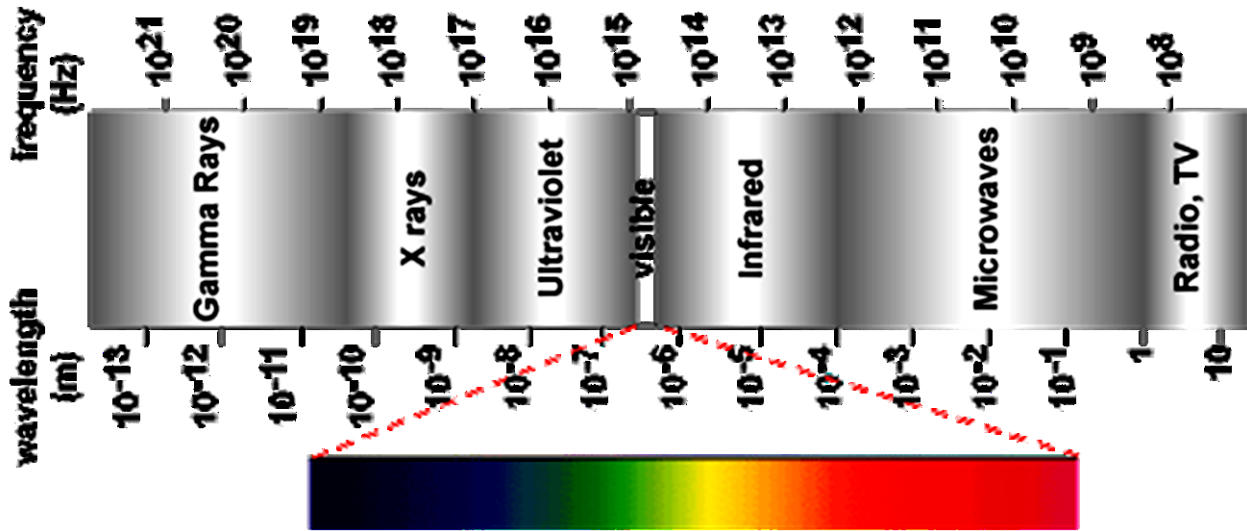


الفصل الأول: خصائص الضوء



الضوء الذي نراه كل يوم ما هو إلا جزء من كامل الطاقة المنبعثة من الشمس والواردة على الأرض، وهو شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي حيث يمثل جزء صغير منه. على حسب مفهوم الطيف الكهرومغناطيسي فإن الضوء يوصف كموجة ذات طول موجة خاص. هذه الطبيعة الموجية للضوء اكتشفت في تجارب التداخل الضوئي للفيزيائيين Augustin و François Arago، Thomas Young و Jean Fresnel. حاليا تفسر ميكانيكا الكم كلا الطبيعيتين الموجية والجسيمية للضوء. الفوتون (ككل الجسيمات الميكانيكية – الكمية مثل الإلكترونات والبروتونات...إلخ)، يصور كحزمة – أمواج (wave-packet) أي مجموعة من الأمواج التي يمكنها التفاعل مع بعضها ومع المادة وبالتالي يمكن للفوتون أن يتصرف كجسيم في تفاعله مع المادة كموجة في تفاعله مع الإشعاع. من هنا تأتي الازدواجية موجة – جسيم للفوتون. وبالتالي فالوصف الفيزيائي الكامل لخواص الضوء يتطلب تحليلا ميكانيكيا – كمي للضوء. فوتون ذو طاقة عالية سوف يملك طول موجة قصير (اللون الأزرق مثلا). فوتون بطاقة أخفض يملك موجة أطول (اللون الأحمر)، فوتون بطاقة أقل فأقل انخفاضاً يملك موجة أطول – مثلا أشعة ما تحت الحمراء غير مرئية.

High energy photon for blue light.



Lower energy photon for red light.



Low energy photon for infrared light.
Should be invisible!



1. طاقة الفوتون:

يتميز الفوتون إما بطول الموجة λ أو طاقة مكافئة E حيث:

$$E = hc/\lambda$$

حيث: h ثابت بلانك و c سرعة الضوء.

$$hc = 1.99 \times 10^{-25} \text{ joules.m} \leftarrow \begin{cases} h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ joule} \cdot \text{s} \\ c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J وحدة الطاقة}$$

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ joules.m}) \times \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ joules}} \right) = 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}$$

$$\Rightarrow hc = (1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}) \times (10^6 \mu\text{m/m}) = 1.24 \text{ eV.}\mu\text{m}$$

$$E(\text{eV}) = 1.24/\lambda(\mu\text{m})$$

حيث تقرب 1.2398 إلى 1.24.

2. تدفق الفوتونات:

هو عدد الفوتونات في وحدة الزمن الثانية ووحدة المساحة:

$$\Phi = \frac{\# \text{ of photons}}{\text{sec.m}^2}$$

بالتالي من أجل نفس الشدة الضوئية، اللون الأزرق يتطلب عدد أقل من الفوتونات لأنها تملك طاقة أعلى. تدفق الفوتونات مهم لأنه سوف يحدد عدد الإلكترونات المتولدة وبالتالي التيار الناشئ في خلية شمسية.

يمكن التركيب بين طاقة الفوتونات وتدفعها لحساب كثافة استطاعتها، حيث تعبر عن مقدار الطاقة المارة في وحدة الزمن الثانية ووحدة المساحة. لحساب كثافة الاستطاعة H بـ W/m^2 ، طاقة الفوتون يجب تكون بالجول:

- باستعمال نظام الوحدات الدولي: $H \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = \Phi \frac{hc}{\lambda}$
- باستعمال المايكرومتر كوحدة لطول الموجة: $H \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = \Phi \cdot q \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})}$
- باستعمال الإلكترون-فولت كوحدة للطاقة: $H \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = \Phi \cdot q \cdot E(\text{eV})$

حيث (q) تمثل الشحنة العنصرية ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

مثال: من أجل تدفق مقداره ($\Phi = 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) من فوتونات ذات طاقة ($E = 2 \text{ eV}$) فإن كثافة الاستطاعة تساوي:

$$H = 3 \cdot 10^{21} * 1.6 \cdot 10^{-19} * 2 = 961.2 \text{ W/m}^2$$

3. الإشعاع الطيفي: Spectral Irradiance

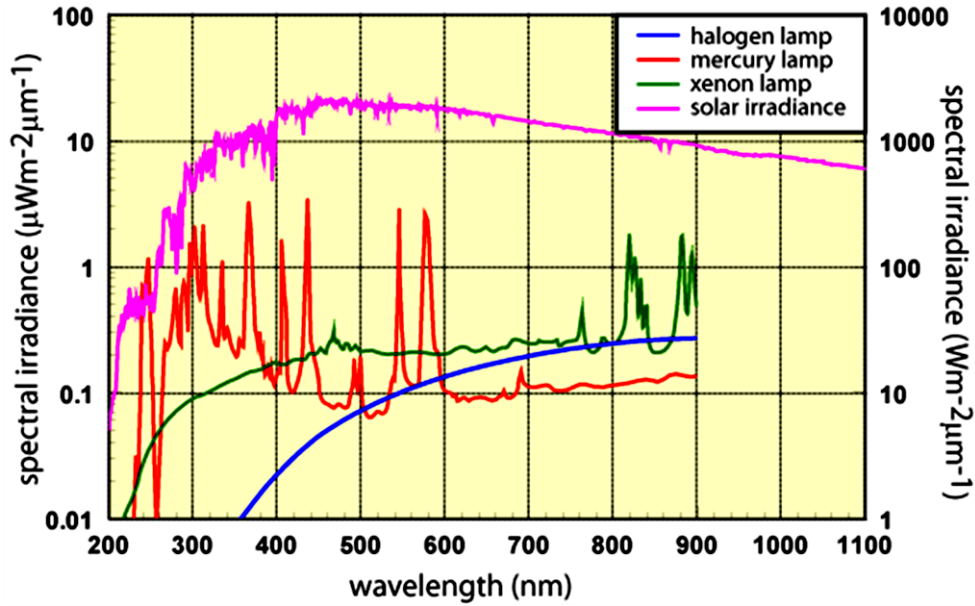
الإشعاع الطيفي هو عبارة عن دالة بدلالة طول موجة الفوتونات (أو طاقتها) ويرمز له بـ F يستعمل عادة في تمييز مصدر ضوئي ما. حيث يعطي كثافة الاستطاعة عند طول موجة محدد. وحدة الإشعاع الطيفي $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}$.

$$F(\lambda) = \Phi \cdot E \frac{1}{\Delta\lambda}$$

حيث في النظام الدولي يكون الإشعاع الطيفي ($F(\lambda)$) بـ ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)، والتدفق (Φ) بـ ($\# \text{ of photons.m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)، أما الطاقة (E) وطول الموجة (λ) فيكونان بالجول (J) والمتر (m) على الترتيب.

عادة ما يعبر عن الإشعاع الطيفي بدلالة طول الموجة على النحو التالي:

$$F(\lambda) = \Phi \cdot q \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda}$$

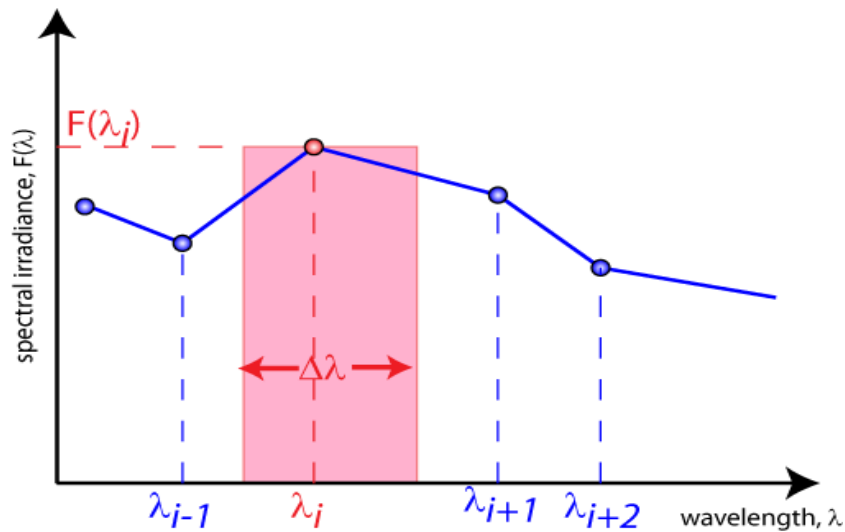


The spectral irradiance of artificial light sources (left axis) compared to the spectral irradiance from the sun (right axis).

يمكن التحصل على كثافة الاستطاعة الكلية (H) بـ W/m^2 لمصدر ضوئي ما بمكاملة اشعاعه الطيفي على كل أطوال الموجة أو الطاقات:

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda$$

عادة ما يصعب التحصل على عبارة الاشعاع الطيفي لمصدر ضوئي معين، بل يمكن قياسه في اطوال موجات محددة كما هو مبين في الشكل.



في هذه الحالة يمكن حساب الاستطاعة في كل مجال كالتالي:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{2} - \frac{\lambda_i - \lambda_{i-1}}{2} = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}{2}$$

وبالتالي فالاستطاعة في كل مجال تساوي:

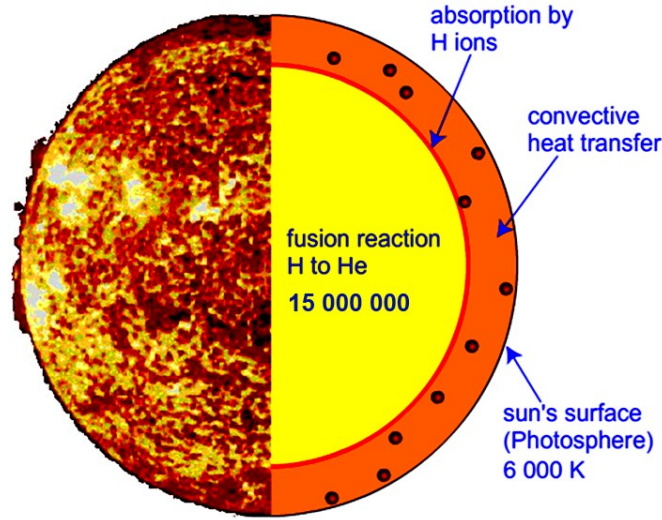
$$H_i = \Delta\lambda \cdot F(\lambda_i)$$

اذن فالمجموع على كل المجالات يعطي كثافة الاستطاعة الكلية حسب العبارة:

$$H = \sum_i F(\lambda) \Delta\lambda$$

الفصل الثاني: الإشعاع الشمسي

الشمس هي عبارة عن كرة ملتهبة من الغازات التي درجة حرارتها الداخلية تصل إلى أعلى من 15 مليون كلفن نظرا لتفاعلات الاندماج النووية داخل جسم الشمس والتي تحول الهيدروجين إلى هليوم. الإشعاعات من النواة الداخلية للشمس ليست مرئية لأنها تمتص بقوة من قبل طبقة ذرات الهيدروجين القريبة من سطح الشمس. تنتقل الحرارة عبر طبقة ذرات الهيدروجين بواسطة تيارات حرارية، لتصل لسطح الشمس (المسمى بالفوتوسفير photosphere) حيث تصل درجة الحرارة إلى 6000K.



1. الإشعاع الشمسي عند سطح الشمس:

لحساب كثافة استطاعة الإشعاع الشمسي عند سطح الشمس يمكن اعتبارها كجسم اسود وبالتالي تطبيق قانون ستيفان-بولتزمان حيث:

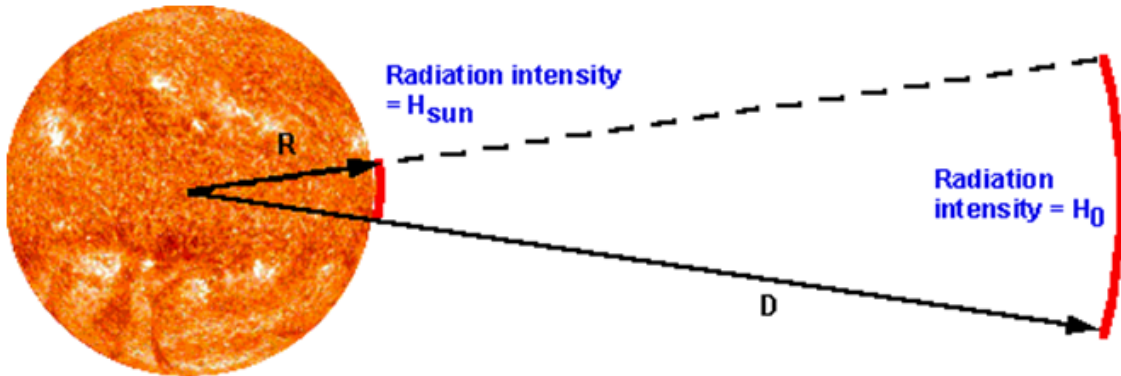
$$H_{sun} = \sigma T^4 \text{ (stefan - Boltzmann Black body)}$$

حيث T درجة الحرارة وتكون بالكلفن، σ ثابت ستيفان-بولتزمان ويساوي $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$.

اما الاستطاعة الكلية المنبعثة من الشمس فتحسب بالجاء بين كثافة الاستطاعة المنبعثة ومساحة سطح الشمس والتي تعطي استطاعة قدرها $9.5 \cdot 10^{25} W$.

2. الإشعاع الشمسي في الفضاء:

فقط جزء من الاستطاعة الكلية الصادرة من الشمس يسقط على جسم في الفضاء يبعد مسافة معينة عن الشمس. الإشعاع الشمسي (H_0 in W/m^2) هي كثافة الاستطاعة الواردة على جسم من الشمس. على مسافة معينة بعيدا عن الشمس، الاستطاعة الكلية من الشمس تنتشر في كل الفضاء على مساحة أوسع من مساحة الشمس، بالتالي الإشعاع الشمسي الوارد على جسم في الفضاء سوف ينقص كلما كان الجسم أبعد من الشمس.



الإشعاع الشمسي عند جسم يقع على مسافة D من الشمس هو الاستطاعة الكلية الصادرة من الشمس / مساحة السطح المشكل بالمسافة D . إذا كانت H_{sun} (W/m^2)، و R_{sun} نصف قطر الشمس بالمتر، اذن:

$$H_0 = \frac{H_{sun} 4\pi R_{sun}^2}{4\pi D^2} = \frac{H_{sun} R_{sun}^2}{D^2}$$

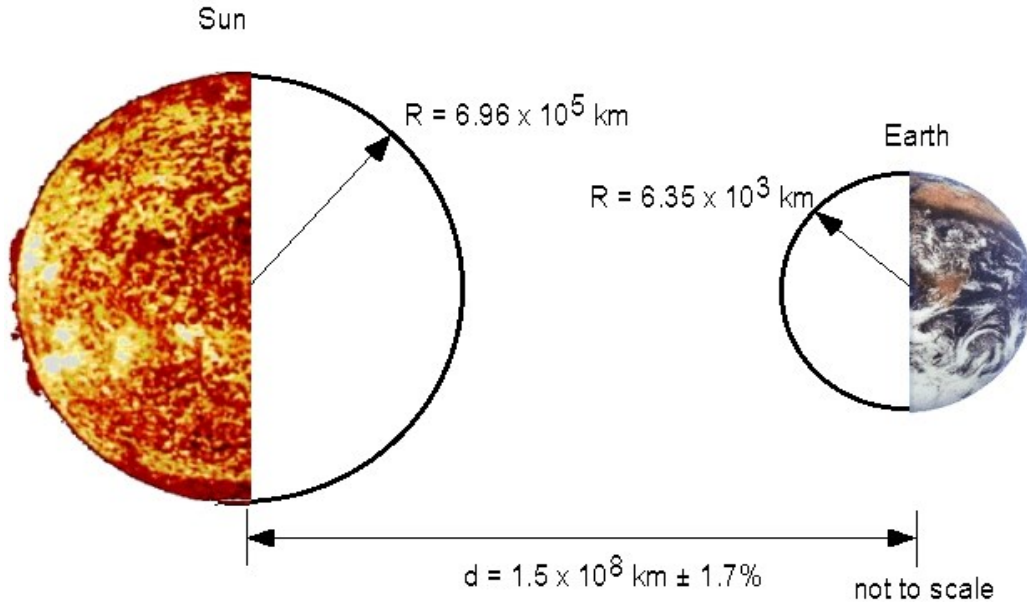
مثال: إذا كان لدينا جسم يقع على مسافة $7,78 * 10^{11} m$ من الشمس، فإن كثافة الإشعاع الوارد إليه تساوي: $H_0 = 47.82 W/m^2$

الجدول التالي يعطي بعض القيم لكثافة الإشعاع الشمسي عند سطح كل كوكب من المجموعة الشمسية:

Planet	Distance (x 10 ⁹ m)	Mean Solar Irradiance (W/m ²)
Mercury	57	9116.4
Venus	108	2611.0
Earth	150	1366.1
Mars	227	588.6
Jupiter	778	50.5
Saturn	1426	15.04
Uranus	2868	3.72
Neptune	4497	1.51
Pluto	5806	0.878

3. الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي الأرضي:

بنفس الطريقة السابقة يمكن حساب الإشعاع الشمسي المحسوب عند الغلاف الجوي الأرضي، حيث يقارب $1.36 kW/m^2$. الثوابت الهندسية المستعملة في حساب الإشعاع الشمسي على سطح الغلاف الجوي الأرضي موضحة في الشكل:



كثافة الاستطاعة الفعلية تتغير بشكل طفيف لأن المسافة أرض - شمس تتغير حسب دوران الأرض في فلكها الإهليجي (elliptical orbit) حول الشمس، المعادلة التالية تصف التغيرات خلال العام للإشعاع الشمسي مباشرة خارج الغلاف الجوي الأرضي.

$$\frac{H}{H_{constant}} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right)$$

حيث H كثافة استطاعة الإشعاع خارج الغلاف الجوي الأرضي ب (W/m^2). $H_{constant}$ قيمة الثابت الشمسي $1.353 kW/m^2$ ، و n اليوم من السنة.

تعتبر هذه التغيرات طفيفة من أجل التطبيقات الفوتوفولطانية، لذلك يمكن اعتبار الإشعاع الشمسي ثابت. قيمة الثابت الشمسي وظيفه يعرفان بالقيمة المعيارية كتلة الهواء صفر («AM0») ويأخذ القيمة $1.353 kW/m^2$.

4. الإشعاع الشمسي على سطح الأرض:

بينما يكون الإشعاع الشمسي الوارد إلى الغلاف الجوي ثابتا نسبيا، فإن الإشعاع الشمسي على سطح الأرض يتغير كثيرا بسبب:

- تأثيرات الغلاف الجوي، بما فيها الامتصاص والتشتت.
- التغيرات المحلية في الغلاف الجوي، مثل بخار الماء، السحب والتلوث.
- خط العرض للموقع (موضع الموقع من خطوط العرض).
- الموسم من السنة والوقت من اليوم.

لهذه العوامل عدة تأثيرات على الإشعاع الشمسي الذي يصل لسطح الأرض. هذه التأثيرات تشمل تغيرات في الاستطاعة الكلية المتلقاة، مكونات الطيف الشمسي وزاوية ورود الإشعاع على السطح. إضافة إلى ذلك، تغير الإشعاع الشمسي في موقع ما يزداد بشكل كبير. ويرجع ذلك إلى كل من التأثيرات المحلية مثل السحب والتغيرات الموسمية، وكذلك إلى تأثيرات أخرى مثل طول اليوم عند خط عرض معين. المناطق الصحراوية تظهر تغيرات أخفض بسبب ظواهر الغلاف الجوي المحلية مثل السحب. المناطق الاستوائية تظهر تغيرات بطيئة بين الفصول.

(ملاحظة: كمية الطاقة التي تستقبلها الأرض كل ساعة أكبر من كمية الطاقة التي تستهلكها البشرية خلال السنة).

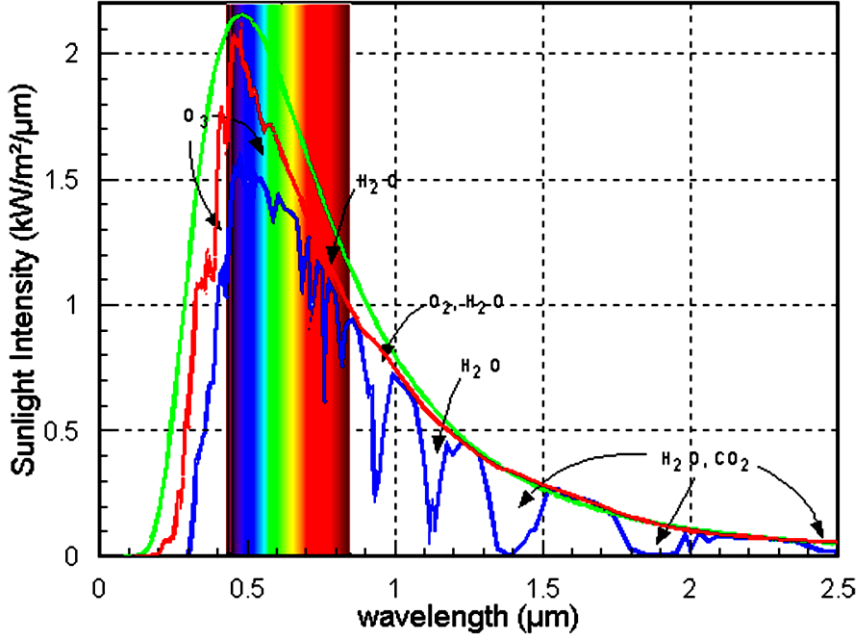
أهم تأثيرات الغلاف الجوي على تطبيقات الخلايا الشمسية هي:

- نقصان في استطاعة الإشعاع الشمسي بسبب الامتصاص، التشتت والانعكاس في الغلاف الجوي.
- تغيرات في المحتوى الطيفي للإشعاع الشمسي بسبب امتصاص أو تشتت بعض أطوال الموجة.
- إضافة مركبة غير مباشرة (مشتتة) للإشعاع الشمسي.

التغيرات المحلية في الغلاف الجوي (مثل بخار الماء، السحب والتلوث) التي لها تأثيرات إضافية على الاستطاعة الواردة، الطيف والاتجاهية. نلخص مختلف هذه التأثيرات في الشكل التالي.



عندما يمر الإشعاع الشمسي من خلال الغلاف الجوي، فإن الغازات والغبار تمتص الفوتونات الواردة. يمتص كل من الأوزون، ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء بقوة الفوتونات التي لها طاقات مقاربة لطاقة تأين هذه الغازات. وتؤدي هذه الإمتصاصات إلى انخفاضات عميقة في منحنى الإشعاعية الطيفية. كمثال، يمتص الكثير من الأشعة تحت الحمراء البعيدة الأكبر من 2 مايكرومتر من طرف بخار الماء وثاني أكسيد الكربون. بشكل مشابه، معظم الأشعة فوق البنفسجية أسفل 0.3 مايكرومتر تمتص من طرف الأوزون (ولكن ليس بما يكفي لتجنب حروق الشمس تماما).



إشعاع الجسم الأسود، الطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي (المنحنى الأحمر) وداخل الغلاف الجوي (المنحنى الأزرق).

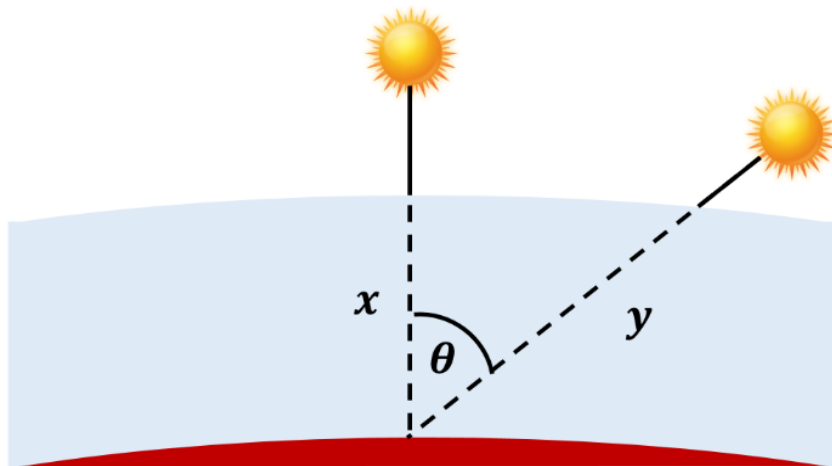
بالرغم من أن الامتصاص من طرف غازات معينة يغير من محتوى الطيف الشمسي الأرضي، لكن تأثيره لا يذكر على الاستطاعة الكلية. بالمقابل فإن أهم العوامل التي تؤثر على الاستطاعة هي الامتصاص والتشتت الناتجان من جزيئات الهواء والغبار. هذا الامتصاص لا يحدث انخفاضات في الإشعاعية الطيفية، ولكنه يسبب نقصاناً في الاستطاعة حسب طول المسار الذي يقطعه الضوء لاجتياز الغلاف الجوي. عندما تكون الشمس عمودية فإن الامتصاص الناتج عن عناصر الغلاف الجوي يؤدي إلى انخفاض موحد نسبياً في الضوء المرئي، لذلك فالضوء الوارد يبقى أبيض. في حين في حال زيادة طول المسار المقطوع (عند الشروق أو الغروب) فإن الفوتونات ذات الطاقة الأعلى (أطوال الموجة الأقصر) تتأثر أكثر بالامتصاص والتشتت. لذلك تبدو الشمس أكثر احمراراً عند الشروق والغروب وأقل شدة مقارنة مع منتصف النهار.

5. كتلة الهواء (Air Mass):

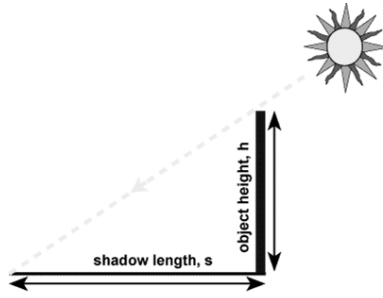
كتلة الهواء هي طول المسار الذي يقطعه الضوء خلال الغلاف الجوي على أقصر مسار ممكن (عندما تكون الشمس في الموضع الرأسي). تعبر كتلة الهواء على مقدار نقصان استطاعة الضوء عندما يجتاز الغلاف الجوي ويتعرض للامتصاص والتشتت بسبب جزيئات الهواء والغبار. تعرف كتلة الهواء بالعلاقة:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

θ هي الزاوية المشكلة مع الموضع الرأسي للشمس. عندما تكون الشمس في الموضع الرأسي فإن كتلة الهواء هي 1



طريقة أبسط لتحديد كتلة الهواء انطلاق من ظل قطب عمودي.

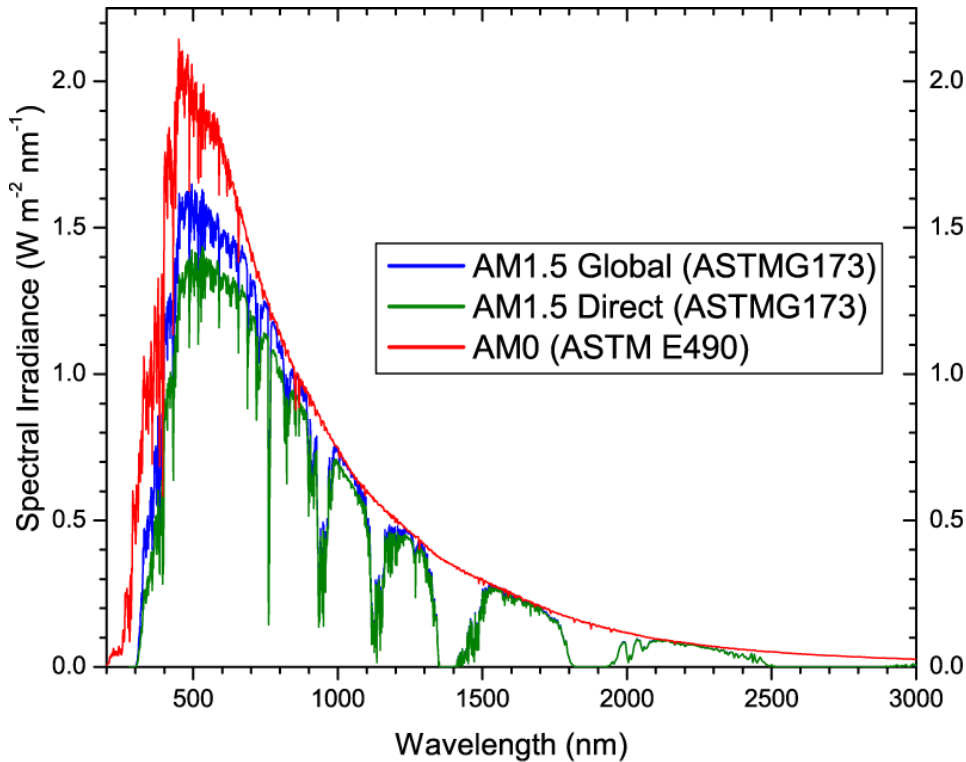


$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} = \sqrt{\frac{h^2 + s^2}{h^2}} = \sqrt{1 + \frac{s^2}{h^2}}$$

مردود الخلية الشمسية حساس جدا للتغيرات في الاستطاعة والطيف للإشعاع الشمسي. لتسهيل مقارنة دقيقة بين مختلف الخلايا الشمسية المقاسة في أزمنة ومواقع عدة، نعرف طيفا قياسيا للإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي وعلى مستوى سطح الأرض.

الطيف القياسي على مستوى سطح الأرض يسمى AM1.5G (G تعني الإجمالي الذي يتكون من المركبة المباشرة والمنتشرة) أو AM1.5D (والذي يحتوي على المركبة المباشرة فقط). يمكن تقريب الإشعاع AM1.5D بتخفيض الطيف AM0 (الذي يمثل الإشعاع خارج الغلاف الجوي) بـ 28 في المئة (18 في المئة نتيجة الامتصاص و10 في المئة نتيجة التشتت). الطيف الإجمالي يكبر الطيف المباشر بنسبة 10 في المئة. هذه الحسابات تعطي بالتقريب 970 W/m^2 والذي يقرب عموماً إلى 1 kW/m^2 .

الطيف الشمسي خارج الغلاف الشمسي يسمى AM0، لأنه لا وجود لغلاف جوي يجتازه الإشعاع الشمسي. يستخدم هذا الطيف للتنبؤ بأداء الخلايا الشمسية في الفضاء.



الفصل الثالث: الامتصاص الضوئي

1. الامتصاص الضوئي في انصاف النواقل:

ذكرنا سابقا خاصية الازدواجية موجة - جسيم للضوء وأن أمواج الضوء يمكن أن تتصرف كجسيمات تسمى فوتونات. حيث أن طاقة الفوتون هي: $E=hf$

$$\lambda = c/\nu = hc/E = \frac{1.24}{E} (\mu\text{m})$$

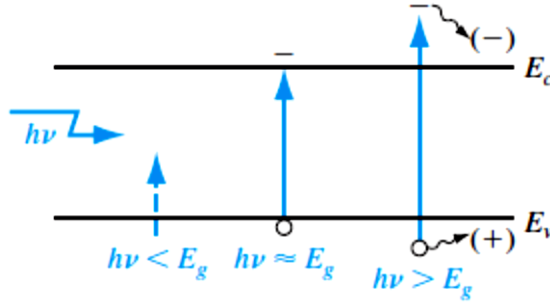
أين E طاقة الفوتون بـ (eV) و c سرعة الضوء.

بالحديث عن تفاعل هذه الفوتونات مع نصف الناقل فهناك عدة آليات: تفاعل الفوتونات مع شبكة نصف الناقل الذي يحول طاقة الفوتونات إلى حرارة، تفاعل الفوتون مع شوائب نصف الناقل (الأخذة أو المانحة أو مع العيوب داخل نصف الناقل). وأخيرا، أهم تفاعل للفوتونات هو مع إلكترونات التكافؤ، عندما يصطدم فوتون مع إلكترون تكافؤ، بطاقة كافية يمكن أن يرفع الإلكترون إلى عصابة النقل. هذه العملية تولد ثنائيات إلكترون - ثقب حرة وبالتالي تكون تركيز إضافي من حاملات الشحنة الحرة.

عندما يضاء نصف ناقل، يمكن للفوتونات أن تمتص أو تنتشر عبر نصف الناقل وذلك تبعا لطاقة الفوتون وعرض الفاصل الطاقي E_g :

- إذا كانت طاقة الفوتونات أقل من E_g ، فإنها لا تمتص والضوء ينتقل عبر نصف الناقل الذي يبدو شفافا.
- إذا كانت $E = hf \geq E_g$ ، يمكن للفوتونات أن تتفاعل مع إلكترونات التكافؤ وترفعها إلى عصابة النقل. مما يؤدي الى تكون ثنائيات إلكترون-ثقب.

يوضح الشكل التالي آليات الامتصاص فوتونات بطاقات مختلفة. عندما $hf > E_g$ تتكون الثنائيات الحرة إلكترون-ثقب والفائض من الطاقة الممتصة يمكن أن يمنح الإلكترون أو الثقب طاقة حركية إضافية التي يمكن أن تتبدد في شكل حرارة في نصف الناقل.



توليد الثنائيات إلكترون-ثقب في نصف ناقل بواسطة الامتصاص الضوئي

2. معامل امتصاص الفوتونات:

إذا اعتبرنا شدة تدفق الفوتونات هي $(\text{Watt}/\text{cm}^2)I(x)$ ، اذن مقدار النقصان في شدة تدفق الفوتونات خلال dx هي: $\alpha \cdot I(x)dx$ حيث:

$$I(x + dx) - I(x) = \frac{dI(x)}{dx} \cdot dx = -\alpha \cdot I(x)dx \Rightarrow \frac{dI(x)}{dx} = -\alpha \cdot I(x)$$

α يمثل معامل الامتصاص وهو العدد النسبي للفوتونات الممتصة في وحدة المسافة، وحدته هي (cm^{-1}) . إذا كان الشرط الابتدائي المفترض هو $I(0) = I_0$ ، فإن حل المعادلة التفاضلية السابقة يكون من الشكل:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha \cdot x)$$

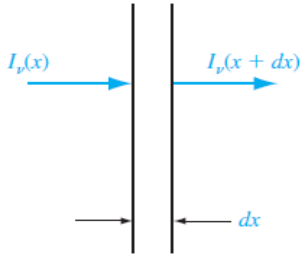


Figure 14.2 | Optical absorption in a differential length.

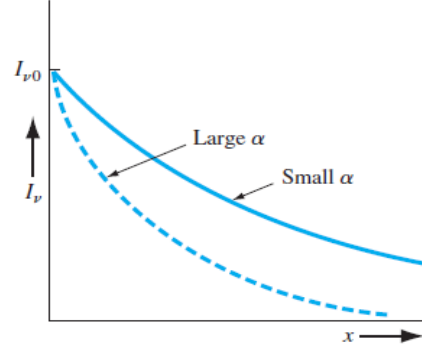
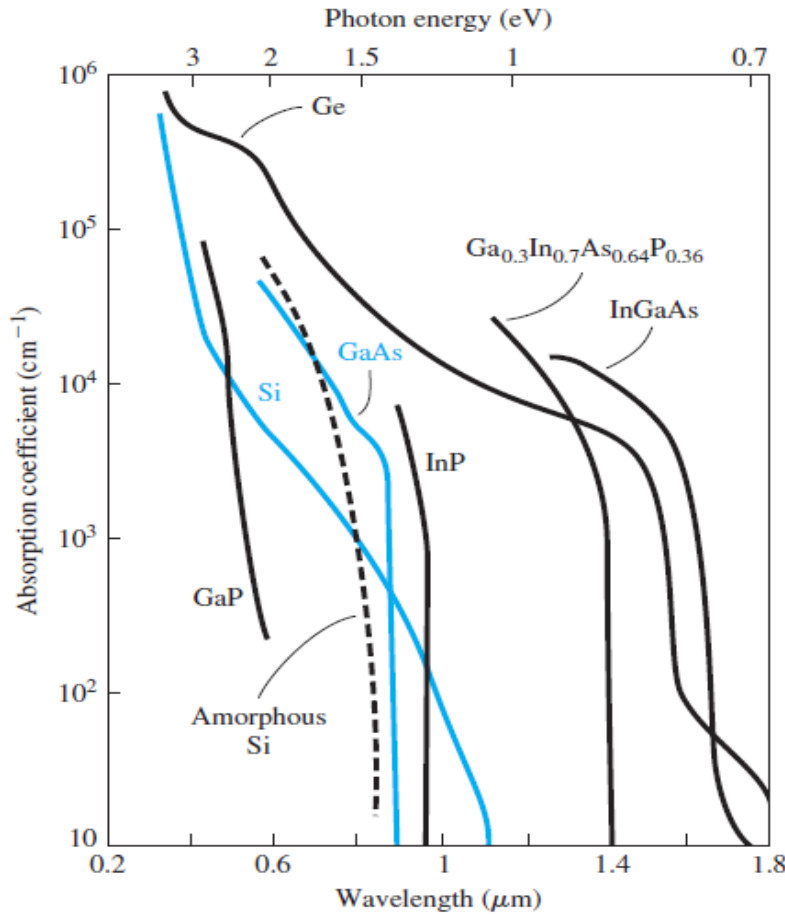


Figure 14.3 | Photon intensity versus distance for two absorption coefficients.

نلاحظ أن:

- أن شدة تدفق الفوتونات تتناقص بشكل أسي مع المسافة عبر نصف الناقل.
- في حالة معامل امتصاص كبير فإن الفوتونات تمتص على مسافة أقصر.
- معامل الامتصاص في نصف ناقل يتغير بشدة كدالة بدلالة طاقة الفوتونات من أجل مختلف أنصاف النواقل.
- معامل الامتصاص يزداد بسرعة من أجل $h\nu > E_g$ أو من أجل $\lambda < \frac{1.24}{E_g}$.
- معاملات الامتصاص صغيرة من أجل $h\nu < E_g$ لذلك يبدو نصف الناقل شفاف للفوتونات في هذا المجال من الطاقة.



الشكل المقابل يمثل معامل الامتصاص بدلالة طول الموجة لعدة أنصاف نواقل

3. معدل التولد:

معدل تولد الثنائيات هو مقدار يعبر عن عدد الثنائيات المتولد في وحدة الحجم وفي وحدة الزمن. إذا فرضنا أن كل فوتون ممتص عند طاقة $(h\nu)$ يكون ثنائية إلكترون-ثقب، فإن معدل تولد الثنائيات إلكترون-ثقب هو:

$$g(x) = \alpha \cdot \phi(x) = \frac{\alpha \cdot I(x)}{h\nu} \text{ (cm}^{-3}\text{s}^{-1}\text{)}$$

الفصل الرابع: تذكير حول الوصلة PN

بين الموصلات والعوازل هناك نوع ثالث من المواد المعروفة باسم أنصاف النواقل (أشباه الموصلات)، هذه المواد لديها عصابة ممنوعة أقل من "3 eV" ما يجعلها تعمل كعوازل عند 0 كلفن. لكن، عند درجات الحرارة المرتفعة، يمكن للطاقة الحرارية أن تنتقل الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، بحيث يمكن أن تتحرك بحرية عن طريق تطبيق حقل كهربائي صغير، وهذا يعطي أشباه الموصلات نطاق مقاوم من 10^{-9} الى $10^{-3} \Omega \cdot m$.

لا يعتمد التيار في أنصاف النواقل فقط على الإلكترونات، بل يعتمد أيضًا على الفراغات الموجبة التي تركتها الإلكترونات خلفها في الذرات، والتي تعرف عادة باسم "الثقوب". لذلك نأخذ بعين الاعتبار في أنصاف النواقل نوعين مختلفين من الحاملات الحرة (الإلكترونات والثقوب).

أنصاف النواقل الجوهرية:

في أنصاف النواقل النقية (المعروفة أيضًا باسم أنصاف النواقل الجوهرية) لا توجد حاملات حرة عند درجة حرارة 0 كلفن. ومع ارتفاع درجة الحرارة، يتم تحفيز الإلكترونات حراريًا لتنتقل من عصابة التكافؤ إلى عصابة التوصيل، وبالتالي، في حالة الاتزان توجد كثافة إلكترونات (n) وكثافة ثقوب (p) متساوية. يمكن حساب كثافة الإلكترونات أو كثافة الثوب بالعلاقتين:

$$n = N_C \cdot \exp[(E_F - E_C)/KT]$$

$$p = N_V \cdot \exp[(E_V - E_F)/KT]$$

في أنصاف النواقل الجوهرية يكون إنتاج أي إلكترون ثقوبًا خلفه، لذا عادة ما نتحدث عن إنشاء زوج ثقب-إلكترون، مما يعني أن تركيز الإلكترونات الحرة مساوٍ لتركيز الثقوب: $n = p = n_i$. إذن يمكن استنتاج العلاقة:

$$n_i^2 = n \cdot p$$

حيث n_i هو التركيز الجوهرية للحاملات الحرة والذي يعد واحد من أهم خصائص أنصاف النواقل. حيث:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left[\frac{-E_g}{2 \cdot KT}\right]$$

حيث يمثل (E_g) عرض العصابة الممنوعة.

ملاحظة:

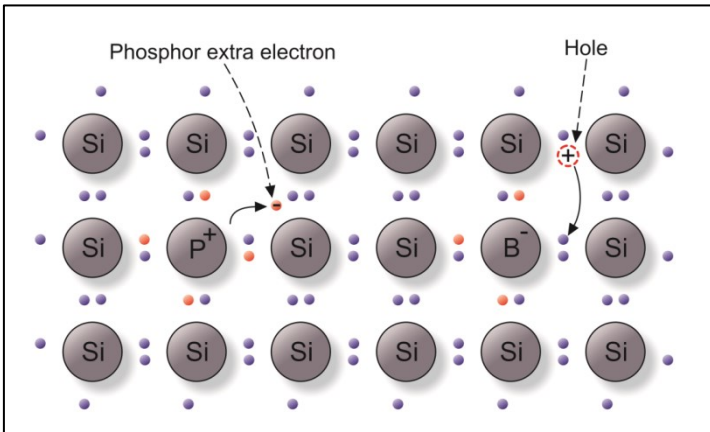
يتعلق الجداء ($n \cdot p$) بدرجة الحرارة وخصائص المادة النصف ناقلة فقط. لذا تعتبر n_i ثابتة من أجل نصف ناقل ما وعند درجة حرارة معينة.

أنصاف النواقل غير الجوهرية:

يمكن التحكم بخصائص أنصاف النواقل بإضافة ذرات غريبة (شوائب) عن المادة بكميات قليلة ما يجعلها أنصاف نواقل غير جوهرية، وهذا ما يعرف بالتطعيم. حيث ينتج نوعين من أنصاف النواقل غير الجوهرية.

أنصاف نواقل نوع N:

نتحصل عليه عن طريق إضافة ذرات مانحة. على سبيل المثال: في حالة السيليكون يمكننا إضافة ذرات الفوسفور التي لديها خمس إلكترونات في مدارها الخارجي. من خلال عمل أربعة روابط تساهمية، تطلق ذرات الفوسفور الإلكترون الخامس. يرتبط هذا الإلكترون بأيون الفوسفور عبر تفاعل كولومب حيث أن النواة الأيونية مشحونة إيجابيا مقارنة بنوى السيليكون.



الفصل الرابع: تركيز حاملات الوصلة PN

إذا تم فصل الإلكترون عن ذرة الفوسفور، عن طريق الطاقة الحرارية - على سبيل المثال- تظل شحنة موجبة ثابتة في موقع الفوسفور. مما ينتج إلكترون إضافي في البنية لكل ذرة فوسفورية (انظر الشكل).

بشكل عام، في أنصاف النواقل المطعمة يكون تركيز الذرات المانحة (N_d) أكبر بكثير من n_i ، لذا يمكننا أن نكتب تركيز الإلكترون في أنصاف النواقل من النوع N في درجة الحرارة الاعتيادية، على النحو التالي:

$$p \approx n_i^2 / N_d \quad , \quad n \approx N_d$$

أنصاف نواقل نوع P:

في هذه الحالة، يضاف عنصر من المجموعة الثالثة للجدول الدوري (البورون مثلاً) إلى السيليكون، حيث يحتوي هذا العنصر على ثلاث إلكترونات في المدار الخارجي. تلتقط ذرة البورون إلكترونًا حرًا لعمل أربعة روابط تساهمية مع ذرات السيليكون المجاورة، مما تنتج ثقبًا إضافية في البنية. فيكون تركيز الحاملات الحرة في هذه الحالة تساوي:

$$n \approx n_i^2 / N_a \quad , \quad p \approx N_a$$

الوصلة PN:

هي عبارة عن نصف ناقل مطعم بذرات مانحة من جهة وذرات آخذة من جهة أخرى كما مبينة في الشكل. عند الحد الفاصل بين الجهتين يتشكل ما يعرف بمنطقة شحنات الفضاء. وهي منطقة تكون شبه خالية من الحاملات الحرة، بالإضافة الى كونها مشحونة سلبا من جهة وإيجابا من جهة أخرى. ما يؤدي الى تشكيل حاجز كموني يعرف بالكمون الداخلي للوصلة والذي يعطى بالعلاقة:

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

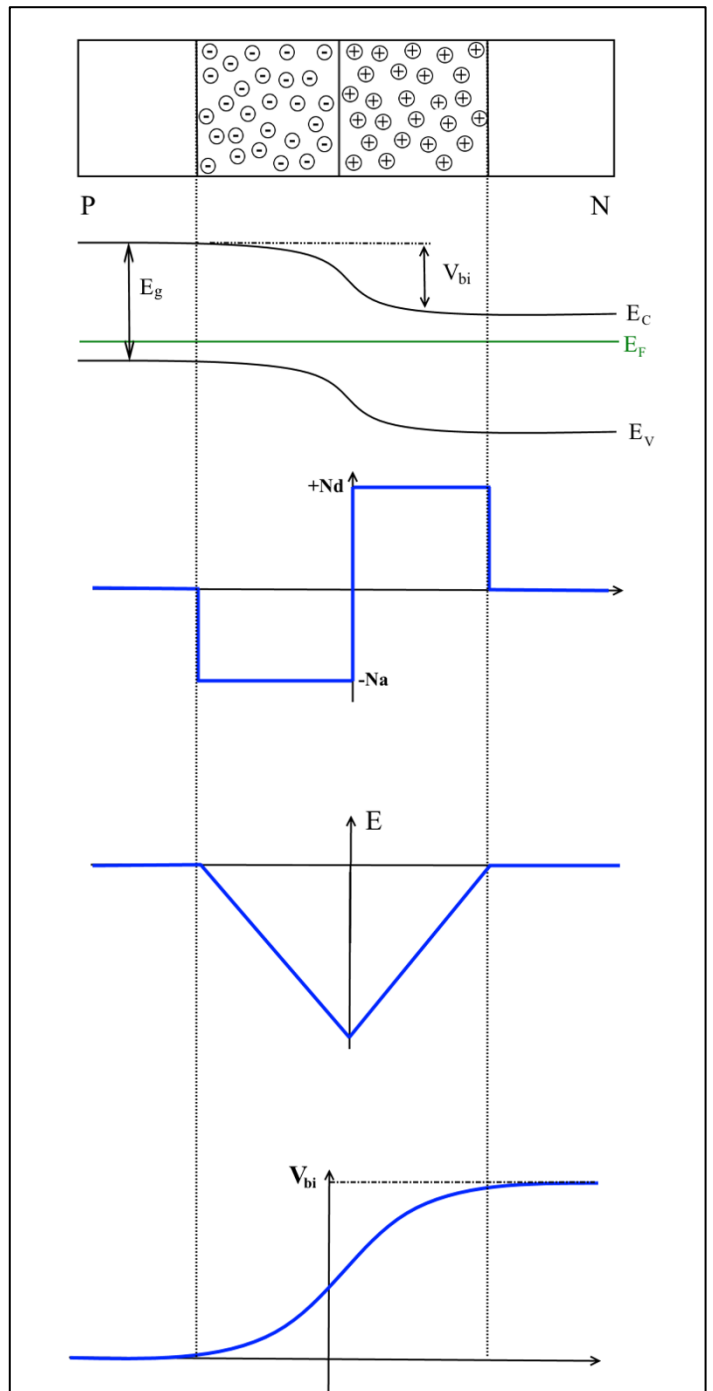
الاستقطاب العكسي:

عندما يتم تطبيق جهد عكسي على وصلة PN، يظهر أثره بشكل رئيسي عبر منطقة شحنات الفضاء، مما يؤدي إلى توسيع عرض منطقة النضوب وزيادة المجال الكهربائي. نظراً للجهد المطبق، لم تعد الوصلة PN في حالة توازن حراري، وبالتالي لا يكون مستوى فارمي ثابتاً على طول الوصلة، حيث ينفصل الى مستويين على طول منطقة شحنات الفضاء تعرف بأشياء مستوى فارمي. وهذا يزيد من ارتفاع الحاجز الكموني بين منطقة N و P بقيمة قدرها qV_D . ستؤدي الزيادة في الحاجز إلى زيادة فعالية تيار جر لمقاومة تيار الانتشار ما يجعل محصلة التيارات مساوية للصفر. ومع ذلك، هناك تيار متبقٍ بسبب الناقلات الأقلية المولدة حرارياً، مما يشكل تيار جر صغير صافٍ للحاملات الأقلية، وهو ما يعرف بتيار التشبع المعطى بالعلاقة:

$$I_s = q \cdot s \cdot \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right)$$

الاستقطاب المباشر:

في حالة وصلة P-N المستقطبة استقطاب مباشر يتم تقليل ارتفاع حاجز الجهد، حيث يظهر الجهد المطبق مباشرة عبر منطقة شحنات الفضاء ويقلل ارتفاع الحاجز الكموني من qV_{bi} إلى $q(V_{bi} - V_D)$. أحد التأثيرات الناتجة من هذا هي زيادة معتبرة في تركيز



الفصل الرابع: تتركيز حاملات الوصلة PN

الإلكترونات في الجانب N والثقوب في الجانب P ذات الطاقات الأعلى من ارتفاع الحاجز المنخفض. وينتج عن ذلك زيادة كبيرة في عدد ناقلات الأغلبية التي تمر عبر منطقة شحنات الفضاء وتظهر على شكل ناقلات الأقلية على الجانب الآخر. وبالتالي، فإن تركيز الناقلات الأقلية (الإلكترونات في الجانب P والثقوب في الجانب N) يزداد.

يزداد عدد حاملات الأغلبية القادرة على تجاوز الحاجز الكموني مع انخفاض ارتفاعه بـ $(V_{bi} - V_D)$ بزيادة في جهد الاستقطاب المباشر V_D . وهذا يعني أن تيار ناقلات الأغلبية التي تتدفق عبر منطقة شحنات الفضاء يزداد مع زيادة في الجهد V_D ، وبالتالي فإن التيار الكلي يزداد هو الآخر مع زيادة قيمة الاستقطاب المباشر، حيث يعطى بالعلاقة:

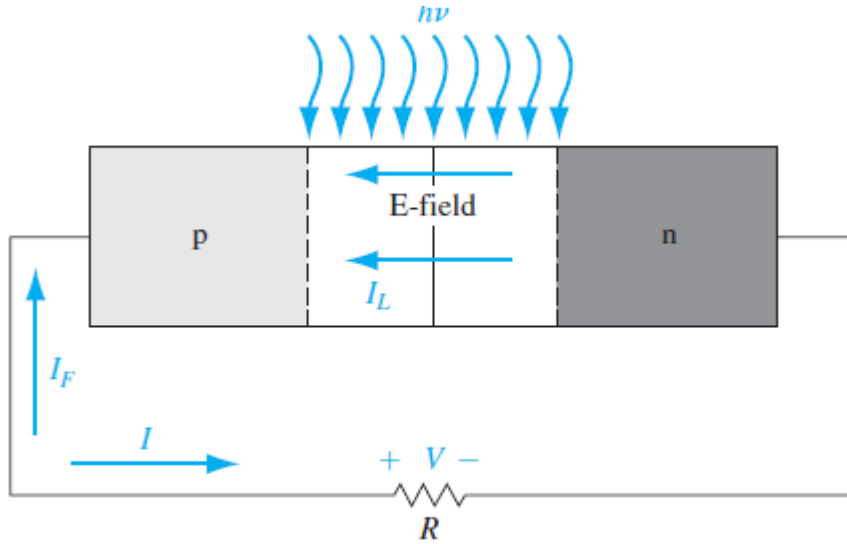
$$I = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{KT}\right) - 1 \right]$$

لاحظ أن هذه العبارة صالحة في كلتا الحالتين (استقطاب عكسي أو مباشر).

الفصل الخامس: الخلايا الشمسية

الخلية الشمسية هي جهاز ذو وصلة pn غير مستقطبة كهربائياً (دون جهد مطبق مباشرة بين طرفيها). الخلية الشمسية تحول استطاعة الفوتونات (الضوء) إلى استطاعة كهربائية تحررها في شحنة. استعملت هذه الأجهزة طويلاً في منح الطاقة للأقمار الصناعية ومركبات الفضاء.

نعتبر وصلة pn كما موضحة في الشكل-1 مع حمولة مقاومة:



الشكل-1: خلية شمسية من نوع pn مع مقاومة حمل

حتى مع عدم وجود استقطاب كهربائي للوصلة، يوجد حقل داخلي في منطقة شحنات الفضاء كما يوضح الشكل-1. في وجود إضاءة موزعة بانتظام وبالتالي تولد منتظم لحاملات الشحنة الإضافية. فإن الثنائيات المولدة في منطقة شحنات الفضاء تنفصل عن بعضها وينتج عنها تيار ضوئي I_L له اتجاه التيار العكسي، مما ينتج فرق في الجهد عبر مقاومة الحمل والذي بدوره يستقطب الوصلة pn استقطاب مباشر. جهد الاستقطاب المباشر ينتج بدوره تيار استقطاب مباشر I_F كما مبين في الشكل. انن فالتيار الصافي للوصلة pn هو محصلة كلا التياران المتعاكسان ويأخذ في حالة خلية شمسية نفس اتجاه التيار العكسي.

1. مبدأ العمل:

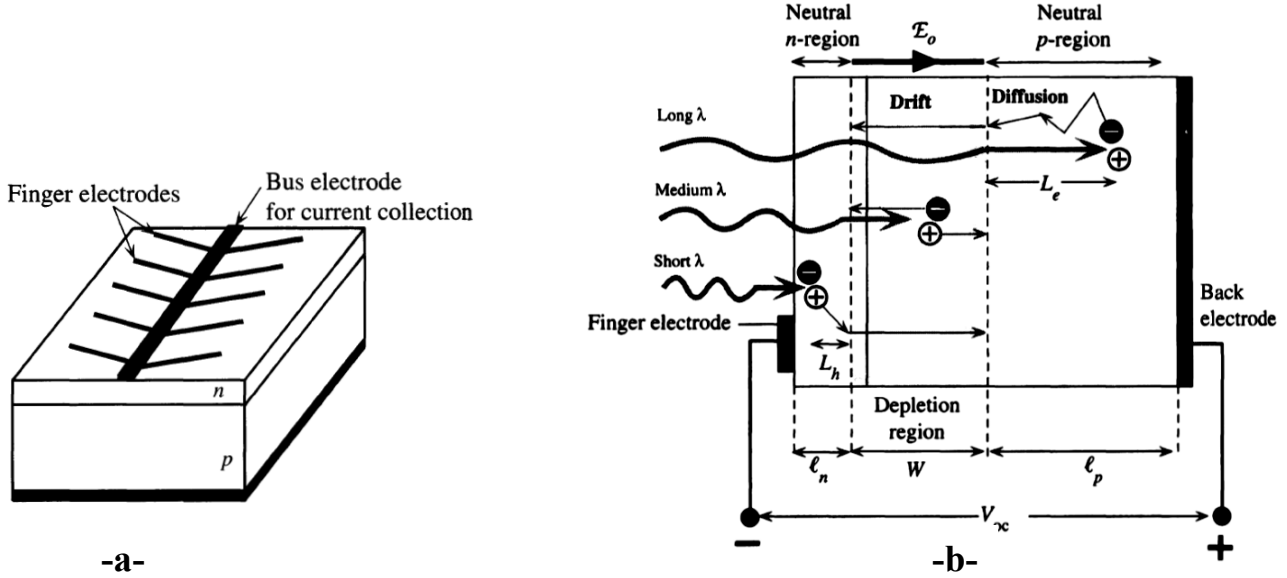
1.1. شكل الخلية

يمثل الشكل-2 مخطط مبسط لنموذج خلية شمسية مكونة من وصلة pn أين المنطقة n ضيقة ومطعمة بشدة، مما يجعل منطقة شحنات الفضاء (W أو SCL space charge layer) تمتد أساساً داخل المنطقة p. والتي بدورها تنشئ حقل داخلي E_0 .

في هذه الحالة تكون الإضاءة عبر المنطقة n، لذلك فالإلكترونات تتوضع على سطح الجهة n وفق تشكيل معين كي تسمح بدخول الضوء (كما موضح في الشكل 2-a). توضع أيضاً على السطح الامامي طبقة ضد عاكسة (شفافة لذلك هي غير موضحة في الشكل) تغطيه وتخفف من الانعكاسات على مستوى السطح المضاء للخلية وبذلك تسمح لمزيد من الضوء بالدخول إلى الجهاز.

2.1. المبدأ الفيزيائي

لأن المنطقة n ضيقة فأغلب الفوتونات تمتص داخل منطقة شحنات الفضاء (W) وداخل الجهة p المتعادلة شحنياً (ℓ_p) وبذلك تتولد ضوئياً الثنائيات (إلكترون-ثقب) في هذه المناطق: الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً داخل منطقة شحنات الفضاء سوف تنفصل عن بعضها مباشرة بواسطة الحقل الداخلي E_0 . الإلكترونات تجر لتصل إلى المنطقة المتعادلة للجهة n وهذا ما يجعل المنطقة سالبة بكميات من الشحنة ($-e$). أما الثقوب فتتجر وتصل إلى المنطقة المتعادلة للجهة p وهذا ما يجعل من هذه الجهة موجبة الشحنة، بالنتيجة يتأسس ما يعرف بجهد الدارة المفتوحة بين نهايتي الجهاز. إذا تم وصل الخلية بمقاومة حمل، فإن الكميات الإضافية من الإلكترونات في الجهة n يمكن أن تسري في الدارة الخارجية إلى أن تصل إلى الجهة p حيث تلتحم مع الكميات الإضافية للثقوب هناك. من المهم اعتبار أنه بدون الحقل الداخلي E_0 فإنه من غير الممكن فصل الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً عن بعضها وبالتالي من غير الممكن تجميع الفائض في الإلكترونات المتولدة ضوئياً في الجهة n والفائض في الثقوب المتولدة ضوئياً في الجهة p.



الشكل -2: مخطط يوضح (a) شكل و (b) مبدأ عمل الخلية الشمسية

عندما يتم وصل نهايتي الجهاز كما موضح في الشكل 3، بالتالي الفانض في الإلكترونات في الجهة n يمكنه أن يسري عبر الدارة الخارجية لكي يعادل الفانض في الثقوب في الجهة p. التيار الناتج من سريان حاملات الشحنة المتولدة ضوئياً يسمى التيار الضوئي. في شروط اشتغال الخلية في النظام المستقر، التيار الضوئي داخل الجهاز الذي ينتج من سريان حاملات الشحنة المتولدة ضوئياً يكون مساوي تماماً إلى سريان حاملات الشحنة في الاتجاه المعاكس خارج الجهاز. حاملات الشحنة في هذه الحالة هي حاملات أقلية التي يتم حقنها بواسطة ظهور جهد فوطوفولطائي عبر الوصلة pn كما لو كنا في حالة اشتغال ثنائية عادية.

3.1 المنطقة الفعالة

الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً، بفوتونات ذات أطوال موجة طويلة والتي تمتص في الجهة p المتعادلة كهربائياً، "تنتشر" على طول هذه المنطقة لأنه لا يوجد حقل كهربائي. إذا كانت مدة حياة الالتحام للإلكترونات هي τ_e فهي تنتشر مسافة متوسطة قدرها

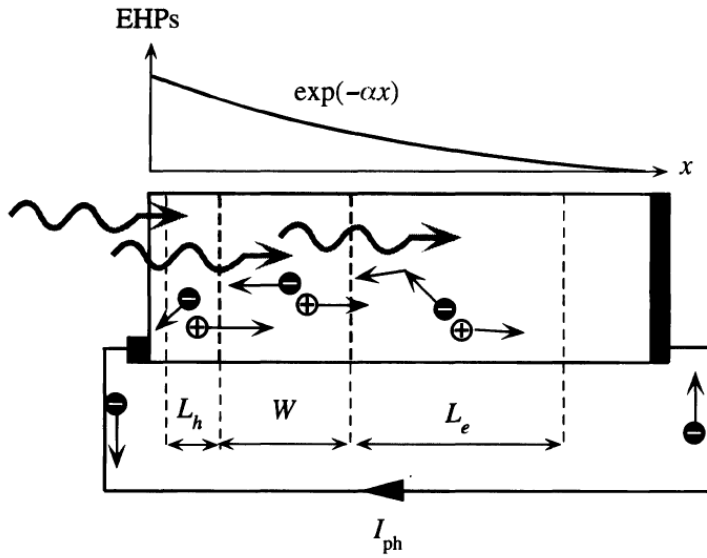
$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$$

أين D_e يمثل معامل انتشار الإلكترونات في الجهة p. وبالتالي فالإلكترونات المتولدة على مسافة L_e من منطقة شحنات الفضاء يمكن لها أن تنتشر لتصل إليها حيث تجر بالحقل الداخلي E_0 إلى غاية الجهة n كما موضح في الشكل 2-b. بالتالي فقط الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً على طول مسافة انتشار حاملات الأقلية (L_e) من منطقة شحنات الفضاء يمكن أن تساهم في الفعل الفوطوفولطائي. عندما ينتشر الإلكترون واصل إلى منطقة شحنات الفضاء فإنه ينتقل عبرها بواسطة الحقل E_0 واصل إلى الجهة n حيث يضيف فيها شحنات سالبة (كذلك تظهر أهمية الحقل الداخلي E_0). لاحظ أن الثقوب المتروكة في الخلف في الجهة p تساهم في زيادة الشحن الموجبة في هذه المنطقة. أما الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً على مسافة أكبر من L_e بعيداً عن منطقة شحنات الفضاء تضيع أو تختفي بالالتحام. إذن من المهم الحصول على طول انتشار حاملات الشحنة الأقلية L_e أطول ما يمكن. لذلك فالوصلة pn من السيليكون Si عادة ما تصنع بحيث يكون أغلب امتداد منطقة شحنات الفضاء في الجهة p ما يجعل الإلكترونات هي حاملات الشحنة الأقلية، مع العلم أن انتشار الإلكترونات في السيليكون هو أكبر من طول انتشار الثقوب. نفس الفكرة تطبق على الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً بالفوتونات ذات أطوال الموجة القصيرة أي الفوتونات الممتصة في المنطقة n. فالثقوب المتولدة ضوئياً على طول مسافة L_h بعيداً عن منطقة شحنات الفضاء (L_h) التي تمثل طول انتشار الثقوب) يمكن لها الانتشار إلى غاية الوصول إليها ثم تجر بواسطة الحقل الداخلي عبرها حتى تصل إلى الجهة p. إذن الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً والتي تساهم في الفعل الفوطوفولطائي تتواجد داخل حجم سمكه $(L_h + W + L_e)$.

4.1 سمك الخلية

الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً بالفوتونات الطاقية الممتصة في الجهة n قرب منطقة السطح أو خارج مدى طول الانتشار L_h بعيداً عن منطقة شحنات الفضاء تختفي. عادة ما تكون مدة الحياة في الجهة n قصيرة بسبب التعطيم المرتفع فيها، لذلك تصنع المنطقة n رقيقة أقل من $0.2 \mu\text{m}$ ، حيث يمكن أن يكون الطول ℓ_n للمنطقة n أقل من طول انتشار الثقوب L_h . بالرغم من هذا فإن الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة قرب سطح المنطقة n تختفي بالالتحام بسبب تواجد عيوب سطحية تتصرف مثل مراكز التلحام.

عند أطوال الموجة حول $1-1.2 \mu\text{m}$ يكون معامل امتصاص السيليكون α صغير وبالتالي عمق الامتصاص ($1/\alpha$) يكون أكبر من $100 \mu\text{m}$. لاقتناص هذه الفوتونات ذات أطوال الموجة الطويلة، يجب أن تكون الجهة p سميكة وفي نفس الوقت طول انتشار حاملات الشحنة الأقلية L_e طويل. عادة الجهة p هي بسبك $200-500 \mu\text{m}$ والطول L_e يؤول أن يكون أقل من هذا.



الشكل-3: الحاملات الحرة المولدة بالضوء داخل الخلية الشمسية

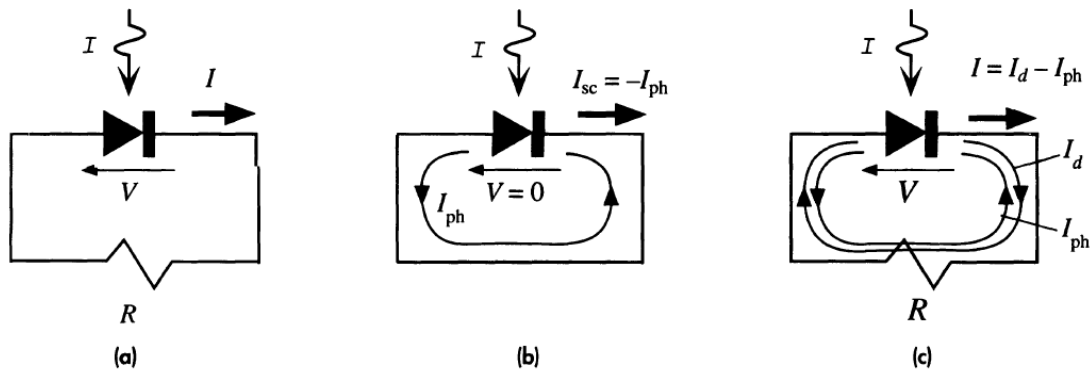
5.1. الفعالية

السيليكون البلوري له فاصل طاقي عرضه 1.1 eV الذي يوافق عتبة طول الموجة $1.1 \mu\text{m}$. الطاقة الواردة في منطقة أطوال موجة أكبر من $1.1 \mu\text{m}$ تضيع وهي تشكل كمية غير مهمة من الطيف الشمسي (حوالي 25%). أسوأ ما يحد (يخفف) من المردود يأتي من الفوتونات عالية الطاقة التي تمتص قرب السطح المضاء للبلور وتضيع بالالتحام في منطقة السطح. سطوح البلورات والسطوح البينية (interfaces) تحتوي تراكيز مرتفعة لمراكز الالتحام التي تحفز التحام الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً قرب السطح. الضياع بسبب التحام الثنائيات (إلكترون-ثقب) قرب أو عند السطح قد يكون أكبر من 40%. هذه التأثيرات مترابطة قد تخفف من مردود الخلية بحوالي 45%. إضافة إلى ذلك الطبقة ضد العاكسة ليست مثالية وهذا ما يخفف من عدد الفوتونات الملتقطة الكلية بمعامل $0.8-0.9$. إذا أضفنا العوامل التي تؤثر في الفعل الفوتوفولطائي في حد ذاته، الحد الأعلى لجهاز فوطوفولطائي يستعمل أحادي بلور من السيليكون هو حوالي 24-26% في درجة الحرارة الاعتيادية.

2. الخصائص الكهربائية:

1.2. التيارات في الخلية الشمسية:

نعتبر خلية شمسية من وصلة pn مثالية متصل بمقاومة حمل R كما موضح في الشكل 4-a. التيار I والجهد V في الشكل يعرفان الاتجاه الاصطلاحي للتيار الموجب والجهد الموجب.



الشكل-4: (a) خلية شمسية موصلة بمقاومة، مع تبيان الاتجاهات الاصطلاحية الموجبة. (b) تمثيل الدارة القصيرة، حيث التيار الوحيد هو التيار الضوئي. (c) خلية شمسية في حالة وجود مقاومة.

1- إذا كان الحمل هو دائرة قصيرة، التيار الوحيد الذي يسري في الدارة هو التيار المتولد بالضوء الوارد. إنه التيار الضوئي I_{ph} الموضح في الشكل 4-b الذي يرتبط بعدد الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً داخل المنطقة الفعالة. كلما كانت الشدة الضوئية أكبر، كلما كان معدل التولد الضوئي أكبر وبالتالي التيار الضوئي I_{ph} . إذا كانت I هي الشدة الضوئية، تيار الدارة القصيرة هو:

$$I_{sc} = -I_{ph} = -K I$$

K هو ثابت مرتبط بالجهاز.

التيار الضوئي لا يرتبط بالجهد عبر الوصلة pn لأن هناك دائماً حقل داخلي ليجر الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً. نستثنى التأثيرات الثانوية للجهد في تعديل عرض منطقة شحنات الفضاء. التيار الضوئي I_{ph} يسري حتى في عدم وجود جهد مطبق على الخلية.

2- إذا كانت R_L قيمة (ليست دائرة قصيرة)، إذن يظهر جهد موجب V عبر الوصلة pn كنتيجة لمرور التيار عبرها كما موضح في الشكل 4-c. هذا الجهد يخفض من الكمون الداخلي للوصلة pn ويؤدي إلى حقن حاملات الشحنة الأقلية وانتشارها كما يحدث في ثنائية عادية. إذن إضافة إلى التيار الضوئي I_{ph} هناك أيضاً تيار I_F مباشر للثنائية يسري في الدارة والذي يظهر نتيجة تكون الجهد V عبر الوصلة كما موضح في الشكل 4-c. التيار المباشر I_F هو نتيجة تصرف عادي لوصلة pn وهو معطى بالخصائص العادية للثنائية:

$$I_F = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

أين I_s يمثل تيار التشعب العكسي و η معامل المثالية ($1 < \eta < 2$). إذن التيار الكلي عبر الخلية الشمسية هو: $I = -I_{ph} + I_F$ أي:

$$I = -I_{ph} + I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

3- في الدارة المفتوحة التيار الكلي = 0 (الشكل 4-c)، هذا يعني أن التيار الضوئي I_{ph} ينشئ جهد فوطوفولطائي V_{oc} كاف لتوليد تيار للثنائية $I_F = I_{ph}$. إذن:

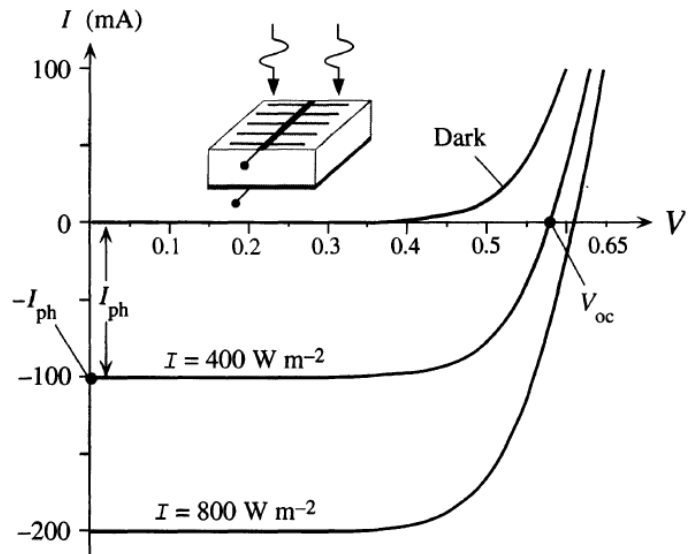
$$I = 0 = -I_{ph} + I_s \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

بالتالي جهد الدارة المفتوحة:

$$V_{oc} = V_t \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right)$$

عموما الخصائص $I - V$ لخلية شمسية من Si موضحة في الشكل 5. هي توافق الخصائص الاعتيادية لوصلة pn في الظلام منسحبة نحو الأسفل بالتيار الضوئي I_{ph} الذي يرتبط بشدة الضوء I . جهد الدارة المفتوحة V_{oc} يحدد بنقطة تقاطع المنحنى $I - V$ مع محور الجهد V ، ($I = 0$). يبدو أنه بالرغم من ارتباطه بالشدة الضوئية فإن قيم V_{oc} هي في المجال (0.5 - 0.7 V).

الشكل 5-: الخاصية (I-V) المثالية لخلية شمسية في اضاءةات مختلفة



2.2. الاستطاعة:

عندما يتم وصل الخلية الشمسية مع مقاومة حمل، يكون لهذه الأخيرة نفس الجهد مثل الخلية الشمسية ويعبرها نفس التيار. لكن التيار I عبر المقاومة R له اتجاه معاكس للاتجاه الاصطلاحي الذي حسبه التيار يسري من الكمون المرتفع إلى الكمون المنخفض (الشكل 6-a). بالتالي:

$$I = -\frac{V}{R}$$

التيار الفعلي I' والجهد الفعلي V' في الدارة يجب أن يحققا معادلتين الخاصتين للخلية الشمسية (*1) ومقاومة الحمل (*2) معا. لتحديد I' و V' يجب حل هاتان المعادلتان في آن واحد أو استعمال الطريقة البيانية (تقاطعهما). باتباع الطريقة الثانية (الشكل 6-b):

- نقوم برسم منحنى $(I - V)$ الخاص بالمقاومة والذي هو عبارة عن خط مستقيم ميله سالب $(-\frac{1}{R})$ يسمى بخط الحمل.
- نقوم برسم منحنى $(I - V)$ الخاص بالخلية الشمسية تحت شدة إضاءة معينة.
- يتقاطع خط الحمل مع خصائص الخلية الشمسية عند النقطة P أين يكون لمقاومة الحمل والخلية الشمسية نفس التيار والجهد I' و V' .
- النقطة P تحقق المعادلتين (*1) و (*2) في نفس الوقت وهي تمثل نقطة اشتغال الدارة.

الاستطاعة المحررة إلى مقاومة الحمل هي:

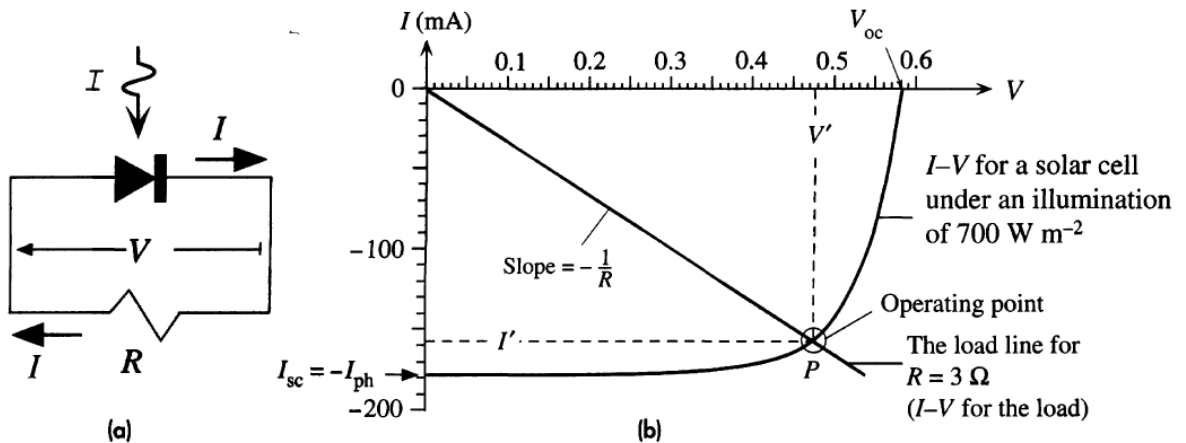
$$P_{out} = I' \times V' = -I_{ph} \cdot V' + I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \cdot V'$$

حيث تمثل مساحة المستطيل المحدود بالمحاور V و I والخطوط المتقطعة كما مبين في الشكل 6-b. أما الاستطاعة الأعظمية المحررة لمقاومة الحمل هي عندما تكون مساحة المستطيل أعظمية (بتغيير المقاومة R أو تغيير الشدة الضوئية)، عندما تصبح $(I' = I_m)$ و $(V' = V_m)$. لإيجاد التيار والجهد اللذان يمنحان الاستطاعة العظمى، نقوم باشتقاق هذه الأخيرة ونساويها للصفر فنجد:

$$\frac{dP}{dV} = 0 = -I_{ph} + I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_m}{kT}\right) - 1 \right] + I_s \cdot V_m \cdot \left(\frac{q}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{qV_m}{kT}\right)$$

حيث V_m : فرق الكمون أين تكون الاستطاعة اعظمية. يمكن كتابة المعادلة السابقة على النحو التالي:

$$\left(1 + \frac{V_m}{V_t}\right) \exp\left(\frac{qV_m}{kT}\right) = 1 + \frac{I_L}{I_s}$$



الشكل 6- (a) مخطط توضيحي لدارة خلية شمسية. (b) الخاصية $(I-V)$ مع توضيح: خط الحمل والتيار الفعلي I'

3.2. معامل التعبئة:

بما أن أعظم تيار ممكن هو التيار الضوئي أو تيار الدارة القصيرة I_{sc} وأعظم جهد ممكن هو جهد الدارة المفتوحة V_{oc} ، إذن الجداء $(I_{sc} \times V_{oc})$ يمثل الاستطاعة المرغوب تحريرها من أجل خلية شمسية معينة. إذن من المهم مقارنة الاستطاعة الأعظمية المحررة من قبل الخلية $I_m \times V_m$ مع $I_{sc} \times V_{oc}$. هذا ما يعرف بمعامل التعبئة FF (fill factor) لخلية شمسية الذي يعكس كفاءتها حيث:

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{SC} \times V_{OC}}$$

FF هو مقياس لمدى قرب منحنى الخصائص $I - V$ للخلية الشمسية من الشكل المستطيل (الشكل المثالي). من الجيد أن يكون FF أقرب ما يمكن من الوحدة. لكن التزايد الأسي لخصائص الوصلة pn يمنع هذا. عادة ما تكون قيم FF في المجال (0.7 - 0.85) أو بالنسب المئوية (70% - 80%) وترتبط بالمادة المستعملة في الخلية الشمسية وبنيتها.

4.2. مردود الخلية الشمسية:

$$\eta_{\text{photovoltaic}} = (100\%) \times \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

P_{out} تمثل استطاعة الخروج أي الاستطاعة الكهربائية المحررة من قبل الخلية في الدارة حيث:

$$P_{out} = I' \times V' \cong I_m \times V_m$$

P_{in} تمثل استطاعة الدخول أي الاستطاعة الضوئية الواردة على الخلية:

$$P_{in} = (\text{المساحة المضاءة}) \times (\text{شدة الضوء})$$

هنا: $[P_{in/out}] = \text{Watt}$

5.2. المردود الكوانتي الداخلي:

هي نسبة عدد الحاملات الحرة التي تمنحها الخلية الشمسية إلى عدد الفوتونات (ذات طاقة معينة) الممتصة من قبل الخلية الشمسية:

$$IQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{absorbed photons/sec}} = \frac{EQE}{1 - R}$$

6.2. المردود الكوانتي الخارجي:

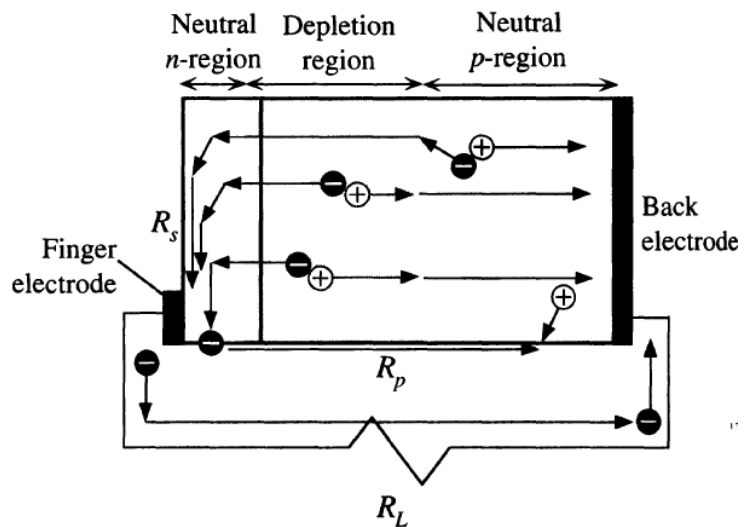
هو نسبة عدد الحاملات الحرة التي تمنحها الخلية الشمسية إلى عدد الفوتونات (ذات طاقة معينة) الواردة على الخلية الشمسية من الخارج:

$$EQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{photons/sec}} = \frac{J_{sc}(\lambda)/q}{\Phi(\lambda)} = \frac{J_{sc}(\lambda) \cdot h\nu}{q P_{in}(\lambda)} = \frac{hc}{q \cdot \lambda} S(\lambda)$$

حيث $S(\lambda)$ هي الاستجابة الطيفية للخلية:

$$S(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \left(\frac{\text{A}}{\text{Watt}} \right)$$

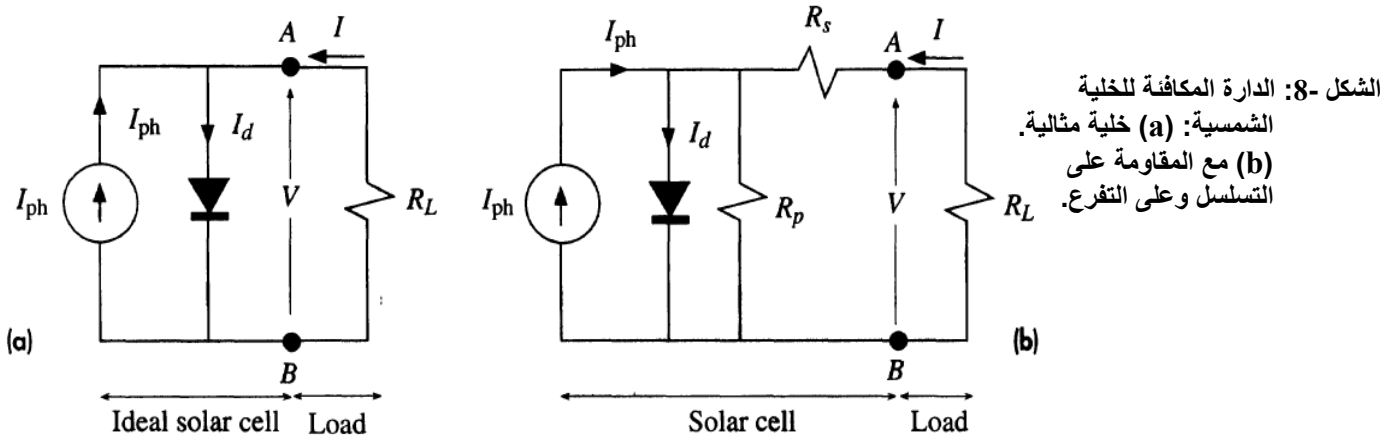
3. المقاومات على التسلسل والتوازي (Series and Shunt Resistance)



الشكل 7: المقاومة على التسلسل وعلى التفرع في خلية شمسية.

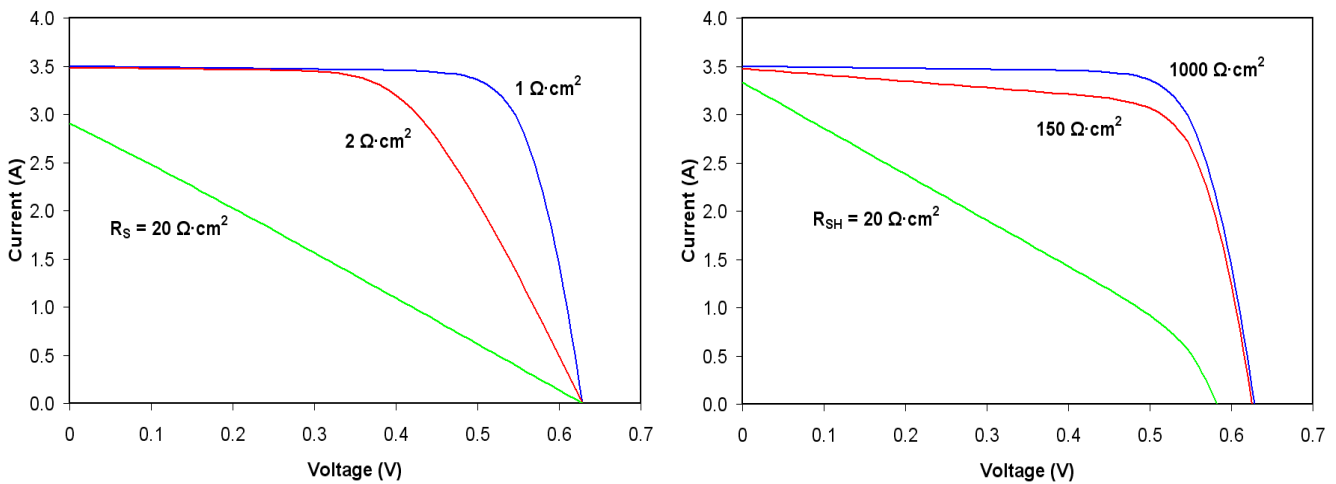
عملية الخلايا الشمسية يمكن أن تحيد عن الخلية الشمسية ذات وصلة pn مثالية كما موضحة في الشكل 5 لعدد من الأسباب. نعتبر وصلة pn مضاءة ومتصلة بمقاومة حمل R_L ويفرض أن التولد الضوئي يحدث في منطقة شحنات الفضاء. كما موضح في الشكل 7، الإلكترونات

المتولدة ضوئياً لها أن تعبر منطقة نصف الناقل السطحية لكي تصل إلى أقرب إلكترونات. كل الإلكترونات التي تعبر من المنطقة السطحية للطبقة n إلى الإلكترونات تواجه مقاومة تسلسل فعلية R_S داخل الدارة الفوفولطائية. إذا كانت الإلكترونات رقيقة، فإن مقاومة الإلكترونات في حد ذاتها سوف ترفع من R_S . هناك أيضاً مقاومة على التسلسل بسبب المنطقة p المتعادلة، لكنها عموماً صغيرة مقارنة مع مقاومة الإلكترونات العابرة إلى الإلكترونات. الشكل 8- a يوضح الدارة المكافئة لخلية شمسية ذات وصلة pn مثالية.



عملية التولد الضوئي تمثل بمولد تيار ثابت I_{ph} ، الذي يولد تيار متناسب مع الشدة الضوئية. تدفق الحاملات المتولدة ضوئياً عبر الوصلة تؤدي إلى زيادة فرق الجهد الفوفولطائي V عبر الوصلة، وهذا الجهد يؤدي إلى تيار الثنائية العادية I_F والذي يمثل بوصلة ثنائية مثالية في الدارة (الشكل 8- a). من الواضح أن I_{ph} و I_F متعاكسان في الاتجاه (I_{ph} صاعد و I_d نازل)، إذن في الدارة المفتوحة تكون لهما نفس الشدة ويلغي أحدهما الآخر. بالاصطلاح، التيار الموجب I عند طرف المخرج يؤخذ $I = -I_{ph} + I_S$.

الصورة 8- b تمثل الدارة المكافئة لخلية شمسية حقيقية. المقاومة على التسلسل R_S تزيد من انخفاض الجهد وبالتالي تمنع الجهد الفوفولطائي المثالي من التأسيس عند المخرج بين A و B . كذلك نسبة من الحاملات المتولدة ضوئياً (عادة صغيرة) يمكن أيضاً أن تسري في السطوح البلورية ($crystal surfaces$) (حدود الجهاز) أو عبر حدود الحبيبات في الجهاز متعدد البلورات بدل السريان عبر مقاومة الحمل R_L . هذه التأثيرات التي تمنع الحاملات المتولدة ضوئياً من السريان في الدارة الخارجية يمكن تمثيلها بمقاومة موازية داخلية أو ما تعرف بـ $shunt resistance R_p$. التي تحرف بعض من التيار الضوئي عن مقاومة الحمل R_L . عادة R_p أقل أهمية من R_S ، إلا إذا كان الجهاز متعدد البلورات بشكل بالغ ومركبة التيار التي تسري عبر حدود الحبيبات ليست مهمة.



الشكل 9- تأثير المقاومة على الخلية الشمسية: (a) على التسلسل. (b) على التفرع.

مقاومة التسلسل R_S يمكن لها أن تؤثر سلباً وبشكل معتبر على خصائص الخلية الشمسية كما موضح في الشكل 9- a حيث من الواضح أن استطاعة المخرج الأعظمية المتوفرة تنقص مع زيادة مقاومة التسلسل وذلك ما يخفض من مردود الخلية. يلاحظ أيضاً أنه عندما تكون R_S كبيرة فهي تحد من تيار الدارة القصيرة. بينما R_S لا تؤثر على جهد الدارة المفتوحة V_{OC} ، فإن المقاومة الموازية R_p يمكن أن تخفض في المردود من خلال خفض V_{OC} .

بأخذ بعين الاعتبار كل من المقاومة على التسلسل والمقاومة على التفرع، تصبح عبارة التيار النهائية كالتالي:

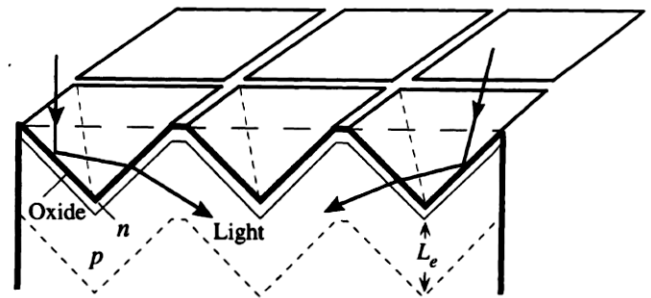
$$I = -I_{ph} + I_s \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{\eta kT} \right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_{SH}}$$

4. أنواع الخلايا الشمسية:

1.4. وصلة pn متجانسة: (homojunction)

هي الخلايا الشمسية المصنوعة من وصلة pn من نفس نصف الناقل. أغلب هذه الخلايا تستعمل السيليكون البلوري لأن صناعة نصف الناقل من السيليكون هي حاليا تكنولوجيا متقدمة تمكن من صناعة أجهزة فعليا مكلفة. مردود الخلايا الشمسية من السيليكون في المجال %18 من أجل الخلايا متعددة البلورات إلى حوالي %22-24 في الخلايا عالية المردود من السيليكون أحادي البلور التي لها بنى خاصة حيث تمتص أكبر ما يمكن من الفوتونات. أحسن خلية شمسية من وصلة متجانسة من السيليكون لها مردود في حوالي %24 من أجل أحادي بلور غالي. هذه الخلايا لها سطح مميز مكون من صف من الأهرام المقلوبة محفورة في السطح لأسر أكبر قدر ممكن من الضوء الوارد كما مبين في الشكل 10.

الشكل 10: سطح على شكل اهرامات مقلوبة للانخفاض من الضياع عن طريق الانعكاس والزيادة من نسبة الامتصاص.



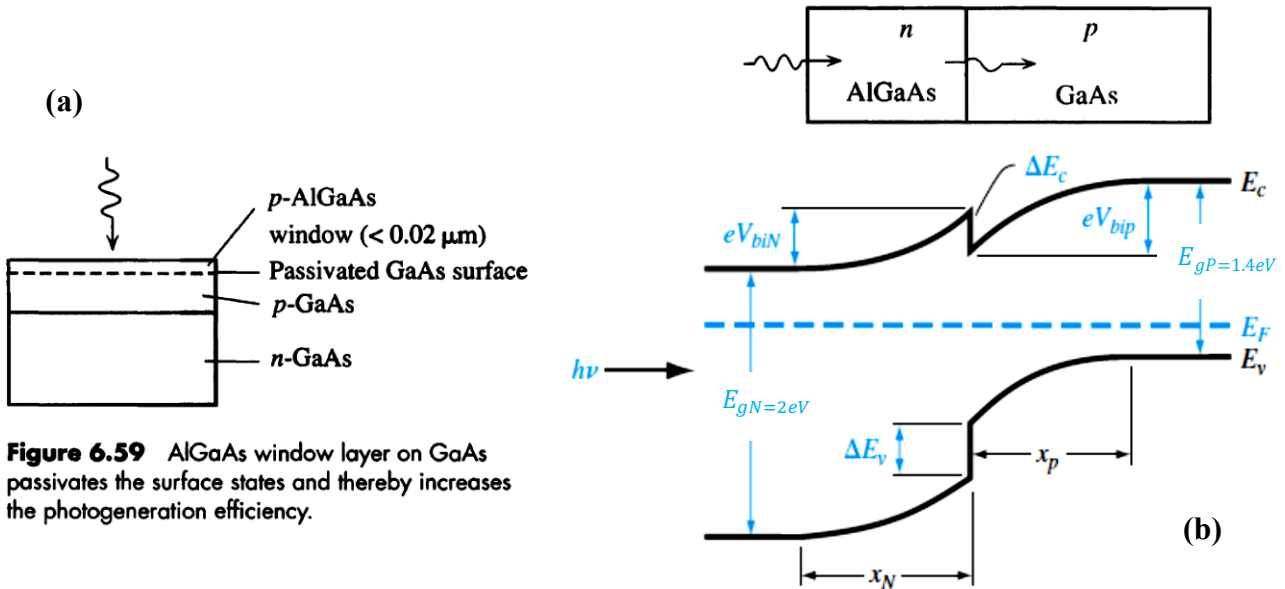
الانعكاسات الناعمية على سطح مستوي للبلور يؤدي إلى ضياع في الضوء، في حين الانعكاسات داخل الهرم تسمح بفرصة ثانية أو حتى ثلاثة لامتصاص الضوء. إضافة إلى ذلك، بعد الانعكاس، الفوتونات يمكنها الدخول إلى نصف الناقل بزوايا مائلة ما يعني أنها سوف تمتص في حجم نصف الناقل حيث يحدث التولد الضوئي أي على طول مسافة انتشار الإلكترونات من منطقة شحنات الفضاء كما موضح في الشكل 10. الجدول الموالي يلخص خصائص خلايا شمسية متعددة في درجة حرارة الغرفة تحت طيف $AMI.5$ واستطاعة قدرها $1000 Wm^{-2}$.

Semiconductor	E_g (eV)	V_{oc} (V)	J_{sc} ($mA cm^{-2}$)	FF	η (%)	Comments
Si, single crystal	1.1	0.5-0.7	42	0.7-0.8	16-24	Single crystal, PERL
Si, polycrystalline	1.1	0.5-0.65	38	0.7-0.8	12-19	Amorphous film with tandem structure, convenient large-area fabrication
Amorphous Si:Ge:H film					8-13	
GaAs, single crystal	1.42	1.02	28	0.85	24-25	Different bandgap materials in tandem increases absorption efficiency
GaAlAs/GaAs, tandem		1.03	27.9	0.864	24.8	
GaInP/GaAs, tandem		2.5	14	0.86	25-30	Different bandgap materials in tandem increases absorption efficiency
CdTe, thin film	1.5	0.84	26	0.75	15-16	
InP, single crystal	1.34	0.87	29	0.85	21-22	
CuInSe ₂	1.0				12-13	

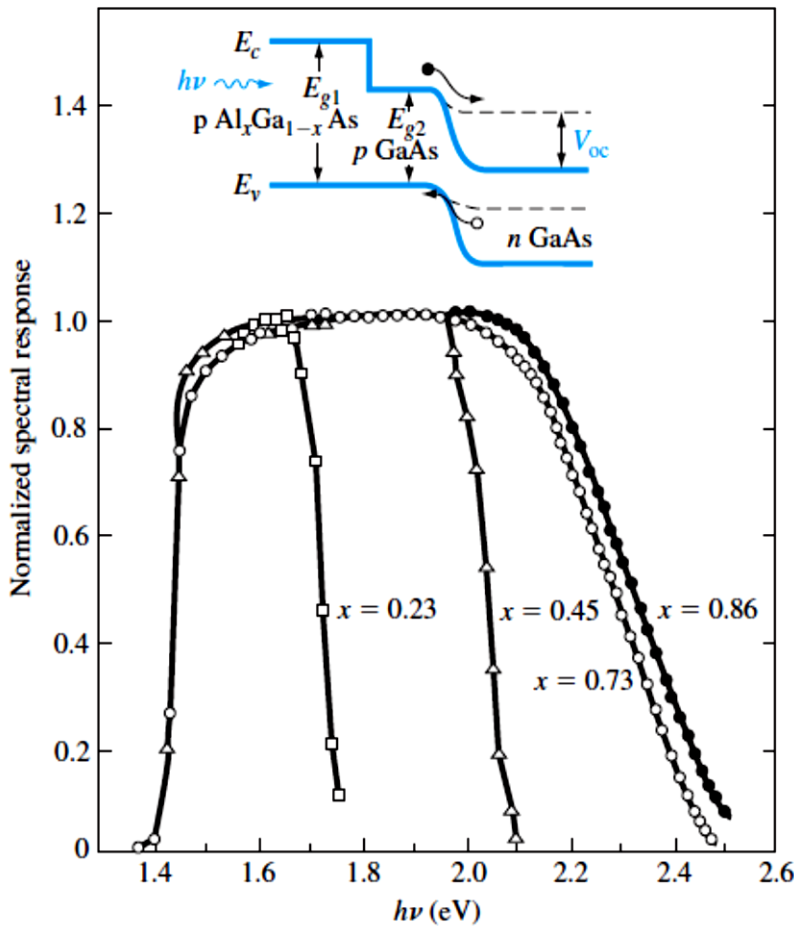
الخلايا من Si و GaAs لها قيم مردود من نفس الرتب بالرغم من كون GaAs الذي له فاصل طاقي أعلى من المتوقع نظريا أن يكون مردوده أحسن.

2.4. وصلة pn غير متجانسة:

أهم العوامل المتسببة في انخفاض مردود خلية شمسية من Si هي الفوتونات غير الممتصة والتي لها طاقة $h\nu < E_g$ والفوتونات في مجال أطوال الموجة القصيرة التي تمتص قرب السطح المضاء. يمكن التقليل من أثر هذه العوامل باستخدام بنية مزدوجة الوصلة (structure tandem) أو بنية وصلات غير متجانسة (hétérojonctions).



الشكل 11: وصلة NP غير متجانسة: (a) بنية الخلية. (b) مخطط الطاقة.



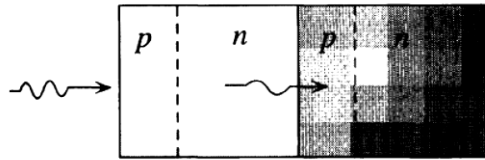
الشكل 12: الاستجابة الطيفية لعدة خلايا شمسية من AlGaAs ذات نسب مختلفة من الألمنيوم.

هناك عدد من خلايا أنصاف النواقل (III-V) التي يمكن تحضيرها مع فواصل طاقة مختلفة وبنفس ثابت الشبكة. الوصلات غير المتجانسة (وصلات بين مواد مختلفة) انطلاقاً من هذه الخلائط تحتوي كمية مهمة من العيوب السطحية البينية (interface defects). AlGaAs له فاصل طاقي أعرض من GaAs وهو بذلك يسمح لأغلب الفوتونات بالمرور عبره. عندما نستعمل طبقة رقيقة من AlGaAs فوق وصلة pn من GaAs كما موضح في الشكل 11-a، هذه الطبقة سوف تبطل فعالية العيوب السطحية المتواجدة عادة في خلية GaAs متجانسة الوصلة. طبقة AlGaAs كنافذة سوف تتغلب على الالتصاقات السطحية وتحسن من مردود الخلية (مثل هذه الخلايا لها مردود في حدود 24%). الوصلات غير المتجانسة بين أنصاف نواقل (III-V) بفواصل طاقة مختلفة والتي شبكاتها تكافئاً تمنح إمكانية تطوير خلايا شمسية عالية المردود. المثال البسيط لوصلة غير متجانسة الموضح في الشكل 11-b يتكون من وصلة pn مكونة من طبقة n-AlGaAs ذات فاصل

طاقة عريض مع طبقة p-GaAs. الفوتونات عالية الطاقة ($h\nu > 2 \text{ eV}$) سوف تمتص في AlGaAs في حين الفوتونات بطاقات أقل من 2 eV وأكبر من 1.4 eV سوف تمتص في المنطقة GaAs. في خلايا شمسية أكثر تطوراً، الفاصل الطاقي لـ AlGaAs يتغير بشكل متدرج انطلاقاً من السطح بتغيير تركيبة الطبقة AlGaAs (نسبة Al في الخليط AlGaAs).

3.4. الخلايا المتعددة:

الخلايا المزدوجة (tandem) أو أكثر تستعمل خليتان مترابطتان على التوالي أو أكثر من خليتان وذلك لزيادة كميات الفوتونات الممتصة من الضوء الوارد كما مبين في الشكل 13. الخلية الأولى مصنوعة من نصف ناقل ذو فاصل طاقي الأعرض (E_{g1}) الذي يمتص فقط الفوتونات بطاقة ($h\nu > E_{g1}$). الخلية الثانية بفاصل طاقي (E_{g2}) تمتص الفوتونات التي تعبر الخلية الأولى ولها طاقات ($h\nu > E_{g2}$). كل البنية يمكن تنميتها ضمن أحادي بلور باستعمال طبقات بلورية متكافئة الشبكة والحصول على خلية مزدوجة متألّفة (monolithic tandem cell). مثلاً، خلية مزدوجة GaAs-GaSb تشتغل تحت شدة ضوئية 100 مرة أكثر من شدة الإشعاع الشمسي العادي (100-sun condition)، تظهر مردود حوالي 34%. بالإضافة فإن استعمال أربعة خلايا مجتمعة مكن من الوصول إلى مردود قدره 46% (أعلى مردود مسجل حتى الآن). الخلايا الشمسية المزدوجة استعملت في الخلايا الشمسية ببنية (pin) من طبقات رقيقة من (a-Si:H) للحصول على مردود في حوالي 12%. هذه الخلايا المزدوجة مكونة من خلية (pin) من a-Si:H مترابطة مع خلية (pin) من a-Si:Ge:H ويمكن صنعها بسهولة على مساحات واسعة.



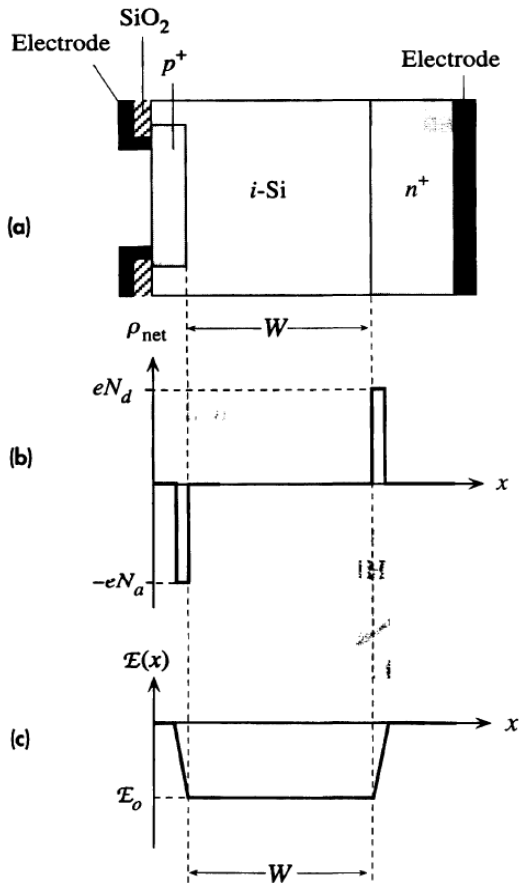
الشكل 13: خلية شمسية مزدوجة.

Cell 1 (E_{g1}) Cell 2 ($E_{g2} < E_{g1}$)

4.4. الثنائيات pin، الثنائيات الضوئية والخلايا الشمسية:

الثنائية pin من Si هي جهاز له بنية مكونة من ثلاث طبقات: طبقة رقيقة من نوع p^+ مطعمة بشدة، طبقة جوهرية (Si-i) نسبياً سميكة، طبقة رقيقة n^+ مطعمة بشدة كما مبين في الشكل 14-a. للتبسيط نفترض أن الطبقة (i) جوهرية فعلاً أو على الأقل مطعمة تطعيماً خفيفاً مقارنة مع p^+ و n^+ بشكل أنها تتصرف تقريباً كأنها جوهرية. الطبقة الجوهرية أعرض من المناطق p^+ و n^+ ، قد تكون في المجال 5-50 μm حسب التطبيقات المعنية. عندما تتشكل البنية في البداية، الثقوب تنتشر من الجهة p^+ والإلكترونات تنتشر من الجهة n^+ نحو منطقة Si الجوهرية أين تلتحم وتختفي. هذا يخلف منطقة رقيقة في الجهة p^+ بها ذرات التطعيم الآخذة المشحونة سلباً غير معوضة بالثقوب، ومنطقة رقيقة في الجهة n^+ بها ذرات التطعيم المانحة المشحونة إيجاباً غير معوضة بالإلكترونات كما مبين في الشكل 14-b. هذه الشحن السالبة والموجبة تكون منفصلة عن بعضها بواسطة المنطقة Si الجوهرية ذات العرض W.

هناك حقل داخلي منتظم E_0 في المنطقة Si-i - i يتجه من الأيونات المشحونة إيجاباً في المنطقة n^+ إلى الأيونات المشحونة سلباً في المنطقة p^+ كما مبين في الشكل 14-c. ليست هناك شحنة فضاء في المنطقة الجوهرية، من $dE/dx = \rho/\epsilon_0\epsilon_r = 0$ بالتالي الحقل يكون منتظم. في حين الحقل الداخلي في منطقة شحنات الفضاء لوصلة pn ليس منتظماً. في عدم وجود استقطاب، الاتزان الترموديناميكي يحافظ عليه بالحقل الداخلي E_0 الذي يمنع انتشار إضافي للحاملات الأغلبية من المناطق p^+ و n^+ نحو المنطقة Si-i. أي ثقب يريد الانتشار من المنطقة p^+ نحو المنطقة Si-i - i يجب رجوعاً بالحقل E_0 بالتالي محصلة التيار هي صفر. مثل وصلة pn هناك أيضاً كمون داخلي V_0 ابتداءً من حد منطقة شحنات الفضاء في الجهة p^+ إلى حد منطقة شحنات الفضاء في الجهة n^+ . V_0 مثل E_0 يكون حاجز كمون



الشكل 14: (a) مخطط توضيحي لبنية pin مثالية، (b) توزيع كثافة الشحنة على طول الوصلة، (c) توزيع الحقل الكهربائي على طول الوصلة.

ضد أي انتشارات إضافية للثقوب والإلكترونات داخل المنطقة $Si - i$ ويحافظ على الاتزان الترموديناميكي في الدارة المفتوحة (لأن محصلة التيار = صفر) كما في وصلة pn. يظهر من الشكل 14-c أنه في غياب الجهد المطبق، فإن $E_0 = V_0/W$.

الحقل E في المنطقة $Si - i$ يبقى منتظم لكنه يرتفع إلى

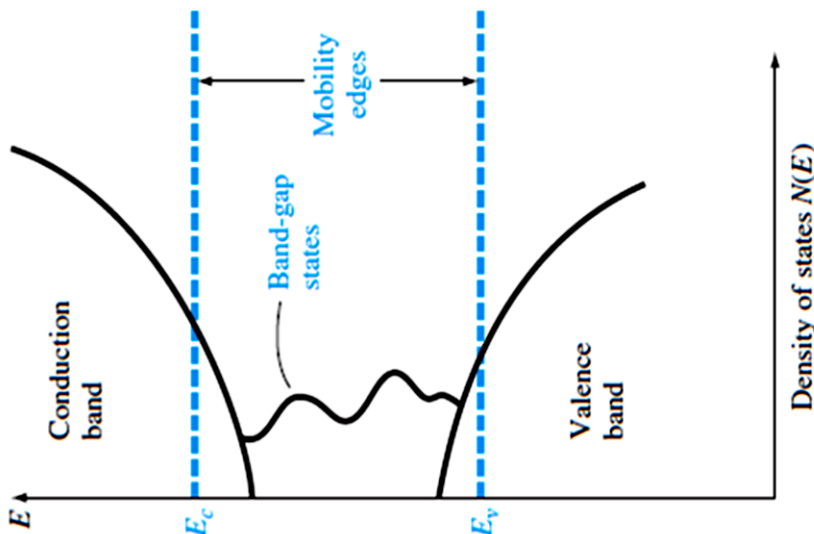
$$E = E_0 + \frac{V_r}{W} \cong \frac{V_r}{W} \quad (V_r \gg V_0)$$

بما أن عرض المنطقة $Si - i$ في الجهاز pin هو عادة أكبر من عرض منطقة شحنات الفضاء في وصلة pn عادية، بالتالي أجهزة pin لها جهود انهيار أعلى وهذا ما يجعل من أجهزة pin مستعملة في الحالات التي تتطلب جهود انهيار مرتفعة.

النقاط السلبية في ثنائية ضوئية من وصلة pn تتمثل في كون عرض منطقة شحنات الفضاء لا يتعدى بعض المايكرومترات. هذا يعني أنه في أطوال الموجات الطويلة أين عمق الاختراق هو أكبر من عرض منطقة شحنات الفضاء أغلب الفوتونات تمتص خارج منطقة شحنات الفضاء أين لا يوجد حقل لفصل الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئياً وجرها. بالتالي المرود يكون نسبياً منخفض في مجال أطوال الموجات الطويلة. هذه الإشكاليات تخف بشكل معتبر في ثنائية ضوئية ذات بنية pin، حيث أغلب التولد الضوئي يحدث في المنطقة الجوهرية.

5.4. الخلايا الشمسية من السيليكون لا متبلور:

الخلايا الشمسية من السيليكون أحادي البلور هي عادة مكلفة في الصناعة ومساحتها محدودة وعادة يفضل استعمال خلايا شمسية واسعة المساحة في اللوح شمسي لتوليد الطاقة المطلوبة، بينما الخلايا الشمسية من السيليكون غير متبلور تعطي إمكانية صناعة أنظمة شمسية واسعة المساحة وأقل تكلفة. يتم عادة توضع السيليكون غير المتبلور بتقنيات CVD عند درجات حرارة أقل من 600°C . وهو ذو ترتيب بلوري قصير المدى (غير متبلور) ولا يحتوي على مناطق بلورية. ويتم إدخال الهيدروجين فيه أي هدرجة السيليكون غير متبلور للحصول على a-Si:H سيليكون لا متبلور مهروج وميزة الهيدروجين أنه يخفف من تراكيز العيوب (الروابط المعلقة) داخل السيليكون من 10^{19} أو 10^{18} إلى 10^{16} أو 10^{15} (cm^{-3}) في أحسن الشروط. و بالتالي مخطط الطاقة لـ a-Si:H يحتوي على توزيعه مستمرة للحالات الطاقية داخل الفاصل الطاقى والمرافقة للعيوب المميزة له (الشكل 15).

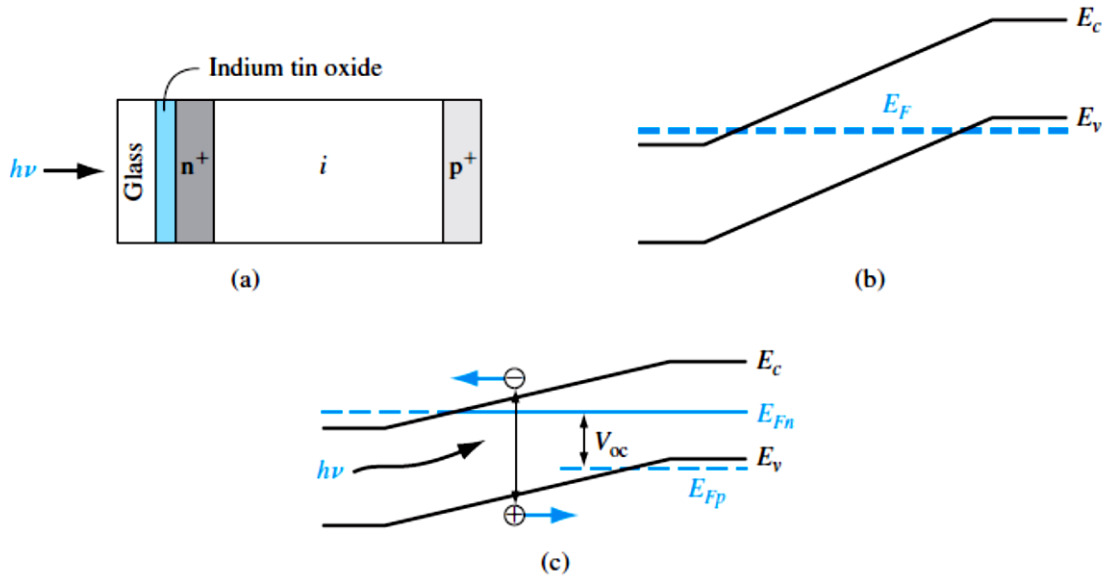


الشكل 15: كثافة الحالات بدلالة الطاقة في السيليكون اللامتبلور.

وهذه العيوب تخفف من الحركيات الفعلية التي تكون في المجال $10^{-6} - 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ بأخذ بعين الاعتبار كل الحالات الطاقية داخل الفاصل الطاقى وبالنسبة للحركيات في الحالات الطاقية فوق E_c أو أسفل E_v تكون قيمها في المجال $1-10 \text{ cm}^2/\text{V.s}$. بالتالي نقل حاملات

الشحنة عبر الحالات الطاقية داخل الفاصل الطاقى يكون مهمل بسبب الحركيات المنخفضة. ونظرا للفرق بين قيم الحركيات بين الحالات الممتدة في العصابات المسموحة والحالات داخل الفاصل الطاقى، تسمى E_c و E_v حدود الحركيات والفاصل الطاقى يسمى فاصل الحركيات gap mobility ويكون في حدود 1.7 eV.

يملك السيليكون لا متبلور معامل امتصاص ضوئى مرتفع وأغلب الضوء الشمسى يمتص على عمق $1 \mu\text{m}$ انطلاقا من السطح المضاء. بالتالى طبقة رقيقة من السيليكون لا متبلور لا يتجاوز سمكها $1 \mu\text{m}$ كافية من أجل صناعة خلية شمسية. وعادة بنية خلية شمسية من السيليكون لا متبلور تكون وصلة PIN (مقابل الوصلة PN في السيليكون البلورى) لأن أطوال انتشار حاملات الشحنة في السيليكون لا متبلور أقصر منها في السيليكون المتبلور وبالتالي لا بد من حقل داخلى قوى يعوض النقص فى طول الانتشار ويضمن فصل وجرّ حاملات الشحنة وهذا ما تحقّقه المنطقة الجوهرية (i) مضافة بين المنطقتين P و N لتشكيل الوصلة PIN. يتم توضع الوصلة PIN للسيليكون لا متبلور على مسند متمثل فى طبقة شفافة نصف ناقلة مصنوعة من أكسيد نصف ناقل شفاف (مثلا أكسيد الزنك ZnO، أكسيد القصدير oxyde d'étain (SnO_2) ، أكسيد الانديوم (In_2O_3) ، أكسيد الانديوم-قصدير (ITO) و تكون هذه الطبقة ذات فاصل طاقى عريض بمثابة نافذة ضوئية للإشعاع الشمسى. فى الجهة الخلفية يتم إضافة طبقة من معدن ألنيوم Al أو فضة Ag تكون بمثابة التماس المعدنى الخلفى الذى يعكس الفوتونات النافذة إليه ويعيدها إلى داخل الوصلة PIN. المناطق P^+ و N^+ مطعمة بشدة وهى رقيقة السمك ($\sim 10 \text{ nm}$) وتلعب فقط دور إلكترونات تجميع الشحن، أما المنطقة الجوهرية فهى المنطقة الفعالة التى يحدث فيها أساسا امتصاص الضوء والتولد الضوئى لحاملات الشحنة والتيار وبالتالي سمكها أعرض بين $0.5 \mu\text{m}$ - $1 \mu\text{m}$. مخطط لبنية الوصلة ولمخطط الطاقة لها موضح فى الشكل 16 حيث الحاملات الإضافية المتولدة بالضوء تتولد داخل المنطقة الجوهرية وتفصل عن بعضها بالحقل الكهربائى الداخلى وتنتج التيار الضوئى. مردود التحول الفوطولطائى لخلايا شمسية من السيليكون لا متبلور أخفض من السيليكون المتبلور لكن يتم تعويض الفارق بالعدد وشساعة مساحة الخلايا الشمسية لا بلورية التى تصل الى $40\text{cm (wide) x many meters (long)}$ وكذلك تكلفتها المنخفضة.



الشكل 16: (a) مقطع عرضي (b) عصابات الطاقة فى التوازن الترموديناميكى و (c) عصابات الطاقة تحت الإضاءة لخلية شمسية من السيليكون اللامتبلور ذات بنية pin.

الفصل السادس: الكواشف الضوئية

عادة ما تستعمل أنصاف النواقل للكشف عن وجود فوتونات. حيث تستعمل لصنع أجهزة تحول الإشارات الضوئية إلى إشارات كهربائية. تولد حاملات شحنة إضافية في نصف ناقل، يرفع من ناقليته وهذه الزيادة في الناقلية تقاس لتكون دليل على وجود فوتونات، هذا هو مبدأ الناقل الضوئي photoconductor الذي يعتبر أبسط نوع من الكواشف. عندما تتولد حاملات الشحنة داخل منطقة شحنت الفضاء لوصلة PN سوف يتم فصلهم عن بعضهم بالحقل الكهربائي وينتج عن ذلك تيار. الوصلة PN هي اساس عمل عدة كواشف ضوئية مثل الثنائية الضوئية photodiode والترانزستور الضوئي phototransistor.

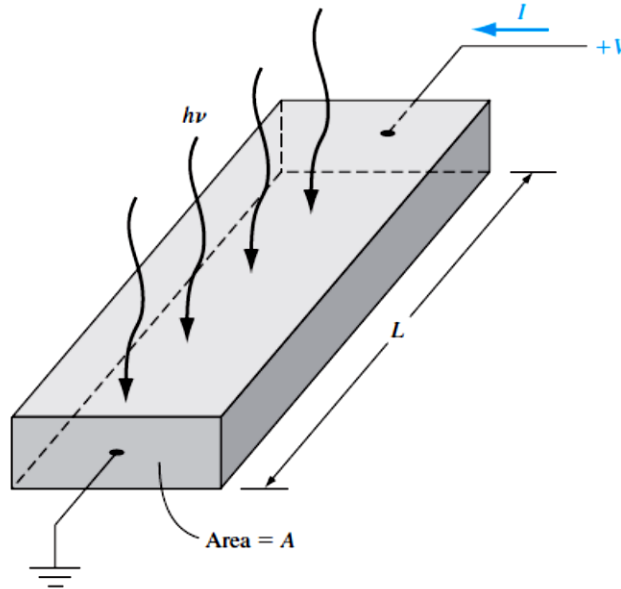
1. الناقل الضوئي photoconductor:

يظهر الشكل أسفله قضيب نصف ناقل مع الكترودات أومية بين طرفيه وفرق جهد مطبق بينهما، الناقلية الكهربائية الابتدائية عند الاتزان الترموديناميكي هي:

$$\sigma_0 = e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)$$

وتتولد حاملات الشحنة الإضافية بتركيز $\delta n, \delta p$ تصبح الناقلية:

$$\sigma_0 = e[\mu_n(n_0 + \delta n) + \mu_p(p_0 + \delta p)]$$



الشكل -1: رسم تخطيطي لناقل ضوئي

نعتبر نصف الناقل من نوع n ونفرض الضوء يولد تركيز متساوي من حاملات الشحنة الإضافية $\delta n = \delta p$. في النظام المستقر تركيز الحاملات المتولدة بالضوء:

$$\delta p = G_L \tau_p$$

حيث G_L معدل التولد الضوئي لحاملات الشحنة الإضافية ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$) و τ_p مدة حياة الحاملات الأقلية، الناقلية الكهربائية تكتب

$$\sigma = e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0) + e(\delta p)(\mu_n + \mu_p)$$

بالتالي الزيادة في الناقلية الكهربائية بالإثارة الضوئية هي الناقلية الضوئية:

$$\Delta \sigma = e(\delta p)(\mu_n + \mu_p)$$

بالجهد المطبق بين طرفي نصف الناقل يتولد حقل كهربائي وبالتالي تيار كهربائي:

$$J = (J_0 + J_L) = (\sigma_0 + \Delta \sigma)E$$

حيث J_0 كثافة التيار المتولدة بحقل الاستقطاب قبل الإثارة الضوئية و J_L كثافة التيار الضوئي. أي أن:

$$J_L = \Delta\sigma \cdot E$$

إذا كان التركيز الإضافي لحاملات الشحنة متولد بشكل منتظم، فإن التيار الضوئي هو:

$$I_L = J_L \cdot A = \Delta\sigma \cdot AE = eG_L \tau_p (\mu_n + \mu_p) AE$$

إذا كانت سرعة جر الإلكترونات هي $(v_n = \mu_n E)$ فإن الزمن الذي يلزم للإلكترون لعبور طول نصف الناقل L هو زمن العبور (transit time):

$$t_n = \frac{L}{v_n} = \frac{L}{\mu_n E}$$

بالتالي التيار الضوئي يصبح:

$$I_L = eG_L \left(\frac{\tau_p}{t_n} \right) \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) AL$$

يعرف الربح للناقل الضوئي بالنسبة بين الشحن المجمعة من طرف الإلكترونات والشحن المتولدة داخل الناقل ومنه:

$$\Gamma_{ph} = \frac{I_L}{e \cdot G_L \cdot A \cdot L} = \frac{\tau_p}{t_n} \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right)$$

2. الثنائية الضوئية photodiode:

هي ثنائية من وصلة pn تعمل مع جهد مطبق عكسي. نعتبر في البداية أن حاملات الشحنة الإضافية المتولدة بالضوء تتولد بشكل منتظم عبر جهاز نصف الناقل. الشكل 2 يوضح الثنائية تحت الاستقطاب العكسي وتوزيعه الحاملات الأقلية في الاستقطاب العكسي قبل الإضاءة. إذا كان معدل التولد الضوئي للحاملات الإضافية، الحاملات الإضافية المتولدة داخل منطقة شحنات الفضاء سوف تفصل عن بعضها بواسطة الحقل وتجرّ سريعاً، الإلكترونات نحو المنطقة n والثقوب نحو المنطقة p. كثافة التيار المتولد بالضوء من منطقة شحنات الفضاء هي:

$$J_{LW} = e \int G_L \cdot dx$$

حيث يكون التكامل على طول عرض منطقة شحنات الفضاء. إذا كان G_L ثابت عبر حجم منطقة شحنات الفضاء، يكون:

$$J_{LW} = eG_L W$$

حيث W هو عرض منطقة شحنات الفضاء، نشير أن J_{LW} هو في اتجاه الاستقطاب العكسي عبر الوصلة pn. مركبة التيار الضوئي تستجيب بسرعة إلى إضاءة الفوتونات وتعرف بالتيار الضوئي السريع.

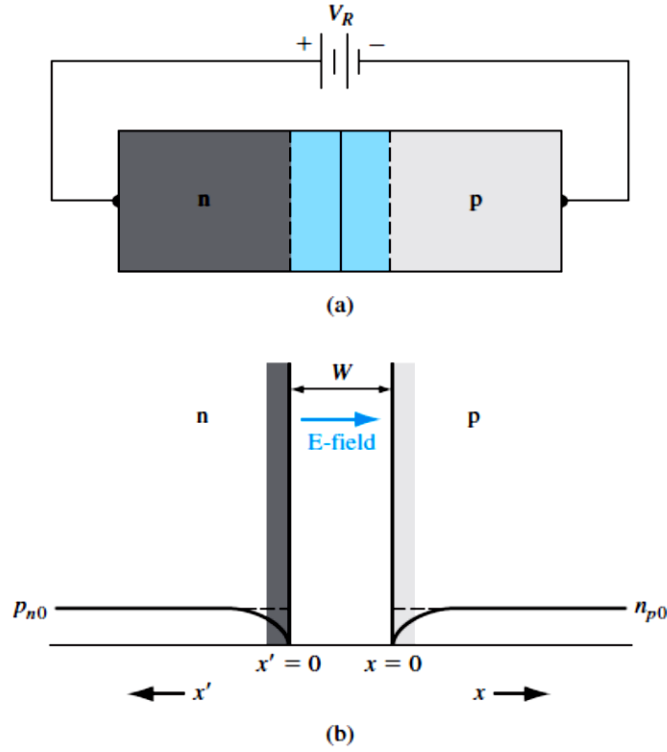
تتولد بالضوء كذلك حاملات الشحنة إضافية داخل المناطق المتعادلة n و p من الثنائية. وبالتالي فإن توزيعه الحاملات الأقلية الإضافية في المنطقة p تحدد بتركيز الإلكترونات الإضافي δn_p الذي يحسب بحل معادلة استمرار الإلكترونات في نفس المنطقة:

$$D_n \frac{\partial^2(\delta n_p)}{\partial x^2} + G_L - \frac{\delta n_p}{\tau_{n0}} = \frac{\partial(\delta n_p)}{\partial t}$$

نقوم بإهمال الحقل في المناطق المتعادلة. وبفرض حالة النظام المستقر يصبح لدينا:

$$\frac{\partial^2(\delta n_p)}{\partial x^2} - \frac{\delta n_p}{L_n^2} = -\frac{G_L}{D_n}$$

حيث $L_n^2 = D_n \tau_{n0}$. حل المعادلة اعلاه يتضمن كل من الحل العام المتجانس δn_{ph} والحل الخاص δn_{pp} . الحل العام بحل المعادلة:



الشكل 2- (a) وصلة pn مستقطبة عكسيا. (b) توزيع الحاملات الأقلية في الاستقطاب العكسي

$$\frac{\partial^2(\delta n_{ph})}{\partial x^2} - \frac{\delta n_{ph}}{L_n^2} = 0$$

وحلها من الشكل:

$$\delta n_{ph} = Ae^{-x/L_n} + Be^{+x/L_n}$$

كشرط حدي δn_{ph} يجب يبقى بقيمة منتهية ما يستلزم أن $B=0$ من أجل ثنائية ممتدة في الطول. أما الحل الخاص δn_{pp} فيحسب من:

$$-\frac{\delta n_{pp}}{L_n^2} = -\frac{G_L}{D_n}$$

ومنه:

$$\delta n_{pp} = \frac{G_L L_n^2}{D_n} = \frac{G_L (D_n \tau_{n0})}{D_n} = G_L \tau_{n0}$$

الحل الكلي δn_p لتركيز الإلكترونات الإضافي في المنطقة p هو:

$$\delta n_p = Ae^{-x/L_n} + G_L \tau_{n0} \quad (1^*)$$

في حالة الاستقطاب العكسي للوصلة، تركيز الإلكترونات الكلي معدوم عند $x=0$ ، بالتالي تركيز الإلكترونات الإضافي عند $x=0$ هو:

$$\delta n_p(x=0) = -n_{p0} \quad (2^*)$$

وباستعمال الشرط الحدي ممثلا في المعادلة (2*)، تركيز الإلكترونات الإضافي الممثل بالمعادلة (1*) يصبح:

$$\delta n_p = G_L \tau_{n0} - (G_L \tau_{n0} + n_{p0})e^{-x/L_n}$$

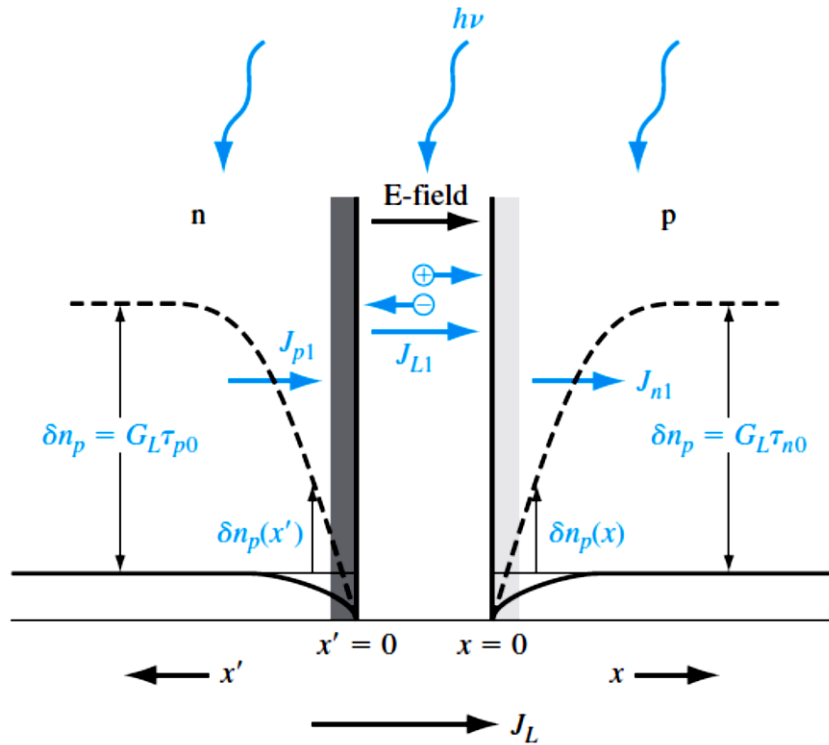
بنفس الطريقة يمكن نحسب عبارة تركيز الثغوب الإضافي δp_n بالنسبة لـ x' في المنطقة n المتعادلة حيث:

$$\delta p_n = G_L \tau_{p0} - (G_L \tau_{p0} + p_{n0}) e^{-x'/L_p}$$

كل من δp_n و δn_p ممثلة في الشكل 3. التدرج في تركيز الحاملات الأقلية ينتج عنه تيارات انتشار في الوصلة pn. كثافة تيار الانتشار عند $x=0$ الذي يعود الى تركيز الإلكترونات الأقلية هو:

$$\begin{aligned} J_n &= eD_n \left. \frac{d(\delta n_{ph})}{dx} \right|_{x=0} = eD_n \left. \frac{d}{dx} [G_L \tau_{n0} - (G_L \tau_{n0} + n_{p0}) e^{-x/L_n}] \right|_{x=0} \\ &= \frac{eD_n}{L_n} (G_L \tau_{n0} + n_{p0}) \\ &\Rightarrow J_n = eG_L L_n + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \end{aligned}$$

الحد الأول يمثل كثافة التيار الضوئي في النظام المستقر. والحد الثاني يمثل كثافة تيار التشبع العكسي المثالي الذي يعود الى الإلكترونات الحاملات الأقلية.



الشكل-3: توزيع الحاملات الأقلية المولدة بفعل الضوء في الاستقطاب العكسي

بنفس الكيفية نجد كثافة تيار انتشار الثقوب الحاملات الأقلية في المنطقة n عند $x' = 0$:

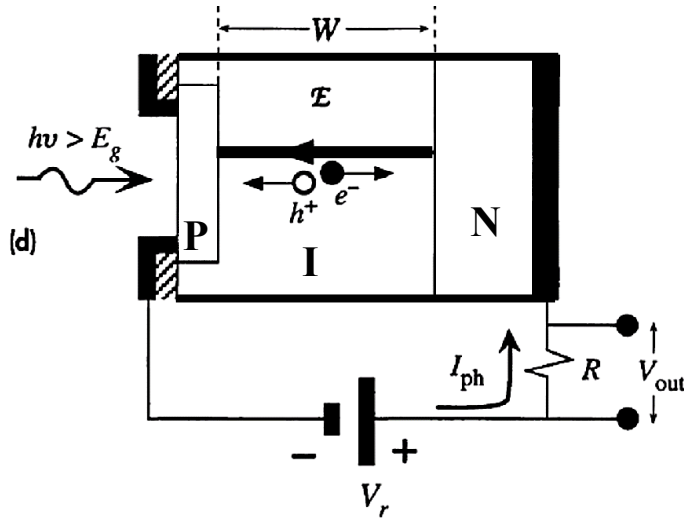
$$J_p = eG_L L_p + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p}$$

كذلك هنا الحد الأول في المعادلة يمثل كثافة التيار الضوئي في النظام المستقر. والحد الثاني يمثل كثافة تيار التشبع العكسي المثالي الذي يعود الى الثقوب الحاملات الأقلية في المنطقة n.

وأخيرا فإن كثافة التيار الضوئي الكلي للثنائية في النظام المستقر هو:

$$J_L = eG_L W + eG_L L_n + eG_L L_p = e(W + L_n + L_p)G_L$$

3. الوصلة الضوئية (photodiode) ذات البنية PIN:



الشكل 4- تركيب الوصلة PIN باستقطاب عكسي ككاشف.

العرض W للمنطقة i . لاحظ أن زيادة العرض W يسمح امتصاص كمية أكبر من الفوتونات، ما يرفع إشارة المخرج لكل شدة ضوئية داخلية، لكنه يخفض من سرعة الاستجابة لأن زمن عبور الحاملات يصبح أكبر.

العرض W للمنطقة الجوهرية I أعرض بكثير من عرض منطقة شحنات الفضاء في وصلة pn عادية. عند تطبيق استقطاب عكسي على ثنائية PIN ، تتسع منطقة شحنات الفضاء بشكل كامل على طول المنطقة الجوهرية. بفرض أن تدفق الفوتونات Φ_0 يرد على المنطقة p^+ وبفرض أن عرضها W_p رقيق جداً، تكون عبارة تدفق الفوتونات كدالة في الموضع x في المنطقة الجوهرية كما يلي:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha \cdot x)$$

حيث α معامل امتصاص الفوتونات. توزيع تدفق الفوتونات موضحة في الشكل 5.

كثافة التيار الضوئي المتولدة في المنطقة الجوهرية تحسب كما يلي:

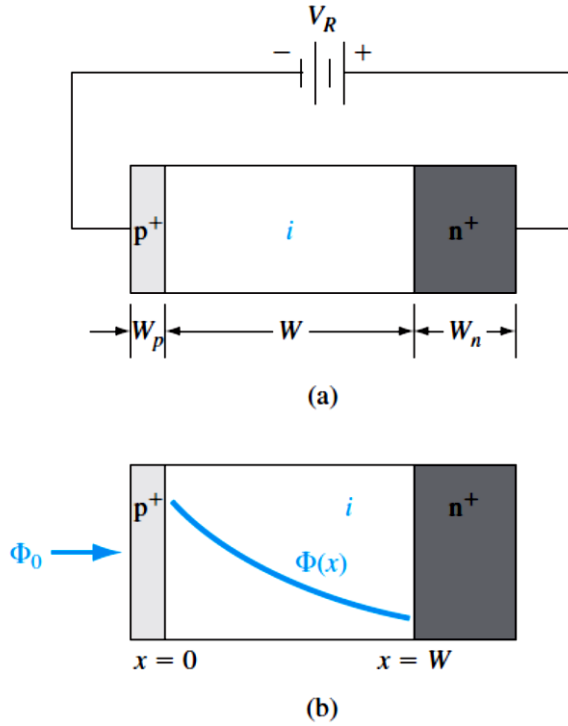
$$J_L = e \int_0^W G_L \cdot dx = e \int_0^W \Phi_0 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot x} \cdot dx = e \Phi_0 (1 - e^{-\alpha \cdot W})$$

هذه المعادلة محسوبة بفرض أنه لا يوجد التحام للإلكترونات - ثقب داخل منطقة شحنات الفضاء وكذلك بفرض أن كل فوتون ممتص سوف يولد ثنائية إلكترون - ثقب.

من أحد مزايا الثنائية PIN هي أن سعة (capacitance) منطقة شحنات الفضاء صغيرة جداً ومستقلة عن الجهد. الفصل بين المنطقتين الرقيقتين للشحن السالبة والموجبة بمسافة مثبتة التي هي العرض W للمنطقة i يشبه حالة مكثف مستوية (من صفيحتين متوازيتين). سعة الوصلة أو سعة منطقة شحنات الفضاء لثنائية pin تعطي ببساطة كما يلي:

$$C_{dep} = \epsilon_0 \epsilon_r A / W$$

أين A مساحة مقطع الوصلة و $\epsilon_0 \epsilon_r$ سماحية نصف الناقل. كذلك بما أن العرض W للمنطقة i مثبت بالبنية، فإن سعة الوصلة لا ترتبط بالجهد المطبق عكس ما هو عليه في الوصلة pn . السعة C_{dep} هي من رتبة البيكوفاراد في الثنائيات الضوئية PIN السريعة. إذن مع مقاومة 50Ω ثابت الزمن RC_{dep} هو حوالي 50 ps .



الشكل -5: (a) وصلة PIN في حالة استقطاب عكسي، (b) توزيع تدفق الفوتونات على طول الوصلة PIN.

عندما يتم تطبيق استقطاب عكسي V_r عبر الجهاز pin فإنه يتأسس أساسا عبر عرض كل المنطقة $i - Si$ عرض منطقة شحنات الفضاء في كل من المناطق n^+ و p^+ مهمل مقارنة مع W . الجهد العكسي V_r يزيد في الجهد الداخلي ليصبح $V_0 + V_r$ كما مبين في الشكل 6.62d.

الحقل E في المنطقة $i - Si$ يبقى منتظم لكنه يرتفع إلى $E = E_0 + \frac{V_r}{W} \cong \frac{V_r}{W}$ ($V_r \gg V_0$) بما أن عرض المنطقة $i - Si$ في الجهاز pin هو عادة أكبر من عرض منطقة شحنات الفضاء في وصلة pn عادية، بالتالي أجهزة pin لها جهود انهيار أعلى وهذا ما يجعل من أجهزة pin مستعملة في الحالات التي تتطلب جهود انهيار مرتفعة.

النقاط السلبية في ثنائية ضوئية من وصلة pn تتمثل في كون سعة منطقة شحنات الفضاء ليست صغيرة كفاية حتى تسمح بالكشف الضوئي في الترددات العالية هذا يعتبر قصور في ثابت الزمن RC. النقطة الثانية تتمثل في كون عرض منطقة شحنات الفضاء لا يتعدى بعض المايكرومترات. هذا يعني أنه في أطوال الموجات الطويلة أين عمق الاختراق هو أكبر من عرض منطقة شحنات الفضاء أغلب الفوتونات تمتص خارج منطقة شحنات الفضاء أين لا يوجد حقل لفصل الثنائيات (إلكترون-ثقب) المتولدة ضوئيا وجرها. بالتالي المرود يكون نسبيا منخفض في مجال أطوال الموجات الطويلة. هذه الإشكاليات تخف بشكل معتبر في ثنائية ضوئية ذات بنية pin، فالأجهزة الفوطوفولطائية ببنية pin تصمم بحيث أن أغلب التولد الضوئي يحدث في المنطقة الجوهرية.

4. الثنائية الضوئية ذات الانهيار Avalanche Photodiode:

هذه الثنائية مشابهة للثنائية الضوئية ذات وصلة pn أو PIN. فقط الاستقطاب الكهربائي المطبق على الثنائية الضوئية ذات الانهيار يكون كبير بشكل يحدث أثر التأين (Impact ionization). الثنائيات إلكترون-ثقب تتولد في منطقة شحنات الفضاء عبر امتصاص فوتونات وهذه الإلكترونات والثقوب بدورها سوف تولد ثنائيات إلكترون-ثقب إضافية عبر أثر التأين. الريح في التيار المحسوب سابقا من أجل ناقل ضوئي يضرب الآن في معامل تضاعف الانهيار (avalanche multiplication factor). الثنائيات إلكترون-ثقب المتولدة بالامتصاص الضوئي وكذلك المتولدة بأثر التأين تجر سريعا خارج منطقة شحنات الفضاء بفعل الحقل القوي داخلها. إذا كانت سرعة التشبع هي 10^7 cm/s في منطقة شحنات الفضاء التي عرضها $10 \mu\text{m}$ بالتالي زمن انتقال الشحنات هو:

$$\tau_t = \frac{10 \times 10^{-4}}{10^7} = 10^{-10} \text{ sec} = 100 \text{ picosec}$$

إذا اردنا استعمال هذه الثنائية لكشف إشارة دورية، فيمكنها الاستجابة لدور قدره $T = 2\tau_t$ وبالتالي تواتر قدره:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \tau_t} = \frac{1}{200 \times 10^{-12}} = 5 \text{ GHz}$$

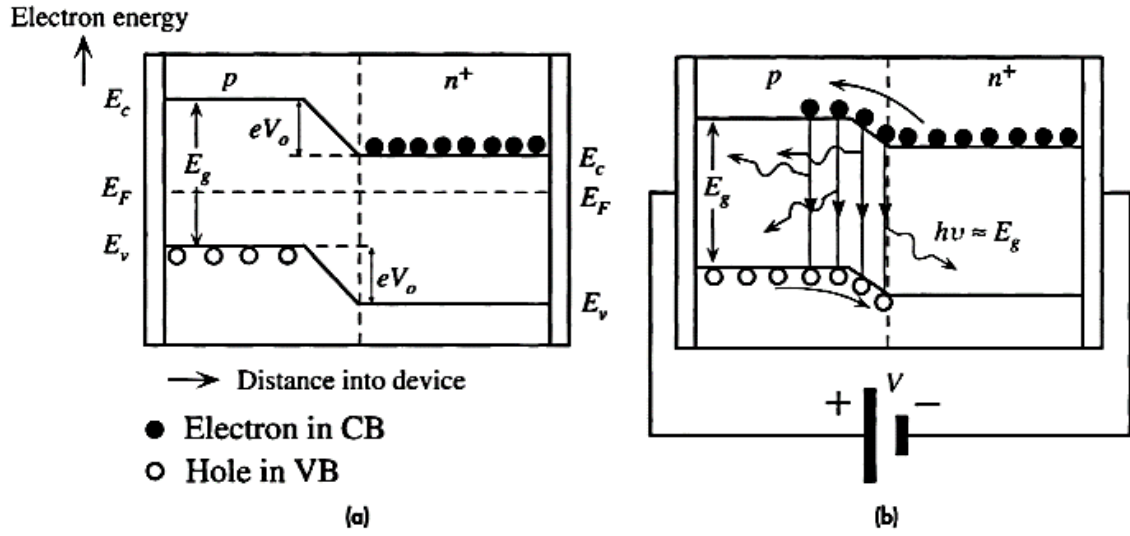
الثنائية الضوئية ذات الانهيار يمكن تستجيب لموجات ضوئية معدلة في تواتر أمواج الميكرو.

الفصل السابع: الثنائية الباعثة للضوء

(LIGHT EMITTING DIODES (LED))

1. مبدأ عمل الثنائية الباعثة للضوء:

الثنائية الباعثة للضوء (LED) هي أساسا ثنائية ذات وصلة pn مصنوعة خصيصا من نصف ناقل ذو فاصل طاقي مباشر مثل GaAs حيث ينتج عن التحام الثنائيات إلكترون-ثقب إصدار فوتون. تكون طاقة الفوتون الصادر $h\nu$ تقريبا مساوية إلى عرض الفاصل الطاقي E_g . يوضح الشكل 1-a مخطط الطاقة لوصلة pn^+ غير مستقطبة والتي تطعم فيها المنطقة n بشدة مقارنة مع المنطقة p. مستوى فارمي E_F مستوي على طول الوصلة (اتزان ترموديناميكي)، ومنطقة شحنات الفضاء تمتد أساسا في المنطقة p نظرا للتطعيم القليل مقارنة بـ n^+ . يتأسس حاجز كمون eV_0 (أين V_0 يمثل الكمون الداخلي أو كمون الانتشار) من E_c في المنطقة n إلى E_c في المنطقة p، ما يمنع انتشار الإلكترونات من المنطقة n إلى المنطقة p. عندما يطبق استقطاب مباشر بجهد V ، فإن الكمون الداخلي V_0 ينقص إلى $V_0 - V$ ، هذا ما يسمح للإلكترونات من المنطقة n^+ بالانتشار، ما يعني حقنها داخل المنطقة p كما يظهره الشكل 1-b. مركبة الثقوب المحقونة من المنطقة p إلى داخل المنطقة n^+ هي أقل من مركبة الإلكترونات المحقونة من المنطقة n^+ إلى المنطقة p.

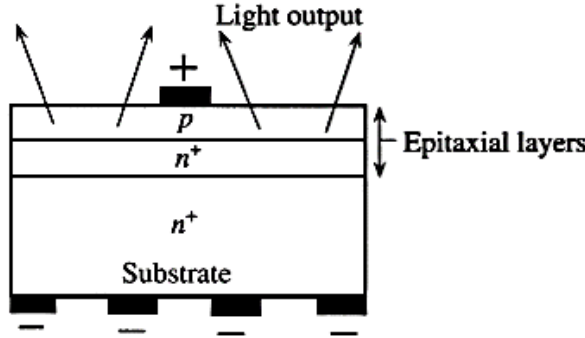


الشكل 1- مخطط عصابات الطاقة لوصلة pn (جهة n مطعمة بشدة): (a) بدون استقطاب (b) استقطاب مباشر مع توضيح الالتحامات في الجهة p المؤدية لتوليد فوتونات.

التحام الإلكترونات المحقونة في منطقة شحنات الفضاء وعلى حجم مدها طول انتشار الإلكترونات L_e في المنطقة p يؤدي إلى إصدار الفوتونات. ظاهرة إصدار الضوء انطلاقا من التحام الثنائيات (إلكترون-ثقب) نتيجة حقن الحاملات الأقلية تسمى التألق الكهربائي بالحقن (injection electroluminescence).

نتيجة الطبيعة الإحصائية لعملية الالتحام بين الإلكترونات والثقوب، الفوتونات المنبعثة تكون في اتجاهات عشوائية، تنتج الفوتونات من آليات الإصدار التلقائي. وبالتالي فبنية الثنائية الباعثة للضوء يجب أن تكون بشكل يسمح للفوتونات المنبعثة أن تصدر إلى خارج الجهاز دون أن تتم إعادة امتصاصها من المادة نصف الناقلة. هذا ما يعني أنه يجب أن تكون المنطقة p ضيقة بما يكفي أو يجب استعمال وصلات غير متجانسة كما سنرى ذلك لاحقا.

2. بنية الثنائية الباعثة للضوء:



الشكل-2: مخطط مبسط لأحد البنيات المستعملة لإنشاء ثنائية باعثة للضوء.

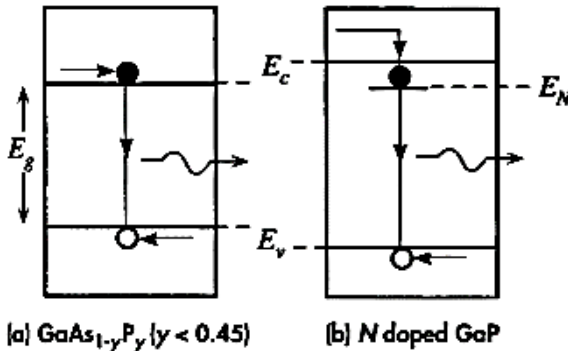
أبسط بنية للثنائية الباعثة للضوء موضحة في الشكل-2. بداية يتم توضع طبقة نصف ناقلة مطعمة على مسند مناسب (GaP, GaAs). التوضع يكون طبقة فوقية epitaxial، أي أن بلور الطبقة الجديدة ينمو ليتبع نفس البنية البلورية للمسند. يكون المسند سميك بشكل كاف لكي يكون أيضا بمثابة مسند ميكانيكي لجهاز الوصلة pn ويمكن أن يكون من بلور مختلف. الوصلة pn+ تتكون بتتمة طبقة أخرى فوقية لكن مطعمة من نوع p فوق الطبقة الأولى. الفوتونات التي تصدر نحو المنطقة n يمكن أن تمتص أو تنعكس على المستوى الخلفي للمسند وذلك حسب سمك المسند والبنية المحددة للثنائية الباعثة للضوء.

عندما يكون للطبقة الفوقية والمسند خصائص شبكة مختلفة، سوف يكون هناك عدم توافق شبكي بين البنييتين البلورية على مستوى الوصلة بينهما. هذا يسبب إجهاد شبكي في المنطقة الباعثة للضوء ويؤدي إلى ظهور عيوب بلورية (ثغرات، إنخلاعات...)، هذه العيوب تجعل من معدل الإشعاع الصادر أقل من معدل الإلتحامات الحاصلة بين الثنائيات (إلكترون-ثقب)، حيث تنصرف هذه العيوب كمراكز التحام. يمكن التقليل من هذه العيوب بجعل الطبقة الفوقية الباعثة للضوء متوافقة شبكياً مع بلور المسند ومن المهم تحقيق ذلك. مثلاً أحد خلائط AlGaAs هو نصف ناقل ذو فاصل طاقي مباشر يوافق منطقة إصدار اللون الأحمر. يمكن إذن تنميته على مسند GaAs مع توافق جيد لخصائص الشبكة وهذا ما ينتج أجهزة ثنائيات باعثة للضوء ذات مردود عالي.

3. المواد المستعملة:

هناك عدة مواد نصف ناقلة ذات فواصل طاقة مباشرة يمكن تطعيمها بسهولة لصناعة ثنائيات باعثة للضوء (LED) تجارية ذات وصلة pn، والتي ترسل إشعاعاً في مجال طول موجة الأحمر وما تحت الحمراء. من أهم أصناف المواد نصف الناقلة التجارية التي تغطي الطيف المرئي هي الخلائط الثلاثية (III-V) التي تقوم على خلط GaAs و GaP و يشار إليها بـ: GaAs_(1-y)P_y. في هذه المركبات، ذرات As، و P من العمود الخامس، تتوزع عشوائياً على المواضع الاعتيادية لذرات As في البنية البلورية لـ GaAs، عندما يكون $y < 0.45$ ، يكون الخليط (GaAs_(1-y)P_y) ذو فاصل طاقي مباشر وبالتالي التحام الثنائيات (إلكترون-ثقب) هو التحام مباشر كما موضح في الشكل a-3. معدل الإلتحام متناسب مباشرة مع جداء تراكيز الإلكترونات والثقوب. مجال أطوال الموجة المنبعثة هو من 630 nm (الأحمر) من أجل $y = 0.45$ (GaAs_{0.55}P_{0.45}) إلى 870 nm من أجل $y = 0$ (GaAs).

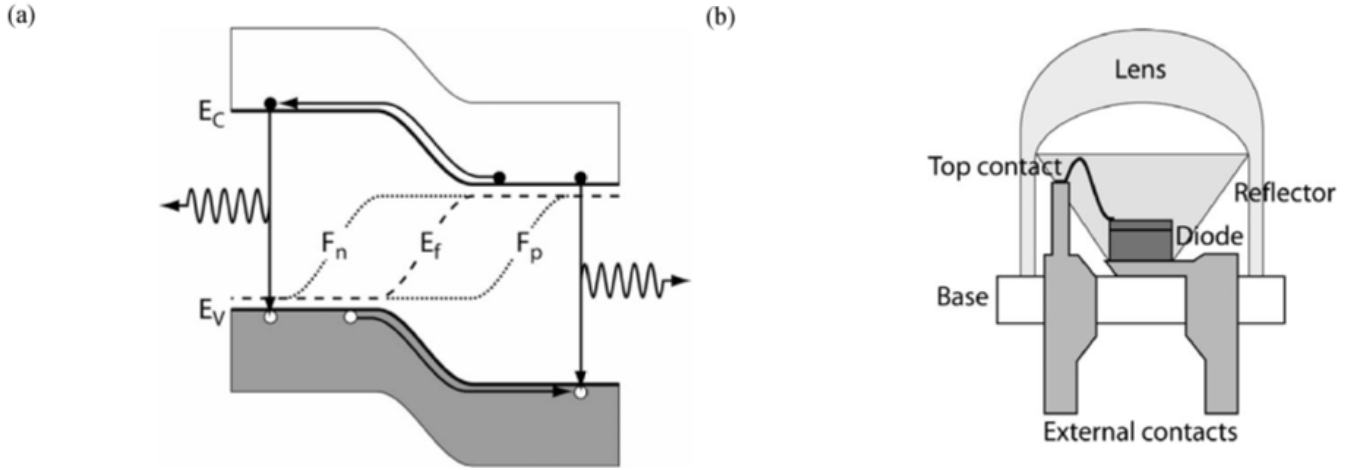
الخليط GaAs_(1-y)P_y مع $y > 0.45$ (بما في ذلك GaP) هي أنصاف نواقل ذات فواصل طاقة غير مباشرة. التحام الثنائيات (إلكترون-ثقب) يحدث أساساً عبر مراكز الإلتحام ويحدث أيضاً اهتزازات الشبكة (الفونونات) بدل إصدار فوتونات.



الشكل-3: (a) انبعاث فوتون في نصف ناقل ذو فاصل طاقي مباشر. (b) يملك GaP فاصل طاقي غير مباشر، بتطعيمه بالنيتروجين ينشأ مركز التحام، حيث الإلتحام بين ثقب والإلكترون مقتنص في EN يولد فوتون.

بالمقابل عندما نضيف شوائب لها عدد من إلكترونات التكافؤ مساوي إلى عدد إلكترونات التكافؤ في ذرات التطعيم، (مثلاً إضافة النيتروجين الذي ينتمي إلى العمود الخامس من الجدول الدوري مثل الفوسفور) في بلور نصف الناقل، فإن عدداً من ذرات N سوف تحتل مواقع إبدالية

لذرات الفوسفور. بما أن N و P نفس التكافؤ، $(N : 2s^2 2p^3)$ ، $(P : 3s^2 3p^3)$ ، ذرات النيتروجين التي تأخذ مواقع لذرات الفوسفور تشكل نفس العدد من الروابط ولكنها لا تتصرف مثل ذرات مانحة أو آخذة. من جهة ثنائية النوى الإلكترونية لـ N و P مختلفة. النواة الموجبة لذرة النيتروجين محمية بعدد أقل من الإلكترونات (7) مقارنة مع نواة ذرة الفوسفور (15)، هذا يعني أن إلكترونات النقل (الحررة) في جوار ذرات النيتروجين يمكن أن تنجذب وتقتنص في مواقع ذرات N . ذرات النيتروجين تكون إذن مستويات طاقة محلية أو فخوخ إلكترونات E_N قرب حد عصابة النقل كما يوضحه الشكل 3-b. عندما يتم اقتناص إلكترون نقل في E_N ، يمكن لهذا الإلكترون أن يجذب ثقب (في عصابة التكافؤ) إلى جواره بجاذبية كولمب ثم يلتحم معه بالتحام مباشر مصدرا فوتونا. طاقة الفوتون الصادر هي أقل بقليل من E_g لأن E_N قريب من E_C . لأن عملية الالتحام ترتبط بـ النطعيم N ، لا تكون فعالة بقدر الالتحام المباشر. و بالتالي مردود الثنائيات LED بأنصاف نواقل $GaAs_{(1-y)}P_y$ ذات الفاصل الطاقى غير المباشر المطعمة بالنيتروجين تكون أقل من مردود الثنائيات بأنصاف نواقل ذات فاصل طاقي مباشر. الخلائط $GaAs_{(1-y)}P_y$ ذات فاصل طاقي غير مباشر مطعمة بالنيتروجين تستعمل بشكل واسع في صناعة ثنائيات LED معقولة الثمن المرسله للون الأخضر، الأصفر و البرتقالي.



الشكل 4- (a) يمثل مخطط الطاقة لثنائية لتجانسة الوصلة (homojunction) مرسله للضوء تحت استقطاب مباشر. F_p و F_n يمثلان شبه مستوى فارمي للإلكترونات والثقوب. الفرق بين هذه المستويات ومستوى فارمي E_f عند الاتزان الترموديناميكي يوضح الزيادة في إسكان الإلكترونات والثقوب حاملات الشحنة الأقلية. (b) يمثل مخطط لشكل نموذجي لثنائية مرسله للضوء (LED). العاكس والعدسات تركز غالبية الضوء الصادر إلى خارج العدسات مقدما بذلك مردود عالي وتائق في الاتجاه الأمامي للثنائية.

4. المردود الخارجي لثنائية LED: $\eta_{external}$

هو النسبة بين الاستطاعة الكهربائية الممنوحة للثنائية LED ($P_{in} = I \times V$) والاستطاعة الضوئية الصادرة من الجهاز P_{out} ، أي:

$$\eta_{external} = \frac{P_{out} (optical)}{I \times V} \times 100 \%$$

يتضمن مردود تحويل طاقة كهربائية إلى طاقة ضوئية صادرة إلى الخارج، المردود الكمي الداخلي (η_{int}) لعملية الالتحام المشع ومردود استخراج الفوتونات من الجهاز.

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \cdot \chi_{ex}$$

المردود الكمي الداخلي هو النسبة بين عدد الفوتونات المتولدة (داخل نصف الناقل) وعدد الأزواج إلكترون-ثقب المحقونة داخل نصف الناقل. ارتفاع جودة نصف الناقل، وانخفاض كثافة العيوب مهمة من أجل قيمة كبيرة من η_{int} . أما مردود استخراج الفوتونات فهو نسبة عدد الفوتونات الصادرة من الجهاز إلى عدد الفوتونات التي تم إنشاؤها. هندسة وشكل الثنائية هي أساس تحسين χ_{ex} .

Semiconductor Active Layer	Structure	D or I	λ (nm)	$\eta_{external}$ (%)	Comments
GaAs	DH	D	870–900	10	Infrared (IR)
$Al_xGa_{1-x}As$ ($0 < x < 0.4$)	DH	D	640–870	3–20	Red to IR
$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ ($y \approx 2.20x, 0 < x < 0.47$)	DH	D	1–1.6 μm	>10	LEDs in communications
$In_{0.49}Al_xGa_{0.51-x}P$	DH	D	590–630	>10	Amber, green, red; high luminous intensity
InGaN/GaN quantum well	QW	D	450–530	5–20	Blue to green
$GaAs_{1-y}P_y$ ($y < 0.45$)	HJ	D	630–870	< 1	Red to IR
$GaAs_{1-y}P_y$ ($y > 0.45$) (N or Zn, O doping)	HJ	I	560–700	< 1	Red, orange, yellow
SiC	HJ	I	460–470	0.02	Blue, low efficiency
GaP (Zn)	HJ	I	700	2–3	Red
GaP (N)	HJ	I	565	< 1	Green

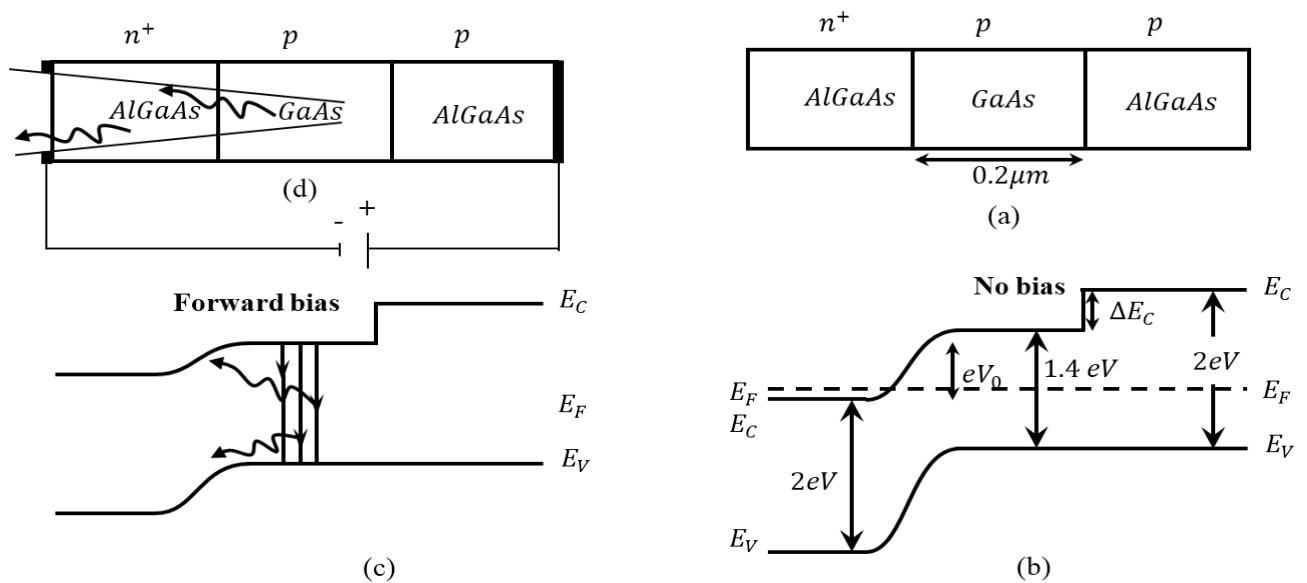
NOTE: Optical communication channels are at 850 nm [local network] and at 1.3 and 1.55 μm [long distance]. D = direct bandgap, I = indirect bandgap. $\eta_{external}$ is typical and may vary substantially depending on the device structure. DH = double heterostructure, HJ = homojunction, QW = quantum well.

يعطي الجدول السابق قيما للمردود الخارجي لثنائية LED من أجل أنصاف النواقل ذو فواصل طاقة غير مباشرة، $\eta_{external}$ يكون عموماً أقل من 1 %، أما من أجل أنصاف النواقل ذو فواصل طاقة مباشرة مع بنية جهاز مناسبة، فإن المردود الخارجي يمكن أن يكون معتبراً.

5. ثنائيات LED عالية الشدة الضوئية غير متجانسة الوصلة (Heterojunction High-Intensity LEDs)

صناعة ثنائيات LED من أجل رفع شدة الضوء الصادر تستعمل بنى غير متجانسة مزدوجة الوصلة (double heterostructure). الشكل 5-a يوضح مخطط جهاز غير متجانس البنية مزدوج الوصلة (double-heterostructure (DH) device) مكون من وصلتين بين مواد نصف ناقلة بفواصل طاقة مختلفة. في هذه الحالة أنصاف النواقل هي AlGaAs مع $E_g \cong 2 eV$ و GaAs مع $E_g \cong 1.4 eV$. البنية غير المتجانسة مزدوجة الوصلة في الشكل لها وصلة غير متجانسة n^+p بين $n^+ - AlGaAs$ و $p - GaAs$ والمنطقة $p - GaAs$ هي منطقة رقيقة سمكها جزء من المايكرومتر وليست مطعمة بشدة.

مخطط الطاقة المبسط لكل الجهاز في غياب استقطاب مبين في الشكل 5-b، حيث مستوى فارمي E_F مستمر عبر كل البنية. هناك حاجز qV_0 على الإلكترونات في عصابة النقل في المنطقة $n^+ - AlGaAs$ في المنطقة $p - GaAs$ يحول دون انتشارها داخل المنطقة $p - GaAs$. وهناك أيضاً تغير في عرض الفاصل الطاقى على مستوى الوصلة بين $p - GaAs$ و $p - AlGaAs$ الذي ينتج عنه تغير مفاجئ ΔE_C بين عصابتي النقل في المنطقة $p - GaAs$ والمنطقة $p - AlGaAs$. هذا التغير المفاجئ هو فعلياً حاجز يمنع مرور أي إلكترون في عصابة النقل من المنطقة $p - GaAs$ إلى عصابة النقل في المنطقة $p - AlGaAs$. هناك أيضاً تغير ΔE_V في E_V لكنه صغير وغير موضح في الشكل 5-b.



الشكل 5- (a) وصلة مزدوجة غير متجانسة. (b) مخطط مبسط لعصابات الطاقة بدون استقطاب خارجي. (c) مخطط مبسط لعصابات الطاقة أثناء استقطاب مباشر. (d) مخطط مبسط لوصلة مزدوجة غير متجانسة أثناء الاستقطاب المباشر يوضح خروج الفوتونات من المنطقة الفعالة

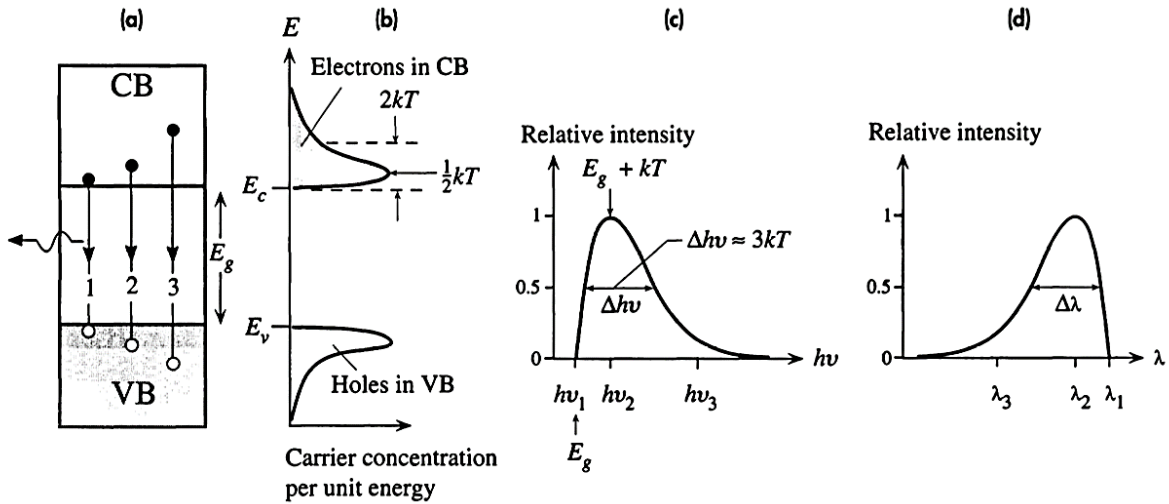
عند تطبيق استقطاب مباشر V ، أغلب هذا الجهد يتأسس بين $n^+ - AlGaAs$ و $p - GaAs$ ويخفض من حاجز الكمون qV_0 إلى $q(V_0 - V)$ ، كما هو الحال في وصلة pn عادية. هذا يسمح للإلكترونات عصابة النقل في المنطقة $n^+ - AlGaAs$ أن تحقن في المنطقة $p - GaAs$ (الشكل 5-c). هذه الإلكترونات تنحصر في عصابة النقل في المنطقة $p - GaAs$ بسبب حاجز الكمون ΔE_c بين $p - GaAs$ و $AlGaAs$ الذي يعيق مرور الإلكترونات إلى $p - AlGaAs$. المناطق $p - AlGaAs$ و $n^+ - AlGaAs$ ذات الفاصل الطائي العريض تتصرف إذن كمناطق حصر تحصر الإلكترونات المحقونة في المنطقة $p - GaAs$. التحام الإلكترونات المحقونة مع الثقوب المتواجدة سلفاً في المنطقة $p - GaAs$ تنتج إصدار تلقائي للفوتونات. بما أن عرض الفاصل الطائي E_g لـ $AlGaAs$ هو أكبر من $GaAs$ ، فإن الفوتونات الصادرة لا يمكن إعادة امتصاصها عندما تغادر المنطقة الفعالة وتستطيع الوصول إلى سطح الجهاز كما موضح في الشكل (d). كذلك الضوء المتجه نحو المنطقة $p - AlGaAs$ لا يمتص، بل يمكنه أن ينعكس ليرفع من شدة الضوء الصادر.

6. خصائص الثنائية المرسلّة للضوء:

إن طاقة الفوتون الصادر من ثنائية LED ليست بكل بساطة مساوية إلى عرض الفاصل الطائي E_g لأن الإلكترونات في عصابة النقل طاقاتها متوزعة ضمن العصابة وكذلك هو الحال بالنسبة للثقوب في عصابة التكافؤ. الشكل 6 (a) و (b) يوضح مخطط الطاقة وتوزيعة الإلكترونات والثقوب الطاقية في عصابتي النقل والتكافؤ على التوالي. تركيز الإلكترونات كدالة في الطاقة عبر عصابة النقل معطاة بـ:

$$n_E(E) = g(E) \cdot f(E)$$

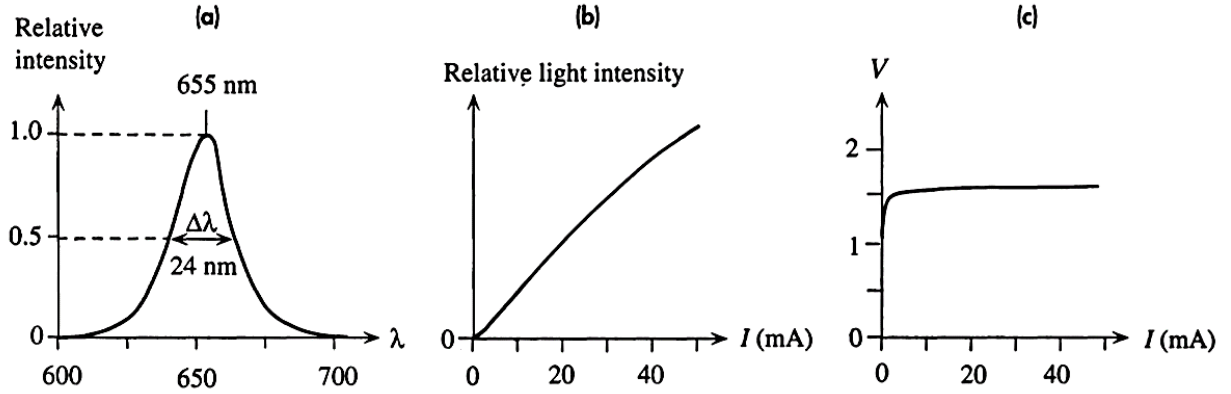
أين تمثل $g(E)$ كثافة الحالات و $f(E)$ دالة فارمي-ديراك (احتمال تواجد إلكترون في مستوى الطاقة E). الجداء $g(E) \cdot f(E)$ يمثل تركيز الإلكترونات في وحدة الطاقة أو التركيز كدالة في الطاقة وهو مرسوم وفق المحور الأفقي في الشكل 6-b (نفس الشيء بالنسبة للثقوب في عصابة التكافؤ).



الشكل 6- (a) مخطط الطاقة مع توضيح مختلف إمكانيات الالتحام. (b) التوزيع الطاقية للإلكترونات. (c) شدة الإشعاع النسبية بدلالة طاقة الفوتونات بالاعتماد على الشكل b. (d) شدة الإشعاع النسبية بدلالة طول موجة الفوتونات.

من الواضح في الشكل 6-b أن تركيز الإلكترونات في عصابة النقل كدالة في الطاقة ليس متناظر ويمر بقيمة عظمى عند $\frac{1}{2} kT$ فوق E_c ، بينما امتداد الطاقة لهذه الإلكترونات هو إلى حد ما $2kT$ انطلاقاً من E_c . نفس الشيء بالنسبة لتركيز الثقوب الذي يمتد بشكل مماثل انطلاقاً من E_v في عصابة التكافؤ. نذكر أن معدل الالتحام المباشر متناسب مع تركيزي الإلكترونات والثقوب. الانتقال المشار إليه بـ 1 في الشكل 6-a يعني الالتحام المباشر بين إلكترون عند E_c وثقب عند E_v . لكن تركيز حاملات الشحنة قرب حدود العصابات صغير جداً وبالتالي هذا النوع من الالتحام لا يحدث كثيراً، لذلك فالشدة النسبية للضوء عند طاقة الفوتون hv_1 صغيرة كما يظهره الشكل 6-c. الانتقالات التي تتضمن أكبر تراكيز للإلكترونات والثقوب هي التي تحدث بكثرة. مثلاً، الانتقال 2 في الشكل 6-a يملك أكبر احتمال لأنه سواء تركيز الإلكترونات أو الثقوب يمر بقيمة كبرى عند هذه الطاقات كما يظهره الشكل 6-b، لذا فشدّة الضوء النسبية الموافقة لطاقة الانتقال hv_2 هي القصوى أو قريبة من القيمة القصوى كما يظهره الشكل 6-c. أما الانتقالات المشار إليها بـ 3 في الشكل 6-a والتي تصدر فوتونات ذات طاقة hv_3 نسبياً عالية تتضمن انتقالات من وإلى مستويات طاقية ذات تراكيز إلكترونات وثقوب صغيرة كما يظهر في الشكل 6-b، وبالتالي شدة الضوء تكون نسبياً صغيرة عند طاقات الفوتونات العالية. تناقص الشدة الضوئية مع طاقة الفوتون موضح في الشكل 6-c الذي يبين خصائص الشدة الضوئية النسبية مقابل طاقة الفوتون للطيف الصادر والتي تمثل خصائص مهمة للثنائية LED. بإعطاء الطيف في الشكل 6-c يمكن أيضاً أن نتحصل على خصائص شدة الضوء النسبية بدلالة طول الموجة كما مبين في الشكل 6-d ($\lambda = c/\nu$).

عرض الطيف الصادر $\nu\Delta$ أو $\lambda\Delta$ معرف بالعرض بين نقطتي نقصان الشدة الضوئية النسبية إلى نصف قيمتها العظمى كما موضح في الشكل 6 (c) و (d). طول الموجة الموافق للقيمة الأعظمية للشدة الضوئية والعرض $\lambda\Delta$ للطيف الصادر متعلقان بوضوح بالتوزيعات الطاقية للإلكترونات والثقوب في عصابتي النقل والتكافؤ وبالتالي بكتافة حالات الطاقة في هذه العصابات. طاقة الفوتون عند قمة الإصدار هي بالتقريب $E_g + kT$ وهي توافق الانتقالات بين قمة توزيعة الإلكترونات طاقيا وقمة توزيعة الثقوب في الشكل 6-b. العرض $\Delta(h\nu)$ للإشعاع الصادر بين نقطتي نقصان الشدة الضوئية إلى النصف هو بالتقريب $3 kT$ كما موضح في الشكل 6-c. من الواضح نسبيا حساب العرض الطيفي $\lambda\Delta$ الموافق لـ: $\Delta(h\nu) \cong 3 kT$.



الشكل 7- (a) الطيف النموذجي لثنائية GaAsP حمراء. (b) الاستطاعة الضوئية بدلالة التيار المباشر. (c) الخاصية I-V النموذجية لثنائية حمراء، جهد الاشتغال يساوي 1,5.

الطيف الصادر أو خصائص الشدة الضوئية النسبية مقابل طول الموجة، من ثنائية LED لا يتعلق فقط بالمادة نصف الناقلة ولكن أيضا ببنية الثنائية ذات الوصلة pn ، بما في ذلك مستويات تركيز التطعيم. الطيف في الشكل 6-d يمثل طيف مثالي دون إدخال تأثيرات التطعيم المرتفع على عصابات الطاقة وإعادة امتصاص بعض الفوتونات. الخصائص المميزة لـ LED مرسل للضوء الأحمر (655 nm) كمثال موضحة في الشكل 7 a إلى c. الطيف الصادر في هذه الحالة يظهر تناظر أكثر من الملاحظ في الطيف المثالي في الشكل 6-d. عرض الطيف هو حوالي 24 nm ما يوافق عرض قدره حوالي $2.7 kT$ في التوزيعة الطاقية للفوتونات الصادرة.

كما يزداد التيار في LED كذلك يزداد تركيز حاملات الشحنة الأقلية المحقونة وكذلك معدل الالتحام المشع وبالتالي شدة الضوء الصادر. الزيادة في الاستطاعة الضوئية الصادرة ليست بأي حال خطية مع تيار LED كما يظهر في الشكل 7-b. عند مستويات عالية للتيار، فإن حقن معتبر لحاملات الشحنة الأقلية يؤدي إلى جعل زمن الالتحام مرتبط بتركيز الحاملات المحقونة وبالتالي مرتبط بالتيار نفسه، هذا يؤدي إلى معدل التحام غير خطي مع التيار. الخصائص تيار-جهد موضحة في الشكل 7-b أين يمكن ملاحظة أن جهد العتبة هو حوالي 1.5 V انطلاقا منه يزداد التيار بحدة مع الجهد. جهد العتبة يعتمد على طبيعة نصف الناقل وعموما يزداد مع الفاصل الطاقي E_g . فمثلا بالنسبة لثنائية LED مرسل للون الأزرق جهد العتبة هو حوالي 3.5 - 4.5 V، من أجل LED مرسل للون الأصفر جهد العتبة 2 V ومن أجل LED GaAs مرسل للإشعاع ما تحت الحمراء جهد العتبة 1 V.

الفصل الثامن: ثنائية الليزر

Diode laser

ضوء الليزر لديه بعض الخصائص الخاصة جدا، والتي تميزه عن الضوء من مصادر أخرى:

الإشعاع المنبعث يكون أحادي اللون بدرجة كبيرة، أي أنه يمتلك طيف اصدار ضيق جدا.

ينتشر ضوء الليزر في شكل شعاع، أي أنه ينتشر على مسافات طويلة دون يتباعد كثيرا في الاتجاهات العرضية (أشعة متوازية). هذا ما يسمح له أن يركز على بقع صغيرة جدا (التركيز عالية من شعاع الليزر).

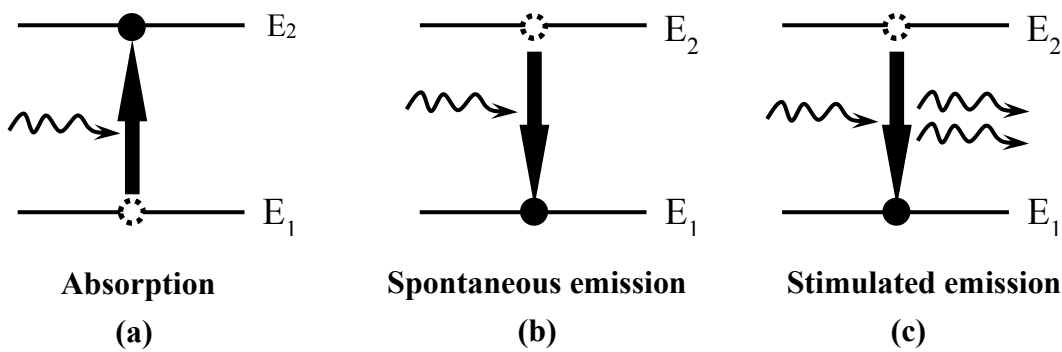
تكون الموجات على درجة عالية من التوافق الزمني (الطور)، يعني ذلك أن هناك توافق طوري صلب يتم الحفاظ عليه لفترات زمنية طويلة نسبيا، تقابل مسافات انتشار كبيرة (كثيرا ما تكون عدة كيلومترات).

الليزر المصنوع من أنصاف النواقل يشبه الليزر الياقوتي (الحالة الصلبة) وليزر الهيليوم والنيون (ليزر الغاز) في الخصائص الضوئية، أنه يختلف عن الأنواع الأخرى في أنه صغير (0.1 مم طول) ويتم التحكم به في الترددات العالية بسهولة عن طريق التحكم في تيار الوصلة. بسبب هذه الخصائص الفريدة، فإن ليزر أشباه الموصلات هو أحد مصادر الضوء الأكثر أهمية للاتصال بالألياف الضوئية، كما أنها تستخدم في تسجيل الفيديو، القراءة البصرية (الأقراص المضغوطة...)، وطابعات الليزر عالية السرعة. كلمة ليزر (LASER) هي اختصار لتضخيم الضوء بواسطة انبعاث الأشعة المحرزة (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). والمميز هو النظام المقابل لموجات الميكرو.

1. مبدأ عمل الليزر:

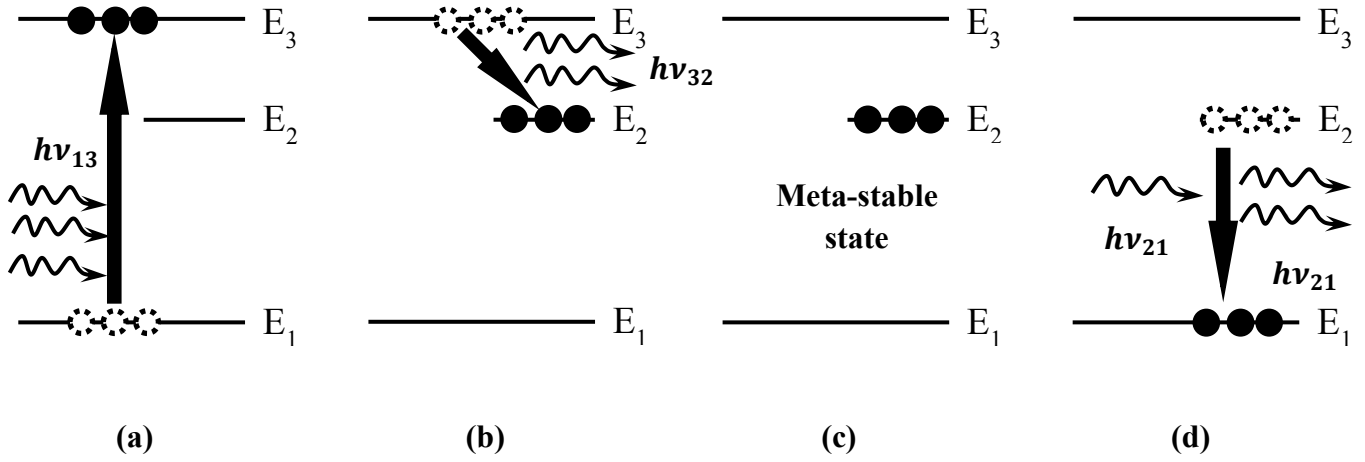
لفهم كيف يعمل الليزر، يجب أولا التطرق لأنواع تفاعل الإلكترونات مع الضوء. لنفرض ذرة ذات مستويين من الطاقة وإلكترون واحد (لتكن E_1 الطاقة في حالة الاستقرار و E_2 الطاقة في حالة الاثارة)، ولنفرض أن الإلكترون في حالة الاستقرار. إذا بامتصاص الفوتون من التردد $\nu = (E_2 - E_1)/h$ ، ينتقل هذا الإلكترون إلى حالة الاثارة (الشكل 1-a). ومن هناك يمكن لهذا الإلكترون أن يعود إلى الحالة المستقرة بانبعث فوتون ذو تردد (ν). هنا يمكننا تمييز نوعين من الانبعاثات:

- **الانبعاث التلقائي:** في هذه الحالة يعود الإلكترون تلقائيا إلى حالة الاستقرار، فينبعث فوتون ذو تردد ν (الشكل 1-b).
- **الانبعاث المحرض:** في هذه الحالة يقوم فوتون وارد ذو تردد ν بتحفيز الإلكترون لجعله ينتقل من الحالة المثارة إلى حالة الاستقرار مما يؤدي إلى انبعاث فوتون ثاني ذو تردد ν يكون على توافق مع الفوتون الأول من حيث الطور والاتجاه وطول الموجة. إذا في هذه الحال يرد فوتون واحد ويغادر فوتونان متوافقان (الشكل 1-c).



الشكل 1- الامتصاص، الانبعاث التلقائي والانبعاث المحرض.

تعتبر الانبعاثات المحرزة هي الأساس لتضخيم الضوء، حيث ينتج عن كل فوتون وارد اثنين من الفوتونات المتوافقة. إذا من الممكن تحقيق جهاز لتضخيم الضوء بالاعتماد على أساس هذه الظاهرة. من الشكل 1، نرى أنه للحصول على الانبعاثات المحرزة، لا ينبغي للفوتونات الواردة أن تمتص بواسطة الإلكترونات المتواجدة في E_1 . وبالتالي إذا أردنا استخدام مجموعة من الذرات لتضخيم الضوء، يجب أن تكون غالبية الذرات في مستوى الطاقة E_2 . تعرف هذه الحالة بالانقلاب في الإسكان (population inversion)، إذا حقق وسط ما هذه الخاصية نقول عنه انه مضخم للضوء. أما إذا لم تكن هذه الحالة محققة، فإن الفوتونات القادمة سوف تمتص من قبل الإلكترونات في E_1 لتنتشر إلى E_2 .



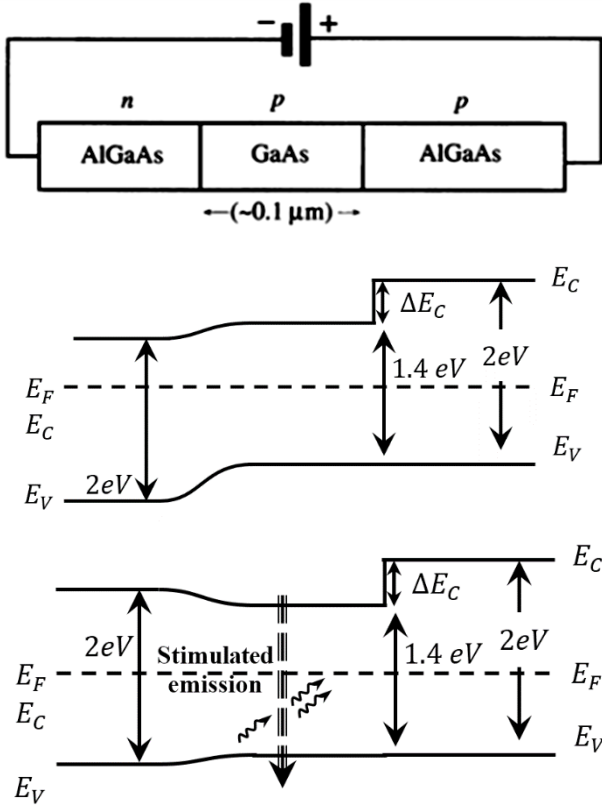
الشكل 2: (a) ضخ الإلكترونات الى المستوى E_3 (b) عودة الإلكترونات بسرعة الى المستوى الطاقى الأدنى (c) الانقلاب في الإسكان بين E_1 و E_2 (d) انطلاق سلسلة الانبعاثات المحرّضة بواسطة فوتون ذو طاقة $h\nu_{21}$.

من الواضح أنه مع اثنين من مستويات الطاقة لا يمكن أبدا تحقيق الانقلاب في الإسكان، لأن طاقة الفوتونات المطلوبة لحدوث الامتصاص (نقل الإلكترونات من المستوى E_1 الى E_2) مساوية للطاقة المطلوبة لحدوث الانبعاث المحرض، وبالتالي احتمال حدوث الظاهرتين متساوي. يمكن تحقيق هذه الحالة باستعمال نظام ذو ثلاث أو أربعة مستويات ذات مدات حياة مختلفة: لنفرض نظام ذو ثلاثة مستويات طاوقية (الشكل 2)، مع وجود إثارة خارجية (فوتونات ذات طاقة $h\nu_{13}$) تسمح بنقل الإلكترونات لمستوى الطاقة E_3 (تسمى هذه العملية بالضخ، حيث يتم استخدام الضخ الضوئي في هذه الحالة). لنفترض كذلك أن مدة حياة الإلكترونات في المستوى الطاقى E_3 قصيرة، أي انها تعود بسرعة إلى مستوى الطاقة E_2 ، والذي يملك مدة حياة طويلة نسبيا، عادة ما يطلق على حالة الإلكترونات في هذا المستوى بحالة شبه الاستقرار. بما أن الإلكترونات لا يمكن أن تعود بسرعة من المستوى E_2 الى E_1 ، فإنها تتراكم مسببة انقلاب في الإسكان بين E_1 و E_2 ، خاصة أن الضخ يأخذ المزيد والمزيد من الإلكترونات من المستوى E_1 الى E_3 ، وبالتالي إلى E_2 .

عندما ينتقل أحد الإلكترونات في ذرة واحدة من المستوى E_2 الى E_1 تلقائيا، ينبعث فوتون، الذي يمكن أن يذهب إلى ذرة مجاورة ويسبب ذلك انبعاث محرض. هذين الفوتونين يمكن أن يذهبا بعد ذلك إلى ذرتين مجاورتين ويتسببان انبعاث فوتونين محرضين، وهلم جرا. والنتيجة هي انبعاث مضاعف لفوتونات محرّضة، وبالتالي انبعاث مجموعة كبيرة من الفوتونات المتوافقة.

2. تضخيم الضوء في أنصاف النواقل:

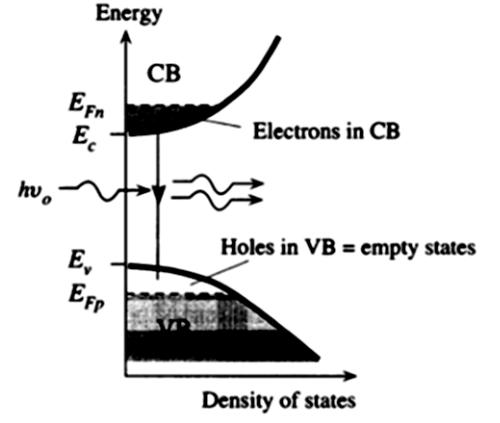
كل ثنائيات الليزر بأنصاف النواقل هي غالبا بنيات غير متجانسة مزدوجة الوصلة (DH : Double heterostructure) حيث مخطط الطاقة مشابه لمخطط ثنائية LED في الشكل 5 (العنصر السابق). مخطط الطاقة لثنائية الليزر DH مستقطبة استقطاب مباشر موضح في الشكل 3-a. في هذه الحالة أنصاف النواقل هي $AlGaAs$ ($E_g \sim 2 \text{ eV}$) و $GaAs$ ($E_g \sim 1.4 \text{ eV}$). المنطقة $p-GaAs$ هي منطقة رقيقة سمكها حوالي $0.1 - 0.2 \mu\text{m}$ وتكون المنطقة الفعالة التي فيها تحدث الإصدارات المحرّضة ($stimulated emissions$). كل من المنطقتين $p-AlGaAs$ و $p-GaAs$ مطعمتان بشدة من نوع p وهما بذلك منحطتان ($degenerate$) مع مستوى فارمي E_{fp} في عصابة التكافؤ. عندما يطبق جهد استقطاب مباشر معتبر، فإن Ec في المنطقة $n-AlGaAs$ تصبح قريبة جدا من Ec في المنطقة $p-GaAs$ ما يسمح بحقن معتبر للإلكترونات في عصابة النقل من المنطقة $n-AlGaAs$ إلى داخل المنطقة $p-GaAs$ (الشكل 3-b). أما باستقطاب مباشر كبير كفاية، يمكن أن تنتقل Ec للمنطقة $n-AlGaAs$ إلى أعلى من Ec للمنطقة $p-GaAs$ ، ما يسبب حقن كبير للإلكترونات من المنطقة $n-AlGaAs$ داخل عصابة النقل للمنطقة $p-GaAs$ (الشكل 3-c). الإلكترونات المحقونة تنحصر في عصابة النقل للمنطقة $p-GaAs$ بما أنه هناك حاجز كمون ΔE_c بين $p-AlGaAs$ و $p-GaAs$ بسبب التغير في عرض الفاصل الطاقى. من جهة أخرى، فإن المنطقة $p-GaAs$ مطعمة بشدة ومنحطة، وبالتالي سقف عصابة التكافؤ مملوء بالثقوب، أو أن كل الحالات الإلكترونية فوق مستوى فارمي E_{fp} فارغة في هذه المنطقة. بالتالي، كما يظهره الشكل 3-d هناك تركيز كبير للإلكترونات في عصابة النقل وحالات طاوقية فارغة كلية في سقف عصابة التكافؤ، ما يعني أنه هناك انقلاب في الإسكان ($population inversion$).



(a)

(b)

(c)



(d)

الشكل 3: (a) مخطط توضيحي لوصلة مزدوجة غير متجانسة (b) عصابات الطاقة في حالة استقطاب مباشر (c) عصابات الطاقة في حالة استقطاب مباشر كبير (d) كثافة الحالات والتوزيع الطاقوي للإلكترونات والثقوب في المنطقة الفعالة.

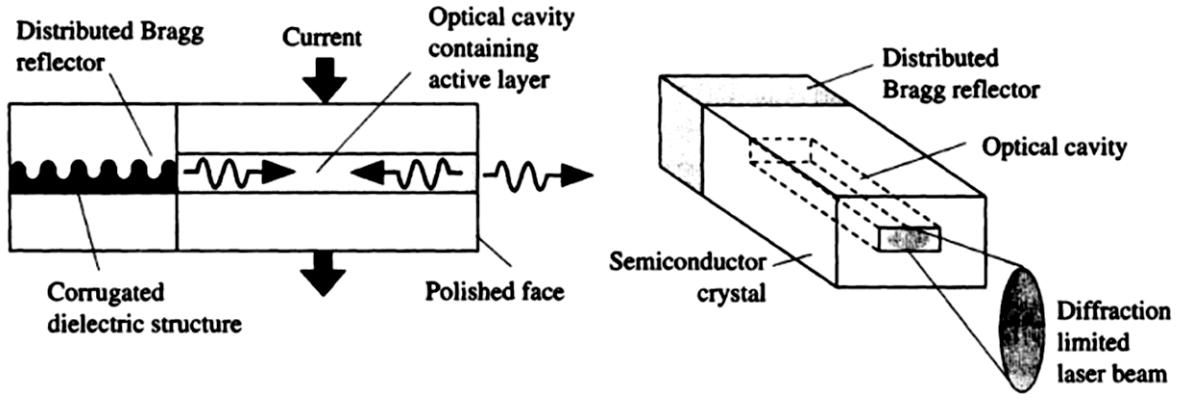
أي فوتون وارد بطاقة $h\nu_0$ أعلى من E_g يمكن أن يحرض إلكترون نقل في المنطقة p -GaAs إلى النزول من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ وإصدار فوتون بالإصدار المحرض (*stimulated emission*) كما مبين في الشكل 3-d. هذا الانتقال هو التحام إلكترون مع ثقب محرض بفوتون، أو الالتحام المشع لليزر. بالتالي سلسلة إصدارات محرضة في المنطقة الفعالة تنتج تضخم ضوئي من الفوتونات بطاقة $h\nu_0$ (إنتاج الليزر).

تضخم الضوء مرتبط بمدى انقلاب الإسكان وبالتالي مرتبط بتيار الاستقطاب المباشر للثنائية. الجهاز يعمل كنصف ناقل مضخم للضوء الذي يضخم إشارة ضوئية تمر عبر المنطقة الفعالة (p -GaAs). هناك تيار عتبة (*threshold current*) أقل منه لا يحدث إصدار محرض ولا تضخم للضوء.

3. التجويف البصري

من أجل صناعة نصف ناقل مصدر لليزر بصفة مستمرة يجب دمج المنطقة الفعالة في تجويف بصري (*optical cavity*). التجويف له نهايتين عاكستين للضوء، تعكس الفوتونات المنتاسقة إلى الخلف وإلى الأمام وتشجع تداخلها البناء داخل التجويف كما موضح في الشكل 4. هذا يؤدي إلى إنشاء اهتزازات كهرومغناطيسية عالية الطاقة داخل التجويف. جزء من هذه الطاقة كهرومغناطيسية في التجويف يمكن الاستفادة منها كإشعاع صادر وذلك بجعل أحد نهايتي التجويف نصف عاكسة.

مثلاً، أحد أنواع التجويفات البصرية (الشكل 4) لها عاكس خاص، يسمى عاكس براغ الموزع (*Bragg distributed reflector - BDR*)، في أحد نهايتها لعكس فقط أطوال موجات معينة داخل التجويف. لعاكس براغ الموزع بنية متموجة دورية محفور في نصف الناقل لعكس فقط أطوال موجية معينة مرتبطة بدورية التموج. هذا الانعكاس الانتقائي لطول الموجة يؤدي إلى وجود نمط واحد ممكن للإشعاع الكهرومغناطيسي داخل التجويف والذي يؤدي إلى إصدار طيف كهرومغناطيسي ضيق أو محدود: إصدار أحادي النمط (*single - mode output*) وفي طيف الإصدار لا توجد إقمة واحدة كما مبين في الشكل 5-b. ليزر أنصاف النواقل الذي يعمل بنمط واحد في إصدار الإشعاع يسمى ليزر أحادي النمط، أو أحادي التردد. عرض الخط الطيفي لليزر أحادي النمط صادر هو حوالي 0.1 nm ، والذي يمكن مقارنته مع العرض الطيفي لثنائية LED قدره 150 nm عند قمة إصدار عند 1550 nm .



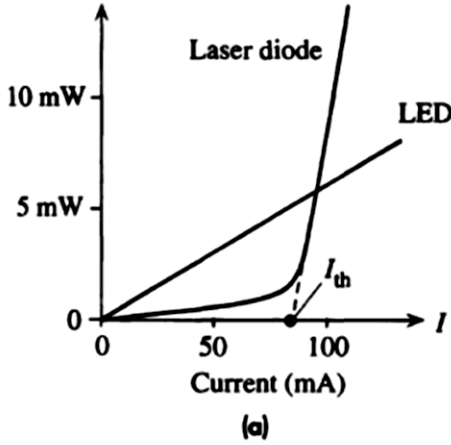
الشكل 4: ليزر أنصاف النواقل يملك تجويف بصري لبناء الاهتزازات المطلوبة. هذا الشكل يوضح استعمال عاكس براغ الموزع لاختيار طول الموجة المرجو.

البنية غير المتجانسة مزدوجة الوصلة لها عدة ميزات. أنصاف النواقل ذات الفاصل الطاقى العريض تملك عموماً قرائن انكسار منخفضة، ما يعني أن المنطقة $AlGaAs$ لها قرينة انكسار أقل من المنطقة $GaAs$. التغير في قرائن الانكسار يكون موجه موجي ضوئي (optical waveguide) الذي يحصر الفوتونات في المنطقة الفعالة من التجويف البصري وبالتالي يخفض الضياع في الفوتونات ويزيد من تركيز الفوتونات. هذه الزيادة في تركيز الفوتونات ترفع من الإصدارات المحرصة وبالتالي من مردود الليزر.

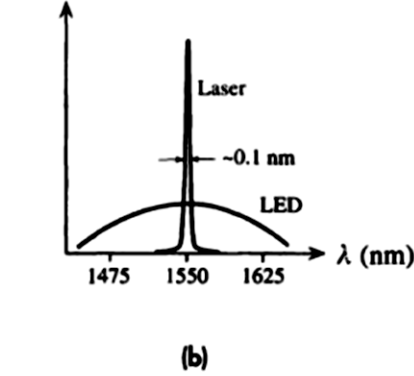
4. تيار العتبة

لتحقيق الإصدارات المحرصة اللازمة من ثنائية الليزر وإنشاء الاهتزازات الضوئية اللازمة في التجويف (التغلب على كل الضياع في الضوء) تيار الاستقطاب يجب أن يفوق تيار العتبة I_{th} كما مبين في الشكل 5-a. وهو التيار الذي تنتقل عنده Ec للمنطقة $n-AlGaAs$ إلى أعلى من Ec للمنطقة $p-GaAs$ ، ما يسبب حقن كبير للإلكترونات من المنطقة $n-AlGaAs$ داخل عصابة النقل للمنطقة $p-GaAs$ وبالتالي انقلاب الإسكان. الاستطاعة الضوئية الصادرة عند التيار I متناسبة تقريباً مع $I - I_{th}$. هناك استطاعة ضوئية صادرة ضعيفة تحت تيار العتبة (I_{th}) لكنها فقط بسبب الالتحامات التلقائية للإلكترونات المحقونة مع الثقوب في المنطقة الفعالة، ثنائية الليزر تتصرف كثنائية LED ضعيفة الشدة تحت التيار I_{th} . بينما يبدأ تضخيم الضوء بعد تيار العتبة وبالتالي فالاستطاعة تتزايد بشكل ملحوظ. من جهة أخرى نلاحظ أن الضوء الصادر من LED يتزايد تقريباً بشكل متناسب مع تيار الثنائية

Optical output power



Optical power



الشكل 3: (a) مخطط توضيحي لوصلة مزدوجة غير متجانسة (b) عصابات الطاقة في حالة استقطاب مباشر (c) عصابات الطاقة في حالة استقطاب مباشر كبير (d) كثافة الحالات والتوزيع الطاقوي للإلكترونات والثقوب في المنطقة الفعالة.