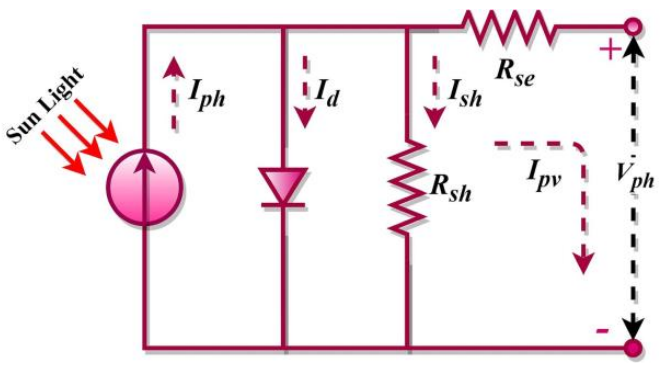
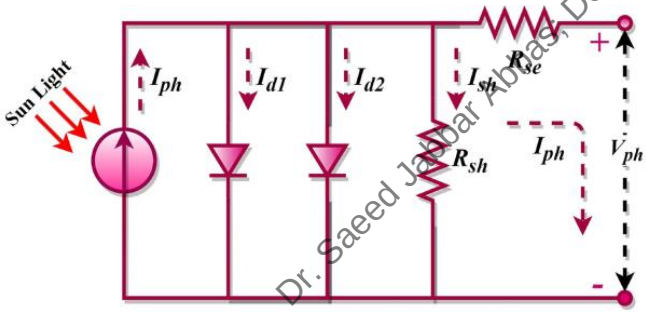
10. خصائص الثنائي المضاء Diode Characteristics under illimitation

تقوم الأجهزة الكهروضوئية بتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء باستخدام التأثير الكهروضوئي. يعد التصوير الدقيق لهذه الآليات أمرًا بالغ الأهمية للتنبؤ بأدائها وتصميم الأنظمة وإجراء تحليل شامل. النماذج الثلاثة الرئيسية المطبقة في تمثيل النظام الكهروضوئي هي SDM و DDMو TDMعادةً يتم تمثيل الخلية من خلال مصدر تيار مفرد، يُشار إليه ب I_{ph}. يعتمد التيار الضوئي، I_{ph}، على شدة الإشعاع الشمسي.

نموذج الثنائي المفرد هو النموذج الأكثر بدائية والأكثر استخدامًا لتقييم الأنظمة الكهروضوئية. يشمل هذا النموذج ثنائي واحد من أشباه الموصلات والتأثير الكهروضوئي الحادث. وعلى الرغم من بساطته، يمكن لهذا النموذج أن يصور بفعالية وظيفة الخلية الشمسية في مختلف الظروف التشغيلية. في إطار نموذجSDM ، نشرك ثنائيًا وحيدًا غير مثالي، مربوطا بصورة متوازية مع المصدر، وهو سيناريو ممثل بصريًا في الشكل 1. كما تم التطرق إليه سابقًا، حيث ترمز R_{sh} إلى المقاومة المتوازية، وترمز R_s إلى المقاومة المربوطة على التوالي، ويُشار إلى التيار المار عبر الدايود بـ I_d. ومع ذلك، تم اعتماد نهج متناقض في DDM، حيث يتم توصيل زوج من الثنائيات غير الكاملة بشكل تعاوني بطريقة متوازية بمصدر تيار واحد فريد، وهو المخطط الموضح في الشكل 2. في هذا الشكل، يشير I_{d1} و I_{d2} إلى التيارات التي تتدفق عبر الثنائيات الأولى والثنائية الثانية على التوالي، مع تحديد I_{d2} على وجه الخصوص، المقابل للخسائر التي تحدث داخل منطقة الشحنة الفضائية.



الشكل (11أ): SDM للخلية الكهروضوئية



الشكل(11ب): DDM للخلية الكهروضوئية.

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

المعادلة الرياضية الأساسية لنموذج الثنائي الأحادي كما يلي:

$$I = I_L - I_{dk} - I_{sh} \qquad (2)$$

يعطى تيار الظلام للثنائي I_d بمعادلة شوكلي للثنائي.، ويعزى تيار التسرب I_{sh} الى مقاومة التوازي، وهو ما يعكس فقدان الطاقة في الخلية الكهروضوئية. بتضمين علاقات الرياضية لكل منى I_d و I_{sh}, يتم كتابة المعادلة (1) على النحو التالي:

$$J = J_o \left[exp\left(\frac{q(V-JR_s)}{nkT}\right) - 1\right] - \frac{V-JR_s}{R_{sh}} - J_{ph} \qquad (3)$$

$$J_{dk} = J_o\left[exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{nkT}\right) - 1\right]$$

على فرض ان الحد الثاني مقدار صغيرة لان مقاومة التوازي كبيرة. من المعادلة الأخيرة، تكون فولتية الدائرة مساوية الى

$$V = V_{th} ln\left[\frac{J}{J_o} + \frac{J_L}{J_o} + 1\right] + JR_s \qquad (5)$$

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \qquad \text{[thermal voltage]}$$

11.معالم خرج الخلية الشمسية Solar cell output parameters

يأتي جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} عندما يصبح $J = 0$ في المعادلة (5) لنحصل على

$$V_{oc} = V_{th} ln\left[\frac{J_L}{J_o} + 1\right]$$

كثافة تيار الدائرة القصيرة J_{sc} حيث $(V = 0)$ تعطى من المعادلة 4.16 بواسطة التعبير

$$J_{sc} - J_o[exp(-R_s J_{sc}/V_{th})] = -J_L$$

اذا كانت Rs ليست كبيرة ، فان $J_{sc} = -J_L$

إذا كانت R معروفة، يتم تحديد خصائص J-V بشكل فريد عندما يكون أي اثنين من من المعاملات الثلاثة ($J_L(\sim -J_{sc})$

أو J_o أو V_{oc} معروفة.

كثافة القدرة هي حاصل ضرب

$$JV = J\left\{V_{th}\left[\left(\frac{J}{J_o}\right) + \left(\frac{J}{J_L}\right) + 1\right] + JR\right\}$$

من المعادلة 5 التي تكون قصوى عندما يكون $d(JV)/dJ = 0$، عند أقصى كثافة تيار للقدرة J_m والجهد V_m. تكون J_m هذه سالبة، ومقدارها أقل قليلًا من J_L (كما هو موضح في الشكل 12)، ويتم تحديدها بالتعبير التالي

$$ln\left[(J_L + J_m + J_o)/J_o\right] = -J_m/(J_L + J_m + J_o) - 2RJ_m/V_{th}$$

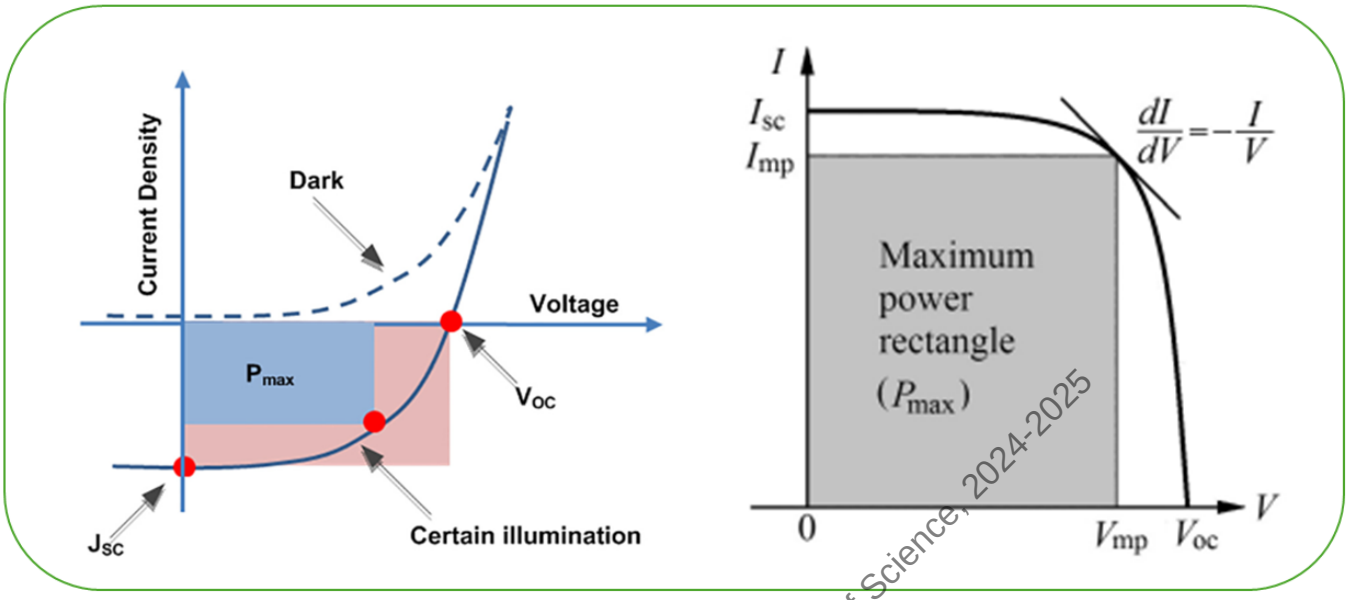
بالتعويض ب J_m في المعادلة 5، نحصل على V_m.

الكفاءة الإجمالية η تُعطى بالعلاقة

$$\eta = -\frac{V_m J_m A}{P_{in}} = -\frac{V_{oc} J_{sc} FF}{(P_{in}/A)} = -\left[\left(\frac{E_g}{q}\right)VF\right][J_{sc}^{max} JF]\frac{FF}{(P_{in}/A)}$$

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

حيث P_{in} هي طاقة الضوئية الساقطة على الخلية الشمسية و A هي مساحة المقطع العرضي للخلية. تأتي الإشارات السالبة من كون J_m وJ_{sc} سالبة.



الشكل (12) :- خصائص I-V : (الأيمن) الظلام والاضاءة. (الايسر) إعادة رسم الربع الرابع

يُعرَّف عامل التعبئة (او عامل الملء) FF بشكل ملائم على أنه النسبة

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} = (J_m/J_L)(V_m/V_{oc})(J_L/J_{sc})$$

والتي تحدد" تربيعية او مربعيه squareness"خصائص الخرج J-V (انظر الشكل 4.2)، و ولها قيمة قصوى تبلغ واحدًا كحد أقصى، وهي تمثل الطاقة المحتملة التي لا يمكن تجنبها في نقل الشحنة إلى حدود الخلية الشمسية للحصول على أقصى قدر من الطاقة والخسائر التيار "الظلام" التي لا يمكن تجنبها من الثنائيات في الانحياز الامامي وكذلك الخسائر بسبب ارتفاع قيم المقاومة التوالي.

$$\boldsymbol{FF_o = \frac{v_{oc} - ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1}}$$

حيث $(v_{oc} = V_{oc}/V_{th})$تمثل الفولتية العيارية (القياسية) ، حيث V_{th} الفولتية الحرارية.

ويطبق التعبير التجريبي اعلاه فقط للحالات المثالية بدون خسائر المقاومة الداخلية.

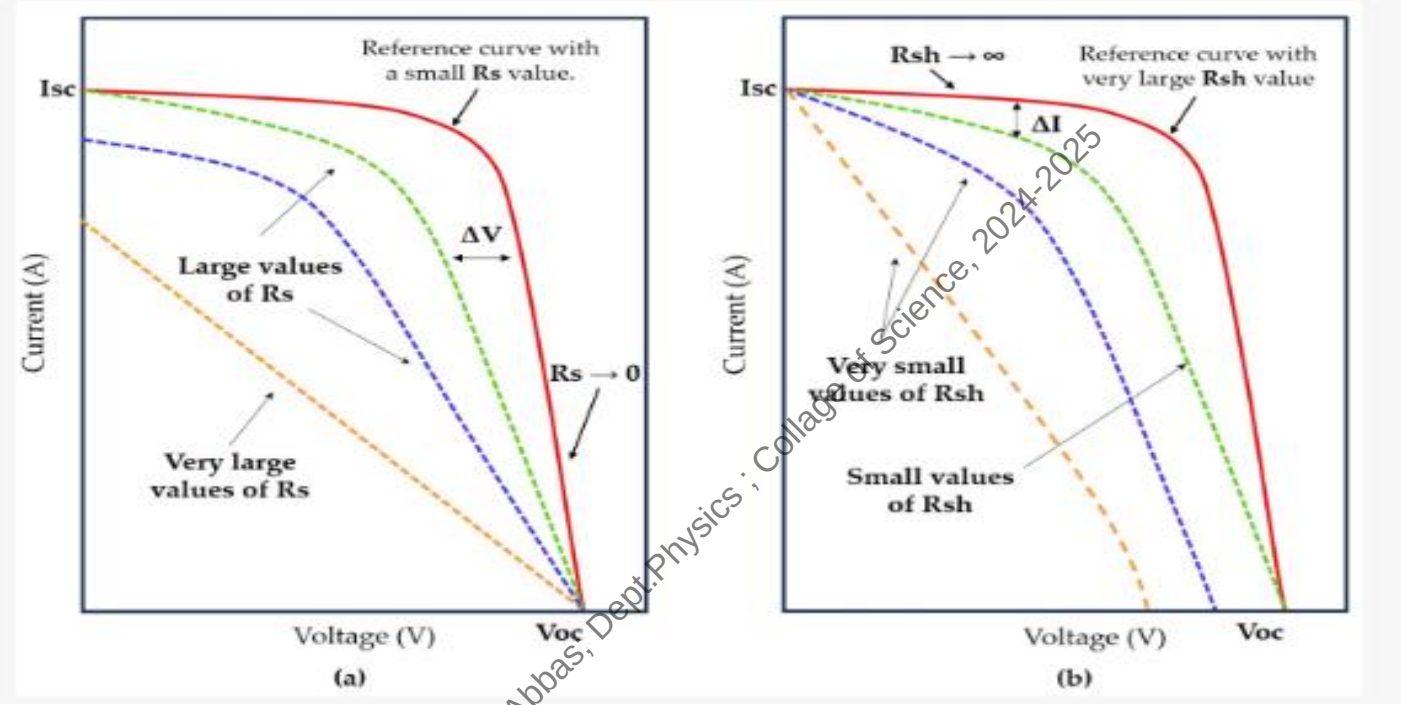
المقاومة المميزة Characteristic Resistance: المقاومة المميزة (R_{CH})هي المقاومة الخرج للخلية الشمسية عند نقطة القدرة العظمى. إذا كانت مقاومة الحمل مساوية الى المقاومة المميزة للخلية الشمسية تتحول القدرة العظمى الى الحمل والخلية الشمسية تعمل عند نقطة القدرة العظمى. المقاومة المميزة عامل مفيد في تحليل الخلية الشمسية خصوصا عند فحص آليات تأثير الخسارة.

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

$$R_{CH} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \text{..... (13)}$$

تأثيرالمقاومات الطفيلية Effect of Parasitic Resistances

تقلل التأثيرات المقاومة في الخلايا الشمسية من كفاءة الخلية الشمسية عن طريق تبديد الطاقة في المقاومات. المقاومات الطفيلية الأكثر شيوعًا هي مقاومة التوالي ومقاومة التوازي (الشكل 11). التأثير الرئيسي للمقاومة الطفيلية ينقص من عامل المليء. ويعتمد كل من قيمة وتأثير مقاومة التوالي والتوازي على الشكل الهندسي للخلية الشمسية.



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

الشكل يوضح تأثير كل من مقاومتي التوالي والتوازي على المميزات التيار-فولتية للخلية الشمسية.

ان وجود مقاومة التوالي للخلية الشمسية (R_s) لها ثلاثة اسباب هي: اولا: حركة التيار خلال الباعث emitter والقاعدة Base للخلية. ثانياً: مقاومة الاتصال بين القطب المعدني وشبه الموصل. اخيراً: مقاومة الاقطاب الامامية والخلفية.

في حالة وجود كل من مقاومة التوالي والتوازي (الحالة غير المثالية) فان التيار الخارج للخلية الشمسية يصبح (معادلة 3):

$$J = J_o \left[exp\left(\frac{q(V-JR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V-JR_s}{R_{sh}} - J_{ph} \text{..... (14)}$$

في حالة وجود مقاومة التوالي فقط، فان التيار الخارج من الخلية الشمسية يصبح:

$$\boldsymbol{J = J_o \left[e^{\frac{q(V-JR_s)}{nkT}} - 1 \right] - J_{ph}} \text{..... (15)}$$

وينقص التأثير الرئيسي لمقاومة التوالي من قيمة عامل المليء، والقيم العالية لمقاومة التوالي قد تؤدي الى نقصان تيار الدائرة القصيرة. في حالة وجود مقاومة التوازي فقط، فان التيار الخارج للخلية الشمسية يصبح:

$$J = J_o\left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] - \frac{V}{R_{sh}} - J_{ph} \text{.....(16)}$$

وجود مقاومة التوالي يؤثر على عامل المليء وكما يلي:

$$FF_s = FF_o(1 - r_s) \text{.....(17)}$$

$$\text{where } r_s = R_s/R_{CH}$$

حيث ان (r_s)مقاومة التوالي المعيارية و(R_{CH}) المقاومة المميزة

عامل المليء بوجود مقاومة التوازي هو

$$FF_{sh} = FF_o(1 - \frac{\upsilon_{oc}+0.7}{\upsilon_{oc}} \frac{FF_o}{r_{sh}}) \text{.....(3.18)}$$

$$\text{where } r_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{CH}}$$

حيث (r_{sh})مقاومة التوازي المعيارية. عامل المليء بوجود مقاومة التوالي والتوازي هو

$$FF_{s,sh} = FF_s(1 - \frac{\upsilon_{oc}+0.7}{\upsilon_{oc}} \frac{FF_s}{r_{sh}}) \text{.....(19)}$$

الكفاءة الكمية والاستجابة الطيفية Quantum Efficiency & Spectral Response

تعرف الكفاءة الكمية (QE_λ) والتي يطلق عليها ايضا بكفاءة التجميع (Collection Efficiency) لفوتون طوله الموجي λ على انها التيار الضوئي الناتج نسبة الى عدد الفوتونات الساقطة على السطح في الطول الموجي المذكور.

$$QE_\lambda = \frac{No.of\ electrons - holes\ generated\ as\ \ I_p/sec}{No.of\ incident\ photons/sec} = \frac{\dot{n}_\lambda}{\dot{N}_\lambda}$$

حيث: $\dot{n}_\lambda$ هو المعدل الزمني لتوليد ازواج الكترون-فجوة في وحدة المساحة.

$(\dot{N}_\lambda)$ عدد الفوتونات الساقطة لوحدة الزمن لوحدة المساحة لوحدة الطول الموجي.

ويمكن ايجاد $(\dot{N}_\lambda)$ من دالة التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي الساقط (F_λ) وهي تمثل الطاقة الاشعاعية في الثانية لوحدة المساحة لوحدة الطول الموجي الساقط على الخلية الشمسية.

$$\dot{N}_\lambda = \frac{F_\lambda}{E_\lambda} \text{..... (21)}$$

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

تكون قيمة (QE_λ) صفراً لجميع الاطوال الموجية التي تكون أقصر من طول موجة القطع (λ_c) وهو الطول الموجي للفوتون الذي طاقته تساوي طاقة الفجوة المحظورة.

$$\boldsymbol{\lambda_c = \frac{1.24}{E_g(eV)}}$$

باستخدام تعريف كثافة التيار والتي تساوي حاصل ضرب الشحنة في عدد الالكترونات في المساحة:

$$\boldsymbol{J_{L,\lambda} = Ae\dot{n}_\lambda} \text{..... (22)}$$

باستخدام المعادلة نحصل على $\boldsymbol{J_{L,\lambda} = Ae\ QE_\lambda \dot{N}_\lambda}$ **..... (23)**

في الحقيقة هناك كفاءتان كميتان هما، الكفاءة الكمية الخارجية EQE والكفاءة الكمية الداخلية IQE وهي تختلف في معالجة الفوتونات المنعكسة من الخلية. فجميع الفوتونات المصطدمة على سطح الخلية تؤخذ في حساب الكفاءة الكمية الخارجية لكن فقط الفوتونات التي لا تنعكس تؤخذ في حساب الكفاءة الكمية الداخلية. وإذا كانت الكفاءة الكمية الداخلية معروفة، فان التيار الضوئي المتولد لجميع الاطوال الموجية λ الممتصة من قبل الخلية هو:

$$J_{L,\lambda} = e\int_\lambda F(\lambda)\big(1-R(\lambda)\big)IQE(\lambda)d\lambda \text{ .....(24)}$$

حيث R(λ) معامل الانعكاس من السطح وهو النسبة بين شدة الضوء المنعكس الى شدة الضوء الساقط.

الاستجابة الطيفية SR(λ) هي النسبة بين التيار الضوئي المتولد بواسطة الخلية مضاءة بطول موجي واحد الى القدرة الساقطة في الطول الموجي نفسه.

$$SR(\lambda) = \frac{J_{L,\lambda}}{F_\lambda} = \frac{eQE_\lambda}{hc/\lambda} = 0.808\lambda QE(\lambda) \text{.....} \quad (25)$$

وتعتمد على طبيعة المواد المكونة للخلية الشمسية وطريقة تصنيعها وعلى الطول الموجي، ووحداتها هي (A/W) عندما λ بـ(μm) ويمكن كتابة المعادلة اعلاه بالصيغة:

$$J_{L,\lambda}=SR_\lambda QE_\lambda \text{ ....} (26)$$

وبدلالة يكون التيار الكلي:

$$\boldsymbol{J_L = \int_\lambda J_{L,\lambda}\, d\lambda = \int_0^{\lambda_c} SR_\lambda\, F_\lambda d\lambda = \overline{SR}.F} \text{.....(27)}$$

$$\text{F}=\int_0^\infty F_\lambda d\lambda \text{ ,} \qquad \overline{SR} = \int_0^{\lambda_c} SR_\lambda\, F_\lambda d\lambda/F$$

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

حيث$(\overline{SR})$ هو معدل الاستجابة الطيفية ويعتمد على التوزيع الطيفي للإشعاع الساقط.

س/ لماذا التكامل في المعادلة الاخيرة الى حد λ_c؟

عند تعويض المعادلة (3.27) في المعادلة (3.2) نحصل على:

$$J = \overline{SR}F - J_o[e^{\frac{eV}{kT}} - 1] \ldots\ldots (28)$$

$$V = V_{th} ln[\frac{\overline{SR}F - J}{J_o} + 1] \ldots\ldots (29)$$

اما فولتية الدائرة المفتوحة (J=0) هي:

$$V_{oc} = V_{th} ln[\frac{\overline{SR}.F}{J_o} + 1] \ldots\ldots (30)$$

اما تيار الدائرة القصيرة (V_{oc}=0):

$$J_{sc} = \overline{SR}.F \ldots\ldots (31)$$

ان وحدات قياس الفيض الشمسي F او القدرة الاشعاعية او الشدة هي W/m^2 وتستخدم وحدات اخرى وهي (sun) شمس او شموس Suns حيث $1sun=100mW/m^2$

خلية شمسية مفردة مساحتها (10 cm x10 cm) تنتج فولتية مقداره (0.5 V) وتيار (2.5 A). اذا كان مقدار الطاقة الشمسية الساقطة $800\ W/m^2$ ، ماهي كفاءة الخلية الشمسية.

الحل: - area =10 cmx10 cm=$10^{-2}\ m^2$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} x100; \quad I_{sc} = \frac{P_{in}}{area}; \quad P_{out} = VI$$

$$\therefore \eta = \frac{VI}{I_{sc} * Area} = \frac{0.5 * 2.5}{800 * 10^{-2}} = \frac{1.25}{8} = 0.1562$$

$$\therefore, the\ efficiency\ of\ the\ solar\ cell\ is, \quad \eta = 15.62\ \%$$

عند اضاءة خلية شمسية مفردة بشدة مقدارها $800\ Wm^{-2}$ تنتج فولتية مقدارها 0.5 V وتيار (2.0A) . اذا كانت كفاءة الخلية الشمسية تساوي 12.5% ، ما هي مساحتها.

$$\therefore \ \eta = \frac{VI}{I_{sc} * Area}; \quad \frac{12.5}{100} = \frac{0.5x2}{800xA}; \quad \therefore A = 10^{-2}\ m^2$$

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

مثال (3-1): خلية شمسية لها المواصفات الاتية: تيار الاشباع العكسي ($Io=6x10^{-7}mA$)عند درجة حرارة ($T=300K$) ومساحتها ($A=100cm^2$) وتيار الدائرة القصيرة ($Isc=2A$) والفيض الشمسي ($F=100mW/cm^2$) فجد ما يلي:

معدل الاستجابة الطيفية، وفولتية الدائرة المفتوحة، وعامل المليء، وكفاءة التحويل، وعدد الفوتونات الساقطة عند الطول الموجي $\lambda=500nm$.

الحل:

$$\mathbf{1)}\ J_{sc} = \overline{SR}.F \rightarrow \overline{SR} = \frac{J_{sc}}{F} = \frac{I_{sc}/A}{F} = \frac{2/100}{100x10^{-3}} = 0.2A/W$$

$$\mathbf{2)}\ V_{oc} = V_{th}\ln[\frac{\overline{SR}.F}{J_o} + 1] = \frac{11600}{300}\ln[\frac{0.2x100x10^{-3}}{6x10^{-13}} + 1] = 0.63V$$

$$\mathbf{3)}\ \upsilon_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_{th}} = \frac{0.63}{0.026} = 24.23$$

$$FF = \frac{\upsilon_{oc} - \ln(\upsilon_{oc}+0.72)}{\upsilon_{oc}+1} = \frac{24.23 - \ln(24.23+0.72)}{24.23+1} = 0.832$$

$$\mathbf{4)}\ \eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{FFV_{oc}J_{sc}}{P_{in}} = \frac{0.832x0.63x0.02}{100x10^{-3}} = 10.48\%$$

$$\mathbf{5)}\ \dot{N}_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}}{E_{\lambda}} = \frac{F}{hc/\lambda} = \frac{100x10^{-3}}{1.24/0.5} = 2.5x10^{17}\ \frac{photons}{s.m^2}$$

تمارين

1- خلية شمسية مساحتها ($100cm^2$) تمتلك تيار ظلام للانحياز العكسي مقداره ($2x10^{-9}A$)، ومقدار تيار الدائرة المغلقة لواحد شمسي 1sun ($1kW/m^2$) هو (3.5A) في درجة حرارة الغرفة (300K) جد (1) فولتية الدائرة المفتوحة. (2) ما مقدار مقاومة الحمل العظمى (V_{mp}/I_{mp}). (3) ما مقدار القدرة العظمى الخارجة.

2- اضيئت خلية شمسية بضوء احادي الطول الموجي شدته ($100mW/m^2$)، فاذا علمت ان القيمة الدنيا لكثافة تيار الاشباع العكسي عند ($T=300K$) هو $10^{-11}A/cm^2$. اوجد الحدود العليا لكفاءة تحويل الشمس الى طاقة كهربائية عندما يكون الطول الموجي للضوء الساقط

(أ) 450nm (ب) 900nm افرض في الحالتين (ا) و(ب) ان طاقة الفوتون اكبر من Eg.

(ج) فسر القيم الناتجة في الفرعين (ا) و (ب).

3- (ا) خلية شمسية لها خصائص مثالية وعامل نوعية n=1 واخرى يسود خصائصها عمليات اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف ولها n=2 وتعطي الخليتين عند درجة حرارة T=300K فولتية دائرة مفتوحة نفسها ($V_{oc}=0.6V$) قارن بين عامل المليء للخليتين.

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

(ب) إذا كانت كفاءة الخلية الاولى 10% والثانية 8% جد تيار الدائرة القصيرة للخليتين.

4- خلية شمسية سيليكونية عند درجة حرارة الغرفة (300K) وبمساحة ($100Cm^2$) ومضاءة بـ($1kW/m^2$) تعطي فولتية الدائرة المفتوحة (100mV) وتيار الدائرة القصيرة (3.3A) بفرض الخلية تعمل بشكل مثالي فما كفاءتها التحويلية عند نقطة القدرة القصوى؟

5- خلية شمسية عند درجة حرارة الغرفة (300K) لها فولتية الدائرة المفتوحة (500mV) وتيار الدائرة القصيرة (2A) وعامل المثالية (1.3) جد عامل المليء تحت الظروف التالية:

(ا) مقاومة التوالي (0.08Ω) ومقاومة التوازي عالية.

(ب) مقاومة التوالي مهملة ومقاومة التوازي (1Ω).

(ج) مقاومة التوالي (0.08Ω) ومقاومة التوازي (2Ω).

(د) مقاومة التوالي (0.02Ω) ومقاومة التوازي (1Ω).

7- ما الكفاءة الكمية وما انواعها وما الفرق بين انواعها؟ وضح ذلك مع ذكر المعادلات ان وجدت.

تعتمد الخلية الشمسية على الظاهرة الفوتوفولطائية Photovoltaic Effect في عملها. ما هذه الظاهرة؟ وما العمليات الاساسية وراء هذا التأثير؟ وممن تتكون الخلية الشمسية ووضحها ايضا بالرسم؟

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