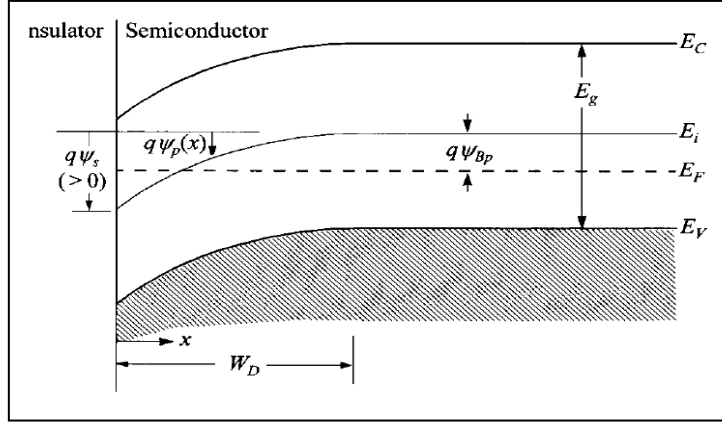
الشكل (7-2) يبين مخطط لحزم الطاقة لتركيب MIS المثالي. [168]

1.3.5.2- سطح منطقة شحنة الفراغ: (Surface Space-Charge Region)

يمكن الحصول على العلاقات بين سطح الجهد وشحنة الفراغ والمجال الكهربائي، والتي من خلالها يمكن معرفة خصائص السعة والجهد للتركيب MIS المثالي. حيث χ و χ_i هي ارتباطات الإلكترون (الألفة الإلكترونية) لشبه الموصل والعازل على التوالي، و ψ_{Bp} و Φ_p هي مستويات فيرمي نسبة إلى منتصف فجوة الطاقة وحافة الحزمة. ويبين الشكل (8-2) مخططاً أكثر تفصيلاً لحزم الطاقة على سطح شبه موصل الموجب. يتم تعريف الجهد $\psi_p(x)$ على أنه الجهد $(E_i(x)/q)$ المرتبط بالجزء الحجمي من شبه الموصل. أي أن:

$$\psi_p(x) \equiv - \frac{[E_i(x) - E_i(\infty)]}{q} \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

حيث على سطح أشباه الموصلات ($\psi_p(0) \equiv \psi_s$)، وتسمى بطاقة السطح.



الشكل (8-2) يوضح مخططاً تفصيلاً لحزم الطاقة على سطح شبه موصل الموجب.

ان كثافة الإلكترونات والفجوات n_p, p_p هما دالة لـ ψ_p ، بحيث ان n_{po}, p_{po} هي كثافة الفجوات والإلكترونات عند حالة التوازن على التوالي في شبه الموصل، و $(\beta \equiv q/kT)$. الكثافات عند السطح الفاصل هي: (168)

$$\begin{aligned} n_p(0) &= n_{po} \exp(\beta \psi_s) \\ p_p(0) &= p_{po} \exp(-\beta \psi_s) \end{aligned} \dots\dots\dots (2-3)$$

من خلال شرح ما تقدم وبالاكتفاء على المعادلات أعلاه، يمكن تمييز مناطق الطاقة السطحية الآتية:

- $(\Psi_s=0)$ شرط الحزم المستوية.
- $(\Psi_s<0)$ منطقة تجميع الفجوات، وانحناء الحزم للأعلى.
- $(\Psi_{Bp}>\Psi_s>0)$ منطقة استنزاف الفجوات، وانحناء الحزم للأسفل.
- $(\Psi_{Bp}=\Psi_s)$ موقع مستوي فيرمي في منتصف فجوة الطاقة، حيث $\{E_F=E_i(0), n_p(0)=p_p(0)=n_i\}$
- $(2\Psi_{Bp}>\Psi_s>\Psi_{Bp})$ حالة الانعكاس الضعيف، حيث ان $(n_p(0) > p_p(0))$.
- $(\Psi_s > 2\Psi_{Bp})$ حالة الانعكاس القوي، حيث يكون $(n_p(0) > p_{po} \text{ or } N_A)$.

2.3.5.2-منحنيات التركيب MIS المثالية:

إن تعادل الشحنة في مخطط الحزم لبنية بسيطة مثالية في حالة الانعكاس القوي يتطلب أن تكون:

$$Q_M = -(Q_n + qN_A W_D) = -Q_s \dots \dots \dots (2-4)$$

حيث Q_M هي الشحنة لوحدة المساحة على المعدن، و Q_n هي شحنة الإلكترونات لوحدة المساحة قرب سطح منطقة الانعكاس، N_A تركيز الشحنات، و $qN_A W_D$ هي القابلات المتأينة لوحدة المساحة في منطقة شحنة الفراغ مع عرض استنزاف W_D ، و Q_s هو الشحنة الكلية لوحدة المساحة في شبه الموصل. من الواضح أنه في حالة عدم وجود أي اختلاف في دوال الشغل، فإن الجهد المسلط سوف يمر جزئياً عبر العازل وجزئياً عبر شبه الموصل. وبهذا فإن: ⁽¹⁶⁸⁾

$$V = V_i + \psi_s \dots \dots \dots (2-5)$$

حيث V هو الجهد المار خلال العازل وتعطى

$$V_i = \mathcal{E}_i d = \frac{|Q_s|d}{\epsilon_i} = \frac{|Q_s|}{C_i} \dots \dots \dots (2-6)$$

إن السعة الكلية C للنظام هي عبارة عن محصلة متسعات متوالية لمتسعة العازل وسعة طبقة الاستنزاف لشبه الموصل C_D

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d} \dots \dots \dots (2-7)$$

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \dots \dots \dots (2-8)$$

بالنسبة لسمك عازل معين d تكون قيمة السعة ثابتة وتتوافق مع قيمة السعة القصوى للنظام. لكن سعة شبه الموصل تعتمد على الانحياز وكذلك على التردد. ويوضح الشكل (2-9) الخصائص المختلفة بصورة كبيرة لمنحنيات خصائص السعة-الجهد التي تم قياسها عند ترددات وسعات قياس مختلفة. إذ يحدث الفرق بشكل رئيسي عند حالة الانعكاس، لا سيما الانعكاس القوي. ويتضح من الشكل سطوح الجهد المقابلة في أنظمة مختلفة.

3.3.5.2-السعة عند الترددات المنخفضة:

ان سعة المتسعة الكلية تتغير بتغير جهد V_{gs} المسلط وذلك لتغير سعة الاستنزاف، والتغير في سعة المتسعة ناتج عن تشكيل عرض سطح طبقة شحنة الفراغ (Space Charge Layer (SCL)) وتعديلها بواسطة مجال البوابة، وتكون مفيدة للغاية في تقييم الخصائص الكهربائية للسطح الداخلي للطبقة العازلة، هناك ثلاث مناطق معينة ذات أهمية وهي منطقة التجميع (accumulation) والاستنزاف (depletion) والانعكاس (inversion) تظهر في مخطط الخصائص C-V للمتسعة، كما هو مبين في الشكل (9-2). [168-170]

تمثل سعة طبقة الاستنزاف لشبه الموصل تغير الشحنة الساكنة الكلية في جانب شبه الموصل الى تغير سطح الجهد لشبه الموصل ($C_D = dQ_s/d\psi_s$)، اذ تعطي وصفا كاملا لمنحنى السعة-الجهد المثالي عند الترددات الواطئة والعالية كما هو موضح في الشكل (9-2). اذ في الجانب الأيسر لمحور ($C(F)$) (جهد سالب و ψ_s) حيث يحدث تجميع الفجوات، وبالتالي يحدث تغير كبير في سعة شبه الموصل. ونتيجة لذلك فإن السعة الكلية قريبة من سعة العازل. وعندما يتم تقليل الجهد السالب إلى الصفر نحصل على حالة الحزمة المستوية (Flat Band). فان:

$$C_D(\text{flat-band}) = \frac{\epsilon_s}{L_D} \dots\dots\dots(2-9)$$

حيث L_D هو طول ديبياي للفجوات، وان السعة الكلية في حالة الحزمة المستوية تعطى بالعلاقة:

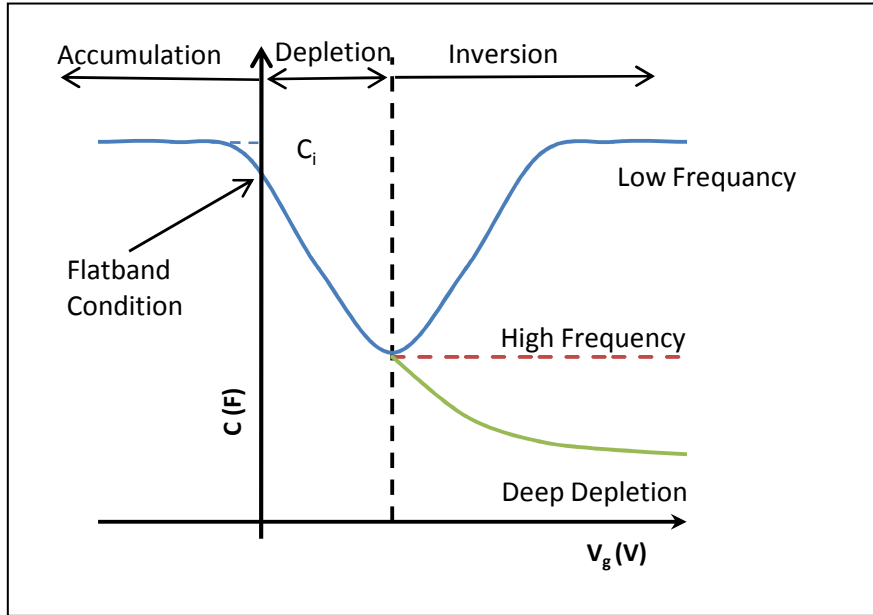
$$C_{FB}(\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_i \epsilon_s}{\epsilon_s d + \epsilon_i L_D} \dots\dots\dots(2-10)$$

حيث ϵ_i و ϵ_s هما سماحية العازل وشبه الموصل على التوالي، ويظهر أنه تحت ظروف الاستنزاف والانعكاس الضعيف أي ($\psi_{Bp} > \psi_s > kT/q$) تكون ($F \approx (\beta \psi_s)^{1/2}$)، وبهذا يمكن اختزال كثافة شحنة الفراغ إلى:

$$Q_s = \sqrt{2\epsilon_s q p_{po} \psi_s} = q W_D N_A \quad (2\psi_{Bp} > \psi_s > kT/q) \dots\dots\dots(2-11)$$

إن الزيادة الإضافية في الجهد الموجب يوسع منطقة الاستنزاف التي تعمل كعازل على سطح شبه الموصل على التوالي مع الطبقة العازلة (إذ يحدث الاستنزاف العميق بدل الانعكاس في النبيطة العضوية)، ويستمر انخفاض السعة الكلية. تمر السعة بالحد الأدنى وبعد ذلك تزداد مرة أخرى مع تشكل طبقة الانعكاس للإلكترونات على السطح. ولان قيمة C_i ثابتة، يمكن ايجاد قيمة الحد الأدنى للسعة C_{min} بأقل قيمة من C_D .

إن زيادة السعة تعتمد على قدرة كثافة الإلكترونات على إتباع الإشارة المتناوبة المسطرة. وهذا يحدث في الترددات المنخفضة فقط، حيث أن معدلات عمليات تولد واتحاد حاملات الشحنة الأقلية (الإلكترونات) يمكنه مواكبة تغير الإشارة الصغيرة ويؤدي إلى تبادل الشحنة مع طبقة الانعكاس أثناء عملية القياس. على عكس الاستنزاف والانعكاس الضعيف، في الانعكاس القوي لا يوجد تزايد كبير في الشحنة على حافة منطقة الاستنزاف ولكن عند سطح طبقة الانعكاس لشبه الموصل مما أدى إلى سعة كبيرة. موقع الشحنة الإضافية في جانب شبه الموصل وصف في الشكل (2-9) لحالات مختلفة من التردد المنخفض والمرتفع والاستنزاف العميق. عملياً تم إثبات أن سعة النظام معدن-أكسيد السليكون-سليكون أكثر اعتماداً على التردد في حدود بين (5Hz-1KHz). ونتيجة لذلك لا تظهر منحنيات النسيطة المقاسة عند الترددات العالية زيادة في السعة في حالة الانعكاس القوي. [171-174]



الشكل (2-9) يبين خصائص السعة-الجهد للتركيب MIS.

4.3.5.2-السعة عند الترددات العالية:

يمكن الحصول على منحنى الترددات العالية باستخدام مقارنة مشابهة لجانب واحد من p-n. عندما يستنزف سطح شبه الموصل، وتكون القابلات المتأينة في منطقة الاستنزاف $-qN_A W_D$ ، نحصل على:

$$\psi_p(x) = \psi_s \left(1 - \frac{x}{W_D}\right)^2 \dots\dots\dots(2-12)$$

حيث يعطى سطح الجهد بالعلاقة:

$$\psi_s = \frac{qN_A W_D^2}{2\epsilon_s} \dots \dots \dots (2-13)$$

وعند زيادة الجهد المسلط تزداد W_D و ψ_s سيحدث الانعكاس القوي. ويبدأ الانعكاس القوي عندما ($\psi_s \sim 2\psi_B$)، وعندما يحدث الانعكاس القوي يصل عرض طبقة الاستنزاف إلى الحد الأقصى. عندما تنحني الحزم للأسفل بعيدا حتى ($\psi_s = 2\psi_B$)، وهي محمية بشكل فعال بواسطة شبه الموصل من اختراق المجال الكهربائي، من خلال طبقة الانعكاس وحتى الزيادة الصغيرة جدا في انحناء الحزمة (المقابلة لزيادة صغيرة جدا في سمك طبقة الاستنزاف)، تنتهي إلى زيادة كبيرة جدا في كثافة الشحنة داخل طبقة الانعكاس. وباستخدام العلاقات (2-5, 2-6, 2-13) السابقة يمكن تمثيل سمك طبقة الاستنزاف بالعلاقة:

$$W_D = -\frac{\epsilon_s}{C_i} + \sqrt{\frac{\epsilon_s^2}{C_i^2} - \frac{2C_s V}{qN_A}} \dots \dots \dots (2-14)$$

ويمكن استخدام منحنيات MIS المثالية لمقارنتها مع النتائج التجريبية وفهم أنظمة MIS العملية. يتطلب التحويل إلى عوازل أخرى قياس سمك الأكسيد مع نسبة السماحية لـ SiO_2 والعازل الآخر عن طريق العلاقة:

$$d_c = d_i \frac{\epsilon_i(\text{SiO}_2)}{\epsilon_i(\text{insulator})} \dots \dots \dots (2-15)$$

حيث d_c هو سمك SiO_2 المكافئ المستخدم في هذه المنحنيات، و d_i و ϵ_i هي السمك والسماحية للعازل الجديد. في الترددات العالية ومع سرعة قياس عالية بالاتجاه الانعكاس القوي فان شبه الموصل لا يملك الوقت الكافي للوصول إلى حالة التوازن حتى مع المدى الكبير لتغير الإشارة. ويمكن أيضا دراسة اعتماد السعة على التردد عند تسليط فولتيات مختلفة أو سمك مختلف. وحيث لا يمكن الحصول على مادة شبه موصلة عضوية بحيث ($\psi_{ms}=0$)، وكذلك وجود العيوب في العوازل العضوية فان إزاحة فولتية الحالة المستوية تكون: [171-174]

$$V_{FB} = \psi_{ms} - \frac{Q_i}{C_i} \dots \dots \dots (2-16)$$

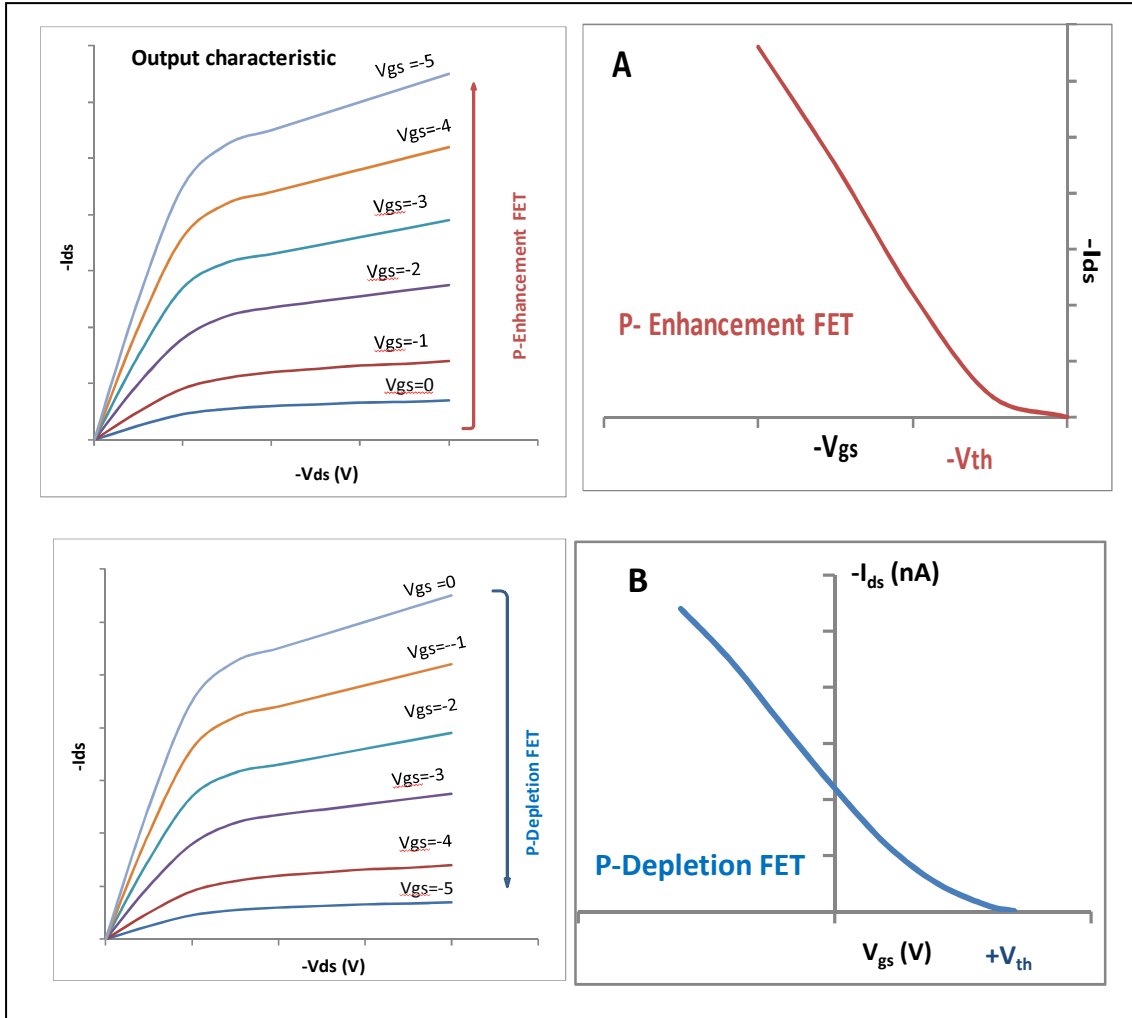
لإنتاج OFET بصورة متكررة من الضروري الحصول على معلومات مفصلة عن عازل البوابة والمادة شبه الموصلة تمكنا من التنبؤ بأدائها، فالتوافق والتجانس العالي بينها وخصائص العازل الجيدة ضرورية في الحصول على الأداء العالي للأجهزة. سنركز هنا على مفاهيم ميزة السعة-الفولتية (C-V) وميزة السعة-التردد (C-F) والتي تصف الخصائص الكهربائية للتركيب معدن-

عازل-شبه موصل MIS. ان ثابت العزل الكهربائي ومجال الانهيار الكهربائي هما المعاملان الكهربائيان الأكثر أهمية لتوصيف المواد العازلة. ويتم تحديد الثوابت من بيانات السعة المقاسة بأبعاد المعروفة.

لأن العازل في تركيب (MIS) يحجب أساسا التيار المستمر DC المار بين اثنين من الألواح الكهربائي (باستثناء تيارات التسرب الصغيرة)، وهي التقنية التشخيصية الرئيسية التي يصفها تحليل بيانات C-V لتركيب MIS. خلال قياس C-V كل من الجهد المستمر DC والإشارة AC هي ضروري للقياس. فالجهد المستمر المسلط على النبيلة لتحديد شروط الانحياز القاعدة. ويتم تسليط جهد إشارة صغيرة متناوبة لتتداخل superimposed على انحياز القاعدة وتغييره يؤدي إلى ارتفاع الاختلاف في الشحنات المقاسة من خلال تعديل طبقة استنزاف شبه الموصل. وتغير الشحنات قابل للقياس من خلال السعة. تم تطبيق ميزة C-V في لنبيلة (arylamino-PPV) لدراسة تأثير المجال في الأجهزة العضوية. ففي عملية التجميع وجدت سعة عازل للترددات منخفضة فقط، وفي الفولتية الموجبة للبوابة، لم يلاحظ الانعكاس في OFET. وان انخفاض الحركة سبب ارتفاع وقت الاسترخاء. وأظهرت الخصائص المقاسة هسترة كبيرة لمختلف عمليات القياس المتكررة وان هناك إزاحة للمنحنيات بإعادة القياس. وأوضح هذا العمل أن خصائص C-V يمكن أن تكون عوناً كبيراً لإثبات تأثير المجال في OFETs. [175-176]

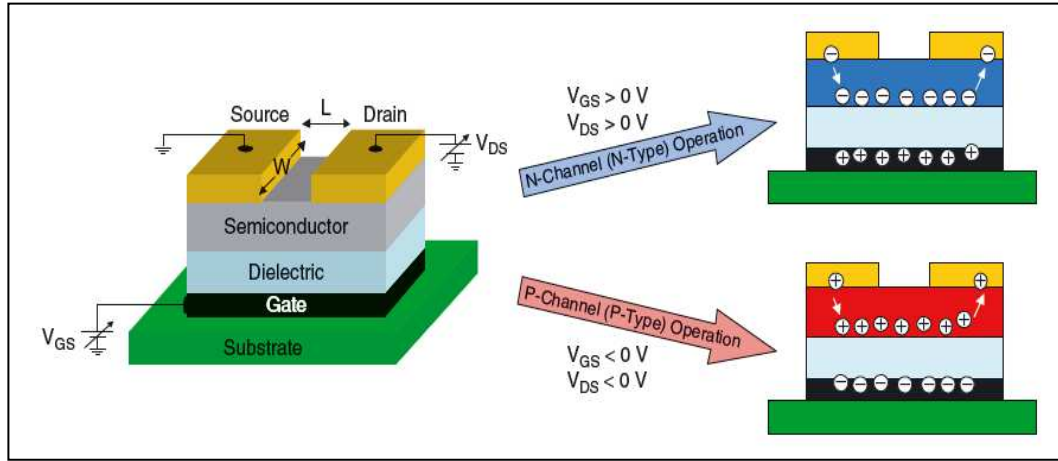
6.2-الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي:

بشكل رئيسي هناك طورين رئيسيين لعمل ترانزستور تأثير المجال العضوي لكل نوع من نوعي الطبقة الفعالة (N, P), يشكل كل منها نوع من هذه الترانزستورات. فعندما يكون نوع الطبقة الفعالة موجب، وكان انحياز فولتية البوابة-المصدر مساوي للصفر وتوصيلية القناة صغيرة جدا (تيار صغير جدا)، وتحتاج البوابة إلى انحياز سالب لتشكيل قناة موجبة (P-Channel) فهذا النوع يدعى بالنوع التعزيزي الموجب (P-Enhancement Mode) (ويدعى أيضا التجميعي Accumulation mode). أما إذا كانت القناة موجودة في الانحياز الصفري للبوابة ويتطلب فولتية موجبة لاستنزاف حاملات الشحنة من القناة، فيمكن القول إن هذا النوع من النوع هو الاستنزافي الموجب (P-Depletion Mode). وبصورة مشابهة هناك نوعان لترانزستورات القناة السالبة ولكن بعكس الانحيازات. يبين الشكل (2-10) ميزة التحويل وميزة الإخراج لكل نوع من هذه الأنواع مع الانحياز المطلوب لفولتية المصدر-البوابة وجهد العتبة المطلوب لعمل الترانزستور. [177-180]



الشكل (10-2) يوضح مخططات لخواص نوعي الترانزستور التعزيزي والاستنزافي.

وان تركيز حاملات الشحنة في أشباه الموصلات العضوية النقية عادة أقل من $(10^{14} \text{ cm}^{-3})$ ، يكون الترانزستور في حالة إطفاء (Off-State) عند عدم وجود انحياز جهد بين البوابة والمصدر ($V_{gs}=0$) بمعنى آخر مجال البوابة مساوي للصفر، حتى مع وجود جهد واطئ بين المصدر والمصرف فتتأثر القناة واطئ جدا. وعند تسليط انحياز سالب أو موجب بين البوابة والمصدر V_{gs} تحدث عملية تجمع للشحنات (Accumulation process) عند السطح البيني الفاصل عازل-شبه موصل (الفجوات أو الإلكترونات بحسب نوع شبه الموصل موجب أو سالب على التوالي)، وبتكريز لحاملات الشحنة يفوق $(10^{20} \text{ cm}^{-3})$. عند زيادة الانحياز بين المصدر والمصرف V_{ds} يبدأ التيار I_{ds} بالنمو ويدخل الترانزستور حالة التشغيل (On-State)، كما هو مبين بالشكل (11-2). [181].

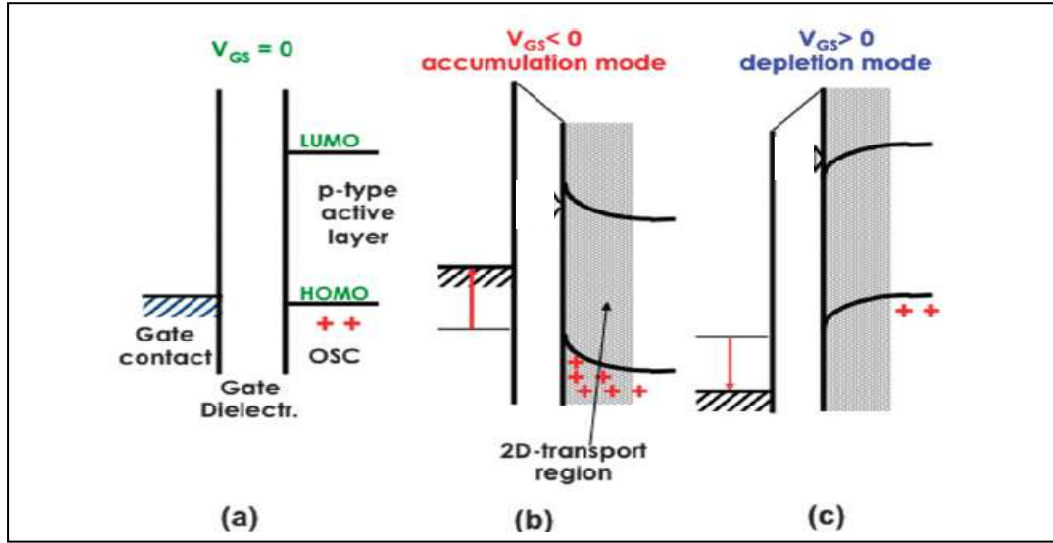


الشكل (11-2) يوضح حالة التشغيل وانتقال الشحنة في الترانزستور العضوي بنوعيه. [181]

بما أن معظم البوليمرات المترافقة وبالأخص شبه الموصل العضوي الذي تم اختياره لإجراء هذه الدراسة هي من النوع الموجب (p-type)، ستركز شرح المفاهيم الأساسية على هذا النوع من المواد العضوية. إن مخطط حزم الطاقة لمعدن قطب البوابة وعازل البوابة والطبقة الفعالة في حالة عدم وجود انحياز $V_{gs}=0$ تسمى الحزم المستوية (flat bands) وهي مبينة في الشكل a-) (12-2)، ويرجع السبب في ذلك إلى وجود القليل من الشحنات الممنوحة من الأقطاب أو إلى وجود العيوب البلورية أو بعض الشوائب غير المرغوب فيها أي الملوثات في الطبقة شبه الموصلية. يوضح الشكل (b-12-2) ما يحدث في السطح البيني عازل-شبه موصل عند تسليط انحياز سالب على البوابة والذي يولد بئر جهد يسمح باقتناص الشحنات الموجبة وتراكمها في حالة تسمى التجميع Accumulation mode، وتتشكل قناة التوصيل بين قطبي المصدر والمصرف. إن المجال المتولد من تسليط V_{ds} يسمح بانتقال حاملات الشحنة من قطب المصدر إلى قطب المصرف عبر قناة التوصيل.

ويعتمد تركيز الشحنات المتجمعة أساساً على قيمة V_{gs} السالبة المسلطة وبالتالي تيار قناة أعلى. وإذا تم تسليط جهد بوابة موجب فإن المجال يسبب انحناء في أطراف حزم الطاقة لأشبه الموصلات (المدارات HOMO و LUMO) للأعلى، مما يسبب في تسارع الشحنات الموجبة للانتشار في المدى الحجمي لشبه الموصل كما في الشكل (c-12-2) ثم يتم استنزاف منطقة القناة وينخفض تدفق تيار القناة في حالة تسمى الاستنزاف Depletion mode. تتم عملية نقل الشحنة في شبه الموصل متعدد البلورات polycrystalline عبر منطقة القناة بواسطة عملية القفز بين المستويات المتمركزة الموجودة داخل فجوة الطاقة (فجوة الطاقة بين المستويات HOMO و LUMO) لشبه الموصل العضوي. تتكون هذه الأغشية في الواقع من أنظمة حزم غير

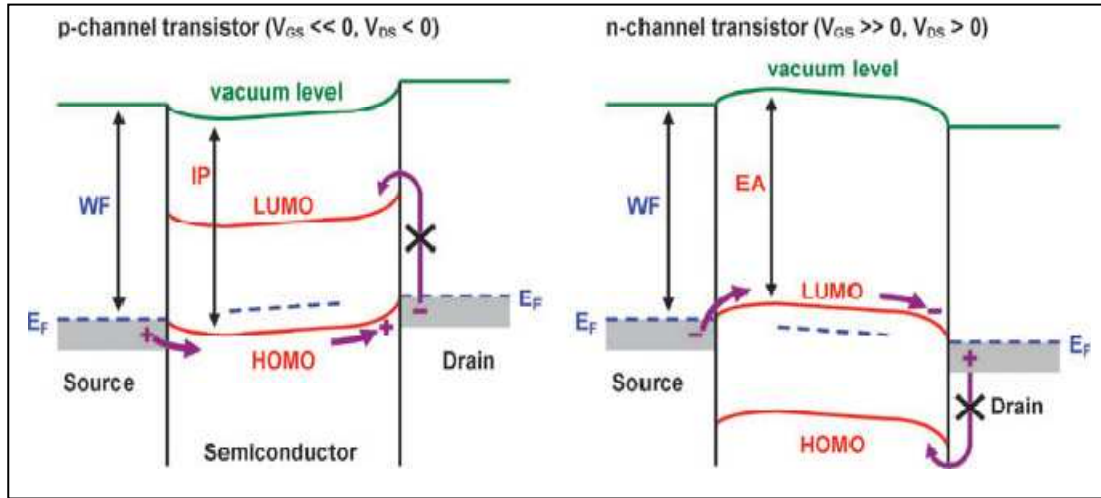
متموضعة ضيقة مرتبطة بتركيز عال من مستويات الطاقة الإلكترونية المنخفضة المتمركزة الناتجة عن التشعب والتي تقع في فجوة الطاقة وتتصرف كمستويات قانصة منخفضة التحركية.



الشكل (2-12): مخطط حزم الطاقة لقطب البوابة وعازل البوابة والطبقة الفعالة للترانزستور. [182]

اذ تنشأ مستويات المصائد على الأرجح من الشوائب أو العيوب الهيكلية الموجودة في الحبيبات البلورية أو على حدودها. إن المستويات المتموضعة في فجوة شبه الموصل بمثابة مستويات مصائد أو مشوبة تبعاً لكيفية استقرار جذور الايونات الموجبة أو السالبة أو متعادلة بطريقة تقارب فعالة لمستوي متموضع الى مستوي الجزيئية غير المتموضع. في الواقع إن المصائد عميقة وهي مستويات واطئة التحركية (بعيداً عن حواف المستويات غير المتموضعة). وان حاجز الطاقة بين الحبيبات يتناسب مع الكثافة السطحية لمصائد الشحنة في حدود الحبيبات ذاتها. يحدث النقل داخل الحبيبات وعبر الحدود في المواد متعددة البلورة، عموماً ان عملية التنفيق Tunneling عبر حدود الحبيبات تكون أبطأ والتي تتسبب بتحركية محدودة بواسطة الانبعاث الحراري فوق حاجز الجهد في حدود الحبيبات. كما أن تسليط V_{gs} من شروط حدوث تجميع الشحنة ولكن تدفق I_{ds} لا يبدأ حتى الوصول الى عتبة جهد البوابة (V_{th}). وهذا يشير الى الدور الرئيسي لانحياز البوابة لتشغيل الترانزستور. تكون V_{th} مساوية إلى (Q_{deep}/C_i) في ترانزستورات الأغشية الرقيقة، حيث Q_{deep} هي كثافة الشحنات التي حقنت أولاً في القناة واقتصت، في حين C_i هي سعة العازل الكهربائي لوحدة المساحة. إذن V_{th} هو جهد البوابة اللازم لحدث الشحنات المطلوبة (Q_{deep}) لتعبئة مستويات طاقة المصائد العميقة بالكامل. ان المصائد يتم ملؤها مرة واحدة ويمكن أن تندفع الشحنة المحقونة بعد ذلك على طول المدار الجزيئي غير المتموضع خلال القناة تحت تأثير انحياز V_{ds} لتشارك بتحركية الترانزستور. [182-183]

خلافًا لما هو الحال في أشباه الموصلات غير العضوية فإن حالة الانعكاس لا تحدث في ترانزستورات تأثير المجال العضوي. وذلك يعود إلى سببين رئيسيين أولهما إن عملية حقن حاملات الشحنة الأقلية (الإلكترونات في حالة أشباه الموصلات الموجبة) هي عملية غير ممكنة. كما هو مبين في الشكل (2-13)، ويرجع ذلك إلى حاجز جهد الحقن الكبير الموجود في قطب المصدر. والسبب الآخر هو أن حاملات الشحنة الأقلية الموجودة في شبه الموصل العضوي لن تكون قادرة على التحرك بسبب اقتناصها في المادة. وبالتالي فإن تيار التوقف ينتج عن التوصيل الحجمي لحاملات الشحنة الأغلبية، ويرجع ذلك في الغالب إلى تيار التسرب أو التشويش غير المتعمد (الملوثات). إن موقع حاملات الشحنة الأغلبية هو بالقرب (مسافة 1-3nm) من السطح البيني لشبه الموصل مع الطبقة العازلة للبوابة، حيث تكون تحركية حاملات الشحنة أعلى ما يمكن. وهذا يعني أنه بالنسبة لأشباه الموصلات النقية سيكون هناك تيار حجمي لا يكاد يذكر، وإن التوصيل عائد إلى الشحنات المتجمعة فقط في المسافة القليلة الأولى من السطح البيني. إذا كان شبه الموصل مشوب سيكون هناك كثافة شحنة حجمية لا تهمل في شبه الموصل تعطي التوصيل الحجمي. [184-186]



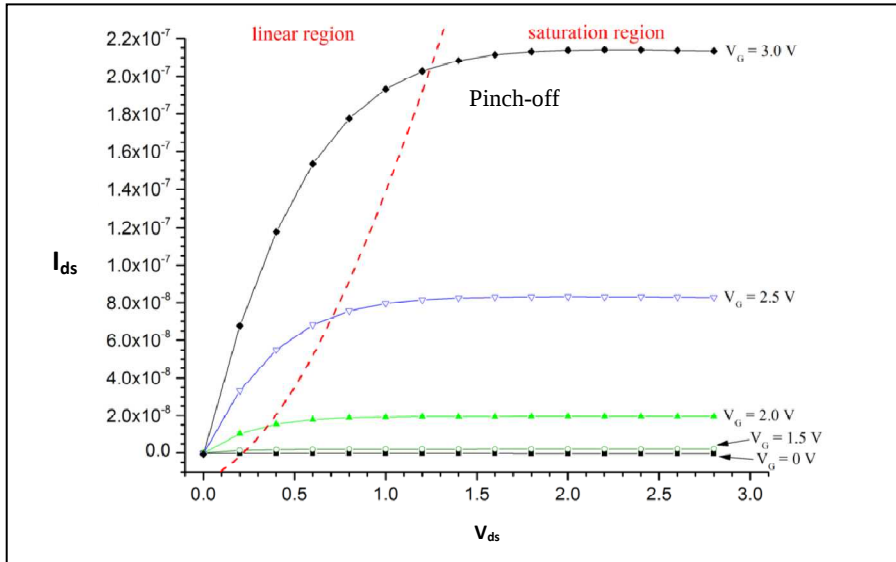
الشكل (2-13) يوضح عمليتي حقن الشحنة واستنزافها في قناة الترانزستور. [184]

7.2- التوصيف الكهربائي للترانزستور OFET:

إن أداء ترانزستور تأثير المجال العضوي يتم تحديده عن طريق إيجاد المعاملات المرتبطة بهذه النبطية وهي تحركية حاملات الشحنة $mobility$ والنسبة I_{on}/I_{off} وجهد العتبة V_{th} ، والتي يمكن تحديد قيمتها من الخصائص النموذجية التي يتم الحصول عليها عند قياس الخواص الكهربائية لهذه النباط، ويمكن تعريف منحنيين لتوصيف الترانزستور كهربائياً هما ممیزتا الخرج والتحويل.

1.7.2-خصائص الخرج: (Output Characteristic)

تصف ميزة الخرج لترانزستور تأثير المجال بسلوك تغير تيار المصدر-المصرف (I_{ds}) اعتماداً على تغير انحياز جهد المصدر-المصرف (V_{ds}) (أي $I_{ds}=F(V_{ds})$) عند قيم مختلفة من جهد البوابة-المصدر (V_{gs}). ويمكن تمييز منطقتين رئيسيتين في سلوك التيار I_{ds} خلال المدى الكامل من تغير V_{ds} ، أولهما منطقة الزيادة الخطية الاومية وتليها منطقة الاشباع في منحنيات ميزة الخرج في ترانزستور تأثير المجال العضوي القائم على شبه موصل موجب. لكل جهد مسلط على قطب البوابة في مدى فولتيات V_{ds} المنخفضة يتناسب تيار I_{ds} مع V_{ds} طردياً بحسب قانون اوم وتسمى هذه المنطقة بالمنطقة الخطية Linear region (وهي تصف طبيعة الاتصال بين المادة شبه الموصلة وكل من القطبين المصدر والمصرف)، ومع زيادة V_{ds} يحدث تناقص في الجهد على قطب المصرف الى أن يهبط الى (0 V) عند النقطة التي عندها يقترب الجهد V_{ds} من V_{gs} وتسمى نقطة قرصة (أو انحصار أو تضيق) القناة (Pinch-off point) ومن هنا تكون قيمة تيار القناة ثابتة لا تعتمد على قيمة الجهد V_{ds} المسلط، وتسمى هذه المنطقة بمنطقة الإشباع Saturation region. كما هو مبين في الشكل (14-2) خط متقطع يشير إلى مكان الجهد V_{ds} التي يصل فيها التيار إلى قيمته القصوى.



الشكل (14-2) يبين ميزة الخرج لترانزستور تأثير المجال.

يمكن توصيف علاقة تيار القناة عند المنطقة الخطية $I_{ds,lin}$ أي عندما ($V_{ds} < V_{gs} - V_{th}$) كالآتي:

[189]

$$I_{ds,lin} = \frac{W}{L} \mu_{lin} C_i (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} \dots \dots \dots (2-17)$$

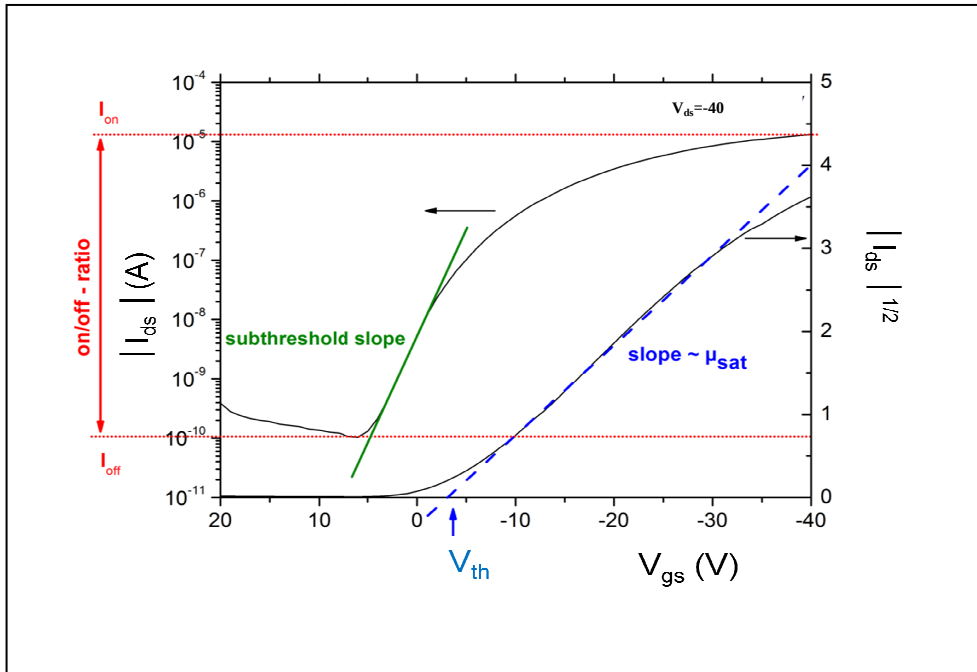
وتيار القناة عند منطقة الإشباع $I_{ds,Sat}$ أي عندما $(V_{ds} > V_{gs} - V_{th})$ [189]

$$I_{ds,Sat} = \frac{W}{2L} \mu_{Sat} C_i (V_{gs} - V_{th})^2 \dots \dots \dots (2-18)$$

حيث V_{th} و V_{gs} و V_{ds} هي الفولتيات المسلطة بين المصدر والمصرف وبين المصدر والبوابة وجهد العتبة بحسب الترتيب، μ_{lin} و μ_{Sat} تحركية حاملات الشحنة عند المنطقتين الخطية والإشباع بحسب الترتيب، و C_i سعة عازل البوابة لوحدة المساحة، و W, L هما طول قناة التوصيل وعرضها بحسب الترتيب.

2.7.2- خصائص التحويل: (Transfer Characteristic)

تصف مميزة التحويل طبيعة تغير تيار المصدر-المصرف (I_{ds}) اعتمادا على تغير انحياز جهد البوابة-المصرف (V_{gs}) (أي $I_{ds} = F(V_{gs})$) عند قيمة ثابتة من جهد المصدر-المصرف (V_{ds})، كما مبين بالمنحني شبه اللوغارتمي الأزرق في الجهة اليمنى من الشكل (2-15)، والذي يضم كذلك رسم العلاقة بين V_{gs} والجذر التربيعي للقيمة المطلقة لتيار القناة (الجهة اليمنى من الشكل)، وهذه الميزة ذات أهمية كبيرة لكون جميع المعاملات الرئيسية لوصف الأداء الكهربائي للترانزستور يتم حسابها من خلال هذه الميزة. (187-192)



الشكل (2-15) يبين ميزة التحويل لترانزستور تأثير المجال.

8.2-المعاملات الرئيسية لترانزستور تأثير المجال العضوي:

(Field Effect Mobility)

1.8.2-التحركية تحت تأثير المجال:

تتأثر الشحنة الكهربائية q عند تسليط مجال كهربائي E بقوة تعرف بقوة لابلاس ($F=qE$)، وهذه القوة لها القدرة على تحريك الشحنة في الفراغ بحرية ومن دون إعاقة. وبالتالي ستزيد السرعة والتعجيل، ولكن في الوسط المادي هذه الشحنات تتصادم مع مكونات المحيط لتجعل السرعة تستقر. إن معدل السرعة v يتناسب مع المجال الكهربائي المسلط ($v = \mu E$)، وبالتالي فإن التحركية μ تصف فعالية الحركة لنقلات الشحنة داخل مادة شبه الموصل تحت تأثير مجال كهربائي. يحدث هذا الانتقال في حالة OFET بشكل رئيسي في السطح البيني الفاصل بين العازل وشبه الموصل. وبالتالي فإن نوعية السطح سوف تؤثر بشكل كبير على التحركية، وكذلك تتأثر التحركية بالسطح البيني القطب-شبه الموصل. ونتيجة لذلك، فإن التحركية المحسوبة هي أقل من التحركية الجوهري للمواد شبه الموصلة. التحركية يعبر عنها بالوحدات (cm^2/Vs) وهي من أهم المعاملات في الترانزستور. ويمكن حساب قيمتها في الحالتين الخطية والإشباع من ميزة التحويل والاستفادة من المعادلات (2-19, 2-20). إن ارتفاع التحركية وارتفاع التيار يعني الاستجابة السريعة للترانزستور، وهي عموماً أقل بكثير للمواد العضوية منها في المواد غير العضوية مثلاً للسيليكون البلوري تبلغ ($10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) مقارنة مع التحركية ($0.01-1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) في الأغشية العضوية الرقيقة. وكما في العلاقتين السابقتين فإن تحركية حاملات الشحنة في المنطقة الخطية يمكن تمثيلها بالعلاقة [57, 193-194]

$$\mu_{\text{lin}} = \frac{L}{WC_i V_{\text{ds}}} \frac{\partial I_{\text{ds}}}{\partial V_{\text{gs}}} \dots \dots \dots (2 - 19)$$

وتحركية حاملات الشحنة عند منطقة الإشباع :

$$\mu_{\text{Sat}} = \frac{2L}{WC_i} \left(\frac{\partial \sqrt{I_{\text{ds}}}}{\partial V_{\text{gs}}} \right)^2 \dots \dots \dots (2 - 20)$$

2.8.2-النسبة بين تيارى التشغيل والإطفاء: ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$)

تعد النسبة بين تيار القناة في حالتي التشغيل والإطفاء ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$) من المعاملات الهامة والتي يمكن استخراجها بصورة عملية من خصائص التحويل والمبينة بالشكل (2-15). للحصول على ترانزستور عالي الأداء يجب أن تكون قيمة هذه النسبة أعلى ما يمكن. لأنه يحدد كفاءة الترانزستور كمفتاح كهربائي خاصة في تطبيقات الدوائر المنطقية، لأنه كلما كانت النسبة أكبر

سيكون من الأسهل الانتقال بين حالتي التشغيل والإطفاء وتصل في أفضل النبائط إلى 10^8 . وتعتمد قيمة تيار الإطفاء I_{off} على نقاوة الطبقة الفعالة وكفاءة الطبقة العازلة في منع تيارات التسرب، أما تيار التشغيل I_{on} فيعتمد بعد إهمال المقاومة بين قطبي S, D والطبقة الفعالة على تحركية حاملات الشحنة في القناة وأبعاد القناة W, L وسعة عازل البوابة (كثافة حاملات الشحنة المتجمعة). [57, 65, 195-196]

3.8.2- جهد العتبة: Threshold Voltage (V_{th})

جهد العتبة هو الحد الأدنى من جهد البوابة والذي عنده يبدأ تدفق تيار القناة، وفي الحالة المثالية يكون جهد العتبة اقرب ما يكون الى الصفر (قيمه سالبة في حالة التوصيل بالفجوات). يمكن استخراج قيمة جهد العتبة مباشرة من خصائص التحويل، وتكون قيمته مساوية لجهد البوابة عند نقطة تقاطع مماس منحنى الجذر التربيعي لتيار القناة مع محور V_{gs} كما مبين بالشكل (2-15). يتأثر جهد العتبة بقوة بوجود المصائد في السطح البيني بين الطبقة الفعالة والطبقة العازلة بصورة طردية وكثافة الشحنات المتراكمة بعد امتلاء هذه المصائد (أي سعة المادة العازلة). وللتمكن من دمج الترانزستورات في التطبيقات ولغرض التقليل من استهلاك الطاقة يفضل أن يكون جهد العتبة اقل ما يمكن، وان استقرارية جهد العتبة مع التشغيل المتكرر أمر مهم والذي قد ينتج عن تشغيل الجهاز في مديات زمنية متباعدة مما يتسبب بظاهرة الهسترة للتيار والتي تؤثر في أداء الجهاز. إن التغيرات الكبيرة والثابتة في جهد العتبة قد تنتج عن ظاهرة الاستقطاب في العوازل والمتعلقة بالعوازل الفيروكهربائية (مثل البوليمر (P(VDF-TrFE)) او PVA والتي تضيف جهد إضافي إلى جهد البوابة يؤدي إلى ظاهرة الهسترة، والتي تكون مفضلة في تطبيقات الذاكرة العضوية. [196,197-200]

4.8.2- الميل تحت العتبة (أو جهد الاشباع الجزئي) (Sub-threshold Voltage (SS))

يعطي المعامل الميل تحت العتبة (أو جهد الإشباع الجزئي) معلومات عن سرعة التحول في الترانزستور بين حالتي التشغيل الى الإطفاء ويعبر عنه بالوحدة (V/decade) لأنه يمثل النسبة بين تغير جهد البوابة إلى تغير تيار القناة لكل نبضة من الزمن وقيمتها الجيدة اقل من (1V/decade). وكلما كانت قيمة الميل اقل كلما كانت سرعة التحول أعلى وبالتالي يكون ذات أداء مرغوب أكثر في التطبيقات. ويمكن حساب SS من ميل المماس للمنحنى اللوغارتمي لتيار القناة في خصائص التحويل المبينة بالشكل (2-15). يعتبر الميل تحت العتبة من المعاملات الحرجة للترانزستور العضوي في تطبيقات المفتاح الكهربائي مثل دائرة التحكم بشاشات

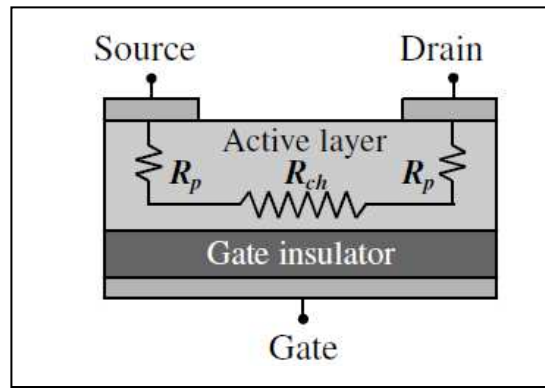
OLED او الدوائر المنطقية، ويتأثر بنوع البنية الهندسية للنبیطة وكذلك وجود الشوائب ومصاد الشحنة. [69, 201-203]

5.8.2-مقاومة الاتصال: (Contact Resistant- R_C)

إن مقاومة الاتصال للسطح البيني بين قطبي S, D والطبقة الفعالة تحد من عمليتي حقن واستنزاف الشحنة (Injection& depletion processes) في ترانزستورات الأغشية الرقيقة العضوية، وبالتالي تقلل سرعة تشغيل الجهاز والدائرة وانخفاض التحركية. يكون الوضع أكثر تعقيداً في الأجهزة البوليمرية، وذلك لأن البوليمرات لا يمكن أن ترسب تحت الضغط المخلخل، على عكس الجزيئات الصغيرة والألومرات، وبالتالي فهي أكثر عرضة لتشكيل السطوح البينية غير النظيفة بتأثير الانتشار أو التفاعل الكيميائي. ان المقاومة الكلية في OFET هي محصلة جمع مقاومة الاتصال ($R_C=R_p+R_p$) ومقاومة القناة R_{ch} والأخيرة تتناسب طردياً مع طول القناة ومقاومة الاتصال لا تعتمد على طول القناة، ويمكن تمثيلها بالعلاقة التالية:

$$R = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}} \bigg|_{V_{gs} \rightarrow 0} = R_{ch} + R_c = \frac{L}{W\mu C_i (V_{gs} - V_{th})} + R_c \dots \dots (2 - 21)$$

ووجد ان المقاومة الكلية للنبیطة تعتمد على جهد البوابة. وتعتمد مقاومة الاتصال على نوع معدن الأقطاب (دالة شغل المعدن). ويبين الشكل (16-2) المقاومات في التركيب الهندسي للترانزستور العضوي. [204-206]



الشكل (16-2) يوضح المقاومات في OFET. [204]

9.2-مصادر الشحنة: (Traps)

تنشأ المصاد في سطح شبه الموصل-عازل في كل من شبه الموصل والطبقة العازلة. عند وجود الشوائب في غشاء أشباه الموصلات فإنها تعرقل الشبكة البلورية البدائية وتخلق مستويات إضافية والتي تجتاح بقوة فجوة الطاقة. بالإضافة إلى إن العيوب الهيكلية الناتجة عن الإزاحة

الجزئية من موضع التوازن يحفز الاختلاف الموضعي في تكامل النقل، الأمر الذي يؤدي أيضا إلى تشكيل مستويات مصائد، وان عمق وكثافة المصائد ترتبط مباشرة مع العيوب الهيكلية. الاختلال الجزئي للجزئيات العضوية يتجمع في الطبقة الأولى، ويقلل من الأداء الكهربائي للترانزستور عن طريق زيادة كثافة المصائد في فجوة الطاقة لشبه الموصل. [207]

كما إن تغير جهد العتبة بالاعتماد على الزمن هو عادة كدالة أسية، وليس هناك اتفاق على الآلية المجهرية وراء هذا التأثير. بل هناك عدة مؤثرات مقترحة لتفسير هذا السلوك منها:

- (a) مصائد حاملات الشحنة المتنقلة (حجميا) في أشباه الموصلات.
 - (b) مصائد حاملات الشحنة في مناطق الاضطراب لأشباه الموصلات.
 - (c) مصائد حاملات الشحنة في المناطق بين الحبيبات البلورية لأشباه الموصلات.
 - (d) مصائد حاملات الشحنة في مستويات السطح البيني لأشباه الموصلات-عازل البوابة.
 - (e) اقتران حاملات الشحنة المتحركة الى بولورون مزدوج في أشباه الموصلات.
- ويمكن أن يحدث التأثير من خلال الرطوبة وتأثير الإثارة الحرارية، بصورة مستقلة عن أشباه الموصلات العضوية المستخدمة وقد ينتج بروتونات في الترانزستورات الموجبة القناة من الفجوات والماء في منطقة التجميع في شبه الموصل ثم تنتقل الى الطبقة العازلة. [208-209]

إن آلية التوصيل في أشباه الموصلات العضوية تختلف عنها في غير العضوي. وذلك يعزى الى قوى الارتباط الداخلية الضعيفة بين الجزئية في أشباه الموصلات العضوية، إضافة الى طبيعة تشكيل حزم الطاقة قليلة الكثافة، وتتحرك حاملات الشحنة بالية القفز. اذ يمكن أن يلاحظ في البلورات الجزئية في درجات الحرارة المنخفضة فقط انتقال يشبه لحد ما آلية الحزمة. ان كون أشباه الموصلات العضوية هي في الأساس مواد جزئية صلبة، حتى في حالة أشباه الموصلات البوليمرية، فإن تأثير المواد العازلة الكهربائية على عملية انتقال الشحنة والتحرية اكبر بكثير من المواد غير العضوي. ويعود السبب في ذلك الى أمرين أولهما يمكن للعازل الكهربائي ان يؤثر على طبيعة تشكل سطح المادة شبه الموصلة واتجاه الشرائح الجزئية، من خلال عملية التأثير المتبادل مع المادة العازلة وخاصة في تركيب البوابة السفلى. وثانياً قد تتأثر حدة وخشونة السطح البيني بالمادة العازلة نفسها وشروط الترسيب والمذيبات المستخدمة.

وتشير الدراسات إلى إن خشونة السطح البيني هي معامل رئيسي في OFET. إذ تؤدي زيادة الخشونة إلى تشكل تعرجات في منطقة القناة، والتي قد تكون بمثابة مصائد للشحنات. وكذلك تمنع الخشونة نمو غشاء بلوري متجانس ويؤثر على كثافة البلورات في المواد متعددة البلورة. آخر

تأثير مثير للاهتمام في OFET هو اعتماد التحركية على جهد البوابة، ومن ثم يؤدي إلى تغير جهد العتبة، والذي يمكن أن يضاف إلى تأثيرات سطح الطبقة العازلة.

وهناك احتمال آخر هو أن تركيز حاملات الشحنة المحتثة عبر العازل ينظم التحركية نفسها عن طريق تغيير مستوى الإشغال لكثافة حالات السطح البيئي. في الوقت نفسه، فإن مجال البوابة قد يجبر حاملات الشحنة على الانتقال في المنطقة المجاورة للسطح ببعدين (2D)، بدلاً من السماح لها بتحسين انتقالها بمسارات أكثر كفاءة خلال المنطقة الحجمية (3D). إن السعة العالية هي صفة مرغوبة عادة للعازل، لأنها تسمح بتخفيض جهد العتبة وجهد التشغيل، ويتم تحقيق هذا من خلال مجال البوابة المنخفض. وقد يعكس جهد العتبة بنية الشحنة الداخلية، ولكنها أيضاً مقياس لحالات السطح البيئي كوجود المجاميع أو المواقع الكيميائية غير المرغوب فيها على المادة العازل نفسها أو الشوائب الملوثة، والتي تنتج مباشرة مصائد داخلية للشحنة. وإن استقطابية السطح البيئي للمادة العازلة تلعب دوراً هاماً، لأنها يمكن أن تؤثر موضعياً في تشكيل السطح أو توزيع المستويات الإلكترونية في المادة شبه الموصلة العضوية. [210-211]

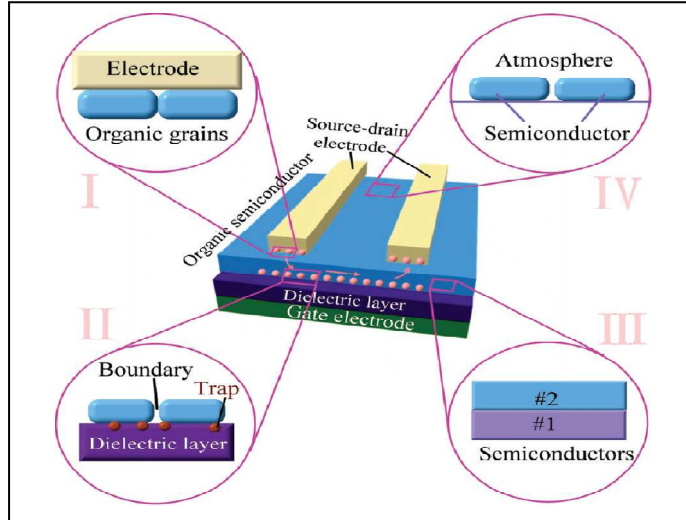
10.2- أهمية سطوح الاتصال بين المواد المختلفة:

إن أداء الترانزستور من النوع OFET يعتمد على الخصائص الجزيئية لأشباه الموصلات العضوية، كما أنه يتأثر بشكل كبير بطبيعة السطوح البينية الموجودة في بنيته التركيبية. إذ بينت الدراسات السابقة أن تحسين تحركية حاملات الشحنة في الترانزستورات العضوية لها فائدة خاصة، وتتجلى هذه الصفة في السطحين الفاصلين. إن نقل الشحنات في ترانزستورات تأثير المجال العضوية هو ظاهرة معقدة، بالإضافة إلى تعقيد التوصيل في أشباه الموصلات العضوية، فهناك ظواهر أخرى محددة للتحركية متعلقة بتركيب الترانزستور تخفض كفاءة أدائه. لذا فإن السطوح البينية لأشباه الموصلات مع المواد الأخرى التي تشكل الترانزستور ستكون محل النقاش. لوحظ من أنواع البنية المختلفة لترانزستورات تأثير المجال التي نوقشت مسبقاً في الفصل الأول، إن طبقة شبه الموصل في الترانزستور العضوي تكون في اتصال مباشر مع قطبي المصدر والمصرف من جهة وطبقة عازل البوابة من جهة أخرى. إن السطح البيئي الفاصل (معدن-شبه موصل) على مستوى الاتصال سوف يؤدي دوراً رئيسياً في حقن الشحنات في أشباه الموصلات في حين أن السطح البيئي (شبه الموصل-العازل) هو المسؤول عن تجميع الشحنات ونقلها في القناة. بالنتيجة فإن هندسة السطوح تمثل نهجاً جديداً نحو تحسين أداء الترانزستور OFET مما اكتسبها اهتماماً كبيراً. هنا نركز على التطورات الحديثة في دراسة السطوح البينية الداخلية في البنية التركيبية OFET المتمثلة بسطح أقطاب التوصيل -الطبقة

العضوية الفعالة وكذلك سطح الطبقة العازلة- الطبقة العضوية الفعالة. إن كل سطح له دور في تحسين أداء الجهاز وتعزيز الاستقرار والمساهمة في الحصول على ترانزستورات عضوية مفيدة في مجال تطبيقي معين. إن التركيز على تصنيع أقطاب معدنية مختلفة المعدن لترانزستور تأثير المجال، ووصف طريقة التعديل له دور فعال كما هو الحال في تأثير الشكل الخارجي والتركيب الداخلي (Morphology) للقطب وكل طبقة في تركيب الترانزستور، نحصل على نتائج جديدة نحو الأداء العالي للترانزستور منخفض التكلفة.[212]

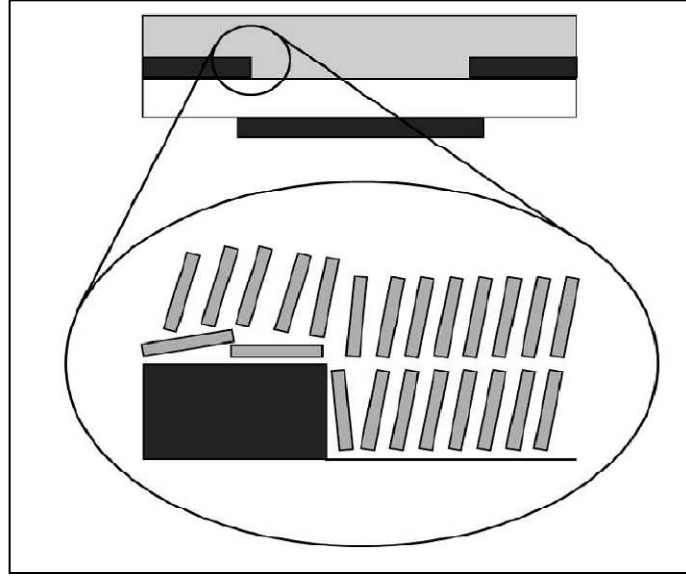
كما إن السطح الفاصل الطبقة العازلة-الطبقة العضوية الفعالة هو سطح فعال يهيمن على انتقال حاملات الشحنة، وبالتالي فإن تعديل هذا السطح يوفر وسيلة هامة لتحسين انتقال حاملات الشحنة وفقاً لذلك. تؤثر مواصفات الطبقة العازلة أيضاً على استقرار جهاز OFET. نال موضوع الأسطح الفاصلة بين (الطبقة العضوية الفعالة-الطبقة العازلة) اهتمام البحوث الحديثة لترانزستور OFET.

التركيب الطبقي للسطوح (العضوية-العضوية) مثلاً على التراكيب متعددة الوصلة من مواد عضوية مختلفة والتي يمكن من خلالها تحسين أداء النبيلة. ويتجلى ذلك من خلال تصميم طبقات متعددة من مواد مختلفة لتصنيع ترانزستور تأثير المجال العضوي. شهدت الأعوام القليلة السابقة تقدماً كبيراً في هندسة السطح البيني لترانزستور OFET، توفر طرقاً بسيطة ولكن أكثر فعالية نحو تصنيع OFET عالية الأداء، لغرض الاستمرار في تقديم مساهمات أساسية في تطوير الأجهزة القائمة على OFET. تم اكتشاف تطبيقات هندسية جديدة تستحق مزيداً من الاهتمام من خلال فهم تام لظواهر السطح. ويوضح الشكل (2-17) السطوح البينية المهمة في البنية التركيبية لترانزستورات الأغشية الرقيقة. حيث يمثل (I) السطح البيني قطب-شبه موصل، أما (II) فيبين السطح عازل- شبه موصل متعدد البلورة، في حين (III) يوضح السطح عازل- شبه موصل أحادي البلورة و (IV) هو السطح الخارجي لشبه موصل مع البيئة المحيطة في التركيب BG-TC للترانزستور العضوي. [213-214]



الشكل (17-2) يوضح السطوح البينية في البنية التركيبية لترانزستورات الأغشية الرقيقة. [214]

إن مفهوم طبقة التجميع الذاتي الأحادية (Self-Assembled Monolayer-SAM) يعني قابلية المادة على تشكيل طبقة أحادية الجزيئة ذات درجة انتظام ذاتية عالية في منطقة التماس مع السطح المرسب عليه. إن مقاومة الاتصال في الإلكترونيات العضوية قد تأتي من شكل السطح وطبيعة التماس بدلا من محاذاة مستوى الطاقة. وذلك يوضح أهمية نوع بنية الجهاز على أدائه النهائي، فالترانزستورات بتركيب الاتصالات العليا (Top-Contact-TC) لديها أداء أفضل من ناحية التحركية وجهد العتبة على نبائط الاتصالات السفلى (Bottom-Contact-BC). ويمكن أن يعزى ذلك إلى إن التركيب البلوري المرسب يتأثر بخصائص سطح المرسب عليه. يوضح الشكل (18-2) تأثير البنية الهندسية BC على تشكيل غشاء المادة شبه الموصلة، إذ إن هناك نوعين من الاختلال في الطبقة الجزيئية، حيث يواجه نموها انقطاعا في الطاقة السطحية بتأثير القاعدة. وتميل الجزيئات للاصطفاف راسيا على سطح الطاقة السطحية المنخفضة للطبقة العازلة، في حين أنها امتدت على السطح المعدني عالي الطاقة. إن استخدام البنية المستوية حيث يكون القطب والعازل على المستوى نفسه تمثل إحدى الحلول لمعالجة اتساع الاختلال. وإن تعديل سطح القطب لتقليل الطاقة السطحية تعتبر طريقة أخرى، والتي تم القيام بها باستخدام طبقة التجميع الذاتي الأحادية (Self-Assembled Monolayer-SAM). ولا تواجه بنية الاتصال العليا TC هذه المشكلة، فأشبه الموصلات العضوية ترسب على سطح مستوي متجانس حيث يمكن للجزيئات أن تبني بتكوين عالي الانتظام على المنطقة بأكملها. [215-220]



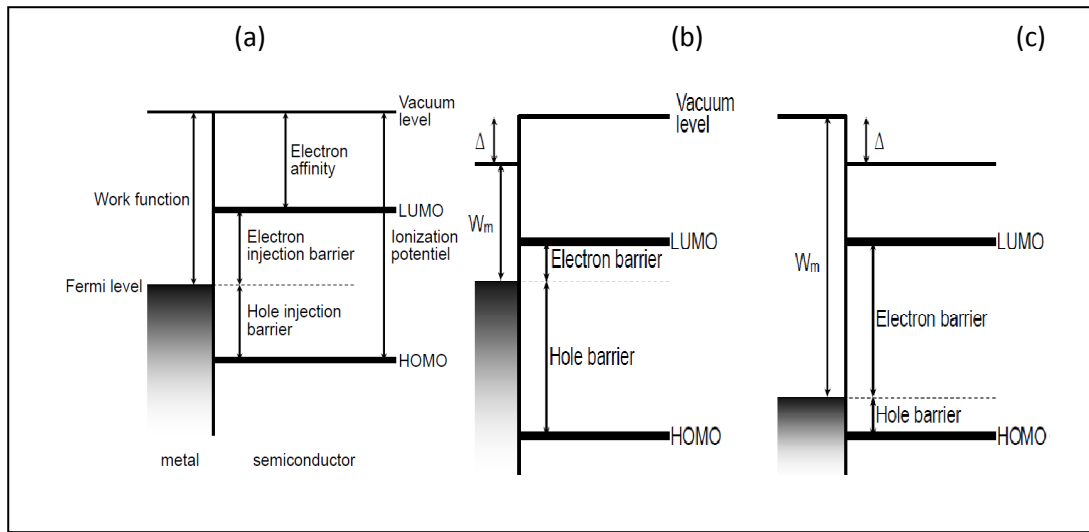
الشكل (2-18) يوضح طبيعة الاصطافاف الجزيئي عند تشكيل الغشاء شبه الموصل. [216]

1.10.2- سطح اتصال (معدن-شبه موصل):

إن تحركية ناقلات الشحنة في ترانزستورات تأثير المجال العضوية تعتمد بشكل كبير على السطح البيني الفاصل بين معدن-شبه موصل عضوي، والذي يؤدي الدور الأساس في عملية حقن حاملات الشحنة وانتقالها من المصدر إلى طبقة شبه الموصل العضوية ثم إلى المصرف بحسب طبيعة الاتصال بينها. بالمقارنة مع السطح البيني الصلب-الفراغ، أي السطح النظيف، والمحدد جيداً للمادة الصلبة، السطوح الصلبة الأخرى ذات أهمية عملية أكثر بكثير. فالسطوح الصلبة-السائلة على سبيل المثال، تؤدي دوراً رئيسياً في الكيمياء الكهربائية والفيزياء الحيوية. إن دراسة تلك السطوح خاصة في مجال الكيمياء الفيزيائية. وتهتم الفيزياء الصلبة وفيزياء السطوح بدراسة السطوح الصلبة-الصلبة، وأحد الأسباب هو الأهمية البالغة للسطوح البينية للمعادن مع أشباه الموصلات ووصلات أشباه الموصلات المتغيرة في فيزياء الأجهزة. توجد وصلات المعادن-أشباه الموصلات في كل جهاز يحتوي في تركيبه على اتصال للمعادن مع أشباه الموصلات. وفي الوقت نفسه أشباه الموصلات متعددة الوصلة هي مهمة في الأجهزة الضوئية مثل أجهزة أشعة الليزر والترانزستورات غير المتجانسة hetero-bipolar transistors وترانزستورات تأثير المجال المنتجة بتراكيب تحتوي طبقة أشباه الموصلات للتطبيقات المتنوعة، وشهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً بهذه السطوح المستخدمة في التطبيقات المهمة.

يعتمد أداء الترانزستور العضوي على كيفية حقن الشحنة في شبه الموصل إضافة إلى آلية انتقال الشحنة داخل القناة، وهذا محدد بالشحنات التي تتدخل في عملية نقل الشحنة والمتدفقة حصرياً من الأقطاب الكهربائية. وهذا يعني أن حقن الإلكترونات يحدث في المستوى LUMO بالنسبة

للترانزستور ذي القناة السالبة، أما الترانزستور ذو القناة الموجبة فحقن الفجوات في مستوى HOMO. ويجب أن تكون الاتصالات أومية من الناحية المثالية، وهذا يمكن من توفير أي نوع من حاملات الشحنة في جهد منخفض. عملياً فإن الأقطاب في الترانزستورات العضوية هي نتيجة للاتصال المباشر بين شبه الموصل ومعدن من دون أي تشويب لأشباه الموصلات، على النقيض مما وجد في نبائط السيليكون. تحت مثل هذه الظروف فإن اختيار حقن الفجوات أو الإلكترونات يتوافق مع الفرق بين المستويات HOMO و LUMO ومستوى فيرمي لمعدن القطب، كما هو موضح في الشكل (a-19-2). وقد تكون الصورة الواردة في الشكل معدله من خلال وجود ثنائيات قطب السطح البيني التي تحدث على تغيير مستوى الفراغ في كلا جانبي السطح البيني. تأثير ثنائيات القطب مهم بشكل خاص عندما يقترب مستوى فيرمي من حواف الفجوة بين HOMO-LUMO. لهذا السبب فإن حواجز الحقن لا يمكن أن تكون أقل من الحد الأدنى الذي يقدر بنحو (0.2 eV). وآلية تحديد مستوى فيرمي موضح في الشكل (b, c-19-2)، حيث W_m هي دالة شغل معدن القطب و Δ سطح ثنائي القطب. [221-222]



الشكل (19-2) مخطط يوضح حزم الطاقة لوصلة معدن-شبه موصل عضوي a- مستوى فيرمي في منتصف الفجوة بين HOMO و LUMO. b- مستوى فيرمي اقرب إلى LUMO للنوع N-Type. c- مستوى فيرمي اقرب إلى HOMO للنوع P-Type. [216]

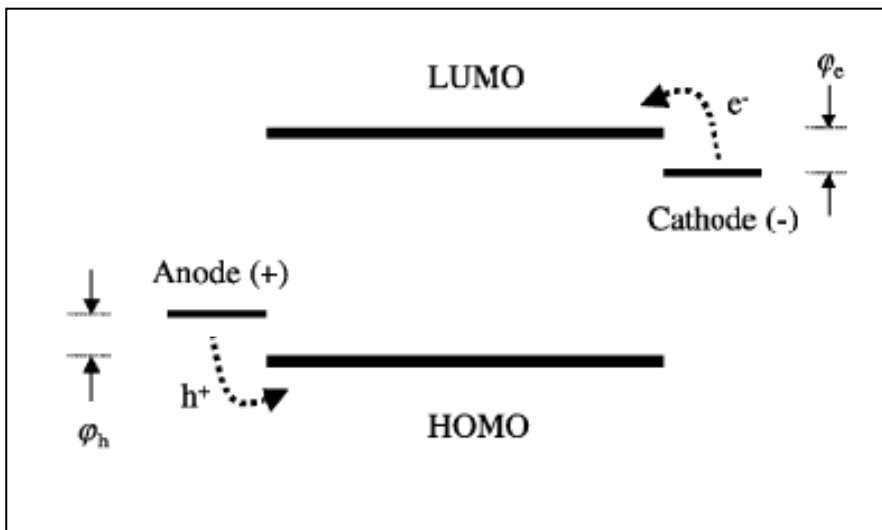
1.1.10.2-الاتصال الأومي:

إن التطورات الحديثة في تركيب المواد وهندسة السطح قد حققت تحسينات كبيرة في أداء نبيطة ترانزستورات تأثير المجال العضوي، وبشكل خاص الترانزستورات المصنعة بطرق ترسيب المحاليل، حيث يمكن تصنيعها في درجات حرارة منخفضة وعلى مساحة واسعة باستخدام تقنيات فعالة من حيث الكلفة وارتفاع الإنتاجية. العديد من العوامل تمثل بشكل جماعي أداء OFET

المصنع بطرق ترسيب المحاليل، مثل الخصائص الكهربائية الجوهرية للمادة شبه الموصلة العضوية وظروف التصنيع ودالة الشغل لمعدن القطبين المصدر والمصرف والخصائص البينية بينها وبين أشباه الموصلات. كما ان التأثير الرئيسي لخفض مقاومة الاتصال هو زيادة تيار خصائص الخرج في جهد التشغيل المنخفض. [223-225]

إن موضوع الاتصال الأومي لأشباه الموصلات مع الأقطاب هو موضوع مهم وكبير مع الكثير من الدراسات ذات الصلة التي يتعين تغطيتها. والغرض من هذا الاستقصاء هو تقديم أمثلة على الطرق الهامة لتشكيل الاتصال الأومي على أي تركيب لمواد أشباه الموصلات بدلا من تقديم أي ادعاء بمعاملة تحسين شاملة. وللحصول على فعالية أكثر في حقن الشحنات الكهربائية في النبيطة المصنعة من مواد عضوية يجب التغلب على حاجز الجهد، أي فرق الطاقة Φ_H أو Φ_e بين أعلى مدار مشغول (HOMO) /أدنى مدار جزيئي فارغ (LUMO) والسيطرة على مستوى فيرمي (E_F)، كما هو مبين بالشكل (20-2)، وبالتالي يجب تسليط جهد الانحياز بالقيمة نفسها التي تمكن من نقل (HOMO/LUMO) إلى E_F .

تستخدم الأقطاب المعدنية في جميع الأجهزة العضوية التي لحقن الشحنة إلى (أو استخراج الشحنة من) طبقة أشباه الموصلات العضوية مثل (OFET, OLED)، تسمح الأقطاب المعدنية حقن الشحنات في الطبقة العضوية. يبين الشكل (20-2) مخطط انتقال الشحنات بين مستويات الطاقة. إن عملية حقن الإلكترون تحدث من مستوى فيرمي لقطب الكاثود إلى أدنى مدار جزيئي فارغ (LUMO) من الطبقة العضوية، بعد التغلب على حاجز الجهد. في الوقت نفسه، عملية حقن الفجوة (أو استخراج الإلكترون) يحدث من مستوى فيرمي من قطب الانود إلى المستوى الأعلى (HOMO) من الطبقة العضوية. [226-228]



الشكل (20-2) مخطط انتقال حاملات الشحنات القطب الى شبه الموصل. [228]

توجد عدة طرق لتعديل السطح البيئي (قطب-شبه موصل عضوي) وبالتالي تحسين عملية حقن الشحنات، مثل تشكيل سطح ثنائي القطب بين السطوح، وكذلك عملية التشويب لأشباه الموصلات العضوية أو للسطح البيئي (المعدن-شبه موصل عضوي). أو بإضافة طبقات التجميع الذاتي الأحادية SAMs، كما ان وجود ثنائيات القطب الكهربائية في السطح يعمل على تعديل دالة الشغل للأقطاب المعدنية، اي يمكن خفضها أو رفعها مما يؤثر على كمية الشحنة المحقونة في شبه الموصل. [229]

ولتحسين كفاءة نقل الشحنة عبر السطح معدن-شبه الموصل، يجب ان يكون مستوى فيرمي للقطب المعدني بمحاذاة أعلى المدار (HOMO) لشبه الموصل نوع P أو بمحاذاة أدنى المدار (LUMO) لشبه الموصل نوع N على التوالي. وغالبا ما يتم اختيار دالة الشغل المعدن في أجهزة أشباه الموصلات العضوية لغرض تصنيع أقطاب لا تشكل حواجز جهد ضد انتقال الشحنة باتجاه الطبقة الفعالة، وهذا يعني أن يتم محاذاة مستوى فيرمي للمعدن مع الحزمة الناقلة لشبه الموصل. حيث يرتبط مستوى فيرمي إلى مستوى الفراغ في المعدن عن طريق دالة الشغل (ϕ_m) حزمة التوصيل في أشباه الموصلات تقارب χ للإلكترون)، لهذا اختيار المعدن الذي لديه دالة شغل مناسبة امر مهم. ان العثور على معدن جيد لحقن الفجوات في كثير من الأحيان ليست مشكلة. ان مجموع الألفة الالكترونية χ وفجوة الطاقة لأشباه الموصلات العضوية تقع في مدى دوال الشغل لأغلب المعادن النبيلة. ويمثل الذهب الخيار الشائع للاتصالات الاومية لحقن الفجوات. إذا كانت هناك حاجة إلى أقطاب شفافة عادة ما يستخدم ITO. الا ان العثور على معدن جيد لحقن الإلكترون هو أكثر صعوبة، لأنه من الضروري أن تكون دالة شغل منخفضة للمعدن، وكون هذه المعادن تتسبب بآثار جانبية لكونها تتفاعل بقوة، مثل استخدام الكالسيوم كأقطاب حقن للإلكترون، او يمكن أن تحقق هذه المحاذاة عن طريق إدخال طبقة حقن إضافية بين المعدن وأشباه الموصلات لتقليل مقاومة السطح. فمثلا وبسبب التوصيلية المنخفضة نسبيا للبوليمرات فإن مشتقات مثل PEDOT تستخدم كطبقة بينية اذ توفر سطح جيد بين القطب ITO والطبقة العضوية الفعالة لنقل الفجوات. [225, 230-234]

2.1.10.2- اتصال شوتكي:

وهي الحالة التي يكون فيها تصرف التيار عند الجهود الواطئة لا يخضع لقانون اوم أي يكون السلوك غير خطي بين المصدر والمصرف، وذلك لوجود حاجز جهد في السطح البيئي بين القطب وشبه الموصل. إضافة إلى إن زيادة عدد مستويات المصائد قد يؤدي إلى التأثير نفسه. إن فهم عملية حقن الشحنة من وصلة المعدن-شبه الموصل العضوي هو الجانب الفيزيائي المهم في

العديد من الأجهزة الإلكترونية العضوية، مثل الثنائيات العضوية الباعثة للضوء وترانزستورات تأثير المجال العضوية. ففي الترانزستور تتم عملية حقن الشحنة في الطبقة الفعالة من قطب المصدر وإستنزافها في قطب المصرف، والجهد المسلط هو ضروري لنقل التيار من القطب المعدني في طبقة التجميع في السطح البيني لشبه الموصل-عازل البوابة والعكس بالعكس. وهذا يقود طبيعياً إلى مقاومة اتصال، نتيجة تسليط الجهد في الاتصالات التي تمنح المصدر والمصرف انحياز منذ بدا تسليطه عبر القناة. إن دالة الشغل لمعدن الحقن والألفة أو التأين الإلكتروني في طبقة شبه الموصل فضلاً عن زيادة عدم الانتظام لطبقة شبه الموصل تمثل المعاملات الرئيسية في تحديد عملية الحقن في السطح البيني معدن-شبه الموصل. ومع ذلك، فهندسة الجهاز هو أيضاً عامل مهم جداً، إذ إن مقاومة الاتصال تعتمد اقل بكثير على حاجز جهد دالة الشغل لمواد الاتصال في البنية المتداخلة (والتي تقع فيها أقطاب المصدر والمصرف وطبقة التجميع على جوانب متعاكسة من الطبقة شبه الموصلة) مما كانت عليه في البنية متحدة المستوي (والتي تكون فيها أقطاب المصدر والمصرف وطبقة التجميع على الجانب نفسه من طبقة شبه الموصل). ووجد أيضاً إن الاتصالات المتداخلة تكون أومية، في حين كانت الاتصالات متحدة المستوي ليست أومية. [232, 235]

2.10.2- سطح اتصال (شبه موصل-عازل):

نال السطح البيني شبه موصل-عازل البوابة في ترانزستور تأثير المجال العضوي اهتماماً خاصاً من قبل الباحثين لأنه موقع تشكل قناة التوصيل في الترانزستور. وقد تحققت تحسينات كبيرة في أداء الأجهزة عن طريق تعديل هذا السطح. تصنيع معظم الأجهزة الإلكترونية يتم عن طريق ترسيب بخار المادة على سطح أكسيد السليكون، وبسبب الطبيعة الفيزيائية والكيميائية المختلفة لكل من المواد قد يؤدي ارتباطها إلى سطوح شديدة الاختلال (العشوائية) مما يؤدي إلى ضعف الأداء. فمثلاً إن تسخين القاعدة والترسيب بمعدل منخفض يؤدي إلى تنظيم أفضل. لكن البديل الأفضل يتمثل في تغطية سطح الأوكسيد بطبقة عضوية أحادية قبل ترسب المادة. مثل ترسيب (octadecyl-trichloro-silane (OTS)) على SiO_2 فقد أعطى نتائج جيدة في ترانزستور البنثاسين. وقد تم تحسين نتائج أفضل بعد استخدام أغشية رقيقة من البولي ستايرين. فكان الطريق البديل هو استخدام المواد العازلة البوليمرية، مما أدى إلى الأداء العالي مع مشتقات سداسي-ثيوفين، فإن التحدي الرئيسي في تطوير OFET منذ ذلك الحين هو العمل على إيجاد طرق الترسيب والمذيبات والتناغم بين المواد العضوية شبه الموصلة والعازلة المناسبة لإيجاد السطح البيني المطلوب لأداء أفضل للنبية. [236]

إن التطورات الأخيرة في التصميم الجزيئي والإجراءات العملية لأشباه الموصلات البوليمرية عالية الأداء قد أشارت إلى أن هذه المواد يمكن أن تلبي متطلبات مختلف تطبيقات النظام الإلكتروني. من أجل الاستفادة الكاملة من هذه البوليمرات من المنظور الصناعي، فإن تطوير طبقة عازل البوابة منخفض الكلفة وذو سعة عالية وموثوق بها، هي عملية بالقدر نفسه من الأهمية لتطوير البوليمر شبه الموصل عالي الأداء. السعة العالية وتيارات التسرب المنخفضة من طبقات العازل تسمح للتشغيل منخفض الجهد في أجهزة أشباه الموصلات البوليمرية، مما يؤدي إلى انخفاض استهلاك الطاقة في الأجهزة العضوية التي تحتوي على هذه البوليمرات. مقارنة الطبقة العازلة العضوية المصنعة بطرق ترسيب المحاليل مع الطبقة غير العضوية ذات ثابت العزل العالي في تلبية متطلبات السعة العالية، فإن البوليمرات العضوية مميزة كونها تصنع بشكل كامل في درجات حرارة منخفضة وهي جيدة في استقطابها واستقرارها الكيميائي. [237]

الفصل الثالث

المواد الكيميائية والطرق
العملية

المواد الكيميائية والطرق العملية

1-3-تمهيد:

يتضمن هذا الفصل التعريف بالمواد الكيميائية والأجهزة المستخدمة والطرق العملية المتبعة في تصنيع الأقنعة وقياس أبعادها بحسب نوع النموذج المعد للدراسة. ويتم التعرف أيضاً على المواد البوليمرية المختارة للدراسة والمتمثلة بالبوليمر شبه الموصل بولي هكسايل ثايوفين (P3HT) والذي يمثل المادة الفعالة لتصنيع الترانزستورات العضوية، والبوليمر بولي فينايل الكحول (PVA) الذي استخدم كعازل لقطب البوابة عند تصنيع الترانزستور، وهذه البوليمرات تتميز بسهولة إذابتها بمذيبات مختلفة، وتم ترسيب الأغشية الرقيقة باستخدام تقنية الطلاء بالبرم. إضافة إلى دقائق الكربون النانوية (CNPs) التي استخدمت كمادة شائبة لكلا البوليمرين لغرض تعديل الخواص الكهربائية لهما. وقد تم ترسيب المعادن النقية المختارة (الذهب والألمنيوم) لغرض تصنيع الأقطاب الكهربائية والتي يتم ترسيبها باستخدام تقنية التبخير تحت الضغط المخلخل (10^{-5} Torr)، وذلك باستخدام أقنعة خاصة تم تصنيعها في المختبر من أجل إجراء هذه الدراسة، وتختلف هذه الأقنعة بحسب نوع النموذج المراد تحضيره للدراسة.

ويتضمن هذا الجزء أيضاً شرح كيفية التخلص من الغبار والدهون والملوثات الأخرى العالقة على القواعد باستخدام المذيبات والمياه وتقنية تنظيف الشرائح باستخدام جهاز الترددات فوق الصوتية. واشتمل هذا الفصل على مراحل تصنيع العينات والمعالجات الحرارية لها وبدرجات حرارة تصل إلى (120°C). شملت الدراسة على مخططات الأشكال الخاصة لتراكيب من نوع (معدن-عازل-معدن (MIM)) والتركيب (معدن-عازل-شبه موصل (MIS)) وترانزستور تأثير المجال العضوي (OFET). وتم التطرق في هذا الفصل إلى الأجهزة ودوائر القياس المستخدمة للحصول على الخواص البصرية والعازلية والكهربائية للمواد النقية والمشوبة، وكذلك الدائرة الخاصة بميزة (I-V) لغرض قياس التوصيلية الكهربائية، والدائرة الخاصة بقياس ميزتي الفولتية-السعة (C-V) والفولتية-التردد (C-F) للتركيب MIS، وأخيراً منظومة القياس الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية لترانزستورات تأثير المجال العضوية المصنوع مختبرياً.

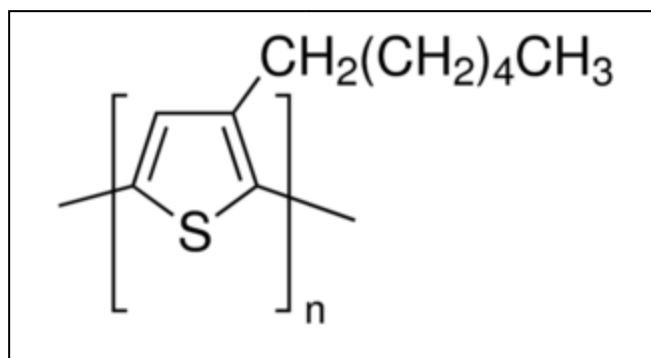
2-3-المواد الكيميائية.

1-2-3- البوليمر بولي هكساييل ثايوفين P3HT.

لاقت أشباه الموصلات العضوية اهتماماً كبيراً من قبل الباحثين في مجال تصنيع نبائط إلكترونية من مواد عضوية لما تمتلكه من ميزات تصنيعية تفوق أشباه الموصلات التقليدية، مما جعلها أداة تنافسية مع الأجهزة الأخرى لكونها أجهزة منخفضة الكلفة إضافة إلى إمكانية تصنيعها بمساحة كبيرة. حيث كانت مشتقات البولي ثايوفين من بين أكثر البوليمرات دراسة، نتيجة لامتلاكها تحركية فجوات عالية بسبب قابلية تعبئتها في تشكيل أغشية رقيقة منتظمة. إن مميزات هذه المواد ومن أهمها البولي ثايوفينات أثمرت في إنتاج الإلكترونيات الحديثة وتطويرها. [238-239]

يعتبر البوليمر regioregular-P3HT احد عناصر عائلة [poly(3-alkylthiophene)]، ويمتلك محوراً رئيسياً مترافقاً صلباً وسلاسل الالكيل جانبية مرنة وهو ما أعطى هذا البوليمر قابلية الذوبان الكبيرة. وإن قدرة جزيئات البوليمر rr-P3HT على تشكيل طبقة الأحادية ذاتية التجمع (self-assemble layer) في حالة المحلول والحالة الصلبة تمكن من الحصول على تركيب منتظم بثلاث أبعاد من السلاسل البوليمرية، والذي يؤدي إلى زيادة تحركية حاملات الشحنة، إذ يمتلك تحركية حاملات شحنة جيدة تصل إلى $(0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs})$. إن ذاتية هذا النوع من البوليمرات يؤدي إلى فصل الطور بين المحور الرئيسي وسلاسل الالكيل الجانبية مما يقود إلى محلول بتركيب طبقي. وعند تشكيل التركيب البلوري ابتداء من التركيب الطبقي الموجود ينتظم كل من المحاور الرئيسية والسلاسل الجانبية تلقائياً في الشبكة البلورية. ويمتاز هذا البوليمر بطول السلاسل الجانبية وضخامتها ولها الدور الكبير في قابلية نقل الشحنات. يعتبر البوليمر rr-P3HT احد البوليمرات الموجبة المتضمنة حاملات الشحنة من نوع الفجوات، وهو بوليمر كاره للماء (hydrophobic). إن هناك عدة عوامل تؤثر بصورة رئيسية على تشكيل الأغشية الرقيقة للبوليمر P3HT منها degree of regioregularity وطريقة الترسيب المتبعة وعملية التلدين الحراري والوزن الجزيئي وطبيعة المذيب المستخدم. [115, 240-242]

استخدم في هذه الدراسة البوليمر (Regioregular Poly(3-hexylthiophene)(2,5-diyl) (rr-P3HT)، والذي يمثل الصنف الإلكتروني ذو رمز المنتج (M104) والمجهز من شركة أوسلا البريطانية (Ossila Limited Co., UK)، ويمتلك هذا البوليمر التركيب الكيميائي المبين بالشكل (1-3).



الشكل (1-3) يبين التركيب الكيميائي للبوليمر P3HT.

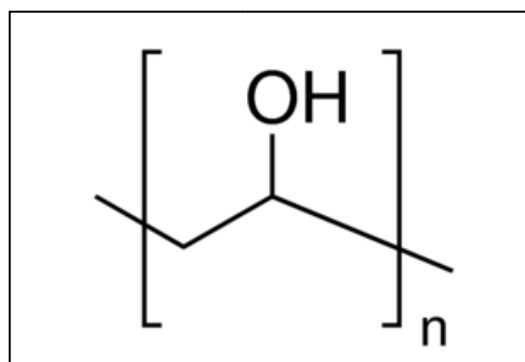
يملك المنتج المواصفات المبينة في الجدول الآتي:

الجدول (1-3) يبين مواصفات البوليمر P3HT المجهز للدراسة الحالية.

Mw	65200
Mn	29600
regioregularity	>95.7% head-to-tail
molecular formula	(C ₁₀ H ₁₄ S) _n
Melting point	238 °C

2-2-3-البوليمر بولي فينايل الكحول: (Poly Vinyl Alcohol-PVA)

استخدم البوليمر بولي فينايل الكحول (poly(vinyl alcohol)-PVA) المجهز من شركة (Sigma-Aldrich) والذي يحمل الصيغة الكيميائية $[CH_2CHOH]_n$ وبمدى من الوزن الجزيئي (85,000-124,000 g/mol) والتحلل المائي (99% hydrolyzed). ويبين الشكل (2-3) التركيب الكيميائي للبوليمر PVA.



الشكل (2-3) التركيب الكيميائي للبوليمر PVA.

البوليمر بولي فينيل الكحول (Polyvinyl alcohol-PVA) هو واحد من عدد قليل جدا من بوليمرات الفايثيل القابلة للذوبان في الماء، وتعتمد ذائبته على الوزن الجزيئي ودرجة التحلل المائي hydrolysis، ويستخدم بشكل نقي أو مشوب أو بشكل خليط مع بوليمرات أخرى. إن البوليمر PVA من البوليمرات المحبة للماء (hydrophilic) والمقاومة كيميائيا ومنخفضة النفاذية وغير السامة وغير المسرطنة، وهو من المواد القابلة للتوافق الإحيائي التي يمكن استخدامها بشكل مباشر مع الكائنات الحية. ويؤثر المحتوى المائي على صفاته الميكانيكية والفيزيائية، إذ يمكن أن يؤثر على تركيبها البلوري ويعمل كملدن في البوليمرات المحبة للماء، ويخفض درجة انتقالها الزجاجي، ويمكن استخدامه بصورة نقية ومشوبة ويملك مواصفات مرغوبة في التطبيقات الكهربائية. [243-247]

إن البوليمر PVA هو احد البوليمرات الهيدروكسيلية (polyhydroxy polymers)، وبسبب مقاومته الكيميائية وصفاته الفيزيائية استخدم صناعيا بشكل واسع. يمكن ايجاز صفات هذا البوليمر نسبة الى معاملين رئيسيين:

i. الوزن الجزيئي: زيادة الوزن الجزيئي لهذا البوليمر تؤدي إلى زيادة كل من اللزوجة والمقاومة الحجمية وإجهاد الشد ومقاومته للماء وقوة التلاصق ومقاومة المذيبات وينخفض ثابت العزل. في حين عندما ينخفض الوزن الجزيئي يزداد كل من ثابت العزل والمرونة ويصبح أكثر حساسية للماء وتسهل اذابته.

ii. النسبة المئوية للتحلل المائي (% hydrolysis): بزيادة هذه النسبة تزداد كل من المقاومة الحجمية وإجهاد الشد ومقاومته للماء وقوة التلاصق ومقاومة المذيبات، بينما عندما تنخفض النسبة يزداد كل من حد المرونة وحساسيته للماء بالإضافة إلى سهولة إذابته بالماء. وتزداد درجة التبلور للبوليمر بمعالجة التلدين الحراري، حيث إن درجة البلورية تتراوح بين (0-0.54). ويزوب في المذيبات عالية القطبية. [248]

اجتذب بولي فينيل الكحول (PVA) الكثير من الاهتمام في السنوات الأخيرة بسبب المرونة والشفافية والصلادة والتكلفة المنخفضة نسبيا. لقد تم استخدام PVA على نطاق واسع في مجالات مختلفة مثل تثبيت حجيم المنسوجات وتم استخدامه كطلاء حساس وكماصة للورق والخشب والمنسوجات والجلد. بالإضافة إلى ذلك إنه بوليمر صديق للبيئة بسبب قابليته للتحلل البيولوجي مما يجعله اختيارا مناسباً لتطبيقات الإلكترونيات. استخدم البوليمر PVA بشكل مثير للاهتمام كعازل للبوابات في الترانزستورات العضوية، وذلك بسبب إمكانية إذابته في الماء، وهو مذيب صديق للبيئة. بالإضافة إلى المزايا الأخرى وهي امتلاكه ثابت عزل كهربائي عالي نسبيا

والتكلفة المنخفضة والتوافق مع القواعد المرنة. وإن إمكانية ترسيبه بشكل أغشية رقيقة متشابكة (crosslinking) يسمح بالحصول على أغشية (CR-PVA) بسمك منخفض وفي الوقت نفسه عالية السعة ومنخفضة تيار التسرب. [249-251]

نظراً لميزاته المهمة، استخدم بولي فينايل الكحول (PVA) كمادة عازلة في ترانزستورات تأثير المجال العضوي (OFETs). البوليمر PVA هو مادة ذات تركيب شبه بلوري ينتج من خلال بلمرة فينايل الأسيتات إلى البوليمر بولي فينايل الأسيتات (PVAc)، والذي يتحول بالتحلل المائي اللاحق من PVAc إلى PVA. وهذا التفاعل غير الكامل يقود إلى بوليمرات بدرجات مختلفة من التحلل المائي hydrolysis. ويمكن السيطرة على خصائصه من خلال تباين محتوى فينايل الأسيتات المتبقي (درجة التحلل المائي hydrolysis degree) والتي تؤثر في الصفات العامة للبوليمر، وغيرها من المعاملات. وتمثل مجاميع الهيدروكسيل بمثابة مواقع تشابك مادية، لأنها تشكل أواصر هيدروجينية بين السلاسل المتجاورة، والتي تحول البوليمر إلى شبكة ثلاثية الأبعاد مستقرة. فيكون متصلب كيميائياً باستخدام ثنائي كرومات الأمونيوم (Ammonium Dichromate-ADC). [252-253]

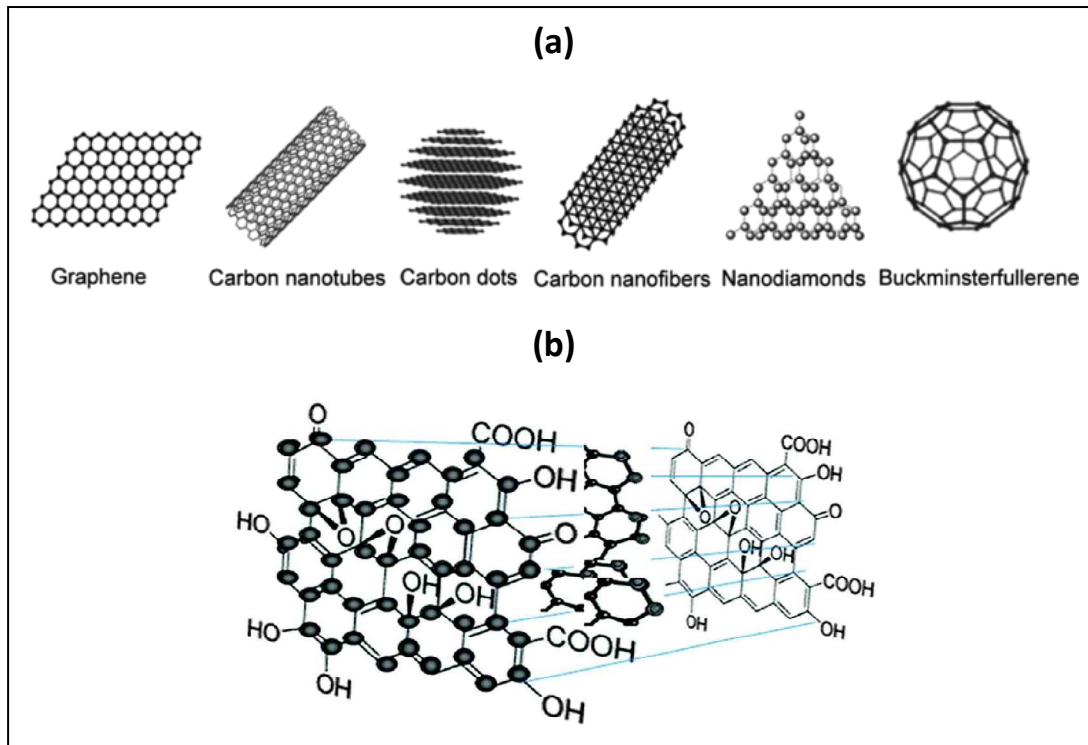
إن احتواء البوليمر العازل PVA على مجاميع الهيدروكسيل، فانه مفيد بسبب ظاهرة الاستقطاب في تطبيقات الذاكرة للترانزستور العضوي، وظاهرة الهسترة في الترانزستور المصنع من PVA ناتجة أما عن الحركة للشحنة داخل الطبقة العازلة، أو عن عمليتي اقتناص وانتزاع الشحنة من المصائد في الطبقة العازلة والسطح البيني الفاصل بين الطبقة العازلة والطبقة شبه الموصلة. ويستخدم أيضاً كأحد البوليمرات التي تشكل عازل البوابة متعدد الطبقات. [144, 254]

3-2-3- دقائق الكربون النانوية (Carbone Nanoparticles- CNPs)

إن تصنيع المواد المشوبة بإضافة مادة شائبة إلى مصفوفة البوليمر هي طريقة تقليدية لغرض تحسين الصفات البصرية والميكانيكية والكهربائية بصورة عامة، والحصول على مادة جديدة تختلف في خواصها عن المواد المضيفة والمضافة. وتركزت الدراسات في العقدين الماضيين على استخدام المضافات النانوية ومنها دقائق الكربون النانوية (CNP).

برزت التراكيب الكربونية النانوية من بين أنواع عديدة من المواد النانوية المتقدمة في السنوات الماضية، حيث استخدمت في مجموعة كبيرة ومتنوعة من المجالات التطبيقية، وذلك لما تملكه من الخصائص الفيزيائية والكيميائية المميزة. يمكن تصنيف المواد الكربونية النانوية استناداً إلى الأواصر التساهمية التي تربط ذرات الكربون إلى sp^2 -C و sp^3 -C. إذ يشمل التركيب sp^2 -C المواد النانوية الفوليرين عديم الأبعاد (0D) وأنابيب الكربون النانوية أحادي البعد بأنواعها

(1D-CNTs) والجرافين ثنائي الأبعاد (2D). تعتبر دقائق الكربون النانوية (CNPs) (نقاط الكربون (C-dots)) هي مجموعات نانوية غير متبلورة الكربون (أو يتألف من تراكيب بلورية صغيرة) بأحجام أصغر من (10 nm)، ويمكن اعتباره أيضاً نوعاً من المواد النانوية الكربون عديمة الأبعاد (0D). اما المواد النانوية الكربونية من النوع Sp^3 -C هي الماس النانوي (NDs) مع أحجام بلورية في المدى النانوي. بصورة عامة، ان CNPs لها شكل كروي يحتوي في سطحه الخارجي على مجاميع $-OH$ و $-COOH$ و $-NH_2$ وغيرها، اعطتها صفاتها المميزة. ويبين الشكل (3-3) الأنواع المختلفة للمواد الكربونية النانوية والتركيب الكيميائي للـ CNPs. أظهرت المواد الكربونية النانوية الخصائص البصرية والكهربائية الممتازة مما جعلها مفيدة في التصوير البصري والاستشعار البيولوجي والكيميائي، وكذلك قابلية التحميل الفعال للأدوية مكنت من استخدامها للأغراض العلاجية. إن قابلية دقائق الكربون النانوية في تشكيل عالق (suspension) إضافة إلى ميزاته الأخرى مكنت من تصنيع أحبار تقنية الطباعة في الالكترونيات المطبوعة. ان المواد الكربونية النانوية التي تتكون ببساطة من قبل الكربون تكون آمنة نسبياً بالمقارنة مع العديد من المواد النانوية غير العضوية الأخرى مثل النقاط الكمومية (QDs)، والتي عادة ما تحتوي على المعادن الثقيلة. [255-259]



الشكل (3-3) يبين (a): الأنواع المختلفة للمواد الكربونية النانوية و (b): التركيب الكيميائي للـ CNPs.

وقد تطرقنا سابقاً في الفصل الثاني بشيء من التفصيل إلى عملية تشويب البوليمرات باستخدام هذه المضافات. استخدم CNPs في هذه الدراسة كمادة مالئة وبنسب واطئة جداً لكل من البوليمر شبه الموصل (P3HT) والبوليمر العازل (PVA)، لغرض دراسة تأثير هذه الإضافة على

الخصائص الكهربائية والعازلية للبولىمرات، والاستفادة منها في تصنيع الترانزستورات العضوية. استخدم مسحوق دقائق الكربون النانوية (Carbon Nanopowder) المجهزة من شركة (NANOSHEL LLC.-USA) الأمريكية، والذي يحمل الخواص الفيزيائية والكيميائية المبينة في الجدول (2-3) التالي:

الجدول (2-3) يبين الخواص الفيزيائية والكيميائية للـ CNP المستخدم في الدراسة.

Assay	≥99% trace metals basis
Form	Nanopowder
Particle Size	<50 nm (TEM)
Surface Area	Spc. Surface area >100m ² /g (BET)
Flash Point	1800 Degree
Boiling Point	2640 Degree
Melting Point	3340 Degree
pH	7 pH
Stability	Completely Stable

4-2-3-المذيبات: (Solvents)

استخدم في هذه الدراسة العديد من المذيبات في عمليتي إذابة البولىمرات وتنظيف قواعد الترسيب. المذيبات التي استخدمت في عمليات الإذابة وتصنيع النماذج هي ثنائي كلوربانزين (Dichlorobenzene (DCB)، والتي لها نقاوة (>99.9 % Purity). وكذلك استخدم الأسيتون منزوع الماء في عمليات تنظيف قواعد الترسيب وإيزو بروبيل الكحول (Isopropyl Alcohol) ذات النقاوة (> 99% Purity) المجهزة من شركة (Sigma-Aldrich). واستخدم الماء المقطر منزوع الأيونات (Di-Water) والمجهز من الشركة الكويتية في عملية الإذابة والتصنيع وعملية تنظيف القواعد.⁽²⁶⁰⁻²⁶²⁾ ويبين الجدول (3-3) بعض مواصفات هذه المذيبات.

الجدول (3-3) يبين درجات الغليان لبعض المذيبات المستخدمة.

Solvent	Boiling Point (°C)
Dichlorobenzene(DCB)	180.3
water	100
Isopropyl Alcohol	82.6
Acetone	56

3-2-5- المواد المعدنية المستخدمة لترسيب الأقطاب الكهربائية:

استخدم في هذه الدراسة نوعان من المعادن في عملية ترسيب الأقطاب الكهربائية للنبائط المصنعة، وهي الذهب (Gold) المجهز من شركة (Sigma-Aldrich) وذات نقاوة (99.99%) وهو بشكل سلك نحيف يبلغ نصف قطره (0.1 mm) ويستخدم لكل عملية ترسيب قطعة بطول (20 cm.) تقريبا، واستخدم أيضا ألومنيوم (Aluminum) ذات النقاوة (99%) والمجهز من شركة (Sigma-Aldrich) وهو بشكل سلك قطره (0.5 mm) ويستخدم لكل عملية ترسيب قطعة بطول (3 cm.).

3-2-6- قواعد الترسيب: (Substrates)

استخدمت في هذه الدراسة قواعد الترسيب الزجاجية الطبية ذات الأبعاد (25mm x 75mm x 1mm) في عملية تصنيع نماذج قياس الخواص البصرية ونماذج نبائط معدن-عازل-شبه موصل (MIS)، وكذلك لتصنيع نماذج نبائط ترانزستورات تأثير المجال العضوي (OFETs). واستخدمت شرائح الألومنيوم (TLC) الطبية عالية النقاوة (>98% Purity) في تصنيع نماذج نبائط معدن-عازل-معدن (MIM). وأيضا هناك قواعد السيراميكية المرسب عليها أقطاب مشطية من معدن الألومنيوم (Interdigitated Fingers) والمجهزة من شركة (Malaysia Electronics) الماليزية، والتي استخدمت لقياس ميزة (I-V) للمادة شبة الموصلة. واستخدمت قواعد السليكونية ($\text{SiO}_2(n-100)$) لدراسة الخواص التركيبية لأغشية البوليمر PVA.

3-3- تحضير النماذج:**3-3-1- عملية تنظيف القواعد:**

تمت عملية تنظيف القواعد المستخدمة بأنواعها في الدراسة باستخدام جهاز التنظيف بالترددات فوق الصوتية (Ultrasonic Cleaner)، من النوع (NT-628+) المجهز من شركة (GUAGZHOU HENWEI ELECTRONICS TECHNOLOGY CO. LTD.) الصينية، شمل التنظيف ثلاث مراحل كل منها باستخدام الأسيتون منزوع الماء وايزو بروبيل الكحول والماء المقطر منزوع الايونات، ولقيمتين من طاقة العمل (35W, 50W) لكل منها فترة زمنية قدرها (5 min.). يلي ذلك عملية تجفيف القواعد باستخدام الفرن المختبري بدرجة حرارة (80°C) ولمدة ساعة واحدة. [263-265]

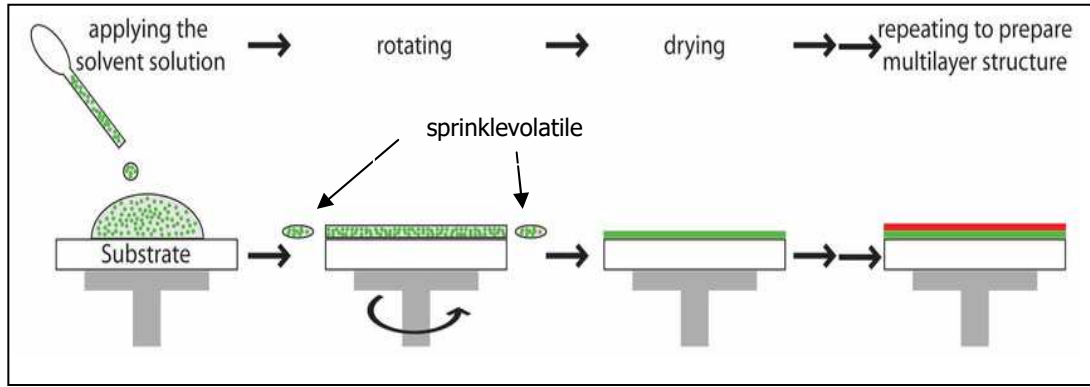
2-3-3-تقنية الطلاء بالبرم: (Spin Coating Method)

إن طريقة الطلاء بالبرم هي طريقة شائعة الاستعمال وبسيطة لتصنيع أغشية رقيقة متجانسة السمك وبسمك قليل جداً على قاعدة صلبة ومستوية باستخدام المحاليل المخففة للبوليمرات. وقد استخدمت لعدة عقود في تطبيقات الأغشية الرقيقة [266] وأجريت الكثير من الدراسات على هذه الطريقة للبوليمرات النقية والمشوبة والخلائط البوليمرية عندما تكون البوليمرات غير متطايرة المذابة في المذيبات المتطايرة بشكل تجريبي ونظري. يوضع محلول المادة المذابة في هذه العملية على سطح قاعدة مثبتة على محور دوار عمودي على سطح القاعدة، في أثناء فترة الدوران ستعمل قوى السوائل والطررد المركزي على نشر السائل على سطح مستوي، ومع استمرار الدوران يصبح الغشاء أقل سمكاً. تتم عملية نشر المحلول على القاعدة وترسيب الغشاء بأربع خطوات عملية، تبدأ الخطوة الأولى بنشر المحلول على سطح القاعدة، والخطوة الثانية هي زيادة سرعة الدوران لتقليل سمك الطبقة السائلة، تليها خطوة تجفيف المذيب من الغشاء المرسب ثم مرحلة تصلب الغشاء.

هناك طريقتان شائعتان للاستعمال هما الاستعمال الثابت، والاستعمال الحركي. الاستعمال الساكن هو ببساطة ضخ كمية صغيرة من السوائل على أو بالقرب من مركز القاعدة، يمكن أن تكون بضعة ملي لتر بحسب لزوجة السائل ومساحة الطبقة المراد تشكيلها. اما الاستعمال الحركي هو عملية الاستعمال بينما تتحرك القاعدة بسرعة منخفضة. يتم استخدام سرعة حوالي (500 RPM) خلال هذه الخطوة من العملية. هذا يعمل على نشر السائل على القاعدة ويمكن أن يؤدي إلى خسائر أقل في مادة الترسيب لأنه ليس من الضروري عادة أن تضع الكثير من السائل على سطح القاعدة بأكمله. بعد خطوة الاستعمال من الشائع زيادة السرعة نسبياً لتقليل سمك السوائل للاقتراب من سمكها النهائي المطلوب.

سرعة التدوير المثالية بحدود (6000-1500 RPM)، واعتماداً على خصائص السائل وكذلك القاعدة. وهذه الخطوة يمكن أن تأخذ من 10 ثواني إلى عدة دقائق. إن الجمع بين سرعة الدوران والوقت المحدد لهذه الخطوة سوف تحدد عموماً سمك الغشاء النهائي. بشكل عام، ارتفاع سرعة الدوران وزمن تدوير أطول يعني ترسيب غشاء رقيق أقل سمكاً. تنطوي عملية طلاء بالبرم على عدد كبير من المتغيرات التي يجب مراعاتها خلال عملية الدوران ومن الأفضل السماح بوقت كاف لها لتحديث. في بعض الأحيان يتم إضافة خطوة تجفيف منفصلة بعد خطوة الدوران بسرعة عالية لغرض الحصول على مزيد من التجفيف للغشاء من دون التأثير بالسمك إلى حد كبير. هذا يمكن أن يكون مفيداً للأغشية السميكة لأن أوقات التجفيف الطويلة قد تكون ضرورية لزيادة الاستقرار المادي للغشاء قبل المعالجة. من دون خطوة التجفيف، وقد تحدث مشكلات في أثناء

المعالجة، مثل حدوث إزاحة للمادة الى جانب من القاعدة عند إزالته من وعاء التدوير، وبالتالي الحصول على غشاء غير متجانس. في هذه الحالة فان سرعة دوران معتدلة حوالي 25% من سرعة التدوير العالية سوف يكفي عموماً للمساعدة في تجفيف الغشاء دون تغيير كبير في السمك. يمكن أن يتم ترسيب مجموعة متنوعة من الأغشية الرقيقة تباعاً بواسطة الطلاء بالبرم، شريطة أن لا تتأثر الأغشية المرسبة سابقاً بالأغشية التي ترسب لاحقاً، تكون بسبب سماكة الغشاء التي تتناسب تقريباً عكسياً مع الجذر التربيعي لسرعة الدوران. ويوضح الشكل (3-4) مراحل تقنية الطلاء بالبرم. [267-270]



الشكل (3-4) يوضح مخطط مراحل تقنية الطلاء بالبرم. (36)

تم استخدام جهاز الطلاء بالبرم نوع (TC100-Spin Coater) (المجهز من شركة MTI- Mtixti Corporation، ألماني المنشأ).

3-3-3- تقنية التبخير الحراري تحت الضغط المخلخل:

(Thermal Evaporation Under Low Pressure)

إن إمكانية ترسيب أغشية رقيقة من مواد مختلفة مهمة لتصنيع أقطاب كهربائية تستخدم في الأجهزة الالكترونية الدقيقة الحديثة. هناك العديد من التقنيات التي تمكننا من ترسيب الأغشية الرقيقة على قاعدة او طبقة أخرى سفلية بسمك صغير يصل الى بضعة نانومترات. في هذه الدراسة سنركز على تقنية لترسيب التي هي التبخير تحت الضغط المخلخل لإنتاج أغشية معدنية رقيقة (أقطاب النبائط)، والتي يمكن ان تتم باستخدام اقنعة خاصة لتحديد شكل الاغشية المرسبة، كونها الطريقة التي استخدمت في ترسيب الأقطاب المعدنية الخاصة بنبائط هذه الدراسة، [271]

ان طريقة التبخير تحت الضغط المخلخل تمكننا من ترسيب مواد معينة بضمنها المعادن النقية على القاعدة المختارة، من خلال تحويلها من مادة صلبة إلى حالة بخار تحت ضغط مخلخل (في الفراغ)، ثم يترك بخار المادة ليتكثف على سطح القاعدة. يتم تسخين المادة المراد ترسيبها والتي

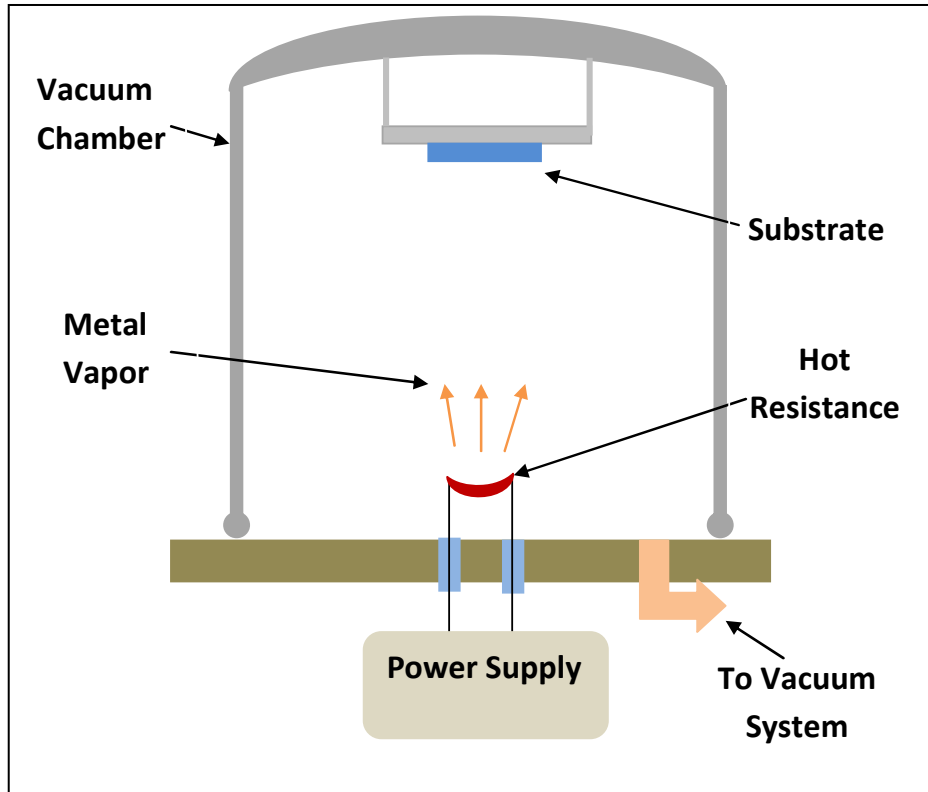
تدعى بالمصدر إلى درجة حرارة مرتفعة بشكل كاف لتبخيرها (أو تساميها)، وتتكون تقنية ترسيب التبخر الحراري تحت ضغط مخلخل (الفراغي) ابتداءً من درجة حرارة التسخين حتى التبخر للمادة المراد ترسيبها. يتكثف بخار المادة في النهاية على شكل طبقة رقيقة على سطح القاعدة البارد وعلى جدران غرفة التبخر (Evaporation Chamber). عادة ما يتم استخدام حدود منخفضة من الضغط (10^{-6} - 10^{-5} torr). بما أن التسخين يتم في الفراغ، فإن درجة الحرارة اللازمة للتبخير تكون أقل بكثير من درجة الحرارة المقابلة المطلوبة عند الضغط الجوي. أيضا عدم وجود الهواء في غرفة التبخر يمنع أكسدة مواد المصدر المراد ترسيبها في درجات حرارة التسخين العالية. يمكن استخدام مجموعة متنوعة من الطرق لتسخين المادة وتبخيرها. وعند هذه الضغوط المنخفضة يكون متوسط المسار الحر لذرات البخار هو نفس ترتيب أبعاد الغرفة التبخر، بحيث تنتقل هذه الجسيمات في خطوط مستقيمة من مصدر التبخر إلى قاعدة الترسيب. إلى جانب ذلك، في تقنيات التبخر الحراري يكون متوسط طاقة ذرات البخار التي تصل إلى سطح القاعدة عموماً منخفضة (من مراتب kT ، أي أعشار الإلكترون فولت). هذا يؤثر بشكل خطير على طبيعة تشكيل الأغشية، مما يؤدي في كثير من الأحيان إلى مادة مسامية ومتلاصقة بشكل ضعيف. في تقنيات التبخر الحراري، يمكن تطبيق أساليب مختلفة لتسخين المواد داخل المختبر إما التسخين بالمقاومة (تأثير جول) أو القصف بشعاع الكتروني ذات طاقة عالية بحدود عدة كيلو إلكترون فولت من قاذف الشعاع الالكتروني. والتسخين بالمقاومة هي أسهل التقنيات. [272-273]

تعتبر هذه التقنية البسيطة مناسبة لترسيب المعادن وبعض المركبات ذات درجة حرارة الانصهار المنخفضة مثل Al ، Ag ، Au ، SiO ، وغيرها. يتم استخدام مادة معدنية تتحمل درجات حرارة عالية مثل المولوبيديوم أو التنكستن لتصنيع حاوية بشكل ملائم، مثل الفتيل (Filament) أو البودقة (Boat) أو قمع خزفي محاط بملف من الفتيل (ceramic crucible) وبما يتلاءم وطبيعة مادة المصدر المراد ترسيبها، لتصل إلى درجة حرارة التبخر ($T_{evap}=1000-2000^{\circ}C$). إذ يستخدم الفتيل إذا كانت مادة المصدر بشكل سلك والبودقة والقمع الخزفي يستخدم عندما تكون بشكل مسحوق أو حبيبات.

يظهر الشكل (3-5) مكونات المنظومة وعملية التبخر والترسيب. إن الفراغ (تخلخل الضغط) الموجود داخل حجرة التبخر يحد بشكل كبير من وجود جزيئات الغاز وملوثات الهواء الأخرى، وبالتالي نتخلص من احتمال حدوث تصادمات ذرات بخار المصدر معها. عادة ما يتم وضع سطح القاعدة المراد الترسيب عليها في الجهة العليا لمادة المصدر بحيث يكون السطح الصلب لها

مواجه لها لتترسب عليه ذرات البخار. ويعتمد طبيعة تشكيل وسمك الطبقة المرسبة على عدة عوامل، منها المواصفات الجوهرية لمادة المصدر مثل درجة الانصهار والنقاوة وكذلك على طبيعة سطح القاعدة وسرعة عملية التبخير وقيمة الضغط والمسافة بين مادة المصدر والقاعدة وغيرها من العوامل. [273-275]

استخدمت في هذه الدراسة منظومة التبخير والترسيب الحراري من النوع (EDWARD) ذات المنشأ (البريطاني) في عملية ترسيب الأقطاب الخاصة بنبائط الدراسة من معدني الألمنيوم والذهب.



الشكل (3-5) يوضح مخطط مكونات منظومة التبخير والترسيب الحراري.

4-3-3- عملية الإذابة والتشويب:

تؤدي عملية اختيار المذيب المناسب وإذابة البوليمر دوراً رئيسياً في العديد من التطبيقات الصناعية في مجموعة متنوعة من المجالات، وهي إحدى أهم المعاملات لتحسين التصميم وطرق التصنيع. تمت عملية الإذابة للبوليمرات وحل المادة المائلة المستخدمة في هذه الدراسة باستخدام مازج مغناطيسي (magnetic stirrer) من النوع (VELP. SCIENTIFICA, AREC.T)، أوربي المنشأ، وكذلك استخدام الميزان الدقيق الماني المنشأ نوع (Sartorius AG-BL210S). وتمت العملية بحسب الخطوات الآتية [122]:

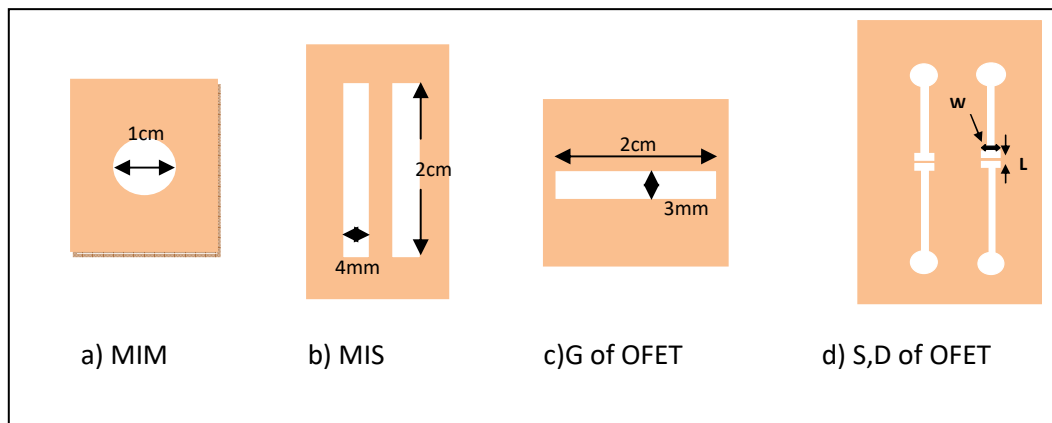
- تم إذابة (0.1 gm) البوليمر شبه الموصل بولي هكساييل ثايوفين (P3HT) في (10 ml) من ثنائي كلورو بانزين (DCB) بتركيز (10 mg/ml)، باستخدام المازج المغناطيسي (Magnetic Stirrer) بدرجة حرارة 60°C ولمدة (15 min.).
 - تم حل (0.01 gm) من دقائق الكربون النانوية (CNP) الخاصة بتشويب البوليمر P3HT بـ (50 ml) من ثنائي كلوروبانزين بتركيز (0.2 mg/ml) باستخدام المازج المغناطيسي (Magnetic Stirrer) بدرجة حرارة المختبر ولمدة (120 min.).
 - تم إذابة (7 gm) البوليمر العازل بولي فينايل الكحول (PVA) بـ (100 ml) من الماء المقطر منزوع الايونات بتركيز (70 mg/ml)، باستخدام المازج المغناطيسي (Magnetic Stirrer) بدرجة حرارة 90°C ولمدة (180 min.).
 - تم حل (0.02 gm) من دقائق الكربون النانوية (CNP) الخاصة بتشويب البوليمر PVA بـ (50 ml) من الماء المقطر منزوع الايونات بتركيز (0.4 gm/ml) باستخدام المازج المغناطيسي (Magnetic Stirrer) بدرجة حرارة المختبر ولمدة (120 min.).
- بعد اكتمال عملية الإذابة تم ترشيح المحاليل للتخلص من الشوائب والتكتلات غير الذائبة واستخدمت في هذه العملية مرشحات محقنة (Syringe Filters) والمجهزة من شركة (Restek). تم ترشيح محلول البوليمر شبه الموصل P3HT بمرشح مسامي ذات الحجم (220 nm.)، اما البوليمر العازل PVA فتم ترشيحه على مرحلتين الأولى باستخدام مرشح بحجم (450nm.) بعدها تم ترشيحه بمرشح بحجم (220 nm.) وذلك للتخلص من تكتلات اسيتات الفاينيل المتبقية بالمحلول. تم حفظ المحاليل في جو مظلم وبدرجة حرارة المختبر. تم تشويب البوليمر P3HT المذاب بثنائي كلوروبانزين بدقائق الكربون النانوية التي تم حلها بالمذيب نفسه بالنسب الحجمية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%). وكذلك تم تشويب البوليمر PVA المذاب بالماء المقطر منزوع الايونات بدقائق الكربون النانوية التي تم حلها بنفس المذيب بالنسب الحجمية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%).

3-3-5- الأقمعة المصنعة لغرض ترسيب الأقطاب الكهربائية.

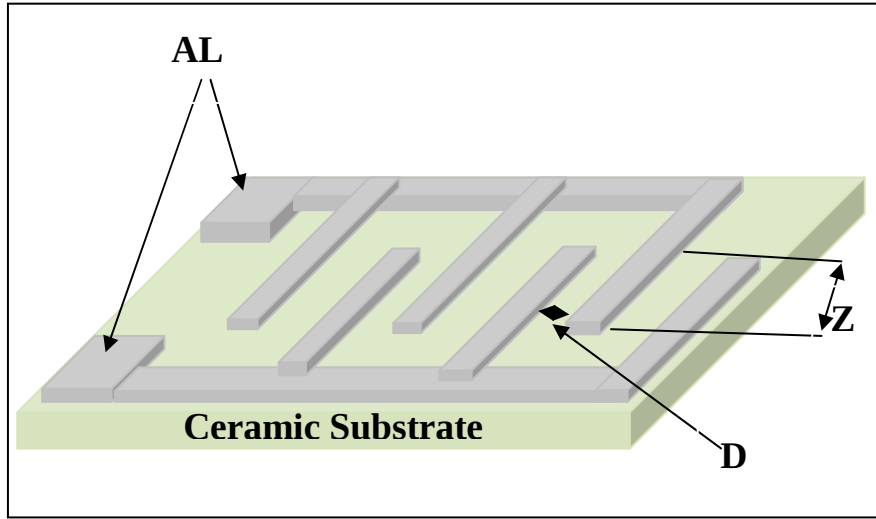
اغلب الدراسات تستخدم أقطاب مرسبة او أقمعة مجهزة من شركات عالمية لغرض ترسيب أقطاب كهربائية شعرية نحيفة خاصة تلك التي تستخدم لتصنيع ترانزستورات تأثير المجال، لكن هذه الأقمعة ذات كلفة عالية. لذلك فقد ارتأينا في مشروع بحثنا هذا تصنيع أقمعة لترسيب الأقطاب محليا داخل المختبر تتوافق مع البنية التركيبية والهندسية للعينات المراد تصنيعها. وتم ذلك بإتباع طرق التخريم والنحت وباستخدام أدوات مجهزة من السوق المحلية وهي: 1- صفائح نحاس

بسمك (0.5-0.7 mm). 2- منشار تخريم. 3- مبرد تنعيم فولاذية بأشكال وأبعاد مختلفة. 4- ورق تنعيم. 5- مصباح منضدي مجهز بعدسة مكبرة. 6- مشرط طبي. 7- ماسكة أدوات صغيرة. 8- أسلاك نحاسية بأقطار مختلفة. واستغرقت عملية تصنيع هذه الأقنعة فترة تزيد على الثلاثة أشهر.

تم عملية تصنيع الأقنعة الخاصة بترسيب الأقطاب باستخدام صفائح معدن النحاس، ولجميع النبائط المحضرة في هذه الدراسة. فكانت أقنعة تصنيع نبائط معدن-عازل-معدن (MIM) لترسيب أقطاب بشكل دائري ذات قطر (1 cm.) كما في الشكل (a-6-3)، أما الأقطاب المصنعة لتصنيع التركيب معدن-عازل-شبه موصل (MIS) فهي بالأبعاد (3cmx1.5cm) لترسيب نبائط مربعة الشكل بالأبعاد (4mm. x4 mm.)، كما في الشكل (b-6-3). وكذلك تم تصنيع أقنعة ترسيب أقطاب ترانزستور تأثير المجال العضوي، فالأقنعة الخاصة بترسيب قطب البوابة (G) مستطيل الشكل بالأبعاد (2 cm. x 3 mm.)، كما في الشكل (c-6-3). أما أقنعة ترسيب قطبي المصدر والمصرف (S, D) فكانت لترسيب القطبين بحيث يتراوح طول القناة بين (L=40-120 μ m.) وعرض القناة مساوي إلى (W=1 mm.)، كما موضح بالشكل (d-6-3). وتم قياس الأبعاد للأقطاب المرسبة بهذه الأقنعة باستخدام المجهر (traveling microscope) الذي يستخدم لقياس المسافات السطحية بدقة قياس تبلغ ($\pm 5 \mu$ m.). أما القواعد الخزفية الجاهزة الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية للمادة شبه الموصلة والتي تملك الأبعاد (n=6, Z=5.25mm and D=505 μ m) موضحة بالشكل (7-3). وكان المجهر المستخدم من النوع المجهر من شركة (REVOLVY CO.) ذات المنشأ (المانى) والمبينة صورته بالشكل (8-3).



الشكل (6-3) يوضح الأقنعة المصنعة الخاصة بترسيب الأقطاب.



الشكل (7-3) يوضح القواعد الخزفية الجاهزة الخاصة بدراسة الخواص الكهربائي.



الشكل (8-3) المجهر المستخدم لقياس أبعاد الأقطاب المرسبة.

4-3- تحضير النماذج:

1-4-3- تحضير النماذج الخاصة بقياس الخواص البصرية والسمك للبوليمر P3HT:

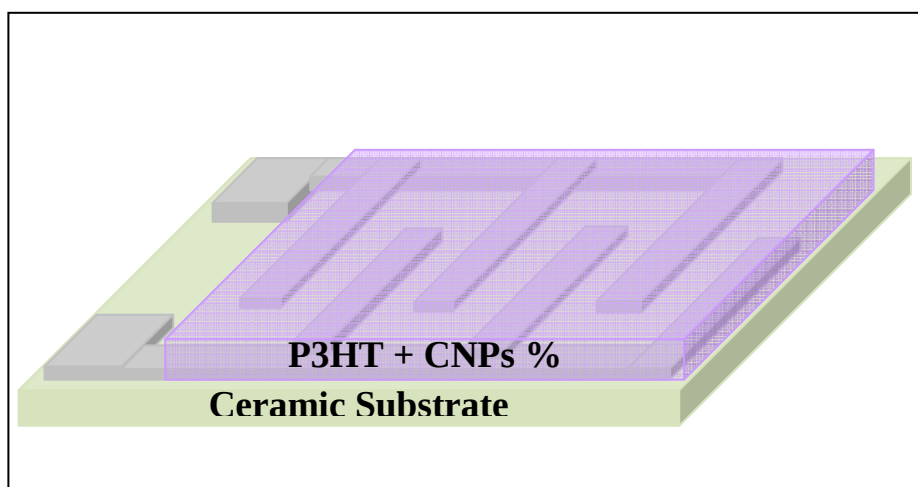
تم تحضير النماذج الخاصة بدراسة الخواص البصرية للبوليمر بولي هكساييل ثايوفين النقي على قواعد زجاجية باستخدام تقنية الطلاء بالبرم، تم تحضير ثلاثون نموذج مختلفة السمك مع تغير سرعة الدوران للبوليمر بولي هكساييل ثايوفين النقي والمشوب (1000, 1500, 2000, 2500, 3000 RPM) ولمدة دقيقة واحدة، بنسب تشويب حجمية مختلفة من دقائق الكربون النانوية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%)، بعدها تم معالجة النماذج حراريا باستخدام فرن مختبري في درجة حرارة (120°C) لمدة (10 min.) وبمعدل انحدار الحرارة (0.5°C/min.). والجدول (4-3) يبين تسلسل العينات المحضرة مقابل سرعة الدوران.

الجدول (4-3) يبين تسلسل العينات المحضرة للبوليمر P3HT مقابل سرعة الدوران.

رقم النموذج						سرعة الدوران
5% CNP	4% CNP	3% CNP	2% CNP	1% CNP	P3HT pure	(rpm)
26	21	16	11	6	1	1000
27	22	17	12	7	2	1500
28	23	18	13	8	3	2000
29	24	19	14	9	4	2500
30	25	20	15	10	5	3000

2-4-3- تحضير النماذج الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT:

تم في هذه الدراسة تحضير النماذج الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية للبوليمر بولي هكسايل ثايوفين النقي والمشوب بنسب تشويب حجمية مختلفة من دقائق الكربون النانوية، (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) وذلك بترسيبها على أقطاب مشطية متداخلة من الألمنيوم (Interdigitated Fingers) باستخدام تقنية الطلاء بالبرم. حضر عدد كبير من النماذج المختلفة مع تغير سرعة الدوران (1000, 1500, 2000, 2500, 3000 RPM) لمدة دقيقة واحدة. بعدها تم معالجة النماذج حرارياً باستخدام فرن مختبري في درجة حرارة (120°C) لمدة (10 min.) وبمعدل انحدار (0.5°C/min.)، كما هو مبين بالشكل (9-3). وتسلسل النماذج مبين في الجدول (4-3) لنوع النماذج المحضرة المستخدمة في الدراسة.



الشكل (9-3) يوضح النماذج المحضرة لدراسة الخواص الكهربائية لـ P3HT.

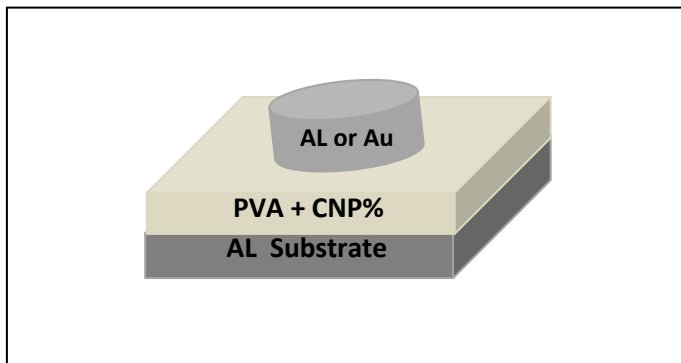
3-4-3- تحضير النماذج المتعلقة بدراسة التركيب (معدن-عازل-معدن) (MIM):

تم في هذه الدراسة تحضير النماذج الخاصة بحساب ثابت العزل للبوليمر العازل PVA النقي والمشوب على قواعد الألمنيوم النقي باستخدام طريقة الترسيب بالصب، وبنسب حجمية مختلفة من دقائق الكربون النانوية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%). وبواقع ثلاثة نماذج لكل نسبة من المضاف للحصول على نتائج أكثر دقة، بعدها تم معالجة النماذج حرارياً باستخدام فرن مختبري في درجة حرارة (70°C) لمدة (180 min). يبين الجدول (3-5) سمك النماذج المحضرة. وباستخدام القناع الخاص الموضح بالشكل (3-6-a) وجهاز التبخير تحت الضغط المخلخل (1.2×10^{-5} Torr) تم ترسيب قطب الألمنيوم العلوي. وكذلك تم تحضير النماذج الخاصة بدراسة الخواص العازلية للتركيب (MIM) للبوليمر بولي فينايل الكحول النقي والمشوب بكل نسب التشويب سالفة الذكر على قواعد الألمنيوم النقي (TLC) باستخدام تقنية الطلاء بالبرم، حضر النماذج مختلفة السمك بسرعات دوران مختلفة (1000, 1500, 2000, 2500, 3000 RPM)، لمدة دقيقة واحدة. بعدها تم معالجة النماذج حرارياً باستخدام فرن مختبري في درجة حرارة (70°C) لمدة (180min) وبمعدل انحدار الحرارة (0.5°C/min.).

الجدول (3-5) يبين سمك النماذج المحضرة بطريقة الصب.

سمك النموذج (μm)						رقم النموذج
5% CNP	4% CNP	3% CNP	2% CNP	1% CNP	PVA pure	
28	22	36	21	31	34	1
24	26	30	27	30	42	2
20	30	24	22	30	48	3

ويبين الجدول (3-6) تسلسل النماذج المحضرة بطريقة الطلاء بالبرم. وباستخدام القناع الخاص الموضح بالشكل (3-6-b) وجهاز التبخير تحت الضغط المخلخل (1.2×10^{-5} Torr) تم ترسيب قطب الذهب أو الألمنيوم العلوي. ويوضح الشكل (3-10) التركيب MIM المصنع.



الشكل (3-10) يوضح التركيب MIM المصنع.

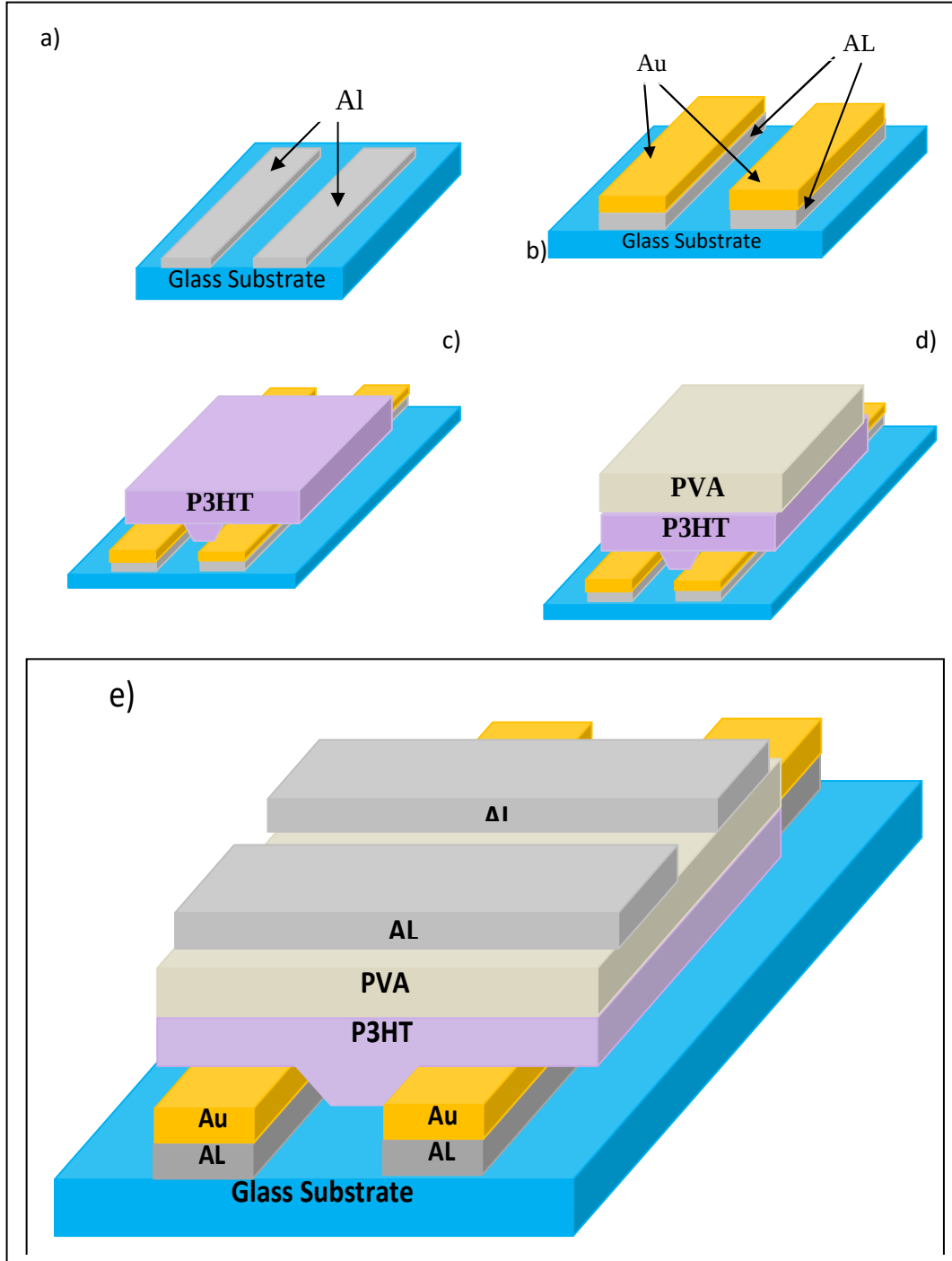
وصنعت نماذج دراسة السمك وXRD باستخدام قواعد سليكونية.

الجدول (6-3) يبين تسلسل النماذج المحضرة بطريقة الطلاء بالبرم لدراسة الخواص العازلية للتركيب (MIM).

رقم النموذج						سرعة الدوران (RPM)
5% CNP	4% CNP	3% CNP	2% CNP	1% CNP	PVA pure	
26	21	16	11	6	1	1000
27	22	17	12	7	2	1500
28	23	18	13	8	3	2000
29	24	19	14	9	4	2500
30	25	20	15	10	5	3000

4-4-3- تحضير النموذج الخاص بدراسة التركيب (معدن-عازل-شبه موصل)(MIS):

تحضير النموذج الخاص بدراسة الخواص الكهربائية للتركيب (MIS) من البوليمرين النقيين بولي فينايل الكحول وبولي هكسائل ثايوفين. تم ترسيب قطب معدن الذهب على طبقة رقيقة من الألمنيوم المرسب مسبقاً باستخدام القناع الخاص بالتركيب والمبين بالشكل (b-6-3) على قاعدة زجاجية وتقنية التبخير تحت ضغط مخلخل كما موضح بالشكل (a-11-3, b). تلا ذلك ترسيب البوليمر النقي P3HT بتقنية الطلاء بالبرم وبسرعة دوران (2500 RPM)، وبعدها أجريت المعالجة الحرارية باستخدام فرن مختبري في درجة حرارة 120°C لمدة (10 min.) كما موضح بالشكل (c-11-3). تم ترسيب البوليمر العازل PVA بتقنية الطلاء بالبرم وبسرعة دوران (2000 RPM)، تم معالجة النماذج حرارياً في درجة حرارة (70°C) لمدة (180min) موضح بالشكل (d-11-3). وأخيراً تم ترسيب قطب البوابة من الألمنيوم -وبالاتجاه المعاكس للقطب السفلي- باستخدام القناع الخاص والمبين بالشكل (b-6-3) وتقنية التبخير تحت ضغط مخلخل موضح بالشكل (e-11-3). والذي يوضح تصنيع أربعة نماذج متماثلة بظروف العمل والمواد للتركيب MIS المصنع.



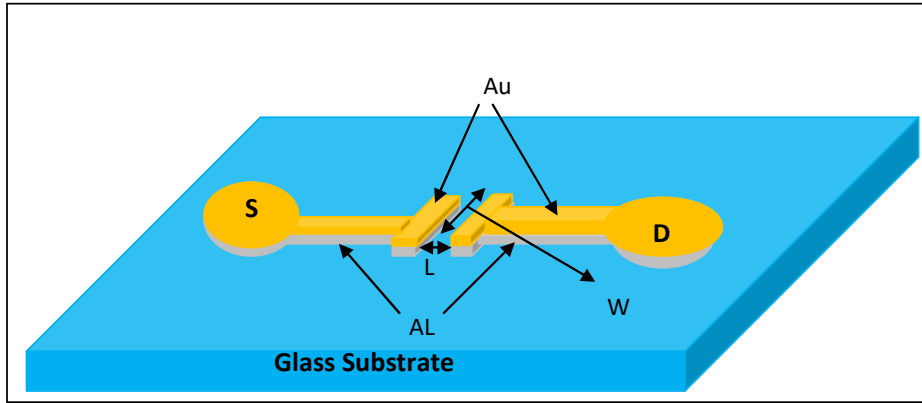
الشكل (3-11) يوضح التركيب MIS المصنع.

5-4-3- تحضير نماذج ترانزستور تأثير المجال العضوي (OEFT):

حضرت النماذج الخاصة بدراسة الخواص الكهربائية لنماذج ترانزستور تأثير المجال العضوي (OFET) بالبنية الهندسية ذات الاتصالات السفلى-البوابة العليا (TG-BC)، للبوليمرات بولي فينيل الكحول وبولي هكساييل ثايوفين النقية والمشوبة بنسب حجمية مختلفة من دقائق الكربون

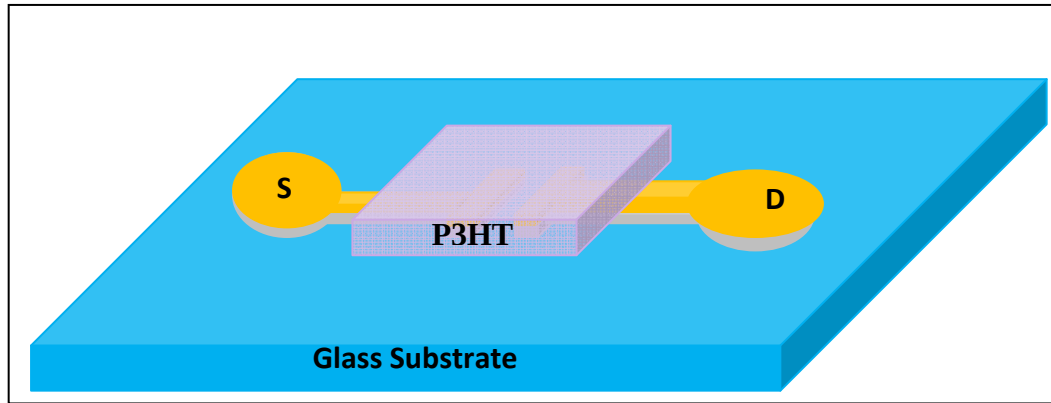
النانونية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%). وكانت مراحل تصنيع النماذج المختبرية لترانزستور تأثير المجال العضوي كما يأتي:

أولاً/ تم ترسيب قطبي معدن الذهب (المصدر والمصرف) بعد ترسيب طبقة رقيقة جداً من معدن الألمنيوم على القاعدة الزجاجية باستخدام الأقفعة الخاصة المبينة بالشكل (d-6-3) وبتقنية التبخير تحت ضغط مخلخل (1.2×10^{-5} Torr). كما مبين بالشكل (12-3).



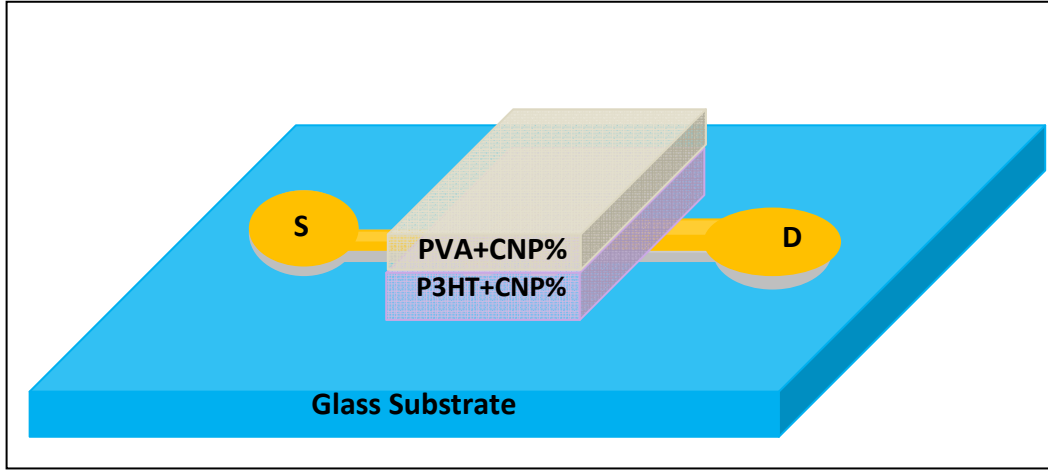
الشكل (12-3) يوضح قطبي S, D المرسلان علة قاعدة زجاجية.

ثانياً/ تم ترسيب البوليمر النقي P3HT بتقنية الطلاء بالبرم، وبعدها تم إجراء المعالجة الحرارية باستخدام فرن حراري في درجة حرارة 120°C لمدة (10 min.) وبمعدل انحدار حرارة قدره ($0.5^\circ\text{C}/\text{min.}$). كما مبين بالشكل (13-3).



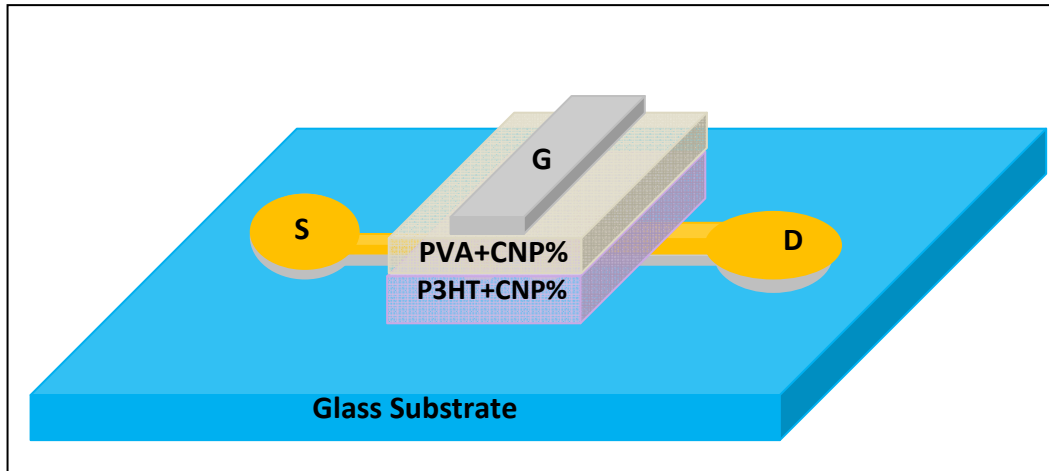
الشكل (13-3) يبين مرحلة ترسيب البوليمر P3HT.

ثالثاً/ تم ترسيب البوليمر PVA بتقنية الطلاء بالبرم وبسرعة دوران (2000 RPM)، تم معالجة النماذج حرارياً في درجة حرارة (70°C) لمدة (180 min.) وبمعدل انحدار حرارة ($0.5^\circ\text{C}/\text{min.}$). كما مبين بالشكل (14-3).



الشكل (3-14) يبين مرحلة ترسيب البوليمر PVA.

رابعاً/ تم ترسيب قطب البوابة من الألومنيوم باستخدام القناع الخاص المبين بالشكل (3-6-c) وبتقنية التبخير تحت ضغط مخلخل قدره $(1.2 \times 10^{-5} \text{ Torr})$. كما مبين بالشكل (3-10-d). كما مبين بالشكل (3-15) الذي يوضح تركيب OFET المصنع.



الشكل (3-15) يبين التركيب الهندسي لنموذج OFET المصنع.

3-5- أجهزة القياس:

استخدمت أجهزة مختلفة لدراسة الخواص البصرية والعازلية وبناء دائرة كهربائية لقياس خواص التركيب (MIS) الكهربائية، وكذلك بناء دائرة قياس خواص الخرج والتحويل لترانزستور تأثير المجال. بالإضافة الى تصنيع مجسات القياس الخاصة بكل منها، ومعايرة دائرة قياس الترانزستور باستخدام ترانزستورات (N, P-MOSFET) قياسية.

(Ellipsometer)**3-5-1-جهاز الاليسوميتر**

تم قياس سمك النماذج المصنعة للبوليمر شبه الموصل بولي هكساييل ثايوفين النقي والمشوب بدقائق الكربون النانوية بالتعاون مع جامعة دورهام (Durham) في المملكة البريطانية المتحدة، وذلك باستخدام جهاز الاليسوميتر (J A Woolam VASE Ellipsometer).

3-5-2-جهاز مطيافية الامتصاصية والنفاذية: (UV-VIS Spectrophotometer)

تم قياس طيف الامتصاصية والنفاذية للأغشية المحضرة للبوليمر P3HT النقي في مدى الأطوال الموجية (300-800 nm)، باستخدام جهاز المطياف (Spectrophotometer) الموضح بالشكل (3-16)، وهو من النوع (UV-1800) ياباني المنشأ، والمجهز من شركة (SHIMADZU).



الشكل (3-16) جهاز المطياف المستخدم.

3-5-3-تقنية حيود الأشعة السينية: (X-Ray Diffraction-XRD)

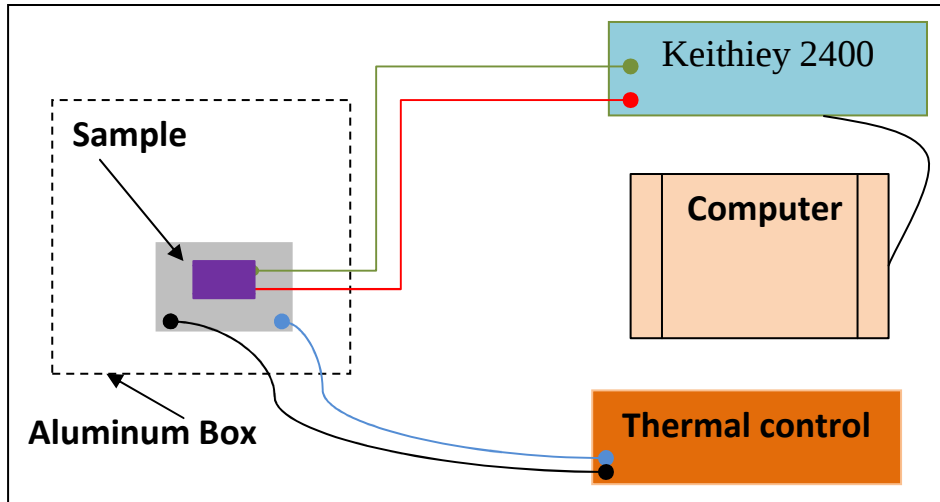
تم استخدام جهاز (X-Ray Diffractometer) من النموذج X- (Model: XRD-6000, X-Ray Tube: Cu, NF type)، المجهز من شركة (Shimadzu) الأمريكية، لفحص الصفات البلورية لأغشية البوليمرين P3HT و PVA النقية والمشوبة بدقائق الكربون النانوية.

3-5-4-مجهر القوة الذرية: (Atomic Force Microscope, AFM)

تم استخدام جهاز مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscopy) من النموذج (Model: AA3000)، المجهز من شركة (Angstrom Advanced Inc.) الأمريكية، الموجود في جامعة بغداد/ كلية العلوم، لفحص الصفات التركيبية لأغشية البوليمر P3HT النقي والمشوب بدقائق الكربون النانوية.

3-5-5- دائرة قياس ميزة التيار- الفولتية (I-V):

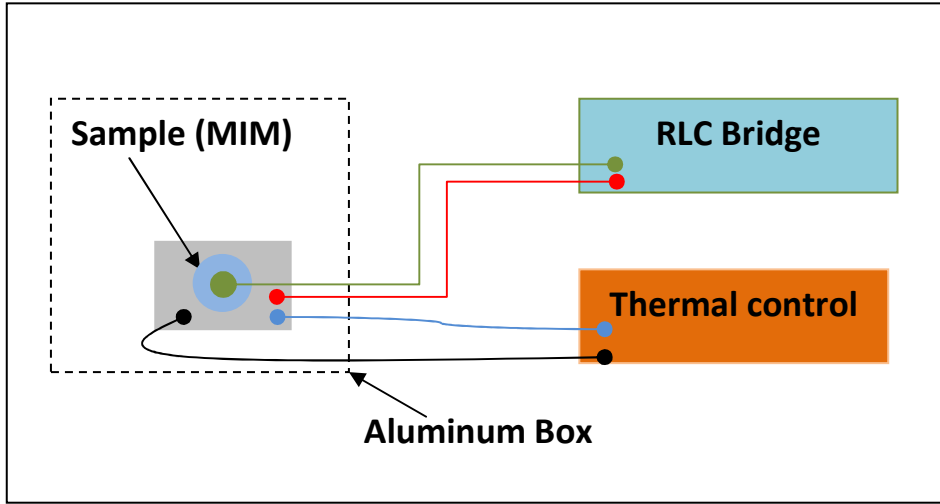
استخدم جهاز كثلي من النوع (Keithley Series 2400 Source Meter) امريكي المنشأ لقياس ميزة (I-V) في الدائرة الموضحة في الشكل (3-17)، تم ربط الجهاز الى الحاسوب للسيطرة على مدى القياس من خلال برامج معدة مسبقا لهذا الغرض، وباستخدام غرفة مصنعة من صفائح الألمنيوم ومجهزة بأقطاب نحاسية متحركة باتجاهات مختلفة ومصدر حراري يتم السيطرة من خلاله على درجة الحرارة باستخدام جهاز قدرة. تمت معايرته باستخدام مجس حراري مربوط بجهاز قياس درجات الحرارة المقابلة لكل فولتية مجهزة للدائرة. تم ربط أجزاء دائرة القياس بأسلاك نحاسية معزولة كهربائيا. وتم توصيل الدائرة بالارض لغرض تسريب التيارات الشاردة. تم قياس الخواص الكهربائية المتمثلة بميزة (I-V) لجميع النماذج المحضرة في الظلام وفي درجات حرارة مختلفة (30, 40, 50, 60, 70°C).



الشكل (3-17) يوضح مخطط دائرة قياس ميزة I-V.

3-5-6- دائرة قياس الخواص العازلية:

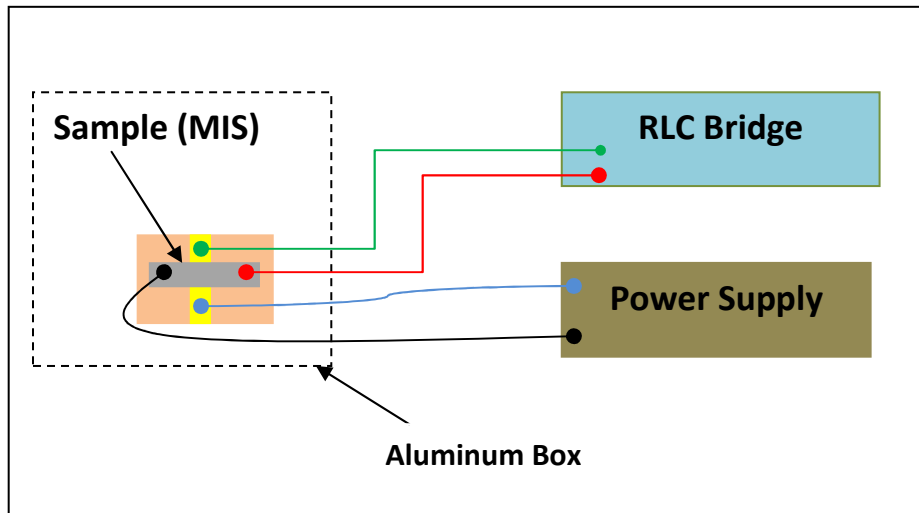
استخدمت دائرة القياس المكونة من المنظومة الحاسوبية (FLUKE PM6306 Programmable Automatic RLC METER) ذات المنشأ الألماني، وخلية القياس الحرارية للسيطرة على درجة حرارة النموذج بدقة عالية، والموضحة بالشكل (3-18)، لقياس الخواص العازلية للتركيب (MIM) في تردد ثابت (1KHz)، المتمثلة بميزة (C-T) لجميع النماذج المحضرة في الظلام ودرجات حرارة مختلفة (30, 40, 50, 60, 70°C).



الشكل (18-3) يوضح الدائرة المستخدمة لقياس الخواص العازلية.

3-5-7- دائرة قياس ميزة (C-V):

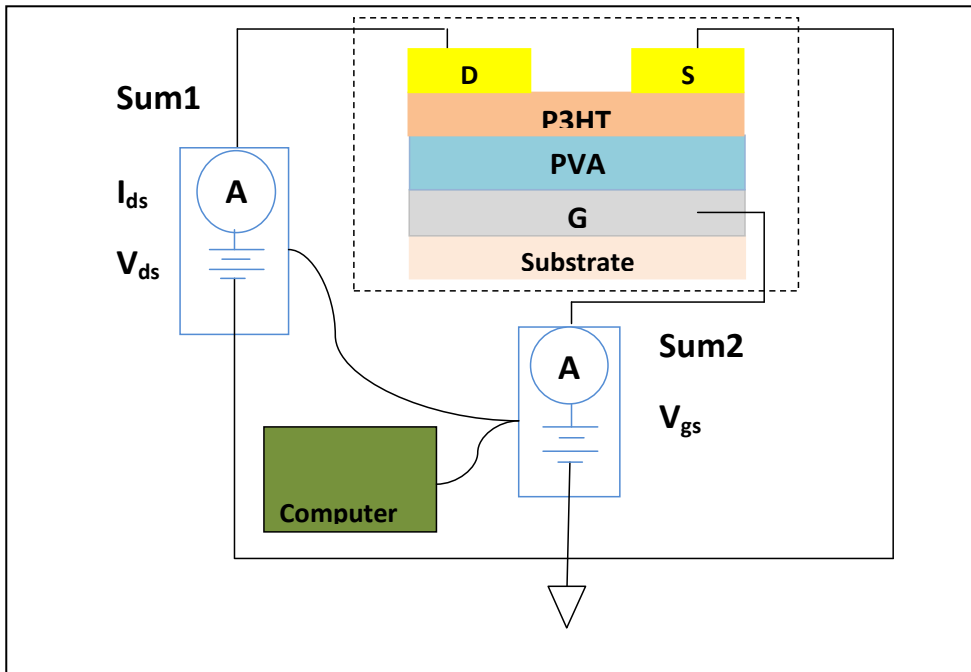
استخدمت الدائرة المكونة من جهاز القدرة من النوع (GSM-Sources-1502AD-DC) ذي المنشأ الصيني، والمنظومة الحاسوبية (FLUKE PM6306 Programmable Automatic RLC METER)، المانية المنشأ. ودائرة القياس موضحة بالشكل (19-3)، وخلية قياس ميزة (C-V) التي تم تصنيعها مختبرياً لهذا الغرض، تم قياس الخواص الكهربائية للتركيب (MIS) المتمثلة بميزة (C-V) في الترددات العالية والمنخفضة للنماذج المحضرة لهذا الغرض، وكذلك ميزة (C-F).



الشكل (19-3) يوضح الدائرة المستخدمة لقياس ميزتي (C-F) & (C-V).

3-5-8- دائرة قياس الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال:

استخدمت المنظومة الحاسوبية المزدوجة (Double-Keithley Series 2400 Source Meter) والتي رمزنا اليهما (Sum1, Sum2) ذات المنشأ الأمريكي، وخلية قياس صنعت مختبرياً لقياس الخواص الكهربائية المتمثلة بميزة الخرج وميزة التحويل لنماذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة لهذا الغرض، وتم معايرة الدائرة باستخدام P-IRF9630,N840-MOSFET. ويبين الشكل (20-3) الدائرة المستخدمة في قياس الخواص الكهربائية لترانزستور OFET، حيث تتكون من جهازي قياس التيار والفولتية الرقمي (Keithley Digital electrometer)، يربط طرفي احدهما (Sum 1) الى قطبي (المصدر-المصرف) والذي يعمل على تجهيز فولتية المصرف V_{ds} وقياس I_{ds} المقابل. بينما يربط طرفي الجهاز الآخر (Sum 2) الى قطب البوابة وقطب المصدر (الذي يعتبر القطب المشترك في عملية القياس والذي يربط إلى الأرض)، ويعمل هذا الجهاز على تجهيز فولتية البوابة V_{gs} المستمرة (ميزة الخرج). وكذلك لقياس ميزة التحويل عبر تعديل الإعدادات الحاسوبية. يتصل كلا الجهازين بجهاز الحاسوب الذي يحتوي على برامج أعدت خصيصاً لقياس مميزات الخرج والتحويل من خلال إعادة ضبط البرامج. وتوضع النسيطة المراد دراسة خواصها الكهربائية في صندوق مصنوع من الألمنيوم مجهز بثلاث مجسات متحركة مدببة النهايات صنعت من صفائح نحاسية. توصل هذه المجسات بالعينة وتربط إلى دائرة القياس. يربط الصندوق بأسلاك من النحاس تتصل بالأرض لغرض تسريب المجالات الشاردة. تمت إجراء جميع القياسات بالظلام وفي درجة حرارة المختبر.



الشكل (20-3) مخطط الدائرة المستخدمة في قياس الخواص الكهربائية لترانزستور العضوي.

الفصل الرابع

نتائج الخواص الفيزيائية العامة للمواد

4- تمهيد:

نستعرض في هذا الفصل من الدراسة مناقشة مستفيضة للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال فحص عينات الأغشية الرقيقة للبوليمرات المختارة وتشخيصها والتي هي بولي فينايل الكحول (PVA) وبولي هكساييل ثايوفين (P3HT)، إذ تركزت الدراسة على تشخيص أغشية PVA المحضرة بالحالة النقية والحالة المشوبة بدقائق الكربون النانوية بتقنية حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction). واستخدم جهاز مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscopy-AFM) لتشخيص الأغشية الرقيقة للبوليمر بولي هكساييل ثايوفين النقي والمشوب بـ CNPs. وكذلك مناقشة نتائج الفحوصات المتعلقة بتأثير سمك الغشاء ودرجة الحرارة ونسبة المضاف من دقائق الكربون النانوية (CNPs) على الخواص البصرية والكهربائية التي أجريت على نماذج الأغشية الرقيقة المصنعة من البوليمر P3HT النقية منها والمشوبة بنسب مختلفة من CNPs كدالة لتغير نسبة التشويب والسمك ودرجة الحرارة وتأثيرها على هذه الخواص.

بالإضافة إلى دراسة نتائج قياس السعة الكهربائية كدالة لتغير سمك الغشاء ونسبة التشويب من المضاف CNPs ودرجة الحرارة في المدى (30-70°C) وتأثير هذه المتغيرات على الخواص السعوية على نماذج الأغشية الرقيقة المصنعة بالتركيب $Al/(PVA:CNPs\%)/Au$ للبوليمر PVA النقي والمشوب بنسب مختلفة من دقائق الكربون النانوية عند تردد ثابت (1 KHz). إضافة إلى دراسة نتائج تغير ثابت العزل الكهربائي لهذا البوليمر بالتركيب $Al/(PVA:CNPs\%)/Al$ كدالة لنسبة المضاف CNPs.

سوف نناقش نتائج دراسة ميزة الفولتية-السعة (C-V) للتركيب MIS المصنوع من البوليمرين النقيين والمتمثل بالصيغة (Au/P3HT/PVA/Al) عند الترددات (50 Hz, 100 KHz) ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع القيم المعيارية الثابتة للتركيب MIS. إضافة إلى مناقشة نتائج ميزة (C-F) للتركيب MIS المصنوع في مدى الترددات (1KHz-1MHz) كدالة لتغير الجهد المسلط ضمن مدى الفولتية المسلطة من (-2.5V) إلى (+2.5V). أخيراً جدولت النتائج المستحصلة ومقارنتها بنتائج دراسات سابقة لهذه الدراسة.

1-4- نتائج الفحوصات التركيبية للأغشية الرقيقة المحضرة.

في هذه الدراسة تم فحص وتشخيص الأغشية الرقيقة باستخدام جهاز حيود الأشعة السينية (XRD) للبوليمر (PVA) لمعرفة التراكيب البلورية والحجم البلوري وتأثير إضافة (CNPs) عليها. كذلك تم استخدام تقنية مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscopy-AFM)

لمعرفة تضاريس سطوح (خشونة السطح) لأغشية البوليمر (P3HT) النقية والمشوبة وحجم الحبيبات وطبيعة تأثير CNPs في تشكيل الأغشية الرقيقة. وسوف نستعرض النتائج المستحصلة باستخدام هذه التقنيات من خلال:-

1-1-4- نتائج فحوصات حيود الأشعة السينية (XRD) للبوليمر PVA.

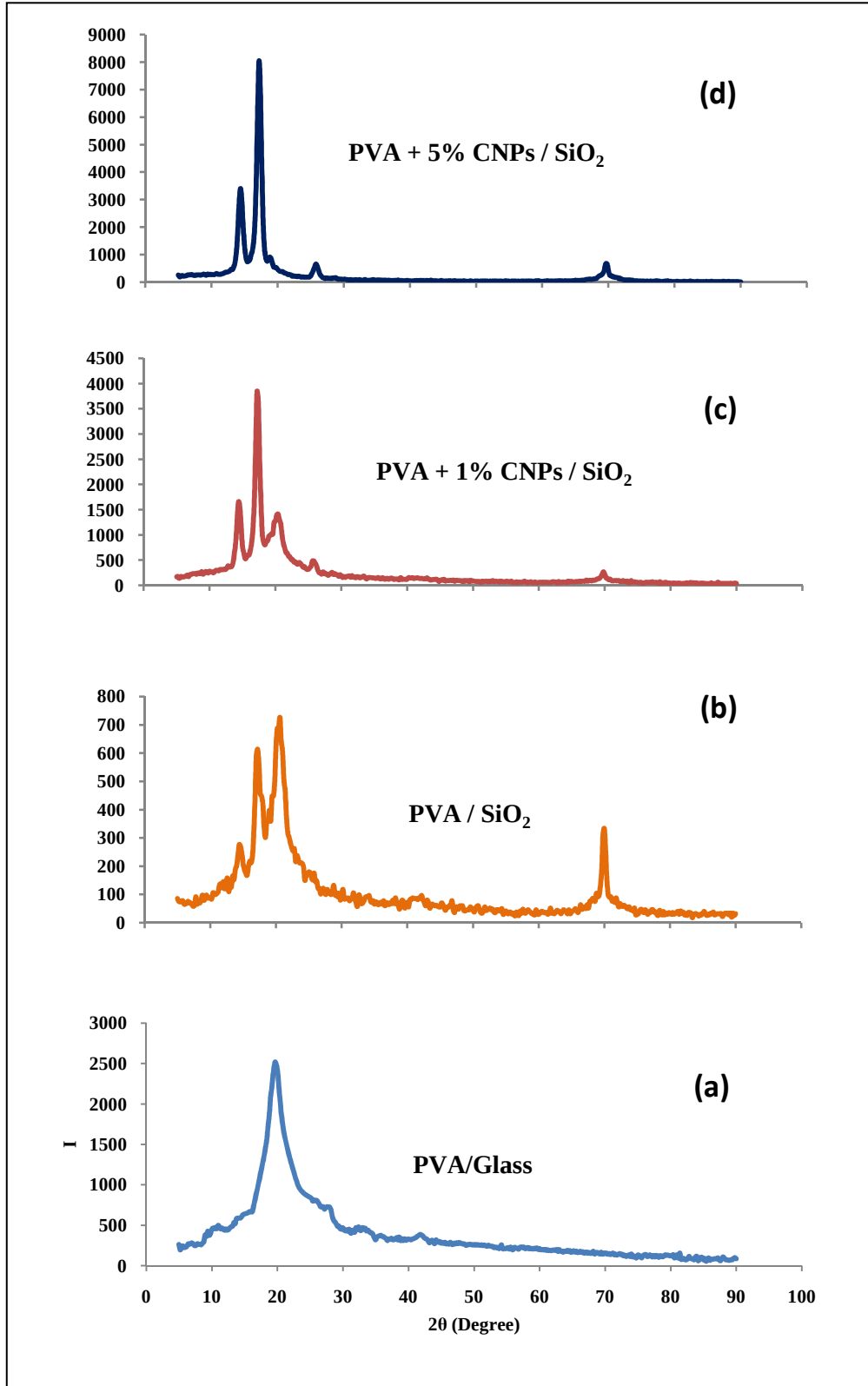
تم فحص نماذج الأغشية الرقيقة للبوليمر (PVA) النقية على نوعين من القواعد هما الزجاجية والسليكونية ((Silicon Dioxide-SiO₂ (n-[100])), لدراسة تأثير نوع القاعدة المستخدمة على طبيعة تشكل الأغشية الرقيقة للبوليمر، وكذلك المشوبة بدقائق الكربون النانوية بالنسبتين (1 %), 5 % على قواعد السليكون، وذلك باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) لغرض تحديد الطبيعة البلورية لهذه الأغشية وحجم البلورات المتشكلة بعد عملية التلدين الحراري التي أجريت على النماذج المحضرة (PVA: 70°C for 3h.) لغرض الإنماء البلوري من خلال إعادة انتظام السلاسل البوليمرية وبالتالي تحسين بلورية الأغشية. إذ تمت عملية الفحص باستخدام الطول الموجي (1) $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ Cu/K- α ضمن المدى الزاوي ($2\theta = 5^\circ - 90^\circ$). وتم حساب حجم البلورة باستخدام معادلة شيرر (Scherrers Formula): [276]

$$D_L = 0.94\lambda / \beta \cos\theta \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

حيث D_L يمثل حجم البلورة و λ الطول الموجي المستخدم و β عرض منتصف ارتفاع القمة (Full Width Half Maximum-FWHM) و θ هي زاوية الحيود.

يبين الشكل (4-1) نتائج فحص حيود الأشعة السينية للبوليمر PVA النقي على نوعين من القواعد (الزجاجية والسليكونية)، وكذلك المشوبة بالنسبتين (1%, 5%) بدقائق الكربون النانوية. ويظهر من الشكل (a-4-1) إن الغشاء المتكون على قاعدة زجاجية هو غشاء ذات انتظام بلوري جزئي، وتظهر فيه القمة الأعلى عند زاوية الحيود ($2\theta = 19.65^\circ$) عند الطول الموجي الذي يحيد بفعل المستوي البلوري (101) من غشاء البوليمر المتشكل مباشرة على سطح قاعدة الترسيب، إضافة الى القمم الأقل شدة الأخرى المبينة في الجدول (4-1) والتي تظهر الطبيعة شبه البلورية للغشاء.

ويبين الشكل (b-4-1) طبيعة تشكيل الغشاء على قاعدة سليكونية، وهو غشاء شبه بلوري، وإن تشكل القمة عند الزاوية ($2\theta = 69.8979^\circ$) ناتجة عن القاعدة السليكونية. ويمكن الاستدلال من خلال المقارنة بين الشكلين والجدولين (4-1) و (4-2) تأثير سطح القاعدة في عدد وحجم البلورات المتكونة، إذ إن الأغشية المرسبة على قواعد زجاجية تكون أكثر عشوائية من الأغشية



الشكل (4-1) يوضح مخطط حيود الأشعة السينية لأغشية البوليمر (a): PVA على قاعدة زجاجية، (b): على قاعدة (SiO₂ (n-100)، (c): المشوب (1% CNP)، (d): المشوب (5% CNP).

المرسبة على قواعد سليكونية. وبصورة عامة فإن الطبيعة شبه البلورية لغشاء البوليمر PVA والنتيجة عند للترابط الهيدروجيني البيني القوي للجزيئات في سلاسل البوليمر PVA هي السائدة، وتمثل فيها شدة قمة الحيود وحجم البلورة مقياس لعدد السلاسل البوليمرية المجمعة والمتراصة بشكل منتظم. وترتبط كثافة القمم أيضا بطبيعة التحول من مرحلة الإذابة (والتي تعني العشوائية) الى مرحلة النمو البلوري (والتي تبدأ عندها جزيئات البوليمر بالاصطفاف البلوري) ثم مرحلة التحول الزجاجي للغشاء (والتي عندها تتقارب وتصفط السلاسل الفرعية باتجاه المستوي الخارجي). [277-280]

الجدول (1-4) يبين نتائج XRD المستحصلة من ترسيب PVA على قاعدة زجاجية.

peak no.	2Theta (deg.)	$D_L(^{\circ}A)$	I/I_0	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int(Counts)
1	19.6519	4.51376	100	2.73710	1460	17967
2	23.0550	3.85462	30	6.80000	441	14178
3	27.6466	3.22398	14	0.00000	207	0

الجدول (2-4) يبين نتائج XRD المستحصلة من ترسيب PVA على قاعدة سليكونية.

peak no.	2Theta (deg.)	$D_L(^{\circ}A)$	I/I_0	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int(Counts)
1	14.4765	6.11371	28	1.87700	110	1072
2	17.4691	5.07254	74	2.09160	296	3098
3	20.4367	4.34217	100	2.56710	398	5326
4	69.8979	1.34469	32	1.62460	127	1284

عند إجراء مقارنة بسيطة بين الأشكال (c, d-4-1) والتي تمثل الأغشية الرقيقة للبوليمر PVA المشوب بالنسبتين (1%, 5%) والمرسبة على قواعد سليكونية والجدولين (4-3) و (4-4) المستحصلة منها من جهة، والشكل (b-4-1) الجدول (4-2) للبوليمر النقي من جهة أخرى، نلاحظ أن الأغشية بصورة عامة هي أغشية شبه بلورية تقل فيها كثافة القمم ابتداءً من الحالة النقية وانتقالاً للغشاء المشوب بنسبة (1% CNP) ثم للغشاء المشوب (5% CNP) مع زيادة في شدة الحيود. أي أن المضاف CNP كان له تأثير في زيادة البلورية داخل مصفوفة البوليمر PVA، وهذا التأثير يزداد بزيادة نسبة المضاف. إضافة الى إزاحة اغلب القمم في الأغشية المشوبة (ولو بدرجة بسيطة) عن موضعها الأصلي في الغشاء النقي، اي انها تغير في مواقع

انتشار البلورات المتشكلة في داخل الغشاء. أي إن عملية التشويب تؤثر في خواص الغشاء الكهربائية والبصرية والميكانيكية للغشاء والتي ترتبط بدرجة الانتظام البلوري في الغشاء، وهذه النتيجة مطابقة لدراسات سابقة [277, 281-283].

الجدول (3-4) يبين نتائج XRD المستحصلة من ترسيب (PVA + 1% CNPs) على قاعدة سليكونية.

peak no.	2Theta (deg.)	$D_L(^{\circ}A)$	I/I_0	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	14.5202	6.09541	38	0.85150	843	4304
2	17.3426	5.10925	100	0.84640	2245	12441
3	20.4615	4.33696	30	1.46780	674	6931
4	25.8574	3.44286	6	0.89250	142	726
5	69.7197	1.34769	5	0.86970	122	878

الجدول (4-4) يبين نتائج XRD المستحصلة من ترسيب (PVA + 5% CNPs) على قاعدة سليكونية.

peak no.	2Theta (deg.)	$D_L(^{\circ}A)$	I/I_0	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	14.4807	6.11195	40	0.91440	2064	11241
2	17.2790	5.12792	100	0.85060	5101	24671
3	19.0657	4.65120	8	1.03080	414	4232
4	25.8402	3.44511	6	0.89290	318	1567
5	69.6350	1.34912	8	0.78690	425	3027

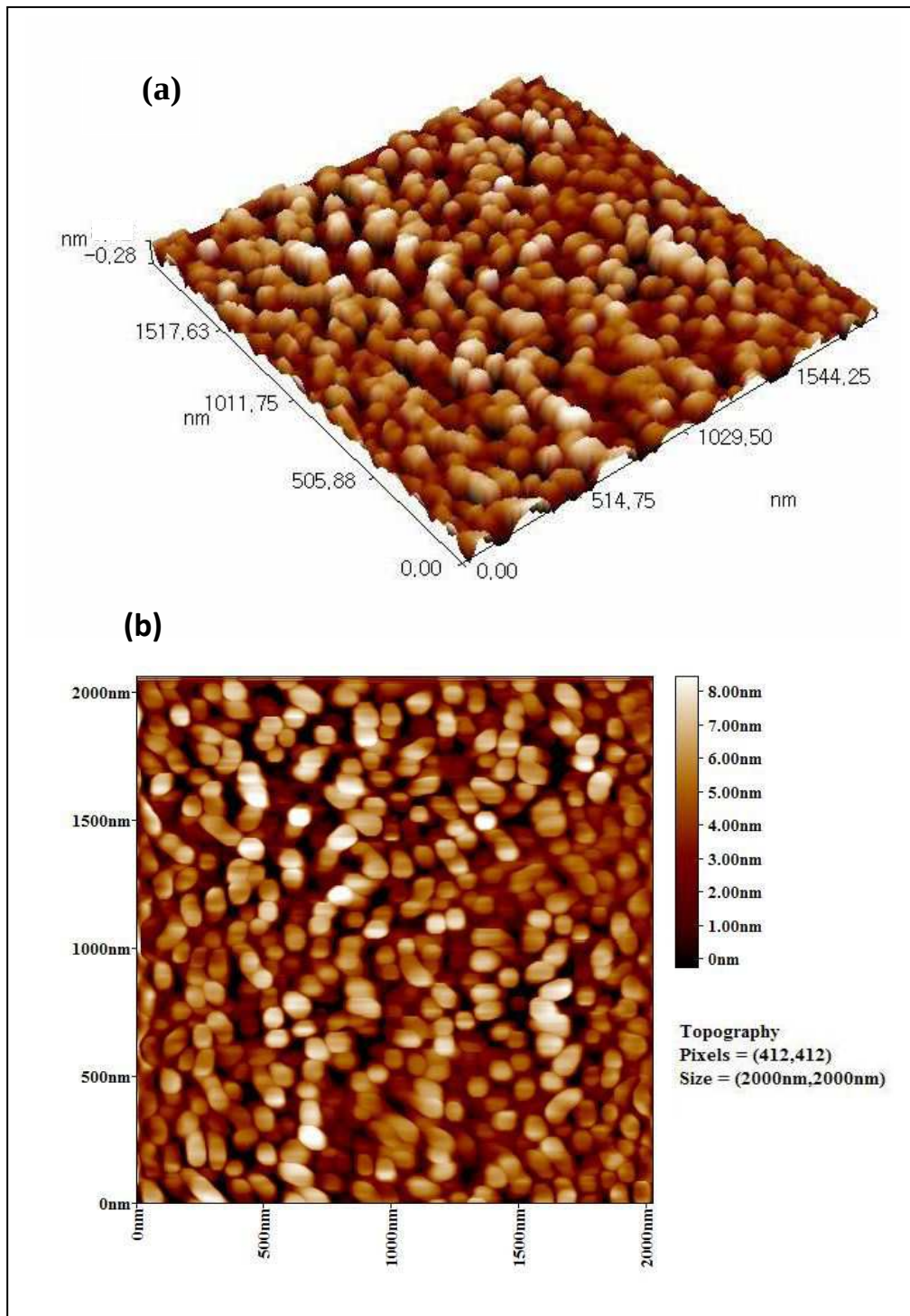
2-1-4- نتائج الفحوصات باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM).

تم فحص طبيعة السطح وحجم وتوزيع الحبيبات للأغشية الرقيقة وتشخيصها لأغشية البوليمر P3HT النقية والمشوبة بالنسبتين (5 %، 1 %) بدقائق الكربون النانوية (CNPs) لمعرفة تأثير التشويب على هذه الصفات، باستخدام جهاز مجهر القوة الذرية.

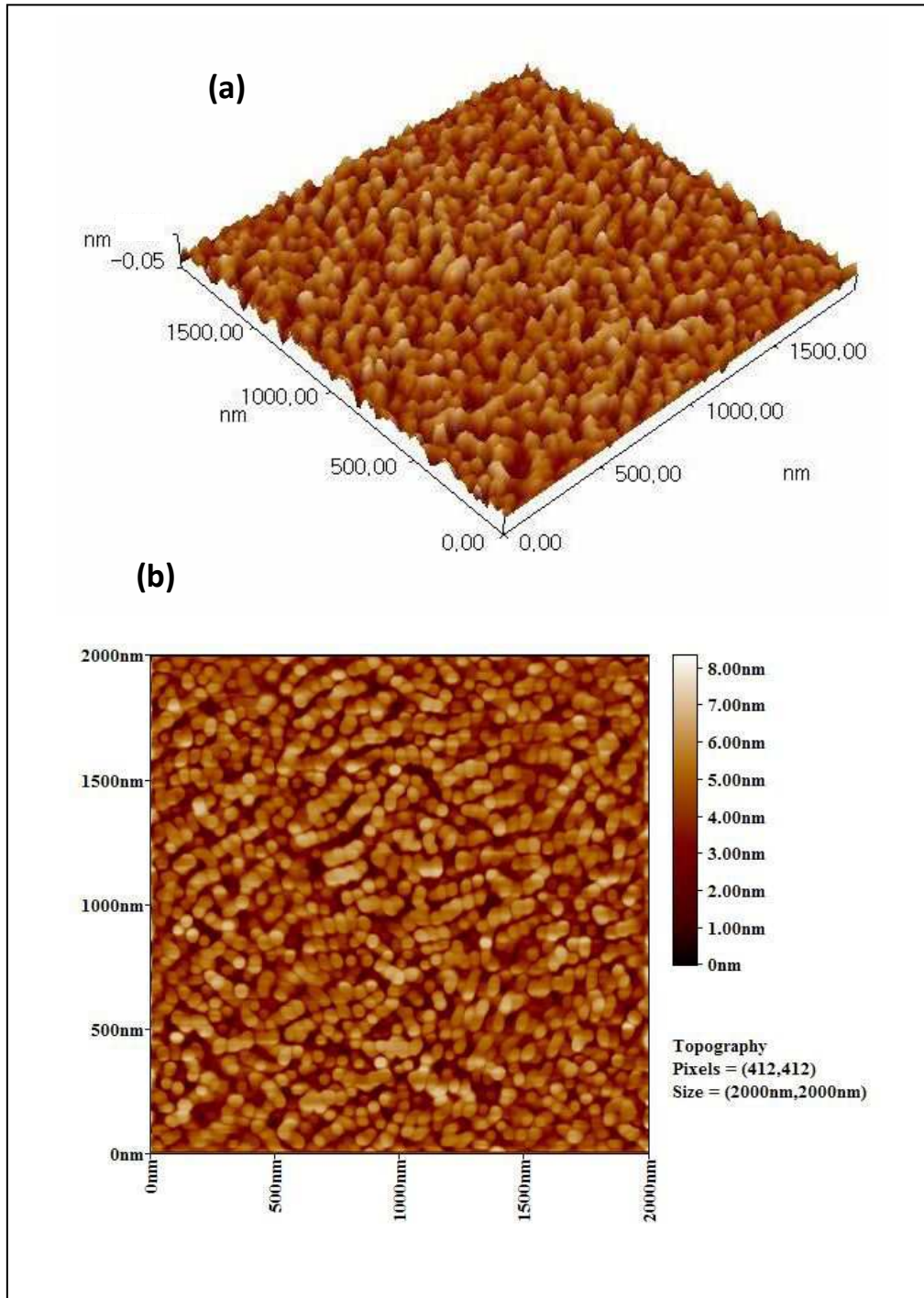
وتبين الأشكال (4-2) و(4-3) و (4-4) نتائج الفحص للنماذج المحضرة للبوليمر P3HT النقي والمشوب بدقائق الكربون النانوية بالنسبتين (5 %، 1 %) على التوالي، ويبين الجدول (5-4) النتائج المستحصلة من هذه الفحوصات. اذ يوضح الجزء (a) من الأشكال المذكورة الصورة ثلاثية الأبعاد، أما الجزء (b) فيوضح الصورة ببعدين للنماذج المحضرة. ويتضح من هذه النتائج ان غشاء البوليمر P3HT هو غشاء شبه بلوري، وبمقارنة بسيطة بين النتائج تبين أن خشونة السطح و R_q تنخفض عند تشويب الغشاء بنسبة 1% من دقائق لكرتون النانوية، وتزداد هذه الخاصية للأغشية عند نسبة التشويب 5% من المادة الشائبة. كذلك يزداد عدد الحبيبات المتشكلة وينخفض معدل قطرها بالغشاء عند نسبة التشويب 1% مقارنة بالغشاء النقي للبوليمر P3HT وينعكس هذا السلوك بزيادة نسبة المادة الشائبة الى 5%. إن تأثير المادة الشائبة المضافة الى البوليمر P3HT في طبيعة تشكيل البلورات وزيادة خشونة السطح الخارجي و R_q مقارنة بالغشاء النقي (جنباً الى جنب مع المؤثرات الأخرى مثل طبيعة المذيب وسرعة التبريد وطبيعة انتشار السلاسل البوليمرية)، هو سلوك مطابق لدراسات سابقة [284-288].

الجدول (5-4) يبين النتائج المستخلصة من فحوصات AFM للنماذج المحضرة.

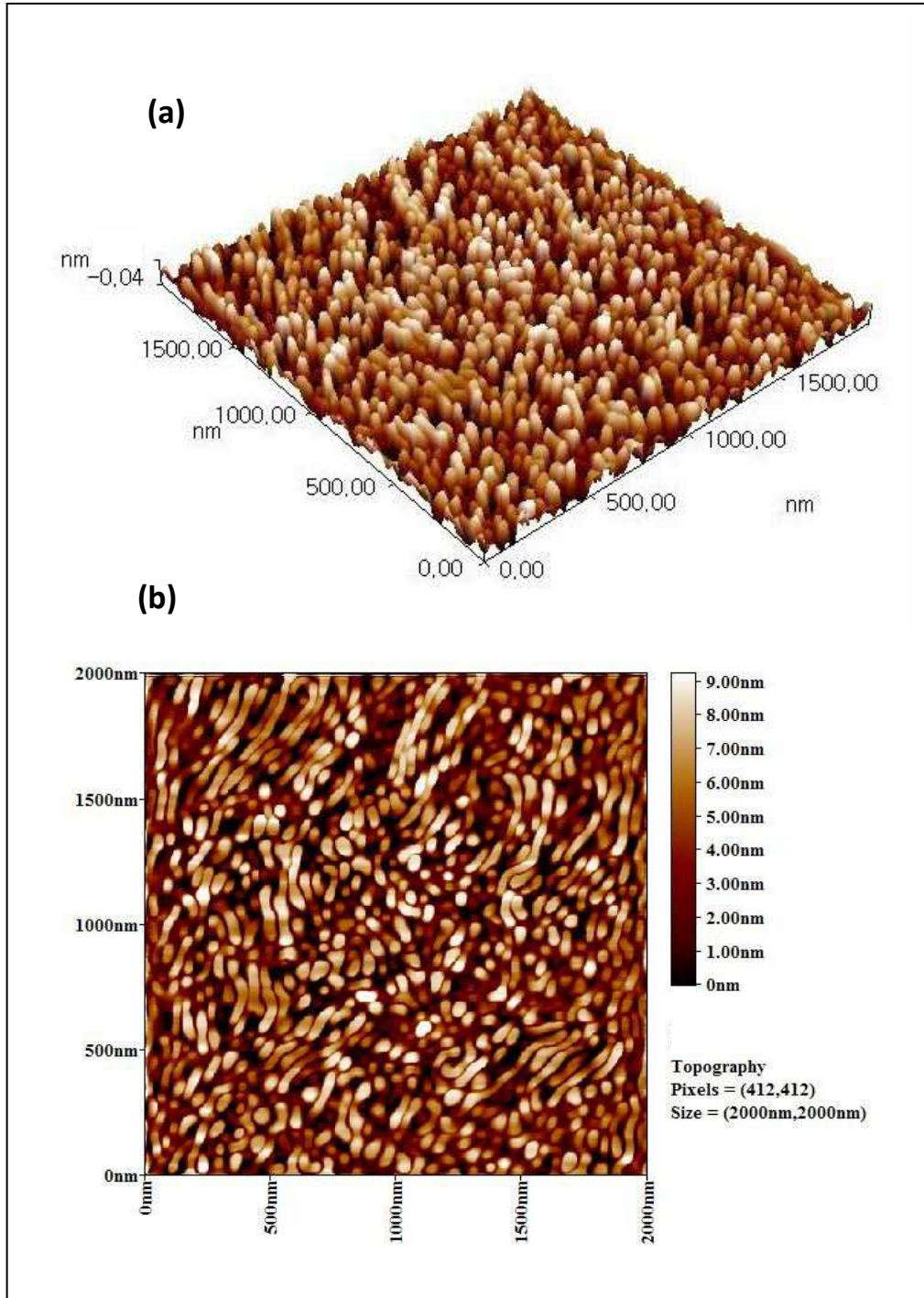
Sample property	Pure P3HT	P3HT + 1%CNPs	P3HT + 5%CNPs
Rough. Avg. (nm)	1.77	1.02	2.24
R_q (nm)	2.11	1.26	2.6
Grain NO.	173	282	213
Avg. Diameter(nm)	84.93	49.69	57.88



الشكل (4-2) يبين صور فحص AFM للبوليمر P3HT النقي: (a) 3D، (b) 2D.



الشكل (4-3) يبين صور فحص AFM للبوليمر (P3HT+1%CNPs): (a) 3D، (b) 2D.



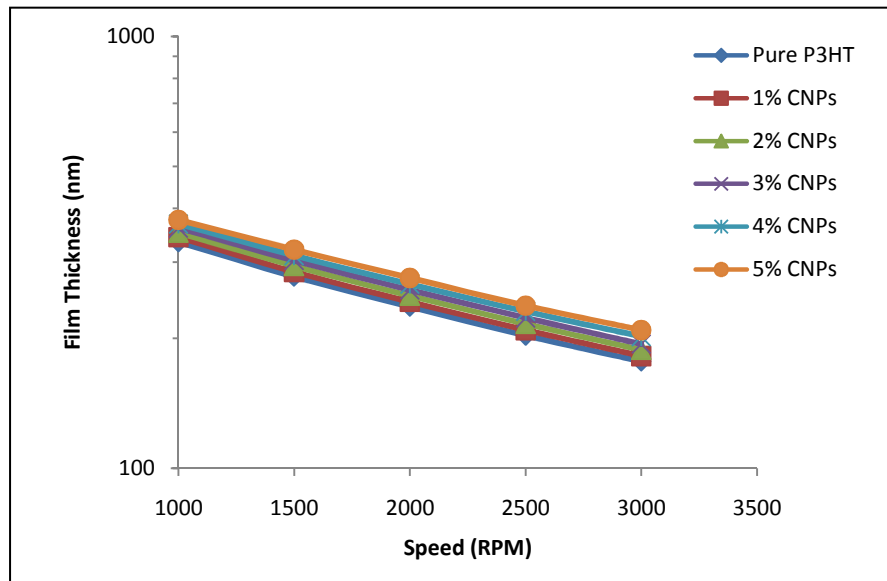
الشكل (4-4) يبين صور فحص AFM للبوليمر (P3HT+5%CNPs): (a) 3D، (b) 2D.

2-4- نتائج قياس سمك الأغشية للبوليمر P3HT:

تم قياس سمك العينات لجميع النماذج المحضرة في هذه الدراسة لأغشية البوليمر P3HT النقي والمشوب بـ CNPs بالنسب الحجمية (1%, 2%, 3%, 4%, 5%). وحسب العلاقة بين سمك الغشاء الرقيق (t) وسرعة الدوران (w) الخاصة بتقنية الطلاء بالبرم المعادلة (4-2): [289]

$$t = Aw^S \quad \text{or} \quad \text{Log}(t) = \text{Log}(A) + S \text{Log}(w) \dots\dots (4 - 2)$$

حيث A,S ثابت. تم رسم العلاقة بين سمك العينات وسرعة الدوران لتقنية الطلاء المستخدمة لترسيب النماذج. كما مبين بالشكل (4-5). يلاحظ من الشكل زيادة السمك بتأثير إضافة دقائق الكربون النانوية في جميع نسب الإضافة، حيث يظهر تأثير كمية دقائق الكربون النانوية المضافة مسببا زيادة في سمك الأغشية للبوليمر P3HT عند كل سرعة دوران مستخدمة. وتقود زيادة سرعة الدوران الى نقصان سمك للبوليمر النقي والمشوب كما هو واضح من الشكل، اذ يتناسب السمك عكسيا مع سرعة الدوران. وهذا سلوك عام مستحصل عليه في اغلب الدراسات السابقة.[290-294] ويوضح الجدول (4-6) نتائج قياس سمك النماذج المحضرة بدلالة سرعة الدوران والنسب الحجمية من المضاف CNPs، حيث كان زمن دوران جهاز طلاء البرم دقيقة واحدة.



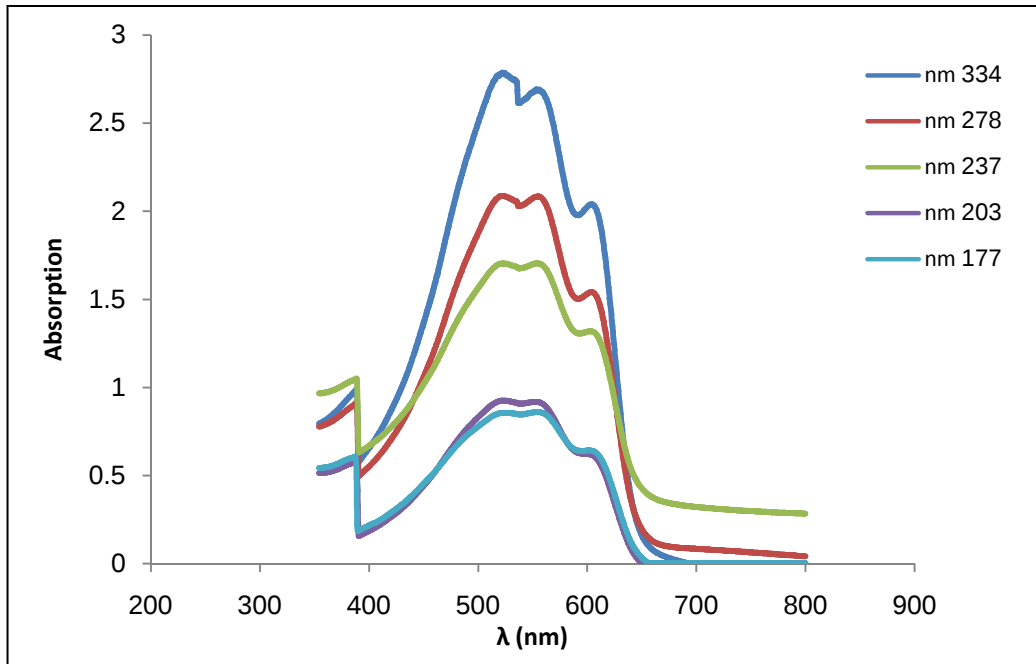
الشكل (4-5) يوضح العلاقة بين السمك وسرعة الدوران للأغشية الرقيقة للبوليمر P3HT النقي والمشوب بدقائق الكربون النانوية.

الجدول (4-6) يبين نتائج السمك للنماذج P3HT المحضرة بدلالة سرعة الدوران ونسب المضاف.

Speed RPM	P3HT pure	1% CNP	2% CNP	3% CNP	4% CNP	5% CNP
	Film Thickness (nm.)					
1000	334	343	351	360	368	376
1500	278	285	294	303	311	321
2000	237	243	251	259	267	276
2500	203	209	216	223	231	238
3000	177	182	188	194	202	209

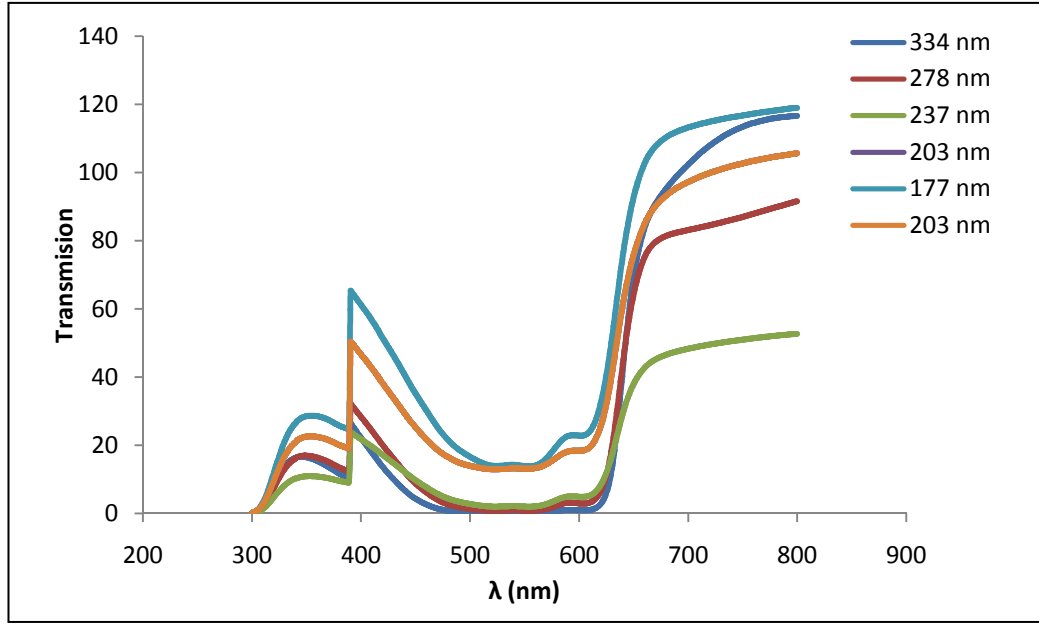
3-4- نتائج قياس الخواص البصرية للبوليمر P3HT:

تم قياس أطيف الامتصاصية والنفاذية لأغشية البوليمر بولي هكسايل ثايوفين P3HT النقي لعينات مختلفة السمك الموضحة في الفقرة (3-4-1) من لفصل الثالث والمبينة في الجدول (4-6). تبين الاشكال (4-7), (4-6) أطيف الامتصاص والنفاذ (UV/Vis) لأغشية البوليمر P3HT النقي الرقيقة المحضرة بطريقة الطلاء بالبرم ولعينات مختلفة السمك (334, 278, 237, 203, 177)nm والمعالجة حراريا بدرجة حرارة (120°C) ولمدة (20 min.). وظهرت قمم الامتصاص عند الأطوال الموجية nm. (510, 555, 600) لجميع الأغشية، والتي تتفق مع نتائج الدراسات السابقة [295-296] نلاحظ من الشكل ان سبب ظهور قمم الامتصاص عند الطولين الموجيين (510, 555nm) ينشأ بسبب الانتقال ($\pi-\pi^*$) نتيجة وجود الأصرة (C=C). أما سبب ظهور القمة الثالثة عند الطول الموجي (600nm) بسبب الانتقال (m- π) نتيجة تفاعل السلسلة الداخلية. (297-298) ويلاحظ تغير في شدة طيف الامتصاص للنماذج المحضرة مع سرعة الدوران، او بعبارة أخرى مع سمك النماذج. اذ تتناسب شدة الامتصاص طرديا مع سمك النماذج لجميع النماذج المحضرة. وتتطابق هذه النتائج مع دراسات سبقتها. [295, 299-302]



الشكل (4-6) يوضح طيف الامتصاصية لأغشية البوليمر P3HT النقي ولعينات مختلفة السمك

(334, 278, 237, 203, 177)nm.



الشكل (4-7) يوضح طيف النفاذية لأغشية البوليمر P3HT النقي ولعينات مختلفة السمك

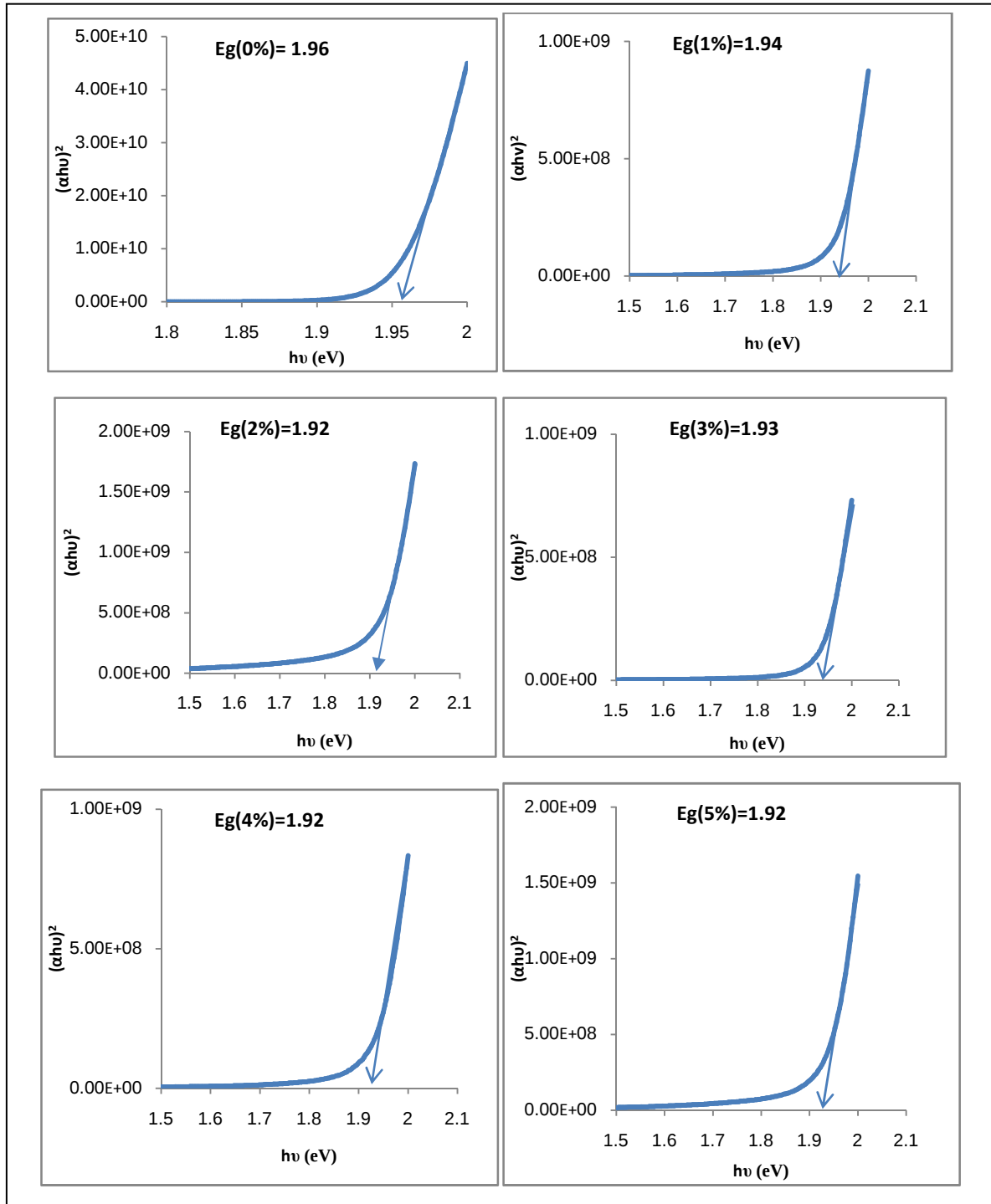
(334, 278, 237, 203, 177)nm

لغرض معرفة نوعية الانتقالات الالكترونية وتأثير التشويب عليها، تم استخدام أطياف الامتصاصية والنفاذية المقاسة لأغشية البوليمر بولي هكسايل ثايوفين P3HT النقي والمشوب بنسب مختلفة من دقائق الكربون النانوية (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%) للعينات عند سرعة الدوران (1500RPM) وذات أغشية مختلفة السمك (278, 285, 294, 303, 311, 321)nm على التوالي، تم حساب معامل الامتصاص (α) وطاقة الفوتون ($h\nu$). ان جميع قيم معامل الامتصاص ولجميع نماذج الدراسة المحضرة اكبر من (10^4 1/sec). وبذلك تمتلك الأغشية المحضرة انتقالات الكترونية مباشرة. وباستخدام العلاقة [302, 303-304]:

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \dots \dots \dots (4 - 3)$$

حيث E_g فجوة الطاقة الضوئية و n مرتبط بنوع الانتقال (في الانتقال المباشر $n=0.5$).

تم رسم العلاقة $(\alpha h\nu)^2$ وطاقة الفوتون ($h\nu$) كما هو مبين بالشكل (4-8) لأغشية البوليمر P3HT المشوبة بنسب مختلفة من CNPs (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%). تم حساب فجوة الطاقة (E_g) لجميع النسب من تقاطع مماس الخط المستقيم مع محور السينات ($h\nu$)، كما هو موضح بالشكل (4-8)، ويبين الجدول (4-7) القيم المحسوبة لفجوة الطاقة لكل نسبة تشويب للبوليمر P3HT بـ CNPs. ان تأثير التشويب على أغشية البوليمر P3HT في تقليص فجوة هو سلوك متشابه مع الدراسات السابقة ويعتمد على نوع المادة المضافة ونسبتها. [305-307]



الشكل (4-8) يبين العلاقة $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ لأغشية P3HT النقية والمشوبة بـ CNP.

الجدول (4-7) يبين القيم المحسوبة لفجوة الطاقة لكل نسبة تشويب للبوليمر P3HT بـ CNPs.

P3HT+CNPs%	0%	1%	2%	3%	4%	5%
E_g (eV)	1.96	1.94	1.92	1.93	1.92	1.92

4-4- نتائج قياس الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT:

تم قياس ميزة (I-V) للنماذج المحضرة للأغشية النقية والمشوبة بدقائق الكربون النانوية بالنسب (1%, 2%, 3%, 4%, 5%)، باستخدام طريقة الطلاء بالبرم على القواعد السيراميكية ذات أقطاب المنيوم مشطية متداخلة، بعد إجراء عملية التلدين الحراري.

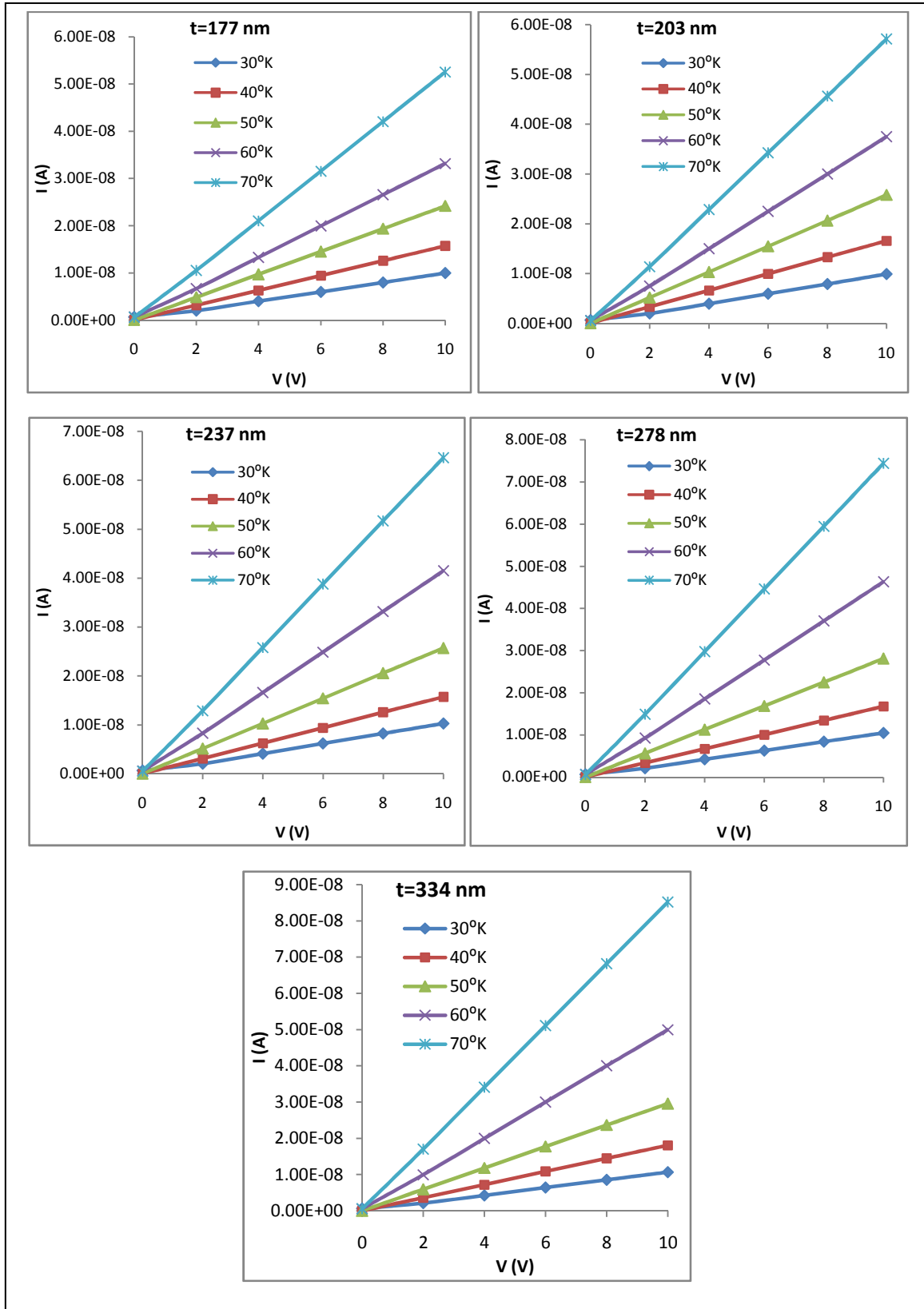
أظهرت النتائج إن السلوك الأومي هو الغالب لميزة (I-V) عند الفولتيات الأقل أو تساوي (10V) لجميع العينات المحضرة، ويبين الشكل (4-9) ميزة (I-V) المقاسة للبوليمر P3HT النقي بدلالة سمك الغشاء، وإن ميزة (I-V) كان لها سلوك مشابه في حالة تشويب الأغشية الرقيقة للبوليمر P3HT مع الاختلاف في القيم وميل الخط المستقيم، ومن حساب الميل في المنطقة الأومية، تم حساب التوصيلية الكهربائية (σ) من العلاقة الآتية: [308-311]

$$\sigma = \left[\frac{I}{V} \right] \left[\frac{L}{Wlt} \right] \dots \dots \dots (4-4)$$

ومنها:

$$\sigma = [Slope] \left[\frac{L}{Wlt} \right] \dots \dots \dots (4-5)$$

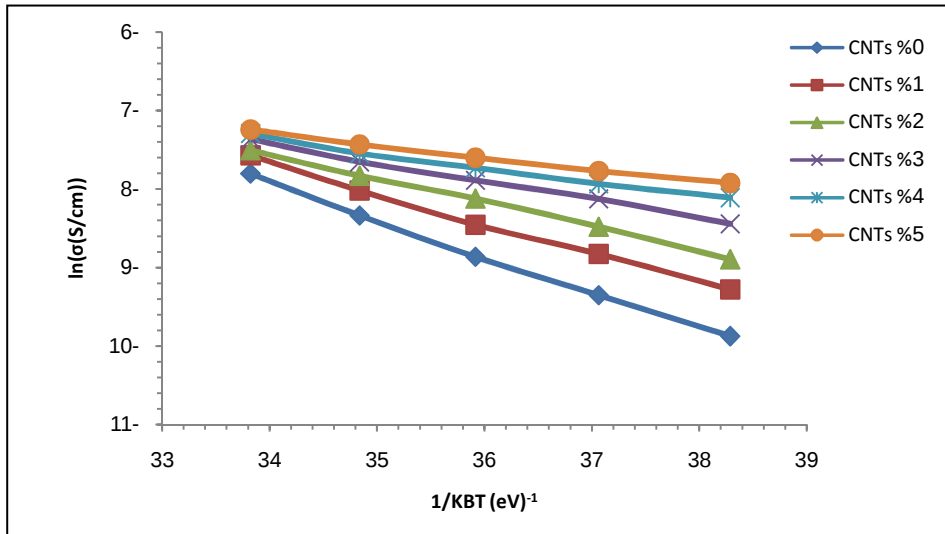
حيث W هي طول مسافة التداخل بين الأقطاب (5.25 mm) و l عدد الأقطاب (6 fingers) و t سمك الغشاء و L المسافة بين قطبين (505 μ m) و V الفولتية المسلطة و I هو التيار المار. تم حساب التوصيلية الكهربائية (σ) للأغشية المحضرة. وكانت النتائج المستحصلة كما هو مبين بالأشكال ((4-10)-(4-14)). إذ يلاحظ من خلال المقارنة أن قيم التوصيلية الكهربائية للأغشية النقية والمشوبة المحضرة تتناسب عكسياً مع مقلوب درجة الحرارة ولجميع العينات المحضرة. وتبين الأشكال أنفة الذكر أن التوصيلية الكهربائية للأغشية المحضرة تتناسب طردياً مع نسبة التشويب بدقائق الكربون النانوية (CNPs) بثبات درجة الحرارة وسرعة الدوران. كون التوصيل في البوليمر P3HT يعتمد على امتداد الحزمة π المترافقة إضافة إلى السلاسل الداخلية ودرجة البلورية وهي خاصية امتازت بها البوليمرات المترافقة، وإن زيادة نسبة التشويب تعمل على تحسين عملية انتقال الشحنة، فهي تشكل نقاط توصيل معدنية بحسب (نظرية الجزر المعدنية) توفر نقاط توصيل في المناطق شبه البلورية أو العشوائية داخل الغشاء البوليمري. [299]



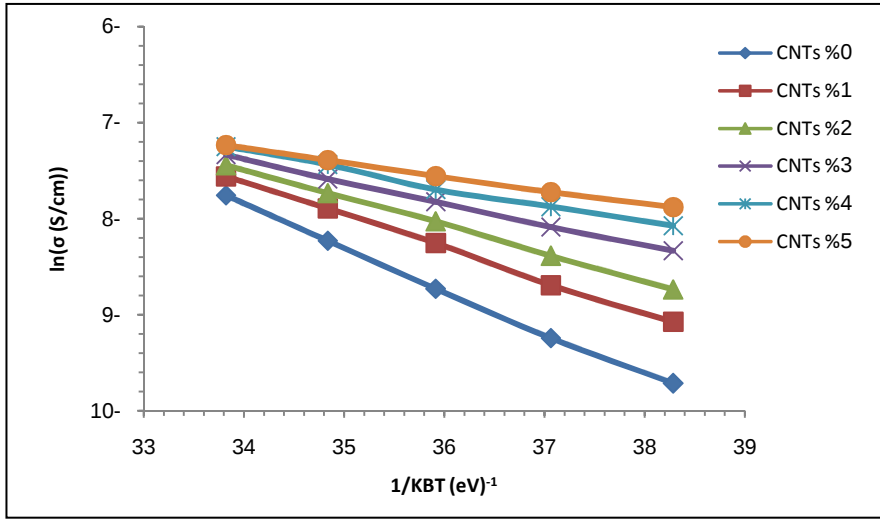
الشكل (4-9) يبين ميزة (I-V) لأغشية P3HT النقية عند سمك الغشاء ($t=177, 203, 237, 278, 334$ nm) ودرجات حرارة ($T=30, 40, 50, 60, 70^\circ\text{C}$).

1-4-4- دراسة تأثير التشويب ودرجة الحرارة على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT:

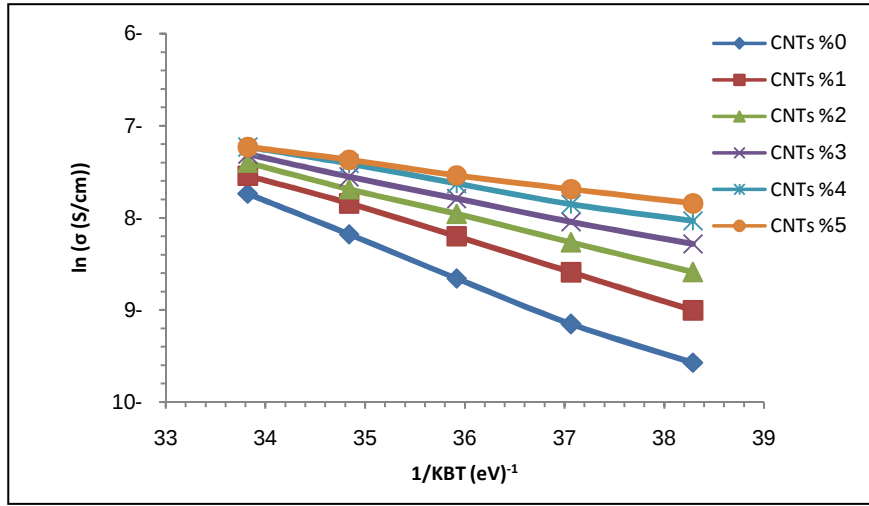
تم دراسة تأثير التشويب ودرجة الحرارة على الخصائص الكهربائية للبوليمر P3HT من خلال العينات المحضرة المذكورة في الفصل الثالث الفقرة (2-4-3). أظهرت النتائج المستحصلة والمبينة بالأشكال ((4-10)-(4-14)) والجدول (4-9) يبين التأثير الواضح لعملية إضافة CNPs (والتي اعتمد في تسميتها سمك الغشاء النقي وذلك لكون تأثير التشويب قليل جدا على سمك الأغشية). إذ يلاحظ زيادة التوصيلية للغشاء البوليمري المشوب بنسبة 1% من CNPs مقارنة بالغشاء شبه الموصل البوليمري النقي، وتستمر الزيادة طرديا مع زيادة نسبة التشويب حتى نسبة التشويب 5%. ويعود السبب في هذا السلوك الى ان إضافة CNPs في مصفوفة البوليمر يعمل كجسور لنقل الشحنات بين المناطق البلورية للمادة شبه الموصلية، وتزداد جسور نقل الشحنة بازدياد نسبة التشويب وبذلك يقلل المسار الحر لانتقال الشحنات داخل الغشاء. كذلك ان امتلاك CNPs الى العديد من مجاميع الأحماض الكربوكسيلية في غلافها الخارجي والتي تشكل في الخلائط الهجينة (P3HT/CNPs) عناصر ارتباط (روابط) ذو وجهين، احدها يرتبط (sp^2 hybridized C) بقوة بذرات كاربون السلسلة الرئيسية للبوليمر P3HT والجهة الأخرى بالقطب الكهربائي مكونة اتصال اومي بمقاومة اقل، إضافة الى دالة الشغل الواطئة لدقائق الكربون النانوية والتي تعمل على تخفيض حواجز الجهد التي تعيق عمليتي ضخ وانتقال الفجوات داخل الشبكة البوليمرية للبوليمر شبه الموصل، ويزداد هذا التأثير بزيادة نسبة الإضافة. وزيادة التوصيلية الكهربائية للبوليمر النقي والمشوب مرتبطة مع زيادة آلية القفز لحاملات الشحنة بزيادة درجة الحرارة. هذا السلوك جاء مطابقا للدراسات السابقة [255, 312-319].



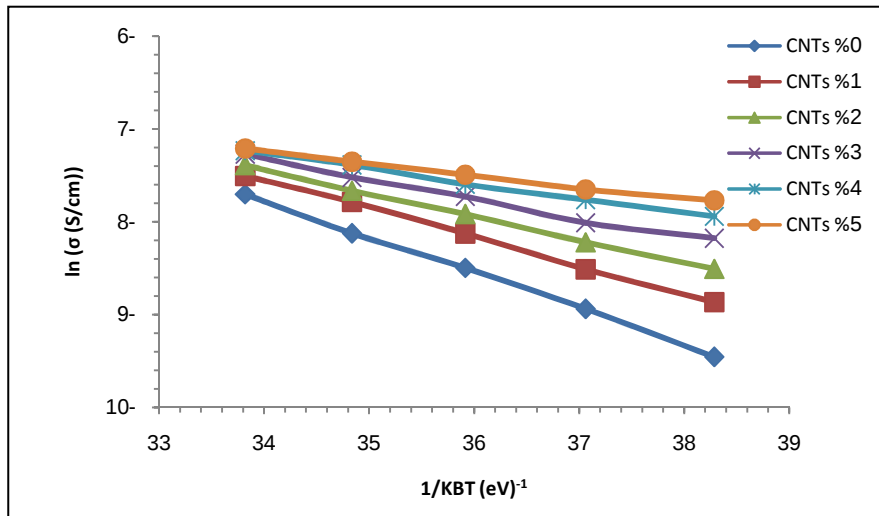
الشكل (4-10) العلاقة بين التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT ومقلوب درجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة عند السمك 334 nm.



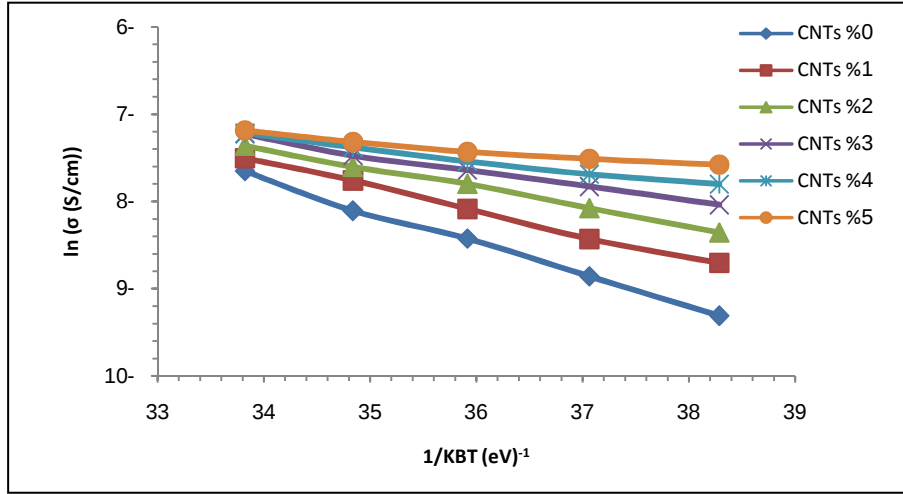
الشكل (4-11) العلاقة بين التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT ومقلوب درجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة عند السمك 278 nm.



الشكل (4-12) العلاقة بين التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT ومقلوب درجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة عند السمك 237 nm.



الشكل (4-13) العلاقة بين التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT ومقلوب درجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة عند السمك 203 nm.



الشكل (4-14) العلاقة بين التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT ومقلوب درجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة عند السمك 177 nm.

2-4-4- حساب طاقة التنشيط لأغشية P3HT المحضرة:

تم حساب طاقة التنشيط (E_a) لأغشية البوليمر P3HT النقية والمشوبة بـ CNPs باستخدام العلاقة [311, 320]:

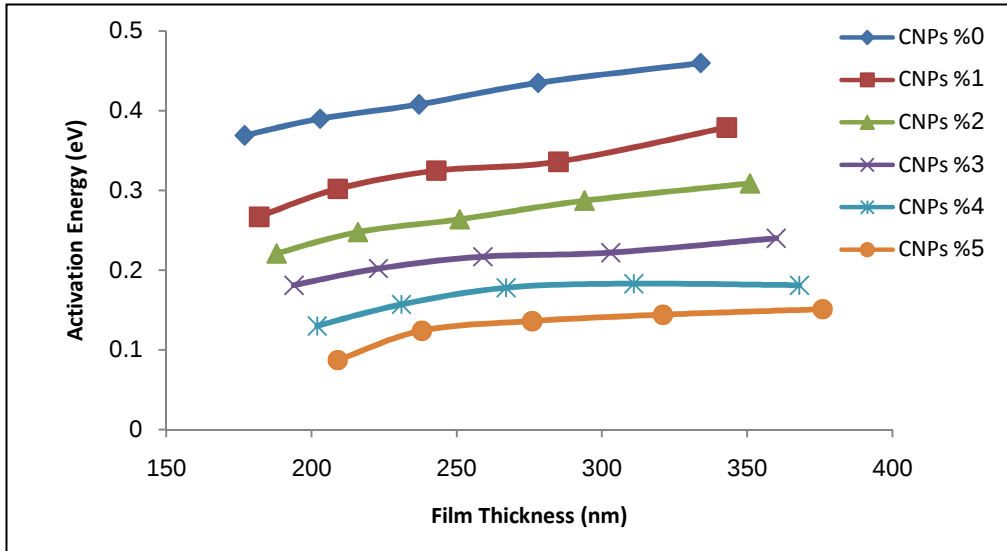
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_a}{K_B T}} \dots \dots \dots (4-6)$$

حيث T درجة الحرارة بالكلفن، و K_B ثابت بولتزمان ($8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

يبين الشكل (4-15) العلاقة بين طاقة التنشيط E_a وسمك النماذج للأغشية الرقيقة للبوليمر P3HT المشوب بنسب مختلفة (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%) من دقائق اسود الكربون والمبين سمك كل منها في الجدول (4-6). يلاحظ من الشكل ان طاقة التنشيط تتخفض بزيادة نسبة التشويب بـ CNPs لجميع أغشية المحضرة بسمك مختلف، وذلك بسبب زيادة التوصيلية الكهربائية بزيادة نسبة التشويب حسب نظرية الجزر المعدنية التي تطرقنا اليها سابقا.

كما يلاحظ من الشكل ان قيم طاقة التنشيط تزداد بزيادة سمك العينات ولجميع التراكيز بسبب زيادة مقاومة الغشاء الذي يعيق من حركة الشحنات مما يحد من التوصيلية الكهربائية. كما ان تقليل سمك الغشاء يعني زيادة تركيز العيوب البلورية داخل الغشاء البوليمري والتي تسهل عملية انتقال الشحنة ومن ثم فهي تقلل من طاقة التنشيط. وتتوافق هذه النتائج مع نتائج دراسات سابقة [317, 320, 321-322].

إن قيم طاقة التنشيط للعينات بدلالة سمك العينة ونسبة التشويب تم جدولتها بالجدول (4-8).



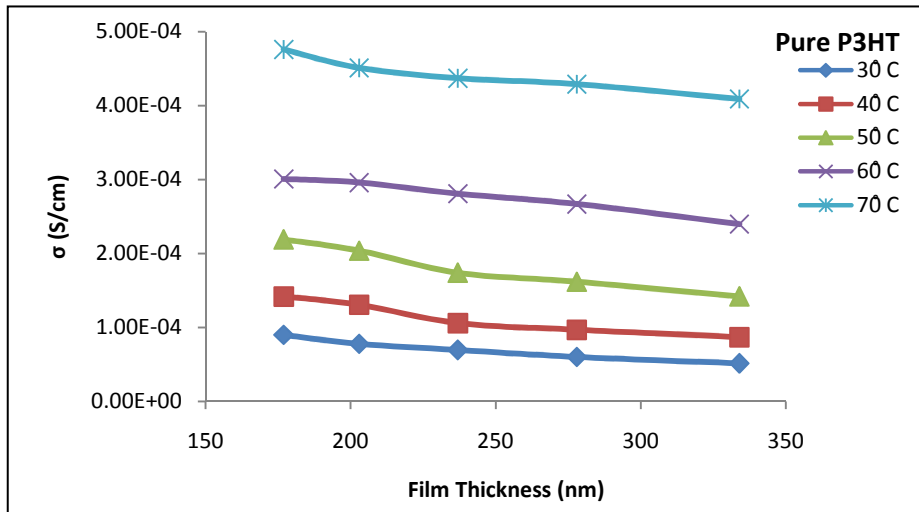
الشكل (4-15) يبين العلاقة بين سمك الغشاء وطاقة التنشيط عند نسب تشويب مختلفة للبوليمر P3HT.

الجدول (4-8) يبين قيم طاقات التنشيط للبوليمر P3HT النقي والمشوب بدلالة نسبة الإضافة وسمك الغشاء.

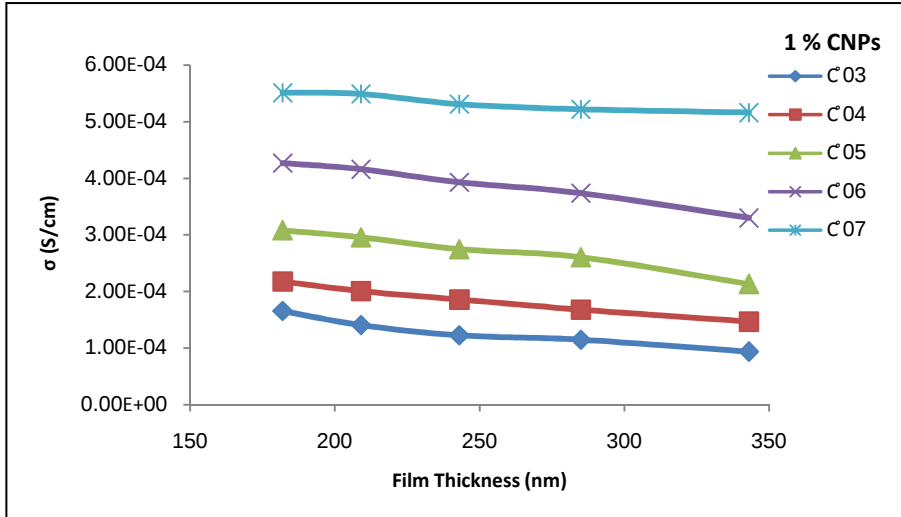
0% CNPs	t(nm)	334	278	237	203	177
	E _a (eV)	0.46	0.435	0.408	0.39	0.369
1% CNPs	t(nm)	343	285	243	209	182
	E _a (eV)	0.379	0.336	0.325	0.302	0.267
2% CNPs	t(nm)	351	294	251	216	188
	E _a (eV)	0.309	0.287	0.264	0.248	0.221
3% CNPs	t(nm)	360	303	259	223	194
	E _a (eV)	0.24	0.222	0.217	0.202	0.181
4% CNPs	t(nm)	368	311	267	231	202
	E _a (eV)	0.181	0.183	0.178	0.157	0.13
5% CNPs	t(nm)	376	321	276	238	209
	E _a (eV)	0.151	0.144	0.136	0.124	0.0872

3-4-4- دراسة تأثير سمك الغشاء على الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT:

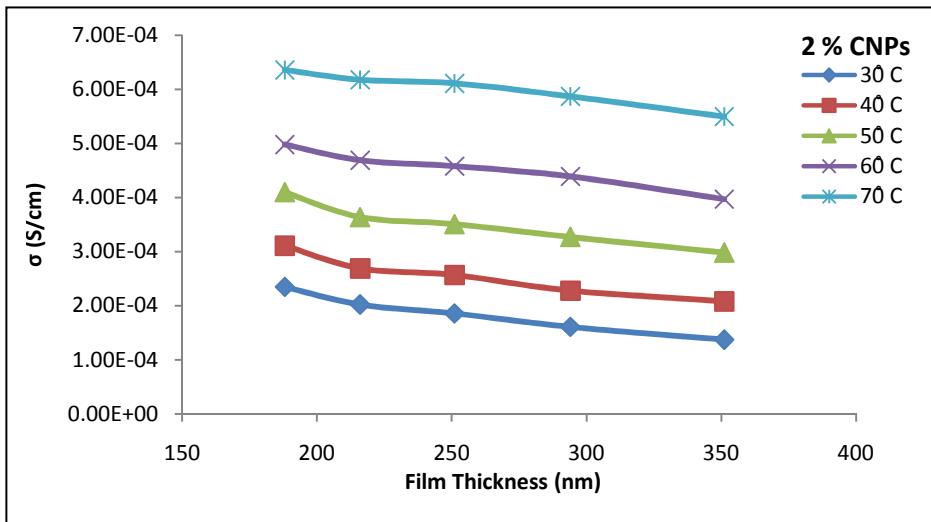
يبين الشكل (4-16) النتائج المستحصلة لتأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT النقي عند درجات حرارة مختلفة $(30, 40, 50, 60, 70)^\circ\text{C}$. يلاحظ من الشكل ان قيم التوصيلية الكهربائية للغشاء البوليمري النقي تنخفض بزيادة سمك الغشاء ولجميع درجات الحرارة. وذلك لان تقليل سمك الغشاء سوف يقلل من المسار الحر للشحنات وذلك لان انخفاض السمك يعني اصطفاف أكثر للسلاسل البوليمرية، بينما قد تكون في السمك العالي ممتدة في جميع الاتجاهات، كذلك ان تقليل سمك الغشاء يؤثر على تركيز العيوب البلورية داخل الغشاء مما يزيد من قابلية التوصيل الكهربائي للأغشية البوليمرية، وقد يكون بسبب وجود الأوكسجين في البيئة المحيطة يعمل على تفاعل مؤكسد يضيف تشويب من النوع الموجب للبوليمر P3HT في أثناء تحضير النماذج. ويلاحظ ان التوصيلية تزداد بازدياد درجة الحرارة. وقد لوحظ السلوك نفسه للأغشية المحضرة المشوبة بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) من CNPs المبينة بالأشكال ((4-20)-(4-16)) والجدول الذي (4-8) يوضح القيم المستحصلة عليها من العلاقة بين التوصيلية ودرجة الحرارة عند نسب تشويب مختلفة ولسمك غشاء مختلف للبوليمر P3HT، ولنفس الأسباب المذكورة أعلاه. وهذه النتائج جاءت متوافقة مع الدراسات السابقة. [210, 321, 323-326]



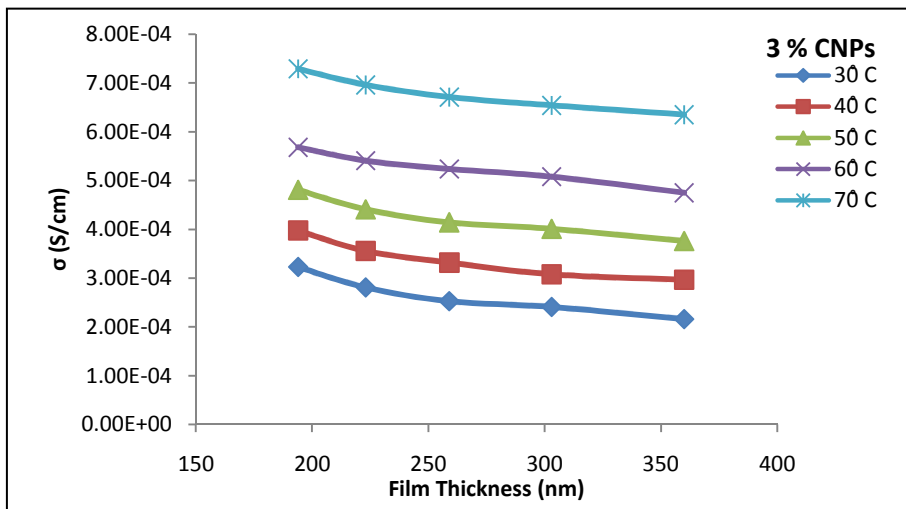
الشكل (4-16) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT النقي.



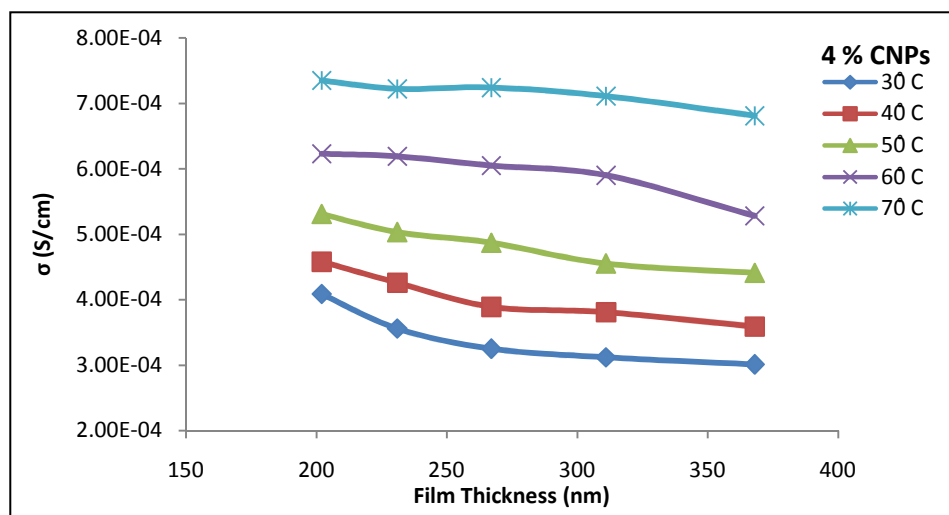
الشكل (4-17) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT المشوب بـ 1% CNPs.



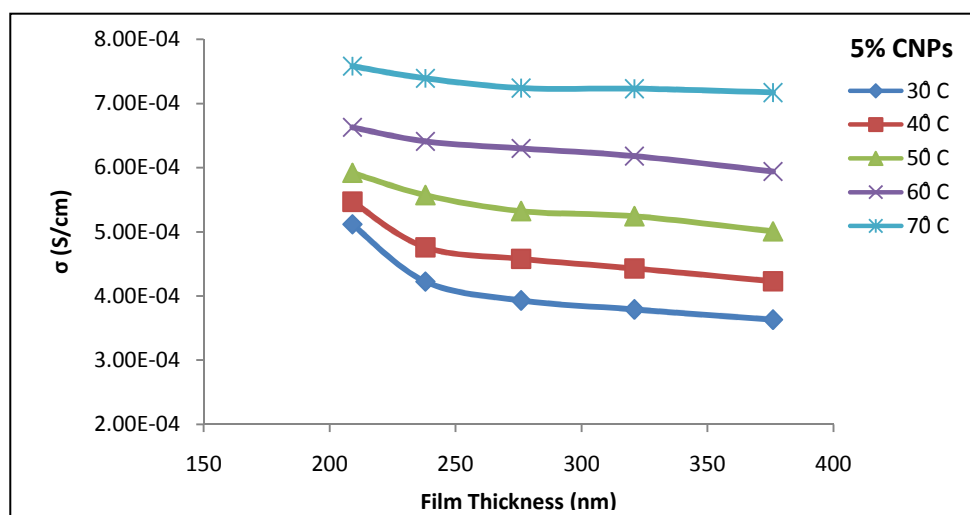
الشكل (4-18) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT المشوب بـ 2% CNPs.



الشكل (4-19) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT المشوب بـ 3% CNPs.



الشكل (4-20) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT المشوب بـ 4% CNPs.



الشكل (4-21) تأثير سمك الغشاء على التوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT المشوب بـ 5% CNPs.

الجدول (4-9) يبين القيم المستحصل عليها للتوصيلية الكهربائية للبوليمر P3HT النقي والمشوب بنسب مختلفة من CNPs وبتغيير سمك الغشاء.

	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
Electrical Conductivity (S/cm)						
t (nm)	334	343	351	360	368	376
30° C	5.15E-05	9.37E-05	1.37E-04	2.16E-04	3.01E-04	3.63E-04
40° C	8.70E-05	1.47E-04	2.08E-04	2.97E-04	3.59E-04	4.23E-04
50° C	1.42E-04	2.13E-04	2.98E-04	3.76E-04	4.41E-04	5.01E-04
60° C	2.40E-04	3.30E-04	3.97E-04	4.75E-04	5.28E-04	5.94E-04
70° C	4.09E-04	5.16E-04	5.50E-04	6.35E-04	6.81E-04	7.17E-04
t (nm)	278	285	294	303	311	321
30° C	6.05E-05	1.15E-04	1.61E-04	2.41E-04	3.12E-04	3.79E-04
40° C	9.70E-05	1.68E-04	2.28E-04	3.08E-04	3.81E-04	4.43E-04
50° C	1.62E-04	2.61E-04	3.27E-04	4.01E-04	4.55E-04	5.24E-04
60° C	2.67E-04	3.74E-04	4.39E-04	5.08E-04	5.90E-04	6.18E-04
70° C	4.29E-04	5.22E-04	5.87E-04	6.54E-04	7.11E-04	7.23E-04
t (nm)	237	243	251	259	267	276
30° C	6.97E-05	1.23E-04	1.86E-04	2.53E-04	3.25E-04	3.93E-04
40° C	1.06E-04	1.86E-04	2.57E-04	3.22E-04	3.89E-04	4.58E-04
50° C	1.74E-04	2.75E-04	3.51E-04	4.14E-04	4.87E-04	5.32E-04
60° C	2.81E-04	3.93E-04	4.58E-04	5.24E-04	6.05E-04	6.30E-04
70° C	4.37E-04	5.31E-04	6.11E-04	6.71E-04	7.24E-04	7.24E-04
t (nm)	203	209	216	223	231	238
30° C	7.81E-05	1.41E-04	2.02E-04	2.81E-04	3.56E-04	4.23E-04
40° C	1.31E-04	2.01E-04	2.69E-04	3.32E-04	4.26E-04	4.76E-04
50° C	2.04E-04	2.96E-04	3.64E-04	4.41E-04	5.03E-04	5.57E-04
60° C	2.96E-04	4.16E-04	4.69E-04	5.41E-04	6.19E-04	6.41E-04
70° C	4.51E-04	5.49E-04	6.18E-04	6.96E-04	7.22E-04	7.39E-04
t (nm)	177	182	188	194	202	209
30° C	9.03E-05	1.66E-04	2.35E-04	3.23E-04	4.09E-04	5.12E-04
40° C	1.42E-04	2.18E-04	3.11E-04	3.98E-04	4.58E-04	5.47E-04
50° C	2.19E-04	3.08E-04	4.10E-04	4.81E-04	5.31E-04	5.92E-04
60° C	3.01E-04	4.27E-04	4.98E-04	5.68E-04	6.23E-04	6.63E-04
70° C	4.76E-04	5.51E-04	6.36E-04	7.29E-04	7.35E-04	7.58E-04

5.4- نتائج قياس تأثير التشويب على خواص البوليمر PVA بالتركيب MIM:

1-5-4- تأثير إضافة CNPs على ثابت العزل للبوليمر PVA:

تم قياس ثابت العزل الكهربائي للنماذج الموضحة في الفصل الثالث في الفقرة (3-4-3) للتركيب $Al/(PVA+CNPs\%)/Al$ والخاصة بدراسة تأثير نسبة المضاف CNPs على ثابت العزل الكهربائي للبوليمر PVA عند تردد ثابت (1KHz). تم إجراء القياسات في درجة حرارة المختبر للنماذج التي يتراوح سمكها بين (32-34 μm). وباستخدام العلاقات الآتية [327-330]:

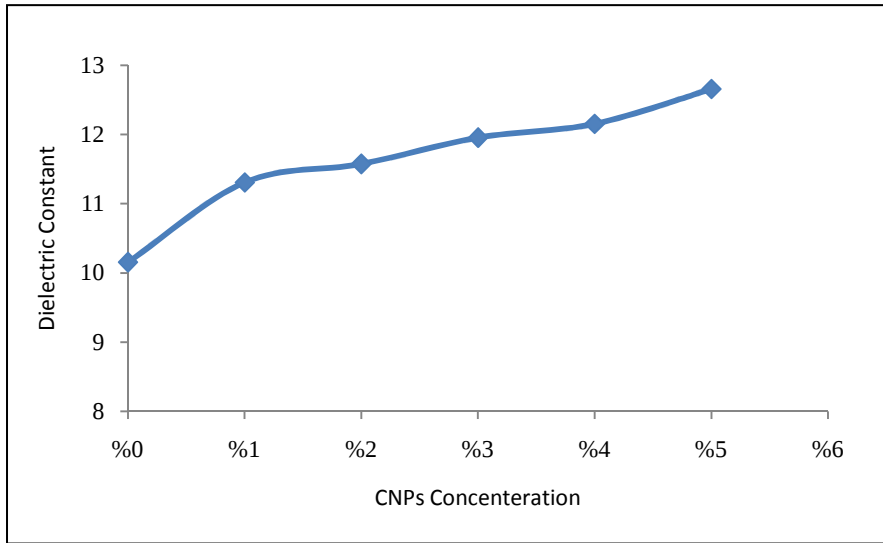
$$C_i = \epsilon_o \epsilon_i \frac{A}{t} \dots \dots \dots (4 - 7)$$

$$C_o = \epsilon_o \frac{A}{t} \dots \dots \dots (4 - 8)$$

$$\epsilon_i = \frac{C_i}{C_o} \dots \dots \dots (4 - 9)$$

حيث C_i ، ϵ_i هو ثابت العزل الكهربائي وسعة المتسعة للمادة العازلة على التوالي، C_o سعة الفراغ، ϵ_o هي سماحية الفراغ، A هي مساحة المتسعة، t سمك الغشاء.

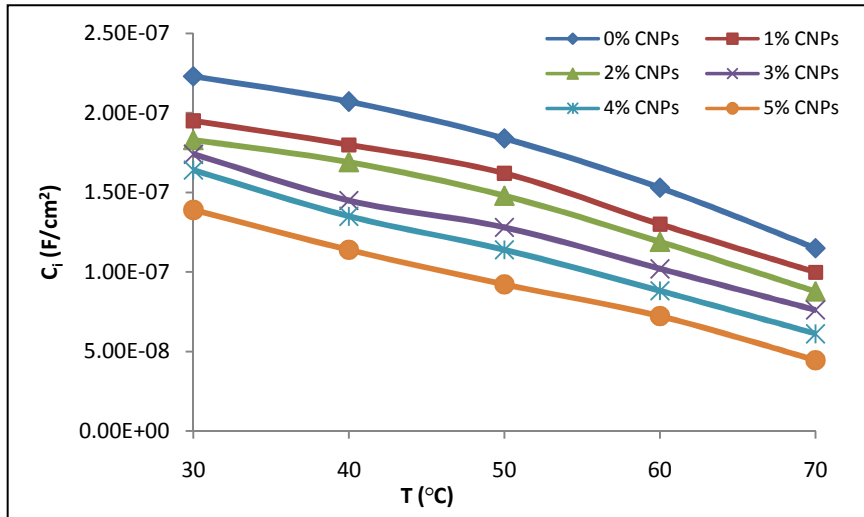
يبين الشكل (4-22) العلاقة بين ثابت العزل الكهربائي للبوليمر PVA النقي والمشوب بنسب مختلفة من CNPs. ويلاحظ من الشكل زيادة ثابت العزل الكهربائي للأغشية البوليمرية مع نسب التشويب ابتداءً من البوليمر النقي ويصل أعلى قيمة له عند أعلى قيمة من التشويب. ان زيادة قيمة ثابت العزل الكهربائي لأغشية PVA ناتج عن إضافة دقائق الكربون النانوية هو سلوك جاء متوافقاً مع الدراسات السابقة [331-335].



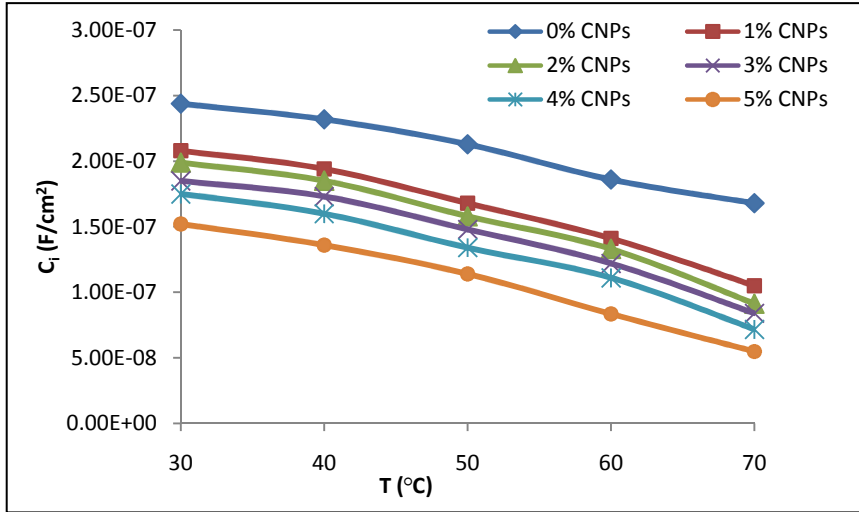
الشكل (4-22) يوضح تغير ثابت العزل الكهربائي للبوليمر PVA مع زيادة نسبة المضاف CNPs.

4-5-2-دراسة تأثير التشويب بـ CNPs وسمك الغشاء ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA:

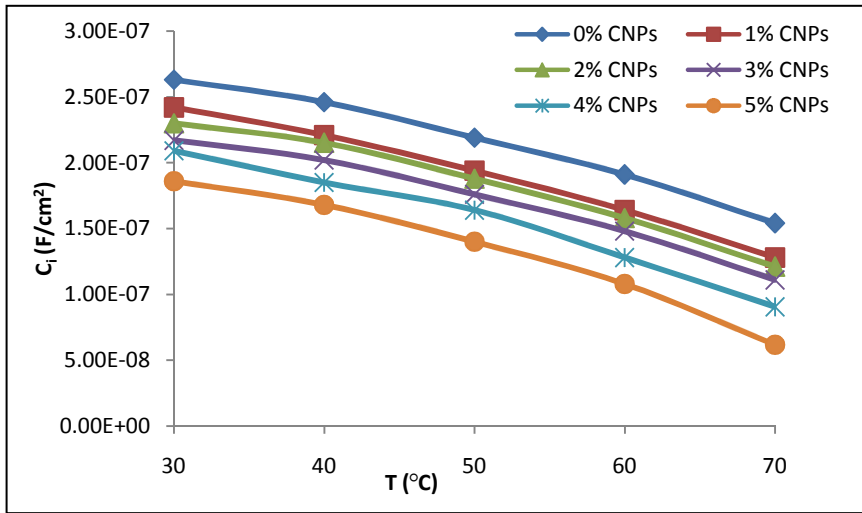
تم قياس سعة المتسعة للتركيب $Al/(PVA+CNPs\%)/Au$ الموضح في الفصل الثالث في الفقرة (3-4-3) وعند تردد ثابت قدره (1KHz) لغرض حساب المعاملات المهمة للترانزستورات العضوية، وفي مدى من درجات الحرارة $(30-70)^{\circ}C$. وتظهر النتائج المبينة بالأشكال من (4-23) - (4-27) والجدول (4-10) للسعة الكهربائية لوحدة المساحة، والتي تتسلسل حسب زيادة سرعة الدوران من (1000rpm) الى (3000rpm) في زمن ثابت قدره دقيقة واحدة، أي تتدرج بانخفاض سمك النموذج للبوليمر PVA الذي يتناسب عكسياً مع سرعة الدوران. ان سعة المتسعة تقل بزيادة درجة حرارة النموذج من درجة حرارة المختبر الى $(70^{\circ}C)$ للبوليمر النقي ولجميع النماذج المشوبة بمختلف النسب ابتداءً بتشويب البوليمر PVA بدقائق الكربون النانوية CNPs وقد يعود ذلك الى السلوك الالكتروليتي للبوليمر وتأثير شوتكي (بسبب اختلاف الاقطاب) والذي يزداد بتأثير المضاف، او بسبب نقصان سماحية وثابت عزل النموذج بزيادة الحرارة، وتنخفض السعة بزيادة نسبة التشويب الى نسبة المضاف (5 %) وذلك لظهور تأثير زيادة التوصيلية الذي يتسبب به المضاف دقائق اسود الكربون النانوية CNPs من خلال زيادة التوصيل الأيوني وزيادة الشحنات الحرة في الشبكة البلورية، وقد يسود تأثير شوتكي في ظهور بعض التغيرات. وهذه النتائج مطابقة لنتائج دراسات سابقة [152, 331, 336-337]



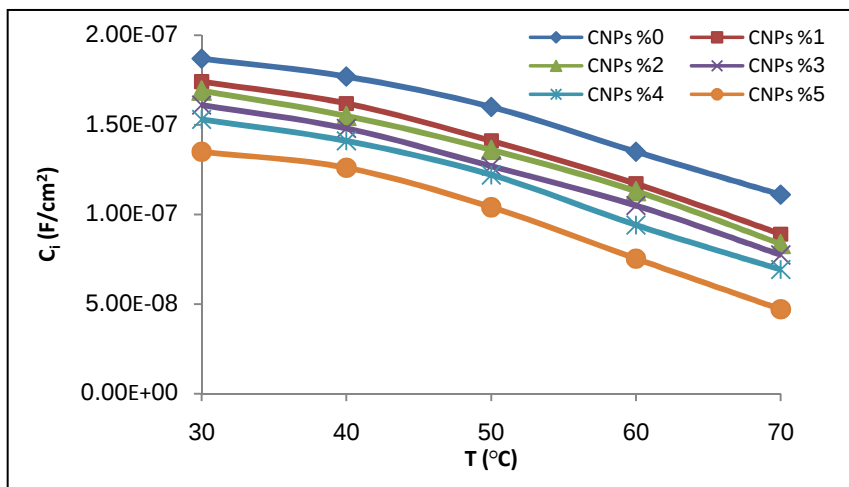
الشكل (4-23) تأثير التشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA عند 1000RPM.



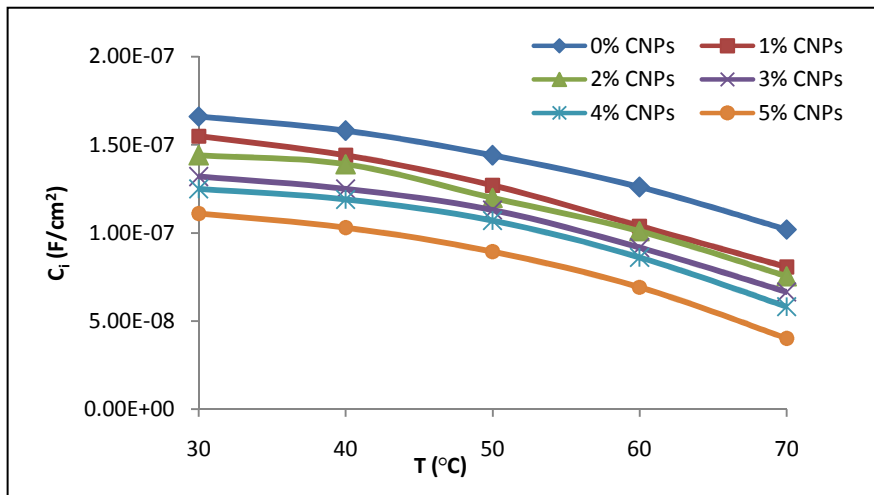
الشكل (4-24) تأثير التشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA عند 1500RPM



الشكل (4-25) تأثير التشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA عند 2000RPM



الشكل (4-26) تأثير التشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA عند 2500RPM



الشكل (4-27) تأثير التشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة متسعة البوليمر PVA عند 3000RPM

الجدول (4-10) قيم سعة متسعة البوليمر PVA بدلالة نسبة التشويب بـ CNPs وسمك الغشاء (بلاية سرعة الدوران (ω) ودرجة الحرارة.

$\omega, T (^{\circ}\text{C})$	Electrical Capacitance per Unit Area (F/cm^2)					
1000 RPM	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
30°C	2.23E-07	1.95E-07	1.83E-07	1.74E-07	1.64E-07	1.39E-07
40°C	2.07E-07	1.80E-07	1.69E-07	1.45E-07	1.35E-07	1.14E-07
50°C	1.84E-07	1.62E-07	1.48E-07	1.28E-07	1.14E-07	9.23E-08
60°C	1.53E-07	1.30E-07	1.19E-07	1.02E-07	8.82E-08	7.23E-08
70°C	1.15E-07	9.99E-08	8.78E-08	7.61E-08	6.12E-08	4.46E-08
1500 RPM	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
30°C	2.44E-07	2.08E-07	1.99E-07	1.85E-07	1.75E-07	1.52E-07
40°C	2.32E-07	1.94E-07	1.85E-07	1.73E-07	1.60E-07	1.36E-07
50°C	2.13E-07	1.68E-07	1.58E-07	1.48E-07	1.34E-07	1.14E-07
60°C	1.86E-07	1.41E-07	1.33E-07	1.22E-07	1.11E-07	8.35E-08
70°C	1.68E-07	1.05E-07	9.14E-08	8.40E-08	7.17E-08	5.50E-08
2000 RPM	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
30°C	2.63E-07	2.42E-07	2.30E-07	2.17E-07	2.09E-07	1.86E-07
40°C	2.46E-07	2.21E-07	2.15E-07	2.02E-07	1.85E-07	1.68E-07
50°C	2.19E-07	1.94E-07	1.88E-07	1.76E-07	1.64E-07	1.40E-07
60°C	1.91E-07	1.64E-07	1.58E-07	1.48E-07	1.28E-07	1.08E-07
70°C	1.54E-07	1.28E-07	1.21E-07	1.11E-07	9.06E-08	6.18E-08
2500 RPM	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
30°C	1.87E-07	1.74E-07	1.69E-07	1.61E-07	1.53E-07	1.35E-07
40°C	1.77E-07	1.62E-07	1.55E-07	1.48E-07	1.41E-07	1.26E-07
50°C	1.60E-07	1.41E-07	1.36E-07	1.27E-07	1.22E-07	1.04E-07
60°C	1.35E-07	1.17E-07	1.13E-07	1.05E-07	9.41E-08	7.53E-08
70°C	1.11E-07	8.91E-08	8.36E-08	7.74E-08	6.92E-08	4.71E-08
3000 RPM	0% CNPs	1% CNPs	2% CNPs	3% CNPs	4% CNPs	5% CNPs
30°C	1.66E-07	1.55E-07	1.44E-07	1.32E-07	1.25E-07	1.11E-07
40°C	1.58E-07	1.44E-07	1.39E-07	1.25E-07	1.19E-07	1.03E-07
50°C	1.44E-07	1.27E-07	1.20E-07	1.13E-07	1.07E-07	8.94E-08
60°C	1.26E-07	1.04E-07	1.01E-07	9.17E-08	8.62E-08	6.93E-08
70°C	1.02E-07	8.07E-08	7.54E-08	6.66E-08	5.82E-08	4.02E-08

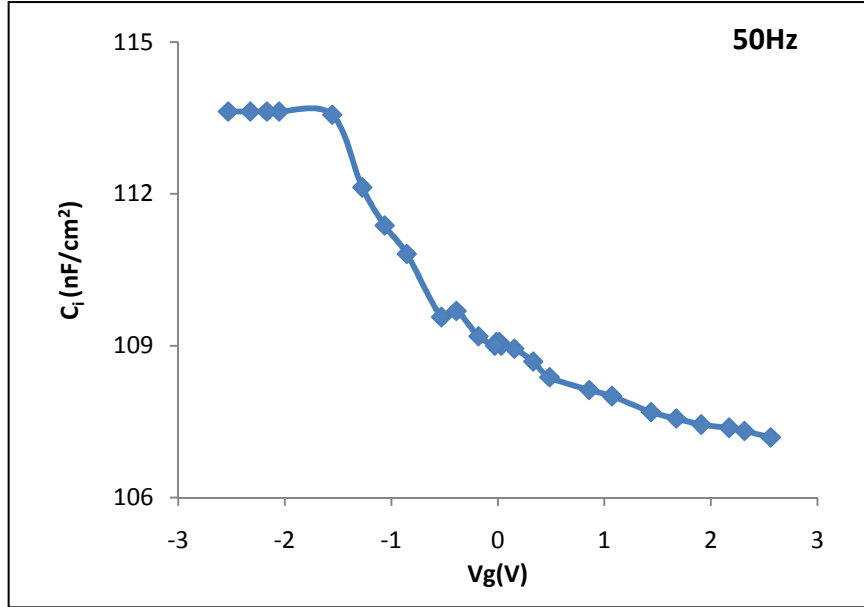
4-6- دراسة خواص التركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA:

تم دراسة الخواص الكهربائية للتركيب Au/P3HT/PVA/Al المصنع مختبريا والذي تم التطرق اليه في الفقرة (4-4-3) من الفصل الثالث، وبسمك للطبقة العازلة من البوليمر PVA مقابل سرعة دوران (2000 rpm)، وسمك للطبقة شبه الموصلة (203 nm)، بمساحة مقدارها (0.16 cm^2)، واستحصلت النتائج بالظلام وفي درجة حرارة الغرفة.

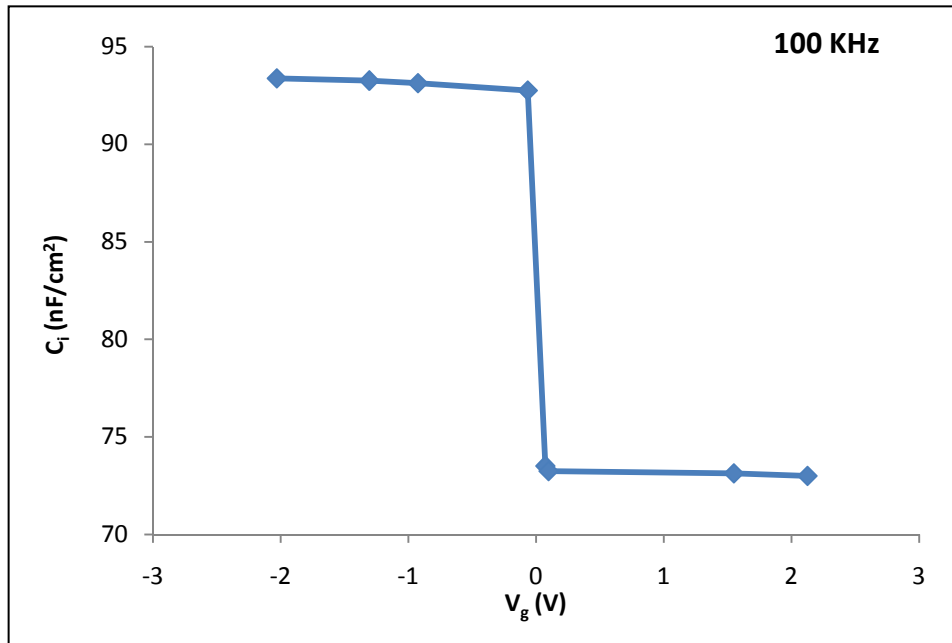
4-6-1- دراسة ميزة (C-V) للتركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA:

يبين الشكلين (4-28)، (4-29) النتائج المستحصلة للعلاقة بين الجهد المسلط والسعة الكهربائية لوحدة المساحة للتركيب Au/P3HT/PVA/Al في ترددات ثابتة قدرها 50Hz, 100KHz.

يلاحظ من الشكل مناطق تأثير تدرج الفولتية المسلطة من القيم السالبة الى القيم الموجبة، وعملية الانتقال من حالة الحزم المستوية الى حالة تجميع حاملات الشحنة الاغلبية -والمتمثلة بالفجوات في دراستنا الحالية- في النبيطة MIS من الفولتية المسلطة (-2.5V) الى الفولتية المسلطة (-1.4 V) حيث استقرار قيمة السعة الكهربائية لوحدة المساحة، بعدها يبدأ النقصان بقيمة السعة الكهربائية لوحدة المساحة للنبيطة، الى القيم التي تحدد منطقة الاستنزاف عند تغيير اتجاه الفولتية المسلطة (تغيير انحياز النبيطة). وبسبب ان النبيطة عضوية التركيب بالكامل لا تظهر سلوك الانعكاس عند عكس انحياز الفولتية الى القيم الموجبة في التردد الواطيء، ومن المتوقع أن العتبة الجهد من الترانزستور العضوي الذي يصنع باستخدام هذه الأغشية الرقيقة سيكون ذات جهد عتبة منخفض. هذه النتيجة تبين أن التوصيف الكهربائية للتركيب MIS فعالة جدا لتحديد خصائص قابلية الأغشية البوليمرية المستخدمة على تشكيل الطبقات الفعالة وعازل البوابة في الترانزستور العضوي. [338-340]



الشكل (4-28) العلاقة بين الجهد المسلط والسعة الكهربائية لوحدة المساحة للتركيب MIS في التردد 50Hz.

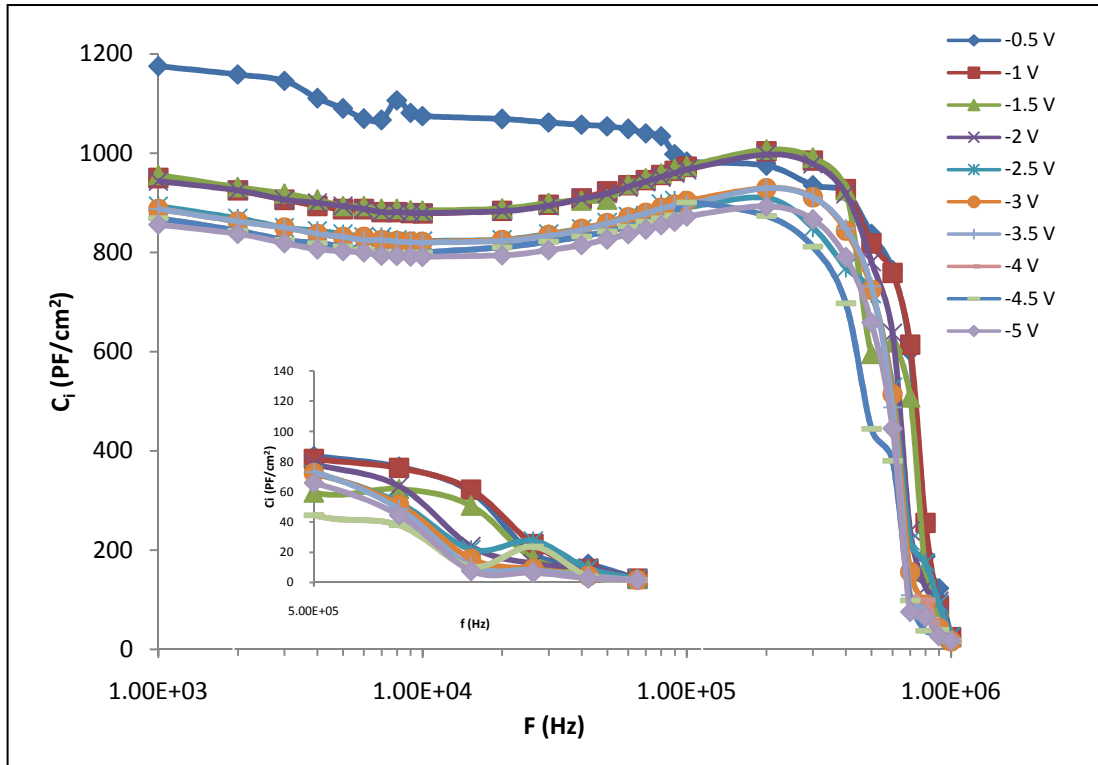


الشكل (4-29) العلاقة بين الجهد المسلط والسعة الكهربائية لوحدة المساحة للتركيب MIS في التردد 100KHz.

4-6-2-دراسة ميزة (C-f) للتركيب MIS للبوليمرين P3HT/PVA:

يبين الشكل (4-30) النتائج المستحصلة من القياسات العملية للعلاقة بين التردد والسعة الكهربائية لوحدة المساحة (ميزة (C-F)) لنبيطة MIS ذات التركيب Au/P3HT/PVA/Al في مدى الترددات (0-1MHz).

يلاحظ من الشكل المذكور ان النقصان في قيمة السعة الكهربائية لنبيطة MIS عند الترددات العالية والتي تتجاوز 100KHz. وهذه النتائج مطابقة لدراسات سابقة. اذ يرتبط سلوك تغير السعة الكهربائية لوحدة المساحة للنبيطة بوجود ثنائيات القطب في الطبقة العازلة وسرعة استجابتها للمجال المسلط في الترددات المختلفة. وكون البوليمر PVA هو بوليمر يحتوي في تركيبه على ثنائيات قطبية، والتي تحدد سرعة استجابتها للمجال المسلط بالسماحية الكهربائية للبوليمر، والتي بدورها تتغير بتغير سمك الغشاء الرقيق المرسب [341-343].



الشكل (4-30) العلاقة بين التردد والسعة الكهربائية لوحدة المساحة لنبيطة MIS ذات التركيب Au/P3HT/PVA/Al.

الفصل الخامس

خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي

خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي

5- تمهيد:

يستعرض هذا الفصل من الأطروحة النتائج التي توصلت إليها دراستنا الخاصة في مجال ترانزستورات تأثير المجال العضوية من خلال النماذج المصنعة مختبرياً والمشار إليها في الفقرة (3-4-5) من الفصل الثالث، والتي تم قياسها بعد حفظها لمدة (24 hr's) تحت ضغط مخلخل ($\approx 10^{-2}$ torr)، وحساب بعض معاملات خواص الترانزستور الكهربائية المهمة لوصف هذه النبائط مثل تحركية حاملات الشحنة والنسبة I_{on}/I_{off} وجهد العتبة.

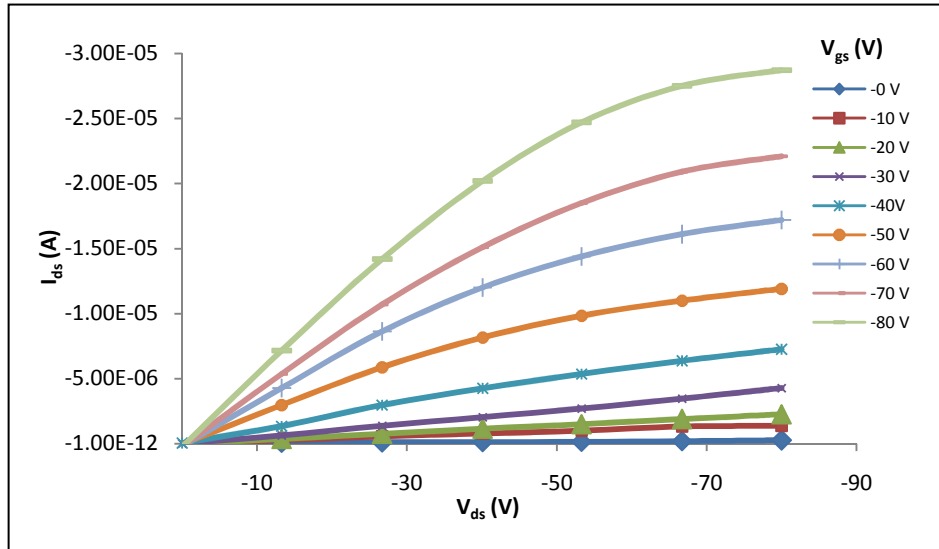
استحصلت بعض النتائج من خلال دراسة تأثير بعض المؤثرات التصميمية والتصنيعية ومقارنة تغير الصفات من خلال إيجاد معاملات خواص النبائط. بدايةً تم تصنيع ترانزستور تأثير المجال ذات جهد التشغيل العالي ذات الانحياز السالب (≈ -31 V). تمت دراسة تأثير تغيير أبعاد قناة التوصيل على مواصفات الترانزستور العضوي المصنع، وكذلك تأثير تغيير سمك الأغشية العضوية، لكل من المادتين شبه الموصلة P3HT والمادة العازلة PVA، وقد قادنا إلى ترانزستورات تعمل في الجهد السالب المنخفض (< -1 V)، والذي اتخذناه كأساس لإكمال الدراسة لأفضليته في التطبيقات الالكترونية.

أخيراً تم استحصل نتائج تأثير تشويب الأغشية البوليمرية الرقيقة المكونة للترانزستور بخمس نسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) من دقائق اسود الكربون النانوية (CNPs) لكل من طبقة عازل البوابة PVA والطبقة شبه الموصلة P3HT بشكل منفرد ومشترك. وتمت مقارنة النتائج للترانزستور من خلال المعاملات المحسوبة لكل نبيطة.

1-5-دراسة تأثير طول القناة على ترانزستور تأثير المجال العضوي P3HT/PVA:

حضرت ترانزستورات تأثير المجال P3HT/PVA-OFET بالتركيب TG-BC باستخدام البوليمرات النقية بسمك ثابت لكل من الطبقة العازلة للبوابة (1000 rpm) والطبقة الفعالة (237 nm) وبعرض قناة توصيل قدره (1 mm)، وتم تغيير طول قناة التوصيل بالمدى بين (40-120 μ m) كما هو مبين بالجدول (1-5) لغرض دراسة تأثير تغيير مقاومة القناة على الخواص الكهربائية للترانزستورات المصنعة والتي يرمز لها بالحرف T، حيث تمثل الأرقام من (1-5) رقم نموذج الترانزستور.

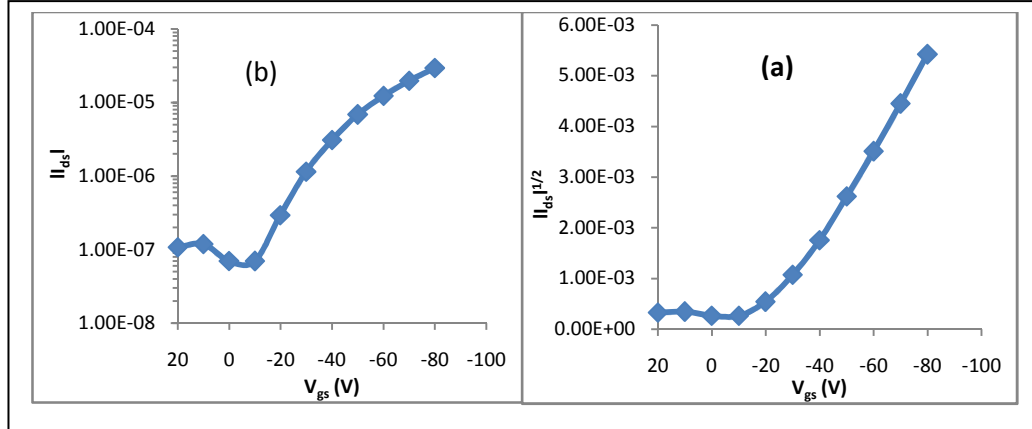
يبين الشكل (1-5) ميزة تيار (المصدر-المصرف) كدالة الى الجهد السالب (المصدر-المصرف) ولجميع قيم فولتية البوابة السالبة للترانزستور ذات التركيب Al/PVA/P3HT/Au والمصنع بطول قناة توصيل (40 μ m)، ويلاحظ من الشكل زيادة I_{ds} بزيادة الجهد السالب V_{ds} وتكون هذه الزيادة خطية تخضع لقانون اوم حتى نقطة تضيق القناة (pinch-off). ويستمر هذا السلوك الاومي حتى الوصول الى حالة الإشباع، ولجميع قيم جهد البوابة - (0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80) ، بعدها يكون تصرف تيار (المصدر - المصرف) السالب شبه ثابت بزيادة جهد المصدر-المصرف السالب ولجميع قيم جهد البوابة السالبة المسلطة. هذا السلوك مشابه تماماً لدراسات سابقة. [344-345]



الشكل (1-5) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذي طول قناة 40 μ m.

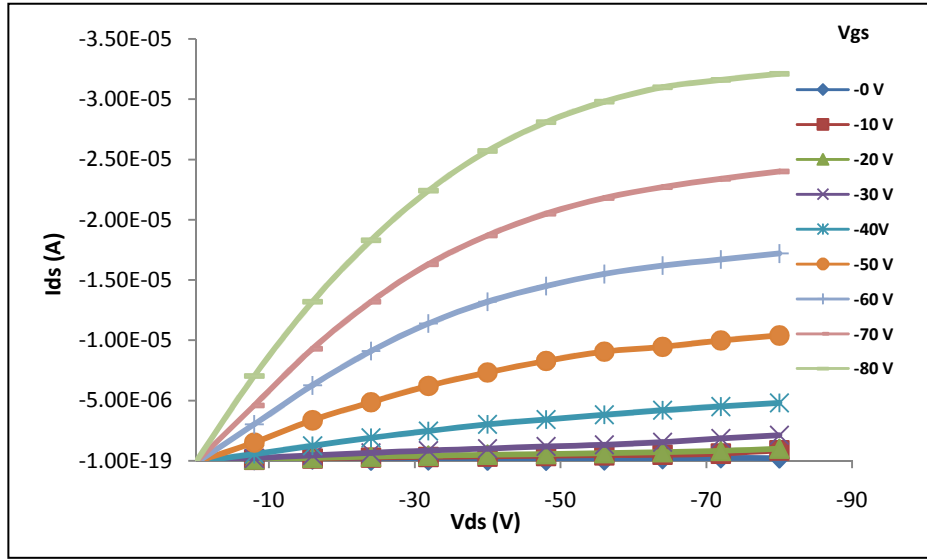
يبين الشكل (2-5) ميزة التحويل للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au ذات طول قناة توصيل (40 μ m) وفولتية (مصدر-مصرف) المسلطة الثابتة (-70V)، ويلاحظ من الشكل العلاقة بين كل من الجذر التربيعي للقيمة المطلقة لقيم كل من تيار قناة التوصيل (I_{ds}) والقيمة

المطلقة لتيار قناة التوصيل مع زيادة جهد البوابة. تم حساب تحركية حاملات الشحنة عند الإشباع من ميل الخط المستقيم المماس في الشكل (a) وبالاستفادة من العلاقة (2-20) وكذلك جهد العتبة الذي وجدت من امتداد الخط المستقيم على المحور V_{gs} . كذلك تم حساب النسبة I_{on}/I_{off} من أعلى وأوطىء قيم في الشكل (b)، وتم حساب مقاومة القناة من ميل مماس الشكل (b) وبالاستفادة من العلاقة (2-21).



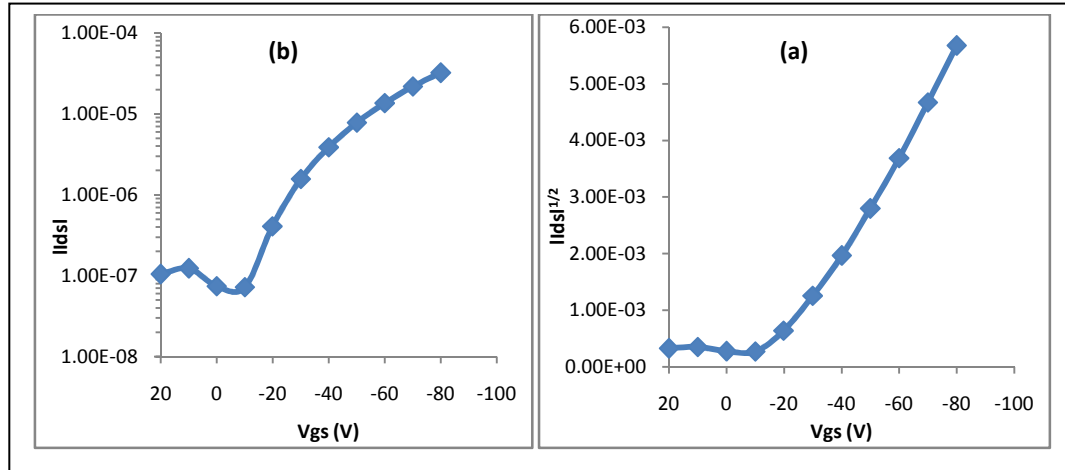
الشكل (5-2) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذو طول قناة $40\mu m$ عند $V_{ds} = -70V$.

يبين الشكل (5-3) ميزة تيار (المصدر-المصرف) السالب الذي يزداد بزيادة الجهد السالب (المصدر-المصرف) ولجميع قيم فولتية البوابة السالبة للترانزستور ذات التركيب $Al/PVA/P3HT/Au$ والمصنع بطول قناة توصيل ($60\mu m$). ويستمر هذا السلوك الاومي حتى الوصول الى حالة الإشباع، ولجميع قيم جهد البوابة المختلفة -40, -30, -20, -10, 0, -50, -60, -70, -80. ان هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار إليه في الشكل (5-1) ولأسباب المذكورة نفسها.



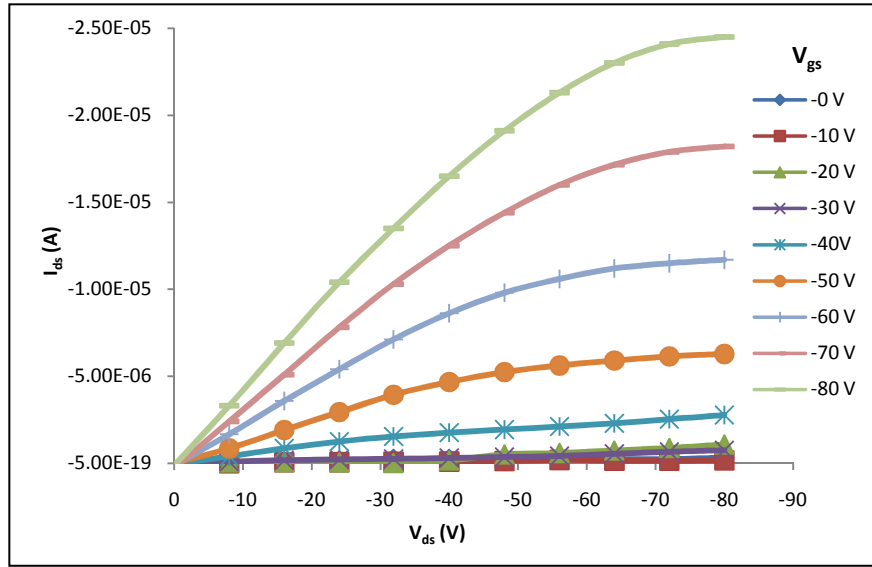
الشكل (5-3) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذي طول قناة $60\mu\text{m}$.

يبين الشكل (5-4) ميزة التحويل للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au ذي طول قناة توصيل ($60\mu\text{m}$) وعند فولتية (مصدر-مصرف) المسلطة الثابتة (-70V)، ويلاحظ من الشكل أن هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار إليه في الشكل (5-2). كما أن قيم المعاملات تم حسابها وبالطريقة نفسها التي حسبت فيها المعاملات في الشكل (5-2).



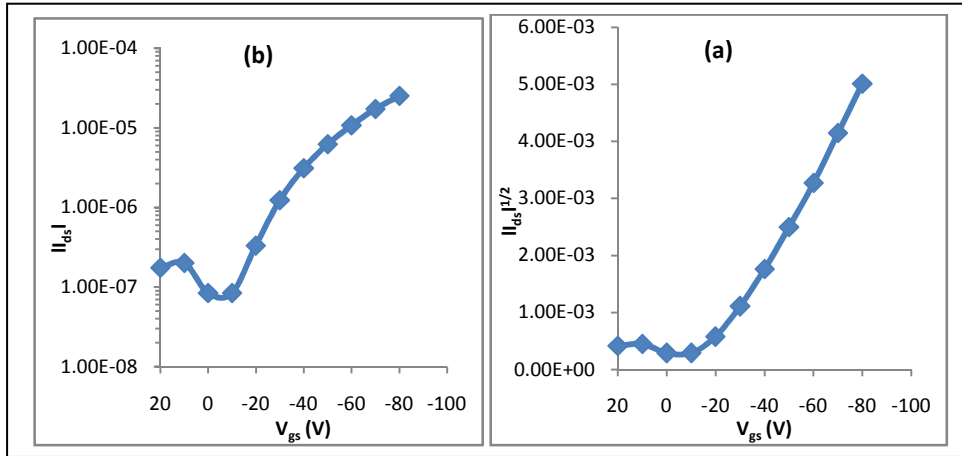
الشكل (5-4) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذو طول قناة $60\mu\text{m}$ عند ($V_{ds} = -70\text{V}$).

يبين الشكل (5-5) ميزة الخرج ($I_{ds}-V_{ds}$) عند قيم مختلفة من فولتية البوابة السالبة ($0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80\text{V}$) للترانزستور ذات التركيب Al/PVA/P3HT/Au والمصنع بطول قناة توصيل ($80\mu\text{m}$). إن هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار إليه في أشكال مميزة الخرج السابقة وللأسباب المذكورة نفسها.



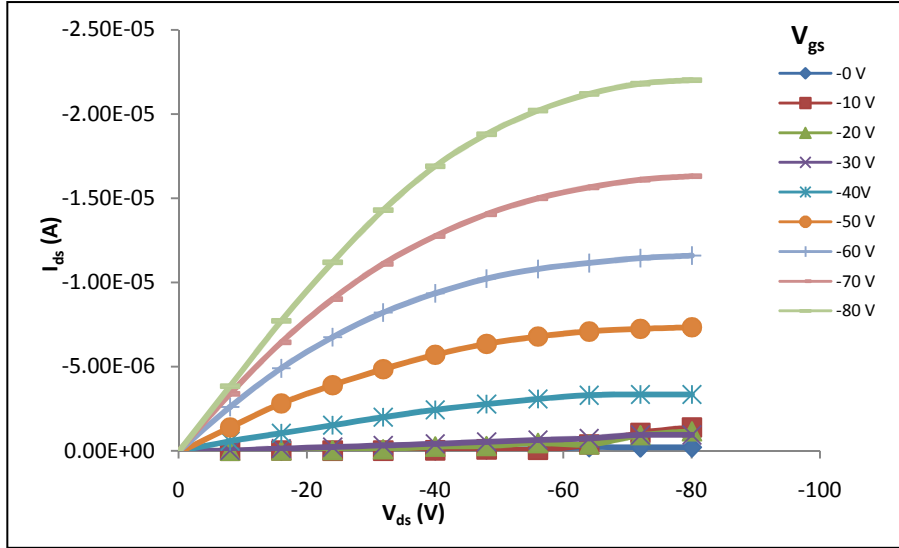
الشكل (5-5) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذي طول قناة 80μm.

يبين الشكل (5-6) ميزة التحويل للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au ذي طول قناة توصيل (80μm) وفولتية (مصدر-مصرف) المسطرة الثابتة (-70V)، ويلاحظ من الشكل ان هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار اليه في أشكال ميزة التحويل السابقة.



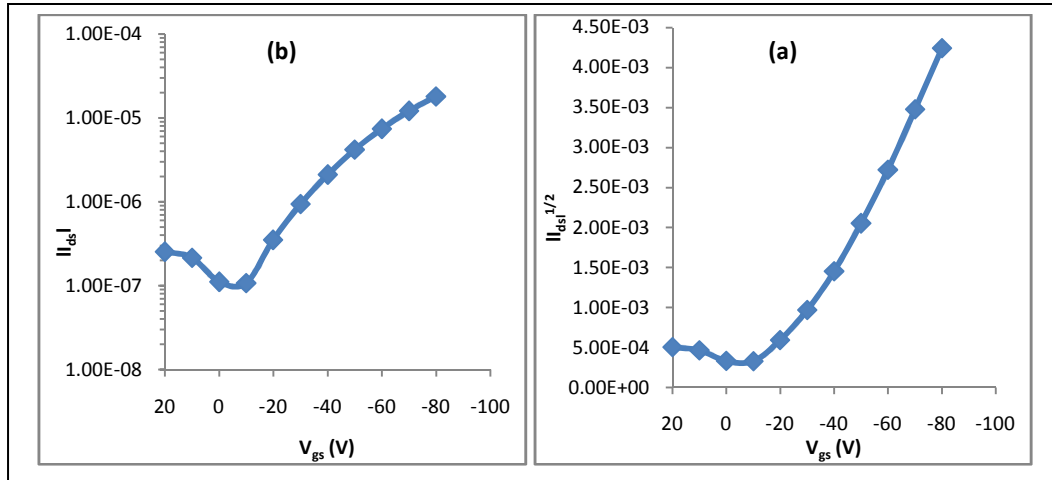
الشكل (5-6) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذو طول قناة 80μm عند (V_ds=-70V).

يبين الشكل (5-7) ميزة الخرج ($I_{ds}-V_{ds}$) عند قيم مختلفة من فولتية البوابة السالبة (-10, 0, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80V) للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au والمصنع بطول قناة توصيل (100μm). ان هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار اليه في الأشكال ميزة الخرج السابقة ولنفس الأسباب المذكورة.



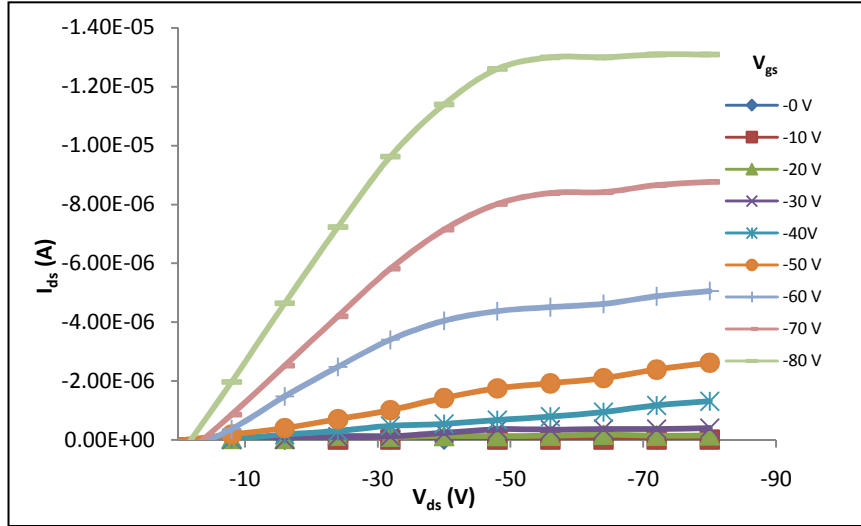
الشكل (5-7) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذي طول قناة $100\mu\text{m}$.

يبين الشكل (5-8) ميزة التحويل للترانزستور ذو التركيب Al/PVA/P3HT/Au ذات طول قناة توصيل ($100\mu\text{m}$) وفولتية (مصدر-مصرف) المسلطة الثابتة (-70V)، ويلاحظ من الشكل ان هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار اليه في أشكال ميزة التحويل السابقة.



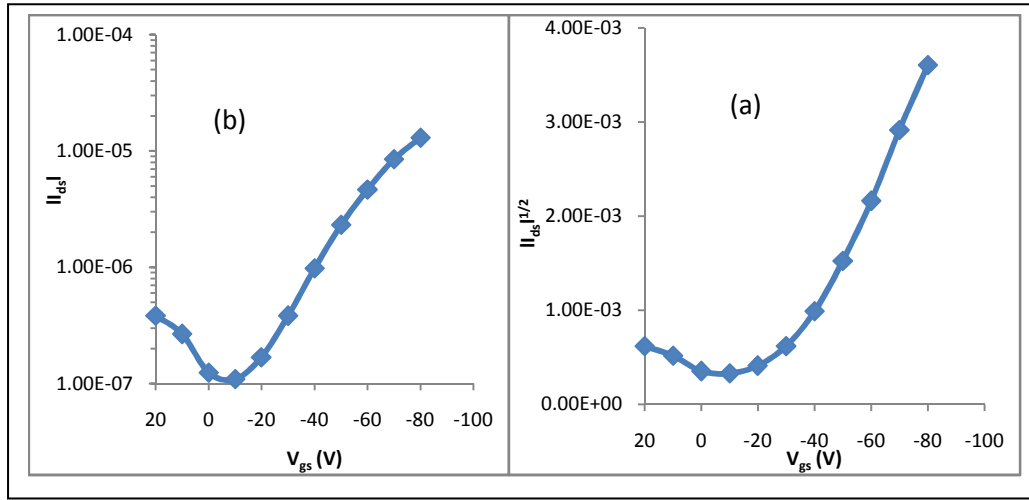
الشكل (5-8) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذي طول قناة $100\mu\text{m}$ عند $(V_{ds} = -70\text{V})$.

يبين الشكل (5-9) ميزة الخرج ($I_{ds}-V_{ds}$) عند قيم مختلفة من فولتية البوابة السالبة ($0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80\text{V}$) للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au والمصنع بطول قناة توصيل ($120\mu\text{m}$). ان هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار اليه في الأشكال ميزة الخرج السابقة ولنفس الأسباب المذكورة.



الشكل (5-9) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذي طول قناة $120\mu\text{m}$.

يُبين الشكل (5-10) ميزة التحويل للترانزستور ذي التركيب Al/PVA/P3HT/Au ذي طول قناة توصيل ($120\mu\text{m}$) وفولتية (مصدر-مصرف) المسطرة الثابتة (-50V)، ويلاحظ من الشكل أن هذا السلوك مشابه تماماً للسلوك المشار إليه في أشكال ميزة التحويل السابقة.



الشكل (5-10) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذي طول قناة عند $120\mu\text{m}$ و ($V_{ds} = -50\text{V}$).

تم حساب المعاملات الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزات التحويل الخاصة بكل منها، وبلاستفادة من العلاقات الخاصة بها المذكورة في الفصل الثاني من هذه الدراسة، وكما ذكرت في الأشكال السابقة. ويبين الجدول (5-1) القيم المستحصلة لهذه المعاملات.

يُبين الشكل (5-11) العلاقة بين التكرارية وطول القناة الموصلة لترانزستور تأثير المجال من النوع التعزيزي أو التجميعي (Accumulation Mode OFET) [346-348]، وإن تكرر حاملات الشحنة بصورة عامة في ترانزستور تأثير المجال العضوي المصنعة تقل بازدياد طول

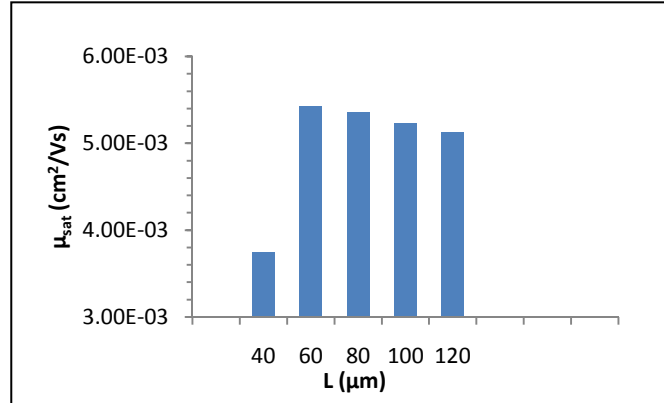
قناة التوصيل في النبيلة (ما عدا حالة $40\mu\text{m}$)، وذلك بسبب ازدياد مقاومتها بازدياد الطول بثبات عرض القناة الفعالة لترانزستور البوليمر P3HT والتي تعتبر ذات استقرار بيئي جيد، وبالتالي فإن النبيلة ستعاني انخفاض في تيار القناة نتيجة زيادة المقاومة مما ينعكس سلباً على قيمة تحركية حاملات الشحنة، أما عند طول القناة $40\mu\text{m}$ يظهر انقلاب في السلوك لجميع المعاملات بسبب ظهور تأثير القناة القصيرة، إذ قد تسطار بعض الشحنات وتعود للقطب وايضا قد يحدث اضطراب في تشكيل الغشاء الفعال في منطقة القناة عند تقليلها لهذه القيمة، وهذه النتيجة جاءت مطابقة لدراسات سابقة. إذ وجد ان تغيير طول القناة بين $(1-5\mu\text{m})$ يغير التحركية بين $(0.02-0.01)\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ، كما ان زيادة طول القناة من $(40-100\mu\text{m})$ يزيد في المقاومة بين $(2.7-3.5\text{ M}\Omega)$ ، ولتغير طول القناة بين $(5-50\mu\text{m})$ تتغير المقاومة بين $(0.5-4\text{ M}\Omega)$ كما هو مبين بالشكل (5-14). [349-353]

في حين يلاحظ ازدياد جهد العتبة السالب للترانزستورات المصنعة بازدياد طول قناة التوصيل، وذلك لان ازدياد طول قناة التوصيل يعمل على زيادة مساحة القناة، وهذا يعني زيادة عدد مصائد حاملات الشحنة في القناة وهو ما يعمل على زيادة جهد العتبة السالب للنبيلة. أما عند طول القناة $40\mu\text{m}$ ان هناك نلاحظ انقلاب في سلوك المعاملات للترانزستور وذلك لظهور تأثير ظاهرة استطرارة حاملات الشحنة للأقطاب، إضافة الى الاضطراب الذي قد يحدث في تشكيل الطبقة الفعالة عند المسافات القصيرة بين الاقطاب، مما يؤثر سلباً على عملية انتقال الشحنة عبر القناة. ويتضح من الأشكال (5-11)-(5-13) ان الترانزستور T2 هو الأفضل -إذا ما تمت المقارنة على أساس تحركية حاملات الشحنة في النبيلة- لأنه يمتلك أعلى تحركية لحاملات الشحنة ونسبة بين تيار التشغيل وتيار الإطفاء عالية نسبياً، عندما يكون طول القناة $(L=60\mu\text{m})$ ومن خلال هذه النتيجة يتضح ان T2 هو الترانزستور الأفضل كفاءة من بين الترانزستورات الأخرى، لذا سوف يعتمد هذا النوع من المواصفات في تصنيع جميع الترانزستورات اللاحقة في هذه الدراسة. [354-358]

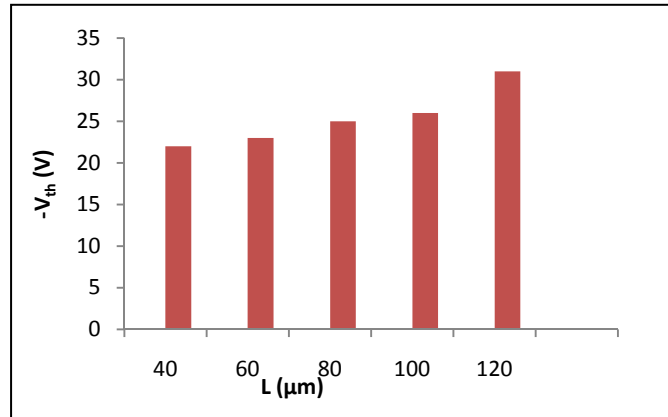
الجدول (5-1) يبين معاملات الترانزستورات المصنعة بتغيير طول القناة.

Device	L (μm)	μ_{sat} (cm^2/Vs)	V_{th} (V)	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	R_{ch} (Ω)
T1	40	3.75×10^{-3}	-22	422	1.21×10^6
T2	60	5.43×10^{-3}	-23	447	1.05×10^6
T3	80	5.36×10^{-3}	-25	298	1.49×10^6
T4	100	5.23×10^{-3}	-26	162	1.95×10^6
T5	120	5.12×10^{-3}	-31	120	5.53×10^6

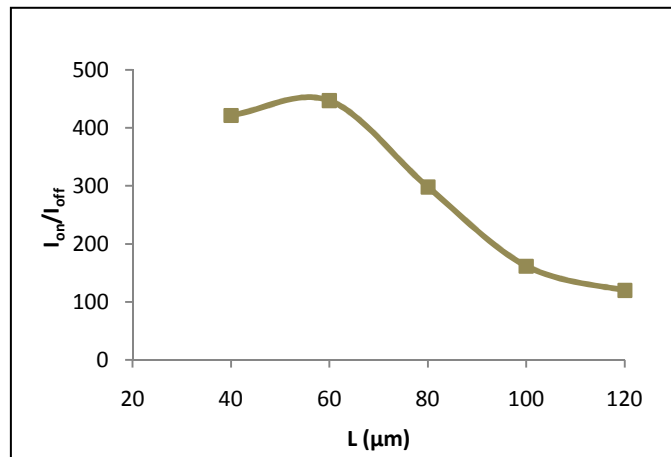
يبين الشكل (5-14) العلاقة بين مقاومة القناة وطول قناة التوصيل في ترانزستور تأثير المجال العضوي. ويلاحظ زيادة مقاومة القناة بزيادة طول القناة ، وتكون هذه الزيادة بطيئة عند قيم طول القناة التي تساوي أو اقل من (100µm)، لكنها تزداد بصورة كبيرة بعد هذه القيمة لطول القناة. إن السبب في زيادة مقاومة القناة هو زيادة مساحتها السطحية التي يقابلها زيادة في العيوب البلورية، وبالتالي تنعكس هذه الزيادة على نقصان في حركية الإشباع لحاملات الشحنة الأغلبية في قناة التوصيل.[359]



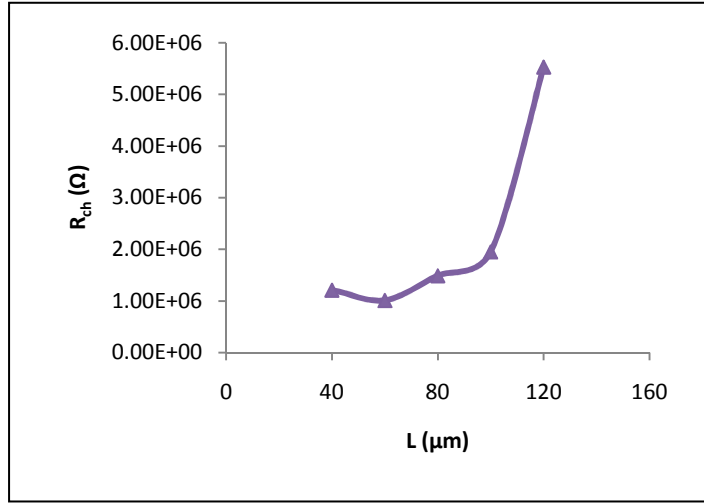
الشكل (5-11) يبين العلاقة بين التكرارية وطول قناة التوصيل في الترانزستورات المصنعة.



الشكل (5-12) يبين العلاقة بين جهد العتبة وطول قناة التوصيل للترانزستورات المصنعة.



الشكل (5-13) يبين العلاقة بين I_{on}/I_{off} وطول قناة التوصيل للترانزستورات المصنعة.

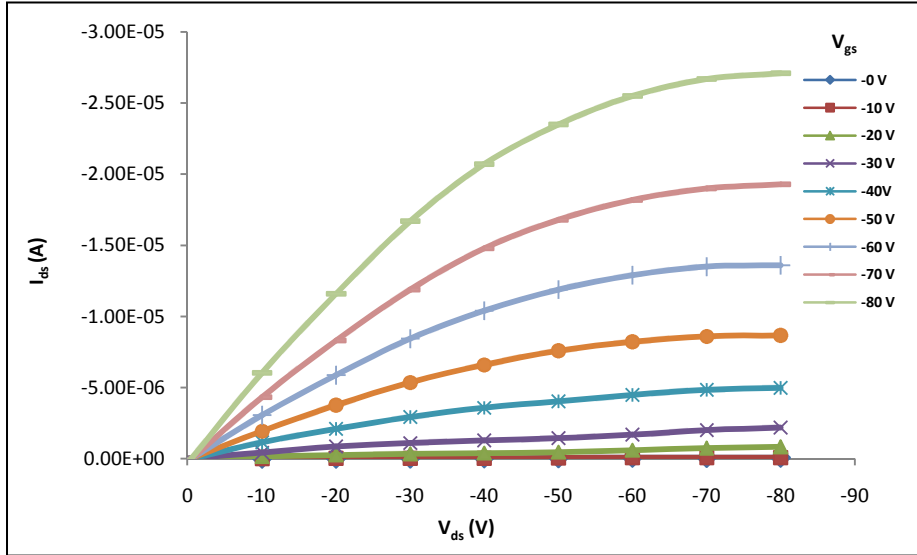


الشكل (5-14) يبين العلاقة بين مقاومة وطول قناة التوصيل للترانزستورات المصنعة.

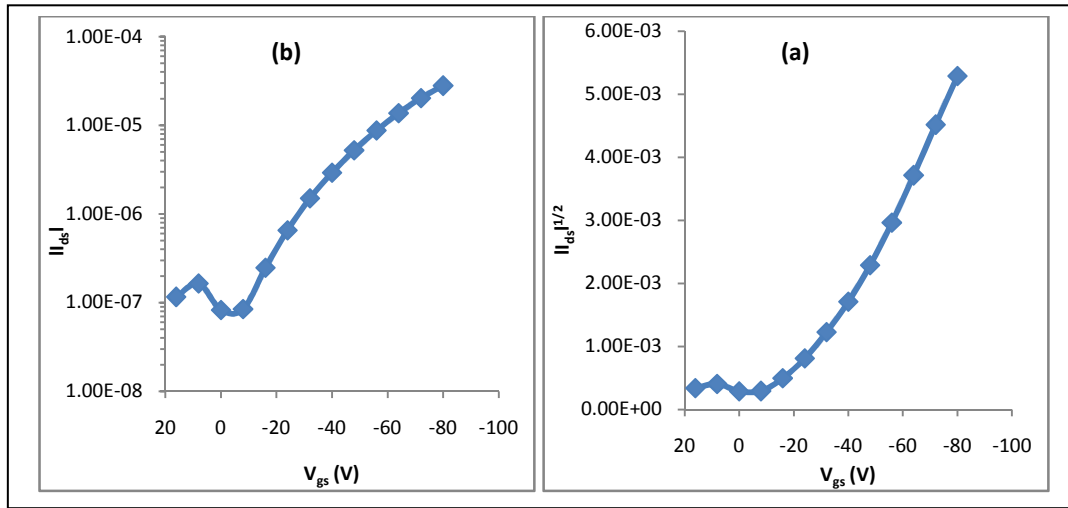
2-5- تأثير سمك الطبقة الفعالة على الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي:

تم دراسة تأثير تغيير سمك الطبقة الفعالة والمصنعة من البوليمر P3HT النقي على الخواص الكهربائية للترانزستور T2 ذات الكفاءة الأعلى والمصنعة على أقطاب من الذهب على قواعد زجاجية بسمك (237 nm) وطبقة عازل البوابة المصنعة بسرعة دوران ثابتة قدرها (1000 rpm)، وبطول قناة توصيل ثابت قدره (60 μm) وعرض قدره (1 mm)، وكما هو مبين بالجدول (5-2).

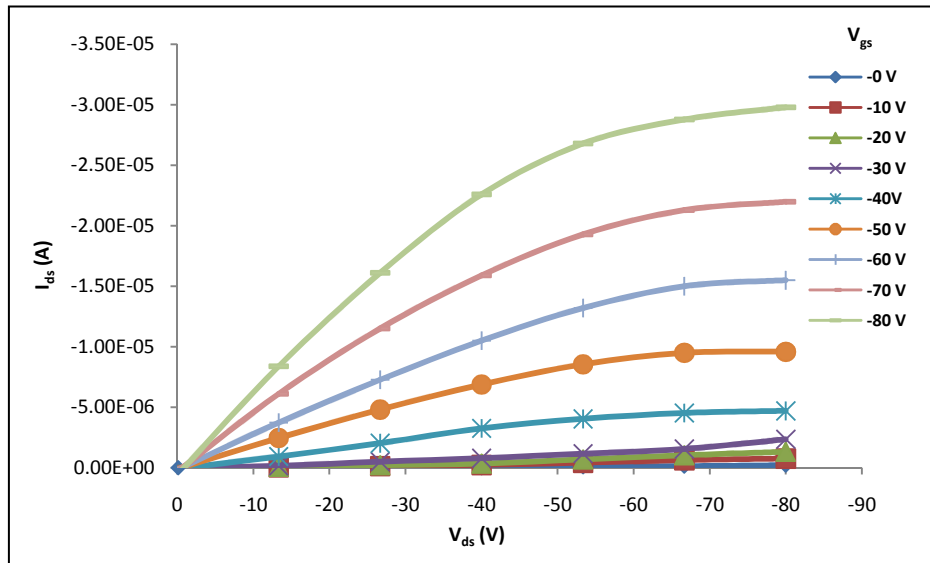
تبين الأشكال من (5-15) إلى (5-22) نتائج قياس ميزتي الخرج والتحويل لهذه الترانزستورات، والتي يتضح منها أن تغيير سمك الطبقة الفعالة في تركيب الترانزستور له تأثير كبير على الخواص الكهربائية لهذه النبائط، حيث يلاحظ سلوك هذه الأشكال مشابه تماماً للأشكال السابقة (5-1)-(5-10) والتي تم ذكرها سابقاً.



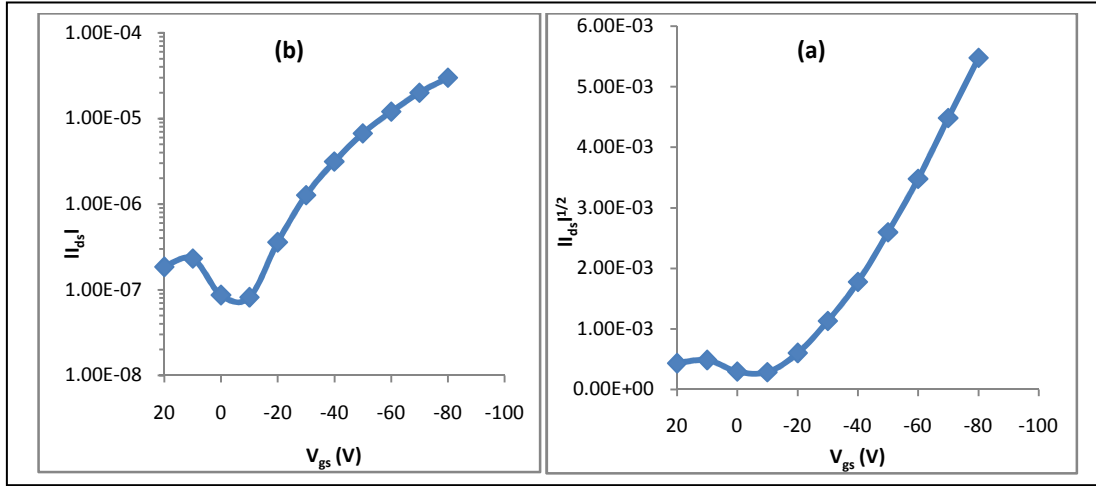
الشكل (5-15) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذو طبقة فعالة بسمك 334 nm.



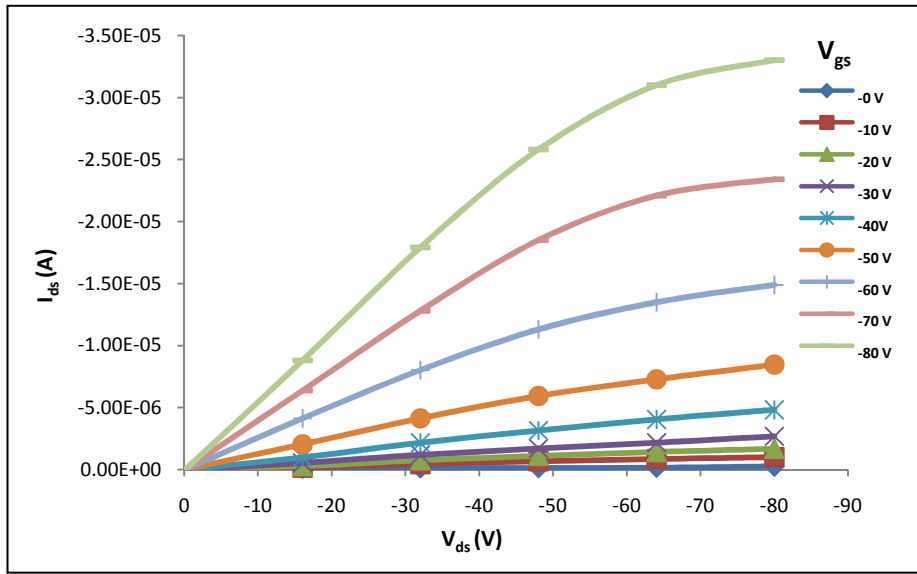
الشكل (5-16) ميزة التحويل للترانزستور ذو طبقة فعالة مرسبة بسمك 334 nm عند $V_{ds} = -70V$.



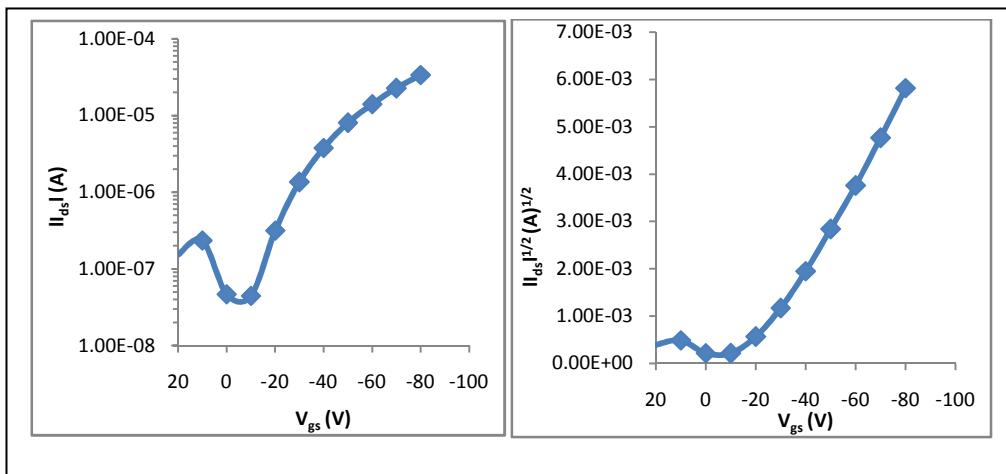
الشكل (5-17) يبين ميزة الخرج للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسمك 278 nm.



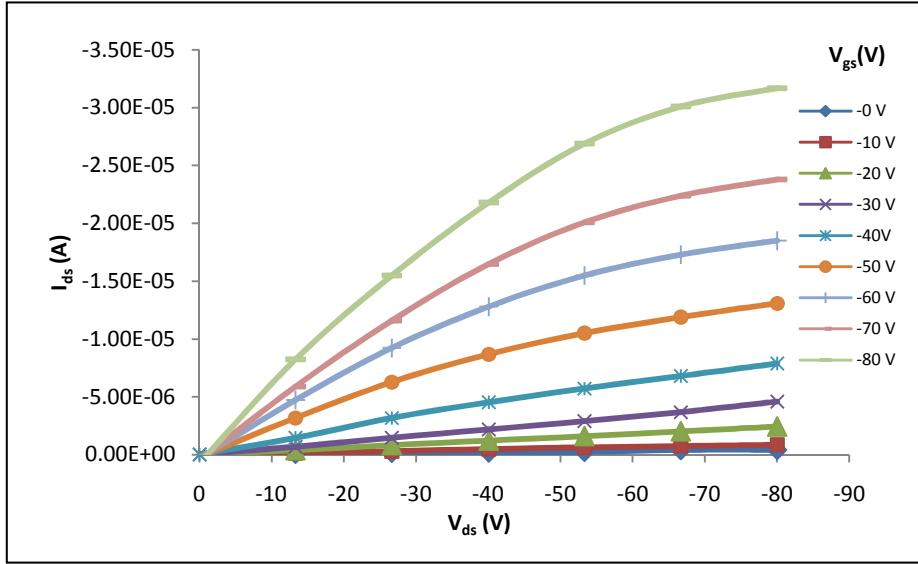
الشكل (5-18) ميزة التحويل للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسمك 278 nm عند $V_{ds} = -70$ V.



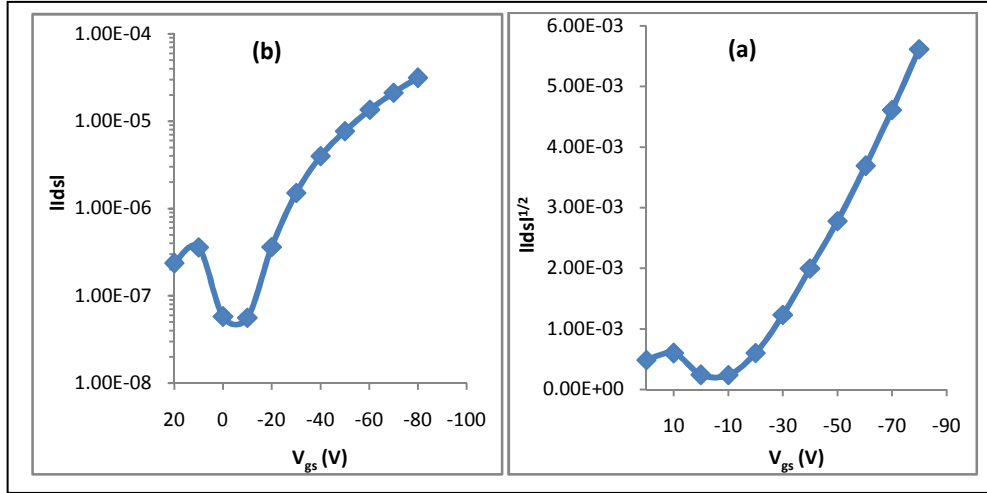
الشكل (5-19) يبين ميزة الخرج للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسمك 203 nm.



الشكل (5-20) ميزة التحويل للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسمك 203 nm عند $V_{ds} = -70$ V.



الشكل (5-21) يبين ميزة الخرج للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسبك 177 nm.



الشكل (5-22) ميزة التحويل للترانزستور بطبقة فعالة مرسبة بسبك 177 nm عند $V_{ds} = -70V$.

تم حساب المعاملات الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، وبلاستفادة من العلاقات الخاصة بها المذكورة في الفصل الثاني من هذه الدراسة والمشار إليها بالفقرة (5-1). فقد تم حساب تحركية حاملات الشحنة ومقاومة قناة التوصيل وكذلك حسب الميل تحت جهد العتبة والنسبة بين تيار التشغيل الى تيار الإطفاء ووجد جهد العتبة مباشرة من ميزات التحويل للترانزستورات، ويبين الجدول (5-2) والأشكال (5-23)-(5-26) النتائج المستحصلة لهذه المعاملات.

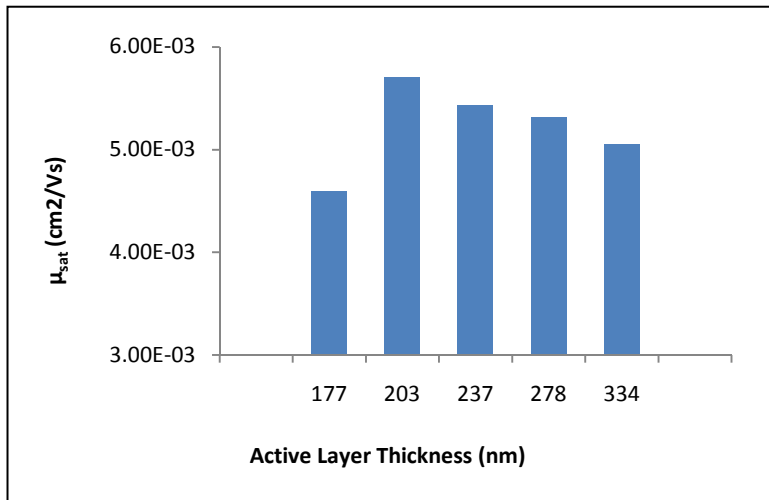
يلاحظ من هذه النتائج زيادة مقاومة قناة التوصيل بانخفاض سمك الطبقة الفعالة وذلك بسبب زيادة خشونة السطح للطبقة الفعالة بازدياد سرعة الدوران مع زمن الدوران عند استخدام طريقة الطلاء بالبرم. وان الزيادة في خشونة السطح الذي تتشكل فيه قناة التوصيل ينتج عنها مصائد شحنة

وحواجز جهد تعيق عملية انتقال حاملات الشحنة في السطح البيني بين الطبقة الفعالة وطبقة عازل البوابة، مما ينعكس سلباً على قيمة تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة في ترانزستور تأثير المجال العضوي المصنعة، ويلاحظ تذبذب قيم التحركية لحاملات الشحنة كمحصلة للتأثير المتعاكس من الخشونة ولكون تقليل سمك الطبقة شبه الموصلة يعد عاملاً مساعداً في زيادة توصيليتها الكهربائية بشكل أساس كون هذه العملية تزيد من انتظام السلاسل البوليمرية داخل الشبكة البوليمرية وكذلك التداخل بين مدارات π لها مما يزيد من تحركية حاملات الشحنة. وبالتالي فإن النسيطة ستعاني انخفاضاً في تيار القناة. [360-361] في حين يلاحظ انخفاض جهد العتبة السالب وكذلك الميل تحت جهد العتبة وزيادة النسبة بين تيار التشغيل الى تيار الإطفاء للترانزستورات المصنعة، وذلك نتيجة ازدياد مقاومة القناة، وهذه النتيجة جاءت مطابقة لدراسات سابقة. اذ يقل جهد العتبة بين $(-5V)$ و $(-10V)$ وتزداد التحركية من $(2 \times 10^{-3} - 10^{-4}) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ بتغيير سمك الطبقة الفعالة بين $(2.1-7\text{nm})$. [362-367]

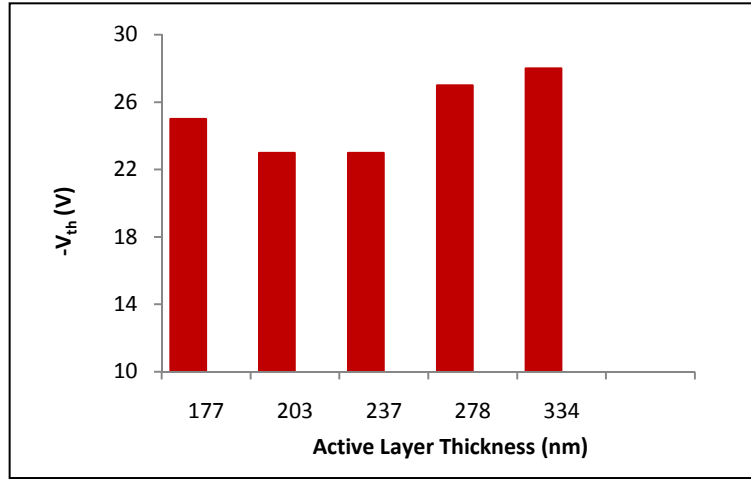
ويتضح من الأشكال (5-26)-(5-23) إن أفضل الصفات التي امتاز بها ترانزستور تأثير المجال هي عندما كان سمك الطبقة الفعالة (203nm) للترانزستور T8 الذي يمتلك قيمة التحركية الأعلى $(5.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs})$ بين قيم العينات الأخرى.

الجدول (5-2) يبين معاملات الترانزستورات المصنعة بتغيير سمك الطبقة الفعالة.

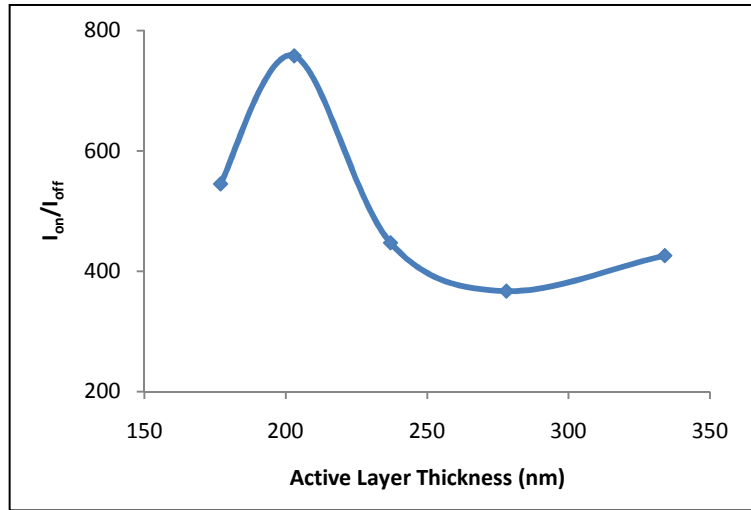
Device No.	Active Layer Thickness (nm)	$\mu_{\text{sat}}(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$V_{\text{th}}(\text{V})$	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	$R_{\text{ch}}(\Omega)$
T6	334	5.05×10^{-3}	-28	426	1.27×10^6
T7	278	5.31×10^{-3}	-27	367	1.21×10^6
T2	237	5.43×10^{-3}	-23	447	1.05×10^6
T8	203	5.7×10^{-3}	-23	758	1×10^6
T9	177	4.59×10^{-3}	-25	545	1.10×10^6



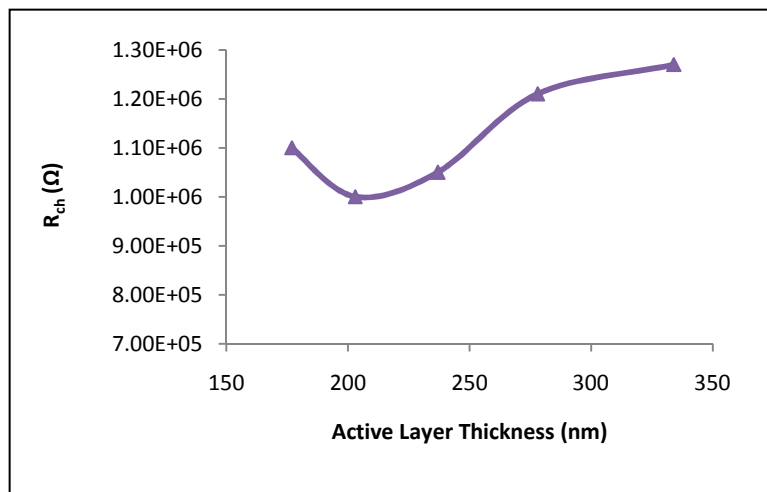
الشكل (5-23) يبين العلاقة بين التحركية وسمك الطبقة الفعالة للترانزستورات المصنعة.



الشكل (5-24) يبين العلاقة بين جهد العتبة وسمك الطبقة الفعالة للترانزستورات المصنعة.



الشكل (5-25) يبين العلاقة بين النسبة I_{on}/I_{off} وسمك الطبقة الفعالة للترانزستورات المصنعة.

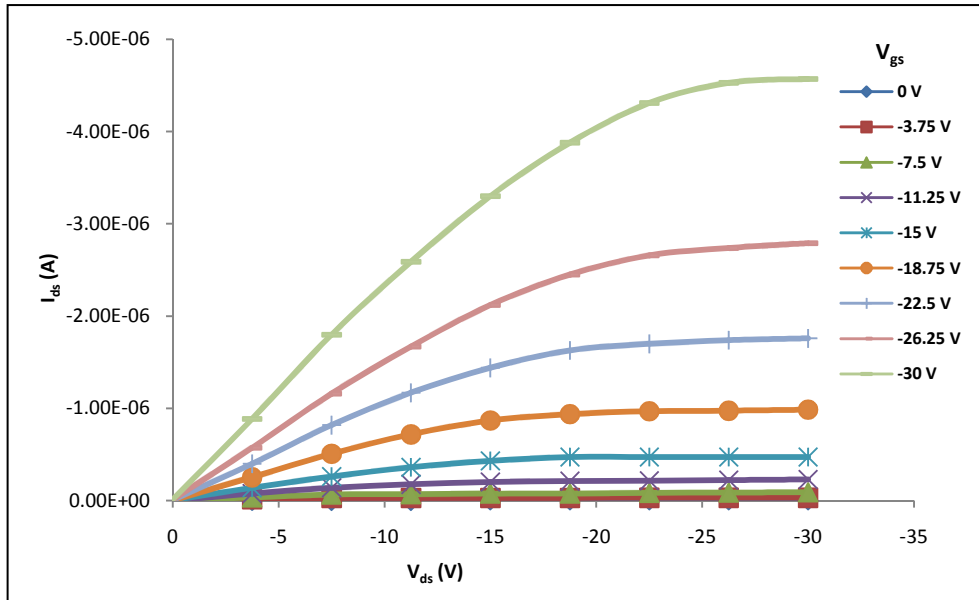


الشكل (5-26) يبين العلاقة بين مقاومة قناة التوصيل وسمك الطبقة الفعالة للترانزستورات المصنعة.

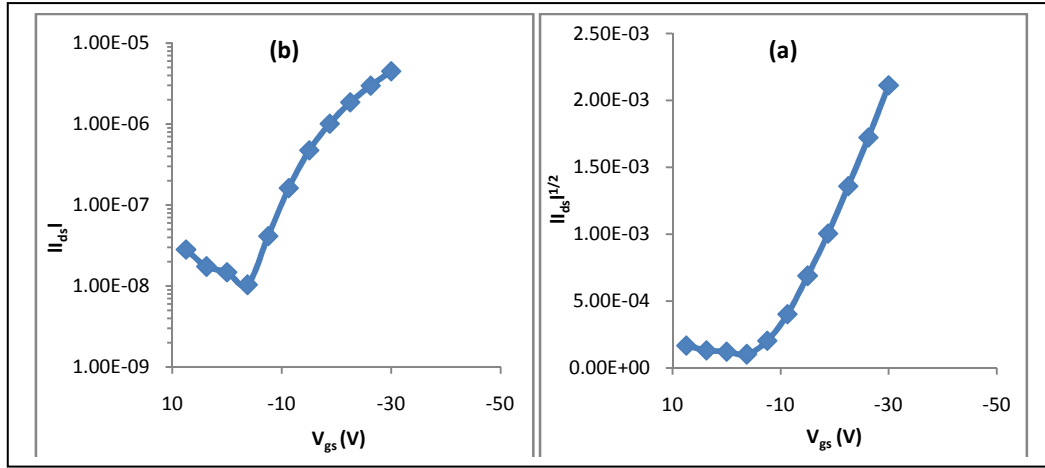
3-5- تأثير سمك عازل البوابة على الخواص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي:

تم دراسة تأثير تغيير سمك الطبقة العازلة للبوابة والمرسبة من البوليمر PVA النقي على الخواص الكهربائية للترانزستورات T8 والمصنع بسرعة دوران للطبقة العازلة (1000 rpm) والطبقة الفعالة P3HT المرسبة بسمك ثابت قدره (203 nm)، وكذلك طول قناة توصيل ثابت قدره (60 μm) وعرض ثابت قدره (1 mm)، وكما هو مبين بالجدول (3-5).

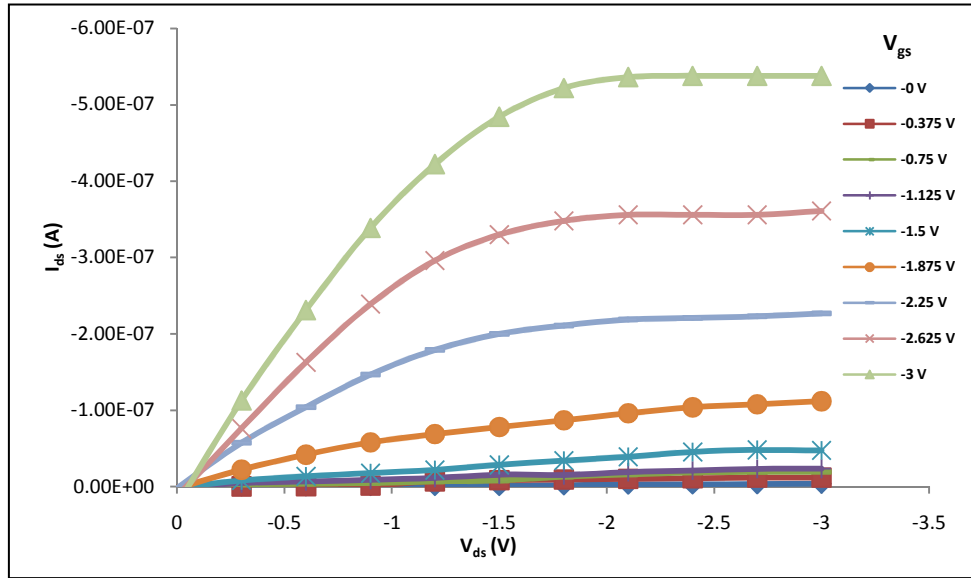
يبين الشكل (5-27) نتائج قياس ميزتي الخرج عند قيم مختلفة لفولتية البوابة - (0, -10, -20, -30V) للترانزستور ذات التركيب Al/PVA/P3HT/Au، علماً ان طبقة عازل البوابة رسبت بسرعة دوران (1500rpm). ويتضح من الشكل أن قيم تيار القناة (I_{ds}) يزداد سلباً بزيادة جهد المصدر-المصرف المسلط وعند مختلف قيم فولتية البوابة المسلطة، بعدها تثبت قيم تيار القناة مع زيادة جهد المصدر-المصرف لجميع قيم جهد البوابة المسلط. والتي يتضح منها أن تغيير سمك الطبقة الفعالة في تركيب الترانزستور له تأثير كبير على الخواص الكهربائية لهذه النماذج، كما يتضح أن الأشكال (5-27)-(5-34) سلوك مشابه تماماً للأشكال (5-1)-(5-10) والتي تمت مناقشتها سابقاً.



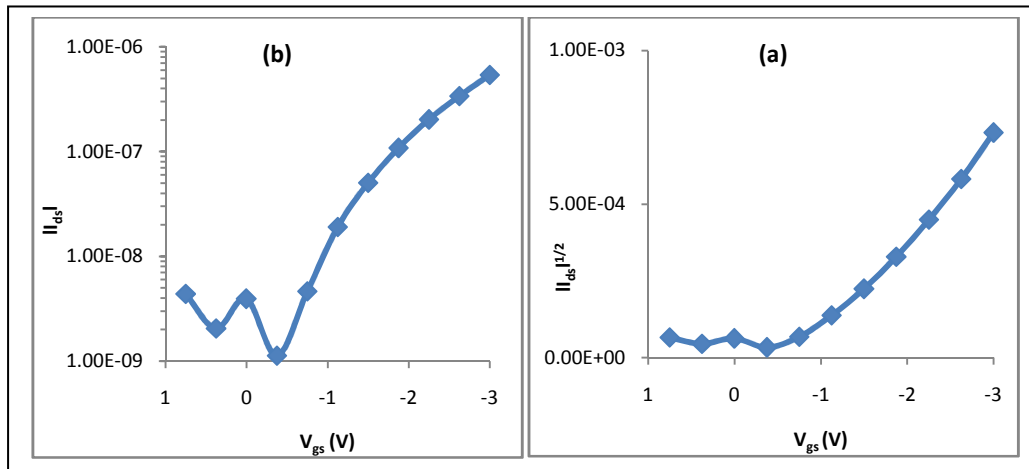
الشكل (5-27) يبين ميزة الخرج للترانزستور عندما يكون سمك الطبقة العازلة 1500rpm.



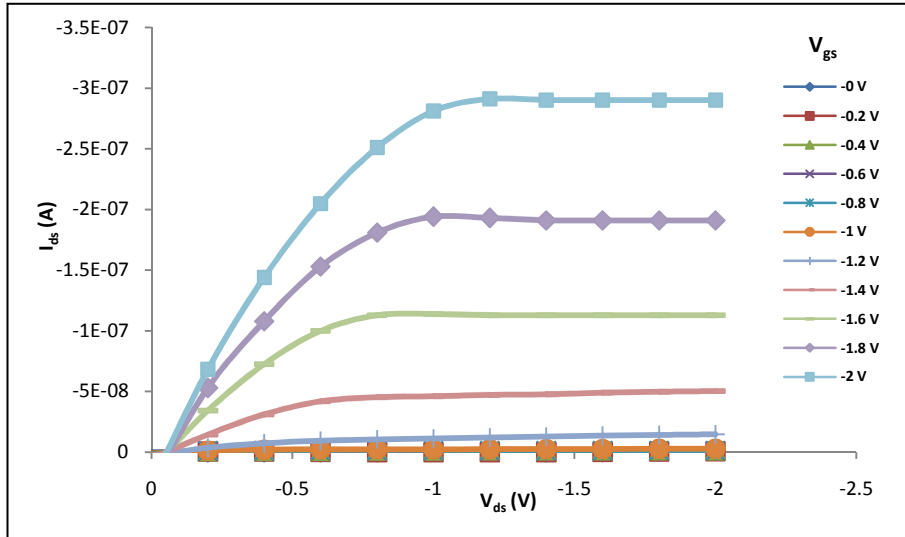
الشكل (5-28) يبين ميزة التحويل للترانزستور عند ($V_{ds} = -26.25V$) وسمك الطبقة العازلة 1500rpm.



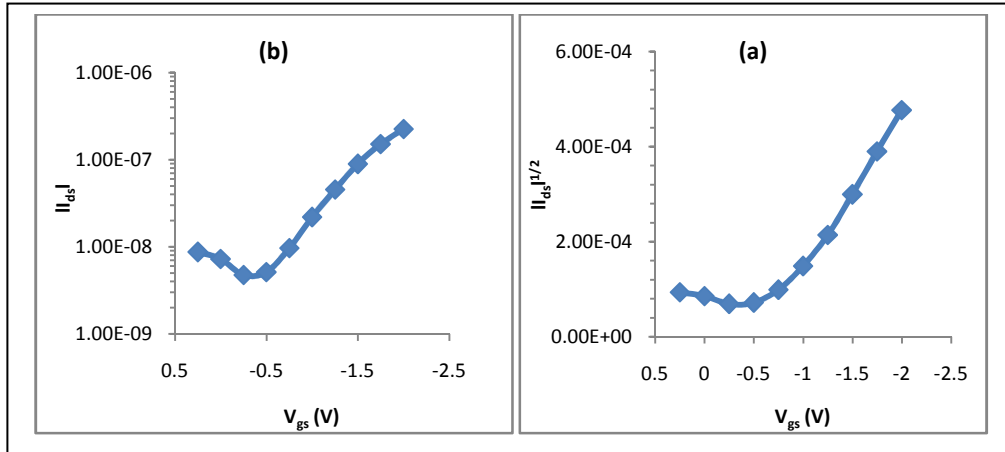
الشكل (5-29) يبين ميزة الخرج للترانزستور عندما يكون سمك الطبقة العازلة 2000rpm.



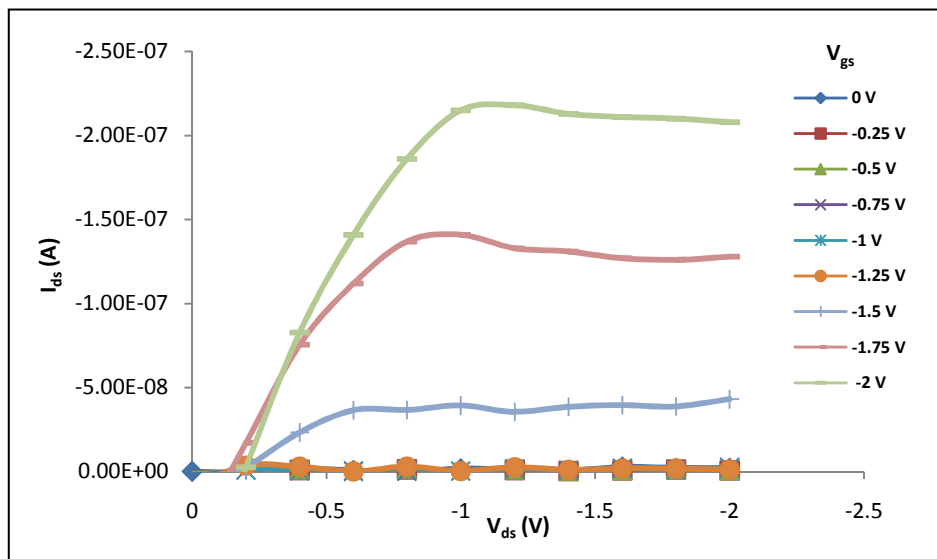
الشكل (5-30) يبين ميزة التحويل للترانزستور عند ($V_{ds} = -2V$) سمك الطبقة العازلة 2000rpm.



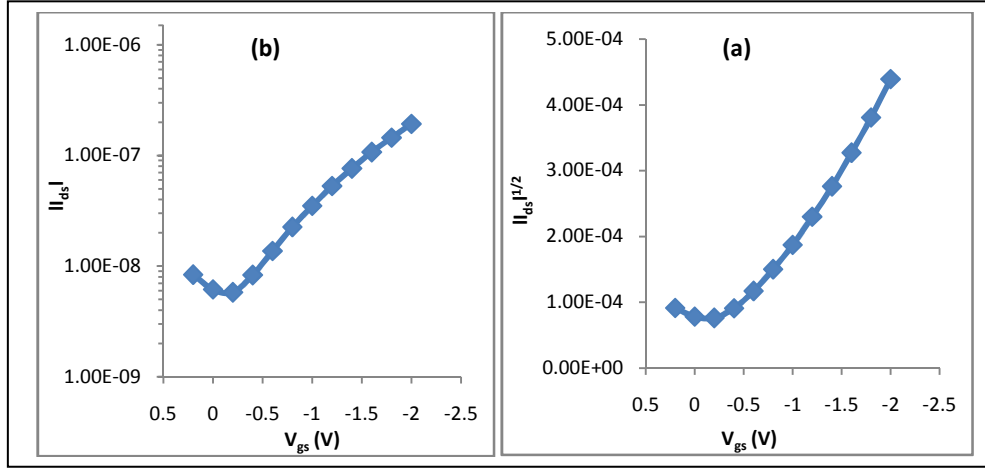
الشكل (5-31) يبين ميزة الخرج للترانزستور عندما يكون سمك الطبقة العازلة 2500rpm.



الشكل (5-32) يبين ميزة التحويل للترانزستور عند ($V_{ds} = -1.2V$) وسمك الطبقة العازلة 2500rpm.



الشكل (5-33) يبين ميزة الخرج للترانزستور عندما يكون سمك الطبقة العازلة 3000rpm.



الشكل (5-34) يبين ميزة التحويل للترانزستور عند ($V_{ds}=-1V$) وسلك الطبقة العازلة 3000rpm.

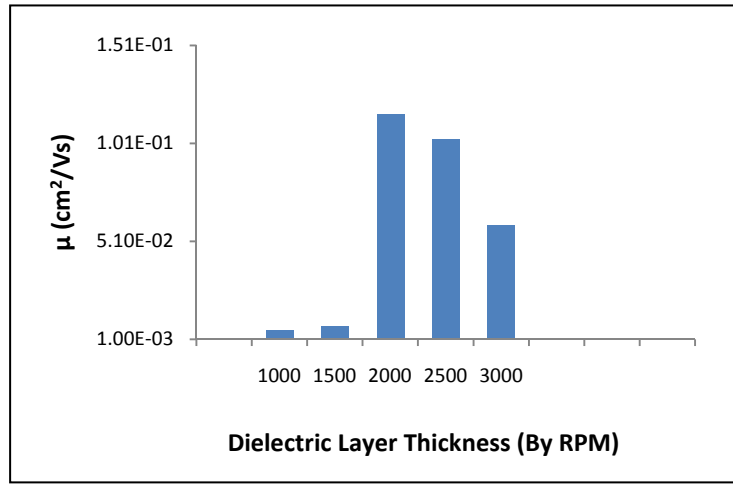
تم حساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، وبالأستفادة من العلاقات الخاصة بها والمشار إليها بالفقرة (5-1). فقد تم حساب تركية حاملات الشحنة ومقاومة قناة التوصيل وكذلك حسبت النسبة بين تيار التشغيل الى تيار الإطفاء ووجد جهد العتبة مباشرة من ميزات التحويل للترانزستورات، ويبين الجدول (5-3) النتائج المستحصلة لهذه المعاملات.

تبين الأشكال (5-35) - (5-38) ان زيادة سعة المتسعة الكهربائية لطبقة عازل البوابة (بانخفاض السمك الطبقة العازلة) من البوليمر العازل PVA، والتي كان تأثيرها واضحاً من خلال انخفاض جهد العتبة لقناة التوصيل في الترانزستورات المصنعة. وذلك لان زيادة سعة المتسعة تعني عدداً أعلى للشحنة المتراكمة في قناة التوصيل، وذلك يقود الى جهد عتبة أوطأ مطلوب لتشغيل النبيلة. وهذا الانخفاض في جهد العتبة الناتج عن زيادة السعة الكهربائية للطبقة العازلة قد غير صفة النبيلة من العمل في الجهد العالي الى العمل في الجهد المنخفض مع تغيرات ملحوظة في المعاملات المرافقة. إن زيادة مقاومة قناة التوصيل مع انخفاض سمك الطبقة العازلة قد يكون بسبب تأثير زيادة سرعة البرم على السطح البيني بحيث يشكل عيوباً بلورية تعيق عملية انتقال حاملات الشحنة. كما إن انخفاض النسبة بين تيار التشغيل وتيار الإطفاء عند السمك المنخفض للطبقة العازلة قد يكون ناتجاً عن زيادة في تيار التسرب مع انخفاض سمك الطبقة العازلة للبوابة إضافة الى احتمالية تشكل مصائد الشحنة ووجود شوائب تحد من كثافة حاملات الشحنة المتراكمة في السطح البيني بين الطبقة الفعالة وطبقة عازل البوابة، مما ينعكس على تركية حاملات الشحنة في الترانزستورات المصنعة. وبصورة عامة إن تقليل سمك طبقة عازل البوابة يقلل من تأثير الشحنات في السطح البيني الداخلي مع الطبقة الفعالة، وذلك من خلال تغير سماحية هذه الطبقة العازلة والتي تؤثر في تموضع هذه الشحنات، وكذلك فان تغيير السمك يعني تغيير ثابت العزل والذي ينعكس على كثافة الشحنات المتجمعة في قناة التوصيل. وتقليل السمك من ناحية

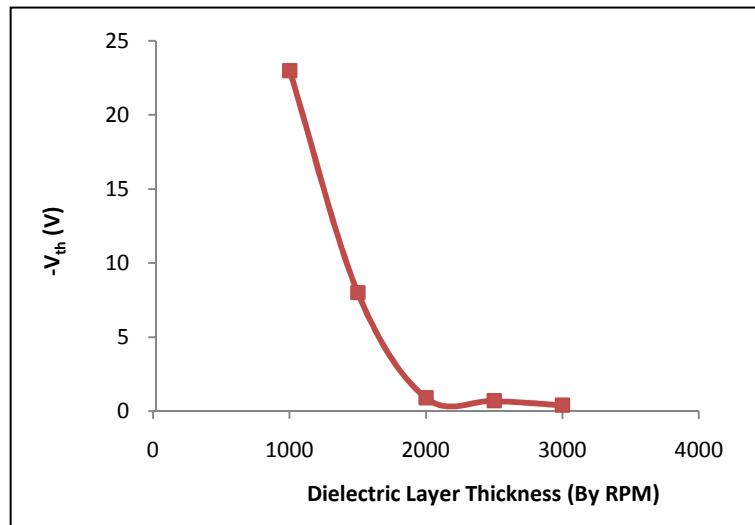
أخرى يعني تقليل مصائد الشحنات في السطح البيني وبالتالي تقليل جهد العتبة. وهذه النتيجة جاءت مطابقة لدراسات سابقة. اذ وجدت دراسات سابقة ان تقليل السمك أي زيادة السعة من ($13.13-33.19 \text{ nF/cm}^2$) ساهم في زيادة التحركية بين ($0.07-0.29 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ونقصان جهد العتبة بين $[368-371] \text{ V}$. ((-1.47)-(-1.06)V)

الجدول (5-3) يبين معاملات الترانزستورات المصنعة بتغيير سمك عازل البوابة.

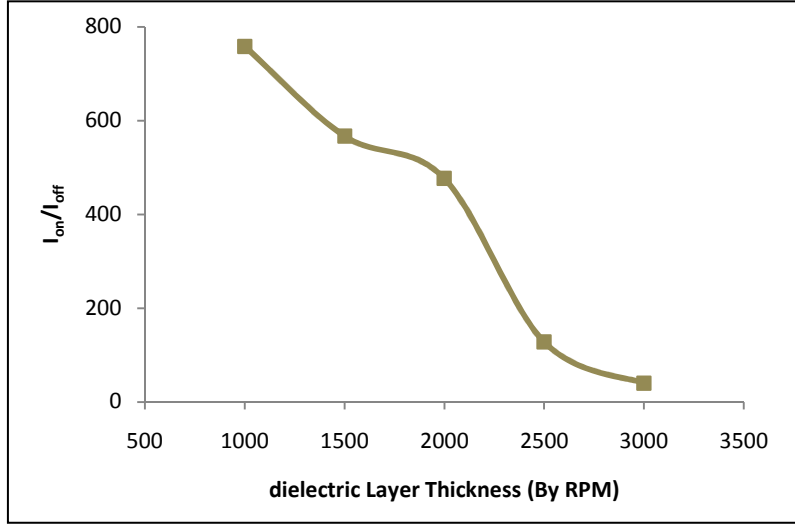
Device	Thickness Of PVA (By RPM)	μ_{sat} (cm^2/Vs)	V_{th} (V)	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	R_{ch} (Ω)
T8	1000	5.7×10^{-3}	-23	758	1×10^6
T10	1500	7.98×10^{-3}	-8	567	1.69×10^6
T11	2000	1.16×10^{-1}	-0.9	477	1.96×10^6
T12	2500	1.03×10^{-1}	-0.7	128	6.25×10^6
T13	3000	5.92×10^{-2}	-0.4	40	1.02×10^7



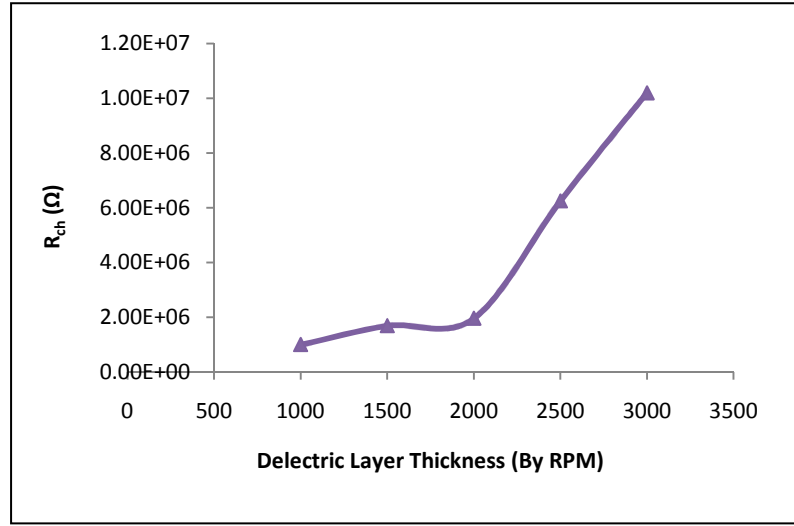
الشكل (5-35) يبين العلاقة بين التحركية للترانزستور وسمك الطبقة العازلة بدلالة سرعة الدوران.



الشكل (5-36) يبين العلاقة بين جهد العتبة للترانزستور وسمك الطبقة العازلة بدلالة سرعة الدوران.



الشكل (5-37) يبين العلاقة بين النسبة I_{on}/I_{off} للترانزستور وسمك الطبقة العازلة بدلالة سرعة الدوران.



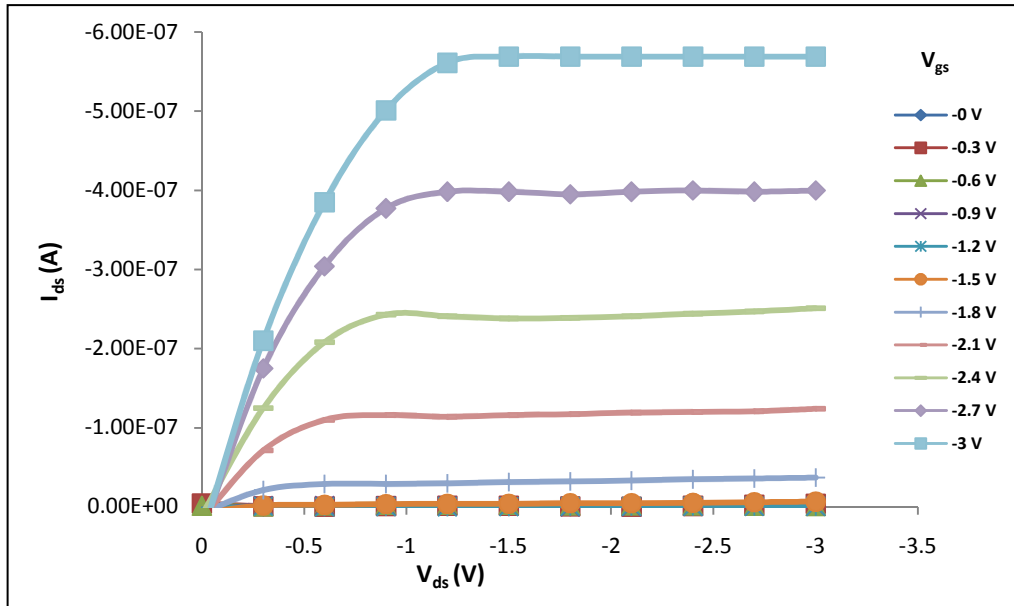
الشكل (5-38) يبين العلاقة بين مقاومة قناة التوصيل للترانزستور وسمك الطبقة العازلة بدلالة سرعة الدوران.

4-5-دراسة تأثير تشويب البوليمر P3HT بـ CNP على ترانزستور تأثير المجال العضوي:

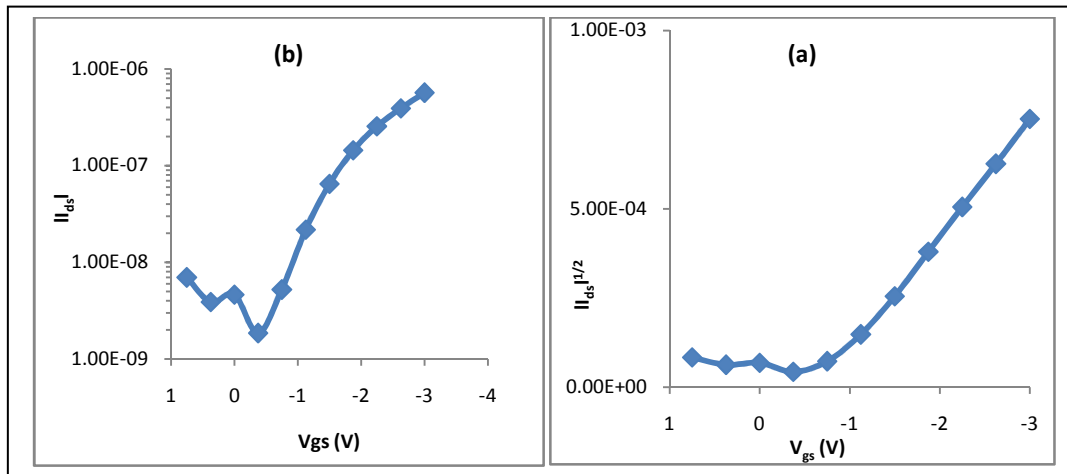
بعد أن تمت دراسة الخصائص الكهربائية لترانزستور تأثير المجال العضوي المصنع من بوليمرات نقية بتغيير سمك كل منها، وقياس ميزة الإخراج والتحويل وحساب بعض المعاملات المهمة في هذه الدراسة، تم تصنيع الترانزستورات بتشويب المادة شبه الموصلة (الطبقة الفعالة) بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) من دقائق الكربون النانوية، وأُعدت مواصفات التصنيع من ناحية أبعاد قناة التوصيل ($W=1\text{mm}$, $L=60\mu\text{m}$) وسمك كل من طبقة عازل البوابة بدلالة سرعة الدوران (2000 rpm) والطبقة الفعالة المشوبة (203 nm). يوضح الجدول (5-4) أرقام الترانزستورات المصنعة بعد تشويب الطبقة الفعالة.

يبين الشكل (5-39) نتائج قياس ميزتي الخرج عند قيم مختلفة لفولتية البوابة ($0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, -1.5, -1.8, -2.1, -2.4, -2.7, -3V$) للترانزستور ذات التركيب $Al/PVA/(P3HT+1\%CNPs)/Au$ ، والذي رسبت فيها الطبقة الفعالة مشوبة بـ 1% من CNPs. ويتضح من الشكل ان قيم تيار القناة السالب (I_{ds}) تزداد بزيادة جهد المصدر-المصرف السالب المسلط وعند مختلف قيم فولتية البوابة المسلطة آنفة الذكر، وعند الإشباع تثبت جميع قيم تيار القناة مع زيادة جهد المصدر-المصرف المسلط لجميع قيم جهد البوابة المسلط.

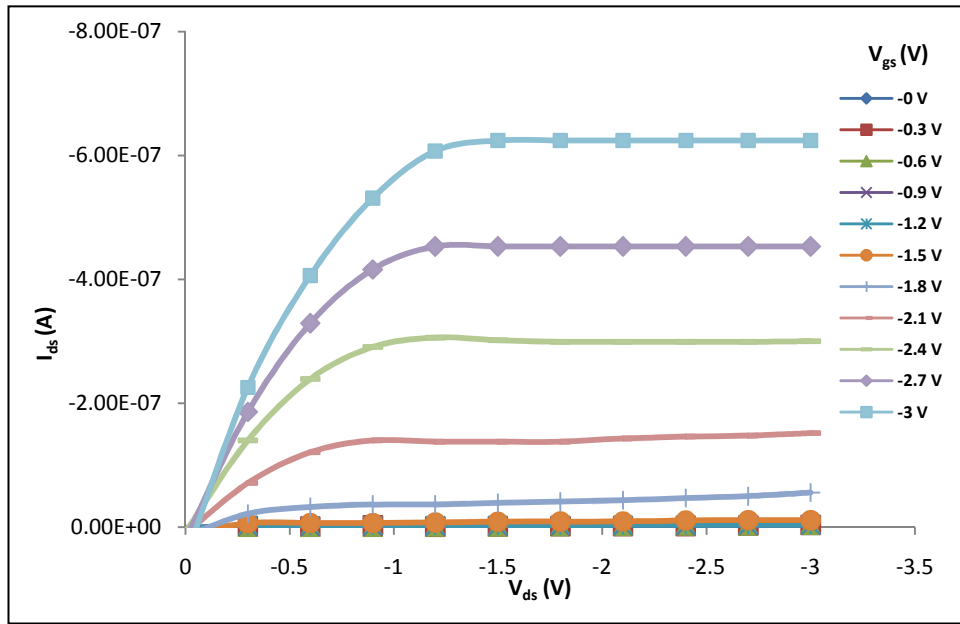
والتي يتضح منها أن زيادة نسبة التشويب للطبقة الفعالة في تركيب الترانزستور لها تأثير كبير على الخواص الكهربائية لهذه النبائط، كما يتضح ان للأشكال (5-40)-(5-50) سلوكاً مشابهاً تماماً للأشكال (5-1)-(5-10) والتي تمت مناقشتها سابقاً.



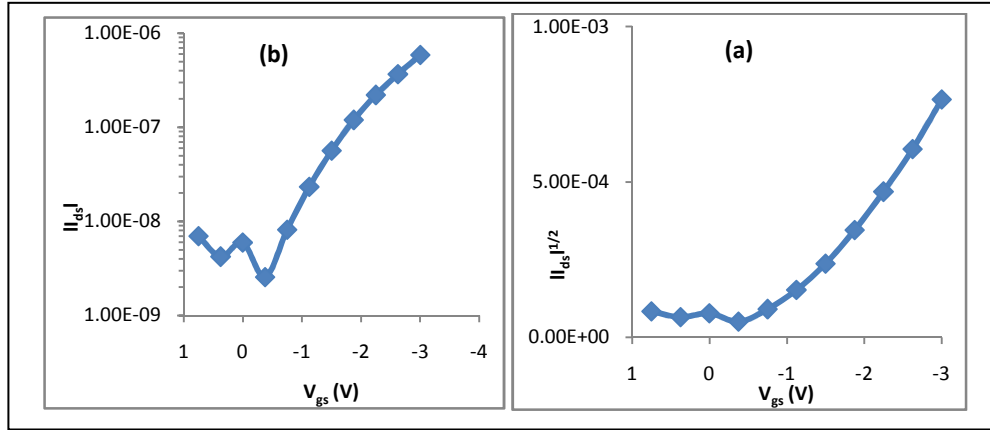
الشكل (5-39) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 1%CNPs.



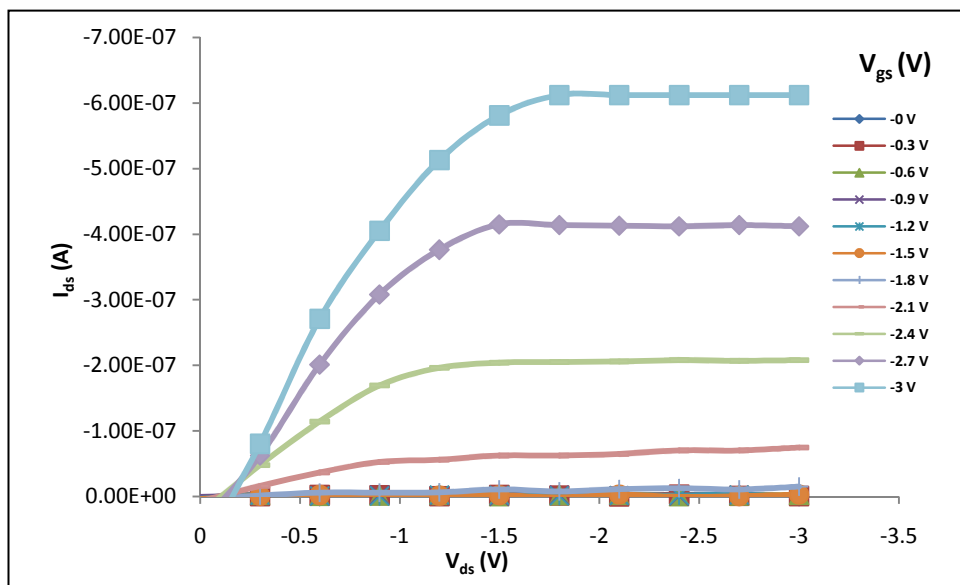
الشكل (5-40) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 1%CNPs عند ($V_{ds} = -1.2V$).



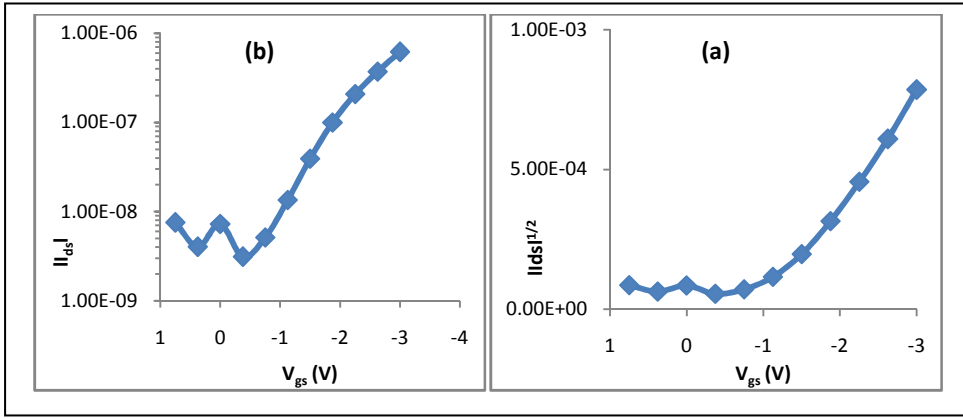
الشكل (5-41) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 2%CNPs.



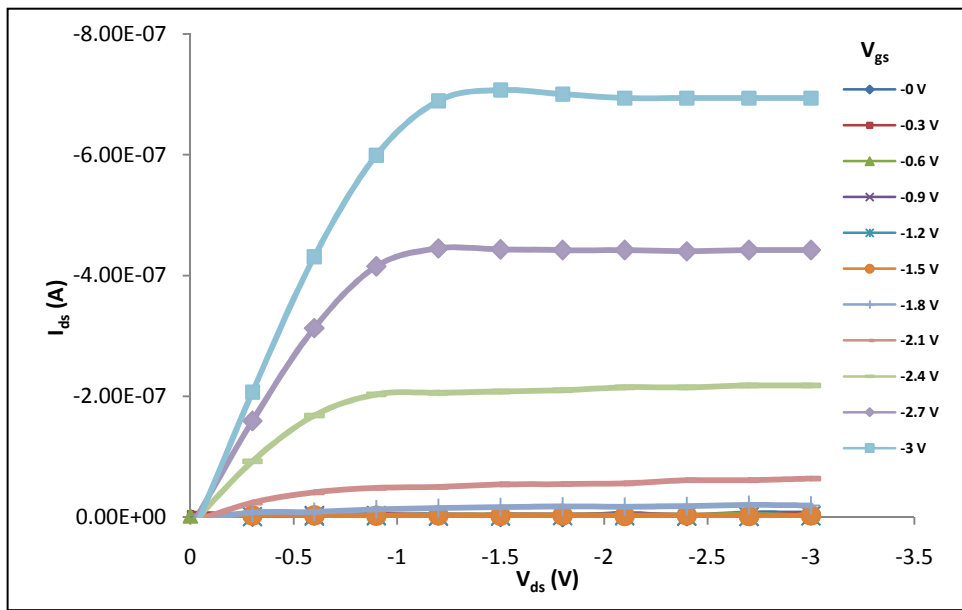
الشكل (5-42) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 2%CNPs عندما ($V_{ds} = -1.5$ V).



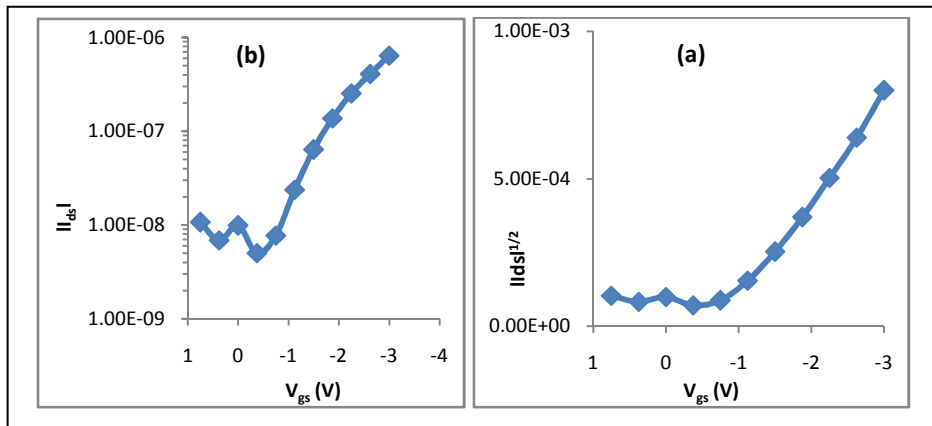
الشكل (5-43) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 3%CNPs.



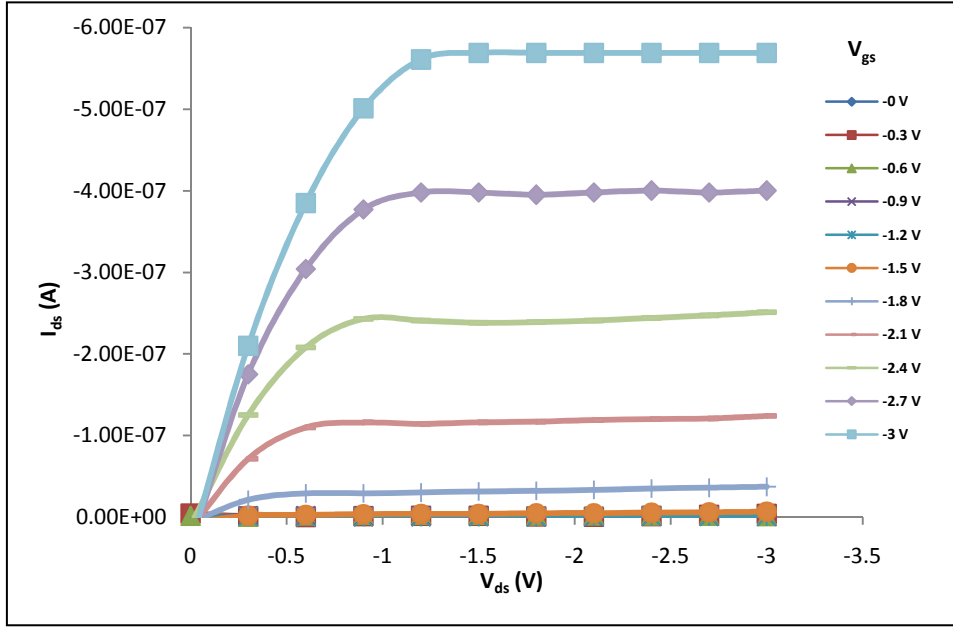
الشكل (5-44) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 3%CNPs عند $(V_{ds}=-1.8V)$.



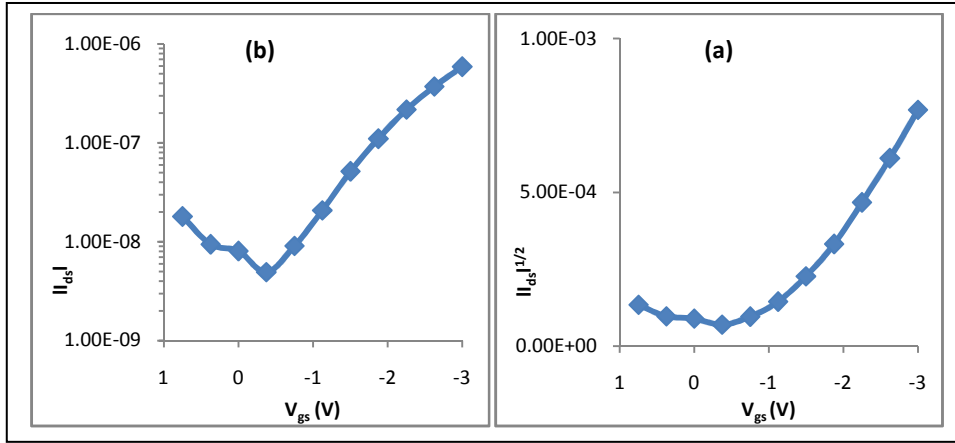
الشكل (5-45) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 4%CNPs



الشكل (5-46) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 4%CNPs عند $(V_{ds}=-1.2V)$.



الشكل (5-47) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 5%CNPs.



الشكل (5-48) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 5%CNPs عند $(V_{ds} = -1.2V)$.

تم حساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، وبالأستفادة من العلاقات الخاصة بها والمشار إليها بالفقرة (5-1). فقد تم حساب تركية حاملات الشحنة ومقاومة قناة التوصيل وكذلك حسبت النسبة بين تيار التشغيل الى تيار الإطفاء ووجد جهد العتبة مباشرة من ميزات التحويل للترانزستورات، ويبين الجدول (5-4) والأشكال من (5-49) الى (5-52) النتائج المستحصلة لهذه المعاملات.

إن تشويب الطبقة الفعالة المتمثلة بالبوليمر P3HT والذي أجري العمل عليه في أجواء مفتوحة للهواء والرطوبة هو بطبيعة الحال غير مستقر تماماً أمام هذه المؤثرات بسبب خواص تأينه الواطئة (4- 4.4 eV)، والتي تعتبر بمثابة تشويب يحث مصائد لذا تم صنع الترانزستور بتركيب TG-BC لغرض توفير الحد الممكن من الحماية من هذه المؤثرات. بينت النتائج المستحصلة في الجدول (5-4) والأشكال (5-49) - (5-52).

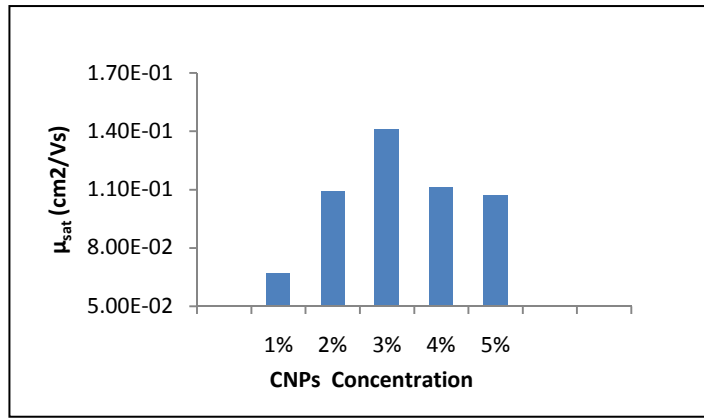
ان تشويب الطبقة الفعالة بدقائق الكربون النانوية يعمل بصورة عامة على تقليل مقاومة القناة مما أدى الى زيادة في تحركية حاملات الشحنة في قناة التوصيل للترانزستورات، وهي أيضا نتيجة طبيعية لزيادة التوصيلية الكهربائية للطبقة الفعالة نتيجة التشويب عبر تشكل الجزر المعدنية من الدقائق المضافة. [315, 372-374] وقد تعود بعض التغييرات بالسلوك الى اختلاف التشكيل البلوري لعازل البوابة بتغير صفات الطبقة الفعالة التي تعتبر بمثابة قاعدة الترسيب، كما اتضح ذلك بنتائج XRD في الفصل الرابع من الدراسة.

يتضح من الشكل (5-49) ان أعلى كفاءة للترانزستورات كانت عند الترانزستور T16 والذي يمتلك نسبة تشويب 3% بدقائق الكربون النانوية لامتلاكه التحركية الأعلى لحاملات الشحنة عند الإشباع ($1.41 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$). وتغير جهد العتبة مرتبط بالعيوب البلورية الناتجة عن التشويب، والتي تشكل مصائد للشحنة.

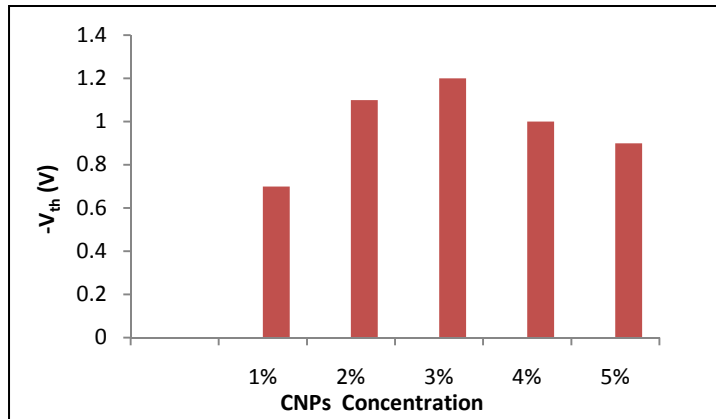
بينت الدراسات السابقة إمكانية زيادة التحركية بين (2×10^{-4} - 10^{-3} Vs/cm^2) عبر تشويب الطبقة الفعالة P3HT، وفي دراسة أخرى زيادة التحركية بين (2.5×10^{-2} - $5 \times 10^{-3} \text{ Vs/cm}^2$) وزيادة جهد العتبة بين (-13) - (-8) V وتغير من جهد العتبة السالب الى الموجب ($+3$) - (-12.5) من خلال عملية تشويب الفعالة P3HT بدقائق الكربون النانوية في دراسة أخرى. ووجد باحثين إن مقاومة القناة تقل بالتشويب بـ CNPs من (5.53×10^8 - $2.08 \times 10^8 \Omega$) [375-378].

الجدول (5-4) يبين معاملات الترانزستورات المصنعة بتشويب الطبقة الفعالة.

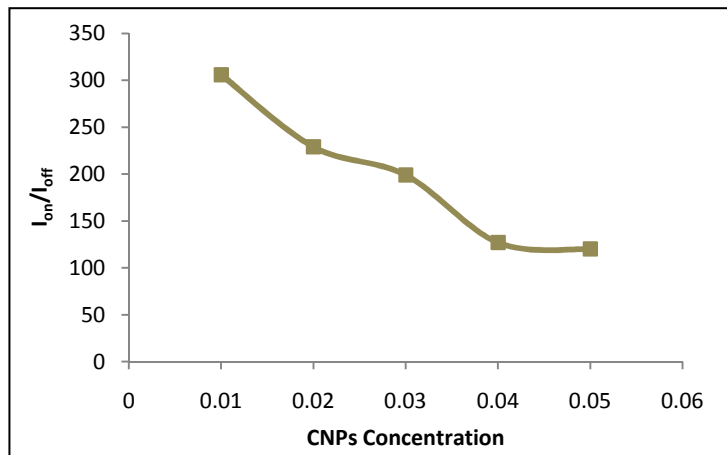
Device	P3HT + CNPs%	$\mu_{\text{sat}} (\text{cm}^2/\text{Vs})$	$V_{\text{th}} (\text{V})$	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	$R_{\text{ch}} (\Omega)$
T14	1%	6.68×10^{-2}	-0.7	306	6.65×10^6
T15	2%	1.09×10^{-1}	-1.1	229	5.21×10^6
T16	3%	1.41×10^{-1}	-1.2	199	2.82×10^6
T17	4%	1.11×10^{-1}	-1	127	1.02×10^7
T18	5%	1.07×10^{-1}	-0.9	120	7.1×10^6



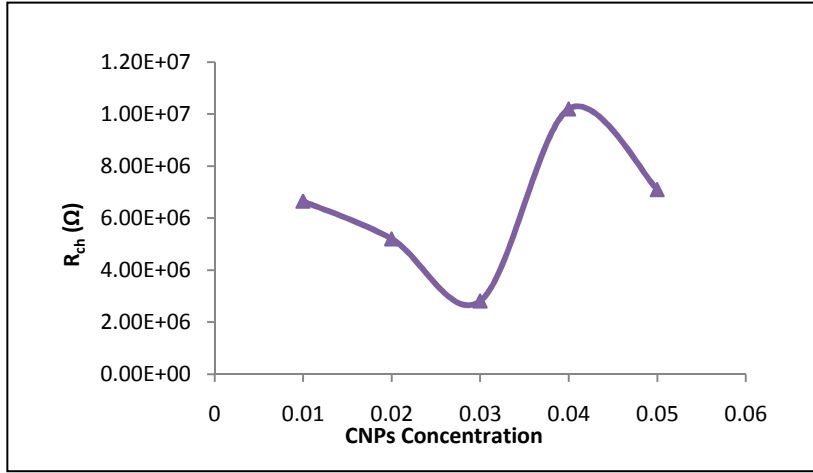
الشكل (5-49) يبين العلاقة بين التكرية ونسبة تشويب الطبقة الفعالة في الترانزستور.



الشكل (5-50) يبين العلاقة بين جهد العتبة ونسبة تشويب الطبقة الفعالة في الترانزستور.



الشكل (5-51) يبين العلاقة بين I_{on}/I_{off} ونسبة تشويب الطبقة الفعالة في الترانزستور.



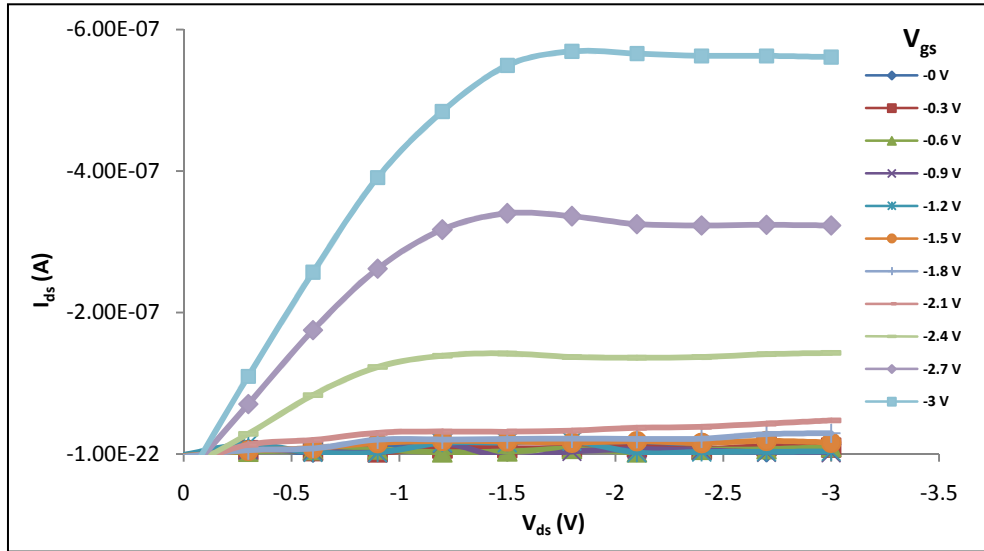
الشكل (5-52) يبين العلاقة بين مقاومة قناة التوصيل ونسبة تشويب الطبقة الفعالة في الترانزستور.

5-5-دراسة تأثير تشويب الطبقة العازلة PVA بـ CNP على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

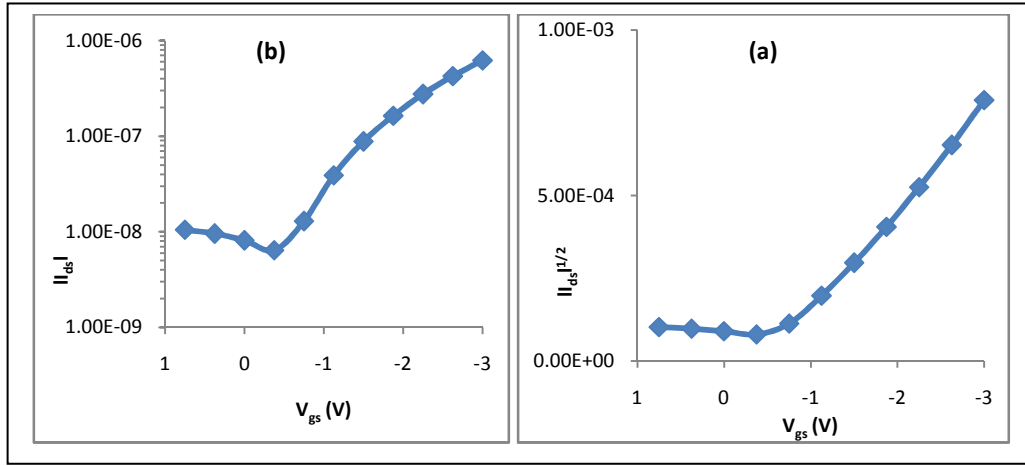
تم تصنيع الترانزستورات بتشويب طبقة عازل البوابة بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) بـ CNPs ، وأُعدت مواصفات التصنيع من ناحية أبعاد قناة التوصيل ($W=1\text{mm}$, $L=60\mu\text{m}$) وسمك كل من طبقة عازل البوابة المشوبة (2000 rpm) والطبقة الفعالة النقية ($\approx 203\text{ nm}$)، ويوضح الجدول (5-5) أرقام الترانزستورات المصنعة مقابل نسبة التشويب بـ CNPs.

يبين الشكل (5-53) نتائج قياس ميزتي الخرج عند قيم مختلفة لفولتية البوابة (0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, -1.5, -1.8, -2.1, -2.4, 2.7, 3V) للترانزستور ذات التركيب $\text{Al}/(\text{PVA}+\%\text{CNPs})/\text{P3HT}/\text{Au}$ ، والذي رسبت فيها الطبقة الفعالة نقية بسرعة دوران ثابتة ($\approx 203\text{ nm}$)، والطبقة العازلة مشوبة بنسبة 1% من CNPs. ويتضح من الشكل ان قيم تيار القناة (I_{ds}) تزداد بزيادة جهد المصدر-المصرف المسلط وعند مختلف قيم فولتية البوابة المسلطة، وعند الإشباع تثبت قيم تيار القناة مع زيادة جهد المصدر-المصرف المسلط لجميع قيم جهد البوابة المسلط.

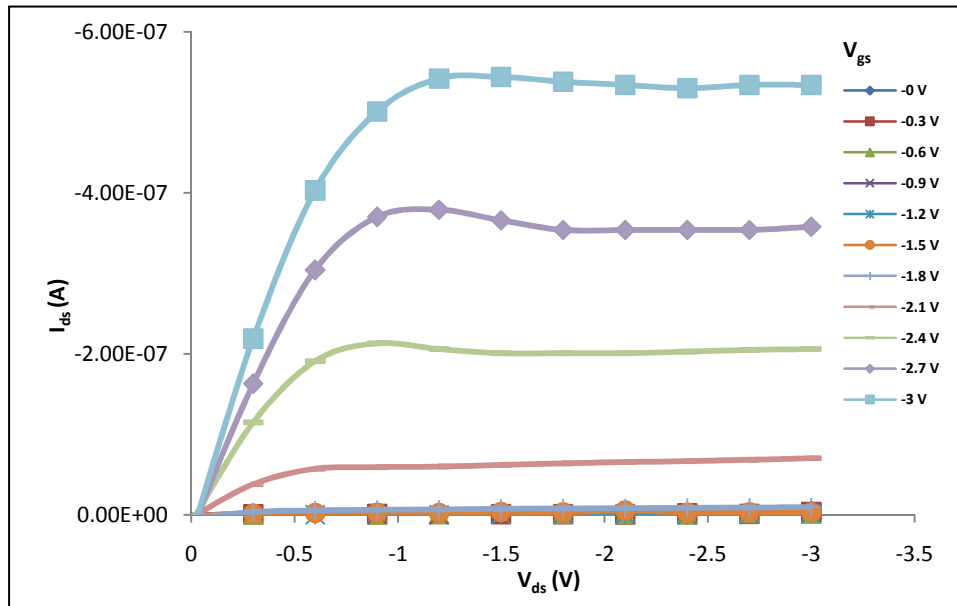
والتي يتضح منها أن زيادة نسبة التشويب للطبقة العازلة في تركيب الترانزستور لها تأثير كبير على الخواص الكهربائية لهذه النبائط، كما يتضح ان للأشكال (5-53)-(5-62) لميزتي الخرج والتحويل لها سلوكاً مشابهاً تماماً للأشكال (5-1)-(5-10) والتي تمت مناقشتها سابقاً، كما ان هذا السلوك مشابه لدراسات سابقة. [379-380]



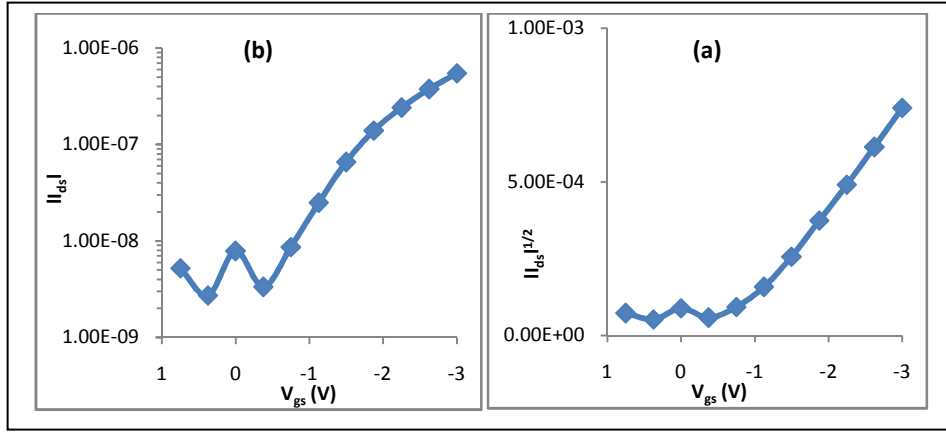
الشكل (5-53) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات عازل البوابة المشوبة بـ 1% CNPs.



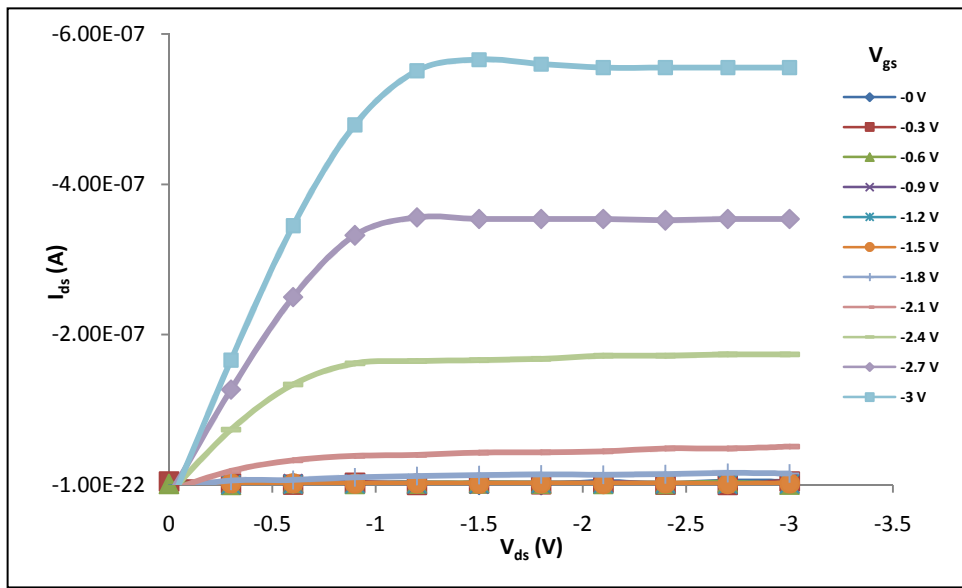
الشكل (5-54) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات عازل البوابة المشوبة بـ 1% CNPs عند $(V_{ds} = -1.5V)$.



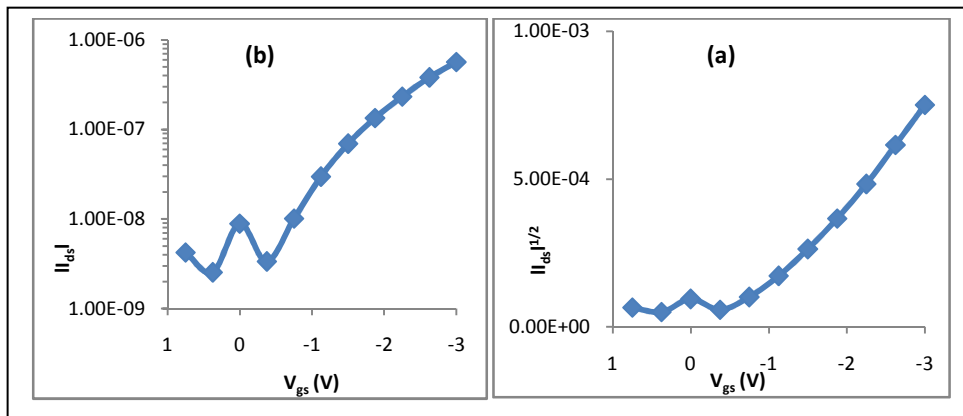
الشكل (5-55) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات عازل البوابة المشوبة بـ 2% CNPs.



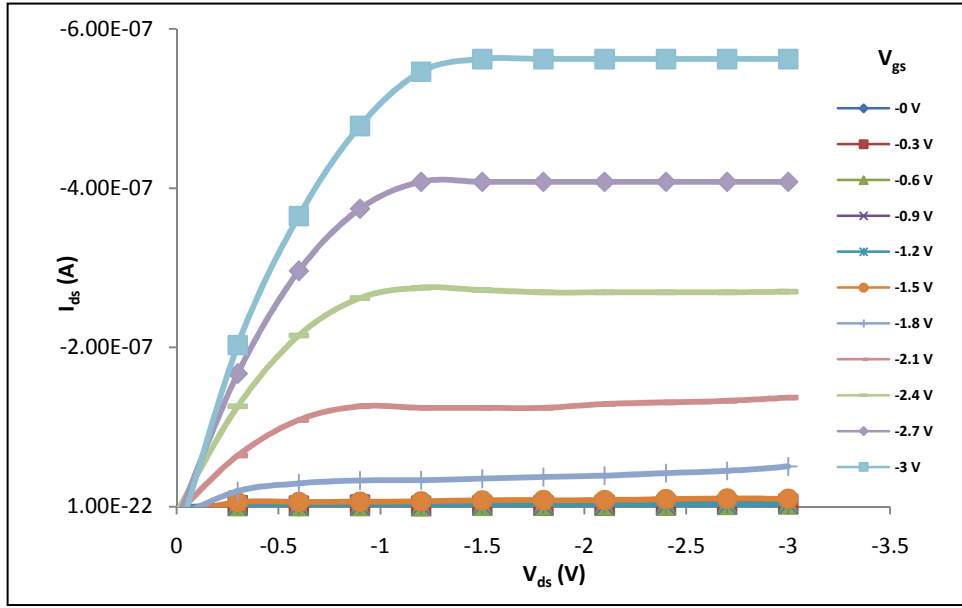
الشكل (5-56) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات عازل البوابة المشوبة بـ 2%CNPs عند ($V_{ds} = -1.2$).



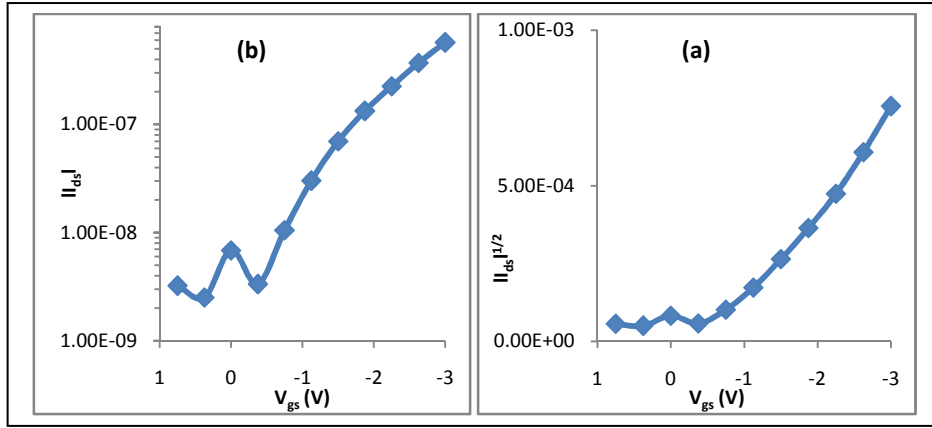
الشكل (5-57) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات عازل البوابة المشوبة بـ 3%CNPs.



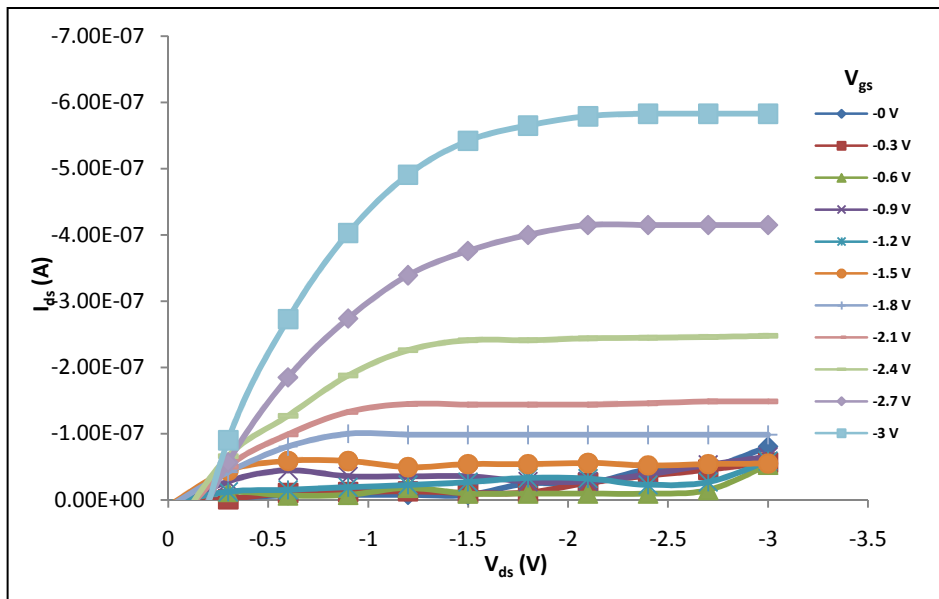
الشكل (5-58) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات القناة المشوبة بـ 3%CNPs عند ($V_{ds} = -1.2V$).



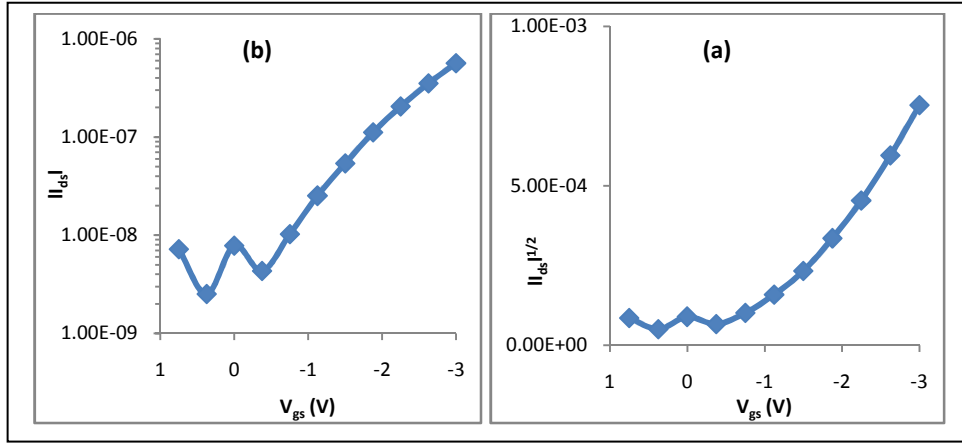
الشكل (5-59) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات عازل البوابة المشوب بـ 4%CNPs.



الشكل (5-60) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات عازل البوابة المشوب بـ 4%CNPs عند $(V_{ds} = -1.2$ V).



الشكل (5-61) يبين ميزة الخرج للترانزستور ذات عازل البوابة المشوب بـ 5%CNPs.



الشكل (5-62) يبين ميزة التحويل للترانزستور ذات عازل البوابة المشوب بـ 5% CNPs عند $(V_{ds} = -1.5)$.

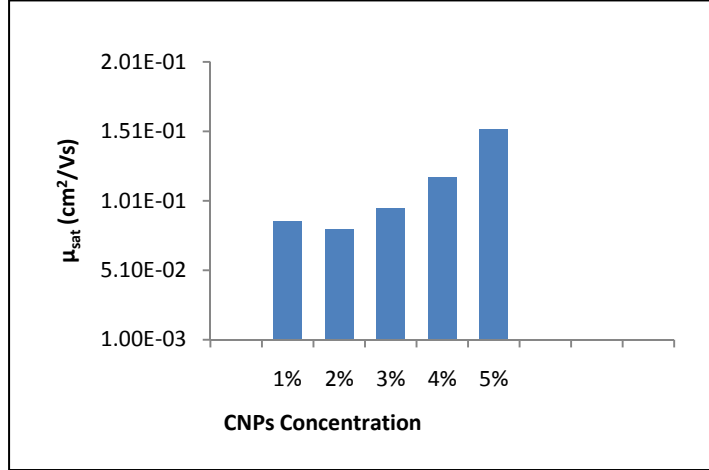
تم حساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، وبالأستفادة من العلاقات الخاصة بها والمشار إليها بالفقرة (5-1). فقد تم حساب تحركية حاملات الشحنة ومقاومة قناة التوصيل وكذلك حسبت النسبة بين تيار التشغيل الى تيار الإطفاء ووجد جهد العتبة مباشرة من ميزات التحويل للترانزستورات، ويبين الجدول (5-5) والأشكال من (5-63) الى (5-66) النتائج المستحصلة لهذه المعاملات.

يلاحظ من الجدول (5-5) والأشكال من (5-63) الى (5-66) ان تشويب طبقة عازل البوابة بدقائق الكربون النانوية بصورة عامة تقود الى زيادة في مقاومة الترانزستور وارتفاع في جهد العتبة وزيادة في نسبة تيارات الترانزستور، كون عملية التشويب بال دقائق النانوية للبوليمر PVA تزيد من مقاومته وقوة مجال الانهيار عدة أضعاف وكذلك توفر الحشوات إمكانية السيطرة على المصادد العميقة في الغشاء في التراكيز الواطئة، والتي ترتبط بالخواص الجزيئية مثل الألفة الالكترونية وطاقة التأين مما يساهم في زيادة الاستقرار للنبيطة. وكذلك ان تأثير التشويب في زيادة ثابت العزل كما ورد في الفصل الرابع، لها تأثير في زيادة التحركية وقد تعزى هذه الزيادة في التحركية الى اسباب تصنيعية مثل طول زمن عمر المحلول او مؤثرات البيئة المحيطة. [381-382]

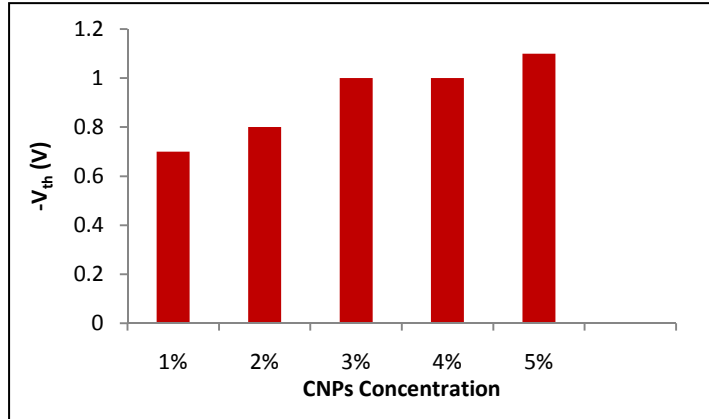
ويتضح من الشكل (5-63) ان الترانزستور T23 ذات طبقة عازل البوابة المشوبة بدقائق اسود الكربون بنسبة 5% يمتلك التحركية الأعلى بين بقية التراكيز.

الجدول (5-5) يبين معاملات الترانزستورات المصنعة بتشويب الطبقة العازلة.

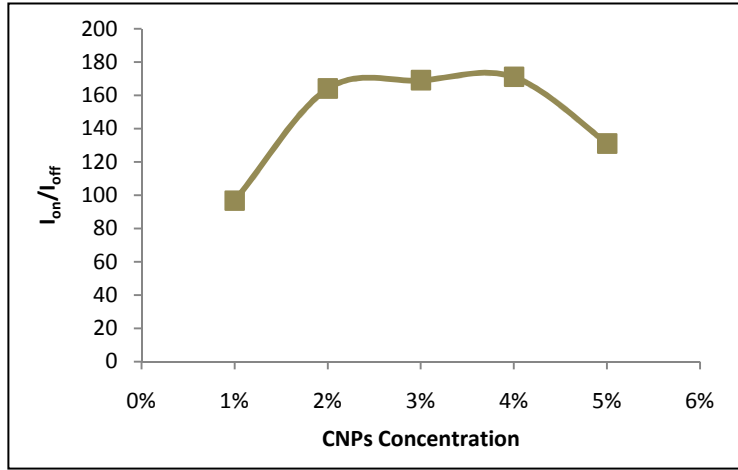
Device	PVA + CNPs%	μ_{sat} (cm ² /Vs)	V_{th} (V)	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	R_{ch} (Ω)
T19	1%	8.64×10^{-2}	-0.7	96.7	3.59×10^6
T20	2%	8.07×10^{-2}	-0.8	164	8.08×10^6
T21	3%	9.61×10^{-2}	-1	169	1.44×10^7
T22	4%	1.18×10^{-1}	-1	171	1.21×10^7
T23	5%	1.53×10^{-1}	-1.1	131	5.28×10^6



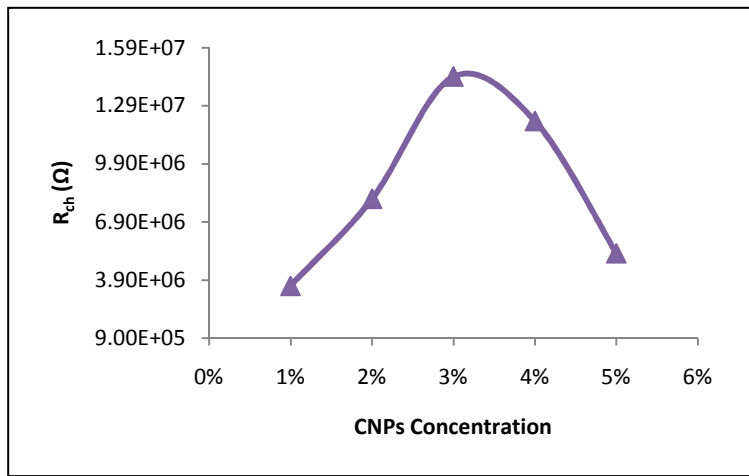
الشكل (5-63) يبين العلاقة بين التكرية ونسبة تشويب الطبقة العازلة في الترانزستور.



الشكل (5-64) يبين العلاقة بين جهد العتبة ونسبة تشويب الطبقة العازلة في الترانزستور.



الشكل (5-65) يبين العلاقة بين I_{on}/I_{off} ونسبة تشويب الطبقة العازلة في الترانزستور.



الشكل (5-66) يبين العلاقة بين مقاومة القناة ونسبة تشويب الطبقة العازلة في الترانزستور.

6-5-دراسة تأثير تشويب كل من الطبقة الفعالة والعازلة بـ CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

تم تصنيع الترانزستورات بتشويب كلا من الطبقتين الفعالة وعازل البوابة بشكل مشترك وبنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) من دقائق الكربون النانوية، وأُعدمت مواصفات التصنيع من ناحية أبعاد قناة التوصيل ($W=1 \text{ mm}$, $L=60 \text{ } \mu\text{m}$)، وتم ترسيب طبقة عازل البوابة المشوبة بسرعة دوران (2000 rpm)، ورسبت الطبقة الفعالة المشوبة بسمك ($\approx 203 \text{ nm}$). فيما يلي نستعرض النتائج التي تم الحصول عليها لنسب تشويب طبقة عازل البوابة والطبقة الفعالة بالنسب المختلفة. وأظهرت نتائج التشويب المشترك لكلا الطبقتين سلوكيات مشابهة تقريبا لتشويب الطبقة الفعالة مع اختلاف القيم بتأثير تغير سعة متسعة الطبقة العازلة للبوابة. ان التشويب المشترك لكلا الطبقتين الفعالة والعازلة هو تغيير لصفات الاغشية من الناحية التوصيلية والعازلية والتشكيلية.

5-6-1- تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 1% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

عند نسبة ثابتة من تشويب الطبقة العازلة (PVA+1%CNPs) ونسب مختلفة من التشويب للطبقة الفعالة P3HT، ويبين الجدول (5-6) النتائج المستحصلة لحساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، ويتضح منها ان النموذج T28 عند (P3HT+5%CNPs) هو الأفضل في هذه المرحلة.

الجدول (5-6) يبين النتائج المستحصلة عند تشويب P3HT بنسب مختلفة و PVA;1%CNPs.

Device No.	T24	T25	T26	T27	T28
P3HT:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
μ_{sat} (cm ² /Vs)	6.63x10 ⁻²	9.58x10 ⁻²	1.03x10 ⁻¹	1.21x10 ⁻¹	1.49x10 ⁻¹
V _{th} (V)	-0.9	-0.8	-0.9	-1	-1.1
I _{on} /I _{off}	93.5	140	73.6	187	166
R _{ch} (Ω)	1.25x10 ⁷	2.16x10 ⁶	2.67x10 ⁶	2.57x10 ⁶	2.37x10 ⁶
Pinch P. (V)	-1.2	-2	-1.8	-1.8	-1.8

5-6-2- تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 2% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

عند نسبة ثابتة من تشويب الطبقة العازلة (PVA;2%CNPs) ونسب مختلفة من التشويب للطبقة الفعالة P3HT، ويبين الجدول (5-7) النتائج المستحصلة لحساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، ويتضح منها ان النموذج T33 عند (P3HT+5%CNPs) هو الأفضل في هذه المرحلة.

الجدول (5-7) يبين النتائج المستحصلة عند تشويب P3HT بنسب مختلفة و PVA;2%CNPs.

Device No.	T29	T30	T31	T32	T33
P3HT:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
μ_{sat} (cm ² /Vs)	1.05x10 ⁻¹	1.41x10 ⁻¹	1.43x10 ⁻¹	1.34x10 ⁻¹	2.46x10 ⁻¹
V _{th} (V)	-1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.4
I _{on} /I _{off}	135	113	122	101	116
R _{ch} (Ω)	3.11x10 ⁶	2.05x10 ⁶	2.28x10 ⁶	2.44x10 ⁶	1.77x10 ⁶
Pinch P. (V)	-1.8	-2	-2	-2	-1.8

5-6-3- تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 3% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

عند نسبة ثابتة من تشويب الطبقة العازلة (PVA;3%CNPs) ونسب مختلفة من التشويب للطبقة الفعالة P3HT، ويبين الجدول (5-8) النتائج المستحصلة لحساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، ويتضح منها ان النموذج T38 عند (P3HT+5%CNPs) هو الأفضل في هذه المرحلة.

الجدول (5-8) يبين النتائج المستحصلة عند تشويب P3HT بنسب مختلفة و PVA;3%CNPs.

Device No.	T34	T35	T36	T37	T38
P3HT:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
$\mu_{\text{sat}} (\text{cm}^2/\text{Vs})$	1.18×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.56×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.82×10^{-1}
$V_{\text{th}} (\text{V})$	-1.15	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	85	142	155	627	449
$R_{\text{ch}} (\Omega)$	7.6×10^6	4.53×10^6	2.95×10^6	3.08×10^6	3.66×10^6
Pinch P. (V)	-1.5	-1.6	-1.8	-2	-1.8

5-6-4- تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 4% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

عند نسبة ثابتة من تشويب الطبقة العازلة (PVA;4%CNPs) ونسب مختلفة من التشويب للطبقة الفعالة P3HT، ويبين الجدول (5-9) النتائج المستحصلة لحساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، ويتضح منها ان النموذج T43 عند (P3HT+5%CNPs) هو الأفضل في هذه المرحلة.

الجدول (5-9) يبين النتائج المستحصلة عند تشويب P3HT بنسب مختلفة و PVA;4%CNPs.

Device No.	T39	T40	T41	T42	T43
P3HT:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
$\mu_{\text{sat}} (\text{cm}^2/\text{Vs})$	9.97×10^{-2}	1.31×10^{-1}	1.26×10^{-1}	1.46×10^{-1}	1.55×10^{-1}
$V_{\text{th}} (\text{V})$	-1.1	-1.2	-1.25	-1.3	-1.35
$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	77.2	169	68.7	137	112
$R_{\text{ch}} (\Omega)$	5.76×10^6	5.46×10^6	9.12×10^6	6.53×10^6	7.42×10^6
Pinch P. (V)	-1.6	-1.6	-1.5	-1.6	-1.6

5-6-5- تأثير تشويب عازل البوابة بنسبة 5% وتشويب الطبقة الفعالة بنسب مختلفة من CNPs على خصائص ترانزستور تأثير المجال العضوي:

عند نسبة ثابتة من تشويب الطبقة العازلة (PVA;5%CNPs) ونسب مختلفة من التشويب للطبقة الفعالة P3HT، يبين الجدول (5-10) النتائج المستحصلة لحساب المعاملات الكهربائية الرئيسية للترانزستورات المصنعة من ميزة التحويل الخاصة بكل منها، ويتضح منها ان النموذج T47 عند (P3HT+4%CNPs) هو الأفضل في هذه المرحلة.

الجدول (5-10) يبين النتائج المستحصلة عند تشويب P3HT بنسب مختلفة و PVA;5%CNPs.

Device No.	T44	T45	T46	T47	T48
P3HT:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
μ_{sat} (cm ² /Vs)	1.17x10 ⁻¹	1.31x10 ⁻¹	1.22x10 ⁻¹	1.6x10⁻¹	1.17x10 ⁻¹
V _{th} (V)	-1.2	-1.2	-0.9	-1.2	-1.2
I _{on} /I _{off}	64.6	57.1	85.2	67.8	82.5
R _{ch} (Ω)	9.2x10 ⁶	8.22x10 ⁶	5.3x10 ⁶	6.72x10⁶	9.18x10 ⁶
Pinch P. (V)	-1.5	-1.5	-1.4	-1.5	-1.5

يبين الجدول (5-11) المعاملات الكهربائية للترانزستورات الأفضل المحضرة بتشويب الطبقة الفعالة والطبقة العازلة بشكل مشترك.

الجدول (5-11) يبين المعاملات الكهربائية للترانزستورات الأفضل المحضرة بتشويب الطبقة الفعالة والطبقة العازلة بشكل مشترك.

PVA:CNPs	1%	2%	3%	4%	5%
P3HT:CNPs	5%	5%	5%	5%	4%
μ_{sat} (cm ² /Vs)	1.49x10 ⁻¹	2.46x10⁻¹	1.82x10 ⁻¹	1.55x10 ⁻¹	1.6x10 ⁻¹
V _{th} (V)	-1.1	-1.4	-1.4	-1.35	-1.2
I _{on} /I _{off}	166	116	449	112	67.8
R _{ch} (Ω)	2.37x10 ⁶	1.77x10⁶	3.66x10 ⁶	7.42x10 ⁶	6.72x10 ⁶
Pinch P. (V)	-1.8	-1.8	-1.8	-1.6	-1.5

يتضح من المقارنة بيت نتائج التشويب المشترك لكلا الطبقتين الفعالة والعازلة للبوابة والمشوبة بنسب دقائق اسود الكربون المختلفة، ان الترانزستور T33 والذي يمتلك طبقة فعالة مشوبة بنسبة 5% وطبقة عازل بوابة مشوبة بنسبة 2% بدقائق اسود الكربون النانوية، هو الترانزستور الذي يمتلك الخصائص الأفضل من ناحية التحركية ($2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)، وهي التحركية الأعلى على مستوى جميع الترانزستورات المصنعة في هذه الدراسة. ويمتلك أيضا المعاملات الآتية:

$$(V_{th}=-1.4 \text{ V}, I_{on}/I_{off}=116, R_{ch}=1.77 \text{ M}\Omega)$$

الفصل السادس

الاستنتاجات والدراسات المستقبلية

6-1-الاستنتاجات:

وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها من دراستنا الحالية، فإن هناك العديد من الاستنتاجات التي يمكن إدراجها في النقاط التالية:

1- إن نوع القاعدة وعملية تشويب البوليمر PVA بدقائق الكربون النانوية (CNPs) بنسبتين مختلفتين (5%, 1%) تؤثر على الصفات التركيبية للأغشية الرقيقة المصنعة، إذ تزيد من الحجوم البلورية للبلورات المتشكلة، وتشكل في الحالات النقية والمشوبة أغشية شبه بلورية، وذلك حسب نتائج فحوصات XRD.

2- إن عملية تشويب البوليمر P3HT بـ CNPs بنسبتين مختلفتين (5%, 1%) تؤثر على الصفات التركيبية للأغشية الرقيقة المصنعة، إذ تقلل من الحجوم البلورية وتزيد من عدد البلورات المتشكلة وتعيد انتشار البلورات المتشكلة، وتشكل في الحالات النقية والمشوبة أغشية شبه بلورية، ويقل كل من خشونة السطح و R_q عند نسبة المضاف 1% وتزداد عند النسبة 5% من CNPs، وذلك حسب نتائج فحوصات AFM.

3- يقل سمك الأغشية الرقيقة للبوليمرات المحضرة بزيادة سرعة الدوران عند زمن دوران ثابت قدره (1 min.) باستخدام طريقة الطلاء بالبرم لتحضير الأغشية النقية والمشوبة بالنسب المختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5% من CNPs). وإن عملية التشويب تقود إلى زيادة قليلة جدا في سمك الأغشية الرقيقة، وذلك بإتباع الإجراءات العملية نفسها بطريقة الترسيب بالبرم من سرعة وزمن الدوران ومعالجة التلدين الحراري ونسبة التشويب.

4- أوضحت دراسة الخواص البصرية للبوليمر P3HT تأثير زيادة كل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5% من CNPs) في زيادة الامتصاصية وتقليل النفاذية، ويزداد هذا التأثير بزيادة كل من سمك الغشاء ونسبة المضاف CNPs. ويعمل التشويب على تقليص فجوة الطاقة البصرية بين (1.96-1.92eV).

5- أوضحت دراسة الخواص الكهربائية للبوليمر P3HT تأثير كل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5% من CNPs) ودرجة الحرارة (30-70°C) في زيادة التوصيلية الكهربائية (5.15×10^{-5} - 7.58×10^{-4} S/cm) وتقليل طاقة التنشيط للأغشية الرقيقة المحضرة بين (0.46-0.0872eV)، ويزداد هذا التأثير بتقليل سمك الغشاء وزيادة كل من درجة الحرارة ونسبة المضاف CNPs.

6- بينت دراسة الخواص العازلية للبوليمر PVA زيادة ثابت العزل الكهربائي لأغشية MIM المحضرة بالتركيب $Al/(PVA+CNP\%) / Al$ عند تشويبه بـ CNPs وبالنسب المختلفة بين (9.6-10.45)، ويزداد هذا التأثير بزيادة نسبة المضاف CNPs. كما إن هناك تأثيراً لكل من سمك الغشاء الرقيق المحضر والتشويب بـ CNPs ودرجة الحرارة على سعة المتسعة الكهربائية المصنعة بالتركيب $Al/(PVA+CNP\%) / Au$ ، ويزداد هذا التأثير بتغيير كل من هذه المؤثرات.

7- كما أظهرت دراسة الخواص العازلية للتركيب معدن-عازل-شبه موصل (MIS) طبيعة تأثير تغيير التردد من خلال ميزة (C_i-F) وكذلك تأثير تغيير الجهد المسلط من خلال ميزة (C_i-V) على السعة الكهربائية لوحدة المساحة للتركيب $(Al/PVA/P3HT/Au)$. بينت دراسة ميزة $(C-F)$ انخفاض C_i مع التردد في الترددات العالية، وأوضحت دراسة ميزة (C_i-V) في الترددات الواطئة والعالية قابلية البوليمرين على تشكيل السطوح التي تمكن من تصنيع OFET منها.

8- أظهرت دراسة تأثير طول قناة التوصيل بين $(40-120\mu m)$ في ترانزستور تأثير المجال $(PVA/P3HT-OFET)$ المصنع مخبرياً (بعد تصنيع جميع الادوات والأقنعة اللازمة مخبرياً) بالتركيب TG-BC ان الترانزستورات هي من النوع التجميعي. ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان طول قناة التوصيل يساوي $60\mu m$ ، لان تقليص طول قناة التوصيل يؤدي الى تقليل مقاومتها وبالتالي زيادة كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وزيادة جهد العتبة، فيما اظهر طول القناة $40\mu m$ تأثير القناة القصيرة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{sat}=5.43 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{th}=-23 \text{ V}), (I_{on}/I_{off}=447), (R_{ch}=1.05 \text{ M } \Omega)$$

9- أظهرت دراسة تأثير سمك الطبقة الفعالة (P3HT) من خلال تغيير سرعة الدوران بترسيب الغشاء بطريقة الطلاء بالبرم بين $(177-334 \text{ nm})$ في ترانزستور تأثير المجال $(PVA/P3HT-OFET)$ المصنع مخبرياً بالتركيب TG-BC. ان الترانزستورات المصنعة هي من النوع التجميعي. ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان سمك الطبقة الفعالة يساوي 203 nm . وان تقليل سمك الطبقة الفعالة يؤدي الى تقليل مقاومة قناة التوصيل وبالتالي زيادة كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وتقليل جهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{sat}=5.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{th}=-23 \text{ V}), (I_{on}/I_{off}=753), (R_{ch}=1 \text{ M } \Omega)$$

10- أظهرت دراسة تأثير سمك طبقة عازل البوابة PVA بدلالة تغيير سرعة الدوران في المدى (1000-3000rpm) في ترانزستور تأثير المجال (PVA/P3HT-OFET) المصنع مختبرياً بالتركيب TG-BC ان الترانزستورات هي من النوع التجميعي، ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في هذا السياق عندما كان سمك الطبقة الفعالة المقابل الى 2000 rpm. بينت الدراسة ان تقليل سمك طبقة عازل البوابة يقود الى الانتقال من الترانزستورات التي تعمل في الجهد العالي الى ترانزستورات الجهد المنخفض، ويؤدي بصورة عامة الى زيادة ونقصان مقاومة قناة التوصيل وزيادة تحركية حاملات الشحنة وتقليل جهد العتبة للترانزستور. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.16 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-0.9 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=477), (R_{\text{ch}}=1.96 \text{ M}\Omega)$$

11- أظهرت دراسة تأثير تشويب الطبقة الفعالة P3HT بدقائق اسود الكربون النانوية CNPs بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) في ترانزستور تأثير المجال (PVA/(P3HT+%CNPs)-OFET) المصنع مختبرياً بالتركيب TG-BC ان الترانزستورات هي من النوع التجميعي، وان عملية التشويب تقود الى تقليل مقاومة قناة التوصيل وبالتالي تغيير كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.41 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-1.2 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=199), (R_{\text{ch}}=2.82 \text{ M}\Omega)$$

12- أظهرت دراسة تأثير تشويب طبقة عازل البوابة PVA بدقائق اسود الكربون النانوية CNPs بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) في ترانزستور تأثير المجال ((PVA+%CNPs)/P3HT-OFET) المصنع مختبرياً بالتركيب TG-BC ان الترانزستورات هي من النوع التجميعي، وان عملية التشويب تقود الى زيادة مقاومة قناة التوصيل وتغير كل من تيار القناة وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة. وكانت المعاملات الكهربائية لأفضل نموذج ترانزستور تأثير المجال العضوي المحضرة في هذه المرحلة كالآتي:

$$(\mu_{\text{sat}}=1.53 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{\text{th}}=-1.1 \text{ V}), (I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=131), (R_{\text{ch}}=5.28 \text{ M}\Omega)$$

13- أظهرت دراسة تأثير تشويب كل من الطبقة الفعالة P3HT وطبقة عازل البوابة PVA بدقائق اسود الكربون النانوية CNPs بشكل مشترك بنسب مختلفة (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) في ترانزستور تأثير المجال ((PVA+%CNPs)/P3HT-OFET) المصنع مختبرياً بالتركيب TG-BC ان الترانزستورات هي من النوع التجميعي، وان عملية التشويب تقود الى تغيير كل المعاملات

الكهربائية للبيئة مقاومة قناة التوصيل وتحركية حاملات الشحنة وجهد العتبة.حيث كان الترانزستور (PVA+2%CNPs)/(P3HT+5%CNPs)-OFET هو الترانزستور الذي يمتلك المعاملات الآتية:

$$(\mu=2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}), (V_{th}=-1.4 \text{ V}), (I_{on}/I_{off}=116), (R_{ch}=1.77 \text{ M}\Omega)$$

14- من خلال مقارنة مجمل نتائج دراسة ترانزستورات تأثير المجال العضوية المحضرة بالتركيب (PVA/(P3HT)-OFET، وجد ان أفضل ترانزستور تم الحصول عليه في دراستنا هو الترانزستور الذي يمتلك التحركية ($\mu=2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)، وذلك عند تشويب الطبقة الفعالة بالنسبة 5% والطبقة العازلة بالنسبة 2% بدقائق الكربون النانوي، وعند طول قناة التوصيل $60 \mu\text{m}$.

6-2- العمل المستقبلي:

- 1- تصنيع خلية شمسية من البوليمر P3HT المشوب بدقائق الكربون النانوية CNPs ودراسة خصائصها الكهربائية.
- 2- تصنيع متحسسات ضوئية وبايوكيميائية وإشعاعية وحرارية من البوليمر P3HT المشوب بدقائق الكربون النانوية CNPs ودراسة خصائصها الكهربائية.
- 3- دراسة ترانزستور تأثير المجال (PVA/P3HT-OFET) المصنع بالتراكيب الأخرى TG-TC, BG-BC, BG-TC وذلك بتحويل طبقة عازل البوابة الى طبقة متشابكة باستخدام ثنائي كرومات الامونيا (AD) مثلاً، وذلك لتلافي التأثير المتعاود للمذيبات وزيادة صفات العزل الكهربائي لطبقة عازل البوابة.
- 4- استخدام بوليمر عازل آخر كعازل للبوابة مثل PVDF, LDPE, PVC وغيرها في تصنيع ترانزستور تأثير المجال.
- 5- دراسة الهسترة الكهربائية وإمكانية تطبيق PVA/P3HT-OFET في مجال الذاكرة والخزن.
- 6- دراسة تأثير المؤثرات مثل الحرارة والضوء والأشعة المؤينة والغازات والأبخرة الكيميائية على خصائص PVA/P3HT-OFETs الكهربائية ودراسة مدى إمكانية الاستفادة منها كمتحسس لهذه المؤثرات.
- 7- دراسة إمكانية تصنيع ترانزستور ضوئي من الأغشية المحضرة.

المصادر

- 1- S. Kumar and A. Dhar, **Low Operating Voltage N-channel Organic Field Effect Transistors using Photoresist/LiF Bilayer Gate Dielectric**, Procedia Engineering, science direct, 141, 78–82, (2016).
- 2- H. Wang and D. Yan, **Organic heterostructures in organic field-effect transistors**, NPG Asia Mater. 2, 2, 69–78, (2010).
- 3- C. Wang, H. Dong, W. Hu, Y. Liu and D. Zhu, **Semiconducting pi-conjugated Systems inField-Effect Transistors a Material Odyssey of Organic Electronics**, Chem. Rev., Vol. 112, pp. 2208-67, (2012).
- 4- W. L. Leong, P. S. Lee, A. Lohani, Y. M. Lam, T. Chen, S. Zhang, A. Dodabalapur and S.G. Mhaisalkar, **Non-Volatile Organic Memory Applications Enabled by In Situ Synthesis of Gold Nanoparticles in a Self-Assembled Block Copolymer**, Adv. Mater., 20, 2325–2331, (2008).
- 5- M. Stoppa and A. Chiolerio, **Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review**, Sensors, 14, 11957-11992, (2014).
- 6- S. Muench, A. Wild, C. Friebe, B. Häupler, T. Janoschka, and U.S. Schubert, **Polymer-Based Organic Batteries**, Chem. Rev. 116, 9438–9484, (2016).
- 7- B. B. Patowary, **Review : Use of Organic Semiconductor in Gas Sensing**, Inter. J. of Adv. Res. in Elec., Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Issue 5, 9351-9361, (2014)
- 8- C. Yumusak, M. Abbas, N. Sariciftci, **Optical and electrical properties of electrochemically doped organic field effect transistors**, Journal of Luminescence 134, 107–112, (2013).
- 9- F. So, **Organic Electronics Materials, Processing, Devices and Applications**, Taylor & Francis Group, 294-295, (2010).
- 10- C. Di, Gui Yu, Y. Liu, Y. Guo, Y. Wang, W. Wu and Daoben Zhu, **High-Performance Organic Field-Effect Transistors with Low-Cost Copper Electrodes**, Adv. Mater, 20, 1286–1290, (2008).
- 11- G. Horowitz, **Organic Field-Effect Transistors**, Adv. Mater., 10, 5, 365-377, (1998).
- 12- H. Klauk, **Organic Electronics Materials, Manufacturing and Applications**, Wiley-VCH, 367-380, (2006).
- 13- R. A. Henle, **The Application of Transistor Technology-to Computers**, IEEE Transactions on Computers, C-25,12, 1289-1303, (1976).
- 14- W. Lee, J. H. Seo and H. Y. Woo, **Conjugated polyelectrolytes: A new class of semiconducting material for organic electronic devices**, ScienceDirect, Polymer, 54, 5104-5121, (2013).
- 15- A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay and A. Salleo, **Materials and Applications for Large Area Electronics: Solution-Based Approaches**, Chem. Rev., 110, 3–24, (2010).
- 16- T. Sekitani and T. Someya, **Stretchable, Large-area Organic Electronics**, Adv. Mater, 22, 2228–2246, (. 2010).
- 17- W. C. H. Choy, **Organic Solar Cells Materials and Device Physics**, Springer-Verlag, London, 4-9, (2013).

- 18- A. Kohler and H. Bassler, **Electronic Processes in Organic Semiconductors**, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-3, (2015).
- 19- E. von Hauff, J. Parisi and V. Dyakonov, **Field effect measurements on charge carrier mobilities in various polymer-fullerene blend compositions**, Thin Solid Films 511 – 512, 506 – 511, (2006).
- 20- J. Bardeen and W. H. Brattain, **The Transistor, A Semi- Conductor Triode**, Letters, 25, 230, (1948).
- 21- R. E. Allen and S. Lidstrom, **Your Higgs number-how fundamental physics is connected to technology and societal revolutions**, Article in Physica Scripta · February, 1-14, (2015).
- 22- T. Jenkins, **A Brief History of Semiconductors**, Mater., Phys. Educ. IOP, 40, 5, 430, (2005).
- 23- L. Lukasiak and A. Jakubowski, **History of Semiconductors**, J. of Telecom. and Informat. Technol., 1, 3-9, (2010).
- 24- M. Grundmann, **The Physics of Semiconductors An Introduction Including Nanophysics and Applications**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3-11, (2010).
- 25- B. D. Malhotra, **Handbook of Polymers in Electronics**, Rapra Technology Limited, 3-5, (2002).
- 26- D. Kahng, **A Historical Perspective on the Development of MOS Transistors and Related Devices**, IEEE Transactions on Electron Devic., 23, 7, 655, (1976).
- 27- R. K. Willardson Albert C. Beer, **Semiconductors and Semimetals**, Academic Press, Inc., 1-4, (1966).
- 28- C. Li, B. Lei, D. H. Zhang, X. L. Liu, S. Han, T. Tang, M. Rouhanizadeh, T. Hsiai, and C. W. Zhou, **Chemical gating of In₂O₃ nanowires by organic and biomolecules**, Applied Physics Letters, 83, 19, 4014-4016, (2003).
- 29- C.R. Kagan and P. Andry, **Thin-Film Transistor**, IBM T.J. Watson Research Center Yorkto-wn Heights, New York, U. S.A., 3-6, (2003).
- 30- H. E. Katz, **Chemically Sensitive Field-effect Transistors and chemiresis-tors: New Materials and Device Structures**, Electro.analysis, 16, 22, (2004).
- 31- H. Shirakawa, A. MacDiarmid and A. Heeger, **Twenty-five years of conducting polymers**, J. Chem. Soc., Chem. Commun. 578, 1-4, (1977).
- 32- A. J. Heeger, S. Kivelson, J. R. Schrieffer and W. P. Su, **Solitons in conducting polymers**, Rev. Mod. Phys., **60**, 781, (1988).
- 33- T. Takenobu, S.R. Bisri, T. Takahashi, M. Yahiro, C. Adachi, Y. Iwasa, **High Current Density in Light-Emitting Transistors of Organic Single Crystals**, Phys. Rev. Lett., 100, 066601, (2008)
- 34- J. Filo and M. Putala, **Semiconducting Organic Molecular Materials**, Journal of Electrical Engineering, 61, 5, 314–320, (2010).
- 35- W. F. Brinkman, D. E. Haggan, and W. W. Troutman, **A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us**, IEEE J. of Solid-State Circuits, 32, 12, 1858, (1997).

- 36- C. D. Dimitrakopoulos and P. R. L. Malenfant, **Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics**, Adv. Mater. 2002, 14, No. 2, 99-117, (2002).
- 37- A. K. Kavala and A. K. Mukherjee, **Sub-threshold-like charge transport in organic field effect transistor: A study on effective channel thickness**, Modern Physics, Letters B 29 , 1550172 (2015).
- 38- H. Bassler and A. Kohler, **Charge Transport in Organic Semiconductors**, Top Curr Chem 312: 1–66, (2012).
- 39- D. L. Smith, **Electronic Properties of Inorganic and Organic Semiconductors**, MRS BULLETIN, 647-652, (2004).
- 40- M. Kozelj, **Application of Organic Semiconductors for the Detection of Ionizing Radiations**, International Conference Nuclear Energy for New Europe, 306, (2006).
- 41- A. Tsumura, H. Koezuka, and T. Ando, **Macromolecular electronic device: Field effect transistor with a polythiophene thin film**, Appl. Phys. Lett. 49, 1210 (1986).
- 42- K. Patel, **Organic and Molecular Electronics**, Material Matter, 4, 3, 57-85, (2009).
- 43- W. Brutting, **Physics of Organic Semiconductors**, Wiley-VCH, 1-11, (2005).
- 44- A. Swist, J. Soloducho, **Organic semiconductors materials of the future**, CHEMIK, 66, 4, 293-296, (2012).
- 45- Z. V. Vardeny, **Ultrafast Dynamics and Laser Action of Organic Semiconductors**, Taylor & Francis Group, LLC, 2-11, (2009).
- 46- A. R. Frechet, J. M. J. Chang, P. Lee, J. Subramanian and V. J. Am., **Organic Thin Film Transistors from a Soluble Oligothiophene Derivative Containing Thermally Removable Solubilizing Groups**, Chem. Soc., 126, 1596, (2004).
- 47- A. K. Kavala and A. K. Mukherjee, **Sub-threshold-like Charge Transport in Organic Field Effect Transistor: A Study on Effective Channel Thickness**, Modern Physics Letters B, 29, 1550172, (2015).
- 48- S. Anand and V. Gupta, **The Next Generation Electronics devices**, IJSRET, ISSN:2278-0882, 49-52, (2014).
- 49- S. Mühl and B. Beyer, **Bio-Organic Electronics—Overview and Prospects for the Future**, Electronics, 3, 444-461, (2014).
- 50- E. Mark and P. Forrest, **Introduction: Organic Electronics and Optoelectronics**, Chemical Reviews, 107, 4, 923-925, (2007).
- 51- T. B. Singh, N. Marjanovic, P. Stadler, G. J. Matt, S. Gunes, and N. S. Sariciftci, **Fabrication and characterization of solution-processed methan-ofullerene-based organic field-effect transistors**, J. of App. Phy., 97, 083714, (2005).
- 52- R. M. Owens and G. G. Malliaras, **Organic Electronics at the Interface with Biology**, MRS BULLETIN, 35, 449-456, (2010).
- 53- S. Kirchmeyer and K. Hecker, **Organic and Printed Electronics Applications, Technologies and Suppliers**, Organic and Printed Electronics, 11-12, (2013).
- 54- J. M. Shaw and P. F. Seidler, **Organic electronics: Introduction**, IBM J. RES. & DEV., 45, 1, 3-9, (2001).

- 55- M.V. Jacob, **Organic Semiconductors: Past, Present and Future**, Electronics, 3, 594-597 (2014).
- 56- K. F. Brennan and A. S. Brown, **Theory of Modern Electronic Semiconductor Devices**, JOHN WILEY & SONS, INC., 84-90, (2002).
- 57- I. Kymissis, **Organic Field Effect Transistors Theory, Fabrication and Characterization**, Spriger, 1-3, (2008).
- 58- R. F. Pierret, **Semiconductors Device Fundamental**, Addison-Wesely, 525, (1996).
- 59- C.R. Newman, C. D. Frisbie, D. A. d. Filho, J. Bre´das, P. C. Ewbank and . R. Mann, **Introduction to Organic Thin Film Transistors and Design of n-Channel Organic Semiconductors**, Chem. Mater., 16, 4436-4451, (2004).
- 60- M. M. Ling and Z. Bao, **Thin Film Deposition, Patterning, and Printing in Organic Thin Film Transistors**, Chem. Mater, 16, 4824-4840, (2004)
- 61- C. Kim, Y. Bonnassieux and G. Horowitz, **Compact DC Modeling of Organic Field-Effect Transistors: Review and Perspectives**, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, 61, 2, (2014).
- 62- F.Gholamrezaie, K. Asadi, R.A.H.J. Kicken, B.M.W. Langeveld-Voss, D.M. de Leeuw and P.W.M. Blom, **Controlling charge injection by self-assembled monolayers in bottom-gate and top-gate organic field-effect transistors**, Synthetic Metals 161, 2226– 2229, (2011).
- 63- C. Liu, G. Huseynova, Y. Xu, D. Xuan Long, W.Park, X. Liu, T. Minari and Y. Noh, **Universal diffusion-limited injection and the hook effect in organic thin-film transistors**, Scientific Reports, 6,29811, (2016).
- 64- T. Richards and H. Sirringhaus, **Bias-stress induced contact and channel degradation in staggered and coplanar organic field-effect transistors**, Applied Physics Letters, 92, 023512, (2008).
- 65- Y. Xu, R. Gwoziecki, R. Coppard, M. Benwadih, T. Minari, K. Tsukagoshi, J. A. Chroboczek, F. Balestra, and G. Ghibaudo, **Diagnosis of low-frequency noise sources in contact resistance of staggered organic transistors**, App. Phys. Lett., 98, 033505, (2011).
- 66- F. F. Vidor, T. Meyers and U. Hilleringmann, **Flexible Electronics: Integration Processes for Organic and Inorganic Semiconductor-Based Thin-Film Transistors**, Electronics, 4, 480-508, (2015).
- 67- D. Natali and M. Caironi, **Charge Injection in Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors: Physics, Models and Characterization Methods**, Adv. Mater., 24, 1357–1387, (2012).
- 68- M. M. Said, Y. Zhang, R. R. Dasari, D. H. Anjum, R. Munir, H. Hu, A. Amassian, S. Barlow and S. R. Marder, **Ultra-low p-doping of poly(3-hexylthiophene) and its impact on polymer aggregation and photovoltaic performance**, Org. Photonics Photovolt., 4:1–16, (2016).
- 69- A. L. Briseno, M. Roberts, M.Ling, H. Moon, E. J. Nemanick and Z. Bao, **Patterning Organic Semiconductors Using “Dry” Poly(dimethylsiloxane)**

- Elastomeric Stamps for Thin Film Transistors**, J. AM. CHEM. SOC., 128, 3880-3881, (2006).
- 70- Z. Bao and J. Locklin, **Organic Field-Effect Transistors**, Taylor and Francis Group, 38-46, (2017).
- 71- S. Janietz, D. Sainova and U. Asawapirom, **Development of Active Functional Polymers for p- and n-type OFET-Applications**, 5th Inter. Conf. on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics- Polytronic, 72-77, (2005).
- 72- C. D. Dimitrakopoulos and D. J. Masearo, **Organic thin-film transistors: A review of recent advances**, IBM J. RES. & DEV. , 45 , 1, 11-27 ,(2001)
- 73- Y. H. Lee, M. Jang, M. Y. Lee, O. Y. Kwon and J. H. Oh, **Flexible Field-Effect Transistor-Type Sensors Based on Conjugated Molecules**, Chem ,3, 724–763, (2017).
- 74- J. Zaumseil and H. Sirringhaus, **Electron and Ambipolar Transport in Organic Field-Effect Transistors**, Chem. Rev., 107, 1296-1323, (2007).
- 75- C. Reese, M. Roberts, M. Ling and Z. Bao, **Organic Thin Film Transistors**, Elsevier Ltd, 20-27,(2004).
- 76- H. E. Katz and J. Huang, **Thin-Film Organic Electronic Devices**, Annu. Rev. Mater. Res., 39, 71–92, (2009).
- 77- B. M. Dhar, R. Ozgun, T. Dawidczyk, A. Andreou and H. E. Katz, **Threshold voltage shifting for memory and tuning in printed transistor circuits**, Materials Science and Engineering R, 72, 49–80, (2011).
- 78- K. Baeg, D. Khim, S. Jung, J. B. Koo, I. You, Y. Nah, D. Kim, and Y. Noh, **Polymer Dielectrics and Orthogonal Solvent Effects for High-Performance Inkjet-Printed Top-Gated P-Channel Polymer Field-Effect Transistors**, ETRI Journal, 33, 6, 887, (2011).
- 79- C.R. Kagan and P. Andry, **Thin-Film Transistor-Organic Transistors: Materials, Patterning Techniques and Applications**, IBM T.J. Watson Research Center Yorktown Heights, New York, U. S.A., 8, (2003).
- 80- V.Sundar, J. Zaumseil, V. Podzorov, E. Menard, R. Willett, T. Someya, M.E. Gershenson, J. Rogers, **Elastomeric Transistor Stamps: Reversible Probing of Charge Transport in Organic Crystals**, Science. 303, 1644-1646,(2004).
- 81- B. Singh, N. Marjanović and N. S. Saricić, **Electrical Characteristics of Metal-insulator-semiconductor Diodes and Transistors with Space Charge Electret Insulators: Towards Nonvolatile Organic Memories**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , 13, 5, 1070-1078, (2006).
- 82- P. Yadav, C. Chanmal, A. Basu, L. Mandal, J. Jog and S.Ogale, **Catalyst free novel synthesis of graphene and its application in high current O-FET and phototransistor based on P3HT / G composite**, The Royal Society of Chemistry-RSC Adv., 1, (2013).
- 83- M. Ichikawa, H. Yangi, Y. Shimizu, S. Hotta, N. Suganuma, T. Koyama and Y. Taniguchi, **Organic Field-Effect Transistors made of Epitaxially Grown Crystals of a Thiophene/Phenylene Co-Oligomer**, Adv. Mater. 14, 1272–1275, (2002).

- 84- H. Koezuka, A. Tsumura and T. Ando, **Field Effect Transistor with Polythiophene Thin Film**, Synthetic Materials, 18, 699-704, (1987).
- 85- A. Assadi, C. Svensson, M. Willander, and O. Inganas, **Field effect mobility of poly(3hexylthiophene)**, Applied Physics Letters 53, 195 (1988).
- 86- F. Garnier, G. Horowitz, V.S. Yvette and D. Fichou, **Thin-Layer Field-Effect Transistors With MIS Structure Whose Insulator And Semiconductor Are Made Of Organic Materials**, United States Patent, USOO5347 144A, (1994).
- 87- G. Xu, Z. Bao and J. T. Groves, **Langmuir-Blodgett Films of Regioregular Poly(3-hexylthiophene) as Field-Effect Transistors**, American Chemical Society, 16, 4, 1834, (2000).
- 88- R. Schroeder, L. A. Majewski, and M. Grell, **Improving organic transistor performance with Schottky contacts**, APP. PHYS. LETT., 84, 6, 1004, (2004).
- 89- S. H. Kim, W. M. Yun, O. Kwon, K. Hong, C. Yang, W. Choi and C. E. Park, **Hysteresis behavior of low-voltage organic field-effect transistors employing high dielectric constant polymer gate dielectrics**, J. Phys. D: Appl. Phys. 43, 465102, 8, (2010).
- 90- B. Yoo, T. Jung, D. Basu, A. Dodabalapur, B. A. Jones and A. Facchetti, **High-mobility bottom-contact n-channel organic transistors and their use in complementary ring oscillators**, App. Phys. Let., 88, 082104, (2006)
- 91- A. Wang, I. Kyymissis, V. Bulovic and A. I. Akinwande, **Engineering Density of Semiconductor-Dielectric Interface States to Modulate Threshold Voltage in OFETs**, IEEE Transactions on Electron Devices, 53, 1, 9-13, (2006).
- 92- I. Mejia, M. Estrada, A. Cerdeira and B. Iniguez, **Reversible Electrical Characteristics in PMMA on P3HT OTFTs**, ECS Transactions, 9, 1, 383-388, (2007).
- 93- Y. Noh and H. Sirringhaus, **Ultra-thin polymer gate dielectrics for top-gate polymer field-effect transistors**, Organic Electronics 10, 174-180, (2009).
- 94- Y. Kunugi, Y. Yyamada, H. Horiuchi, H. Hiratsuka and J. Ohshia, **OFET Characterstics of Stretched Poly(3-hexylthiophene) Films**, Electrochemistry, 78, 3, 191, (2010).
- 95- K. Baeg, D. Khim, D. Kim , J. B. Koo, I. You, W. S. Choi and Y. Noh, **High mobility top-gated poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors with high work-function Pt electrodes**, Thin Solid Films, 518 , 4024-4029 , (2010).
- 96- A. Klug, K. Schmoltner and E. J. W. List, **Organic field-effect transistors applicable for gas and ion detection**, Org. Semicond. in Sens. and Bioelectron. III, Proc. of Spie, 77790G, (2010).
- 97- W. Ou-Yang, M. Weis, T. Manaka and M. Iwamoto, **Effects of an Interface Monolayer with Downward Dipole Orientation on Pentacene Organic Field-Effect Transistors**, Sci. Direct, Physics Procedia 14, 198-203, (2011).
- 98- M. Reyes-Reyes, D. L. Carroll, W. Blau and R. Lopez-Sandoval, **Materials and Devices for Organic Electronics**, J. of Nanotech., Article ID 589241, 2, (2011).

- 99- C. Lin, C. Hsu, I. Chen, C. Lee and W. Wu, **Enhancement of carrier mobility in all-inkjet-printed organic thin-film transistors using a blend of poly(3-hexylthiophene) and CNPs**, Thin Solid Films 519, 8008-8012, (2011).
- 100- J. Huang, D.R. Hines, B.J. Jung, M.S. Brongseest, A. Tunnell, V. Ballarotto, H.E. Katz, E. D. Williams and J. Cumings, **Polymeric semiconductor/graphene hybrid field-effect transistors**, Org. Ele. 12, 1471-1476, (2011).
- 101- M. Abbas, G. Cakmak, N. Tekin, A. Kara, H. Y. Guney, E. Arici, N. Serdar Sariciftci, **Water soluble poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) as novel dielectric layer for organic field effect transistors**, Organic Electronics 12, 497–503, (2011).
- 102- C.L. Chue, K.L. Woon, **Comparative study on different annealing methods and choice of solvent in organic field effect transistors based on Poly(3-hexylthiophene)**, Materials Science-Poland, 31,3, 325-330, (2013).
- 103- A. Munzer , K. Melzer, M. Heimgreiter and G. Scarpa, **Random CNT network and regioregular poly(3-hexylthiophen) FETs for pH sensing applications: A comparison**, Biochim. & Biophys. Acta 1830, 4353-4358, (2013).
- 104- U. Bielecka, P. Lutsyk, M. Nyk, K. Janus, M. Samoc, W. Bartkowiak and S. Nespurek, **Hole transport in organic field-effect transistors with active poly(3-hexylthiophene) layer containing CdSe quantum dots**, Materials Science-Poland, 31, 2, pp. 288-297, (2013).
- 105- B. Xiao, C. Xiaoman, F.J. Feng, J. Jing and W. Feng, **Effect of Poly(vinyl alcohol) Gate Dielectric Concentration on Poly(3-hexylthiophene) Based Organic Field Effect Transistor**, Chinese J. of Lumin., 35, 4, 170, (2014).
- 106- E. Basaran, A. Altyndal, K. Esmer and D. Malkoc, **Effect of molecular weight of gate dielectric (Polyvinylalcohol) and solvents on operational stability of organic field effect transistors**, ChemXpress, 7, 1, 23-29, (2014).
- 107- Z. Zhu, J. Wang and B. Wei, **Self-assembly of Ordered Poly(3-hexylthiophene) Nanowires for Organic Field-effect Transistor Applications**, Sci. Dir. Phys. E, 59, 83–87 , (2014).
- 108- S. Ochiai, X. Wang, N. P. Rajesh, A. Ohashi, K. Kojima and T. Mizutani, **Performance Improvement and Evaluation of an All Plastic Organic Field Effect Transistor**, Proc. of SPIE, 665816-1, (2007).
- 109- S. Nam, J. Seo, H. Kim, and Y. Kim, **Organic Non-volatile Memory Transistors with Poly(vinyl alcohol) Gate Insulator and Poly(3-hexylthiophene) Channel Layers.**, App. Phys. Lett., 107, 153302, (2015).
- 110- G. Lu, N. Koch, and D. Neher, **In-situ Tuning Threshold Voltage of Field-effect Transistors Based on Blends of Poly(3-hexylthiophene) with an Insulator Electrets**, App. Phys. Lett. 107, 063301, (2015).
- 111- T. Tsai , J. Chang , T. Wen and T. Guo, **Manipulating the Hysteresis in Poly(vinyl alcohol)-Dielectric Organic Field-Effect Transistors Toward Memory Elements**, Adv. Funct. Mater., 23, 4206-4214, (2013).
- 112- V. P. Liyana, A. M. Stephania, K. Shiju, and P. Predeep, **Influence of Gate Dielectrics, Electrodes and Channel Width on OFET Characteristics**, J. of Phys.: Conf. Series-IOP Publ., 619, 012029, (2015).

- 113-C. Col, A. Nawaz, I. Cruz-Cruz, A. Kumar and A. Kumar, I. A. Hummelgen, **Poly(vinyl alcohol) gate dielectric surface treatment with vitamin C for poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based field effect transistors performance improvement**, Sci. dirc.-Org. Elect., 17, 22-27, (2015).
- 114-R. A. Nawrocki, E. Pavlica, N. Celi, D. Orlov, M. Z. Valant, D. Mihailovi and G. Bratina, **Fabrication of Poly(3-hexylthiophene) Nanowires for High-Mobility Transistors**, Sci. Direct- Organic Electronics, 30, 92-98, (2016).
- 115-E. C. P. Smits, T. D. Anthopoulos, S. Setayesh, E. Veenendaal, R. Coehoorn, Paul W. M. Blom and D. M. de Leeuw, **Ambipolar Charge Transport in Organic Field-effect Transistors**, Phys. Rev. B, 73, 205316, (2006).
- 116-A. Nawaz, A. Kumar and I. A. Hummelgen, **Ultra-high mobility in defect-free poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) field-effect transistors through supra-molecular alignment**, Sci.Dir.- Org. Electr., 51, 94-102, (2017).
- 117-E. Lim,K. A. Peterson, G. Su and M. L. Chabiny, **Thermoelectric Properties of Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) Doped with 2,3,5,6-Tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4TCNQ) by Vapor-Phase Infiltration**, Chem. Mater., 30, 998–1010, (2018).
- 118-D. Sweatman, **Organic Devices: A Review**, Microelec. Eng. Res. Conf., (2001).
- 119-A. Nawaz, M.S. Meruvia, D.L. Tarange, S. Gopinathan, A. Kumar, A. Pal and I. Hummelgen, **High mobility organic field-effect transistors based on defect-free regioregular poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)**, Org.Ele.,38, 89-96, (2016).
- 120-W. R. Salaneck, S. Stafstrom and J.-L. Bredas, **Conjugated polymer surfaces and interfaces**, Cambridge Univ. Press, 66, (1996).
- 121-J. H. Bannock, N. D. Treat, M. Chabiny, N. Stingelin, M. Heeney and J. C. Mello, **The influence of polymer purification on the efficiency of poly(3-hexylthiophene):fullerene organic solar cells**, Sci. Rep.,6, 23651, (2016).
- 122-I. Salzmann, G. Heimel, M. Oehzelt, S. Winklerand and N. Koch, **Molecular Electrical Doping of Organic Semiconductors: Fundamental Mechanisms and Emerging Dopant Design Rules**, Acc. Chem. Res, 28, (2015).
- 123-S. Scheinerta, G. Paaschb, S. Pohlmann, H. H. rhoelc and R. Stockmannnc, **Field effect in organic devices with solution-doped arylamino-poly-(phenylene-vinylene)**, Solid-State Electronics, 44, 845-853 (2000).
- 124-K. Yim, G. L. Whiting, C. E. Murphy, J. J. M. Halls, R. H. Friend and J. Kim, **Controlling Electrical Properties of Conjugated Polymers via a Solution-Based p-Type Doping**, Adv. Mat., 20, 3319-3324, (2008).
- 125-P. Pacher, A. Lex, V. Proschek, H. Etschmaier, E. Tchernychova, C. Slugovc, and E. Zojer, **Chemical Control of Local Doping in Organic Thin-Film Transistors: From Depletion to Enhancement**, Adv. Mat., 20, 3143, (2008).
- 126-J. A. Letizia, A. Facchetti, C. Stern, M. A. Ratner and T. Marks, **High Electron Mobility in Solution-Cast and Vapor-Deposited Phenacyl-Quaterthiophene-Based Field-Effect Transistors: Toward N-Type Polythiophenes**, J. Am. Chim. Soc., 127, 13476-13477, (2005).

- 127-A. Giovannitti, D.Sbircea, S. Inal, C. B. Nielsen, E. Bandiello, I. McCulloch and J. Rivnay, **Controlling the mode of operation of organic transistors through side-chain engineering**, PNAS, 113, 43, 12017-12022, (2016).
- 128-J. Stejskal, M. Hajna, V. Kasarkova, P. Humpolicek, A. Zhigunov and M. Trchova, **Purification of a conducting polymer, polyaniline, for biomedical applications**, Sci.Dir. -Syn. Met., 195, 286-293, (2014).
- 129-J. Sworakowski, **Current-voltage characteristics in organic field-effect transistors, Effect of interface dipoles**, Chem. Phys. 456, 106-110, (2015).
- 130-B. Luassem, C.Keum, D. Kasemann, B. Naab, Z. Bao and K. Leo, **Doped Organic Transistors**, Chem. Rev., 116, 13714-13751, (2016).
- 131-B. Luassem, M. Riede and K. Leo, **Doping of Organic Semiconductors**, Phys. Status Solid, A, 210, 1, 9-43, (2013).
- 132-A. Gheno, S. V., B. Ratier and J. Boucle, **π -Conjugated Materials as the Hole-Transporting Layer in Solar Cells**, MDPI-J. Metals, 6, 21, (2016).
- 133-X. Han, Z. Wu and B. Sun, **Enhanced performance of inverted organic solar cell by a solution-based fluorinated acceptor doped P3HT:PCBM layer**, Org. Ele., 14, 1116-1121, (2013).
- 134-S. Nam, J. Kim, H. Lee, H. Kim, C. Ha and Y. Kim, **Doping Effect of Organosulfonic Acid in Poly(3-hexylthiophene) Films for Organic Field-Effect Transistors**, ACS Appl. Mat. Inter., 4, 1281-1288, (2012).
- 135-P. Pingel, L. Zhu, K. S. Park, J. Vogel, S. Janietz, J. Bredas and N. Koch, **Charge-Transfer Localization in Molecularly Doped Thiophene-Based Donor Polymers**, J. Phys. Chem. Lett., 1, 2037-2041, (2010).
- 136-C. Liu, Y. Xu and Y. Noh, **Contact Engineering in Organic Field-effect Transistors**, Mater. Tod., 18, (2014).
- 137-D. X. Long, E. Choi and Y. Noh, **Manganese Oxides Nanoparticle as New P-type Dopant for High Performance Polymer Field-Effect Transistors**, ACS App. Mat. & Interf., 9, 29, 24763-24770, (2017).
- 138-Y.H. Lee, M. Jang, O.Y. Kweon and J. H. Oh, **Flexible Field-Effect Transistor-Type Sensors Based on Conjugated Molecules**, Inc.Chem, 3, 724, (2017).
- 139-T.B. Singh, N.S. Sariciftci, M. Jaiswal and R. Menon, **Organic Field-Effect Transistors: From Materials to Device Physics**, Amer. Sci. Pub., 153, (2008).
- 140-C. Col, A. Nawaz, I.C. Cruz, and I.A. Hummelgen, **Poly(vinyl alcohol) gate dielectric surface treatment with vitamin C for poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based field effect transistors performance improvement**, Org. Ele., 17, 22-27, (2015).
- 141-S. Faraji, M. Turner and L. Majewski, **Dielectric Materials for Low Voltage OFET Operation**, Pat.-Int. publ., PCT/GB2015/ 051478, 1-6, (2015).
- 142-M. Egginger and S. Bauer, **Current Versus Gate Voltage Hysteresis in Organic Field effect Transistors**, Monatsh Chem, 140, 735-750, (2009).
- 143-W. Shi, Y. Zheng and J. Yu, **Polymer Dielectric in Organic Field Effect Transistor**, INTUCH, 3-8, (2017).

- 144-G. Paasch and S. Scheiner, **Scaling Organic Transistors: Materials and Design**, Mat. Sci.-Poland, 22, 4, 423-433, (2004).
- 145-L. A. Majewski, R. Schroeder, and M. Grell, **Organic Field-effect Transistors with Electroplated Platinum Contacts**, App. Phys. Let., 85, 16, (2004).
- 146-X. Peng, G. Horowitz, D. Fichou and F. Garnier, **All-organic Thin Film Transistors Made of Alpha-sexithienyl Semiconducting and Various Polymeric Insulating Layers**, App. Phys. Let., 57, 2013 (1990).
- 147-P.J. Diemer, Z. Lamport, Y. Mei, J. Ward and K. Goetz, **Quantitative Analysis of the Density of Trap States at the Semiconductor-Dielectric Interface in Organic Field-Effect Transistors**, App. Phys. Let., 107, 103303, (2015).
- 148-J.A. Nichols, D.J. Gundlach, and T.N. Jackson, **Potential Imaging of Pentacene Organic Thin-Film Transistors**, Appl. Phys. Lett. 83, 2366, (2003).
- 149-S.R. Ekanayake, M. Ford and M. Cortie, **Metal-Insulator-Metal (MIM) Nanocapacitors and Effects of Material Properties on Their Operation**, Mat. For., 27, 15-20, (2004).
- 150-H.S. Tan, T. Cahyadi, Z. Wang, A. Lohani, S. Zhang, F. Zhu and S. Mhaisalkar, **Low-Temperature-Processed Inorganic Gate Dielectrics for Plastic-Substrate-Based Organic Field-Effect Transistors**, Dev. Let., 29, 7, (2008).
- 151-B. Salim, J.M. Pria, M. Alagappan and A. Kandaswamy, **Fabrication of Poly (methyl methacrylate) and Poly(vinyl alcohol) Thin Film Capacitors on Flexible Substrates**, IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. and Eng., 99, 012026, (2015).
- 152-C. Hung, H. Wu, Y. Chiu, S. Tung and W. Chen, **Crosslinkable High Dielectric Constant Polymer Dielectrics for Low Voltage Organic Field-Effect Transistor Memory Devices**, J. Poly. Sci., 54, 3224-3236, (2016).
- 153-S.H. Kim, S.Y. Yang, K. Shin, H. Jeon, J. W. Lee, K.P. Hong and C.E. Park, **Low-Operating-Voltage Pentacene Field-Effect Transistor with a High-Dielectric-Constant Polymeric Gate Dielectric**, App. Phys. Let., 89, (2006).
- 154-M.R. Beaulieu, J.K. Baral, N.R. Hendricks, Y. Tang, A.L. Briseno and J.J. Watkins, **Solution Processable High Dielectric Constant Nanocomposites Based on ZrO₂ Nanoparticles for Flexible Organic Transistors**, ACS Appl. Mat. Interfaces, 5, 13096-13103, (2013).
- 155-A. Kalita, N.V. Subbarao and P. K. Iyer, **Large-Scale Molecular Packing and Morphology-Dependent High Performance Organic Field-Effect Transistor by Symmetrical Naphthalene Diimide Appended with Methyl Cyclohexane**, J. Phys. Chem. C, 119, 12772-12779, (2015).
- 156-M.P. Walser, W.L. Kalb, T. Mathis and B. Batlogg, **Low-Voltage Organic Transistors and Inverters with Ultra-Thin Fluoropolymer Gate Dielectric**, App. Phys. Let., 95, 23, 233301, (2009).
- 157-S. Vasimalla, N. Subbarao, M. Gedda, D. Goswami and P. Iyer, **Effects of Dielectric Material, HMDS Layer, and Channel Length on the Performance of the Perylenediimide-Based Organic Field-Effect Transistors**, ACS Omega, 2, 2552-2560, (2017).

- 158-J. Veres, S. Ogier, and G. Lloyd, **Gate Insulators in Organic Field-Effect Transistors**, Chem. Mater.,16, 4543-4555, (2004).
- 159-S. Jung, M. Albariqi, G. Gruntz, E. Caurel, Y. Nicolas, T. Toupance, Y. Bonnassieux and G. Horowitz, **A TIPS-TPDO-tetra CN-Based n-type Organic Field-Effect Transistor with a Cross-linked PMMA Polymer Gate Dielectric**, ACS Appl. Mater. Interfaces, 8, 23, 14701-14708, (2016).
- 160-S. A. Asher, K. W. Kimble and J. P. Walker, **Enabling Thermo-reversible Physically Cross-Linked Polymerized Colloidal Array Photonic Crystals**, Chem. Mat.,20, 7501-7509 (2008).
- 161-H. Kim, S. M. Jung, Y. Kim, B.Kim, S. Ha, Y.Kim, T.Yoon and H. H. Lee, **Characterization of Gold Nanoparticle Pentacene Memory Device with Polymer Dielectric Layer**, Thin Solid Films, 519, 6140-6143, (2011).
- 162-W. Xu and S. Rhee, **Low-operating Voltage Organic Field-Effect Transistors with High-k Cross-linked Cyanoethylated Pullulan Polymer Gate Dielectrics**, J. Mater. Chem., 19, 5250-5257,(2009).
- 163-R. Shinar and J. Shinar, **Organic Electronics in Sensors and Biotechnology**, McGraw-Hill Companies, 117-125, (2009).
- 164-C.P. Watson, M. Devynck and D.M. Taylor, **Photon-Assisted Capacitance-Voltage Study of Organic Metal-Insulator-Semiconductor Capacitors**, Org. Ele., 14, 1728-1736 , (2013).
- 165-Y. Xu, P.R. Berger, J. Cho and R.B. Timmons, **Capacitance-Voltage Characterization of Pulsed Plasma Polymerized Allylamine Dielectrics for Flexible Polymeric Field Effect Transistors**, J. of Ele. Mat., 33, 10, (2004).
- 166-P. Stallinga, **Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices**, John Wiley & Sons, 91-116, (2009).
- 167-G. Horowitz, **Organic thin film transistors: From theory to real devices**, J. Mater. Res., 19, 7, 1946-1962, (2004).
- 168-S.M. Sze, K.K. Ng, **Physics of Semiconductor Devices**, 3d Edition, John Wiley & Sons, 197-210, (2007).
- 169- K. Hess, **ADVANCED THEORY OF SEMICONDUCTOR DEVICES**, A John-Wiley & Sons, INC., 5-15, (2000).
- 170-D. Sharma, **Basics of Semiconductor Devices**, Microele. group, 10-16, (2005).
- 171- R. Ledru, S. Pleutin, B. Grouiez, D. Zander, H. Bejbouji, K. Lmimouni and D. Vuillaume, **Low frequency dielectric loss of metal/insulator/organic semiconductor junctions in ambient conditions**, Org. Ele.,13,1916-1924, (2012).
- 172-J. P. Colinge, C. A. Colinge, **PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES**, KLUWER ACADEMIC, 165-174, (1999).
- 173-U. K. Mishra and J. Singh, **Semiconductor Device Physics and Design**, Springer, 439-446, (2008).
- 174-S. Kar, **High Permittivity Gate Dielectric Materials**, Springer Series in Advanced Microelectronics, 43-63, (2013).
- 175-H. Bentarzi, **Transport in Metal-Oxide- Semiconductor Structures Mobile Ions Effects on the Oxide Properties**, Springer, (2011).

- 176-S. Scheinerta, G. Paaschb, S. Pohlmann, H.H. rholdc and R. Stockmann, **Field effect in organic devices with solution-doped arylamino-poly-(phenylene-vinylene)**, Solid-State Electronics, 44, 845-853, (2000).
- 177-M. Zhu, G. Liang, T. Cui and K. Varahramyan, **Depletion-mode n-channel organic field-effect transistors based on NTCDA**, Solid-State Electronics, 47, 1855–1858, (2003).
- 178- F. Pettersson, J. Koskela, C. Wikman, C.Welin, A. Kilpela and R. Osterbacka, **Patterned Membrane as Substrate and Electrolyte in Depletion- and Enhancement Mode Ion-Modulated Transistors**, J.Elec.Dev.Soc., 3, 2, 58-66, (2015).
- 179-R.K. Al-Hakim and A.K. Khidaira, **Fundamental of Electronic Engineering**, Iraqi Higher Education Ministry, 283, (1977).
- 180-N. Koch, **Organic Electronic Devices and Their Functional Interfaces**, Wiley-VCH Verlag-Chem.Phys., 8, 1438 – 1455, (2007).
- 181-I gor and D. F. Perepichka, **Handbook of Thiophene-Based Materials: Applications in Organic Electronics and Photonics**, John Wiley, (2009).
- 182-L. Torsi, M. Magliulo, K. Manoli and G. Palazzo, **Organic field-effect transistor sensors:a tutorial review**, Chem. Soc. Rev, 42, 8612., (2013).
- 183-S. Jung, T. Ji, and V. Varadan, **Temperature sensor using thermal transport properties in the subthreshold regime of an organic thin film transistor**, App. Phys. Lett., 90, 062105, (2007).
- 184-H. Klauk, **Organic thin-film transistors**, Chem. Soc. Rev, 39, 2643-2666., (2010).
- 185-J. P. Colinge and C. A. Colinge, **Physics of Semiconductors Devices**, Kluwer Academic Publ., 158-160, (2002).
- 186-G. Meller and T. Grasser, **Organic Electronics**, Springer, 232-238, (2010).
- 187- K. R. Rajesh, V. Kannan, M. R. Kim, Y. S. Chae and J. K. Rhee., **High mobility polymer gated organic field effect transistor using zinc phthalocyanine**, Bull. Mater. Sci., 37, 1, 95–99, (2014).
- 188- C. Fuster, J. V. L. Roger, L. C. Rodrigo and E. G. Breijo, **Inexpensive Measuring System for the Characterization of Organic Transistors**. J. of Sens., 2018, ID 4286894, (2018).
- 189-C.D. Dimitrakopoulos and P.R. Malenfant, **Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics**, Adv. Mater., 14, 2, (2002).
- 190-U. Farok, Y. Falinie, A. Alias, B. Gosh, I. Saad, A. Mukifza and K. Anuar, **Electrical Characterization and Source-Drain Voltage Dependent Mobility of pchannel Organic Field-Effect Transistors using MATLAB Simulation**, 1st Inter. Conf., Mod. & Simul., 411-413, (2013).
- 191-E.V. Hauff, F. Johnen, A.V. Tunc, L. Govor, and J. Parisi, **Detailed investigation of the conducting channel in poly(3-hexylthiophene) field effect transistors** Citation: Journal of Applied Physics 108, 063709, (2010).
- 192-H. L. Gomes, **Organic field effect transistors**, Pan Stanford Publishing Pte Ltd, 3, (2009).

- 193- D. Choi, P.Chu, M. McBride and E. Reichmanis, **Best Practices for Reporting Organic Field Effect Transistor Device Performanc**, Chem. Mater., 27, 4167-4168, (2015).
- 194- Y. Abe, T. Hasegawa, Y. Takahashi, T. Yamada, and Y. Tokura, **Control of threshold voltage in pentacene thin-film transistors using carrier doping at the charge-transfer interface with organic acceptors**, Applied Physics Letters 87, 153506 (2005).
- 195- W. Shi, Y. Zheng, A.D. Taylor, J. Yu, and H.E. Katz, **Increased mobility and on/off ratio in organic field-effect transistors using low-cost guanine-pentacene multilayers**, Appl. Phys. Lett., 111, 043301, (2017).
- 196- P. Pingel, L. Zhu, K. Park, J. Vogel, S. Janietz, E. Kim, J. Rabe, J. Bredas and N. Koch, **Charge-Transfer Localization in Molecularly Doped Thiophene-Based Donor Polymers**, J. Phys. Chem. Lett., 1, 2037-2041, (2010).
- 197- B.J. Thompson, **Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic Materials and Device**, CRC Press, 319, (2008).
- 198- C.H. Park, S. Im, J. Yun, G.H. Lee, B.H. Lee and M.M. Sung, **Transparent photostable ZnO nonvolatile memory transistor with ferroelectric polymer and sputter-deposited oxide gate**, App. Phys. Let., 95, 223506, (2009).
- 199- R. Cai, H. Kassa, A. Marrani, A. Breemen, G. Gelinck, B. Nysten, Z. Hu, and A. Jonas, **An organic ferroelectric field effect transistor with poly(vinylidene fluoride-cotrifluoroethylene) nanostripes as gate dielectric**, App. Phys. Let., 105, 113113, (2014).
- 200- R. Bhatt, A. K. Bajpai and R. Katare, **Mechanism of Controlling the Threshold Voltage from Recently Modified Dual Gate Organic Field Effect Transistor Biosensor**, Inter. J. of Ethics in Eng. & Manag. Edu., 1, 8, (2014).
- 201- H. Cheng, Y. Mai, W. Chou, and L. Chang, **Influence of Molecular Structure and Microstructure on Device Performance of Polycrystalline Pentacene Thin-Film Transistors**, Appl. Phys. Lett., 90, 171926, (2007).
- 202- D. Braga and G. Horowitz, **Subthreshold Regime in Rubrene Single-Crystal Organic Transistors**, Appl Phys A, 95, 193–201, (2009).
- 203- M. Kano, T. Minari and K. Tsukagoshi, **Improvement of subthreshold current transport by contact interface modification in pp-type organic field-effect transistors**, Appl. Phys. Lett. 94, 143304, (2009).
- 204- M. Iwamoto, Y.Kwon and T. Lee, **Nanoscale Interface for Organic Electronics**, World Sci. Publ. Co., 9-24, (2011).
- 205- H. Nalwa, **Hantlbook of Organic Electronics and Photonics**, 153-176, (2008).
- 206- T. Minari, P. Darmawan, C. Liu, Y. Li, and K. Tsukagoshi, **Highly enhanced charge injection in thienoacene-based organic field-effect transistors with chemically doped contact**, App. Phys. Let. 100, 093303, (2012).
- 207- M.J. Malachowski and J. Zija, **Organic Field-Effect Transistors**, Opto-Electron. Rev., 18 ,2 , 121-136 , (2010).

- 208-A. Sharma, S. G. Mathijssen, E. Smits, M. Kemerink, D. Leeuw and P. Bobbert, **Proton Migration Mechanism for operational instabilities in Organic Field-Effect Transistors**, Phys Rev. B, 82, 075322, (2010).
- 209-R. Hausermann and B. Batlogg, **Gate Bias Stress in Pentacene Field Effect Transistors: Charge Trapping in the Dielectric or Semiconductor**, App. Phys. Lett., 99, 8, (2011).
- 210-J. Veres, S. Ogier, and G. Lloyd, **Gate Insulators in Organic Field-Effect Transistors**, Chem. Mater, 16, 4543-4555, (2004).
- 211-L. Kergoat, L. Herlogsson, D. Braga and B. Piro, **A Water-Gate Organic Field-Effect Transistor**, Adv. Mater, 22, 2565–2569, (2010).
- 212-F. So, **Organic Electronics Materials, Processing, Devices and Applications**, Taylor & Francis Group, 141-154, (2010).
- 213-Y. D. Park, J. Ah Lim, H. S. Lee and K. Cho, **Interface engineering in Organic Transistors**, Elsevier-Materials Today, 10, 3, 46, (2007).
- 214-C. Di, Y. Liu, G. Yu, and D. Zhu, **Interface Engineering: An Effective Approach toward High-Performance Organic Field-Effect Transistors**, Accounts of Chemical Research, 42, 10, 1573-1583, (2009).
- 215-G. Horowitz, **The Organic Transistor: State-of-the-art and Outlook**, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 53, 33602 (2011).
- 216-G. Horowitz, **Interface Modification for Tuning the Contact Resistance of Metal/Organic Semiconductor Junctions**, App. Phys. J., 4, 2-7, (2011).
- 217-M. Nakano, I. Osaka, and K. Takimiya, **Control of Major Carriers in an Ambipolar Polymer Semiconductor by Self-Assembled Monolayers**, Adv. Mater. 02893, (2016).
- 218-S. Casalini, C. A. Bortolotti, F. Leonardi and F. Biscarini, **Self-assembled monolayers in organic electronics**, Chem. Soc. Rev., 46, 40, (2017).
- 219-R.H. Tredgold, **Order in Thin Organic Films**, Camb. Univ. Press, 116, (1994).
- 220-S. Jo, J. Park, W. Lee, K. Cho and B. Hong, **Large-area grapheme synthesis and its application interface-engineered field effect transistors**, Sol. St. Communications, 152, 1350–1358, (2012).
- 221-Q. Ling, D. Liaw, C. Zhu, D. S. Chan, E. Kang and K. Neoh, **Polymer electronic memories: Materials, devices and mechanisms**, Prog. in Poly. Sci., 33, 917–978, (2008).
- 222-H. Luth, **Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films**, Springer, 377. (2010).
- 223-J. Kim, Y. Rim, Y. Liu, J. Thomas, H. Chen, Y. Yang and P. S. Weiss, **Interface Control in Organic Electronics Using Mixed Monolayers of Carboranethiol Isomers**, Amer. Chem. Soci.-Nano Lett, 14, 2946-2951, (2014).
- 224-S. Alborghetti and P. Stamenov, **Modeling of Electronic Transport through Metal/Polymer Interfaces in Thin Film Transistors**, Corp.-ISRN Elect., ID 652587, 6, (2013).
- 225-P. Stallinga, **Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices**, A John Wiley and Sons, 30-38, (2009).

- 226- A.G. Baca, F. Ren, J.C. Zolper, R.D. Briggs and S.J. Pearton, **A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors**, Thin Solid Films 308-309, 599–606, (1997).
- 227- S. Lach, A. Altenhof, F. Schmitt, M. Ali, M. Vogel, J. Sauther, P. Oppeneer and C. Ziegler, **Metal–Organic Hybrid Interface States of A Ferromagnet/Organic Semiconductor Hybrid Junction as Basis For Engineering Spin Injection in Organic Spintronics**, Adv. Fun. Mat, 22, 989-997, (2012).
- 228- Y. Shen, A. Hosseini, M. Wong and G. Malliaras, **How To Make Ohmic Contacts to Organic Semiconductors**, Chem.Phys.Chem, 5, 16-25, (2004).
- 229- S. Fabiano, S. Braun, M. Fahlman, X. Crispin and M. Berggren, **Effect of Gate Electrode Work-Function on Source Charge Injection in Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors**, Adv. Func. Mat., 24, 5 695-700, (2014).
- 230- B. Kumar, B. Kaushik and Y. Negi, **Influence of the Contact Thickness on Electrical Performance of Staggered and Planer *p*-Channel Organic Field Effect Transistors**, Advan. Mat. Res., 622, 1434-1438, (2013).
- 231- L. Chua, J. Zaumseil, J. Chang, C. Ou, K. Ho, H. Sirringhaus and R. Friend, **General Observation of N-type Field-Effect Behavior in Organic Semiconductors**, Publ. Group Nature. , 434, 10, (2005).
- 232- T.J. Richards and H. Sirringhaus, **Analysis of the Contact Resistance in Staggered, Top-Gate Organic Field-Effect Transistors**, J. of App. Phys., 102, 094510, (2007).
- 233- A. Benor and D. Knipp, **Contact Effects in Organic Thin Film Transistors with Printed Electrodes**, Organic Electronics, 9, 209-219, (2008).
- 234- K. Hong, S. Y. Yang, C. Yang, S. H. Kim, D. Choi and C. E. Park, **Reducing the Contact Resistance in Organic Thin-Film Transistors by Introducing a PEDOT:PSS Hole-injection Layer**, Organic Electronics, 9, 864–868, (2008).
- 235- F. Werkmeister and B. Nickel, **Towards Flexible Organic Thin Film Transistors (OTFTs) for Biosensing**, J. Mater. Chem. B, 1, 3830, (2013).
- 236- Y. Gao, H. Yip, K. O'Malley, O. Acton, G. Ting, H. Chen and A.K. Jen, **Surface Doping of Conjugated Polymers by Graphene Oxide and Its Application for Organic Electronic Devices**, Adv. Mater, 23, 1903-1908, (2011).
- 237- H. Klauk, **Organic Electronics Materials, Manufacturing and Applications**, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 9-20, (2006).
- 238- S. Alborghetti, J. M. D. Coey and P. Stamenov, **Dependence of charge carrier injection on the interface energy barrier in short-channel polymeric field effect transistors**, Applied Physics Letters, 100, 143301, (2012).
- 239- Y. D. Park, J. H. Cho, D. H. Kim, Y. Jang, Hwa S. Lee, K. Ihm, T. Kang and K. Cho, **Energy-Level Alignment at Interfaces Between Gold and Poly(3-hexylthiophene) Films with Two Different Molecular Structures**, Electrochemical and Solid-State Let., 9, 11, 317-319, (2006).
- 240- Z. Bao, A. Dodabalapur and A. J. Lovinger, **Soluble and Processable Regioregular Poly(3hexylthiophene) for Thin Film Field Effect Transistor Applications with High Mobility**, App. Phys. Let., 69, 4108, (1996).

- 241-C. Yang, F. Orfino, and S. Holdcroft, **A Phenomenological Model for Predicting Thermochromism of Regioregular and Nonregioregular Poly(3-alkylthiophenes)**, *Macromolecules* , 29, 6510-6517, (1996).
- 242- Richard and D. McCullough, **The Chemistry of Conducting Polythiophenes**, *Adv. Mater*, 10, 2, 93-116, (1998).
- 243-Z.H. Ping, Q.T. Nguyen, J.Q. Zhou and Y. Ding, **States of Water in Different Hydrophobic polymer DSC and FTIR Studies**, *Poly.*, 42, 8461-8467, (2001).
- 244-R. Lipsa, N. Tudorach, A. Grigoras, C. Vasile and P. Gradinariu, **Study on Poly(inyl alcohol) Copolymers Biodegradation**, *Mem. of the Sci. Sect. of the Rom. Aca.*, 8-24, (2015).
- 245-S. Lee, **Encyclopedia of Chemical Processing**, volume 1, Taylor and Francis group, 1101-1103, (2006).
- 246-C.L. Raju, J.L. Rao, B.C. Reddy and K.V. Brahman, **Thermal and IR studies on copper doped polyvinyl alcohol**, *Bull. Mat. Sci.*, 30, 3, 215-218, (2007).
- 247-A. Hany, M.A. Mousa, T. El-Essawy, **Studies on AC Electrical Conductivity, Dielectric Properties and Ion Transport in PVA polymeric Electrolytes**, *J. of Basic and Envir. Sci.*, 4, 298-304, (2017).
- 248-H.F Mark, **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**, John Wiley & Sons, 399-430, (2006).
- 249-A. Nawaz, I. Cruz-Cruz, R. Rodrigues and I.A. Hummelgen, **Performance enhancement of poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based field effect transistors through surfactant treatment of the poly(vinyl alcohol) gate insulator surface**, *Phys.Chem.Chem.Phys.*, 17, 26530, (2015).
- 250-S. Han, X. Yang, X. Zhuang, J. Yu and L. Li, **Tailoring the Dielectric Layer Structure for Enhanced Performance of Organic Field-Effect Transistors: The Use of a Sandwiched Polar Dielectric Layer**, *Materials*, 9, 545, (2016).
- 251-A. Nawaz, I. Cruz-Cruz, A. Kumar, A. Kumar, I. A. Hummelgen and C. Col, **Poly(vinyl alcohol) gate dielectric surface treatments with vitamin C for poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based field effect transistors performance improvement**, *Organic Electronics*, 6, 1566-1199, (2014).
- 252-E. Van Etten, E. Ximenes, L. Tarasconi, I. Garcia, M. Forte and H Boudinov, **Thermal and Electrical Characterization of Polyvinyl Alcohol focusing on Organic Electronics Applications**, 28th Symposium on Microele. Tech. and Dev., Conf. of Curitiba, Brazil, 13935552, (2013).
- 253-W. Huang, J. Yu, X. Yu and W. Shi, **Polymer dielectric layer functionality in organic field-effect transistor based ammonia gas sensor**, *Org. Elect.*, 143453-3459, (2013).
- 254- E. A. Etten, E. S. Ximenes, L. T. Tarasconi, I. T.S. Garcia, M.M.C. Forte and H. Boudinov, **Insulating characteristics of polyvinyl alcohol for integrated electronics**, *Thin Solid Films*, 568, 111-116, (2014).
- 255-C. Lin, C. Hsu, C. Lee, and W. Wu, **Inkjet-Printed Organic Field-Effect Transistor by Using Composite Semiconductor Material of Carbon Nanoparticles and Poly(3-Hexylthiophene)**, *J. of Nanot.*, ID 142890, 7, (2011).

- 256-Z. Lou, H. Huang, M. Li, T. Shang and C. Chen, **Controlled Synthesis of Carbon Nanoparticles in a Supercritical Carbon Disulfide System**, J. Mat., 7, 97-105, (2014).
- 257-A. C. Power, B. Gorey, S. Chandra and J. Chapman, **Carbon nanomaterials and their application to electrochemical sensors: a review**, Nanotechnol Rev, 7, 1, 19-41, (2018).
- 258-Frederico R. Baptista,a S. A. Belhout,a S. Giordanib and S. J. Quinn, **Recent developments in carbon nanomaterial sensors**, Chem. Soc. Rev., 44, 4433, (2015).
- 259- N. Tarasenko, A. Stupak, N.Tarasenko S. Chakraborti and D.Mariotti, **Structure and optical properties of carbon nanoparticles generated by laser treatment of graphite in liquid**, ChemPhysChem, 18, 9, 1074-1083, (2017).
- 260-H. Oxfall, G. Ariu, T. Gkourmpis, R. W. Rychwalski and M. Rigdahl, **Effect of carbon black on electrical and rheological properties of graphitenanoplatelets/poly(ethylene-butylacrylate) composites**, Exp.Poly.Let.,9, 1,66-76, (2015).
- 261-K Tetzner, I. R. Bose and K. Bock, **Organic Field-Effect Transistors Based on a Liquid-Crystalline Polymeric Semiconductor using SU-8 Gate Dielectrics on Flexible Substrates**, J. Mat., 7, 7226-7242, (2014).
- 262-M. M. Durban, P. D. Kazarinoff, and C. K. Luscombe, **Synthesis and Characterization of Thiophene-Containing Naphthalene Diimide n-Type Copolymers for OFET Applications**, Macromo., 43, 6348-6352, (2010).
- 263-S. Han, X. Zhuang, W. Shi, X. Yang, L. Li and J. Yu, **Poly(3-hexylthiophene)/ polystyrene (P3HT/PS) blends based organic field-effect transistor ammonia gas sensor**, Sens. and Actuat. B, 225, 10-15, (2016).
- 264-A. M. Gaikwad, Y. Khan, A. E. Ostfeld, S. Pandya, S. Abraham and A. C. Arias, **Identifying orthogonal solvents for solution processed organic Transistors**, Org. Elect., 30, 18-29, (2016).
- 265-J. Huang, J. Du, Z. Cevher, Y. Ren, X. Wu and Y. Chu, **Printable and Flexible Phototransistors Based on Blend of Organic Semiconductor and Biopolymer**, Adv. Funct. Mater., 1604163, (2017).
- 266-D. B. Hall, P. Underhill and J. M. Torkelso, **Spin Coating of Thin and Ultrathin Polymer Films**, Poly. Eng. and Sci., 38, 12, 2039-2045, (1998).
- 267-J. Flores, S. Eickelmann and H. Riegler, **Deposition of polymer films by spin casting: A quantitative analysis**, Chem. Eng. Sci., 17, 9257-264, (2018).
- 268-A. G. Emslie, F. T. Bonner, and L. G. Peck, **Flow of a Viscous Liquid on a Rotating Disk**, J. Appl. Phys. 29, 858, (1958).
- 269-J.H. Heo , D.H. Song , and S.H. Im, **Planar CH₃NH₃PbBr₃ Hybrid Solar Cells with 10.4% Power Conversion Efficiency, Fabricated by Controlled Crystallization in the Spin-Coating Process**, Adv. Mater., 1-5, (2014).
- 270-P. Kajal, K. Ghosh and S. Powar, **Manufacturing Techniques of Perovskite Solar Cells**, Springer, 341, (2018).
- 271-K.S.S. Harsha, **Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films**, 1st edition, Elsevier B.V., 367-370, (2007).

- 272-G. S. Kumar and J. V R. Rao, **Thin Film Deposition, Formation of Nanopartical & Variation of Resistance of Deposited Sample with Temperature**, Intern. J. of Nanot. and App., 3, 1, 1-10, (2013).
- 273-M. Song, J. Seo, H. Kim and Y. Kim, **Flexible Thermal Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymeric Channel/Gate-Insulating and Light-Blocking Layers**, ACS Omega, 2, 4065–4070, (2017).
- 274-S. Prabahar, N. Suryanan, K. Rajasekar and S. Srikanth, **Compositinal and Electrical Resistivity Studeis on Thermal Evaporation Lead Selenide Thin Films**, Chalcogenide Let., 6, 6, 227- 232, (2009).
- 275-G. Zhang, S. Hawks, C. Ngo, L. Schelhas, H. Kang, J. Aguirre, S. Tolbert and B. Schwartz, **Extensive Penetration of Evaporated Electrode Metals into Fullerene Films: Intercalated Metal Nanostructures and Influence on Device Architecture**, ACS Appl. Mater. Interf., 7, 25247-25258, (2015).
- 276-B. Yang, J. K. Keum, D. B. Geohegan, and K. Xiao, **In Situ X-Ray Studies of Crystallization Kinetics and Ordering in Functional Organic and Hybrid Materials**, Springer-Verlag GmbH, 33-55, (2018).
- 277-E. A. Abbas,E. Y. Abid, S. H. Salman,s. A. Abbas, **Effect of Gamma radiation on the Structural and Optical properties of PVA: CuO films**, J. of Coll. of Educ., 5, 343-354, (2005).
- 278- S. Yadav and P. K. Bajpai, **Effect of Substrate on CuS/PVA Nanocomposite Thin Films Deposited on Glass and Silicon Substrate**, Nanosci. Let., 8, 9-19, (2018).
- 279- H.N. Chandrakala, B. Ramaraj, J. H. Lee and Siddaramaiah, **Polyvinyl alcohol/ carbon coated zinc oxide nanocomposites: Electrical, optical, structural and morphological characteristics**, J. of Alloys and Comp., 580, 392-400, (2013).
- 280- R. Nangia, N. K Shukla and A. Sharma, **Preparation, Structural and Dielectric Properties of Solution Grown Polyvinyl Alcohol(PVA) Film**, IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng., 225, 012044, (2017).
- 281- S. Rathod, R. Bhajantri, V. Ravindrachary, J. Naik and D. J. M. Kumar, **High Mechanical and pressure sensitive dielectric properties of Graphene Oxide doped PVA Nanocomposites**, J. Royal Soci. of Chem, RSC Adv., 1-3, (2016).
- 282- E. Sheha, H. Khoder, M.G. El-Shaarawy and M.K. El Mansy, **Structure, dielectric and optical properties of p-type (PVA/CuI) nanocomposite polymer electrolyte for photovoltaic cells**, Optik, 123, 1161-1166, (2012).
- 283- D.M. Fernandes, S.M. Limab, L.H.C. Andradeb, A.R.L. Cairesc, E.A.G. Pineda, **Preparation, characterization, and photoluminescence study of PVA/ZnO nanocomposite films**, Mat. Chem. and Phys., 128, 371-376, (2011).
- 284- F.A. Sabah, N.M. Ahmed, Z.Hassan and M.A. Almessiere, **A Novel CuS Thin Film Deposition Method by Laser-Assisted Spray Photolysis Deposition and Its Application to EGFET**, Sens and Actuat B: Chem, 247, 197-215, (2017).
- 285- Y. Lin, H. Lin, N. Yan, Z. Tang and H. Chan, **Incorporation of black phosphorus into P3HT:PCBM/n-type Si devices resulting in improvement in electrical and optoelectronic performances**, Appl. Phys., A, 122:974, (2016).

- 286- D.T. Duong , H. Phan , D. Hanifi, T. Nguyen and A. Salleo, **Direct Observation of Doping Sites in Temperature-Controlled, p-Doped P3HT Thin Films by Conducting Atomic Force Microscopy**, Adv. Mat. 26, 6069-6073, (2014).
- 287- S. Li, W. Liu, M. Shi, J. Mai, T. Lau, J. Wan, X. Lu, C. Li and H. Chen, **A spirobifluorene and diketopyrrolopyrrole moieties based non-fullerene acceptor for efficient and thermally stable polymer solar cells with high open-circuit voltage**, Energy Environ. Sci., 9, 604-610, (2016).
- 288- P. Wu, G. Ren, F.S. Kim, C. Li and S.A. Jenekhe, **Poly(3-hexylthiophene)-b-poly(3-cyclohexylthiophene): Synthesis Microphase Separation, Thin Film Transistors and Photovoltaic Applications**, Poly.Chem. 48(3): 614-626, (2010).
- 289- A.P. Wanninayake, S. Li, B. Church and N. Abu-Zahra, **Thermal Annealing on P3HT/PC70BM Solar Cells Incorporated with Au and CuO Nanoparticles**, Internat. J. of Renewable Energy Res., 5, 4, (2015).
- 290- A. Bruno, S.A. Haque and P. Minutolo, **Spectroscopic investigation of flame synthesized carbon nanoparticle/P3HT blends**, Carbon, 94, 955–961, (2015).
- 291- P. Ehrenreich, S.T. Birkhold, H. Hu, K. Kim, J. Weickert, T. Pfadler & L. S. Mende, **H-aggregate analysis of P3HT thin films-Capability and limitation of photoluminescence and UV/Vis spectroscopy**, Sci. Rep., 6, 32434, (2016).
- 292- B. Salim, J. M. P. KNJ, M. Alagappan and A. Kandaswamy, **Fabrication of Poly (methyl methacrylate) and Poly(vinyl alcohol) Thin Film Capacitors on Flexible Substrates**, Mat. Sci. and Eng., 99, 012026, (2015).
- 293- J.D. Flores, S. Eickelmann and H. Riegler, **Deposition of polymer films by spin casting: A quantitative analysis**, Chem. Eng. Sci., 179, 257–264, (2018).
- 294- M. Fardousi, M.S. Islam and S.R. Ruslan, **Cost-Effective Home-Made Spin Coater for Depositing Thin Films**, J. Mod. Sci. and Tech., 1, 1, 126-134, (2013).
- 295- C. J. Lawrence, **The mechanics of spin coating of polymer films**, Phys. Fluids 31, 2786, (1988).
- 296- G. Li, V. Shrotriya, Y. Yao and Y. Yang, **Investigation of annealing effects and film thickness dependence of polymer solar cells based on poly(3-hexylthiophene)**, J. Appl. Phys., 98, 043704, (2005).
- 297- H. Hintz, H.-J. Egelhaaf, H. Peisert and T. Chasse, **Photo-oxidation and ozonization of poly(3-hexylthiophene) thin films as studied by UV/VIS and photoelectron spectroscopy**, Poly. Degrad. and Stab., 95, 818-825, (2010).
- 298- D. Jarzab, K. Szendrei, M. Yarema, S. Pichler, W. Heiss and M. Loi, **Charge-Separation Dynamics in Inorganic-Organic Ternary Blends for Efficient Infrared Photodiodes**, Adv. Funct. Mat., 21, 11, 1988-1992, (2011).
- 299- D. E. Motaung, G. F. Malgas, C. J. Arendse, E. Mavundla, and D. Knoesen, **Structural and photo-physical properties of spin-coated poly (3-hexylthiophene) thin films**, Mat. Chem. and Phys., 116, 1, 279-283, (2009).
- 300- H. Ando, S. Tanaka, K. Matsumoto and Y. Nakao, **Theoretical study on steric deconjugation of poly(3-hexylthiophene) through bromination**, Chem. Phys. Lett., 2614, 17, (2017)

- 301-S.H. Tsai, S.T. Ho, H.J. Jhuo, C.R. Ho, S.A. Chen and J. He, **Toward high efficiency of inverted organic solar cells: Concurrent improvement in optical and electrical properties of electron transport layers**, App. Phys. Let., 102, 253111, (2013).
- 302-Y. Dua, S.Z. Shen, W.D. Yang, K.F. Caia and P.S. Casey, **Preparation and characterization of multiwalled carbonnanotube/poly(3-hexylthiophene) thermoelectric composite materials**, Synth. Metals, 16, 2375- 380, (2012).
- 303-R. Bkakri, A. Sayari, E. Shalaan, S. Wageh, A.A. Al-Ghamdi and A. Bouazizi, **Effects of the graphene doping level on the optical and electrical properties of ITO/P3HT:Graphene/Au organic solar cells**, Superlat. and Microst., 76, 461-471, (2014).
- 304-H. A. Badran, H. F. hussain, K. I. Ajeel, **Nonlinear characterization of conducting polymer and electrical study for application as solar cells and its antibacterial activity**, Optik- Inter. J. for Light and Electron Op.,16, (2016).
- 305-J. Kim, S. Kim, H. Lee, W. Ma, X. Gong and A. J. Heeger, **New Architecture for High-Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-Based Titanium Oxide as an Optical Spacer**, Adv. Mater, 18, 572-576, (2006).
- 306-J. Hynynen, D. Kiefer, L. Yu, R. Kroon, R. Munir, A. Amassian, M. Kemerink and C. Muller, **Enhanced Electrical Conductivity of Molecularly p-Doped Poly(3-hexylthiophene) through Understanding the Correlation with Solid-State Order**, Macromolecules, 50, 8140-8148, (2017).
- 307-S.H. Lee, Y. Lee, D.H. Park, M.S. Kim, E.H. Cho and J. Joo, **Tuning optical properties of poly(3-hexylthiophene) nanoparticles through hydrothermal processing**, Sci. Technol. Adv. Mater., 12, 025002, 6, (2011).
- 308-K. Tremel and S. Ludwigs, **Morphology of P3HT in Thin Films in Relation to Optical and Electrical Properties**, Adv. Poly. Sci., 265, 39-82, (2014).
- 309-R.K.F. Alfahed, K.I. Ajeel, **Effect of Cobalt's Chloride on the Electrical Properties of Poly (O-Toluidine)**, Inter.J.Mat. Sci. and Eng., 3, 4, 319, (2015).
- 310-H.F. Hussein, K.M. Ziadan and K.I. Ajeel, **Synthesizes and study some electrical properties of poly(o- toluidine) doped with Para toluene sulfonic acid (POT-PTSA)**, Basrah J. of Sci. (A), 29, 1, 92-100, (2011).
- 311-K.M. Ziadan, D. KThabyh, **The Electrical Properties of Poly(o-toluidine) Doped with DBSA Blend with Polyethylene Oxide PEO as Nano Conducting Polyblend**, Adv. in Phys. Theories and App., 42, 1, (2015).
- 312-Y. D. Park, J. A. Lim, Y. Jang, M. H. Hw, S. Lee, D. H. Lee, H. Lee, J. Baek and K. Cho, **Enhancement of the field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene)/functionalized carbon nanotube hybrid transistors**, Org. Elect., 9, 317-322, (2008).
- 313-L. Jiang, J. Zhang, D. Gamota and C.G. Takoudis, **Enhancement of the field-effect mobility of solution processed organic thin film transistors by surface modification of the dielectric**, Org. Electronics, 11, 344–350, (2010).

- 314-J. Tsukamoto, J. Mata, and T. Matsuno, **Organic Field Effect Transistors Using Composites of Semiconductive Polymers and Single-Walled Carbon Nanotubes**, Japanese J. of App. Phys., 46, 17, 396-398, (2007).
- 315-M.R. Karim, **Synthesis and Characterizations of Poly(3-hexylthiophene) and Modified Carbon Nanotube Composites**, J. of Nanomat., 174353, 8, (2012).
- 316-Y. Li, S. Li, L. Jin, J. B. Murowchick and Z. Peng, **Carbon nanoparticles as an interfacial layer between TiO₂-coated ZnO nanorod arrays and conjugated polymers for high-photocurrent hybrid solar**, RSC Adv., 3, 16308, (2013).
- 317-O. Esenturk, J.S. Melinger, and E.J. Heilweil, **Terahertz mobility measurements on poly-3-hexylthiophene films: Device comparison, molecular weight, and film processing effects**, J. of App. Phys. 103, 023102 ,(2008).
- 318-J. Obrzut and K.A. Page, **Electrical conductivity and relaxation in poly(3-hexylthiophene)**, American Phys. Soci., Phys. Rev. B, 80, 195211, (2009).
- 319-A Aljaafari, M Abu-Abdeen and M Aljaafari, **Mechanical and electrical properties of poly(vinyl chloride) loaded with carbon nanotubes and carbon nanopowder**, J. of Thermoplastic Composite Mat., 25, 6, 679-699, (2011).
- 320-E. Kim, K. Baeg, Y. Noh, D. Kim, T. Lee, I. Park and G. Jung, **Templated assembly of metal nanoparticles in nanoimprinted patterns for metal nanowire fabrication**, IOP Publ., Nanotech., 20, 355302, (2009).
- 321-J. Cui, D. Tong, A. Sanz, T. Ezquerro, E. Rebollar and A. Nogales, **Relaxation and Conductivity in P3HT/PC71BM Blends As Revealed by Dielectric Spectroscopy**, American Chem. Soci., Macromo., 49, 7, 2709-2717, (2016).
- 322-K.I. Winey, T. Kashiwagi and M. Mu, **Thermal Properties of Polymers by the Addition of Carbon Nanotubes as Fillers**, MRS Bulletin, 32, (2007).
- 323-J. Hwang, J. Jang, K. Hong, J.H. Han, K. Shin and C.E. Park, **Poly(3-hexylthiophene) wrapped carbon nanotube/poly(dimethylsiloxane) composites for use in finger-sensing piezoresistive pressure sensors**, Carbon, 49, 106-110, (2011).
- 324-P. Chung, M. Cheng, H. Tseng, C. Liu, T. Chiu, K. Jeng, M. Chi and J. Chen, **Dewetting of Swollen Poly(3-hexylthiophene) Films during Spin-Coating Processes: Implications for Device Fabrication**, ACS App. Nano Mat., 1, 5, 2021-2028, (2018).
- 325-J. Chen, Z. Chen, Y. Qu, G. Lu, F. Ye, S. Wang, H. Lv and X. Yang, **Large interfacial area enhances electrical conductivity of poly(3-hexylthiophene)/insulating polymer blends**, RSC Adv., 5, 1777,(2015).
- 326-K.S. Karimov, H.B. Senin, I. Qazi and M. Sadrai, **Organic Semiconductors: Conduction Mechanisms and some Applications**, AIP Conf. proc.1017, 1, 25-37, (2008).
- 327-H. Dng, M. Zeng and J. Za, **1D/2D Carbon Nanomaterial-Polymer Dielectric Composites with High Permittivity for Power Energy Storage Applications**, Carbon Nanomat., Wiley-VCH, Weinheim, 1-13, (2016).
- 328-T. Tunç, H. Uslu, and E. Altında, **Preparation and Dielectric Properties of Polyvinyl Alcohol (Co, Zn Acetate) Fiber/n-Si and Polyvinyl Alcohol (Ni, Zn Acetate)/n-Si Schottky Diodes**, Fib. and Poly., 12, 7, 886-892, (2011).

- 329- C. H. Kim, K. Kisiel, J. Jung, B. Geffroy, Y. Bonasieux and G. Horowitz, **Persistent photoexcitation effect on the poly(3-hexylthiophene) film: Impedance measurement and modeling**, Synth. Met., 15, 00670274, (2012).
- 330- J. Zhang, M. Mine, D. Zhu and M. Matsuo, **Electrical and dielectric behaviors and their origins in the three-dimensional polyvinyl alcohol/MWCNT composites with low percolation threshold**, Carbon, 47, 1311-1320, (2009).
- 331- I.A. Latif, S.M. Abbas and M.A. Kadhum, **Hydrogen Bonds Effects on the Electrical Properties of Pectin/Pva Graphene Nanocomposites**, Chem. and Mat. Res., 3,1, 2224-3224, (2013).
- 332- S. Chuangchote, A. Sirivat and P. Supaphol, **Mechanical and electrorheological properties of electrospun poly(vinylalcohol) nanofibre mats filled with carbon black nanoparticles**, Nanotech., 18, 145705, (2007).
- 333- S. Sugumaran and C.S. Bellan, **Transparent nano composite PVA-TiO₂ and PMMA-TiO₂ thin films: Optical and dielectric properties**, Optik, 125, 5128-5133, (2014).
- 334- S. Sathish, B.C. Shekar and R. Sathyamoorthy, **Nano polymer films by fast dip coating method for field effect transistor applications**, Phys. Procedia, 49, 166-176, (2013).
- 335- S.B. Aziz, O.G. Abdullah, S.A. Hussein and H.M. Ahmed, **Effect of PVA Blending on Structural and Ion Transport Properties of CS:AgNt-Based Polymer Electrolyte Membrane**, J. of Poly., 9, 622, (2017).
- 336- G. Ek, **A study of poly(vinyl alcohol) as a solid polymer electrolyte for lithium ion batteries**, UPTEC K 16013, (2016).
- 337- M. Na, S. Rhee, **Electronic characterization of Al/PMMA[poly(methyl methacrylate)]/p-Si and Al/CEP (cyanoethyl pullulan)/p-Si structures**, Org. Ele., 7, 205-212, (2006).
- 338- M. Estrada, F. Ulloa, M. Avila, J. Sanchez, A. Cerdeira, B. Iniguez, L.F. Marsal and J. Pallares, **Frequency and Voltage Dependence of the Capacitance of MIS Structures Fabricated With Polymeric Materials**, IEEE Transac. on Electron Devices, 60, 6, 2057, (2013).
- 339- A. Sleiman, A. Albuquerque, S. J. Fakher, and M. F. Mabrook, **Gold nanoparticles as a floating gate in Pentacene/PVP based MIS memory devices**, 12th IEEE Inter. Conf. on Nanotech., 2, (2011).
- 340- C. P. Watson, M. Devynck and D.M. Taylor, **Photon-assisted capacitance-voltage study of organic metal-insulator-semiconductor capacitors**, Org. Elect., 14, 1728-1736, (2013).
- 341- I. Torres, D. M. Taylor and E. Itoh, **Interface states and depletion-induced threshold voltage instability in organic metal-insulator-semiconductor structures**, App. Phys. Lett., 85, 2, (2004).
- 342- S. Aikawa, S. Kim, T. Thurakitserree, E. Einarsson, T. Inoue, S. Chiashi, K. Tsukagoshi, and S. Maruyama, **Carrier polarity engineering in carbon nanotube field-effect transistors by induced charges in polymer insulator**, Appl. Phys. Lett., 112, 013501, (2018).

- 343- S. Grecu, M. Roggenbuck, A. Opitz and W. Brutting, **Differences of interface and bulk transport properties in polymer field-effect devices**, Org. Elect., 7, 276-286, (2006).
- 344- L. A. Majewski and A. M. Songa, **Extended storage time of poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors via immersion in common solvents**, J. of App. Phys., 102, 074515, (2007).
- 345- A. Assadi, C. Svensson, M. Willander, and O. Inganas, **Field effect mobility of poly(3hexylthiophene)**, Applied Physics Letters, 53, 195, (1988).
- 346- U. Farok, Y. Falinie, A. Alias, B. Gosh, I. Saad, A. Mukifza and K. Anuar, **Electrical Characterization and Source-Drain Voltage Dependent Mobility of p-channel Organic Field-Effect Transistors using MATLAB Simulation**, 1st International Conference on Artificial Intelligence, IEEE, (2013).
- 347- F. Pettersson, J. Koskila, C. Wikman, T. Remonen, C. Wilin, A. Kilpela and R. Oosterbaka, **Patterned Membrane as Substrate and Electrolyte in Depletion- and Enhancement Mode Ion-Modulated Transistors**, J. Electron Devices Soci., 3, 2, (2015).
- 348- G. Horowitz, R. Hajlaoui, and F. Kouki, **An analytical model for the organic field-effect transistor in the depletion mode. Application to sexithiophene films and single crystals**, Eur. Phys. J. AP 1, 361-367, (1998).
- 349- S. Nam, J. Seo, H. Kim, and Y. Kim, **5 V driving organic non-volatile memory transistors with poly(vinyl alcohol) gate insulator and poly(3-hexylthiophene) channel layers**, App. Phys. Let., 107, 153302, (2015).
- 350- H. Yun, S. Kim, H. Kim, J. Lee, K. cAllister, J. Kim, S. Pyo, J. S. Kim, E. E. B. Campbell, W. H. Lee & S. W. Lee, **Stencil Nano Lithography Based on a Nanoscale Polymer Shadow Mask: Towards Organic Nanoelectronics**, Org. Nanoele. Sci. Rep., 5, 10220, 1-8 (2015).
- 351- K. Bhargava, M. Shukla and V. Singh, **Comparative analysis of contact resistance and photoresponse in poly(3-hexylthiophene) and poly(3-octylthiophene) based organic field-effect transistors**, Synth. Met., 233, 15-21, (2017).
- 352- Z. Zhu, J. Wang and B. Wei, **Self-assembly of ordered poly(3-hexylthiophene) nanowires for organic field-effect transistor applications**, Phys., 59, 83-87, (2014).
- 353- S. Cho and K. Lee, **Thermal annealing-induced enhancement of the field-effect mobility of regioregular poly (3-hexylthiophene) films**, J. of App. Phys., 100, 114503, (2006).
- 354- G.V. Leite, E. Ettenb, M. Forteb and H. Boudinova, **Degradation of current due to charge transport in top gated P3HT-PVA organic field effect transistors**, , Synth. Met., 229, 33-38, (2017).
- 355- S.P. Tiwari, V. R. Raolt, H. S. Tan, E. B. Namdas and S. G. Mhaisalka, **Pentacene Organic Field Effect Transistors on Flexible substrates with polymer dielectrics**, Restrictions apply, 1, 4244-0585, (2007).

- 356-D. J. Gundlach, L. Zhou, J. A. Nichols, T. N. Jackson and P. V. Necliudov, **An experimental study of contact effects in organic thin film transistors**, J. Appl. Phys., 100, 024509, (2006).
- 357-X. Yu, J. Yu, W. Huang, L. Zhang, and H. Zeng, **Source/drain electrodes contact effect on the stability of bottom-contact pentacene field-effect transistors**, AIP Adv., 2, 022113, (2012).
- 358-J. A. Frescas, M. A. Khan and H. N. Alshareef, **Polymer ferroelectric field-effect memory device with SnO channel layer exhibits record hole mobility**, Sci. Rep., 4, 5243, (2014).
- 359-M. Torrent, D.d. Boer, M. Durkut and A.P. Schenning, **Field effect transistors based on poly(3-hexylthiophene) at different length scales**, Nanotech., 15, 265-269, (2004).
- 360-S. Liu, C. Lee, H. Tai, J. Wen, J. Lee and C. Chen, **In situ Electrical Characterization of the Thickness Dependence of Organic Field-Effect Transistors with 1-20 Molecular Monolayer of Pentacene**, App. Mat. and interface, 2, 8, 2282–2288, (2010).
- 361-S. Cho and K. Leea, **Thermal annealing-induced enhancement of the field-effect mobility of regioregular poly(3-hexylthiophene) films**, J. of App. Phys., 100, 114503, (2006).
- 362-J. Y. Na, B. Kang, D. H. Sin, K. Cho & Y. D. Park, **Understanding Solidification of Polythiophene Thin Films during Spin-Coating: Effects of Spin-Coating Time and Processing Additives**, Sci. Rep., 5,13288, (2015).
- 363-B. Park, A. Aiyar, J. Hong, and E. Reichmanis, **Electrical Contact Properties between the Accumulation Layer and Metal Electrodes in Ultrathin Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) Field Effect Transistors**, ACS App. Mat. Interf, 3, 1574-1580, (2011).
- 364-R. Schroeder, L. A. Majewski, and M. Grell, **Improving organic transistor performance with Schottky contacts**, App. Phys. Let., 84, 6, (2004).
- 365-H. Jia, S. Gowrisanker, G.K. Pant, R.M. Wallace, and B.E. Gnade, **Effect of poly (3-hexylthiophene) film thickness on organic thin film transistor properties**, J. of Vac. Sci. & Tech. A, 24, 1228, (2006).
- 366-Y. Ran, L.Z. Dong, H.Y. Feng, C.S. Bo, T. Feng, H.Y. Bing and L.X. Jun, **Effects of gate dielectric thickness and semiconductor thickness on device performance of organic field-effect transistors based on pentacene**, Tech. Sciences, 57, 6, 1142-1146, (2014).
- 367-W. Wang, D. Ma, S. Pan and Y. Yang, **Hysteresis mechanism in low-voltage and high mobility pentacene thin-filmtransistors with polyvinyl alcohol dielectric**, Appl. Phys. Lett., 101, 033303, (2012).
- 368-H. Avila, P. Serrano, A. Barreto, Z. Ahmed, C. Gouvea, C. Marchiori and M. Cremona, **High hole-mobility of rrP3HT in organic field-effect transistors using low-polarity polyurethane as gate dielectric**,Org.Elec.,58,33-37,(2018).

- 369-D. Choi, T.K. An, Y.J. Kim, D.S. Chung, S.H. Kim and C.E. Park, **Effects of semiconductor/dielectric interfacial properties on the electrical performance of top-gate organic transistors**, Org. Ele., 15, 1299-1305, (2014).
- 370-S. H. Kim, W. M. Yun, O. Kwon, K. Hong, C. Yang, W. Choi and C.E. Park, **Hysteresis behaviour of low-voltage organic field-effect transistors employing high dielectric constant polymer gate dielectrics**, Appl. Phys., 43,465102, (2010).
- 371-A. Nawaz, C.d. Col, I. Cruz-Cruz, A. Kumar, A. Kumar and I.A. Hummelgen, **Gate dielectric surface treatments for performance improvement of poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) based organic field-effect transistors**, Org. Sen. and Bioelect. VIII, 95681A,1, (2015).
- 372-Y. Noh, H. Sirringhaus, **Ultra-thin polymer gate dielectrics for top-gate polymer field-effect transistors**, Organic Electronics 10, 174-180, (2009).
- 373-P. Deng, Y. Lei, X. Zheng, S. Li, J. Wu, F. Zhu, B. S. Ong and Q. Zhang, **Polymer based on benzothiadiazole-bridged bis-isoindigo for organic field-effect transistor applications**, Dyes and Pigments 125, 407-413, (2016).
- 374- C. Lee, C. Hsu, I. Chen, W. Wu and C. Lin, **Percolation of Carbon Nanoparticles in Poly(3-Hexylthiophene) Enhancing Carrier Mobility in Organic Thin Film Transistors**, Adv. in Mat. Scie. and Eng., ID 878064, (2014).
- 375-Y.D. Park, J.A. Lim, Y. Jang, M. Hwang, H.S. Lee, H.Lee, and K. Cho, **Enhancement of the field-effect mobility of poly(3-hexylthiophene)/functionalized carbon nanotube hybrid transistors**, Org. Ele., 9317-322, (2008).
- 376-V. Ballarotto, H. E. Katz, M. S. Fuhrer, E. D. Williams, J. Huang, D. R. Hines, B. J. Jung, A. Tunnell, J. Cumings, **Polymeric semiconductor/graphene hybrid field-effect transistors**, Org. Ele. 12, 1471-1476, (2011).
- 377-C.Lin, C.Hsu, I.Chen, C.Lee and W. Wu, **Enhancement of carrier mobility in all-inkjet-printed organic thin-film transistors using a blend of poly(3-hexylthiophene) and carbon nanoparticles**, Thin Solid Films, 519, 8008-8012, (2011).
- 378-M. Reyes-Reyes, D.L. Carroll, W. Blau, and R. Lopez-Sandoval, **Materials and Devices for Organic Electronics**, J of Nanotech, ID 589241, 2, (2011).
- 379-M. Tonga, L. Wei, E. Wilusz, L. Korugic-Karasz, F.E. Karasz and P.M. Lahti, **Solution-fabrication dependent thermoelectric behavior of iodine-doped regioregular and regiorandom P3HT/carbon nanotube composites**, Synth. Met., 239, 51-58, (2018).
- 380-S. M. Obaidulla, D. K. Goswami, and P. K. Giri, **Low bias stress and reduced operating voltage in SnCl₂Pc based n-type organic field effect transistors**, App. Phys. Lett., 104, 213302, (2014).
- 381-Y. Jang, D. H. Kim, Y. D. Park, J. H. Cho, M. Hwang, and K. Cho, **Influence of the dielectric constant of a polyvinyl phenol insulator on the field-effect mobility of a pentacene-based thin-film transistor**, App. Phys. Lett., 87, 152105, (2005).

- 382-Y. Huang, K. Wu, M. Bell, A. Oakes, T. Ratcliff, N. A. Lanzillo, C. Breneman, B. C. Benicewicz and L. S. Schadler, **The effects of nanoparticles and organic additives with controlled dispersion on dielectric properties of polymers: Charge trapping and impact excitation**, J. of App. Phys., 120, 055102 (2016).

البحوث المنشورة والمقبولة للنشر

The Study of Carbon Nano-particles (CNPs) & Film Thickness & Temperature Effect on the Electrical Properties of Poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl)

Nadhim .A. Abdullah¹ Waleed Ali Hussein² Hussein falaih Hussein²

1.Polymer Research Centre/ University of Basra / Basra / Iraq

2.Department of Physics/ College of Education for Pure Sciences/ Basra University

Abstract

A thin films of a neat and a doped of P3HT in (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) CNPs concentrations were fabricated by a spin coating method in multi revolution speeds (1000, 1500, 2000, 2500, 3000)rpm on glass substrate for thin film thickness measurement, and other films were fabricated on aluminum interdigitated finger electrodes of ceramic substrates for I-V characteristics measurement. The film thickness of the fabricated thin films of neat and doped P3HT was found in direct proportional to CNPs concentration in every revolution speed, and in reciprocal proportional to the revolution speed for every CNPs concentration. I-V characteristics were measured at (303, 313, 323, 333, 343)°K temperature for all thin films in the voltage range to equal or less than (10 V), which presents an ohmic behavior of all samples. The surface electrical conductivity (σ_s) of samples was calculated from a slope of ohmic lines, the results shows an electrical semiconductor behavior for all neat and doped P3HT deposited films. On the other hand, an increasing of a surface conductivity of samples with an increase of CNPs doping concentration from (0%) to (5%) in every temperature and revolution speed. Its observed from the results that the electrical conductivity was decreased with film thickness increasing for neat and doped P3HT films in any one of temperature range. An activation energy (E_a) of the fabricated thin films was calculated from the slope of linear relation between conductivity an inverse of temperature, its observed that the activation energy decreasing for doped case P3HT in comparison with neat polymer, and its decreasing with an increase of the CNPs doping ratio. Also its clear that activation energy, increasing with increasing film thickness of the neat and doped P3HT.

Introduction

The researchers work concentrated on characteristics development and ability to assignment of the organic materials in advance application after its become an inorganic materials alternatives, because of its effective applications in integrated circles and devices which are distinguished by cheap, large area, light weight, transparency, fixable, environmentally friendly, solution process able deposition and low power requirement in fabrication and operation cases. The studies accelerated in synthesized of organic semiconductor materials and its devices fabricating methods, it's beginning of improvement of its electrical, optical, thermal and mechanical properties. The modern applications such as larger flexible displays, Processors & Memories, Electronic textiles, Biochemical Detectors, mobiles, thin film batteries, touch screens, Organic Light Emitting diodes & Field Effect Transistors and Photovoltaic all these and others come out of these efforts which called organic electronics. Organic (or plastic) electronics are a branch of electronics that based on the using of organic conductors and semiconductor materials as an active medium in design and fabrication organic devices.⁽¹⁻¹⁰⁾

At the beginning, after a few years of poly-acetylene (PA) film deposition as a semiconductor medium in 1974, it was proved the enhanced ability of doping processes on its electrical conductivity. This concept has developed and implemented on many polymers such as Poly-thiophenes (PT) and poly-pyrroles (PP). The unique electrical and electronic properties of the organic π -conjugated backbone (semiconductors & conducting) material are attractive candidates for modern electronic devices. The doping techniques of these polymers by modification of their electronic structure, such as the generation of new states in the band-gap enable to controlling on its electrical conductivity be reversibly varied from the insulating to the metallic phase.⁽¹¹⁻¹²⁾

The composite material is an incorporation of metal or its salts and inorganic semiconductors into polymers as a monomolecular or aggregated, which can be fabricated as a thin films by using solution processes (or by evaporation of insoluble organic materials) from mixing a dissolved polymer with a homogeneously dissolved or dispersed solid filler particles. The basic development of the materials science in the last few decades is by the advancement of nanotechnology, which have contributed in improvement of organic semiconductor materials.⁽¹³⁻¹⁴⁾

One of important p-type organic materials is poly (3-hexylthiophene) (P3HT), which is classified among more studied organic materials in the fields of sensors, photovoltaic and organic field effect transistor. P3HT is one of polythiophene derivatives, which able to forming an active layer modern organic electronics, and at the same time its capabilities in direct touch with a solution even aqueous media. It's soluble in solvents and suitable to deposit with a solution deposition method as a spin coating, dip coating, drop coating and printing. P3HT



no.
date.

ISSN-1994-697X **مجلة ميسان للدراسات الأكاديمية**
Misan Journal of Academic Studies - Misan University - Iraq
كلية التربية / جامعة ميسان / العراق



العدد / ٨٦
التاريخ ٢٠١٨/١١/٢٤

إلى / طالب الدكتوراه ناظم عبد أجليل عبد الله

١. د. وليد علي حسين المحترم

١. د. حسين فالح حسين المحترم

جامعة البصرة / مركز البحوث البوليمر



م / قبول نشر

نهدىكم أطيب التحيات

تدارست هيئة تحرير المجلة بحثكم الموسوم

**The Study of Effect of the Active Layer Thickness on the
Electrical properties of Organic Thin Film Transistor.**

فوجدته صالحاً للنشر وسينشر في أعداد المجلة القادمة إن شاء الله.

مع وافر الاحترام والتقدير ...

أ.م.د. عصام جهم عبد الشاوي

مدير التحرير

٢٠١٨/١١/٢٤

The Study of Effect of the Active Layer Thickness on the Electrical properties of Organic Thin Film Transistor.

Nadhim A. Abdullah¹, Waleed Ali Hussain² and Hussain falih Hussain².

1-Polymer Research Centre/ University of Basra / Basra / Iraq.

2- Department of Physics/ College of Education for Pure Sciences/ Basra University.

E-Mail: nadhim_2011@yahoo.com

ABSTRACT:

In the present work, we are studied the effect of the active layer thickness in organic field effect transistor (OFET) on some of its electrical parameters. Organic field effect transistor in top gate-bottom contact (TG-BC) configuration was fabricated of thin films of Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) as an active layer, and polyvinyl alcohol (PVA) as a gate dielectric layer. OFET was made at AL/PVA/P3HT/Au structure, by using masks and required instrument which were manufactured in lab, in constant conductance channel width ($W=1\text{mm}$) and length ($L=60\mu\text{m}$). The dielectric layer of polyvinyl alcohol (PVA) was deposited in constant revolution speed (1000rpm) by spin coating method, which its electrical capacity per unit area at AL/PVA/Au sandwich structure is ($C_i=223\text{ nF/cm}^2$). While the semiconducting polymer was deposited in multi revolution speeds (1000, 1500, 2000, 2500, 3000) rpm to obtain a different active layer thickness. The source and drain electrodes were made of (99.99% purity) gold, and gate electrode was made of (99% purity) aluminum.

The results shown that all devices were operating in enhancement (accumulation) mode. The calculation and finding of OFET some parameters was done after measurement of output and transfer characterizations, the results of the saturation mobility and the ratio of on current case to off current case evident the increasing with decreasing of semiconductor layer thickness from 1000 until 2500rpm revolution speed, and decreasing at 3000rpm, due to the increasing of the resistance of the conduction channel by increasing of active layer thickness, because of the increasing of roughness of the active layer surface with decreasing the revolution speed of the spin coating deposition method. This increasing of roughness at interface -where the conduction channel is formed- will induce a charge traps that inhibit the transfer of charge carriers in the interface between the active layer and the gate insulator layer, which negatively affects the channel current value and the mobility of the charge carriers and increasing the threshold voltage in the organic field effect transistor. In addition to, the reduce of the thickness of the semiconductor layer is basically increasing the electrical conductivity, because its reducing the defects of crystalline and increase the regularity of polymer chains within the polymeric lattice, as well as, increasing the overlap between the orbits of π orbital, which increases the mobility of charge carriers. The best characteristic of the organic field effect transistor is when the thickness of an active layer corresponding to (2500rpm), which has the highest saturation mobility value ($5.86 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{Vs}$) and ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}= 786$), and lowest threshold voltage (-22V) and channel resistance ($9.57 \times 10^5\ \Omega$).

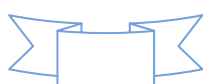
Keywords: Organic field effect transistor OFET, Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT), Polyvinyl alcohol (PVA), Thin film, Mobility, Threshold voltage, Channel resistant.

ABSTRACT

The study of the electrical properties of thin films of pure semiconducting polymer poly(3-hexyl-thiophine)-P3HT and poly(vinyl-alcohol)-PVA as insulating one, and the effect of membrane thickness, temperature and doping with a different percentages (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) of carbon nanoparticles (CNPs) is the objective of our current study. In addition to the manufacture of masks and laboratory tools required for the purpose of manufacturing of an organic field transistors from these polymers, and study the electrical properties and the influence of the doping process on these properties.

The effect of the PVA doping process with Carbon Nanoparticles (CNPs) was studied at (1%,5%) ratios on the synthetic properties of the thin films manufactured, it's found to reduces the crystalline grains volumes and re-diffusion the crystals, where all films are semi-crystalline, as a results of the XRD tests.

The effect of the P3HT doping process with Carbon Nanoparticles (CNPs) was studied at (1%, 5%) ratios on the morphological and synthetic properties of the thin films manufactured, it's found to reduces the crystalline grains volumes and re-diffusion the crystals, where the roughness and root mean square were reduced at 1%CNPs and increased at 5% CNPs, where all films are semi-crystalline, as a results of the AFM tests. It's found that the increasing of revolution speed of spin coating method decreased the film thickness of P3HT thin films, with the same practical procedures as the time (1min.), thermal annealing and solution properties. The film thickness increases with the addition of CNPs, as a results of the ellipsometer tests. A study of the optical properties of polymer P3HT by UV-VIS spectroscopy measurements showed that increasing both the thickness of the thin film prepared and the variability



in the different ratios of carbon nanoparticles increasing the absorbance, reducing the emission. The doping process of polymeric films reducing the optical energy gap between (1.96-1.92eV), and this influence increasing with concentration of CNPs.

The study of the electrical characteristics of the polymer P3HT shown the effect of increasing both the thickness of the membrane and the different percentages of carbon nanoparticles and the temperature to increasing the surface electrical conductivity between (5.15×10^{-5} - 7.58×10^{-4} S/cm) and reduce the activation energy of the prepared thin films between (0.46-0.0872 eV). The electrical conductivity of the membrane increases by reducing the thickness of the membrane and increasing both the temperature and the concentration of CNPs.

The results of the study of MIM properties of AL/(PVA +% CNPs)/AL structure at 1KHz frequency shown that the dielectric insulation constant of the pure PVA membranes increased when it have doped by different percentages of CNPs. The dielectric constant of PVA was increased between (9.6-10.45) when the concentration of CNPs was increased. The thickness of a prepared thin films and the addition ratio of CNPs and the temperature have an effect on the electrical capacity per unit area of AL/(PVA+CNPs%)/Au, at 1KHz frequency study. This effect is increased by varying each of these effects. The study of the electrical properties of the metal-insulator-semiconductor (MIS) has also demonstrated the nature of the effect of frequency changing through a C_i -F characteristic, and the effect of applied voltage change by the C_i -V characteristic on the electrical capacity of a (AL/PVA /P3HT/Au) structure, which was shown the possibility to manufacturing of OFET from these polymers by same procedure.



In addition, the effect of the conduction channels length of the electrical properties of the field effect transistor (PVA/P3HT-OFET) at TG-BC structure -after the manufacture of all necessary instruments and masks in laboratory- was studied, with a constant thickness of the dielectric layer (1000rpm) and (2000rpm) of P3HT. All the transistors was seems to be accumulation type. Where the reducing of the channel length is reduce it resistance and thus increases both the channel current, the charge carrier mobility and the threshold voltage increase. The electrical parameters of the device were changed by reducing the length of the channel from (60-120 μm). At 40 μm of the channel length the short channel effect was appeared. Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage was: ($\mu_{\text{sat}}=5.43 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-23 \text{ V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=447$), ($R_{\text{ch}}=1.05 \text{ M } \Omega$).

The effective of the active layer thickness (P3HT) in the PVA/P3HT-OFET was appeared to has a clear effect on its electrical characteristics, where the reducing of the thickness of the active layer reduces (between 334-177nm) the resistance of the conduction channel and thus increases both the current of the channel and the mobility of the charge carriers and reduces the threshold voltage. Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage (at 203nm) was: ($\mu_{\text{sat}}=5.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-23\text{V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=753$), ($R_{\text{ch}}=1 \text{ M } \Omega$).

Where the reducing of the thickness of the PVA in the PVA/P3HT-OFET are leads to the transition from high-voltage operating transistors to low-voltage operating transistors, generally its reducing the resistant of the conduction channel and increasing both carrier mobility and threshold voltage reduction, Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage was: ($\mu_{\text{sat}}=1.16 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-0.9 \text{ V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=477$), ($R_{\text{ch}}=1.96 \text{ M } \Omega$). The study of the doping effect of P3HT with CNPs in the different ratios of PVA/ (P3HT+%CNPs)-OFET, showed that the doping process leads to reducing the resistance of the conduction channel and



thus changing both the mobility of the charge carriers and the threshold voltage, Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage was (at 3%): ($\mu_{\text{sat}}=1.41 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-1.2 \text{ V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=199$), ($R_{\text{ch}}=2.82 \text{ M } \Omega$).

The study of the effect of the doping of the gate insulating layer PVA with different ratios of CNPs in the transistor (PVA+%CNPs)/P3HT-OFET leads to increasing the resistance of the conduction channel and affects of the concentration of the accumulated charge and the mobility of the charge carriers and the threshold voltage. Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage was (at 5%):

($\mu_{\text{sat}}=1.53 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-1.1 \text{ V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=131$), ($R_{\text{ch}}=5.28 \text{ M } \Omega$).

Finally, a study of the effect of the doping of both P3HT and PVA layers with CNPs showed a changing of all electrical parameters of (PVA+%CNPs)/(P3HT+%CNPs)-FET, the resistance of the conduction channel, the mobility of the charge carriers and the threshold voltage. Where the electrical parameters of the best OFETs in this stage was: (PVA+2%CNPs)/(P3HT+5%CNPs)-OFET is the transistor with an electrical parameters ($\mu=2.46 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ($V_{\text{th}}=-1.4 \text{ V}$), ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=116$), ($R_{\text{ch}}=1.77 \text{ M } \Omega$), which is the best device in our study.





Study Of The Effect Of Carbon Nano particles (CNPs) On The Electrical Properties Of The Polymer (P3HT) To Be Used In Manufacturing An Organic Field Effect Transistor (OFET).

A thesis

**Submitted to the College of Education of Pure Science
University of Basrah
in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in physics.**

By

Nadhim Abdull-Jaleel Abdullah Al-Khamseen.

B.Sc. 1999, M.Sc. 2002

2018