الباب الثالث ① المناهج الفيزيائية لتحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربية

المراجع:

① Physics, Technology and Use of Photovoltaics
R. J. Van Overstraeten
R. P. Mertens
Adam Hilger Ltd, Boston, U.S.A.

② Handbook of Solar Energy

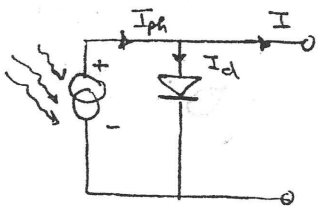
③ Lecturer's notes

المقومات * تقويمات اساسية
* المناهج الفيزيائية لتحويل الطاقة فوتو
* عناصر صناعة الخلية الشمسية
* اداء الخلية الشمسية
* الدائرة المكافئة للخلية الشمسية
* كفاءة التحويل الطاقي
* الحواجز الفيزيائية والتقنية المحددة لكفاءة الخلية
* إضافة الرصاص والحواجز الفيزيائية لمحددات كفاءة الخلية
* حل معادلات الاتزان الكيميائي لدراسة اتحاد الأكسجين الضئيل مع الجرافيت

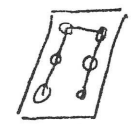
تقويمات اساسية

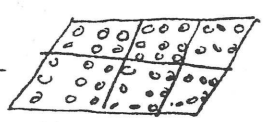
Photovoltaic Systems الأنظمة المولدة فوتوفلطائيا

يطلق على الأجهزة التي تحول طاقة الإشعاع الشمسي الى طاقة كهربية مستمرة بالخلايا الشمسية وتتكون من مادة شبه موصلة تعمل على توليد هذا التيار بفعل استضاءة الضوء الشمسي موصلة ثنائية تعمل على توليد جهد كهربي داخلي يوضع في فعل هذا التيار، وتجميع المناطق بجمع



هذا وتقع الصعوبة ادناه الرصد الكهربي للخلية الشمسية وتقاس الكفاءة لإنتاج الضوء والذرات المقذوفة بالجهد موصل يحتاج بالتالي الى تقنيات فوتوفلطائيا فقد اطلق على الأنظمة المتكونة من خلايا موصلة بالجهد الكهربي (لزيادة الجهد) او التوازي (لزيادة التيار) بالأنظمة الفوتوفلطائية وتتباين تلك الأنظمة في صورة تبعا لشكل (عنقودي موصل التوالي التوازي)


Solar Panle


Solar Array

وفي صورة منظومة تتبع انواع موصل التوالي او التوازي
" " حقل من المنظومات (عدة منظومات موصل التوالي او التوازي)

المناهج الفيزيائية تقول حارسنا العليم ان* المكونات الذرات المحددة تمتلك مستويات طاقية محكمة وفي المواد يتوزع تلك المستويات بأعداد من الجسم متفق التوصيل والتكافؤ وهناك حاجز الطاقة الذي يفصل تلك المناطق تصنف المواد الى موصلة وشبه موصلة وعازلة

* عدد الالكترونات المسموح بكل مستوى طاقة لكل عنصر جميع توضيح بداية كثافة المستويات والحشوة من مستوى طاقة (E) تزيد من مستوى طاقة

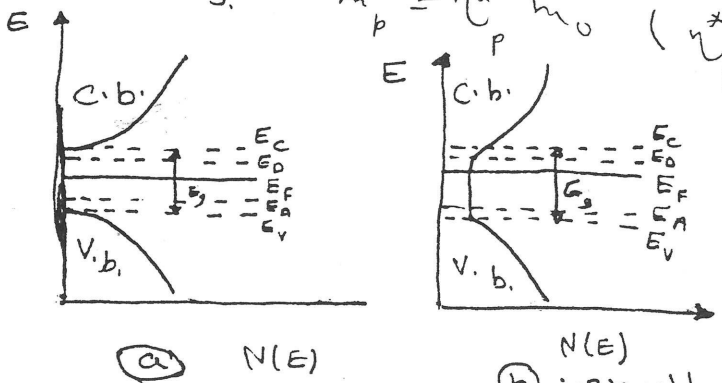
منطقة التوصيل (أعلى الصدفة 2) بالحادم

$$N(E) = \left(\frac{2\pi m^*}{\hbar^2}\right)^{3/2} \sqrt{E - E_E} \quad \text{--- (1)}$$

حيث m^* الكتلة الفعلية وتعتبر مرتبطة بالكتلة السكونية للإلكترون بالعلاقة

$m_n^* = \eta_n^* m_0$ (ثابت لايعتمد على نوع المادة) للإلكترونات

$m_p^* = \eta_p^* m_0$ (η_p^* " " " " ") للجوات



(a) N(E) (b) N(E)

(a) الصدفة (2) المتأثر بالمادة شبه موصلة متبلورة (b) والمادة شبه موصلة غير متبلورة (b)

أ) نرى أن $N(E)=0$ في الحاجز العاقي للمادة شبه موصلة التام المتبلور بينما $N(E)\neq 0$ في المادة شبه موصلة الغير متبلورة الأمر الذي يفسر لماذا تتغلب أشباه الموصلات المتبلورة على أشباه الموصلات الغير متبلورة في صناعة الدارات الإلكترونية

مفاهيم تزيد الطرائق التي تمكننا من تقييم واختيار مادة صناعة الليزر

تقول مفاهيم تزيد الطرائق المذكورة سابقا أن الموصلية الكهربائية للمواد شبه الموصلة تتزايد بزيادة درجة الحرارة بينما تتحسن في حالة المعادن شبه موصلة وتتزايد بالتوازي بزيادة درجة الحرارة. وبالتالي فإن مقاومة المعادن شبه موصلة تتناقص بينما تتزايد مقاومة المعادن شبه موصلة ورغم أننا لا نزال لم نبحث بالتفصيل عن تلك الأسباب فإن تجاربنا تثبت

* عدم وجود أي نوع من أنواع الموصلية الكهربائية عند درجة الصفر المطلق في المعادن شبه موصلة وذلك لأن منطقة التكافؤ تكون مملوءة بالإلكترونات بينما منطقة التوصيل فارغة تماما

* أن صغر الحاجز العاقي في المعادن شبه موصلة يجعل التوصيل الكهربائي ممكنا إذا ما رفعت درجة الحرارة وتسبب في ذلك يرفع الإلكترون الحاجز العاقي نتيجة زيادة درجة الحرارة طبقا للعلاقة

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T \quad \text{--- (2)}$$

حيث $E_g(0)$ الحاجز العاقي عند درجة صفر المطلق (0K)

α ثابت يعتمد على نوع مادة صناعة الليزر وليس متساوي التناقص في E_g لكل ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار (1°K) (4.7×10⁻⁴ eV/°K)

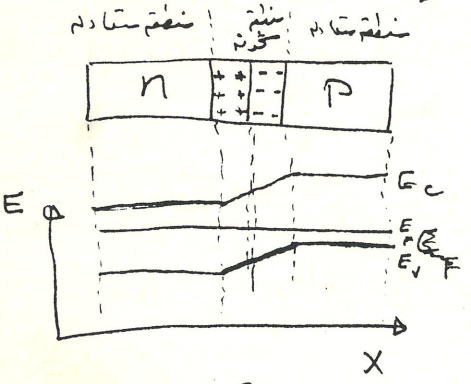
T درجة الحرارة المطلقة (°K)

تفاعلات

* ما المادة شبه موصلة مع طاقة توقين تصدر الإلكترون المحتجز كافية لدفع الإلكترون من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل. وذلك يعني أن التوقين ذات الطاقة $E \geq E_g$ هي التي تهم في إنتاج التيار الكهربائي

* لهذا الحد من الاستطاعة المستهلكة [illegible]

اختيار فولت ايونات موجبة فإن بعد الحقل الثنائي يصبح ضروريا لتسارع الايونات في الحقل وتجميع الطاقة في منطقة التوصيل وتحل لصوء بجعل التيار الكلي المتولد مساويا مجموع التيار الالكتروني في منطقة التوصيل وتيار الجحورات في منطقة التكافؤ كما هو مبين في الصورة الموضحة



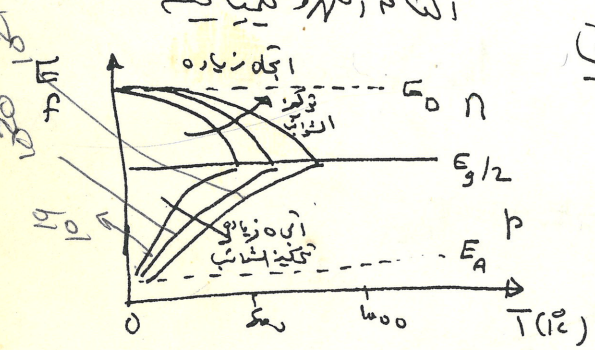
الصورة 3: التركيب الحامل لمادة بشبه موصل والذي يبين مستويات طاقة منطقتي التكافؤ (E_v) والتوصيل (E_c) الالكترونات طاقة الالكترون بينما تمثل طاقة الالكترون كهربائيا

* لهذا الحد N(E)=0 في الطاقة الحالي لمادة شبه موصل (انظر الصورة 2) فإن مستويات طاقة في الطاقة الحالي لمادة شبه موصل نوع P الاقرب بالشوائب الحقن الالكترونات تسمى بمستوى الشوائب المقبلة للالكترونات تسمى بمستوى الطاقة للشوائب الحقن E_A قريب من E_v والمستوى الطاقي للشوائب المقبلة E_D قريب من E_c الذي يتم تحريك الالكترون بينهما

* يتغلب عدد الحوامل الجحور في حالة الشوائب الحقن وتغيب عدد حوامل الجحور بالسبة في حالة الشوائب المقبلة

* هذا يعني في موضوع مستوى طاقة فيرمي نحو مستوى الطاقة للشائبة الحقن كما هو موضح في الصورة (4)

وكما هو واضح من الصورة فإن $E_f = E_{g/2}$ عندما تتساوى عدد الحوامل $n_e = n_h$ وتكون أيضا موصلية فالية من الشوائب. وبزيادة تركيز الشوائب ودرجة الحرارة تقترب E_f من $E_{g/2}$ الذي يمثل مستويات طاقة فيرمي في الجزء الجحور والتيار يتكون من جهد الجزء وكفاءة تحويل الطاقي للكترون الى الجحور ما يخلفه بالتيم الثنائي والمحلل لاقصى جهد وتيار توليد الخلية الشمسية كما هو موضح في الجدول التالي



الصورة (4): تأثير درجة الحرارة وزيادة تركيز الشوائب على مستويات طاقة فيرمي

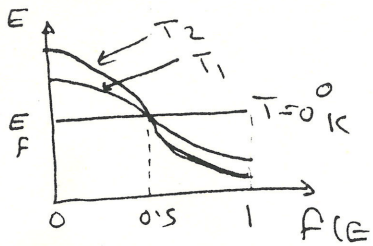
	اقصى كثافة تيار (mA/cm^2)	اقصى جهد (V)
المهوم التقاربي	44	0.82
احد التأثيرات الحقن	36	0.67
احد الحقن بالتيار	31	0.60

وإن حل ذلك الحقن دعونا نتعرف في بقية مفاهيم فيزياء الجوامد التي تحكم توليد الكهرباء الشمسية

كثافة حوامل التيار: طبقا لمبدأ باولي الاستبعاد فإن كل مستوى طاقي مسموح به للتوزيع الالكترون بأقصى عدد من الالكترونات ذات الحقن المتعاكس الاتجاه الذي يجعل توزيع الالكترونات حافظ لحالة فيرمي - ديراك الاحصائية والمحددة لمستوى الطاقي E

④

بالمعادلة $f(E) = \left(1 + e^{(E-E_f)/k_BT}\right)^{-1}$ ... ③



واذا ما رسمنا $f(E)$ كدالة في (E) نجد أن مستوى طاقة فيرمي E_f: يمثل الطاقة التي تمتلكها الحامل عند وجودها في المستوى، علمًا

وذلك يعني أن كل المستويات ذات الطاقة الأقل من E_f تكون مشغولة بالالكترونات عند الصفر المطلق بينما المستويات ذات الطاقة الأعلى من E_f فارغة تمامًا. ويكون الوضع مختلف عند درجات حرارة $T \neq 0^oK$ حيث تشغل بعض المستويات فوق E_f اذا كانت E_f قريبة من E_c فإن كثافة حاملات الشحنة (عدد الالكترونات في وحدة الحجوم) في حالة الاتزان تحسب بالتكامل

$$n = \int_{E_c}^{\infty} 2\, N(E)\, f(E)\, dE$$

وبالتعويض من المعادلات ① ، ② ، ③ نجد أن

$$n = 2 \int_{E_c}^{\infty} \left(\frac{2\pi m_n^*}{h^2}\right)^{3/2} \sqrt{kT}\, \sqrt{\frac{E-E_c}{kT}}\, e^{-(E-E_f)/kT}\, dE$$

حيث تقرب $f(E)$ الى

$$f(E) \simeq e^{-(E-E_f)/kT}$$

وبتقييم ذلك التكامل نجد أن كثافة حاملات الشحنة السالبة (n) وكثافة الجحور (p) تعطى بالعلاقات

$$n = N_c\, e^{-(E_f-E_c)/kT} \quad ; \quad p = N_v\, e^{-(E_f-E_v)/kT} \quad \text{... ④}$$

حيث N_c / N_v تمثل كثافة الحامل في منطقتي التوصيل والتكافؤ وتعطى بالعلاقات

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi\, m_n^*\, kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad ; \quad N_v = 2\left(\frac{2\pi\, m_p^*\, kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad \text{... ⑤}$$

حيث m_n^* / m_p^* تمثل الكتلة الفعلية للحامل بدلالة كتلة سكون الالكترون m_o وتعتمد على نوع مادة أشباه الموصلات المستخدمة وسوف نتعرف فيما بعد.

وبما أننا نتعامل مع مادة شبه موصلة خالصة من الشوائب فإن حالة الاتزان تتطلب تساوي كثافة الحوامل الجحوم بالتالي يمكننا من تعيين تركيز الحوامل بالمعادلة

$$np = n_i^2 = N_c N_v\, e^{(E_v-E_c)/kT} = N_c N_v\, e^{-E_g/kT} \quad \text{... ⑥}$$

حيث $E_g = E_c - E_v$

$$\frac{N_v}{N_c} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{3/2}$$

ومباشرة من المعادلة السابقة نحصل على مستوى طاقة فيرمي

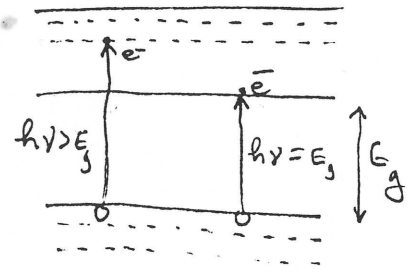
$$E_f = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2} kT \ln N_v/N_c \quad \text{... ⑦}$$

الذي يحدد E_f بدلالة منتصف طاقتي الحاجز الحاجز مالم يكن الفارق بين N_v / N_c كبيرًا جدًا حيث يزاح E_f بعيدًا عن منتصف الحاجز الحاجز.

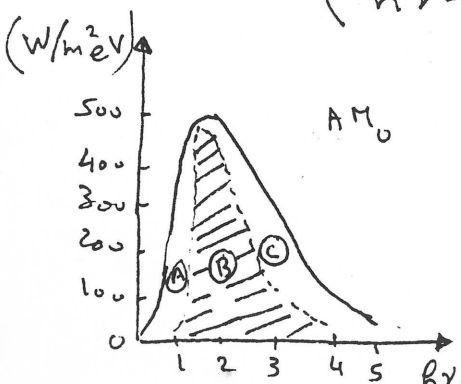
⑤ وكي لا يحدث لبس في هذه المعادلة (٥) والتي تقول بأن تركيز الشوائب N_A (أو N_D) لا يجب أن يتجاوز n_i^2 فإن ذلك يكون صحيحاً في حالة الأشباه الموصلة عديمة الشوائب فإن كثافة الحوامل في منطقة التوصيل والتكافؤ تختلف وتصبح بدلالة مستويات طاقة فيرمي الكامنة (راجع فيزياء الجوامد).

ميكانيكية عمل الخلايا الشمسية: امتصاص الفوتونات في المادة يتسبب عنه توليد أزواج من حوامل التيار الطبيعي ويتم ذلك بالانتقال المباشر للإلكترونات من منطقة التكافؤ لمنطقة التوصيل عبر الطاقة الحاجز الحاوي لمادة شبه موصلة E_g (الفجوة) والذي يحدد بالمعادلة

$$E_g = h\nu_g = hc/\lambda_g \quad \cdots \quad (5)$$

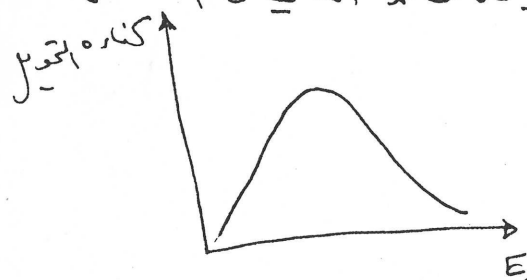


ومما تقدم نجد أن الانتقال المباشر للإلكترونات عبر طاقة الحاجز الحاوي يتم إذا كانت $E \geq E_g$ (أي أن $h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_g}$).



ويمثل ذلك دعماً لمنحنى التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض خارج الغلاف الجوي (أي AM_0). حيث أن الفوتونات الواقعة في المنطقة (A) تمتلك طاقة أقل من الحاجز الحاوي للجرمانيوم ($E_g = 1.2eV$) وبالتالي فإن استقطاب الجرمانيوم لا يسهم في إنتاج التيار الكهربائي. وأن الفوتونات في المنطقة (C) تمتلك طاقة أعلى من طاقة الحاجز الحاوي الأمر الذي يجعل الطاقة الفوتونية الناتجة $(h\nu - E_g)$ تضيع هدراً. وعليه فإن إنتاج التيار الكهربائي يعتمد كلياً على الفوتونات الواقعة في المنطقة (B) ولهذا السبب

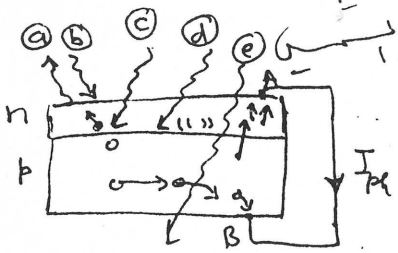
* أن هناك حاجز طاقي معين يكون عنده إنتاج الكهرباء أقصى ما يمكن أي أنه توقع لكفاءة التحويل الكهربي زيادة الحاجز الطاقي إلى أن تصل لقيمة عظمى ثم تقل بعد ذلك



* أن الكفاءة النظرية القصوى لتحويل الطاقة الشمسية الساقطة بين عبارة عن

$$\eta_{th,max} = \frac{\text{الطاقة الكهربية الناتجة (B)}}{\text{الطاقة الكهربية الناتجة (A+B+C)}} = 0.47$$

وعملياً ثبت أن ذلك يتناسب لحاجز طاقي قدره (0.9eV)



وبناءً على ذلك الشكل يكون تيار المادة شبه موصلة عند إشعاع الشمس بفوتونات الطاقة المناسبة للإشعاع الساقط على السطح الخلفي

فقد تمتلك الطاقة الفوتونية الكافية	لا تساهم في إنتاج التيار
وقد تكون غير كافية لتوليد إلكترونات	تساهم كلياً
كافية لتوليد الإلكترونات	تساهم جزئياً
تمتلك طاقة أكبر من الحاجز الطاقي	تساهم
لا تمتص بل تنفذ خلال السطح الخلفي	لا تساهم

لما أن وجود الحقل الكهربائي يعمل على فصل حوامل التيار وتجميعها في المنطقة (A) و (B) بحيث يكون تيار فوتوني في اتجاه معاكس في السطح.

⑥ عناصر صناعة الخلايا تنقسم إلى مواد شبه موصلة ذات حاجز طاقي

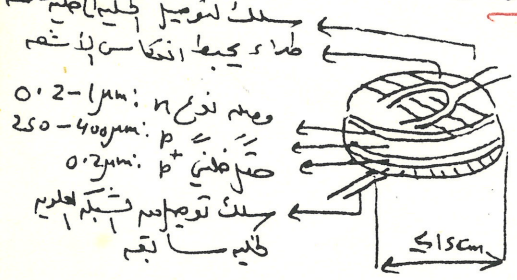
غير مباشر (Si, Se) أو ذات حاجز طاقي مباشر

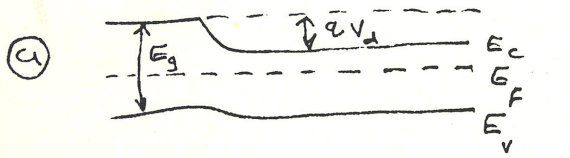
(..../ GaAs/ CdTe/ Cu_2S / CdS) وتكون بالأبعاد المتغيرة المتحكم في السمك. تكون ذا حاجز طاقي على هيئة

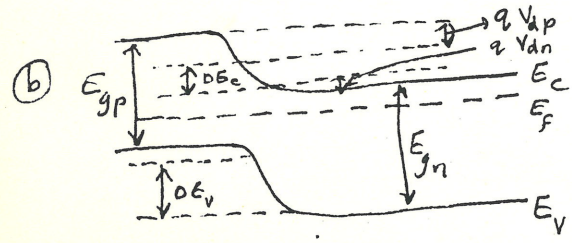
ⓐ وصلة ثنائية من مادة واحدة

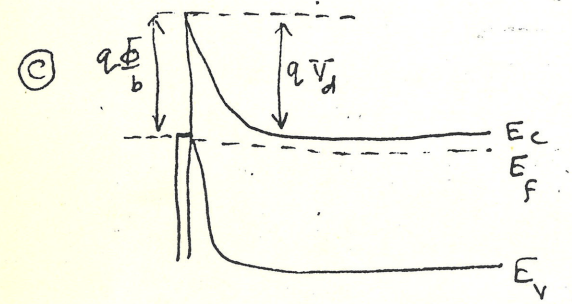
ⓑ من ثنائية من مادتين مختلفتين

ⓒ وصلة معدن موضوع على سطح شبه موصل

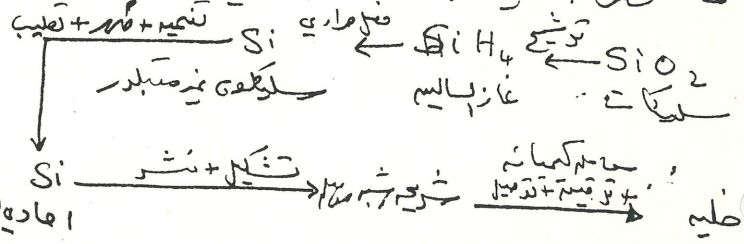






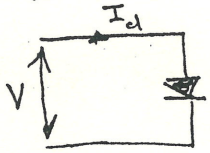


لا تتوفر صناعيًا بالطرق التالية



أداء الخلية الضوئية

في غياب الضوء تعتبر الخلايا الشمسية صمامات ثنائية



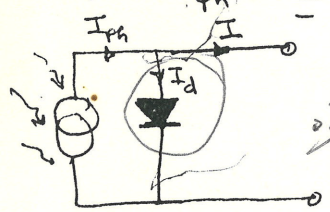
يحتاج إذا وصلنا دائرة خارجية فإنه يتولد تيار المار لتيار مزدوج

اطرد طبقًا للمعادلة $I_d(V) = I_0\left(e^{V/N_t} - 1\right)$ --- ⑨ طارد تيار إلصاق

حيث I_0 تيار التشبع وسوف نتعرف عليه في الفقرات التالية ويكون عادةً سالب كما سوف نثبت

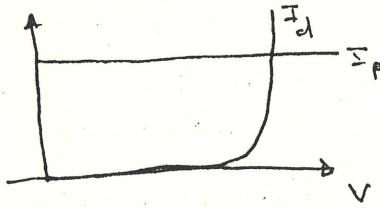
$V_t = \frac{kT}{q}$ الجهد الحراري ويقاس بـ (V)

وعند إضاءة الخلية (أي سقوط ضوء الشمس عليها) يتولد تيار ضوئي I_{ph} وبالتالي يكون التيار المار في الدائرة عبارة عن

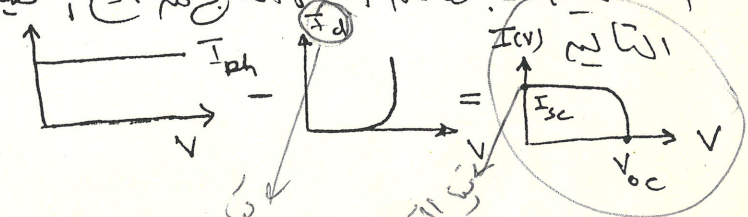


$I = I_{ph} + I_d = I_{ph} - I_0\left(e^{V/N_t} - 1\right)$ --- ⑩ طارد تيار إلى الخارج

ومن المعادلة ⑩ فإن I تعتمد على مستوى الإشعاع من خلال اعتماد I_{ph} على مستوى الإشعاع لكل جهد من الجهد (V) من خلال اعتماد I_d على V. وإذا ما رسمنا اعتماد



عند مستوى إشعاعي معين نحصل على المنحنى التالي



وتوضح لنا أن منحنى الجهد-التيار للخلية الشمسية عبارة عن المنحنى الناتج من طرح المنحنيات التالية

تيار طارد خارج من الخلية

تيار الحمل الخارجي

وكما نرى من الرسم فإن أقصى تيار تولده الخلية عند مستوى إشعاعي معين هو تيار دائرة القصر والذي يُرمز له بالرمز I_{sc}. وإذا ما رجعنا إلى المعادلة (10) فسوف نجد أن تيار دائرة القصر يساوي قيمة $I(V)$ عند $V=0$ أي أن

$$I_{sc} = I_{ph}$$

وذلك يعني أن I_{sc} يمثل مستوى التيار الضوئي الناتج عن الخلية

طبقاً للمعادلة

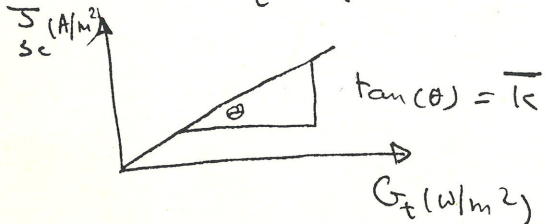
$$I_{sc} = A_{cell}\,\overline{K}\,G_t \rightarrow \frac{I_{sc}}{A_{cell}} = J_{sc} = \overline{K}\,G_t \quad \cdots (11)$$

حيث $\overline{K}$ متوسط معامل الاستجابة الطيفية للخلية ويقاس بـ (A/W)

G_t الفيض الإشعاعي الساقط على سطح الخلية بالواط لكل متر مربع (W/m²)

وبقياس كل من J_{sc} (الكثافة التيارية لتيار دائرة القصر) و G_t يمكننا إيجاد $\overline{K}$

وذلك برسم علاقة بين J_{sc} و G_t



وإذا ما رجعنا مرة أخرى إلى المعادلة (10) فأننا نجد أن أقصى جهد تولده الخلية هو جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} وهو عبارة عن قيمة V عند $I(V)=0$ أي أن

$$I_{ph} = I_{sc} = I_o\left(e^{V_{oc}/V_t} - 1\right)$$

وبحل تلك المعادلة لإيجاد V_{oc} نحصل على

$$V_{oc} = V_t \ln\left(\frac{I_{sc}+I_o}{I_o}\right) = \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{I_{sc}+I_o}{I_o}\right)$$

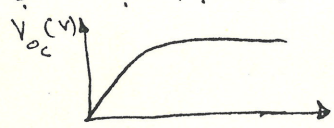
لعمل تشابه

$$A_{cell} = A_o \Rightarrow V_{oc} = \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{J_{sc}+J_o}{J_o}\right) \quad \cdots (12)$$

حيث $J_{sc} = I_{sc}/A_{cell}$ ، $J_o = I_o/A_o$

(A_{cell} مساحة وجه الخلية ، A_o مساحة العكس الثانية)

وكما نرى من المعادلة (12) فأن V_{oc} دالة في مستوى الإشعاع من خلال اعتماد I_{sc} على مستوى الإشعاع (المعادلة 11) كما أنه دالة في درجة الحرارة من خلال اعتماد I_o و V_t و الطاقة الحاجز الفاصل على درجة الحرارة. وعند درجة حرارة ثابتة تثبت تجاربنا أن V_{oc} يمثل مستوى الضوء الإشعاعي كما في الرسم



تثبت تجاربنا أن

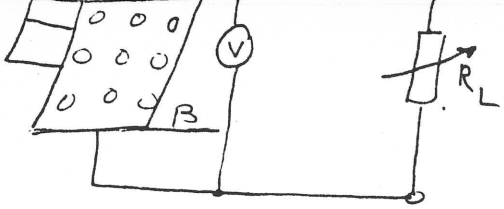
V_{oc} يزيد بزيادة الطاقة الحاجز الفاصل عند ثبوت درجة الحرارة

يقل بزيادة درجة الحرارة عند ثبوت الطاقة الحاجز الفاصل

القدرة القصوى هي القدرة التي تعطيها الخلية الشمسية في غياب وجود حمل كهربي موصل بالخلية

وتحسب من العلاقة

$$P_{max} = I_{sc}V_{oc} \quad \cdots (13)$$



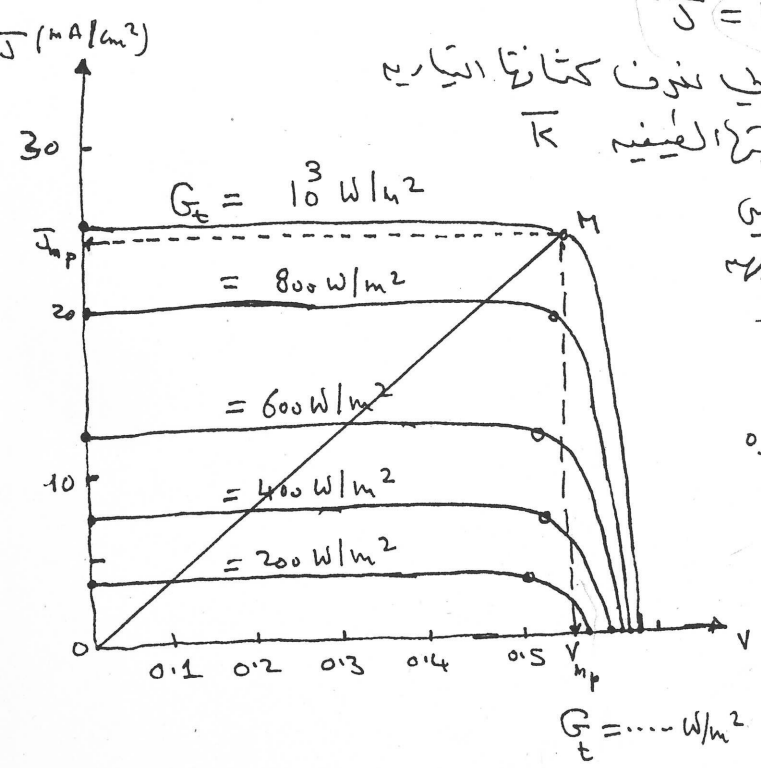
حيث عند نقطة تشغيل حمل كهربائي موصل بالوح الشمسي مثلاً في الرسم. ويحسب تيار الخلية من العلاقة

$$J = J_{sc} - J_0 \left(e^{V/V_t} - 1\right)$$

كما هو موضح بالرسم (V) والمستوى الإشعاعي الساقط على سطح اللوح هذه العلاقة

$$J = K G_t - J_0 \left(e^{V/V_t} - 1\right)$$

وذلك طبعاً لتغير مادة صناعة وبالتالي تغير كثافة التيار التشبيع J_0 كما تغير متوسط استجابة الطيف K



والعملية تتطلب عملياً رسم الخلية (أو اللوح) الشمسي بزاوية ميل مناسبة زاوية خط الطول يتم توجيهه إلى الجنوب ووضع جهاز قياس الضوء الإشعاعي عند نفس زاوية الميل

وعند رسم منحنى نقيس G_t وكل رسم تيار دائرة القصر I_{sc} (في I عند $R_L = 0$) وكذا جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} (في V عند $R_L = 0$)

ولجهد ما نميز R_L ونوصله ثم نقيس I ، V المقابلة لقيم R_L وجدول نموذجي كالتالي

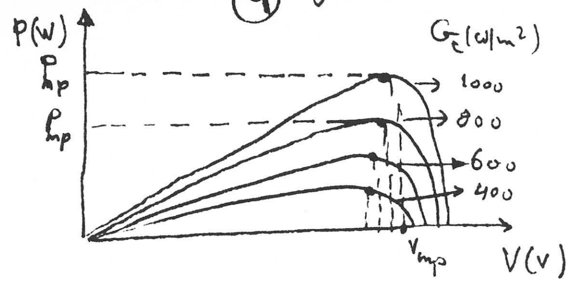
R_L (Ω)	0	2	4	.....	∞
V (v)	...	...	...		...
I (A)	....	...	...		...
$J = I/A$	....	...	..		...
$P = IV$ (W)	..	...	..		...

وتكرار ذلك عند عدة مستويات إشعاعية كما في الرسم السابق نحصل على مجموعة المنحنيات الموضحة في الرسم. والسؤال كيف نحصل نحن القدرة الذروية؟

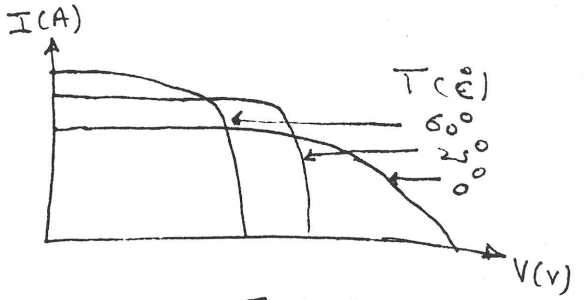
عند معرفة مقاومة الحمل المطلوب تشغيله نمثل ذلك R_1 عند نرسم خط الحمل وهو الخط الذي يصل مع محور الجهد زاوية قدرها $\theta = \tan^{-1}(1/R_1)$ أي أن $\tan(\theta) = 1/R_1$ ولمعرفة زاوية خط الحمل نحدد المستوى الإشعاعي المطلوب معرفة القدرة الذروية عنده لنفترض 10^3 W/m² عندها نقطة تقاطع خط الحمل مع ذلك المستوى الإشعاعي (النقطة M) تحدد نقطة التشغيل وبإسقاط العمود على محور الكثافة التيارية والجهد نحصل على كثافة التيار عند نقطة التشغيل J_{mp} وكذا الجهد عند نقطة التشغيل V_{mp} وبالتالي تكون كثافة القدرة الذروية عبارة عن

$$P_{mp} = J_{mp} V_{mp} \quad (W/m^2) \quad \ldots\ldots \quad (14)$$

وكما نرى من الرسم أن $P_{mp} < P_{max}$ وكذا ليس $J_{mp} V_{mp} < J_{sc} V_{oc}$ وكلي نحدد نقطة القدرة الذروية لو الجهد في الرسم السابق (دائرة مفتوحة) فإننا نقوم بضرب IV لكل مستوى إشعاعي ثم نرسم الناتج كدالة في (V) لنحصل على مجموعة المنحنيات التالية



ولما كان وضيقا التغذية مصادر الطاقة المستمرة فإن الشدة التي تتعرض لها الخلية الشمسية للحمل تعطي القيم ذروية P_{mp} تمكنه تحديدها لكل مستوى إشعاعي لكل الشمس. إن المنحني P_{mp} ذا الأهمية فهو عبارة عن الشدة العيارية التي تقع بين الخلايا الشمسية



تأثير درجة الحرارة I_{sc} ، V_{oc}

تقول التجارب بأن I_{sc} تزيد بزيادة درجة الحرارة بينما V_{oc} تقل بزيادة درجة الحرارة ويمكننا التعبير عن اعتماد I_{sc} ، V_{oc} مع درجة الحرارة من خلال التعبير عنها بدلالة القيم المرجعية $I_{sc}(T_r)$ ، $V_{oc}(T_r)$ كما يلي

$$\left.\begin{aligned} I_{sc}(T) &= I_{sc}(T_r)\left(1 + a(T_M - T_r)\right) \\ V_{oc}(T) &= V_{oc}(T_r)\left(1 - b(T_M - T_r)\right) \\ P_{max}(T) &= P_{max}(T_r)\left(1 - c(T_M - T_r)\right) \end{aligned}\right\} \quad \cdots (15)$$

$$T_M = T_a + 0.025\, G_t$$

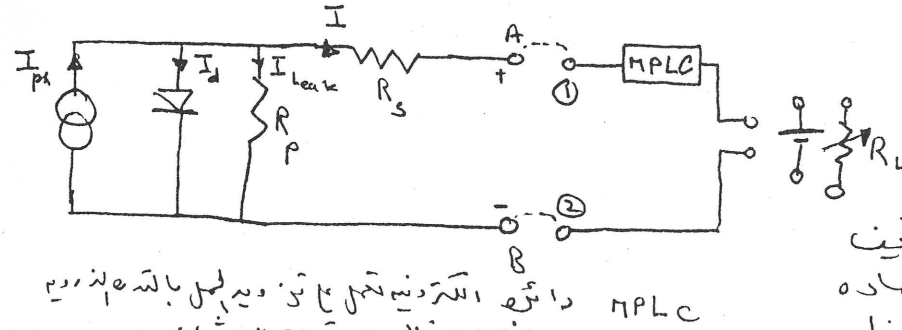
حيث T_r درجة الحرارة المرجعية والتي تؤخذ عادة 25°C (اصطلاح)

T_M درجة حرارة سطح اللوح الشمسي وتعطى بدلالة درجة حرارة الهواء الخارجي T_a وشدة الإشعاع الشمسي G_t بالمعادلة $T_M = T_a + 0.025 G_t$ (°C)

a, b, c ثوابت تقاس بـ C^{o-1} وتعتمد نوع مادة الخلية

$I_{sc}(T_r), V_{oc}(T_r), P_{max}(T_r)$ تمثل قيم I_{sc} ، V_{oc} ، P_{max} عند درجة حرارة 25° ومستوى إشعاعي $G_t = 1kW/m^2$

$I_{sc}(T), V_{oc}(T), P_{max}(T)$ 〃 〃 〃 〃 〃 〃 T°C



الدائرة المكافئة للخلية الشمسية

تشتمل عناصر الدائرة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية من التصريف الثنائي للخلية فهي مكونة من مادة شبه موصل وحاجز ما فيها ولهذا فإنه يمثلها كمولد للتيار المستمر المتصل مع الثنائي على التوازي. ولكي نأخذ في عين الاعتبار الضياع الطاقي الناتج من تسرب التيار عبر الحمل وفقدان الكهربائية من الخلية إلى الحمل بسبب أسلاك التوصيل فقد انضم مع وجود مقاومات وهمية تتصل على التوالي R_s ومع التوازي R_p

MPLC دائرة التحكم تعمل على تزويد الحمل بالقدرة العظمى لنفس التناسب مستوى الإشعاع
Max. Power Load Control

بطارية خزن

مقاومة حمل R_L

I_{ph} التيار الفوتوني

I_d التيار المار في الثنائي

I_{leak} التيار المتسرب

I التيار الكلي

R_p, R_s مقاومات وهمية تمثل الضياع الطاقي الناتج من تسرب التيار عبر الحمل وفقدان الكهربائية من الخلية إلى الحمل

$$I_{leak} = \frac{V - V_s}{R_p}$$

$$V_p + V_s = V$$

$$V_p = V - V_s \Rightarrow I_{leak} = \frac{V_p}{R_p} = \frac{V - V_s}{R_p}$$

$$V_s = I R_s \Rightarrow I_{leak} = \frac{V - IR_s}{R_p}$$

وبتطبيق قانون ... (10)

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V - IR_s}{R_p} \quad \cdots (16)$$

حيث I_{ph} التيار الضوئي والمعبر عن كفاءة الخلية بالمعادلة (11)

I_d التيار المار في الصمام ويعبر بالمعادلة $I_d = I_o\left(e^{(V+IR_s)/V_t} - 1\right)$

$\frac{V - IR_s}{R_p}$ يمثل التيار المتسرب

ومهمتنا الآن تتصرف في كل المعادلة (8) حالة غياب الحمل وحالة تقصير

في حالة غياب الحمل وبالتالي التيار المتسرب ($R_p = \infty$) تصبح $R_s = 0$ فنجد أن

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_o\left(e^{V/V_t} - 1\right)$$

عند $V = 0$ فنجد أن $I = I_{ph} = I_{sc}$

" $I = 0$ " $I_{ph} = I_{sc} = I_o\left(e^{V_{oc}/V_t} - 1\right)$

وبالتالي $V_{oc} = V_t \ln\left(\frac{I_{sc} + I_o}{I_o}\right)$

في حالة وجود حمل (أي تقصير النقط 1، 2 الـ A، B) الإتزان عند نجد أن

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{I(R_L - R_s)}{R_p} \rightarrow I = \left(\frac{R_p}{R_p + R_L - R_s}\right)\left(I_{ph} - I_d\right)$$

وعندما تكون $R_p = R_s$ فإن $I = \left(\frac{R_s}{R_L}\right)\left(I_{ph} - I_d\right)$

وطبقاً للنظريات دوائر التيار المستمر فإن الطاقة تنتج أقصى قدر عند $R_s = R_L$

أي أن

$$I_{mp} = I_{sc} - I_o\left(e^{V_{mp}/V_t} - 1\right) \quad \cdots (17)$$

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp}$$

وبتفريق القدرة الذروية نجد أن

وكما نعلم فإن شرط تفريق الحمل بالقدرة الذروية يتطلب تحقيق شرط

$$\frac{dP_{mp}}{dV_{mp}} = 0 = I_{mp} + V_{mp}\frac{dI_{mp}}{dV_{mp}} = I_{mp} - \frac{V_{mp} I_o}{V_t} e^{V_{mp}/V_t} = 0$$

وبوضع قيمة I_{mp} (المعادلة 17) نجد أن

$$I_{sc} - I_o\left(e^{V_{mp}/V_t} - 1\right) - \frac{V_{mp} I_o}{V_t} e^{V_{mp}/V_t} = 0$$

وبترتيب الحدود نجد أن

$$\frac{I_{sc} + I_o}{I_o\left(1 + \frac{V_{mp}}{V_t}\right)} = e^{V_{mp}/V_t}$$

أو أن

$$V_{mp} = V_t \ln\left(\frac{I_{sc} + I_o}{I_o\left(1 + \frac{V_{mp}}{V_o}\right)}\right) \cdots (18)$$

ونظراً لصغر I_o مقارنة بـ I_{sc} فإن

$$V_{mp} = V_t \ln\left(\frac{I_{sc}/I_o}{1 + V_{mp}/V_t}\right) \cdots (19)$$