الفصل الثاني عشر

أشباه الموصلات

Semiconductors

بعد أن يكمل القارئ هذا الفصل، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلاله، من المتوقع أن يكون قادراً على:

1. أن يميّز أشباه الموصلات عن الأصناف الأخرى للمواد الموجودة في الطبيعة.
2. أن يصنّف المواد من حيث سلوكها الكهربائي مستفيداً من المفهوم المبسط لنظرية أشرطة الطاقة.
3. أن يشرح المعنى الصحيح لشبه الموصل النقي، وكيفية استخدامه لصناعة البلورات من النوع الموجب والبلورات من النوع السالب، ودور عملية التطعيم في ذلك.
4. أن يوضح السبب في اختيار شوائب التطعيم ثلاثية أو خماسية التكافؤ، ولماذا لا تكون غير ذلك؟
5. أن يميّز حاملات التيار في كلا النوعين من البلورات؛ النوع الموجب والنوع السالب.
6. أن يُعرّف "الثنائي البلوري" ويدرس خواص الفولتية والتيار له، ويقرر أنّ العلاقة بين الفولتية والتيار ليست علاقة خطية، كما هو الحال في المقاومة الكهربائية.
7. أن يميّز مفهوم "المقاومة الحرارية" في الثنائي البلوري.
8. أن يضبط الاستخدامات التطبيقية لأنواع الثنائي البلوري من خلال اطلاعه على وظائف وخصائص عددٍ منها.

obeikandl.com

obeikandl.com

أشباه الموصلات

Semiconductors

12-1 المقدمة *Introduction*:

كنا قد بينا في الفصل السادس من هذا الكتاب أن المواد الصلبة تصنّف إلى ثلاثة أقسام من حيث ناقليتها للكهرباء، وذلك بعد اختبارها وإجراء التجارب العملية عليها، وهذه الأصناف الثلاثة هي:

1- المواد العازلة للكهرباء *insulators*.

2- المواد الناقلة للكهرباء *conductors*.

3- المواد شبه الناقلة[1] للكهرباء *semiconductors*.

إنَّ عدد "الإلكترونات الحرة" لوحدة الحجم في الموصلات الجيدة يبلغ نحو $(10^{28}\ electron/m^3)$، بينما يبلغ في المواد العازلة نحو $(10^{7}\ electron/m^3)$، أما في أشباه الموصلات فيتراوح بين هذين العددين.

إن أشباه الموصلات *semiconductors* هي موضوع الفصل الذي بين أيدينا، ولعل أكثر هذه المواد شيوعاً الجيرمانيوم *germanium* واختصاراً يرمز

(1) أصبح من المألوف استخدام كلا التسميتين أشباه ا لموصلات، أو أشباه النواقل وهي موافقة للتسمية الإنكليزية ***semiconductors***.

obeikandl.com

لـه بـالرمز (*Ge*) والسـيليكون *silicon* ويرمـز لـه بـالرمز (*Si*)، وسـنتناول ترتيبهـا البلـوري وعـدد الإلكترونـات التكافئيـة لـذراتها، وطريقـة تحضـير البلورات الموجبة والبلورات السالبة صناعياً منها، كما سنتعرف على وصلة (*p-n*) المصنوعة من هذه المواد، وخصائص الفولتية والتيار لها، ونقارن ذلك بخصائص الفولتية والتيار للمواد الناقلة للكهرباء.

وعلم دراسة أشباه الموصلات هو جزء من علم فيزياء الحالة الصلبة *solid state physics*، ذلك لأن التوصيل الكهربائي يحدث في الحالة الصلبة للمادة، وهذا بهدف تمييزها عن الحالات الأخرى كالسائلة والغازية، أو الفراغية، كما يحدث في الصمامات الإلكترونية *electronic valves* على سبيل الإيضاح.

12-2 أشرطة الطاقة في المواد الصلبة *Energy Bands in Asolid*:

إنّ مستويات الطاقة في المواد الصلبة تصل إلى عدد (*N*) مستوى وهي من رتبة عدد أفوكادرو نفسها، وتكوّن هذه المستويات ما يسمى بحزم أو شرائط الطاقة *energy bands*، ومن هذه الشرائط شريطان يحددان الخواص الإلكترونية للمادة، حيث إن شريط التكافؤ *valence band*، يعود إلى المستويات العالية لطاقة الإلكترونات التي تحوم في المدارات الخارجية للذرة. أما شريط التوصيل *conduction band* فهو ذو مستويات طاقة أعلى من مستويات طاقة شريط التكافؤ. ويفصل بين الشريطين ما يسمى بالشريط المحظور *forbidden band-gap* وهو يؤدي دوراً كبيراً في مسألة التمييز بين الأصناف الثلاثة للمواد الصلبة. ومن المناسب ذكره هنا أن شريطي التكافؤ والتوصيل مُشتركان بين كافة ذرات المادة، وهذان الشريطان متداخلان في

obeikandl.com

المواد الناقلة مما يتيح للإلكترونات حرية التحرك، وهذا ما يفسِّر ظاهرة مرور التيار الكهربائي خلالها بيسر وسهولة.

إنَّ الإلكترونات التكافئية في المواد شبه الموصلة تحتاج إلى اكتساب طاقة خارجية كي تنتقل من شريط التكافؤ إلى شريط التوصيل، ومن الممكن أن تكون هذه الطاقة ضوئية أو حرارية، وعلى سبيل المثال فإنَّ درجة حرارة الغرفة كافية لتحفيز الإلكترونات التكافئية كي تمكّنها من عبور الشريط المحظور، وتعرّف الإلكترونات هنا بالإلكترونات المحفزة حرارياً *thermally excited electrons*.

وبصفة عامة فإن التوصيل الحراري في المواد الصلبة يعتمد على ثلاثة عوامل:

1- كثافة الإلكترونات، أي عددها في وحدة الحجوم *electron density*.

2- توفر مصدر للطاقة *source of energy*.

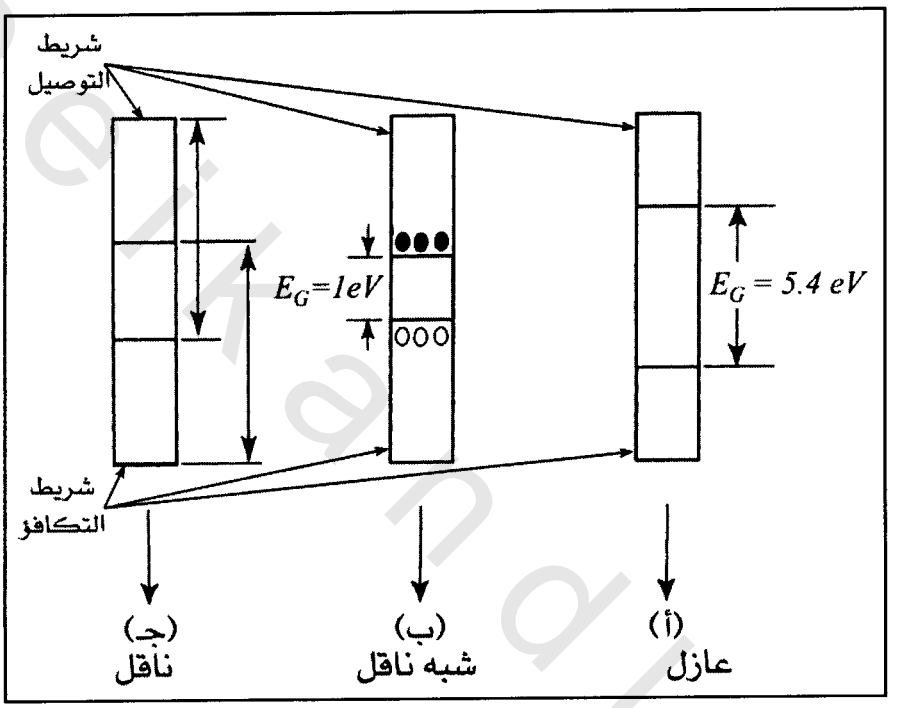
3- وجود مستويات طاقة في شريط التوصيل لاستقبال الإلكترونات المُحفزة.

وبهدف التمييز بين الأصناف الثلاثة للمواد الصلبة من خلال أشرطة طاقتها، تأمل الشكل (1-12).

إن هذا المخطط يمكّننا من التمييز بين الأصناف الثلاثة، حيث تكون طاقة الشريط المحظور (E_G) بشكل عام في المواد العازلة بحدود $(5.4\ eV)$،

obeikandl.com

انظر الشكل (1-12 أ)، مما يستدعي امتلاك أي إلكترون لمثل هذه الطاقة كي يتمكن من عبورها. ولهذا يبقى شريط التوصيل في المواد العازلة فارغاً، وهذا ما يفسر عدم توصيلها للكهرباء.



الشكل (1-12)

يوضح مواضع أشرطة الطاقة الثلاثة في كل من المواد العازلة، وشبه الناقلة، والناقلة

أما مقدار (E_G) بشكل عام في أشباه الموصلات فيساوي على وجه التقريب $(1\ eV)$ وهذا ما يفسِّر عبور بعض الإلكترونات إلى شريط التوصيل في حالة توفر الطاقة الخارجية اللازمة لذلك. أما في حالة الموصلات فإن شريطي التكافؤ والتوصيل متداخلان، انظر الشكل (1-12 جـ)، وهذا ما يفسر الاستجابة الفورية للتوصيل الكهربائي في هذا الصنف من المواد الصلبة.

ومن المناسب تأكيده هنا أنّ عدد الإلكترونات التي تعبر الشريط المحظور في أشباه الموصلات يزداد ازدياداً طردياً مع ازدياد درجة الحرارة، وهذه ميزة هامة من مميزات أشباه الموصلات، وسنبين هذا الأمر عند دراستنا لخصائص التيار الكهربائي المار في الثنائي شبه الموصل.

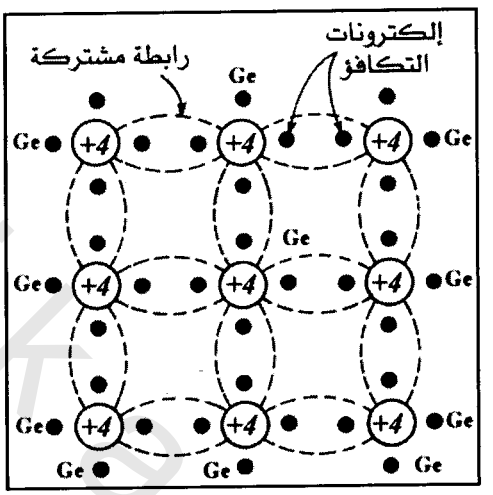
12-3 شبه الموصل النقي *Intrinsic Semiconductor*:

يعتبر كل من السيليكون *silicon* والجيرمانيوم *germanium* من أهم أشباه الموصلات التي تُستعمل في الأغراض الإلكترونية التطبيقية والصناعية، وكلاهما يقع ضمن المجموعة الرابعة *(group IV A)* في الجدول الدوري، أي أنها رباعية التكافؤ. ويمتلك السيليكون أربعة عشر إلكتروناً، بينما يمتلك الجيرمانيوم اثنين وثلاثين إلكتروناً. وتتصف ذرات كلٍ منهما بالقدرة على الاتحاد فيما بينها عن طريق ترابط إلكترونات التكافؤ للذرات المتجاورة وتكوين ما يسمى بالرابطة المشتركة *covalent bond*، أما التركيب العام لكل منهما فهو تركيب بلوري هندسي دقيق متساوي البعد طولاً وعرضاً وارتفاعاً *uniform crystalline structuse*، والقطعة أو اللّبنة الواحدة تسمى بلورة *crystal*، تأمل الشكل (2-12).

إنَّ السلوك الكهربائي لكلٍ من السيليكون والجيرمانيوم في ظل الظروف الاعتيادية يشابه سلوك المواد العازلة. أما إذا تعرضت بلوراتهما لتأثيرات خارجية كالتأثيرات الضوئية أو الحرارية مثلاً فإن ذلك يؤدي إلى إضعاف الروابط المشتركة للإلكترونات التكافئية، وتكفي درجة حرارة الغرفة لحصول مثل هذا التأثير لعنصر الجيرمانيوم، حيث إن مقدار طاقة

• • •

الشـريط المحظـور *forbidden energy gap* $(E_G = 0.72\,eV)$ بينمـا تسـاوي في السيليكون $(E_G = 1.1eV)$.



الشكل (2-12) يبين إلكترونات الكتافؤ *valance electrons* وموضع الرابطة المشتركة *covalant bond* في الجيرمانيوم

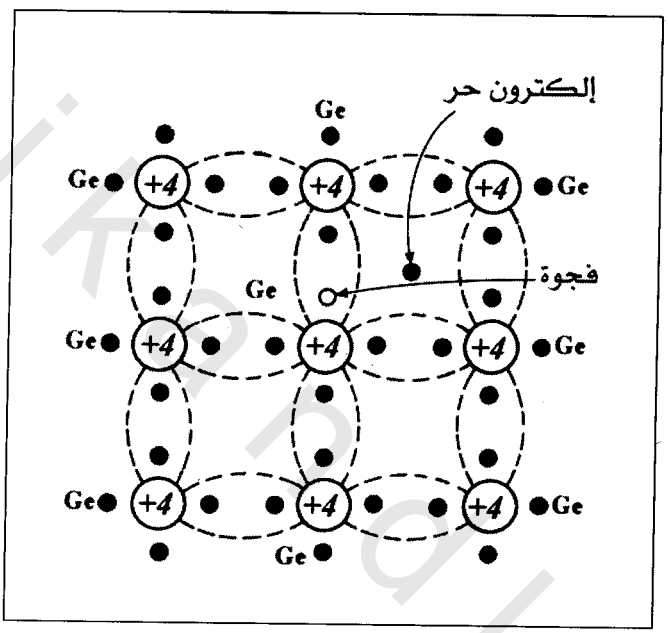
إن الدائرة الصغيرة الفارغة المبينة في الشكل (3-12) تمثل الفراغ الذي تركه غياب الإلكترون المحفّز، هذا الفراغ يسمى بالفجوة *hole* وهو ذو طبيعة كهربائية موجبة، أما أهميته فتتمثل في كونه ناقلاً للتيار الكهربائي، حيث تتكرر إمكانية حدوثه وملؤه بصفة دائمة من قبل الإلكترونات التكافئية، تأمل الشكل (4-12).

وعند تطبيق فرق جهد على أشباه الموصلات تكون الإلكترونات منساقة نحو النهاية الموجبة للبطارية، بينما تنساق الثقوب نحو النهاية السالبة لها، ويكون التيار محصلة لمجموع التيارين الناتجين بسبب حركة كلٍ من الإلكترونات والثقوب، وذلك لكون التيارين يسريان في الاتجاه نفسه،

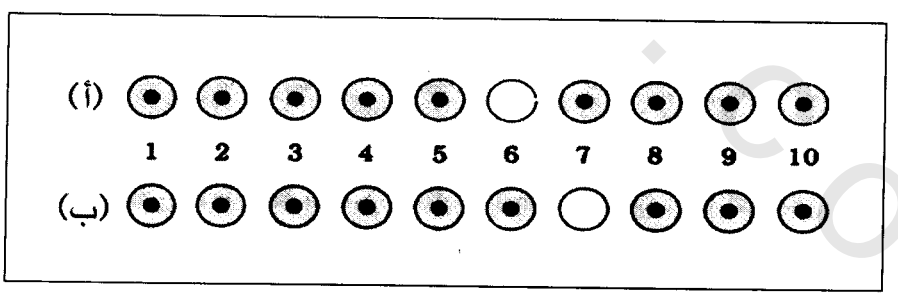
• • •

ويمكن التعبير عن كثافة الشحنات النقية *intrinsic density* والتي يُرمز لها بالرمز (n_i) على أنها المتوسط الهندسي لكثافة الإلكترونات (n) والفجوات (p) أي أن:

$$np = n_i^2 \qquad (12\text{-}1)$$



الشكل (12-3)



الشكل (12-4) يبين كيفية انتقال الفجوة *hole* كحامل للتيار

obeikandl.com

وعندما يؤثر مجال كهربائي مقداره $(\vec{E})$ على شبه الموصل فإن كثافة التيار[1] الناتج عن حركة الإلكترونات هي:

$$J_n = ne\mu_n\vec{E} \qquad (12\text{-}2)$$

أما كثافة التيار الناتج عن حركة الثقوب فهي:

$$J_p = pe\mu_p\vec{E} \qquad (12\text{-}3)$$

حيث تعبِّر (μ_n) عن تحركية الإلكترونات *electron mobility*، بينما تعبِّر (μ_p) عن تحركية الثقوب *hole mobility*، وهكذا يمكننا أن نعبّر عن كثافة التيار الكلي بالعلاقة الرياضية:

$$J = J_n + J_p = (n\mu_n + p\mu_p)e\vec{E} \qquad (12\text{-}4)$$

وأما الناقلية *conductivity*، فترتبط بكثافة التيار بالعلاقة الرياضية:

$$J = \sigma\vec{E} \qquad (12\text{-}5)$$

$$\boxed{\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e} \qquad (12\text{-}6)$$ (علاقة الناقلية بكثافة التيار)

وإذا كان شبه الموصّل نقياً فإن:

$$n = P = n_i$$
$$\sigma = (\mu_n + \mu_p)n_i e$$

وتتغير (n_i) تبعاً لتغير درجة الحرارة وفقاً لعلاقة التناسب الآتية:

$$n_i^2 \propto T^3 e^{-E_G/kT} \qquad (12\text{-}7)$$

---

(1) سبق لنا تعريف كثافة التيار الكهربائي في الفصل السابع من هذا الكتاب.

• • •

حيث إن (E_G) طاقة الفجوة المحظورة عند درجة حرارة الصفر المطلق.

وفي حالة الجيرمانيوم تتغير كثافة الناقلات وفقاً للعلاقة الرياضية الآتية:

$$n_i^2 = 3.1\times 10^{32} T^3 e^{-9101/T} \qquad (12\text{-}8)$$

أما في حالة السيليكون:

$$n_i^2 = 1.5\times 10^{33} T^3 e^{-14028/T} \qquad (12\text{-}9)$$

إنَّ تركيز كثافة الإلكترونات في شريط التوصيل يتغير مع تغير درجة الحرارة وفقاً للمعادلة:

$$\boxed{n = N_C\ e^{-(E_C - E_F)/kT}} \qquad (12\text{-}10)$$ (كثافة الإلكترونات في شريط التوصيل)

أما تركيز كثافة الفجوات فيتغير وفقاً للمعادلة:

$$\boxed{p = N_V\ e^{-(E_F - E_V)/kT}} \qquad (12\text{-}11)$$ (كثافة الفجوات)

حيث تمثل (N_C) الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في شريط التوصيل، أما (N_V) فتمثل الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في شريط التكافؤ، (E_C) طاقة الإلكترونات في شريط التوصيل، أما (E_F) فهي طاقة مستوى فيرمي *Fermi energy level*.

ولغرض المقارنة العامة بين كلٍ من الجيرمانيوم والسيليكون تأمل بعناية الجدول (1-12).

• • •

السيليكون *silicon*	الجيرمانيوم *germanium*	الخاصية *property*
2.33	5.32	الكثافة (g/cm^3)
12	16	النفاذية النسبية ε_r
5.00×10^{22}	4.4×10^{22}	عدد الذرات في (cm^3)
1.21 eV	0.785 eV	E_{GO}
1.10 eV	0.72 eV	E_G عند $(300°k)$
$1.50\times10^{10}/cm^3$	$2.5\times10^{13}/cm^3$	n_i عند $(300°k)$
$230\,k\Omega.cm$	$45\,\Omega.cm$	المقاومة النوعية $(300°k)$
$1300\,cm^2/V.s$	$3800\,cm^2/V.s$	μ_n
$34\,cm^2/s$	$99\,cm^2/s$	$D_n=\mu_n V_T$
$500\,cm^2/V.s$	$1800\,cm^2/V.s$	μ_p
$13\,cm^2/s$	$47\,cm^2/s$	$D_p=\mu_p V_T$
14	32	العدد الذري
28.1	72.6	الوزن الذري

الجدول (1-12) يبين الخصائص العامة لكل من الجيرمانيوم والسيليكون، وهما من أكثر المواد شبه الناقلة استخداماً

obeikandl.com

وفي حالة شبه الموصل النقي فإنَّ ($n = n_i = p$) وهذا يؤدي إلى الآتي:

$$N_C\ e^{-(E_C-E_F)/kT} = N_V\ e^{-(E_F-E_V)/kT}$$

أي أن طاقة مستوى فيرمي هي:

$$E_F = \left(\frac{E_C + E_V}{2}\right) kT\, ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \qquad (12\text{-}12)$$

وعندما تتساوى كل من N_V وN_C فإن هذا يؤدي إلى:

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} \qquad (12\text{-}13)$$

أي أن مستوى فيرمي يقع في منتصف الفجوة المحظورة.

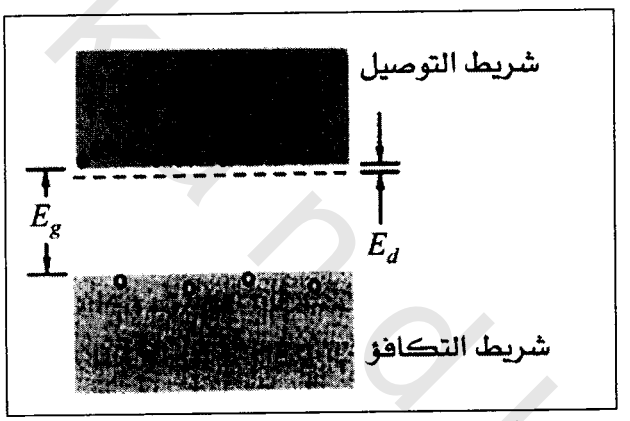
12-4 بلورة شبه الموصل من النوع السالب *n – Type Semiconductor*:

يمكننا عملياً الحصول على هذا النوع من البلورات وذلك عند تطعيم الجيرمانيوم أو السيليكون بذرات عنصر خماسي التكافؤ، أي أنه يمتلك خمسة إلكترونات تكافئية، وتقع مثل هذه العناصر (فوسفور، زرنيخ، أنتيمون، ...) في المجموعة الخامسة في الجدول الدوري إذ تتحد أربعة إلكترونات بروابط تساهمية مع الإلكترونات التكافئية الأربعة لكل من السيليكون أو الجيرمانيوم ويبقى الإلكترون الخامس زائداً حيث أن مقداراً صغيراً من الطاقة يكفي لانتقاله إلى حزمة التوصيل، وينشأ نتيجة لذلك مستوى طاقة جديد، قريب جداً من مستوى طاقة التوصيل في شبه الموصل، انظر الشكل (12-5)، يسمى بالمستوى المانح *donor level*، وينشأ نتيجة

obeikandl.com

لتجمع هذه الإلكترونات مجال كهربائي (E_d) يؤثر على خصائص البلورة الإلكترونية، انظر موقع المجال الكهربائي في الشكل (5-12).

إن مقدار الطاقة الفاصلة للمستوى المانح عن حزمة التوصيل في الجيرمانيوم تساوي ($0.01\ eV$)، أما في السيليكون فتبلغ ($0.04\ eV$)، ومن المناسب ذكره هنا، أن التيار الناتج في هذا النوع من البلورات يكون بسبب حركة الإلكترونات، ولذا سُميت (البلورة من النوع السالب)، وتكون الإلكترونات في هذه الحالة هي غالبية حاملات التيار.



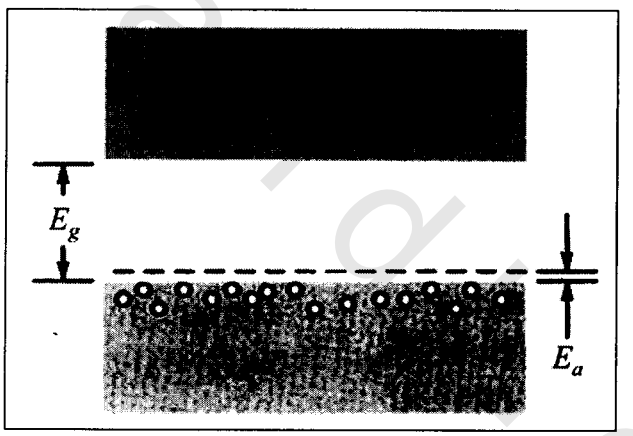
الشكل (5-12) بلورة من النوع السالب، ونرى المستوى المانح للطاقة، والذي تمثله النقاط السوداء وهو ما تشكله غالبية حاملات التيار (الإلكترونات)، بينما نرى النقاط المفرغة، وهي تمثل حاملات التيار الأقلية (الفجوات)

5-12 بلورة شبه الموصل من النوع الموجب *P – Type Semiconductor*:

يمكننا عملياً الحصول على هذا النوع من البلورات عند تطعيم الجيرمانيوم أو السيليكون بعناصر من المجموعة الثالثة، أي ثلاثية التكافؤ (الألمنيوم، البورون، الأنديوم، ...) إذ تقوم الإلكترونات التكافئية الثلاثة

• • •

بالارتباط بروابط مشتركة مع ثلاثة إلكترونات من الإلكترونات التكافئية الأربعة لكل من الجيرمانيوم أو السيليكون تاركة ثقوباً شاغرة، حيث تكون هذه الثقوب جاهزةً لاستقبال الإلكترونات التكافئية من ذرات شبه الموصل المجاورة لها تاركة ثقوباً جديدة في البلورة، لنحصل بعد ذلك على حركة عشوائية للثقوب، وبتطبيق مجال كهربائي ذي مقدار مناسب على البلورة تحدث حركة دائبة للثقوب، ينشأ عنها مستوى طاقة جديد، هو المستوى القابل للشحنات *acceptor level*، تأمل الشكل (6-12)، وبما أن الثقوب هي المسؤولة عن حركة التيار لذا سُميت هذه البلورات (بالبلورات من النوع الموجب).



الشكل (6-12) بلورة من النوع الموجب، وترى المستوى القابل للطاقة، والذي تمثله النقاط المفرغة وهو غالبية حاملات التيار في حزمة التكافؤ، بينما نرى النقاط السوداء (الإلكترونات) تمثل حاملات التيار الأقلية

إن مقدار الطاقة الفاصلة للمستوى القابل في الجيرمانيوم المطعم بالأنديوم يبلغ حوالي *(0.01eV)* أما في السيليكون المطعم بالأنديوم فيبلغ

حوالي $(0.16\,eV)$ ، ومن الممكن تسمية المستوى القابل (بالمستوى الآخذ) زيادة في الإيضاح.

مثال (12-1) *Example*

قطعة من الجيرمانيوم ذات مقطع مربع طول ضلعه $(1cm)$ ، تم تسليط جهد قدره $(1.5V)$ عبر سمكها البالغ $(0.25mm)$.

أوجد حسابياً مقدار التيار المار في القطعة علماً أن:

عدد الإلكترونات الحرة في المتر المكعب يساوي $(2\times10^{19}\ m^{-3})$ ، وتحركية الإلكترونات $(\mu_n = 0.36\ m^2/V.s)$ ، أما تحركية الثقوب $(\mu_p = 0.17\ m^2/V.s)$.

الحل *Solution*:

بتطبيق المعادلة (12-5) نجد أنَّ:

$$J = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{V}{d} = \frac{1.5V}{0.25\times10^{-3}m} = 6\times10^{3}V/m$$

$$\sigma = (\mu_n + \mu_p)n_i e$$

$$= (0.36 + 0.17)\times 2\times10^{19}\times1.6\times10^{19}$$

$$= 1.696(\Omega.m)^{-1}$$

$$J = 10176\ A/m^2$$

$$A = 1.0cm\times1.0cm = 10^{-4}m^2$$

$$\therefore I = AJ = 1.0176A$$

مثال (12-2) *Example*

تم تطعيم قطعة من الجيرمانيوم (*Ge*) في درجة حرارة الغرفة بشوائب موجبة *donors* بنسبة ($1 : 10^8$).

أوجد حسابياً مقدار المقاومة النوعية للجيرمانيوم (ρ) إذا علمت أن تحركية الثقوب ($\mu_p = 1800\,cm^2/V.s$) وتحركية الإلكترونات ($\mu_n = 3800\,cm^2/V.s$).

الحل *Solution*:

نحن نعلم من الفصل السابع في هذا الكتاب أن العلاقة الرياضية بين كل من المقاومة النوعية (ρ) والناقلية (σ) هي:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

إلا أن الناقلية وفقاً للمعادلة *(12-6)* هي:

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

إذاً، نحتاج لمعرفة مقدار كل من (*n*) و(*p*)، وهذا يحتاج بطبيعة الحال إلى معرفة كلٍ من الكثافة والوزن الذري للجيرمانيوم، وبالرجوع إلى الجدول (12-1) نجد أن:

كثافة الجيرمانيوم تساوي ($5.32\,gm/cm^3$)، ووزنه الذري يساوي (*72.6*).

obeikandl.com

من المعلوم لدينا أن العلاقة الرياضية بين عدد الناقلات لوحدة الحجوم (n) وعدد أفوكادرو (N_A) وكثافة المادة (d)[1] ووزنها الذري (A) هي:

$$\frac{n}{N_A} = \frac{d}{A}$$

وهكذا:

$$n_{Ge} = 6.02\times10^{23}\frac{atoms}{mole}\times\frac{1\,mole}{72.6\,gram}\times5.32\frac{gram}{cm^3}$$
$$= 4.41\times10^{22}\,cm^{-3}$$

كما أنَّ:

$$N_D = \frac{1}{10^8}\times4.41\times10^{22} = 4.41\times10^{14}\,atom/cm^3$$
$$n \cong N_D$$

ولكن بالنسبة للجيرمانيوم:

$$n_i = 2.5\times10^{13}\,cm^{-3}$$
$$\therefore p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(2.5\times10^{13})^2}{4.41\times10^{14}} = 1.42\times10^{12}\left(\frac{mole}{cm^3}\right)$$

وبما أن $p >> n$ نجد أن الناقلية:

$$\sigma \cong n\mu_n e$$
$$= 4.41\times10^{14}\times3800\times1.6\times10^{-19}$$
$$= 0.268(\Omega.cm)^{-1}$$
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 3.72\Omega.cm$$

---

(1) لاحظ أننا استخدمنا الحرف (d) هنا للتعبير عن الكثافة، وذلك لأننا استخدمنا (ρ) للتعبير عن المقاومة النوعية.

obeikandi.com

12-6 المقاومة الحرارية *Thermistor* :

إنَّ تغيُّر التوصيل الكهربائي في أشباه الموصلات بتغير درجات الحرارة من الممكن استثماره علمياً وذلك لصناعة مقاومات متغيرة بتغير درجات الحرارة، وهي ما نسميه "المقاومة الحرارية" *thermistor*، وهذه التسمية مشتقة من المسمى الإنكليزي *thermal resistor*، وأما تركيبتها، فتتكون من قطعة من شبه موصل نقي، يتصل بطرفيها سلكان للتوصيل الكهربائي. وفي المقاومة الحرارية من غير المفيد استخدام الجيرمانيوم أو السيليكون، ولكننا، نلجأ إلى استخدام الأكاسيد المعدنية، كأكسيد الحديد Fe_2O_2 وأكسيد النيكل NiO وأكسيد المنجنيز Mn_2O_3، إذ أن هذه الأكاسيد تمتلك معاملاً حرارياً سالباً *negative temperature coefficient (NTC)*، وذلك لتمييزها عن المقاومات الحرارية ذات المعامل الحراري الموجب *positive temperature coefficient (PTC)*. إنَّ السبب في استخدام هذه الأكاسيد، هو أن مقاومتها تتناقص كلما زادت درجات الحرارة، ومعامل توصيلها الحراري أكبر من معامل التوصيل الحراري للمعادن. أما في درجة حرارة الغرفة فإن مقدار معامل التوصيل الحراري لهذه المواد يساوي تقريباً *(– 0.04 W/m.k)*، أي أن زيادة درجة الحرارة من *(200°C – 0°C)* يؤدي إلى تقليل المقاومة حوالي *(500)* مرة، بينما لا تزاد المقاومة في المعادن في مجال تغيّرات درجات الحرارة نفسه إلى أكثر من ضعف مقدارها عند درجة حرارة الغرفة. وتستعمل المقاومة الحرارية على نطاق واسع في الدوائر الإلكترونية لتنظيم عملها ضمن مجال تغير درجات الحرارة المتوقع، كما تُستخدم للتحكم الحراري في الأجهزة الخاصة بالقياسات الحرارية، إذ أنها تستخدم

obeikandl.com

للكشف عن تغيُّرات في درجات الحرارة يقل مقدارها أحياناً عن ($5 \times 10^{-4}°C$)، كما أنها تستخدم في قياس القدرة في أجهزة الموجات الدقيقة المايكروية *microwave* وتسمى في هذه الحالة *bolometer*.

12-7 وصلة[1] *(p-n) Junction (p-n)*:

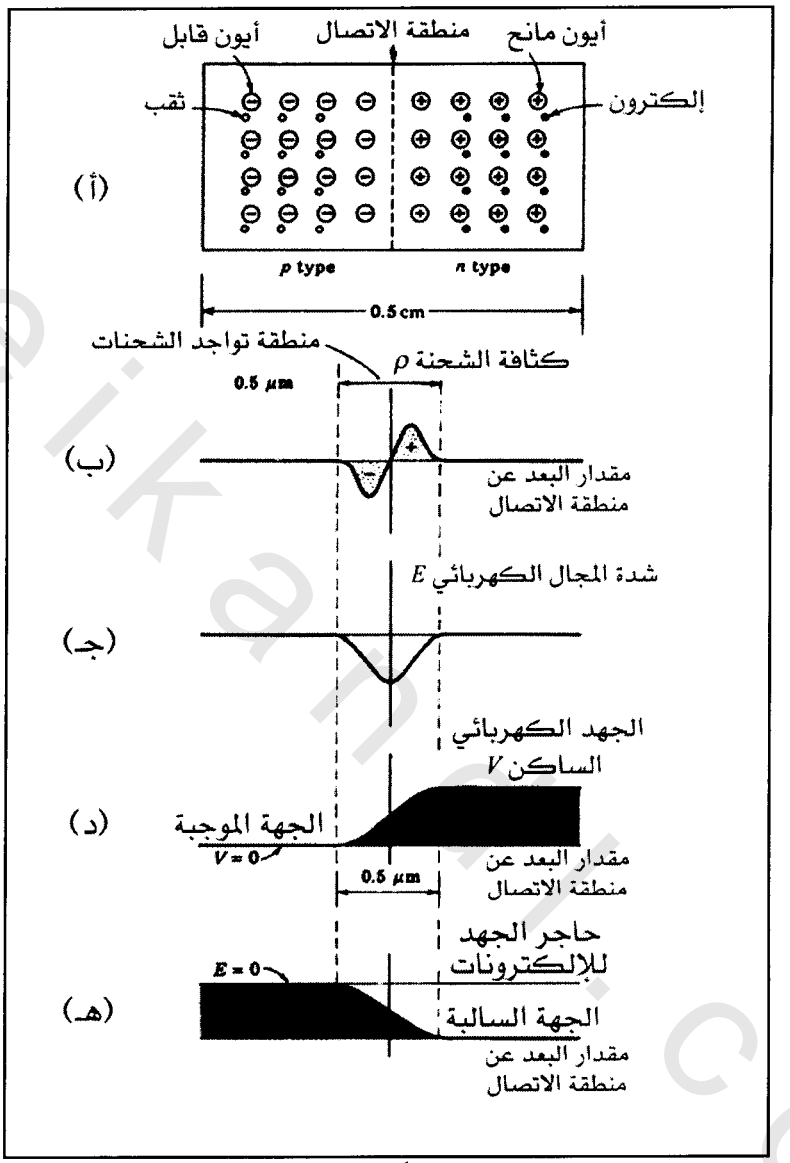
تأمل الشكل (7-12) حيث ترى مقطعاً عرضياً لوصلة بلورتين *(p-n)*، طُعمت اليمنى بشوائب مانحة *positive type crystal*، وطُعمت اليسرى بشوائب قابلة *negative type crystal*، كما أنك ترى الحد الواصل بينهما. ولو تمعنت أكثر فأكثر في الشكل تجد أننا أشرنا إلى الأيونات المانحة بدوائر تحتوي علامة ⊕، بينما أشرنا إلى الأيونات القابلة بدوائر تحتوي بداخلها علامة ⊖، وهذا يُفسر المعنى الصحيح للمانح والقابل وذلك بتبرع المانح بإلكترون واستقبال القابل لهذا الإلكترون.

والسؤال الآن: ما الذي يحدث في وصلة *(p-n)* بعد ذلك؟

لتبسيط الإجابة عن هذا السؤال، لاحظ بدايةً أن عدد الأيونات الموجبة في الجهة اليمنى (البلورة السالبة) يساوي عدد الإلكترونات التي أطلقتها، ومعنى هذا كهربائياً أن الشحنة الكهربائية في البداية تكون متعادلة في البلورة الواحدة، ويحصل مثل ذلك في الجهة اليسرى (البلورة الموجبة) وذلك أن عدد الثقوب والأيونات السالبة متعادل أيضاً. وبسبب الطبيعة الكهربائية للبلورتين نجد أن كثافة الثقوب في الجهة اليسرى أكبر مما عليه في الجهة اليمنى،

(1) وصلة *(p-n)* هي ما نطلق عليه في اللغة العربية "الثنائي شبه الموصل".

• • •



الشكل (7-12 أ، ب، ج، د، هـ) يبين مخططاً لوصلة (*p-n*)، يشتمل على كثافة الشحنة، شدة المجال الكهربائي، حاجز الطاقة الكامنة، المنحنى (د) يتناسب مع الطاقة الكامنة للفجوات، (هـ) يتناسب مع الطاقة الكامنة للإلكترونات

obeikandl.com

مما يؤدي إلى انتشار *deffusion* بعض الإلكترونات إلى الجهة اليسرى، وبعض الثقوب إلى الجهة اليمنى عبر منطقة الوصلة، وهكذا بعد أن تكتمل العملية، نجد أنّ مجالاً كهربائياً *(E)* قد نشأ في منطقة الوصلة يزداد مقداره إلى الحد الذي يمنع انتشار أيٍ من الشحنات الأخرى نحو الطرفين، تسبب هذه العملية في نشوء منطقة جديدة عند حدود الوصلة *(p-n)* الداخلية، تكون خاليةً من كلٍ من الإلكترونات والثقوب، نطلق عليها منطقة الاستنزاف *depletion region*، ويتراوح سمك هذه المنطقة من (*1μm*) إلى بضع ميكروميترات).

ولمتابعة هذه العملية في منطقة الوصلة *(p-n)* تأمَّل الشكل (7-12 ب) وكذلك الشكل (7-12 ج) لترى كيف تتغير شدة المجال الكهربائي عند منطقة الوصلة، وهذا ما يفسِّر وجود جهد كهربائي يحول دون مرور ثقوب أخرى، لاحظ الشكل (7-12 د)، كما تلاحظ وجود جهد آخر يحول دون مرور إلكترونات أخرى، لاحظ الشكل (7-12 هـ)، يسمى هذا الجهد بالجهد الحاجز *barrier potential*. ومن الواضح أن هذا الجهد يشابه منحدراً مائلاً نحو الأسفل يصعب تسلقه *potential hill* باتجاهين متعاكسين أحدهما يعيق مرور الثقوب والآخر يعيق مرور الإلكترونات، أما مقداره العددي فيساوي بضعة أعشار من الفولت. إنَّ هذا التفسير الإلكتروني لما حدث في منطقة الوصلة يعتبر أساساً هاماً لدراسة خصائص الفولتية والتيار في دائرة الثنائي البلوري، وهذا ما سوف نراه في الفقرة القادمة.

12-8 خواص الثنائي البلوري *Crystal Diode Characterstics*:

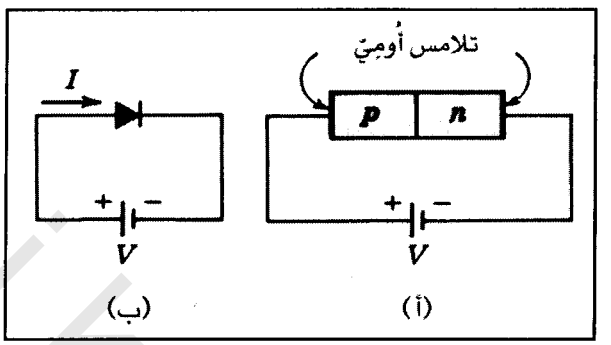
من خلال دراستنا في الفقرة (7-12) تبيّن لنا أن وصلة *(p-n)* هي عبارة عن (الثنائي البلوري)، ذلك أنّه يتكون من بلورتين اثنتين الأولى من النوع *(p)* والثانية من النوع *(n)*. والثنائي البلوري يُعتبر أحد أهم مكونات الدوائر الإلكترونية، وأهميته تتمثل في كونه لا يسمح بمرور التيار الكهربائي إلا في اتجاه واحد، ومن الناحية العملية يمكننا أن نستخدم الثنائي البلوري بطريقتين يعتمد كل منهما على كيفية توصيل فرق الجهد المطلوب لتشغيل الثنائي البلوري بكلتا بلورتيه.

12-8-1 الاستخدام الأول (الانحياز الأمامي *Forward Biased*):

ويحدث ذلك عند ربط القطب الموجب للبطارية بالبلورة الموجبة، وربط قطبها السالب بالبلورة السالبة، انظر الشكل (8-12). إن أهمية هذا الاستخدام تتمثل في خفض مقاومة الثنائي، من خلال تخفيض مقدار الجهد الحاجز على حساب تضاؤل منطقة الاستنزاف مما يؤدي إلى تسهيل مرور حاملات التيار الأغلبية *majority carriers* حيث تعبر الإلكترونات نحو القطب الموجب للبطارية، كما تعبر الثقوب نحو القطب السالب لها وهذا ما يفسر مرور التيار الكهربائي، ويقال حينئذ بأن الثنائي منحاز انحيازاً أمامياً *forward biased*، وتأخذ مقاومة الثنائي هذه التسمية إذ يطلق عليها مقاومة أمامية *forward resistance*، ومن الملاحظ أن لفرق الجهد المطبق من خلال البطارية تأثيراً مباشراً على انحياز الثنائي، إذ يُعتبر انحيازه مثالياً عندما تقترب مقاومته من الصفر، وذلك ما يحدث عندما يتساوي فرق جهد البطارية

obeikandl.com

مع فرق الجهد الحاجز، ولقياس قيمة التيار المار، لا بد من توصيل مقاومة على التوالي مع الثنائي البلوري.

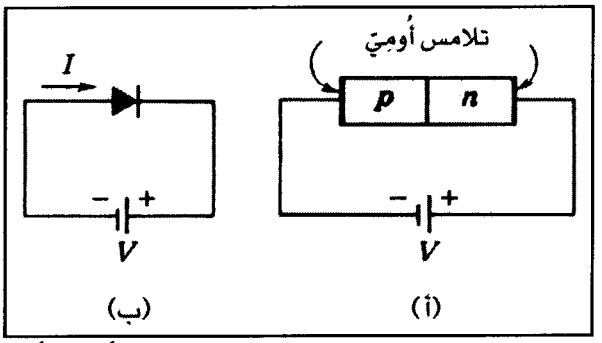


الشكل (8-12) يبين ثنائي (*p-n*) منحاز انحياز أمامي، كما يوضح الرمز المعتمد للثنائي في الدوائر الإلكترونية

12-8-2 الاستخدام الثاني (الانحياز العكسي *Reverse Biased*):

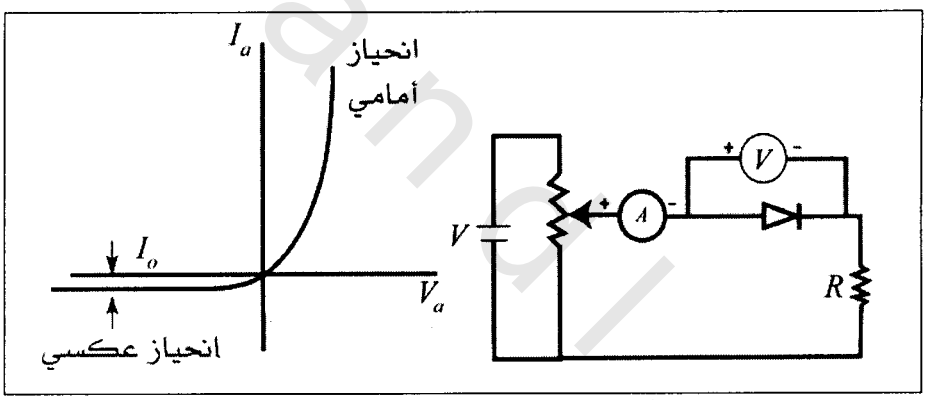
ويحدث ذلك عند ربط القطب السالب للبطارية بالبلورة الموجبة، وربط قطبها الموجب بالبلورة السالبة، انظر الشكل (9-12).

إنّ أهمية هذا الاستخدام تتمثل في زيادة مقاومة الثنائي البلوري، من خلال زيادة مقدار الجهد الحاجز على حساب اتساع منطقة الاستنزاف مما يؤدي إلى صعوبة مرور ناقلات التيار، إذ أن الثقوب -وهي الغالبية- تنجذب نحو قطب البطارية السالب والإلكترونات تنجذب -وهي الأقلية- نحو القطب الموجب، وهذا يؤدي إلى ابتعاد كلا النوعين من ناقلات التيار عن منطقة الوصل، حتى يكاد التيار المار يكون صفراً، وتسمى المقاومة عادةً بنوع الانحياز، فهي في هذه الحالة "مقاومة عكسية *reverse resistance*" ويصل مقدارها الـ"ما لا نهاية" عندما يكون الثنائي مثالياً.



الشكل (9-12) يبين ثنائي (p-n) منحاز انحيازاً عكسياً، كما يوضح الرمز المعتمد للثنائي في الدوائر الإلكترونية

وبهدف تقريب عمليتي الانحياز الأمامي والعكسي للثنائي البلوري، تأمل الشكل (10-12).

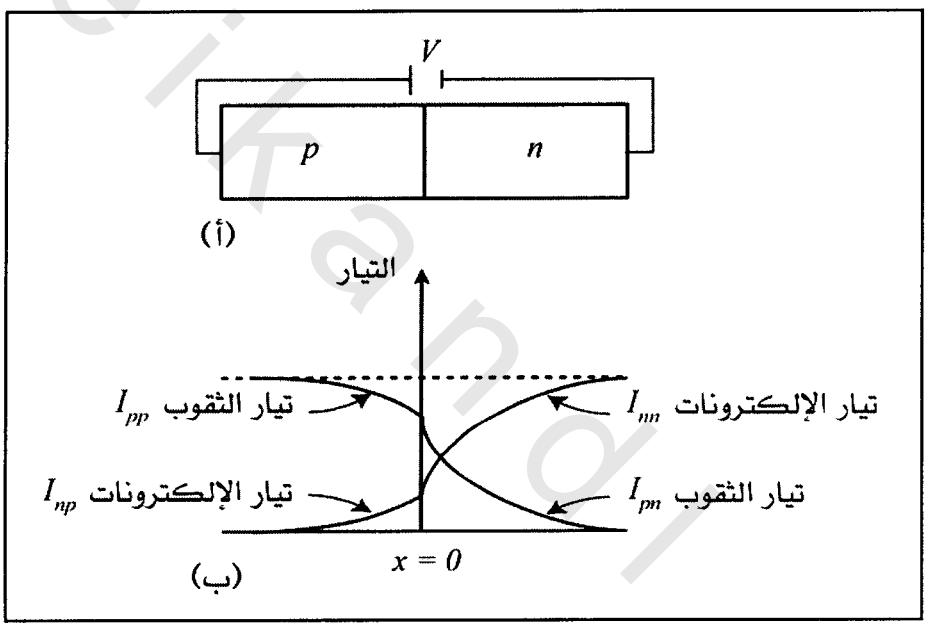


الشكل (10-12) دائرة الثنائي البلوري – خواص الفولتية – التيار (I-V) للثنائي البلوري

ففي الشكل تجد الدائرة التي يمكننا استخدامها عملياً لدراسة خصائص الثنائي البلوري من خلال معرفة مقداري كلٍ من فرق الجهد بين طرفيه (V_a) والتيار المار خلاله (I_a) وذلك بتغيير فرق الجهد بصورة تدريجية (V)، كما تلاحظ خصائص الانحياز الأمامي (V_a)(I_a) في الربع الأول،

وخصائص الانحياز العكسي ($-I_a$, $-V_a$) في الربع الثالث، حيث تلاحظ ضآلة مقدار التيار المار.

وقبل أن نبيّن الخواص الفعلية للثنائي البلوري، تلك التي تظهر عند وجوده في دائرة إلكترونية، لابد لنا من أن نحدد مختلف مركبات التيار التي تساهم في مرور التيار الكلي. ولهذا الغرض تأمل الشكل (11-12).



الشكل (11-12) مركبات التيار في الثنائي البلوري

يبيّن الشكل (11-12 أ) ثنائياً بلورياً منحازاً انحيازاً أمامياً، وهذا واضح من خلال طريقة التوصيل مع مصدر فرق الجهد (V)، وفي هذه الحالة مثلما مر معنا في الاستخدام الأول للثنائي البلوري، سوف تنساق الإلكترونات -وهي الحاملات الأغلبية للتيار- نحو الجهة الموجبة لتصبح حاملات أقلية للتيار تنتشر مبتعدة عن منطقة الوصلة ويتضاءل تركيزها في هذه المنطقة

نتيجة لالتحامها مع الثقوب، وهذا ما يمثله في الشكل (11-12) التيار (I_{nn}) في الجهة السالبة، بينما يمثله التيار (I_{np}) في الجهة الموجبة منه.

ولكن لا بد أن نتذكر بأن التيار الناتج من حركة الإلكترونات يزامنه تيار آخر ناتج عن حركة الثقوب -وهي التي تمثل الحاملات الغالبية- في الجهة الموجبة والتي سوف تتحرك إلى الجهة السالبة وتبدو كحاملات أقلية للتيار تلتحم مع الإلكترونات السالبة أثناء عملية انتشارها، ويمثل التيار (I_{pp}) تيار الانسياق الناتج عن الثقوب في الجهة الموجبة، بينما يمثل التيار (I_{pn}) تيار الانتشار الناتج في الجهة السالبة، ومن الجدير بالذكر أن سلوك كلٍ من الثقوب والإلكترونات لا يختلف، بينما يختلف منسوب التطعيم في البلورتين، وهذا ما بيناه في الفقرتين (4-12) و(5-12)، وعليه فإن كلاً من (I_{np}) و (I_{pn}) ليسا متساويين، أي أن:

$$I_{pn} \neq I_{np} \qquad (12\text{-}14)$$

والتيار الكلي الموضح في الشكل (11-12 ب)، هو عبارة عن مجموع تيار الانتشار الناتج عن الحاملات الأقلية والتيار الناتج عن الحاملات الأغلبية، وحيثما كان موقع النقطة (x) فإن التيار الكلي المار يعبّر عنه بالمعادلتين:

$$I = I_{pp} + I_{np} \qquad (12\text{-}15)$$

$$I = I_{nn} + I_{pn} \qquad (12\text{-}16)$$

وما تفيده هاتان المعادلتان أن التيار الذي يدخل الجهة الموجبة ناتج عن حركة الثقوب، والتيار الذي يخرج من الجهة السالبة ناتج عن حركة الإلكترونات، ويعرف التيار (I) الكلي في هذه الحالة بالتيار ذي القطبين *bipolar current*. وأما بالنسبة للانحياز العكسي وهو ما أوردناه في الاستخدام

obeikandl.com

الثاني للثنائي البلوري فإن التيار الكلي يشبه تماماً حالة الانحياز الأمامي، إلا أن الفرق الجوهري هو أن مركبات التيار تتحرك باتجاه معاكس، كما أنّ مقدار أي من تلك المركبات أقل بكثير مما هو عليه في الانحياز الأمامي.

ولمعرفة التيار الذي يمر عبر الثنائي البلوري عندما يخضع لتأثير فرق جهد *porential difference* مقداره (V)، لا بد من تحديد نوعية المادة شبه الموصلة *semiconductor* المستخدمة في صناعة الثنائي، ومعرفة تيار التشبع العكسي، وهو التيار الصغير الذي يمر عند إعادة الالتحام بين الثقوب والإلكترونات، ولنرمز له بالرمز (I_o) وهو لا يتأثر بفرق الجهد (V) ولكن لدرجة الحرارة تأثير مباشر على مقداره، حيث يزداد مقداره بازدياد درجة الحرارة ويرافق ذلك نقصان ملحوظ في مقدار مقاومة الثنائي البلوري، ويمكننا التعبير رياضياً عن التيار المار خلال الثنائي البلوري بالمعادلة:

$$I = I_o\left[exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1\right] \qquad (12\text{-}17)$$

حيث إن:

(V_T): الفولت المكافئ للحرارة *volt equivalent of temp* ويساوي ($0.026\ V$) في درجة حرارة الغرفة.

(V): فرق الجهد المسلط بين طرفي الثنائي البلوري.

(η): معامل عددي، يساوي (1) في الجيرمانيوم، و(2) في السيليكون، وعلى سبيل المثال عندما يكون الثنائي مصنوعاً من الجيرمانيوم

وفي حالة انحياز أمامي، ويكون فرق الجهد ($V > 0.1\ volt$) فإن المعادلة (12-17) في درجة حرارة الغرفة[1] تأخذ الشكل:

$$I = I_o\ [exp\ (39\ V)] \qquad (12\text{-}18)$$

ونجد أن المقدار (1) الذي ظهر في المعادلة (12-17) قد اختفى وذلك أن المقدار [$exp(39V)$] سوف يكون كبيراً جداً قياساً بالمقدار (1). أما عندما يكون الثنائي البلوري منحازاً انحيازاً عكسياً وتحت تأثير فرق جهد يزيد مقداره عن (V_T) فإن المعادلة (12-17) تأخذ الشكل:

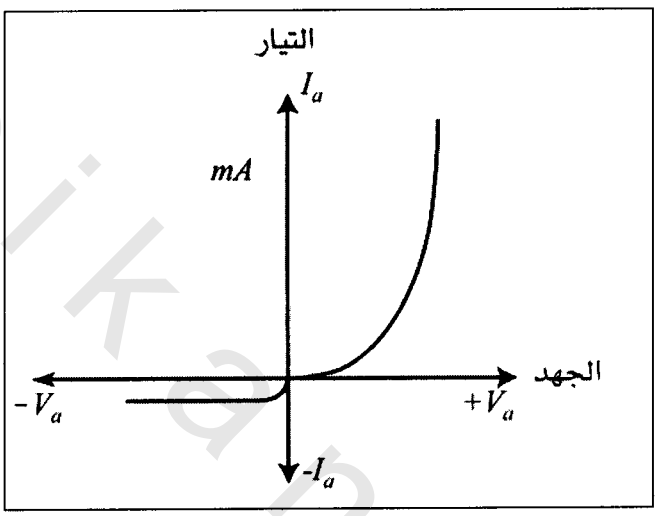
$$I \cong -I_o \qquad (12\text{-}19)$$

ويمكن ملاحظة ضآلة مقدار التيار المار في الاتجاه العكسي بالنسبة لمقداره خلال مرحلة الانحياز الأمامي من خلال ملاحظة وتأمل الشكل (12-12).

ولكلٍ من أشباه الموصلات المعروفة على نطاق واسع -وهما الجيرمانيوم (*Ge*) والسيليكون (*Si*)- استخداماتها المعتمدة على الخواص الذاتية لكل منهما، ففي الجيرمانيوم يكون جهد القطع *cutin voltage* في درجة حرارة الغرفة ($0.2\ volt$)، أي أن التيار لا يمر عبر الثنائي المصنوع من مادة الجيرمانيوم إلا بعد أن يزيد مقدار الجهد المسلط عليه عن هذا المقدار، بينما يساوي جهد القطع في حالة السيليكون ($0.6\ volt$)، وهذا يشير إلى أن جهد القطع يزيد بحوالي ($0.4\ volt$) عنه في الجيرمانيوم، ولا بد من أخذها بعين الاعتبار عند الاستخدامات العملية، أما سبب هذا الفرق فيعود إلى الفرق في

(1) عوض عن ($\eta = 1$) وعن ($V_T = 0.026$) في المعادلة **(12-17)** كي تتأكد أنك ستحصل على المعادلة **(12-18)**.

تيار التشبع العكسي (I_o)، فعلى سبيل الإيضاح يقاس هذا التيار بوحدات الميكروأمبير في حالة الجيرمانيوم، بينما يقاس بالنانوأمبير في حالة السيليكون.



الشكل (12-12) مقارنة مقداري التيار في الاتجاهين الأمامي والعكسي للثنائي البلوري

إن الحديث عن التيار المار عبر الثنائي البلوري يؤكد ضرورة الانتباه إلى درجة الحرارة، ذلك أن لها تأثيراً واضحاً على خواص الثنائي البلوري *(I-V) characteristics*، وهي من المساوئ المصاحبة لاستخدام مثل هذه الثنائيات، ولذا لابد من الحفاظ على درجة الحرارة ثابتةً في المحيط الذي تعمل به هذه الثنائيات بهدف الحفاظ على وظائفها المطلوبة. إن السبب في ذلك يعود إلى التغيرات الواضحة في مقدار تيار التشبع العكسي، ففي الجيرمانيوم تسبب كل ثمان درجات مئوية مضاعفة لمقدار التيار (I_o) أما في السيليكون فإن هذا التيار يتضاعف لكل خمس درجات مئوية، وعادة يستخدم السيليكون في درجات الحرارة العالية وذلك لصغر مقدار تيار التشبع

العكسي (I_o). وليست الزيادة مقتصرة على تيار التشبع العكسي أثناء ارتفاع درجات الحرارة، بل التيار الأمامي أيضاً يعاني هو الآخر من الزيادة، إلا أن نسبتها تقل كثيراً عن النسبة في زيادة تيار التشبع العكسي.

وبصفة عامة يمكن إعادة صياغة المعادلة (12-17) على الشكل الآتي:

$$I \cong I_0\left[exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right)\right] \qquad (12\text{-}20)$$

وذلك لمعرفة الزيادة التي تسببها زيادة درجة الحرارة في كلٍ من تيار التشبع العكسي، والتيار الأمامي، فلو اعتبرنا أن فرق الجهد (V) يبقى ثابتاً خلال تغير درجة الحرارة، نستطيع إيجاد المشتقة الأولى[1] للمعادلة (12-20) بالنسبة لدرجة الحرارة (T) وبعد أن نعوض عن (V_T) بما يساويها (kT) وذلك على النحو الآتي:

$$\frac{dI}{dT} = \frac{dI_o}{dT}\left[exp\left(\frac{V}{\eta kT}\right)\right] - \frac{VI_o}{\eta kT}\left[exp\left(\frac{V}{\eta kT}\right)\right] \qquad (12\text{-}21)$$

إن الارتفاع الحاصل في درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة ملحوظة في التيار المار عبر الثنائي البلوري، كما يؤدي إلى تغير الجهد عبر طرفي الثنائي، ولدراسة هذا التغير نقوم بتثبيت مقدار التيار في الاتجاه الأمامي، ثم نحسب المقدار التفاضلي (dV/dT)، الذي يعبّر عن تغير الجهد عبر الثنائي بتغير درجة الحرارة، وعلى سبيل المثال عندما يكون جهد القطع في الجيرمانيوم ($0.2\,volt$) فإن هذا التغير يساوي:

(1) يحتاج المدرس إلى توضيح طريقة إيجاد مشتقة التابع الأسي ***exp(x)***، تسهيلاً على الطلبة.

• • •

$$\frac{dV}{dT} = -2.1 mV / ^\circ C$$

بينما عند جهد القطع *(0.6 volt)* في السيليكون فإن:

$$\frac{dV}{dT} = -2.3 mV / ^\circ C$$

وعلى وجه العموم ونظراً لكون النسبتين قريبتين من بعضهما البعض، فإن المقدار المعتمد عملياً في الاستخدامات العملية للترانزستور *transistor* – الثلاثي البلوري المعروف والشائع الاستعمال- هو *(0.25 mV / °C)* والإشارة السالبة تعني انخفاض مقدار الجهد بازدياد درجة الحرارة.

أما الجانب المتبقي في هذه الدراسة فهو مقاومة الثنائي البلوري، وهنا لابد لنا من أن نميز بين مقاومة الثنائي المستقرة *static resistance*، وهي النسبة بين فرق الجهد المار عبر الثنائي والتيار المار فيه (قانون أوم)، ونصفها رياضياً بالعلاقة المعروفة:

$$R = \frac{V}{I} \qquad (12\text{-}22)$$

إنَّ مقاومة الثنائي البلوري المستقرة تتغير من نقطة إلى أخرى نظراً لتغير كلٍ من الفولتية والتيار المار خلاله، أما المقاومة الأخرى، فهي المقاومة الحركية *dynamic resistance* ونعبِّر عنها رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$\boxed{r = \frac{dV}{dI}} \qquad (12\text{-}23)$$ (تعريف المقاومة الحركية)

إن هذه المقاومة يمكن تحديدها عند أي نقطة على الخط البياني لخصائص الفولتية والتيار للثنائي *characteristics* $(I_a - V_a)$ ذلك بحساب مقلوب الميل *slope* عند تلك النقطة.

وفي حالة الانحياز الأمامي للثنائي يمكننا حسابها من العلاقة الرياضية:

$$I \cong I_o\ e^{39V}$$

$$\frac{I}{r} = \frac{dI}{dV} = (I_o\ e^{39V})(39)$$

$$= I39$$

$$\therefore r = \frac{1}{39I}$$

أما إذا اعتمدنا التيار وفقاً للعلاقة:

$$I \cong I_o\ e^{\left(\frac{V}{\eta V_T}\right)}$$

فإن المقاومة الحركية تكون على الشكل الآتي:

$$\frac{1}{r} = \frac{dI}{dV} = \left(I_o\ e^{\left(\frac{V}{\eta V_T}\right)}\right)\left(\frac{1}{\eta V_T}\right)$$

$$= I\left(\frac{1}{\eta V_T}\right)$$

$$r = \frac{\eta V_T}{I} = \frac{0.026}{I}\Omega$$

وهذا عندما تكون $(\eta = 1)$ في حالة الجيرمانيوم، أما في حالة السيليكون فإن $(\eta \cong 2)$ فتصبح مقاومة الثنائي الحركية على النحو الآتي:

$$r = \frac{0.052}{I}\Omega$$

obeikandl.com

وفي الأغراض التطبيقية يتم اعتماد خواص الثنائي البلوري في الاتجاه الأمامي بسبب التشابه الكبير مع خواص الثنائي المثالي والذي يقوم بالتوصيل تماماً عندما ينحاز انحيازاً أمامياً، ومعنى ذلك أن الفولتية تكون مساوية للصفر مهما كان مقدار التيار الأمامي، كما أن الثنائي يكون عازلاً تماماً في الاتجاه العكسي، بمعنى أن التيار المار يبقى مساوياً للصفر مهما كان مقدار الفولتية، وهذا غير ممكن عملياً ولذا أطلقت عليه هذه التسمية (الثنائي البلوري المثالي).

ومن المعارف الأولية للطالب أن يكون مطلعاً على مفهوم الفولت المكافئ للحرارة *volt equivelant of temperature* وذلك كي يَسهُل عليه استيعاب مفهوم الجهد الحاجز في الثنائي البلوري وإجراء العمليات الحسابية الخاصة به. إنَّ هذا المفهوم الهام قدَّم له العالم أنيشتين في معادلته المعروفة التي تربط بين كلٍ من ثابت الانتشار سواء للثقوب أو الإلكترونات وثابت الحركية لهما، وهما مفهومان ليسا مستقلين عن بعضهما البعض في عملية الانتشار، وذلك بالصيغة الرياضية الآتية:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T$$

$$V_T = \frac{\bar{k}\,T}{e} = \frac{1.6\times10^{-19}\;k\,T}{e}$$

$$= \frac{(1.6\times10^{-19}\,C)(8.620\times10^{-5}\,eV/K)}{(1.6\times10^{-19}\,C)}$$

$$= \frac{T}{11600}$$

فعند درجة حرارة الغرفة مثلاً $(T = 300\,K)$ نجد أنَّ:

• • •

$$V_T = \frac{300}{11600} = 0.26$$

وكما لاحظنا فإن أهميته تظهر جليةً في حساب كلٍ من تيار الانحياز الأمامي والانحياز العكسي في الثنائي البلوري، كما تظهر أهميتها مرةً أخرى عند حساب مقدار الجهد الحاجر في الثنائي البلوري أيضاً، ومن المفيد أن يتعلم الطالب استخدام الصيغة الرياضية المعتمدة لذلك، إنَّ الصيغة الرياضية التي يمكننا استخدامها الحساب مقدار الجهد الحاجر هي:

$$V_o = V_T \ \ell n \frac{n_n}{n_p} \qquad (12\text{-}24)$$

حيث إن:

(n_p) تساوي عدد الفجوات الموجبة عند التوازن الحراري.

(n_n) تساوي عدد الإلكترونات عند التوازن الحراري أيضاً.

12-9 أنواع الثنائيات البلورية واستخداماتها العملية[1]

Crystal Diodes And Their Applications:

إن خواص الثنائي البلوري التي تشير بشكل واضح إلى أن العلاقة بين كلٍ من الفولتية المسلطة عليه والتيار المار خلاله، ليست خطية، وهذه الخاصية جعلته متعدد الاستخدامات العملية، مثل: مقوم الفولتية *voltage rectifier* ومحدد الفولتية *voltage clipper*، ومضاعف الفولتية

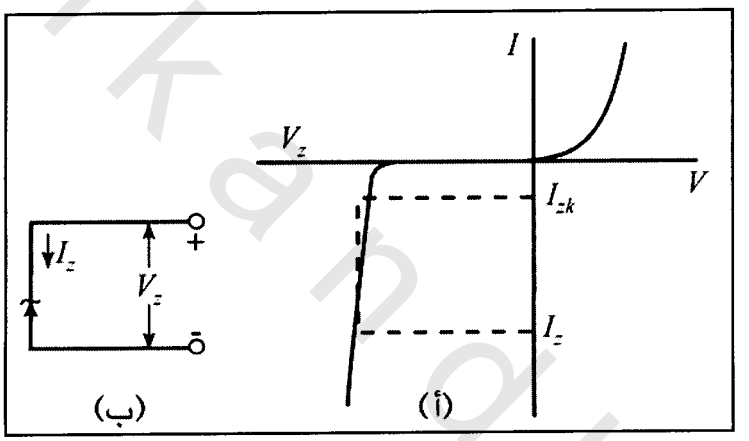
(1) لقد خصصنا هذه الفقرة لغرض الاطلاع فقط، حيث يمكن التعرف على الاستخدامات التطبيقية لعدد من الثنائيات البلورية.

• • •

voltage doubler، ومنظم الفولتية *voltage regulator*، كما هو الحال في ثنائي زينر *Zener diode*، وغير ذلك الكثير، وسنتناول في هذه الفقرة أهم أنواع الثنائيات البلورية واستخداماتها العملية.

12-9-1 ثنائي زينر *Zener Diode*:

وبهدف التعرف على هذا الثنائي تأمل الشكل (13-12) الذي يبين خصائص *characteristics (I-V)* لثنائي زينر في الاتجاهين الأمامي والعكسي.



الشكل (13-12) يبين خصائص التيار والفولتية في منطقة الانهيار لثنائي زينر، كما يبين الرمز المعتمد لثنائي زينر في الدوائر الإلكترونية

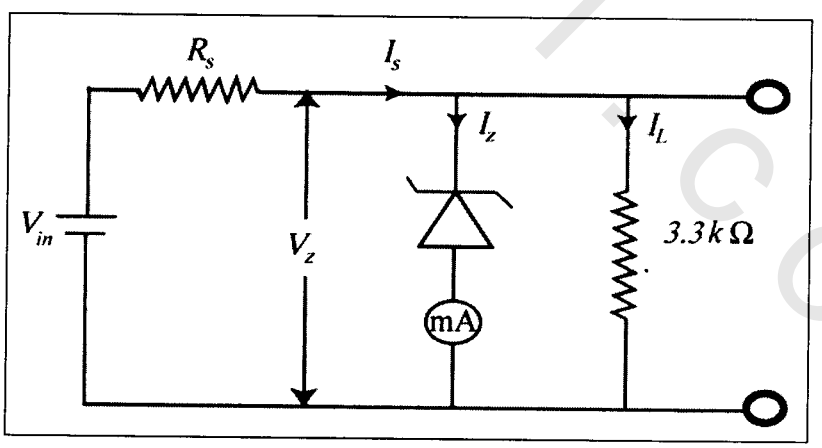
ببساطة شديدة نلاحظ أن هذه الخصائص في الاتجاه الأمامي لا تختلف عن خصائص الثنائيات البلورية الأخرى، كما يُلاحظ أن زيادة تيار الثنائي في منطقة الانهيار *deplesion area* تكون كبيرة جداً مقابل أية زيادة قليلة في الفولتية السالبة، وهذا يشير بوضوح إلى أن مقاومة الثنائي صغيرة جداً:

$$R_Z = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad (12\text{-}25)$$

لقد وُجد عملياً أن مقدار هذه المقاومة (R_Z) يتراوح بين ($2-50\Omega$)، كما يمكننا عملياً إيجاد جهد زينر *Zener voltage* وذلك بتحديد نصف القيمة لأعلى تيار يتحمله الثنائي، وهي عادة تتراوح بين (*2–200 volt*)، تبعاً لمقدار تركيز الشوائب في المواد شبه الموصلة المستخدمة في صناعته. وجهد زينر من الأرقام التي يجب معرفتها، كما أن معرفة مقدار القدرة *power* التي يستطيع الثنائي تحمُلها هي الأخرى هامة جداً، وعادة يتراوح مقدارها بين (*50 watt–200 m watt*)، وهكذا من الممكن حساب مقدار أعلى تيار يتحمله الثنائي من المعادلة:

$$I_m = \frac{P_m}{V_Z} \qquad (12\text{-}26)$$

ومن أهم الاستخدامات العملية لثنائي زينر، استخدامه كمنظم للفولتية *voltage regulator*، وذلك بربطه على التوازي *in parallel* مع مقاومة الحمل *load*، حيث تساوي الفولتية بين طرفيه مقدار الفولتية المارة عبر الثنائي، تأمل الشكل (12-14) حيث يبيِّن دائرة بسيطة تمَّ استخدام ثنائي زينر فيها كمنظم للفولتية.



الشكل (12-14) ثنائي زينر كمنظم للفولتية

• • •

تلاحظ في هذه الدائرة وجود المقاومة (R_S) والتي تعمل على حماية الثنائي من التلف وذلك في الحيلولة دون السماح للفولتية الداخلة بتجاوز مقدار جهد زينر (V_Z)، ويمكننا حساب مقدارها عددياً من المعادلة:

$$R_S = \frac{V_{in} - V_Z}{I_Z + I_L} \qquad (12\text{-}27)$$

حيث إن:

(V_{in}): هي الفولتية الداخلة من المصدر *input voltage*.

(V_z): هي فولتية زينر *Zener voltage*.

(I_z): التيار الداخل إلى الثنائي *Zener current*.

(I_L): التيار الداخل إلى الحمل *load current*.

12-9-2 الثنائي ذو المكثف المتغير *Varicap Diode*:

إن الحاجة الماسة عملياً إلى توليف دوائر الرنين *tuning of resonance circuits* ذات التردد العالي بطريقة كهربائية، من الممكن تلبيتها عن طريق هذا النوع من الثنائيات ذات السعة المتغيرة *varicap diode*، وتؤدي مهمتها هذه من خلال التحكم بمقدار الفولتية في الاتجاه العكسي، وذلك بعد معرفة مقدار السعة الكهربائية للثنائي قبل تطبيق هذا الجهد، ولقد وُجد عملياً وبصورة تقريبية أن:

$$C = \frac{C_o}{\sqrt{V}} \qquad (12\text{-}28)$$

حيث إن:

obeikandl.com

(C_o): هي سعة الثنائي قبل تسليط الفولتية.

(C): هي سعة الثنائي بعد تسليط الفولتية.

(V): الفولتية في الاتجاه العكسي.

وتؤدي الشحنات المتمركزة على الجهتين السالبة والموجبة وعلى طول الطبقة المتأينة للجهد الحاجز *barrier potential*، عمل المكثف ذي اللوحين المتوازيين، وهي تكافئ تماماً من الناحية العملية وظيفة المكثف ذي اللوحين المتوازيين في الدوائر الإلكترونية.

ومن الممكن عملياً تغيير سعة هذا المكثف عن طريق التحكم بالجهد العكسي بين واحد إلى بضع عشرات من البيكوفاراد، ويطلق عليه البعض اسم مكثف الانتقال *transition capacitor* والانتقال هنا بمعنى الانتقال من البلورات الموجبة *p-type* إلى البلورات السالبة *n-type* للثنائي.

أما في الانحياز الأمامي فيسمى هذا المكثف –مكثف الانتشار– أو الخزن *storage capacitor* ويصل مقدار سعته إلى بضع مئات بيكوفاراد، ويعبّر عنها بالعلاقة الرياضية:

$$C_D = \frac{\partial Q}{\partial t} \qquad (12\text{-}29)$$

ويتم توصيله عادة على التوازي مع المقاومة الأمامية الصغيرة للثنائي البلوري. ومن الجدير بالذكر أن استعمال هذا النوع من المكثفات البلورية يتم استبعاده تماماً في التطبيقات التي تتضمن الكشف أو التقويم *detection and rctification*، وخاصة في الدوائر المنطقية *logic circuits*.

obeikandl.com

12-9-3 الثنائي الضوئي *Photo Diode*:

يُعتبر استخدام الثنائي الضوئي أحد الاستعمالات المباشرة للاستفادة من الطاقة الضوئية باعتبار أن الضوء هو: أشعة كهرومغناطيسية *photo electromagnetic wave* تحمل طاقتها الفوتونات إلى إلكترونات حزمة التكافؤ *electrons of valance band* لتزيد من طاقتها ثم ترتقي بها إلى حزمة التوصيل، وبهذا يمكن الاعتماد على استخدام الضوء بهدف السيطرة على ناقلية *conductivity* المواد شبه الموصلة، وذلك باعتماد الثنائي الضوئي *photo diode* وهذا هو سبب التسمية.

وهناك نوعان من الثنائيات الضوئية:

12-9-3-1 ثنائي التوصيل الضوئي *Photoconductive Diode*:

إن من أهم الصفات التي يتمتع بها هذا النوع من الثنائيات، هي صغر حجمه وشدة حساسيته الضوئية، إضافة إلى كثرة استعمالاته في التطبيقات العملية، ونذكر منها تحويل رموز الطاقات المثقوبة *punch reach power* في الحاسبات الإلكترونية *electronic calculators* إلى إشارات كهربائية *electrical signals*، ويستخدم كذلك في كاشفات الضوء *light detectors*، وكذلك في تحويل إشارات الصوت *audio signals* في الأفلام السينمائية إلى إشارات كهربائية لغرض تكبيرها إلى نطاق ترددي يمكن سماعه.

أما التفسير العلمي لما يحدث داخل ثنائي التوصيل الضوئي فيعتمد أساساً على توصيل الثنائي في الاتجاه العكسي *reverse biased* من خلال التحكم بمقدار تيار التشبع العكسي، وذلك بالاستناد إلى الحقيقة التجريبية

obeikandl.com

التي تفيد بأن التيار الكهربائي الناشئ عن الإضاءة يتناسب طردياً مع شدة الإضاءة على وجه التقريب، حيث يؤخذ بعين الاعتبار في هذه الحالة التيار المنبعث بسبب زيادة درجة الحرارة، وهو ما يسمى بتيار الظلام *dark current*.

2-3-9-12 ثنائي الخلية الضوئية *Photovalic Diode*:

إن من أهم مميزات هذا النوع من الثنائيات هو استخدامها في تحويل الضوء إلى طاقة كهربائية عن طريق استخدام ما يسمى بالخلايا الشمسية *solar cells*، إذ يُعتمد عليها كثيراً في الأقمار الصناعية لذات الغرض حيث يتم توصيلها على نوعين:

1- على التوالي *in series* وذلك لزيادة جهدها الكهربائي.

2- على التوازي *in parallel* وذلك لزيادة قدرتها الكهربائية.

أما التفسير العلمي لما يحدث داخل ثنائي الخلية الضوئية فيعتمد على توليد قوة دافعة كهربائية عند تعريضه للضوء. والمسألة يتم تحديدها على أساس حساب ارتفاع الجهد الحاجز *barrier potential* قبل تعرض الثنائي للضوء، ثم دراسة تأثير القوة الدافعة الكهربائية على الحد من ارتفاع الجهد وبالتالي تمرير تيار كهربائي عن طريق توليد حاملات إضافية، كما أن المجال الكهربائي المتولد يزيد من انتقال الحاملات الأقلية في اتجاه المنحدر للجهد الحاجز مما يؤدي إلى زيادتها.

إن مقدار الزيادة في القوة الدافعة الكهربائية *electromotive force* يعادل مقدار النقصان الحاصل في الجهد الحاجز، وتصل هذه القيمة في السيليكون إلى *(0.5 volt)* وفي الجيرمانيوم إلى *(0.1 volt)*.

4-9-12 الثنائي باعث الضوء *Light Emitting Diode*:

إذا كانت الخلية الضوئية في الثنائي المسمى "ثنائي الخلية الضوئية" سابق الذكر يقوم بتحويل الضوء إلى طاقة كهربائية، فإن الحالة في الثنائي باعث الضوء تكون على العكس تماماً، إذ أن الثنائي باعث الضوء يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية "الإشعاعات الكهرومغناطيسية المنبعثة عند استرخاء الإلكترونات من طاقة أعلى إلى طاقة أقل"، إلى ضوء. وتحدث هذه الظاهرة عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً أمامياً *forward biased*، والأساس العلمي لذلك أن الطاقة التي تكتسبها كلٍ من حاملات الشحنة (الإلكترونات والفجوات) في كلا النوعين من البلورات *(P-type)* و*(n-type)* تعود إلى تحريرها عند عبورها لمستويات طاقة مختلفة أثناء حركتها، وتكون هذه الطاقة على شكل طاقة حرارية في ثنائيات الجيرمانيوم والسيليكون بينما تكون على شكل ضوء في ثنائيات زرنيخ الغاليوم *gallium arsenide*. أما تردد *frequency* الضوء المنبعث من الثنائي، فيساوي:

$$\boxed{f = \frac{E_G}{h}} \qquad (12\text{-}30)$$ (تردد الثنائي باعث الضوء)

حيث إن:

(E_G): هي طاقة الفجوة *energy gap* بين شريطي التكافؤ والتوصيل،

(h) ثابت بلانك *Plank's constant* ويساوي:

$$6.63 \times 10^{-34}\ J.s$$

$$4.14 \times 10^{-15}\ eV.s$$

كما يمكن معرفة الطول الموجي للضوء المنبعث باستخدام المعادلة المعروفة:

$$c = \lambda f$$

حيث:

(λ): هي الطول الموجي *wave length*.

(f): التردد *frequency*.

(c): سرعة الضوء $(c = 3 \times 10^8\ m/s)$ *light speed*.

وهكذا:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (12\text{-}31)$$

وفي حالة استخدام وحدة الإلكترون فولت *electron volt* لقياس الطاقة (E_G) فإن الطول الموجي (λ) يقاس بالمايكرون *micrometer*، ويمكننا أن نعبّر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\boxed{\lambda = \frac{1.24}{E_G}} \qquad (12\text{-}32)$$ (الطول الموجي للثنائي باعث الضوء)

ومن المناسب ذكره هنا أن هذا النوع من الثنائيات يسميه البعض: ثنائي مصباح الحالة الصلبة *solid state lamp*، كما أن الأحرف الثلاثة الأولى الكبيرة من التعبير الإنكليزي *light emitting diode*، أي *(LED)* هي الاختصار الشائع والمعروف لهذا النوع من الثنائيات.

obeikandl.com

إن لون الضوء المنبعث من الثنائي يختلف حسب المادة المستعملة لصناعة الوصلة (*p-n*)، ولبيان ذلك تأمل الجدول (2-9).

المادة المستعملة في صناعة الثنائي باعث الضوء	اللون الناتج *color*
1- زرنيخ الغاليوم *GaAs*	إشعاع ضوئي غير مرئي، دون الحمراء *infrared*
2- زرنيخيد فوسفيد الغاليوم *GaAsP*	اللون الأحمر أو البرتقالي *red or orange color*
3- فوسفيد الغاليوم *GaP*	اللون الأصفر أو الأخضر *yellow or green color*

الجدول (2-12)

وتعتبر الثنائيات المصنوعة من فوسفيد الغاليوم هي الأكثر شيوعاً، وذلك لمناسبة اللون الأخضر ذي الطول الموجي (*5500 A°*) وملائمته لإحساس العين البشرية.

والثنائيات المستخدمة في الحاسبات الإلكترونية لإظهار الرقم هي عبارة عن سبع قطع تمثل كل رقم من الأرقام *seven segment display* بناءً على مقدار التيار الكهربائي. كما يمكن استعمال مجموعة من الثنائيات على شكل مصفوفة *matrix* وذلك عندما تكون الحاجة قائمة لإظهار الأرقام والحروف والإشارات والرموز المتداولة، كما هو الحال في بعض أنواع الحاسبات الصغيرة.

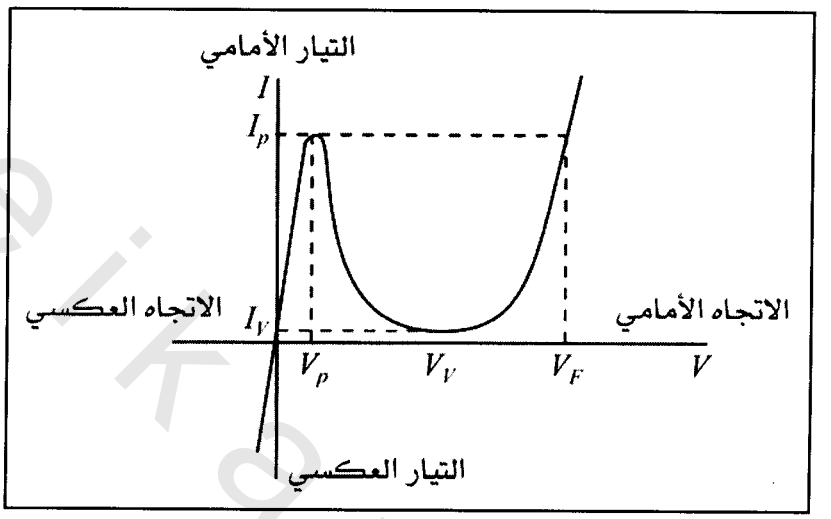
إن خواص هذه الثنائيات تشابه خواص الثنائي الاعتيادي، إلا أن فرق الجهد في انحيازها الأمامي يزيد عن واحد فولت.

12-9-5 الثنائي النفقي أو ثنائي إيزاكي *Tunnel Diode or Ezake Diode*:

يعود اكتشاف هذا النوع من الثنائيات إلى العام الميلادي 1957 على يد العالم *Ezaki*، إنَّ الدور الأساسي لهذا النوع من الثنائيات يمكن الحصول

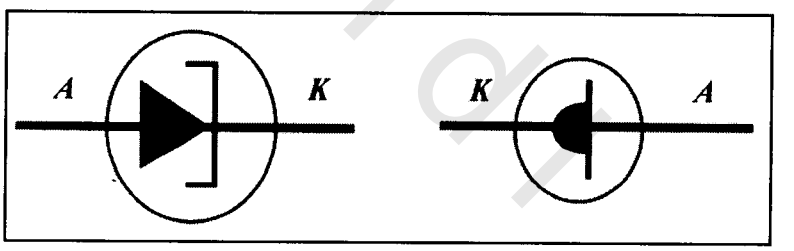
• • •

عليه عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً أمامياً، وبهدف توضيح عمله بشكل مبسط تأمل الشكل (15-12).



الشكل (15-12) خصائص الفولتية – التيار الثنائي بلوري نفقي (ثنائي إيزاكي)

(I-V) characteristics (p-n) Ezaki diode



الشكل (16-12) رمزان لثنائي إيزاكي في الدوائر الإلكترونية

ويُمثَّل ثنائي إيزاكي برسم خاص في الدوائر الإلكترونية لتمييزه عن إن مقداراً صغيراً من الفولتية في الاتجاه الأمامي كأن يكون *(0.1 volt)* أو *(0.2 volt)* كافٍ تماماً لإلغاء تأثير زينر، حيث يبدأ التيار بعد الانحياز الأمامي بالنقصان بعد فرق جهد مقداره *(V_p)*. وهنا تتجلى أهمية هذا الثنائي عملياً حيث يزداد فرق الجهد كما تلاحظ من الشكل (15-12) من المقدار

obeikandl.com

(V_p) إلى المقدار (V_V). ويرافق ذلك نقصان في مقدار التيار من المقدار (I_p) إلى المقدار (I_V) ، وبملاحظة الشكل تجد أن ميل الخط البياني في هذه المنطقة أصبح سالباً وهذا يفسر وجود مقاومة حركية سالبة *negative dynamic resistance* في هذه المرحلة، وتكمن أهميتها في توليد الترددات العالية وتكبيرها *generation and amplification of high frequencies* وهذه هي أهم الاستخدامات التطبيقية لثنائي إيزاكي، ومن المفيد أن نذكر هنا أن النظرية الكلاسيكية غير مناسبة لتفسير كل ما يجري في هذا النوع من الثنائيات إذ يُعتمد الميكانيك الكمي *quantum mechanics* لتفسير آلية عمل الثنائي.

ولعله من المفيد أن نذكر هنا أن الفرق الرئيس بين الثنائيات البلورية العادية وهذا الثنائي هو الفارق الكبير في نسبة التطعيم فهي من رتبة (1.10^8) في الثنائيات العادية بينما تكون $(1:10^3)$ في ثنائي إيزاكي، وهذا يؤدي إلى تقليص سماكة منطقة الاستنزاف لتصل إلى $(0.01\,\mu m)$ بدلاً من حوالي $(5.0\,\mu m)$ في الثنائيات الاعتيادية.

الثنائيات الأخرى، انظر الشكل (16-12).

12-9-6 ثنائي الليزر *Laser Diode*:

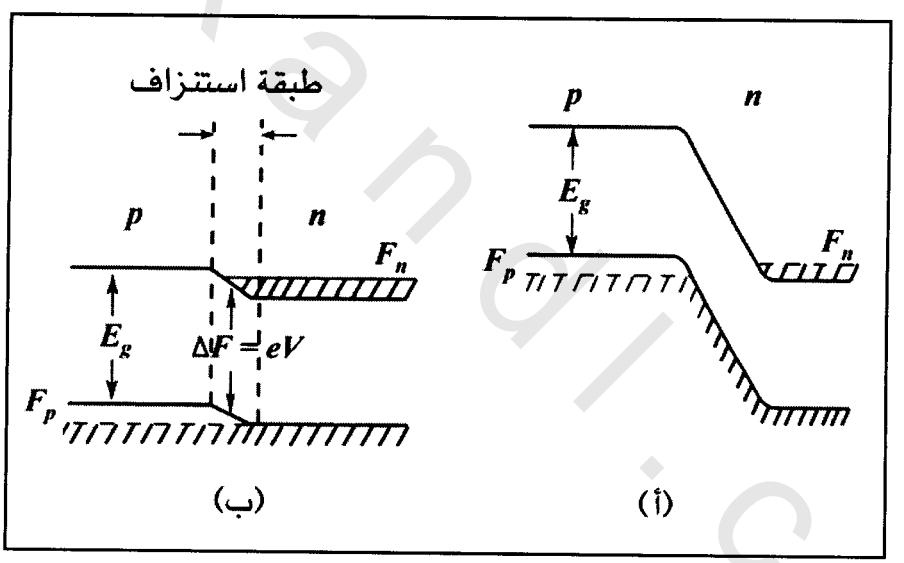
يتم تحضير الثنائي الليزري[1] عادة بمواصفات تناسب استخدامه في التطبيقات العملية، وعادة ما يكون على شكل وصلة *(p-n Junction)*، حيث تكون المنطقتان من النوع (p) و(n) ذات انحلال عال

(1) يعتبر هذا النوع من أشعة الليزر ضمن أنواع ليزرات الحالة الصلبة.

obeikandl.com

high degeneracy، ويتم ذلك بزيادة تركيز التطعيم لكل من المستويات المانحة *doner levels*، والقابلة *acceptor levels* لتصل إلى أكثر من $(10^{18}\ atom/cm^3)$ لضمان حصول حالة انقلاب التعداد في منطقة الاتصال (ليزر الاتصال) *junction lazer*.

ولغرض توضيح فكرة عمل ثنائي الليزر سنأخذ الثنائي المصنوع من زرنيخ الغاليوم *(GaAs)* لكلا النوعين من البلورات *(p)* و*(n)* حيث يتم وصلهما لتشكيل منطقة اتصال متجانس *homo junction*، ولبيان عمل الثنائي المصنوع بهذه الطريقة تأمل الشكل (17-12 أ، ب).



الشكل (17-12 أ، ب) الأساس العملي -ليزر شبه موصل- لغرض الاتصال:
أ- لا يوجد انحياز، ب- انحياز أمامي.

إن كثافة نسبة التطعيم تجعل مستوى فيرمي في البلورة الموجبة (F_p) يقع ضمن شريط التكافؤ *valence band*، كما تجعل مستوى فيرمي للبلورة

obeikandl.com

السالبة (F_n) يقع ضمن شريط التوصيل *conduction band*، ومن الملاحظ وقوع مستويي فيرمي على الخط نفسه، دون تسليط أي فرق جهد خارجي، أي أن لهما المقدار نفسه من الطاقة، ولكن عند تطبيق فرق جهد (V) فإن المستويين ينفصلان عن بعضهما بطاقة مقدارها:

$$\Delta F = eV \qquad (12\text{-}33)$$

ولبيان مواقع مستويات الطاقة عندما يكون الثنائي الليزري منحازاً انحيازاً أمامياً، انظر الشكل (17-12 ب)، وواضح أن الانقلاب في التعداد سابق الذكر قد حصل في منطقة الاستنزاف *depletion layer* للوصلة (p-n)، وحقيقة ما جرى هو حقن الإلكترونات في طبقة الاستنزاف من حزمة التوصيل للبلورة السالبة، وحقن الفجوات من حزمة التكافؤ للبورة الموجبة.

بملاحظة الشكل (17-12 ب) مرة أخرى نجد أن:

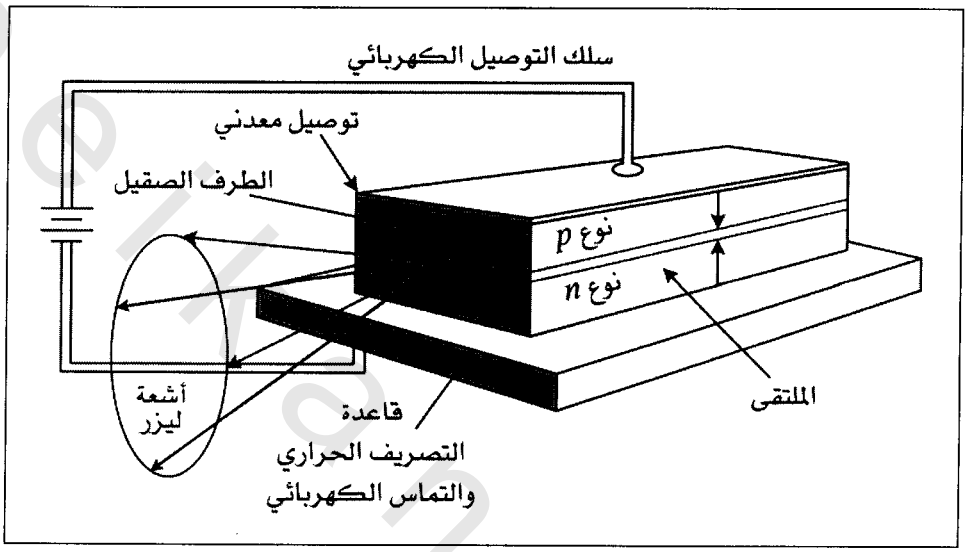
$$\Delta E \cong E_G \qquad (12\text{-}34)$$

حيث إن (E_G) هي طاقة الشريط المحظور *forbidden gab energy*، كما يمكن استخدام المعادلة *(12-33)* لحساب فرق الجهد المطلوب تسليطه لتشغيل ثنائي الليزر، آخذين بالاعتبار حقيقة العلاقة الرياضية *(12-32)*.

وفي حالة الليزر المصنوع من مادة زرنيخ الغاليوم ($Ga\,As$) فإن ($V = 1.5\,volt$)، ولكي تكون هذه المسألة أكثر وضوحاً انظر الشكل (18-12) حيث تجد الرسم التخطيطي لثنائي ليزري، ونلاحظ في الشكل (18-12) أن ليزر أشباه الموصلات يتركب من طبقتين من أشباه الموصلات هما (P-type) و(n-type) ويفصل هذين النوعين من أشباه الموصلات طبقة من

openkandil.com

أشباه موصلات متشابهة وذلك لتشكيل وصلة موجب / سالب (*P / n junction*). ثم يتم تطبيق انحياز أمامي، حيث تتولد الفوتونات الضوئية نتيجة لتراكب الثقوب مع الإلكترونات في وصلة (*p - n*) النشطة.



الشكل (18-12) رسم تخطيطي لليزر (الثنائي البلوري)

وإليك مجموعة من الأمثلة على بعض أنظمة مركبات ليزر أشباه الموصلات وأطوالها الموجبة، وذلك بحسب طريقة إثارة الليزر، فيمكننا مثلاً استخدام الحزم الإلكترونية، أو استخدام الضخ البصري لهذا الغرض، إضافة إلى إمكانية استخدام مواد شبه موصلة أخرى مثل ($ZnO = 380\,nm$)، ($ZnO = 330\,nm$)، ($CdS = 495\,nm$)، ($PbS = 427\,nm$)، ($PbSe = 800\,nm$)، ($PbTe = 650\,nm$)، كل ذلك يمكننا من الحصول على مدى للطول الموجي التشغيلي لليزرات أشباه الموصلات ممتداً من ($300 - 30{,}000\,nm$).

• • •

النظام المستخدم	الطول الموجي بالنانومتر $\lambda(nm)$
Al Ga As زرنيخيد الغاليوم ألمنيوم	*650-900*
Ga As زرنيخيد الغاليوم	*840*
In P فوسفيد الأنديوم	*910*
Ga Sb أنتيمون الغاليوم	*1530*

obeikandl.com

مسائل عامة محلولة
solved problems

12-1 ثنائي مصنوع من مادة الجيرمانيوم *germanium diode*، تبلغ مقاومته النوعية *resistivity* عندما يكون منحازاً انحيازاً أمامياً ($2\ \Omega cm$) وفي حالة الانحياز العكسي ($1\ \Omega cm$).

أوجد حسابياً مقدار الجهد الحاجز *potential barrier*.

الحل *Solution*:

إن الصيغة الرياضية التي يمكننا اعتمادها لإيجاد مقدار الجهد الحاجز في الثنائي البلوري هي:

$$V_o = V_T \ell n \frac{n_n}{n_p}$$

حيث إن:

(n_p) تساوي عدد الفجوات في البلورة الموجبة، وتساوي (p) عند التوازن الحراري.

(n_n) تساوي عدد الإلكترونات في البلورة السالبة، وتساوي (n) عند التوازن الحراري أيضاً.

إنَّ الصيغة الرياضية لمعادلة الناقلية (σ) هي:

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

وفي البلورة من النوع الموجب فإن: $P = N_D$ ، كما أن: $\sigma = p\,\mu_p\,e$

• • •

وفي البلورة من النوع السالب فإن: $n = N_A$ ، كما أن: $\sigma = n\mu_n e$

ومن المعروف لدينا أنَّ العلاقة الرياضية بين المقاومة النوعية والناقلية هي:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$N_D = \frac{1}{eN_A \mu_p} = \frac{1}{(1.6\times10^{-19}C)(1800\,cm^2/V.s)(2\,\Omega cm)}$$
$$= 1.736\times10^{15}/cm^3$$

$$N_A = \frac{1}{eN_n \mu_n} = \frac{1}{(1.6\times10^{-19}C)(3800\,cm^2/V.s)(1\,\Omega cm)}$$
$$= 1.645\times10^{15}/cm^3$$

وللجيرمانيوم فإن (n_i) هي:

$$n_i = 2.5\times10^{13}/cm^3$$

كما أنَّ:

$$V_T = \frac{T}{11600}$$
$$= \frac{300}{11600} = 0.0259$$

نلاحظ أنَّ:

$$N_D = n_n$$
$$N_A = \frac{n_i^2}{n_p}$$
$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$V_o = V_T \ell n \frac{n_n}{n_p}$$

$$= V_T \ell n \frac{N_D \; N_A}{n_i^2}$$

$$= 0.0259 \ell n \frac{(1.736 \times 10^{15} / cm^3)(1.645 \times 10^{15} / cm^3)}{\left(2.5 \times 10^{13} / cm^3\right)^2}$$

$$= 0.1218 eV$$

12-2 ثنائي بلوري مصنوع من مادة الجيرمانيوم، يبلغ مقدار تيار تشبعه العكسي ($25\ \mu A$)، تم وصله بفرق جهد مقداره ($0.18\ V$).

أوجد حسابياً مقدار المقاومة الحركية للثنائي عند درجة الحرارة ($100°C$) في الحالتين:

1- الثنائي منحاز انحيازاً أمامياً.

2- الثنائي منحاز انحيازاً عكسياً.

الحل *Solution*:

تيار التشبع العكسي: $(I_o = 25 \times 10^{-6}\ A)$

فرق الجهد بين طرفي الثنائي البلوري: $(V = 0.18\ volt)$

درجة الحرارة: $(T = 100°C)$

أوجد المقاومة الحركية في الاتجاهين الأمامي والعكسي.

1- عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً أمامياً:

$$I = I_o e^{V/\eta V_T}$$

obeikandl.com

والعلاقة بين درجة الحرارة و كما نعلمها تساوي:

$$V_T = \frac{T}{11600}$$

على أن تكون (T) درجة الحرارة مقاسة بالكلفن وحدة قياس درجة الحرارة في النظام الدولي للقياس (SI).

$$T = 100°C + 273 = 373\,K$$

$$V_T = \frac{373}{11600} = 0.0322\,V$$

ومعلوم لدينا أن $(\eta = 1)$ في حالة الجيرمانيوم:

$$I = (25\times10^{-6}\ A)e^{(0.18\ V\ /\ 0.0322\ V)}$$

$$= 6.7\times10^{-3}\ A = 6.7\ mA$$

$$r = \frac{\eta V_T}{I} = \frac{(1)(0.322\ V)}{(6.7\times10^{-3}\ A)} = 4.8\,\Omega$$

2- عندما يكون الثنائي منحازاً انحيازاً عكسياً:

$$I = -I_o = -25\times10^{-6}\ A$$

أما المقاومة:

$$r = \frac{\eta V_T}{I}$$

$$= \frac{(1)(0.0322\ V)}{(-25\times10^{-6}\ A)} = -128.8\ \Omega$$

هذا يعني أنَّ الإشارة السالبة في المقاومة ترافق الانحياز العكسي في الثنائي البلوري.

obeikandl.com

مسائل وتمارين الفصل الثاني عشر

Chapter Twelve Exercises & Problems

12-1 ناقل معدني يحتوي السنتيمتر المكعب الواحد منه (10^{23}) إلكتروناً حراً *free electrons*، وتبلغ مقاومته النوعية *resistivity* ($5\times10^{-5}\ \Omega.cm$).
أوجد مقدار تحركية إلكتروناته الحرة *electron mobility*.

12-2 شريحة من السيليكون الموجب *P-type silicon wafer*، مقاومته النوعية *resistivity* تساوي ($100\ \Omega m$)، وتبلغ تحركية الإلكترونات فيها ($0.12\ m^2 V^{-1} s^{-1}$) وهي تساوي ثلاثة أضعاف تحركية الثقوب.
أوجد منسوب التطعيم *acceptor level* (E_A) لشريحة السيليكون.

12-3 نريد تحفيز الإلكترونات في مادة السيليكون عند درجة حرارة الغرفة ($20°C$)، وذلك باستخدام موجة ضوئية.
أوجد أقصى طول لهذه الموجة يمكن استخدامه لهذا الغرض.

12-4 تتأثر إلكترونات التوصيل في مادة الجيرمانيوم *germanium* بدرجات الحرارة.
أوجد عددها عند درجتي الحرارة ($20°C$) و($40°C$) ثم قارن بينهما.

12-5 قطعة نقية من مادة الجيرمانيوم طولها ($1\ cm$) وعرضها ($2\ mm$) وسماكتها ($1\ mm$) وتبلغ مقاومتها الطولية عند درجة الحرارة ($20°C$)، ($2160\ \Omega$).
أوجد حسابياً عدد الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل لهذه القطعة.

• • •

12-6 تبلغ كثافة معدن التنكستن *density* ($18.89\ cm^{-3}$)، إذا كان عدد الإلكترونات الحرة في كل ذرة من ذراته هو اثنان فقط.

أوجد حسابياً مقدار طاقة منسوب فيرمي للتنكستن.

12-7 يبلغ تيار التشبع العكسي في ثنائي بلوري ($8.9\ \mu A$).

أوجد حسابياً مقدار التيار الأمامي لقيم فرق الجهد الآتية: ($0.1\ V$)، ($0.3\ V$)، ($0.4\ V$).

obeikandl.com

مسائل اختيارية

Optional Problems

12-1 إذا كانت احتمالية إيجاد إلكترون يحمل مقداراً من الطاقة قدره *(0.3eV)* فوق منسوب طاقة فيرمي *Fermi energy level* هي *(1%)*.
أوجد درجة الحرارة المناسبة لذلك.

12-2 ثنائيان بلوريان تمّ وصل طرفيهما الموجبين ببعضهما، وتم وصل الطرفين السالبين ببطارية تعطي فرقاً في الجهد مقداره *(5V)*.
أوجد فرق الجهد خلال كلٍ من الثنائيين عند درجة الحرارة *(20°C)*، علماً بأن تأثير زينر *Zener effect* يظهر عند فرق الجهد أكبر من *(5V)*.
ملاحظة: عوض عن *($\eta = 2$)* وكذلك عن *($V_T = 0.026V$)*.

obeikandl.com

obeikandl.com

الخلاصة
Summary

سنركز في تلخيص هذا الفصل على أهم الأفكار والمسميات والتعريفات الجديدة التي مرت على الطالب في دراسته الماضية، أو التي تمر عليه للمرة الأولى.

- **المواد الناقلة *conductor***: هي المواد التي تسمح للشحنات الكهربائية بالمرور خلالها بسهولة كبيرة، وسبب ذلك امتلاكها لعدد هائل من الإلكترونات أو الأيونات الحرة، وهذا ما يجعل مقاومتها صغيرة نسبياً، وناقليتها كبيرة.
- **المواد شبه الموصلة *semi conductor***: هي المواد التي لا تسمح للشحنات الكهربائية بالمرور إلا تحت ظروف معينة كدرجة الحرارة أو نسبة الشوائب المضافة إليها. وهي موجودة في الطبيعة، وتقع ناقليتها الكهربائية بين ناقلية المواد الناقلة والمواد العازلة، وتتميز بامتلاكها معامل حراري سالب للمقاومة *(NTC)*. ومن أشهرها الجيرمانيوم والسليكون.
- **البلورة من النوع الموجب *p-type***: مادة شبه موصلة يتمُّ تطعيمها بعنصر ثلاثي التكافؤ مما يؤدي إلى إحداث نقص في عدد الإلكترونات وزيادة في عدد الفجوات، إذ تكون الفجوات الموجبة هي غالبية حاملات التيار، وهذا هو سبب التسمية.

obeikan.com

- **البلورة من النوع السالب *n-type***: مادة شبه موصلة يتمُّ تطعيمها بعنصر خماسي التكافؤ مما يؤدي إلى إحداث زيادة في عدد الإلكترونات ونقصان في عدد الفجوات، إذ تكون الإلكترونات هي غالبية حاملات التيار، وهذا هو سبب التسمية.

- **الشوائب *impurities***: هي المواد التي تستعمل لغرض تطعيم المواد شبه الموصلة النقية، ويشترط أن يكون تكافؤها ثلاثياً أو خماسياً عند إضافتها إلى المواد شبه الموصلة رباعية التكافؤ، ويتم ذلك في صناعة دقيقة للغاية، وأهم النتائج لعملية التطعيم:

  1- تحقيق فائض في عدد الإلكترونات أو الفجوات.

  2- تغيير ناقلية المادة شبه الموصلة النقية.

- **الإلكترونات الحرة *free electrons***: هي الإلكترونات التي لا تكون مرتبطة بذرة معينة أو جزيء معين ارتباطاً دائماً، ويمكنها أن تتحرك بحرية تحت تأثير أي مقدار للمجال الكهربائي، وهي موجودة بوفرة شديدة في المواد الناقلة.

- **الفجوات *holes***: هي عبارة عن مواقع النقص الحاصل في إلكترونات روابط ذرات العناصر ذات التكافؤ الرباعي كالجيرمانيوم مثلاً، وذلك عند تطعيمه بشوائب ذراتها ثلاثية. حيث تظهر الصفة الكهربائية الموجبة للذرات المطعمة، وتمثل هذه الفجوات غالبية حاملات التيار بسبب عدم ارتباطها مع ذرات أخرى وتكون حرة الحركة.

- **الانبعاث الحراري للإلكترونات *thermoionic emission***: هي عملية تحرر الإلكترونات من المواد الصلبة بسبب ارتفاع درجة حرارتها، تؤدي إلى إكساب الإلكترون طاقة إضافية تمكنّه من التغلب على قوة جذب ذرات السطح المجاورة لها.

- **الانبعاث الكهروضوئي للإلكترونات *photoelectric emission***: هي عملية تحرر الإلكترونات من المواد عند سقوط إشعاعات كهرومغناطيسية بترددات معينة عليها.

- **الانحياز الأمامي *forward bias***: هو عملية مرور التيار الكهربائي في الجزء الموجب من منحنى خواص الفولتية والتيار للثنائي البلوري، وذلك عند تسليط الجهد الكهربائي في اتجاه المقاومة الأقل للثنائي.

- **الانحياز العكسي *reverse bias***: هو عملية عدم مرور التيار الكهربائي في الجزء السالب من منحنى خواص الفولتية والتيار للثنائي البلوري، وذلك عند تسليط الجهد الكهربائي في اتجاه المقاومة الأكبر للثنائي.

- **الترانزستور*transistor***: ويسميه البعض الترانزستور ثنائي الوصلة، وذلك لوجود منطقتي اتصال بين الأنواع المختلفة للبلورات المصنوعة من المواد شبه الموصلة، فقد تكون على شكل $(n-p-n)$، أي وصلتان لثنائيان من النوع $(n-p)$، أو $(p-n-p)$، أي وصلتان لثنائيان من النوع $(p-n)$، باعتبار أن البلورة الواقعة في الوسط في كلا الحالتين بلورة مشتركة، وتسمى أقطاب التوصيل الثلاثة (باعث، قاعدة، مجمع) حسب طريقة توصيل الترانزستور في الدائرة الإلكترونية.

• • •

- **عدد أفوكادرو *Avogadro's number***: وهو عدد الجزيئات لعنصر أو مركب في مول واحد منه، وقد سبق لنا أن عرَّفنا المول في الوحدة الأولى من هذا الكتاب، ويعتبر عدد أفوكادرو من الثوابت المتداولة كثيراً، ويساوي عدداً ($6.02\times10^{22}\ cm^{-3}$).

obeikandl.com