4. انتقال حاملات الشحنة The charge carriers Transport

انتقال حاملات الشحنة هو عملية تحرك الإلكترونات والثقوب داخل المادة، وهو أمر جوهري لفهم سلوك أشباه الموصلات وتطبيقاتها مثل الخلايا الشمسية، الثنائيات، والترانزستورات.

أنواع انتقال حاملات الشحنة في أشباه الموصلات:

1. الانتقال بالتوصيل(Conduction) : يتم هذا الانتقال عند وجود مجال كهربائي خارجي (مثل فرق الجهد). الإلكترونات في نطاق التوصيل تتحرك باتجاه القطب الموجب، بينما الثقوب في نطاق التكافؤ تتحرك نحو القطب السالب. يُطلق على هذا الانتقال الانجراف.(Drift Transport)
2. الانتقال بالانتشار (Diffusion) يحدث عندما يوجد تدرج في تركيز حاملات الشحنة (اختلاف في كثافتها عبر المادة):
   - الإلكترونات تتحرك من المناطق ذات التركيز العالي إلى المناطق ذات التركيز المنخفض، والعكس صحيح للثقوب.
   - يحدث هذا بشكل شائع في وصلة p-n، حيث يتشكل المجال الكهربائي الداخلي نتيجة لتوزيع حاملات الشحنة.

Dr. Saeed Jabbar Abbas, Dept.Physics ; Collage of Science, 2024-2025

3. الانتقال الحراري:(Thermal Motion)
   - عند درجات الحرارة المرتفعة، تتحرك الإلكترونات والثقوب عشوائيًا بسبب الطاقة الحرارية.
   - هذا النوع من الانتقال لا يُساهم في التيار الكهربائي الصافي إلا إذا كان هناك مجال كهربائي أو تركيز متفاوت لحاملات الشحنة.

آليات انتقال حاملات الشحنة في الأجهزة:

✓ .1في وصلة p-n :

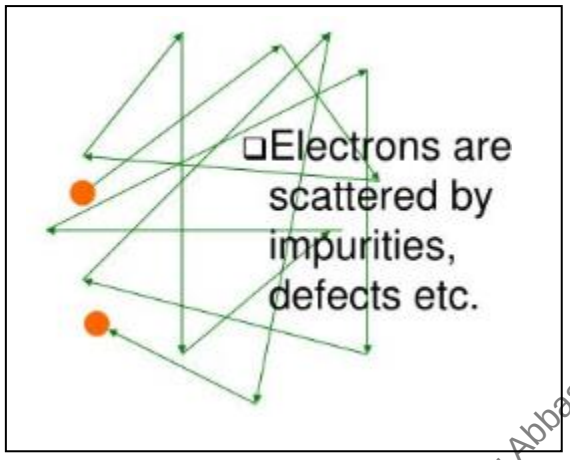
- في وصلة p-n ، يتسبب التلامس بين المادة p (الغنية بالفجوات) والمادة n (الغنية بالإلكترونات) في انتقال الإلكترونات من النطاق n إلى النطاق p والفجوات في الاتجاه المعاكس.
- هذا يؤدي إلى تشكيل منطقة الاستنزاف (Depletion Region) التي تحتوي على شحنة ثابتة ومجال كهربائي داخلي.

✓ .2في الخلايا الشمسية:

- عندما يسقط الضوء على الخلية الشمسية، يتم توليد أزواج الإلكترونات-الفجوات.
- يتحرك الإلكترون نحو الجانب n (نتيجة للمجال الكهربائي)، والفجوات نحو الجانبp ، مما يخلق تيارًا كهربائيًا عند توصيل حمل خارجي.

العوامل المؤثرة على انتقال حاملات الشحنة:

- المجال الكهربائي: يحفز حركة حاملات الشحنة بالانجراف.
- تدرج التركيز: يؤدي إلى انتقال حاملات الشحنة بالانتشار.
- درجة الحرارة: تؤثر على كثافة حاملات الشحنة الحرة وحركتها.
- المقاومة والعيوب البلورية: تحد من انتقال حاملات الشحنة وتزيد من احتمالية إعادة التركيب.



حركة الشحنات: توصف من خلال الكميات التالية:

التوصيلية: σ وهي مقلوب المقاومة النوعية

التحركية: μ تُعرَّف قابلية الحركة (μ) بأنها سرعة الإنجراف (v_d) لحاملات الشحنة لكل وحدة مجال كهربائي (E)

الحركة في عدم وجود مجال كهربائي مسلط عشوائية- جميع الالكترونات وحرارية – توزيع الطاقة

ماذا يحدث عند تسليط مجال؟

آليات نقل الشحنات هي نماذج نظرية تهدف إلى الوصف الكمي (المقداري) لتدفق التيار الكهربائي عبر وسط معين.

والمواد الصلبة البلورية Crystalline solids والمواد الصلبة الجزيئية molecular solids هما حالتان متطرفتان متعاكستان من المواد التي تُظهر آليات انتقال(توصيل) مختلفة إلى حد كبير. ففي حين أن التوصيل في المواد الصلبة الذرية يكون التوصيل داخل الجزيئات، والمعروف أيضًا باسم النقل الحزميband transport ، يكون النقل في المواد الصلبة الجزيئية بين الجزيئات، والمعروف أيضًا باسم توصيل القفز hopping transport. وينتج عن الآليتين المختلفتين حركيات شحنات charge mobilities. مختلفة.

5. التوليد وإعادة الاتحاد Generation and Recombination

Dr. Saeed Jabbar Abbas; Dept.Physics ; College of Science; 2024-2025

يعرَّف توليد الحاملات بأنه العملية التي يتم من خلالها توليد الإلكترونات والفجوات وإعادة الاتحاد هي العملية التي يتم من خلالها فناء الإلكترونات والفجوات. وبعبارة اخرى هي العملية التي يتم من خلالها توليد الإلكترونات الحرة والفجوات في زوج تسمى زوج الكترون- فجوة (Electron-hole pair, EHP).

6. تفاعل الضوء مع شبه الموصل Interaction of light with the semiconductor

تشير التأثيرات الضوئية بشكل عام إلى الظواهر الناتجة عن تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. ويمكن اعتبار عملية التحويل هذه عكس عملية التلألؤ(او أنبعاث) الكهربائي electroluminescence . ومع ذلك، فإن معايير تحقيق التحويل مختلفة. في حالة التلألؤ الكهربائي، لا ينتج الضوء إلا من إعادة الاتحاد الإشعاعي radiative recombination، ويمكن أن تكون الحاملات الشحنة المشاركة في إنتاج الضوء حرة أو مقيدة. ولكن بالنسبة للتأثيرات الكهروضوئية، يجب أن ينتج الامتصاص الضوئي حاملات حرة، ويجب أن تكون الحاملات المشاركة في توليد الفولتية الضوئية حرة (متحركة).

الجهاز الكهروضوئي photovoltaic device هو عبارة عن ثنائي ضوئي يمكن أن تتولد فيه أزواج الإلكترونات-الفجوات عن طريق امتصاص الفوتون، ويتم فصلها بمجال، إما بسبب انتشار هذه الحاملات المولدة ضوئياً باختلاف تحركيتها في المادة،او بسبب جهد الوصلة (أو جهد الانتشار) الناتج عن التلامس بين مادتين مختلفتين.

تتضمن أي تأثيرات ضوئية تحدث في مادة صلبة ما يلي:

امتصاص الضوء في المادة الصلبة، حاملات الشحنة المتحركة الناتجة عن الامتصاص، عدم انتظام داخلي أو توزيع غير منتظم للشوائب أو العيوب مما يؤدي إلى إنشاء مجال كهربائي داخلي لفصل نوعي للحاملات.

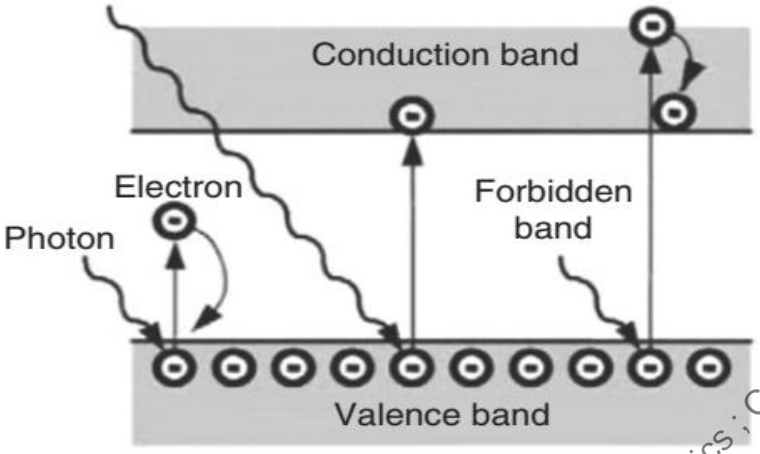
التلامس الكهربائي : ويؤدي امتصاص الفوتونات إلى توليد حاملات أغلبية وحاملات أقلية. في العديد من التطبيقات الكهروضوئية، يكون عدد الحاملات المولدة للضوء أقل من عدد حاملات الأغلبية الموجودة بالفعل في الخلية الشمسية بسبب التشويب. وبالتالي، لا يتغير عدد حاملات الأغلبية في أشباه الموصلات المضيئة بشكل كبير. ومع ذلك، فإن العكس صحيح بالنسبة لعدد حاملات الأقلية. فعدد حاملات الأقلية المولدة ضوئيًا يفوق عدد حاملات الأقلية الموجودة في الخلية الشمسية المشوبة في الظلام (لأن تركيز حاملات الأقلية في التشويب يكون صغيرًا جدًا)، وبالتالي يمكن تقريب عدد حاملات الأقلية في الخلية الشمسية المضيئة بعدد الحاملات المولدة ضوئيًا.

بالطبع، لا يتم امتصاص جميع الفوتونات. فالفوتونات، اعتماداً على طاقتها ($E_p=hc/\lambda$) ، وكذلك على سمك ونوع مادة أشباه الموصلات، لها خيارات مختلفة: يمكن أن تنفذ الفوتونات وتمر عبر أشباه الموصلات (وفي هذه الحالة تعتبر أشباه الموصلات شفافة)، أو يمكن أن تنعكس من السطح العلوي، أو يمكن أن تمتص. يعتبر الضوء النافذ أو المنعكس ضياعًا، وبالتالي فإن علم البصريات مهم للغاية لتقليل نسبة الضوء المنعكس. بالنسبة للأطوال الموجية التي تهمنا في العمل الشمسي،

Dr. Saeed Jabbar Abbas, Dept. Physics, College of Science, 2021-2023

ينعكس أكثر من 30% من الضوء من السيليكون، وهو رقم يعيق كفاءتنا إلى حد كبير. فيما يلي الاحتمالات الأساسية لمصير الفوتون بناءً على طاقته، حيث E_P هي طاقة الفوتون القادم وEg هي الطاقة اللازمة لعبور فجوة الحزمة:

- ✓ $E_P < Eg$: طاقة الفوتون واطئة، يجعل أشباه الموصلات شفافة، ويمر الفوتون من خلالها.
- ✓ $E_P = Eg$: يمتلك الفوتون طاقة كافية لإثارة إلكترون في حزمة التوصيل، ومن ثم تكون الطاقة المهدرة قليلة.
- ✓ $E_P > Eg$: يمتلك الفوتون طاقة أكثر من كافية لإثارة إلكترون، لذا فإن أي إلكترون مثار يطلق هذه الطاقة بسرعة في صورة حرارة ويعود إلى حافة حزمة التوصيل.



الشكل يوضح ان الالكترونات ترتفع من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل بعد امتصاصها طاقة الفوتونات الساقطة على شبه الموصل

Dr. Saeed Jabbar Abbas; Dept.Physics ; Collage of Science 2024-2025

التأثير الكهروضوئي هو العملية التي يتم من خلالها تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية باستخدام المواد شبه الموصلة. يحدث ذلك من خلال الخلايا كهروضوئية، المعروفة عادةً بالخلايا الشمسية. إليك شرحًا لكيفية عملها:

1. **امتصاص الضوء** :عندما تسقط أشعة الشمس على سطح الخلية الكهروضوئية، يتم امتصاص الطاقة من الضوء (على شكل فوتونات) بواسطة المادة شبه الموصلة، عادةً السيليكون.
2. **توليد أزواج الإلكترونات والفجوات** :الطاقة الممتصة تثير الإلكترونات في المادة شبه الموصلة، مما يسمح لها بالتحرر من الروابط الذرية. هذا يخلق أزواجًا من الإلكترونات والفجوات. الإلكترونات التي يمكن أن تتحرك بحرية والفجوات التي تعمل كحاملات شحنة موجبة.
3. **فصل الشحنات** :تحتوي الخلية الكهروضوئية على مجال كهربائي داخلي (تم إنشاؤه من خلال اتحاد نوعين من المواد شبه الموصلة (نوع P ونوع N). يساعد هذا المجال في فصل الإلكترونات والفجوات، موجهًا الإلكترونات نحو الطبقة من نوع P والفجوات نحو الطبقة من نوع .N)

إن الازاحة بين الحزم، وهو مجرد الفرق بين موقع مستوى فيرمي في المنطقة n ومستوى فيرمي في المنطقة p، يسمى الجهد الحاجز V_{BI}، يبقي هذا الجهد الداخلي معظم الفجوات في المنطقة p، والإلكترونات في المنطقة n. وهو يوفر حاجزًا

يمنع تدفق التيار عبر الوصلة. (في مخطط الحزمة، علينا أن نضرب الجهد المدمج V_{BI} في شحنة الإلكترون، q حتى نتمكَّن من تمثيل الإزاحة في الطاقة بدلالة الإلكترون فولت، وهي وحدة طاقة الجهد المستخدمة في مخططات الحزم).

يشير الجهد الناشئ من حركة الحاملات (المعروف أيضًا باسم الجهد الذاتي) في الوصلة PN إلى فرق الجهد الكهربائي الذي يتطور عبر الوصلة عندما يتم تجميع شبه موصل من النوع p وشبه موصل من النوع n معًا لتكوين وصلة. وينشأ فرق الجهد هذا بسبب الاختلاف في تركيز حاملات الشحنة (الفجوات في النوع p والإلكترونات في النوع n) على جانبي الوصلة.

عندما يتم تلامس أشباه الموصلات من النوع p والنوع n، تنتشر الإلكترونات من منطقة النوع n (التي تحتوي على إلكترونات زائدة) إلى منطقة النوع p (التي تعاني من عجز في الإلكترونات أو فجوات زائدة)، وبالمثل، تنتشر الفجوات من منطقة النوع p إلى منطقة النوع n. وينتج عن ذلك:

تكوين منطقة النضوب او الاستنزاف Depletion region: تخلو هذه المنطقة من حاملات الشحنة الحرة لأن الإلكترونات من المنطقة من النوع n تتحد مع الفجوات في المنطقة من النوع p، مما يؤدي إلى تكوين ذرات مانحة ومتقبلة غير متحركة.

إنشاء مجال كهربائي: تولِّد الذرات المانحة المتأينة في الجانب n (التي أصبحت الآن موجبة الشحنة) والذرات المستقبلة المتأينة في الجانب p (التي أصبحت الآن سالبة الشحنة) مجالاً كهربائيًا يعارض انتشار المزيد من الحاملات.

ونتيجة لذلك، ينشا جهد كهربائي ذاتي عبر الوصلة، وهو المسؤول عن منع المزيد من انتشار الإلكترونات والفجوات. وهذا الجهد مهم لسلوك الثنائيات، حيث إنه يؤثر على كيفية تدفق التيار عبر الوصلة عند تطبيق جهد كهربائي خارجي.

Dr. Saeed Jabbar Abbas, Dept Physics, College of Science, 2024-2025

7. حقن حاملات الشحنة

يشير حقن حاملات الشحنة في الخلايا الشمسية إلى توليد الإلكترونات والفجوات (حاملات الشحنة) وحركتها داخل الخلية الشمسية لإنتاج تيار كهربائي. وتعد هذه العملية أساسية لتشغيل الخلية الشمسية، حيث تتيح تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء من خلال التأثير الضوئي. الخطوات الأساسية في حقن حاملات الشحنات

1. **امتصاص الفوتون**

- عندما تضرب أشعة الشمس الخلية الشمسية، يتم امتصاص الفوتونات بواسطة مادة شبه موصلة
- إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من فجوة حزم أشباه الموصلات، يتم استثارة إلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل، تاركاً وراءه فجوة في حزمة التكافؤ.

2. توليد حاملات الشحنة:

- يولد الفوتون الممتص زوجاً من الإلكترون والفجوة:

- إلكترونات: حاملات الشحنة السالبة في حزمة التوصيل. - فجوات: حاملات شحنة موجبة في حزمة التكافؤ.

3. **فصل حاملات الشحنة:**

- تُنشئ الوصلة p-n داخل الخلية الشمسية مجالاً كهربائياً.
- ويدفع هذا المجال الإلكترونات نحو الجانب n (الجانب السالب) والفجوات نحو الجانب p (الجانب الموجب)، مما يمنع إعادة الاتحاد ويفصل الشحنات.

4. **حقن حاملات الشحنات:**

- بمجرد فصل الإلكترونات والفجوات، يتم حقنهما في المناطق الخاصة بكل منها:
- تتحرك الإلكترونات نحو القطب الموجب. وتتحرك الفجوات نحو القطب السالب.
- تُنشئ هذه الحركة فرق جهد عبر الانحياز الأمامي.

5. تجميع حاملات الشحنة:

- تقوم الأقطاب الكهربائية الخارجية بتجميع الإلكترونات والفجوات، مما يسمح لها بالتدفق عبر الحمل.
- ويشكل هذا التدفق من حاملات الشحنة التيار الكهربائي الذي يمد الحمل بالطاقة.

Dr. Saeed Jabbar Abbas; Dept.Physics ; College of Science; 2024-2025

العوامل المؤثرة على حقن حاملات الشحنة

1. خصائص المواد:

- فجوة الطاقة: تحدد مدى فعالية المادة في امتصاص أشعة الشمس.
- الحركية: تسمح الحركية العالية بحركة أسرع لحاملات الشحنة.
- معدل إعادة الاتحاد: تضمن إعادة الاتحاد المنخفضة وصول المزيد من الناقلات إلى نقاط الاتصال.

2. تصميم الخلية الشمسية:

- الطلاءات المضادة للانعكاس: تقليل الانعكاس، وزيادة امتصاص الفوتون.
- مستويات التشويب: تحسين المجال الكهربائي لفصل الشحنات بشكل فعال.
- طبقات الخاملة: تقليل عيوب السطح التي تسبب فصل الشحنة الفعال: تقليل العيوب السطحية التي تسبب إعادة الاتحاد.

4. الظروف البيئية:

- درجة الحرارة: تزيد درجات الحرارة المرتفعة من إعادة الاتحاد، مما يقلل من الكفاءة.
- الإضاءة: تؤثر شدة الضوء وطيفه على عدد الحاملات المتولدة.

تعزيز حقن الشحنة (الحاملات)

1. الخلايا الشمسية المتراكبة: الجمع بين مواد متعددة ذات فجوات طاقة مختلفة لالتقاط مدى أوسع من الطيف الشمسي.

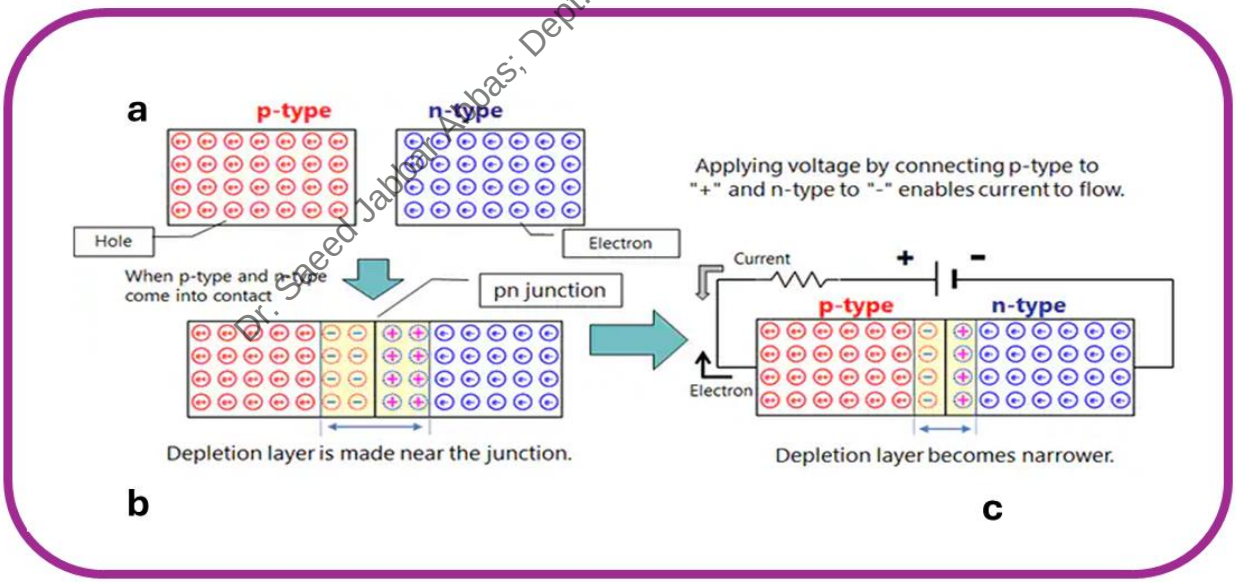
2. الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة: استخدام مواد مثل البيروفسكايت لتوليد وحقن ناقل الشحنة بكفاءة.

3. بنى متطورة: الخلايا ذات الوصلات المتغايرة والطلاء الخلفي العاكس الخامل (PERC) على تحسين الكفاءة من خلال تعزيز فصل الحاملات وتقليل الفقد.

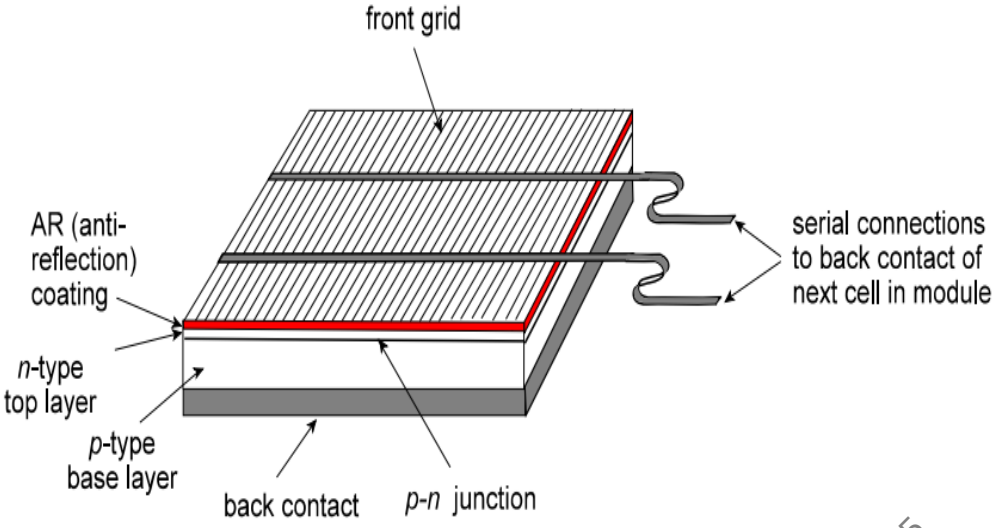
8. وصلة (او ثنائي) PN والخلية الشمسية PN Junction Diode and solar cell

في الوقت الحاضر، معظم الخلايا الشمسية تُصنع من نوعين من أشباه الموصلات، يُطلق عليهما السيليكون من النوع p والنوع n. وتتكون الخلية الشمسية من طبقة من السيليكون من النوع p موضوعة بجانب طبقة من السيليكون من النوع n (الشكل 1). في الطبقة من النوع n، يوجد فائض من الإلكترونات، وفي الطبقة من النوع p، يوجد فائض من الفجوات موجبة الشحنة (وهي عبارة عن فجوات بسبب نقص إلكترونات التكافؤ). وبالقرب من التقاء الطبقتين، تنتقل الإلكترونات الموجودة على أحد جانبي الوصلة (الطبقة من النوع n) إلى الفجوات الموجودة على الجانب الآخر من الوصلة (الطبقة من النوع p). وهذا يخلق منطقة حول الوصلة، تسمى منطقة الاستنزاف، حيث تملأ الإلكترونات الفجوات (الشكل 8).

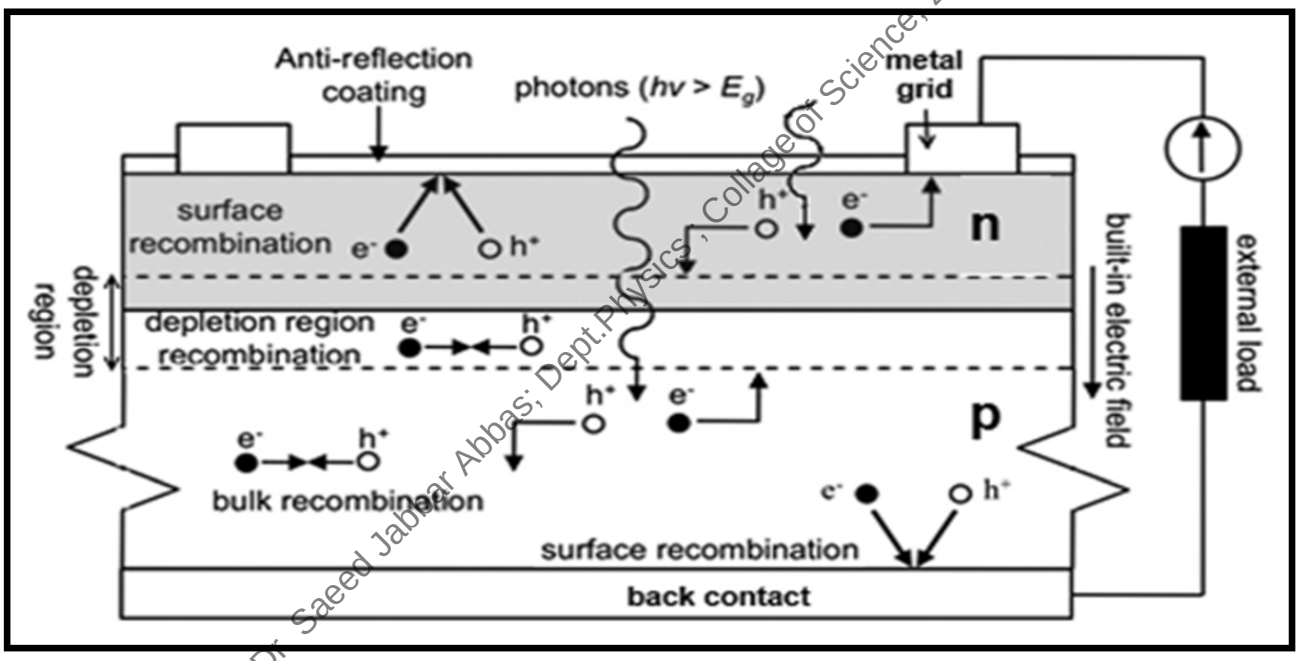
Dr. Saeed Jabbar Abbas; Dept.Physics ; College of Science; 2024-2025



الشكل (8) :- عملية تكوين وصلة PN (a) قبل عملية تلامس نوع N و نوع P (b) عند اتصال نوع N و نوع P (c) عند تسليط انحياز امامي على الوصلة تصبح منطقة الاستنزاف اضيق.



الشكل 8a: السمات الأساسية لخلية شمسية من السيليكون المتجانس.p-n



الشكل 9. (أ) رسم تخطيطي لخلية شمسية أحادية الوصلة مع باعث من النوع n على على قاعدة أساسية من النوع P. تساهم الحاملات الاضافية المتولدة والتي تجمع بواسطة المجال الكهربائي للوصلة في التيار الضوئي

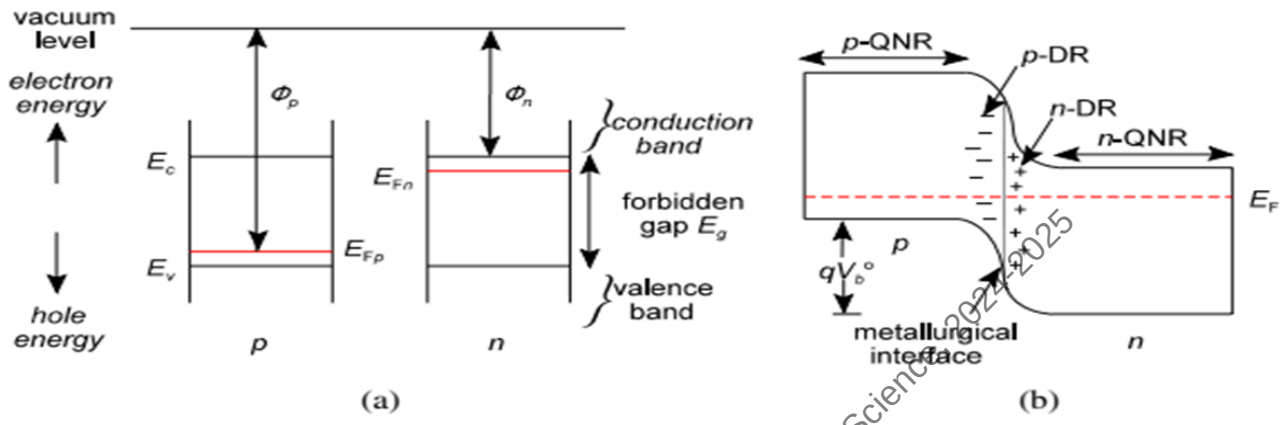
Dr. Saeed Jabbar Abbas; Dept.Physics, College of Science, 2024-2025

عند الاتزان : تتطابق مستويات فرمي على جانبي الوصلة p-N عندما تكون في حالة توازن. عند الوصلة، تحقق الإلكترونات والفجوات اتزانًا وتشكل منطقة استنزاف. يشير السهم المتجه لأعلى في الشكل إلى زيادة طاقة الإلكترونات. وهذا يشير إلى أنك ستحتاج إلى توفير طاقة لجعل الإلكترون يتحرك لأعلى المخطط وطاقة لجعل الفجوة تتحرك لأسفل المخطط.

عند الانحياز الأمامي: يتم جعل الجانب p أكثر موجب من أجل التحيز الأمامي للوصلة p-n، مما يجعلها "منحدرة" لهجرة الإلكترونات عبر الوصلة.يمكن ملء الفجوة القريبة من الوصلة بواسطة إلكترون يتحرك فوقها. ويمكن القول عندئذٍ أن الفجوة تتحرك يمينًا بينما

تتحرك من فجوة إلى فجوة أخرى يسارًا نحو الطرف الموجب.في الشكل، تتحرك الإلكترونات من اليمين إلى اليسار، ويشير الاتجاه التصاعدي إلى ارتفاع طاقة الإلكترون.

عند التحيز العكسي : يتم جعل الجانب p من الوصلة p-N أكثر سالبة للتحيز العكسي لها، مما يجعلها "صاعدة" للإلكترونات لعبور الوصلة.في الشكل، تجري الإلكترونات من اليمين إلى اليسار، ويشير الاتجاه التصاعدي إلى ارتفاع طاقة الإلكترونات.



الشكل 10- حزم الطاقة في الوصلة المتجانسة p-N في الظلام: (أ) في أشباه الموصِلات من النوع p والنوع n قبل التلامس، يوضِّح حزمتي التوصيل والتكافؤ E_c وE_v، والفجوة المحظورة E_g ومستويات فيرمي E_{Fn} وE_{Fn} (خطوط حمراء) في n و p (ب) عبر الوصلة المتجانسة p-n بعد التلامس و حالة الاتزان، مما يدل على الطبقة الكهربائية المزدوجة التي تشكلت عن طريق نقل الشحنة العابرة، ومناطق الاستنزاف (DRs) المناطق شبه المتعادلة (QNRs) ومستوى فرمي المشترك E_F في جميع أنحاء الجهاز.

Dr. Saeed Jabbar Abbas Dept.Physics - College of Science 2022-2025

9. خصائص الثنائي تحت الظلام Diode Characteristics under darkness

توفر الخصائص I-V للخلايا الشمسية المقاسة في الظروف المظلمة والمضيئة أداة مهمة لتقييم أداء الخلايا الشمسية. الخصائص المظلمة هي أسهل طريقة لتقدير جودة الوصلة والشبكة ومقاومات التلامس. العلاقة الرياضية لخصائص I-V المظلمة مع الأخذ بعين الاعتبار مقاومة التوالي والتوصيل التحويلة من خلال المعادلة التالية:

$$I = I_s \left[exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s) - 1\right)\right] + \frac{(V - R_s I)}{R_{sh}} \qquad (1)$$

حيث q هي الشحنة الإلكترونية، وk هو ثابت بولتزمان، وT هي درجة الحرارة المطلقة. I_s، n، R_s و R_{sh} هي تيار الاشباع العكسي الصمام، وعامل جودة ، ومقاومة التوالي، ومقاومة التوازي، على التوالي.

في الخلية الشمسية، **Shunt resistance) R_{sh})** تشير إلى قدرة الخلية على توصيل التيار بشكل جانبي عبرها بدلاً من أن يمر التيار بشكل منتظم عبر الدائرة الخارجية. هذا السلوك غير المرغوب فيه يمكن أن يؤثر سلبًا على كفاءة الخلية.