



الالكترونيات الفيزيائية

للفرقة الثالثة تربية عام فيزياء

أعداد

د/ حمدى توفيق

٢٠٢٣-٢٠٢٤

الإلكترونيات

ELECTRONICS

تأليف

د. زياد القاضي
د. عبد الفتاح سليمان
م. هدى حواشين
م. ابراهيم غريب
د. سامي سرحان

الطبعة الرابعة
1428 - 2007

يطلب من مكتبة الخليج
ت / ٥٢٢٣٥٢٩
نجران - حي الضيافة - شارع الأمير سلمان

دار الفلاح
تأليف ومراجعة

التركيب الالكتروني للذرات The Electronic Structure of Atoms

مقدمة

لكي يتسنى لنا فهم العديد من الظواهر المتعلقة بالخصائص الذرية للمادة، كالتوصيل الكهربائي والعزل الكهربائي والانبعاث الالكتروني يجدر بنا في البداية أن نتعرف على التركيب الذري للمادة في جميع حالاتها، الغازية السائلة والصلبة. مع محاولة للتعرف على مستويات الطاقة (Energy Levels) ونطاقات الطاقة (Energy Bands). كذلك سوف نتعرف على كيفية التمييز بين المواد العازلة والمواد الموصلة والمواد اشباه الموصلات (Semiconductors).

1-1 حركة الالكترونات في الذرة:

Electron Motion in Atom

الالكترون هو جسيم متناهي الصغر ويمتلك شحنة سالبة، وقد حُدثت قيمتي كل من كتلته وشحنته باجراء العديد من التجارب على حركة الالكترون في المجال الكهربائي والمغناطيسي. وتبلغ قيمة كتلة الالكترون ($m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$)، حيث ان هذه القيمة هي كتلة الالكترون عند السكون أو عندما تكون سرعة حركته اقل كثيراً من سرعة الضوء التي تبلغ في الفراغ الحر ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). وتبلغ قيمة شحنة الالكترونات ($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ c}$). أي ان عدد الالكترونات اللازمة للحصول على شحنة كهربائية مقدارها كولوم واحد تبلغ 6×10^{18} الكترون. تتكون الذرة من نواة موجبة الشحنة تتركز فيها أغلب الكتلة الذرية، وحول هذه النواة تدور الالكترونات السالبة الشحنة ذات الكتلة الخفيفة جداً مقارنة مع كتلة النواة في مدارات مغلقة، يكون شكل هذه المدارات دائري أو على شكل قطع ناقص (ellipse) حيث تم اثبات ذلك باستخدام نظريات الميكانيكا الكلاسيكية.

وقد بين هذا النموذج العلاقة بين الطاقة الكلية للإلكترونات وبين نصف قطر مداره، حيث تبين ان الطاقة الكلية للإلكترون تنخذ قيمة سالبة دائماً، وكلما إقترب الالكترون من النواة تناقصت قيمة طاقته.

إذا كان عزم كمية الحركة للإلكترون هزماً كميّاً أي يتخذ قيم صحيحة المقدار، فنجد ذلك تتحقق الحالة المستقرة. أي أن الحالة المستقرة هي الحالة التي يتحقق لها الشرط التالي

$$(2-1) \quad mvr = nh/2\pi$$

حيث mvr العزم الزاوي (angular momentum)

m كتلة الإلكترون

v السرعة

r نصف قطر المدار

n العدد الكمي، ويتخذ قيم صحيحة ($n=1, 2, 3, 4, \dots$)

h ثابت بلانك ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.S}$)

وجدير بالذكر أن بوهر اعتمد على ذرة الهيدروجين في تفسيره لنظرياته الثلاث وقد وجدنا أن الإلكترون عند دورانه حول البروتون في نواة الهيدروجين يتخذ قيم محددة للطاقة. وهكذا فإننا نجد أن الإلكترون يمكن أن يدور في مدارات مختلفة وتكون طاقته في كل مدار ذات قيم محددة وعندئذ يكون الإلكترون في حالة محددة للطاقة ويطلق على هذه الحالة اسم مستوى الطاقة (Energy Level). ويمكن أن ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة إلى آخر. فإذا انتقل الإلكترون من مستوى ذي طاقة أعلى إلى مستوى ذي طاقة أقل في الذرة فإنه ينتج عن ذلك إشعاع طاقة مساوية للفرق بين طاقتي مستويي الطاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية، وعندئذ يقال إنه انطلق فوتون (Photon) بطاقة وتردد تحدده العلاقة (1-1). أما إذا انتقل إلكترون من مستوى ذي طاقة أقل إلى مستوى ذي طاقة أعلى فإنه لكي يتم هذا الانتقال لا بد أن تمتص الذرة طاقة تساوي الفرق بين طاقة مستويي الطاقة. وفي هذه الحالة نجد أن الذرة تمتص طاقة.

وقد حدد بوهر طاقة مستوى الطاقة بالعلاقة التالية

$$(3-1) \quad E = -B/n^2$$

حيث B ثابت بوهر ($B = 2.179 \times 10^{-18}$)

n العدد الكمي.

وبين الشكل (1) مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين تبعاً لنظريات بوهر

من المعروف أن أي جسم مشحون يتحرك بتسارع يجب أن يشع طاقة. فإذا ما قامت شحنة بحركة إهتزازية بتردد مقداره f يكون تردد طاقة الإشعاع مساوياً لنفس التردد f ، أي أن تردد الطاقة المفقودة بسبب الإشعاع يساوي تردد دوران الإلكترون حول النواة. وهذا يعني أنه طالما أن الإلكترون يفقد طاقة على شكل إشعاع فإن طاقته الكلية سوف تتناقص بنفس قيمة طاقة الإشعاع. وهذا يؤدي إلى تناقص طاقة الإلكترون بالتدرج ويتناقص بالتالي نصف قطر المدار إلى أن يسقط الإلكترون على النواة. وهذا منافٍ للحقيقة. فالإلكترون لا يسقط على النواة.

1-1-1 نظرية بوهر لذرة الهيدروجين:

The Bohr Theory of the Hydrogen Atom

وبما أن تردد دورات الإلكترون يعتمد على نصف قطر المدار (Orbit)، وحيث أن نصف قطر المدار يتناقص تدريجياً كما ذكرنا سابقاً فإن تردد الطاقة المفقودة يجب أن يتغير تغيراً تدريجياً. وهذه الخلاصة لا تنطبق والنتائج العملية والتجريبية حيث وجد أن الخطوط الطيفية المنبعثة من الذرات لها ترددات ثابتة ومحددة ولا تتخذ أي قيم تدريجية. وبناءً على هذه النتيجة وضع العالم السويدي بوهر (Boher) فرضياته الشهيرة والتي أصبحت بعد ذلك أساساً لميكانيكا الكم (Quantum Mechanics). وتنص نظريات بوهر الثلاث على ما يلي:

- يمكن أن تتواجد في الذرة قيم محددة (متقطعة) للطاقة. وعند تواجد الإلكترون في حالات تكون طاقته مساوية لهذه القيم المحددة فإن الإلكترون لا يشع أي طاقة ويقال عند ذلك أن الإلكترون في حالة مستقرة.
- عند انتقال الإلكترون من حالة مستقرة للطاقة إلى حالة مستقرة أخرى فإنه يقوم بإشعاع أو امتصاص طاقة تساوي فرق الطاقة بين الحالتين ويكون تردد هذه الطاقة يساوي

$$(1-1) \quad f = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{E_{\text{photon}}}{h}$$

وتدعى هذه المعادلة بمعادلة اينشتين

حيث E_1 الحالة المستقرة للطاقة التي انتقل إليها الإلكترون

E_2 الحالة المستقرة للطاقة التي انتقل منها الإلكترون

h ثابت بلانك (Planck's Constant) ووحدته هي (جول. ثانية)

E_{photon} طاقة الفوتون

وبتعويض قيمة r بمعادلة اينشتين نجد أن

$$\gamma = \frac{hc}{E_{\text{photon}}}$$

$$= \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 2.998 \times 10^8}{4.086 \times 10^{-19}}$$

$$= 4.861 \times 10^{-7} \text{m}$$

2-1 التركيب الإلكتروني للعناصر

Electronic Structure of the Elements

كما رأينا في البند السابق ان النظريات التي وضعها بوهر تنطبق على ذرة الهيدروجين ولا تنطبق على الذرة التي تحتوي على أكثر من الكترون، حيث انه يتم تحديد مستويات الطاقة لهذه العناصر بطريقة تجريبية. فاذا طبقنا نظريات بوهر مثلاً على ذرة الهيليوم (Helium) لحساب الطاقة وطول الموجة نجد ان نسبة الخطأ من مرتبة % 5. ومن هنا اصبح لا بد من وجود نموذج آخر للذرة.

1-2-1 الاعداد الكمية للإلكترونات:

Quantum Numbers of Electrons

في عام 1926 قام العالم الالماني شرودنجر (schrödinger) بوضع نظرية الميكانيكا الموجية (Wave Mechanics). وجددير بالذكر ان هذه النظرية لا تلغي نظرية بوهر، ولكنها تعدلها الى الحد الذي لا يكون فيه سلوك الإلكترون كما لو كان جسماً فقط، وإنما لسلوكه أيضاً طبيعة موجية. وتبين المعادلة التالية معادلة شرودنجر الموجية.

$$(4-1) \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

حيث: m هي كتلة الجسيم

E هي الطاقة الكلية

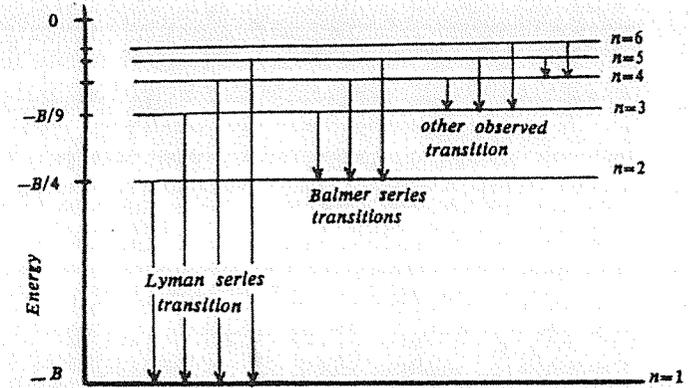
h ثابت بلانك

ψ دالة الموجة

x, y, z الاحداثيات الفراغية

وبناءً على المعادلة الموجية السابقة استطاع شرودنجر تعيين حالة الإلكترون من خلال الاعداد

الكمية (Quantum Numbers) التالية:



شكل 1 مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين

مثال (1):

أوجد طول الموجة لطاقة الكترون انتقل من المستوى الرابع للطاقة الى المستوى الثاني للطاقة.

الحل:

بالرجوع الى نظرية بوهر نجد أن

$$E_1 = -B/16 = -(2.179 \times 10^{-18})/16 = -1.362 \times 10^{-19} \text{J}$$

$$E_2 = -B/4 = -(2.179 \times 10^{-18})/4 = -5.448 \times 10^{-19} \text{J}$$

وبالتالي فان طاقة الفوتون تساوي الفرق بين طاقتي المستوي الطاقة

$$E_{\text{photon}} = (-1.362 + 5.448) \times 10^{-19}$$

$$= 4.086 \times 10^{-19} \text{J}$$

وبالرجوع الى معادلة اينشتين

$$f = \frac{E_{\text{photon}}}{h}$$

وحيث ان العلاقة بين التردد f وطول الموجة γ هي

$$f = \frac{c}{\gamma}$$

$$\uparrow = +\frac{1}{2}$$

$$m_s \uparrow = -\frac{1}{2}$$

Pauli Exclusion Principle

2-2 مبدأ باولي للاستبعاد:

ينص مبدأ الاستبعاد الذي وضعه باولي على انه لا يمكن ان يوجد أكثر من إلكترون واحد له نفس الاعداد الكمية الاربعة n, l, m_l, m_s اي انه عند تواجد عدد معين من الالكترونات في ذرة ما فانه لا يمكن ان يوجد الالكترونات في نفس الحالة او لها نفس أعداد الكم، وبالتالي فلن لكل إلكترون حالة كمية (Quantum state) لا يماثل فيها اي إلكترون آخر.

Energy Levels

2-3 مستويات الطاقة

تعرف الحالات الكمية للالكترونات بمستويات الطاقة، حيث ان جميع الالكترونات ذات العدد الكمي الرئيسي المشترك تخضع لمستوى طاقة رئيسي واحد، ويرمز لمستويات الطاقة الرئيسية (Principal Energy Levels) المختلفة بالرموز K, L, M, N, O, P, Q وهي مستويات الطاقة ذات العدد الكمي الرئيسي $n=1, 2, 3, 4, \dots$ وينقسم كل مستوى طاقة رئيسي الى مستويات طاقة فرعية (Sublevels) يحددها العدد الكمي الفرعي l ويرمز لمستويات الطاقة الفرعية بالرموز s, p, d, f وهذه الرموز مقابلة لقم العدد الكمي الفرعي $l=0, 1, 2, \dots$. وبين الشكل (2) توزيع الالكترونات على مستويات الطاقة الرئيسية ومستويات الطاقة الفرعية حسب الاعداد الكمية الاربعة.

Level n	1		2			3								
	K		L			M								
sublevel l	0	0	1			0	1		2					
	s	s	p			s	p		d					
orbital m_l	0	0	1	0	-1	0	1	0	-1	2	1	0	-1	-2
spin m_s	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
number of electrons in sublevel l	2	2	6			2	6		10					
Total number of Electrons in level	2		8			18								

شكل 2 توزيع الالكترونات على مستويات الطاقة حسب الاعداد الكمية الاربعة

- العدد الكمي الاول، n (First Quantum Number)

ويسمى هذا العدد بالعدد الكمي الرئيسي n وهو عبارة عن عدد صحيح يتخذ اي قيمة صحيحة أكبر من الصفر (n=1, 2, 3, 4, ...). ويحدد هذا الرقم طاقة الالكترون للحالة المعينة ويمكن بالتالي ان يحدد مداره الرئيسي. وكلما زاد العدد الكمي الرئيسي زادت طاقة الالكترون وزادت بالتالي المسافة بينه وبين النواة.

- العدد الكمي الثاني، l (Second Quantum Number)

ويطلق عليه العدد الكمي للاندفاع المداري الزاوي (The Orbital Angular Momentum Quantum Number) او العدد الكمي الفرعي ويتخذ هذا العدد القيم

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

ويحدد هذا الرقم شكل المدار الكلاسيكي، فعندما تكون $l=0$ يكون شكل المدار دائري أما عندما تكون $l=1$ فيكون شكل المدار ناقص كما وتستطيع عن طريق هذا الرقم تحديد كمية التحرك الزاوية والمدار الثانوي للالكترون.

- العدد الكمي الثالث، m_l (Third Quantum Number)

لما كان العدد الكمي l عبارة عن قيمة متجهة فإنه يجب تحديد اتجاهه بالنسبة لاتجاه معلوم في الفراغ. ويمكن ان يحدد هذا الاتجاه للمعلوم باستخدام مجال مغناطيسي. وبذلك تم التصرف على عدد كمي جديد يطلق عليه العدد الكمي المداري المغناطيسي (The orbital Magnetic Quantum Number) ويرمز له بالرمز m_l ويتخذ هذا العدد القيم التالية

$$m_l = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$$

وهذا العدد يحدد قيمة مسقط العدد الكمي الثاني في اتجاه المجال المغناطيسي.

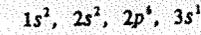
- العدد الكمي الرابع، m_s (Fourth Quantum Number)

ويطلق عليه العدد الكمي المغزلي (The spin Quantum Number) ويرمز له بالرمز m_s . لقد وجد تجريبياً ان الالكترون يدور حول نفسه بالإضافة الى دورانه حول النواة. وقيمة العزم الذاتي المتولدة عن هذا الدوران تتخذ قيماً محددة بالنسبة لاتجاه المجال المغناطيسي. وبذلك نجد أن العزم الذاتي الالكتروني يمكن ان يتخذ قيمتين فقط هما

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

وكما ذكرنا سابقاً ان كل مستوى طاقة رئيسي ينقسم الى مستويات طاقة فرعية. فاذا اخذنا مثلاً ذرة الصوديوم وعددها الذري يساوي 11، نجد ان هذه الالكترونات تنوزع حول نواة ذرة الصوديوم في مستويات طاقة رئيسية ثلاث هي K ، L ، M حيث يحتوي مستوى الطاقة الرئيسي الاول K على الكترونين تملأ مستوى الطاقة الفرعي $1s$ ، أما مستوى الطاقة الرئيسي الثاني L فهو يحتوي على ثمانية الكترونات تنوزع على مستويي الطاقة الفرعية $2s$ و $2p$ حيث يملأ مستوى الطاقة الفرعية $2s$ بالكترونين بينما يملأ مستوى الطاقة الفرعية $2p$ بستة الكترونات. ونجد ان الكترون واحد فقط يوجد في مستوى الطاقة الرئيسي الثالث M يسكن مستوى الطاقة الفرعية $3s$ ، وهذا المستوى غير ممتلأ لأنه يحتوي على الكترون واحد بينما يتسع الى الكترونين وبذلك يقال ان ذرة عنصر الصوديوم احادية التكافؤ.

ونتيجة لما سبق نجد أن التوزيع الالكتروني لذرة عنصر الصوديوم هو كما يلي:



وجدير بالذكر ان مستويات الطاقة الفرعية متقاربة جداً من بعضها البعض ضمن مستوى طاقة رئيسي معين، لذلك تكون الطاقة المطلوبة لحركة الالكترون بين مستويات الطاقة الفرعية قليلة مقارنة مع الطاقة المطلوبة لتحريك الالكترون من احدى مستويات الطاقة الرئيسية الى آخر. كما نجد أن مستويات الطاقة القريبة من النواة، شديدة الارتباط بالذرة ولا يمكن إثارها أو تأيينها بسهولة وذلك لان هذه الالكترونات تكون اكثر ارتباطاً بالذرة وبذلك تكون طاقتها اقل ما يمكن. كما أن الذرات التي تملأ مستويات طاقتها الخارجية بالالكترونات تكون ذرات مستقرة تماماً ويطلق عليها اسم العناصر الخاملة مثل الهيليوم (He) والنيون (Ne) والارجون (Ar) والكريبتون (Kr) والاكسنون (Xe) والرادون (Rn) وهذه العناصر تمثل عناصر المجموعة الثانية في الجدول الدوري (periodic table).

مثال (2):

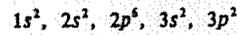
بين التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة حول نواة ذرة السيليكون Si علماً ان العدد الذري للسيليكون هو 14.

الحل:

بما أن عدد الالكترونات الموجودة حول نواة ذرة السيليكون يساوي 14 الكترون، نجد أن هذه الالكترونات تنوزع حول نواة ذرة السيليكون في مستويات طاقة رئيسية ثلاث هي K ، L ، M .

يتسع مستوى الطاقة الاول K لالكترونين ويحتوي على مستوى طاقة فرعي واحد هو $1s$ وبذلك يملأ مستوى الطاقة الفرعي بالالكترونين، $1s^2$. ويتسع مستوى الطاقة الثاني L لثمانية الكترونات تنوزع على مستويات الطاقة الفرعية $2s$ و $2p$ كما يلي $2s^2$ ، $2p^6$. كما يتسع مستوى الطاقة الثالث M لثمانية عشرة الكترونات. وبما أنه قد تبقى اربع الكترونات فقط فان هذه الالكترونات تنوزع على مستويات الطاقة الفرعية $3s$ و $3p$ حيث يتسع $3s$ لالكترونين بينما نوزع الالكترونين المتبقين على $3p$ وبذلك يصبح مستوى الطاقة الثالث كما يلي $3s^2$ ، $3p^2$.

وبذلك يصبح التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة حول نواة ذرة السيليكون كما يلي

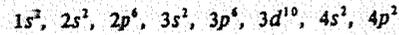


مثال (3):

بين التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة حول نواة ذرة الجرمانيوم Ge علماً بأن العدد الذري للجرمانيوم هو 32.

الحل:

تحتوي ذرة الجرمانيوم على اثنين وثلاثون الكترونات تنوزع حول نواتها في مستويات طاقة رئيسية اربعة كما يلي



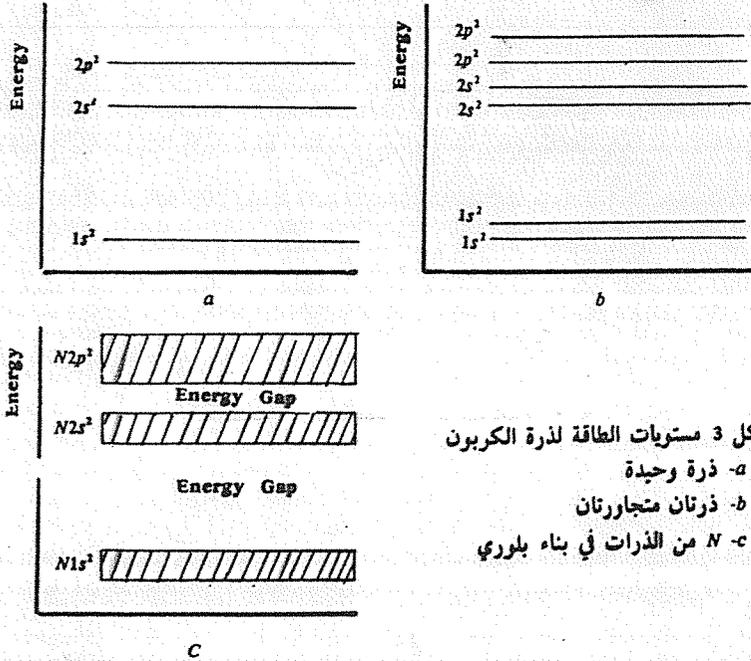
وكما هو واضح من المثالين السابقين ان عنصري السيليكون والجرمانيوم يحتوي كل منهما على اربع الكترونات في مستوى الطاقة الخارجي، لذلك تدعى هذه العناصر بالعناصر رباعية التكافؤ.

مما سبق نستطيع القول انه عند انتقال الكترون من مستوى ذي طاقة منخفضة الى مستوى ذي طاقة اعلى ان الذرة اصيحت مثارة، حيث يصبح مجموع الطاقة الكلية للذرة اكبر. وفي هذه الحالة يجب ان نمنح للالكترون كمية من الطاقة تساوي الفرق بين طاقة المستويين وتدعى هذه الكمية من الطاقة بجهد الإثارة (Excitation Potential). واما عند منح الالكترون كمية من الطاقة تكون كافية لابعاده عن تأثير النواة، اي عندما يخرج هذا الالكترون من مستوى الطاقة الخاص به، الى خارج الذرة فان هذه العملية تدعى بعملية التأين حيث تبقى الذرة على شكل ايون موجب الشحنة. وتدعى كمية الطاقة اللازمة للتأين بجهد التأين (Ionization Potential) وتساوي تماماً الطاقة الكلية السالبة للالكترون ولكن باشارة موجبة.

المثال التالي: لنفرض ان لدينا ذرة كربون واحدة منفصلة والتوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة حول نواة ذرة الكربون c هو كما يلي

$$1s^2, 2s^2, 2p^2$$

وهذا التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة موضح بالشكل (3-a). اما اذا نظرنا الى التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة لذرتين متجاورتين من الكربون فاننا نجد ان بعض مستويات الطاقة في إحدى الذرتين قد زادت طاقته بينما تقل طاقة مستويات الطاقة في الذرة الاخرى المجاورة بنفس المقدار. وهذا يقودنا الى ما ذكرناه سابقاً من ان المجموع الكلي لطاقتان مستويات الطاقة يبقى ثابتاً. ويبين الشكل (3-6) مستويات الطاقة لذرتي الكربون المتجاورتين. أما إذا كان لدينا عدد N من ذرات الكربون المشتركة في تركيبه بلورية واحدة فاننا نجد أن مستوى الطاقة الواحد في ذرة الكربون المنفصلة قد أصبح عبارة عن مستويات طاقة في الذرات المتقاربة، وان الفرق في الطاقة بين هذه المستويات يكون صغيراً جداً في حين ان عددها يكون كبيراً، لدرجة انه يمكن اعتبارها متداخلة. ويدعى هذا العدد الكبير من مستويات الطاقة القريبة جداً من بعضها البعض بنطاقات الطاقة، وهذه النطاقات من الطاقة موضحة بالشكل (3-c).



شكل 3 مستويات الطاقة لذرة الكربون
 a- ذرة واحدة
 b- ذرتان متجاورتان
 c- من الذرات في بناء بلوري

Energy Bands

3-1 نطاقات الطاقة

كما هو معروف ان المادة تتكون من ذرات، وان حالات المادة ثلاث هي الحالة الغازية والحالة السائلة والحالة الصلبة. وقد رأينا فيما سبق ان مستويات الطاقة للذرة لا تتأثر مالم تتعرض الذرة الى اي مؤثر خارجي كالمجال الكهربائي او اقتراب ذرات اخرى منها الى غير ذلك من المؤثرات.

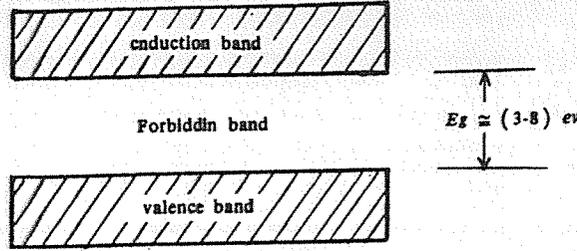
تكون المسافة بين الذرات في جزيئات الغازات كبيرة بالنسبة الى نصف قطر الذرة لذلك فان الالكترونات في مستويات الطاقة لذرة الغاز لا يقع عليها اي تأثير من الالكترونات المجاورة. وتقع هذه الذرات فقط تحت تأثير أنويتها الخاصة بها. لذلك نجد أن كل جزيء غاز هو عبارة عن منظومة منفصلة اي ان مستويات الطاقة للذرة مشابهة لمستويات الطاقة في الذرة الواحدة.

أما في الحالة السائلة فتتعرض الالكترونات في مستويات الطاقة لذرة السائل لتأثير أنوية الذرات المجاورة بالإضافة لتأثير أنويتها. ونتيجة لذلك تتغير مستويات الطاقة لذرة السائل عما لو كانت في حالة منفصلة.

وقد أثبتت الدراسات ان للجاسم الصلبة من المعادن واشباه الموصلات تركيب بلوري. والتركييب البلوري هو عبارة انتظام توزيع في غط هندسي معين. وفي هذه الحالة تكون ذرات المادة الصلبة قريبة جداً من بعضها البعض مما يؤدي الى تأثير الالكترونات في مستويات الطاقة بانوية الذرات المجاورة بالإضافة الى الاثر الناتج عن أنويتها الخاصة بها. اي ان الالكترونات لا تكون متأثرة بنواة ذرة معينة فقط وانما تتأثر أيضاً بالمجالات الكهربائية للذرات المجاورة. وهذا يعني ان طاقة الالكترون الكلية وبالتالي مستوى طاقته سوف تكون محصلة هذه المجالات الكهربائية مجتمعة.

وكتنتيجة لبناء البلوري لذرات المعادن واشباه الموصلات، تتداخل الالكترونات الذرات المجاورة في الفراغ بين أنوية الذرات، مما يؤدي الى تغير في مستويات الطاقة. وقد وجد ان هذا التغير يكون صغيراً لمستويات الطاقة الداخلية القريبة من النواة، بينما وجد ان هذا التغير يكون كبيراً وظاهراً بالنسبة لمستويات الطاقة الخارجية البعيدة عن النواة، حيث تقسم أكثر من نواة هذه الالكترونات فيما بينها. وبالرغم من التغير الحاصل على مستويات الطاقة الا ان المجموع الكلي لطاقة الذرات يبقى ثابتاً، حيث انه لو زادت طاقة إحدى مستويات الطاقة في ذرة معينة فاننا سوف نجد ان طاقة مستوى الطاقة المقابلة لها في الذرة المجاورة سوف تقل.

وقد أدى التأثير المتبادل بين الالكترونات في مستويات الطاقة الخارجية والبعيدة عن النواة الى تكوين ما يدعى بنطاقات الطاقة (Energy Bands) ولتوضيح مفهوم نطاقات الطاقة دعونا نأخذ

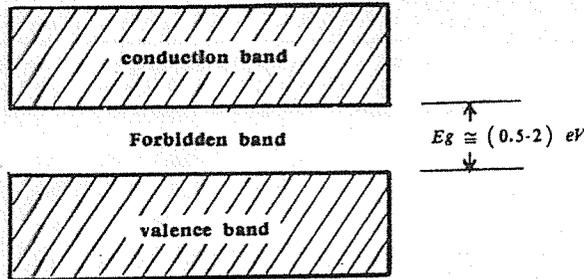


شكل 4 تتابع نطاقات الطاقة في المواد العازلة

- اشباه الموصلات: Semiconductor

تدعى المواد التي يكون عرض النطاق المحظور بها صغيراً، حوالي واحد الكيلو إلكترون فولت بأشياء الموصلات. وفي هذه المواد وعند درجة حرارة الصفر المطلق (0°K) تكون جميع الإلكترونات في نطاق التكافؤ ولا يوجد أي منها في نطاق التوصيل. لذلك فإن هذه المواد تكون عازلاً مثالياً عند درجة الحرارة هذه. أما عند زيادة حرارة هذه المادة فإن الإلكترونات سوف تقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل وبذلك تسلك هذه المادة سلوك المواد الموصلة.

من أشهر اشباه الموصلات السيليكون والجرمانيوم، ويبلغ عرض النطاق المحظور للسيليكون (1.21eV) عند درجة حرارة الصفر المطلق كما ويبلغ (0.785eV) لعنصر الجرمانيوم. ويبين الشكل (5) تتابع نطاقات الطاقة لأشياء الموصلات. ويكون عرض النطاق المحظور في اشباه الموصلات حوالي (0.5 - 2) إلكترون فولت.



شكل 5 تتابع نطاقات الطاقة لأشياء الموصلات

كما هو مبين في الشكل (3-c)، أنه يوجد بكل نطاق طاقة عدد N من مستويات الطاقة يحتوي كل مستوى على إلكترونين أي أن عدد الإلكترونات في كل نطاق طاقة يساوي $2N$ من الإلكترونات، كما يلاحظ وجود فجوات في الطاقة بين كل نطاق طاقة وآخر. يطلق على فجوات الطاقة (Energy Gap) هذه بالنطاق المحظور (Forbidden Band). ويمكن أن تتداخل بعض نطاقات الطاقة فيما بينها عندما تكون المسافة بين الذرات في البلورة صغيرة جداً، ويعتمد ذلك على موصليته المادة كما ستوضح ذلك فيما بعد.

والآن لو أعدنا النظر إلى الشكل (3-c) لوجدنا أن النطاق الأول يحتوي على $2N$ من الإلكترونات وهذا النطاق يتسع فقط $2N$ من الإلكترونات لذلك نجد أن هذا النطاق ممتلئاً، وكذلك النطاق الثاني فهو ممتلئاً أيضاً. أما النطاق العلوي فهو يحتوي على $2N$ من الإلكترونات في حين أنه يتسع إلى $6N$ من الإلكترونات وبالتالي لمليء هذا النطاق بالإلكترونات نحتاج إلى $4N$ من الإلكترونات، لذلك يحدد هذا النطاق تكافؤ العنصر ويدعى بنطاق التكافؤ (Valence Band). كذلك يوجد نطاق طاقة أعلى من نطاق التكافؤ وهو النطاق الناتج عن انتقال إلكترون من مستوى الطاقة $2p$ إلى مستوى الطاقة $3s$ في حالة ذرة الكربون عند إثارة هذه الذرة، ويدعى هذا النطاق بنطاق التوصيل (Conduction Band) وهو نطاق فارغ تماماً من الإلكترونات.

1-4 تصنيف المواد حسب الموصلية للتيار

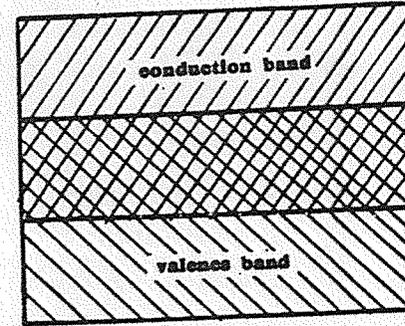
تصنف المواد حسب موصليتها للتيار الكهربائي إلى ثلاث أقسام هي: المواد العازلة واشباه الموصلات والمواد الموصلة، وذلك على ضوء نطاقات الطاقة لهذه المادة.

- المواد العازلة Insulators

المواد العازلة هي تلك المواد التي لا تسمح بمرور التيار الكهربائي من خلالها. وفي هذه المواد يكون "نوع النطاق المحظور كبيراً، أي أن الفرق في الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل كبير نسبياً، ويساوي تقريباً $3e$ إلكترون فولت (e.v) بحيث أنه إذا استخدمنا مجالاً كهربائياً لمنع أي إلكترون طاقة لنحطفي النطاق المحظور ستكون هذه الطاقة كبيرة جداً وتبلغ شدة المجال الكهربائي حوالي 6×10^8 v/cm تقريباً لذلك فإنه من المستحيل منع أي إلكترون هذه الطاقة. ويبين الشكل (4) تتابع نطاقات الطاقة في المواد العازلة.

المواد الموصلية Conductors

تتميز المواد الموصلية بعدم وجود نطاق محظور بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل، أي يتداخل كل من نطاقي التكافؤ والتوصيل فيما بينها. وبذلك نجد أن الكتلونات التكافؤ تكون هي نفسها الكتلونات التوصيل. وعند تواجد مجال كهربائي ما تكتسب هذه الكتلونات طاقة إضافية مما يؤدي إلى انتقالها بسير وسهولة بين مستويات الطاقة المختلفة. ويبين الشكل (6) نطاقات الطاقة للمواد الموصلية.



شكل 6 تتابع نطاقات الطاقة للمواد الموصلية

وإذا أثرنا على المعدن بمجال كهربائي منتظم، نجد أن هذه الكتلونات تبدأ بزيادة سرعتها بعكس اتجاه المجال الكهربائي. ونتيجة للتصادم بين الكتلونات والأيونات في النسق البلوري لذرات المعدن نجد أن هذه الكتلونات تخسر جزء من طاقتها بحيث تصل في النهاية إلى سرعة ثابتة تعرف باسم سرعة السحب (Drift Velocity). وتبين العلاقة التالية ارتباط سرعة السحب في شدة المجال الكهربائي E

$$v = \mu E \quad (5-1)$$

حيث μ الناقلية (Mobility) وهي تعبر عن مدى حرية حركة الكتلونات داخل النسق البلوري للمادة الموصلية للتيار. وبذلك نجد أن حركة الكتلونات داخل المادة الموصلية أصبحت ذات حركتين الأولى عشوائية والآخرى ناتجة عن وجود المجال الكهربائي ولها اتجاه محدد، ونتيجة لحركة الكتلونات هذه يسري تيار كهربائي في المادة الموصلية.

فإذا كانت كثافة الكتلونات الحرة في المعدن، أي عدد الكتلونات في وحدة الحجم m^3 تساوي n نجد أن كثافة التيار الكهربائي (أي شدة التيار الكهربائي في وحدة المساحة بالأبسط لكل متر مربع A/m^2) يعبر عنها حسب العلاقة التالية

$$J = nq v \quad (6-1)$$

وبتمويض العلاقة (5-1) في العلاقة (6-1) نجد أن

$$J = nq \mu E = \sigma E \quad (7-1)$$

حيث $\sigma = nq\mu$ وتعرف بالموصلية (Conductivity) ووحدة قياسها هي $(\Omega \cdot m)^{-1}$.

وبين الجدول الموضح بالشكل (7) قيم كل من الناقلية والموصلية لبعض المعادن وأشباه الموصلات.

المادة	الناقلية Mobility	الموصلية conductivity
النحاس (Cu)	3×10^{-3}	62.5×10^6
الفضة (Ag)	5×10^{-3}	58.1×10^6
الجرمانيوم (Ge)	0.39	2.2
السيلكون (s)	0.14	0.43×10^{-3}

شكل 7 بعض قيم الناقلية والموصلية لأهم المعادن وأشباه الموصلات

Mobility and Conductivity

3-1 الناقلية والموصلية:

عرفنا فيما سبق أنه لا وجود للنطاق المحظور في المواد الموصلية للتيار الكهربائي، ويرجع السبب في ذلك إلى التداخل الحاصل بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل. وقد وجدنا أن الكتلونات التكافؤ تكون مرتبطة ارتباطاً ضعيفاً بنواة ذرتها ويكون هذا الارتباط مثل ارتباطها بنواة أي ذرة أخرى في المادة الموصلية، وبذلك نجد أن هذه الكتلونات تتحرك بحرية بين ذرات المادة.

وبناءً على ذلك يمكن القول أن المادة الموصلية للتيار الكهربائي ذات تركيب بلوري تحتوي على أيونات مرتبة على نمط هندسي معين ومرتبطة ارتباطاً وثيقاً ببعضها تسمح فيما بينها بحرية من الكتلونات الحرة. وتكون هذه الكتلونات ذات حركة مستمرة وعشوائية، حيث يتغير اتجاه حركة أي الكتلونات من هذه الكتلونات عند اصطدامه بأحد الأيونات. ونتيجة لذلك نجد أن التيار الكهربائي الناتج عن هذه الحركة العشوائية يكون مساوياً للصفر.

اشباه الموصلات والديودات Semiconductors and Diodes

مقدمة:

لقد تعرفنا في الوحدة الاولى على كيفية التمييز بين المواد الموصلة للتيار الكهربائي والمواد العازلة واشباه الموصلات. حيث وجدنا ان فرق الطاقة بين نطاقي التكافؤ والتوصيل اي عرض النطاق المحظور هو الذي يحدد طبيعة المادة هل هي موصلة أم شبه موصلة ام عازلة.
وسوف نتعرف في هذه الوحدة على كيفية التوصيل في اشباه الموصلات بالإضافة الى دراية الديودات وكيفية تحليل دوائر الديودات والتعرف على اهم الديودات الخاصة.

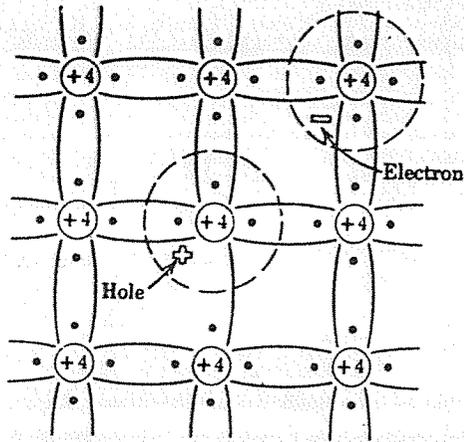
1-2 اشباه الموصلات النقية Intrinsic Semiconductors

تقع عناصر اشباه الموصلات المستخدمة في الاغراض الالكترونية ضمن المجموعة الرابعة في الجدول الدوري (Periodic Table) اي ان هذه العناصر رباعية التكافؤ. ومن اشهر هذه العناصر السيليكون Si والجرمانيوم Ge. وتتميز هذه العناصر بالتوزيع الالكتروني المشابه لمستويات الطاقة في كل منها، حيث ان التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة لعنصر السيلكون هو $1s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^4$ كما أن التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة حول نواة ذرة الجرمانيوم هو $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^4, 3d^{10}, 4s^2, 4p^2$ ونلاحظ مما سبق ان مستوى الطاقة الخارجي لهذه العناصر يحتوي على اربع الكترونات تكافؤ تشترك فيما بينها في روابط تساهمية (covalent bonds) لتكوين بلورة (Crystal) المادة. والتركييب العام للبلورة هو عبارة عن ترابط مجموعة من ذرات المادة في شكل هندسي دقيق منتظم ومتكرر يدهى بالنسق البلوري (Crystalline Lattice) ويبين الشكل (1) تركيباً بلورياً رباعياً لأشباه الموصلات وكما هو واضح من الشكل ان وحدة خلية البلورة تتكون من ذرة مركزة في مركز المكعب تحيط بها اربع ذرات موجودة في اربع زوايا من زوايا المكعب الثمانية. وتتكرر وحدة الخلية هذه بانتظام مكونة بلورة شبه الموصل. ولأجل التبسيط والايضاح سوف نختزل البناء البلوري لأشباه الموصلات الى مستوى واحد ذو بعدين كما هو مبين في الشكل (2) وترمز الدوائر في هذا الشكل الى قلب ذرة اشباه الموصلات سواء كانت

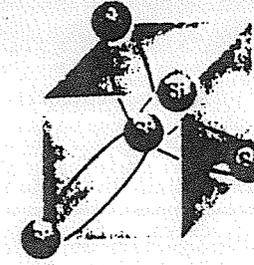
(Conduction band) ونلاحظ ان كل الكترون من الالكترونات التكافؤ مرتبط بذرتين ولا يوجد اي الكترون حر لذلك فان اشباه الموصلات من السيلكون والجرمانيوم تسلك سلوك العازل المثالي. حيث تكون جميع الالكترونات في اقل مستوى طاقة ممكن لها. ويكون الفرق في الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل اي عرض النطاق المحظور للجرمانيوم 0.785 eV والسيلكون 1.21 eV .

1-1-2 توليد الالكترونات والفجوات واعادة الاتحاد

عند ارتفاع درجة حرارة البلورة الى درجة حرارة الغرفة (300°K) تكتسب الالكترونات التكافؤ طاقة حركية كافية لكسر بعض الروابط التساهمية ونتيجة لذلك يخرج الكترون من نطاق التكافؤ الى خارج تركيب النسق البلوري وبذلك يصبح هذا الالكترون حراً ويشترك في التوصيل الكهربائي وتبقى ذرته موجبة الشحنة. ويخلف كل الكترون يتحرر من النسق البلوري مكانه فارغاً حيث يدعى هذا المكان بالفجوة (Hole) كما هو مبين بالشكل (3). وتكمن اهمية الفجوة في انها تعتبر ناقلة للتيار الكهربائي شأنها في ذلك شأن الالكترون. فعندما تتكون فجوة نتيجة تحرر الكترون من النسق البلوري يصبح من السهل على اي الكترون آخر في ذرة مجاورة ان يتحرر ويتحرك ليملا هذه الفجوة مخلفاً مكانه فجوة اخرى. وهكذا فانه عندما تتحرر الكترونات نتيجة لوجود البلورة في درجة حرارة معينة تتكون فجوات موجبة الشحنة يمكن الافتراض ان حركتها في الاتجاه المعاكس لحركة الالكترونات. تدعى كل من الالكترونات والفجوات هذه بمحملات الشحنة (Charge Carriers) ويشترك كل منها بالتوصيل الكهربائي.

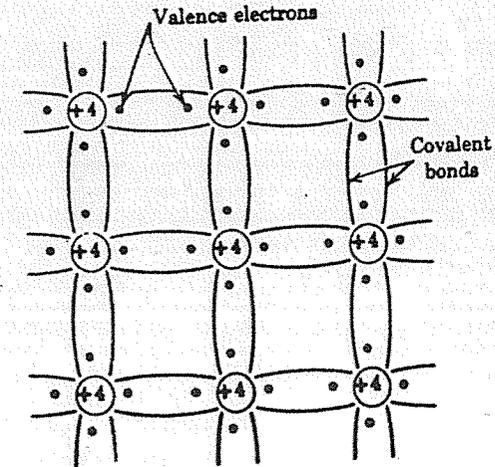


شكل 3 كيفية تحرر الالكترون وتكون الفجوة



شكل 1 نموذج ثلاثي الابعاد لشبكة بلورة اشباه الموصلات.

سيلكون أو جرمانيوم والمكونة من النواة والالكترونات مستويات الطاقة الداخلية. وقد رمزنا للالكترونات التكافؤ الاربعة بالنقاط المحيطة بالدائرة. ونتيجة ارتباط كل الكترون تكافؤ بالذرة الخاصة به وبذرة أخرى مجاورة تنتج قوى ترابط بين هذه الذرات ويدعى هذا الترابط بالرابطة التساهمية (Covalent band) وقد عبرنا عنها بمخطين يصلان بين قلب الذرتين المتجاورتين.



شكل 2 نموذج لمستوى واحد ذو بعدين لشبكة بلورة اشباه الموصلات

عند درجة حرارة الصفر المطلق (0°K) تكون جميع الالكترونات التكافؤ لاشباه الموصلات موجودة في نطاق التكافؤ (Valence band) ولا يوجد من هذه الالكترونات في نطاق التوصيل

$$(1-2) \quad n_i = P_i$$

حيث n_i عدد الكثرونات التوصيل في وحدة الحجم (m^3) (كثافة الالكترونات)، عدد فجوات التوصيل في وحدة الحجم (m^3) (كثافة الفجوات) كما أن كثافة كلاً من الالكترونات والفجوات يعتمد على نوع المادة سواء كانت سيلكون أو جرمانيوم ويعتمد كذلك على درجة حرارة المادة. حيث وجد أن العلاقة التي تحدد قيمة عدد الكثرونات التوصيل حسب نظريات ميكانيكا الكم هي كما يلي:

$$n_i = 2 \frac{(2\pi mKT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right)$$

$$(2-2) \quad = 5 \times 10^{21} T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right)$$

حيث m كتلة الالكترون

K ثابت بولتزمان

T درجة الحرارة المطلقة

h ثابت بلانك

E_g الفرق في الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل (فجوة الطاقة)

مثال 1:

اوجد عدد كل من الكثرونات التوصيل وفجوات التوصيل لعنصري السيلكون والجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة ($300^\circ K$)، اذا علمنا ان قيمة فجوة الطاقة لكل من السيلكون والجرمانيوم يساوي 1.1 eV و 0.75 eV على التوالي وان قيمة ثابت بولتزمان يساوي ($138 \times 10^{-23} \text{ J/K}^\circ$)

الحل:

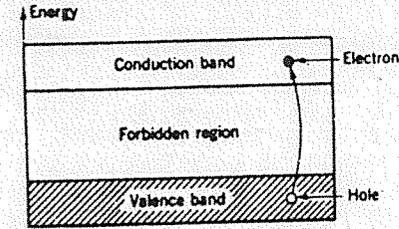
حسب العلاقة (2.2) نجد أن عدد الكثرونات التوصيل في وحدة الحجم لعنصر السيلكون

يساوي

$$n_i = 5 \times 10^{21} T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right)$$

$$E_g = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.1 = 1.76 \times 10^{-19} \text{ J}$$

وبين الشكل (4) نطاقات الطاقة لاشباه الموصلات النقية عند تعرضها لدرجة حرارة الغرفة، حيث نجد أن الكثرون من نطاق التكافؤ يمتلك طاقة كافية لنقله من نطاق التكافؤ (المليء بالالكترونات) الى نطاق التوصيل (الفارغ من الالكترونات)، تاركاً خلفه فجوة (Hole) في نطاق التكافؤ. وكما ذكرنا سابقاً انه من السهل على اي الكثرون آخر في اي ذرة مجاورة ان يتحرر ويتحرك ليملاً هذه الفجوة الموجبة الشحنة. حيث تدعى هذه العملية بعملية اعادة الاتحاد (Recombination). وعندما يعيد الالكترون الاتحاد مع فجوة فان هذا الالكترون يفقد طاقته على شكل حرارة أو ضوء احياناً. ومن المؤثرات الخارجية التي تؤدي الى توليد الالكترونات والفجوات تعرض مادة اشباه الموصلات الى اشعة ضوئية أو اشعاعات كهرومغناطيسية بالاضافة الى تعرضها الى الحرارة.



شكل 4 نطاقات الطاقة لاشباه الموصلات عند درجة حرارة الغرفة.

1-2-2 حالة الاستقرار لاشباه الموصلات النقية

عندما يتحرر الكثرون من الرابطة التساهمية بين ذرات النسق البلوري لاشباه الموصلات فانه يتحرك حركة عشوائية بين الذرات، واذا ما اقترب هذا الالكترون من فجوة فمن الممكن ان يتحد معها من جديد فيما يدعى بعملية اعادة الاتحاد.

وفي حالة الاستقرار يتساوى عدد الروابط التساهمية التي تنكسر مولدة بذلك ازواج من الالكترون - الفجوة (electron-hole pairs) مع عدد الروابط التساهمية التي تكتمل نتيجة عملية اعادة الاتحاد (Recombination) بين الكثرون وفجوة. وهذا ما يدعى بالاتزان الديناميكي في البلورة حيث يوجد عدد ثابت من الالكترونات والفجوات.

وجدير بالذكر ان عدد الالكترونات الحرة في وحدة الحجم يتساوى مع عدد فجوات التوصيل لاشباه الموصلات النقية اي ان

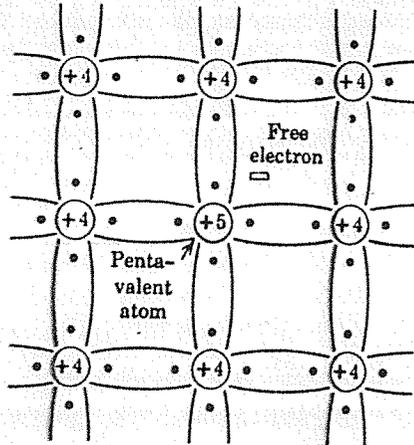
(n-type Semiconductor)

1.2.2 اشباه موصلات من نوع n-

يمكن زيادة موصلية اشباه الموصلات النقية مثل السيلكون والجرمانيوم عند اضافة شوائب من مواد خاسية التكافؤ (اي عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري) الى مادة شبه الموصل النقي. ويعتبر الفسفور P والانتيمون Sb والزرنيخ As من اكثر عناصر المجموعة الخامسة استخداماً لهذا الغرض.

عند اضافة اي من المواد خاسية التكافؤ الى بلورة السيلكون أو الجرمانيوم النقي بواسطة عملية التطعيم (doping)، فان شبه الموصل يكتسب موصلية اضافية تعرف بالموصلية الالكترونية وبذلك فاننا نشكل مادة من نوع n- (n-type). في المادة نوع n- تضيف الذرة الخاسية التكافؤ إلكترونات حراً الى النسق البلوري. حيث ان الذرة الخاسية التكافؤ ترتبط مع أربعة ذرات مجاورة من ذرات شبه الموصل النقي بأربعة إلكترونات من إلكتروناتها الخمسة الموجودة في مستوى الطاقة الخارجي لها وذلك لأن النسق البلوري لا يحتاج الا لأربعة روابط تساهمية فقط. اما الإلكترون الخامس فيصبح ارتباطه بذرة العنصر الشائب ضعيف جداً وسرعان ما يصبح حراً.

وكنتيجة للعملية السابقة تظهر كمية من الإلكترونات الحرة يكون عددها مساوياً لعدد ذرات المادة الشائبة الداخلة في عملية التطعيم ويدعى هذا النوع من الشوائب الخاسية التكافؤ بالشوائب المانحة أو الشوائب الواهبه (donor impurity) حيث تهب ذرة الشائب إلكترونات من إلكتروناتها الخمسة ليشارك في التوصيل الكهربائي. ويبين الشكل (5) شبكة بلورة شبه الموصل عند اضافة مادة خاسية التكافؤ الى شبه الموصل النقي.



شكل 5 شبكة بلورة المادة نوع n-

$$n_i = 5 \times 10^{21} (300^\circ\text{K})^{3/2} \exp\left(\frac{-1.76 \times 10^{-19} \text{ J}}{2 \times 138 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 300^\circ\text{K}}\right)$$

$$= 1.58 \times 10^{16}$$

وبما أن عدد إلكترونات التوصيل في وحدة الحجم يساوي عدد الفجوات في وحدة الحجم لشبه الموصل النقي، إذاً

$$p_i = n_i = 1.58 \times 10^{16}$$

أما بالنسبة لعنصر الجرمانيوم

$$E_g = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.75 = 1.2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$n_i = 5 \times 10^{21} \times (300)^{3/2} \exp\left(-\frac{1.2 \times 10^{-19}}{2 \times 138 \times 10^{-23} \times 300}\right)$$

$$= 2.4 \times 10^{19}$$

$$p_i = n_i = 2.4 \times 10^{19}$$

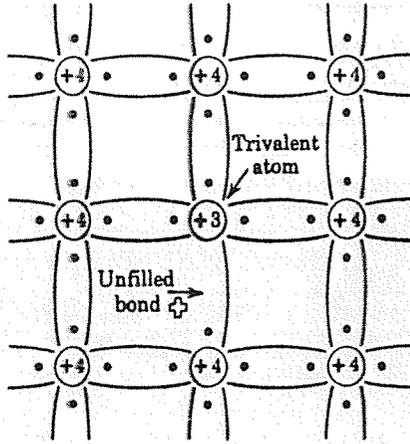
Impurity Semiconductors

2.2 أشباه الموصلات ذات الشوائب

مما سبق يتضح ان موصلية اشباه الموصلات النقية تعتبر صغيرة جداً اذا ما قورنت مع موصلية المعادن مثل الفضة والنحاس. حيث يكون عدد الإلكترونات الحرة مساوياً لعدد الفجوات. وعند تعرض المادة شبه الموصلية للضوء أو الحرارة تتولد أزواج من الإلكترونات والفجوات في الوقت الذي تختفي فيه أزواج اخرى نتيجة عملية اعادة الاتحاد.

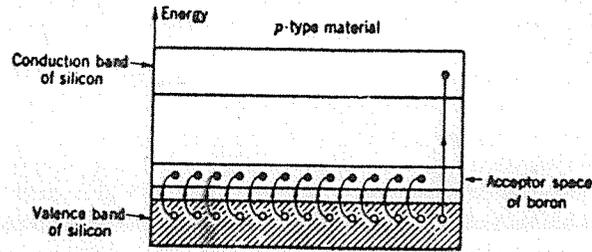
يمكن زيادة موصلية اشباه الموصلات النقية وذلك باضافة شوائب خاسية التكافؤ أو باضافة شوائب من مواد ثلاثية التكافؤ الى مادة شبه الموصل النقي وبمعدل مسيطر عليه، حيث تكون نسبة الشوائب المضافة الى السيلكون أو الجرمانيوم النقي نسبة صغيرة جداً تصل الى حوالي ذرة لكل مليون ذرة من السيلكون أو الجرمانيوم. تدعى عملية اضافة الشوائب هذه بعملية التطعيم (doping)، كما يدعى شبه الموصل في هذه الحالة بشبه الموصل ذي الشوائب (Impurity). تصنف اشباه الموصلات ذات الشوائب من حيث المواد المضافة اليها الى اشباه موصلات الكترونية التوصيل (n-type semiconductor) أو اشباه موصلات من النوع السالب (n-type) واشباه موصلات من النوع الموجب (P-type Semiconductor).

وكنتيجة للمعملية السابقة تظهر كمية من الفجوات الحرة يكون عددها مساوياً لعدد ذرات المادة الشائبة الداخلة في عملية التطعيم تشترك في التوصيل الكهربائي.



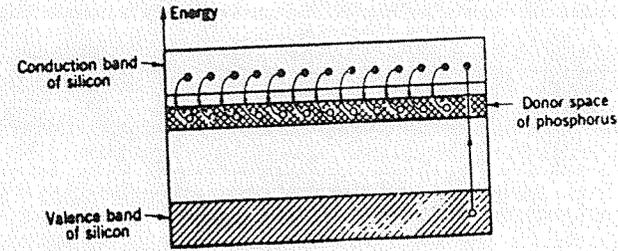
شكل 7 شبكة بلورة شبه الموصل نوع P-

بما سبق يتضح انه بالامكان زيادة موصلية شبه الموصل النقي وذلك باضافة احدى عناصر المجموعة الثالثة (group III) اليه، تؤدي عملية التطعيم هذه الى تشكيل مستوى يقع فوق نطاق التكافؤ، ويكون فرق الطاقة بين هذا المستوى ونطاق التكافؤ قليل جداً اذا ما قورن بفرق الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل. ويحدث التوصيل الكهربائي عند انتقال الالكترونات من نطاق التكافؤ الى هذا المستوى، ويدعى هذا المستوى بالمستوى الكاسب (Acceptor Level) لان



شكل 8 نطاقات الطاقة في المادة نوع P-

كما هو معروف ان الطاقة اللازمة لكسر الروابط التساهمية في اشباه الموصلات النقية تساوي فرق الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل وتكون قيمة هذه الطاقة بحدود 1.1 eV في حالة السيلكون و 0.75 eV في حالة الجرمانيوم. اما عند تشكيل مادة شبه موصل من نوع n- (n-type) فانه يتشكل مستوى طاقة للالكترونات الاضافية يقع تحت نطاق التوصيل ويكون فرق الطاقة بين هذا المستوى ونطاق التوصيل بحدود 0.01 eV فقط. ويدعى هذا المستوى بالمستوى المانح أو الواهب (Donor Level)، حيث تنتقل الالكترونات من هذا المستوى الى نطاق التوصيل كما هو مبين بالشكل (6).



شكل 6 المستوى الواهب في المادة نوع n-

2-2-2 اشباه الموصلات من النوع P-

P-type Semiconductor

تدعى العناصر التي يحتوي مستوى الطاقة الخارجي لها على ثلاثة الكترونات بالعناصر الثلاثة التكافؤ، وهي تمثل عناصر المجموعة الثالثة في الجدول الدوري، ومن هذه العناصر البورون B والالومنيوم Al والاندسيوم In.

فاذا ما اضيف الى مادة السيلكون أو الجرمانيوم النقي شوائب من مادة ثلثية التكافؤ، فإن الالكترونات الثلاثة للمادة الشائبة ترتبط بروابط تساهمية بينما تبقى الرابطة الرابعة غير مكتملة مما يؤدي الى تكون فجوة (Hole)، اي ان المادة الشائبة ترتبط بأربعة ذرات مجاورة من مادة شبه الموصل النقي وبما أن للمادة الشائبة ثلاث الكترونات تكافؤ فإنها تستقبل الالكترون الرابع من ذرة سيلكون أو جرمانيوم مما يؤدي الى تكون فجوات في ذرات شبه الموصل النقي. تدعى ذرات الشوائب التي تستقبل الالكترونات بالشوائب الكاسبة (Acceptor) وبين الشكل (7) شبكة بلورة شبه الموصل نوع P-

الالكترونات التي تنتقل اليه تكون نتيجة استقبال ذرة الشائب للالكترونات لانعام روابطها التساهمية وتكون الفجوات في ذرات شبه الموصل النقي. تدعى هذه المادة باشباه الموصلات من النوع P- لان التوصيل الكهربائي يكون نتيجة حركة الفجوات الموجبة الشحنة. وبين الشكل (8) نطاقات التوصيل والمستوى المكاسب في المادة نوع P- (P-type).

3-2 الحاملات الغالبة والأقلية Majority and Minority Carriers

في اشباه الموصلات ذات الشوائب لا يكون عدد الالكترونات مساوياً لعدد الفجوات. وقد اتضح لنا مما سبق ان موصلية اشباه الموصلات تزداد لدرجة كبيرة عند اضافة اي من المواد الشائبة الى مادة شبه الموصل. حيث تكون حاملات التيار إما الكترونات أو فجوات.

عند درجة حرارة الصفر المطلق (0°K) تكون حاملات التيار هي الالكترونات فقط لاشباه الموصلات من النوع n- وفجوات فقط لاشباه الموصلات من النوع P-. أما عند ازدياد درجة الحرارة وعند درجة حرارة (300°K) نجد أنه بالإضافة للالكترونات أو الفجوات الناتجة عن اضافة الشوائب تتكون أزواج من الالكترونات والفجوات الذاتية. اي انه بالإضافة الى حاملات التيار الناتجة عن الشوائب توجد حاملات تيار ذاتية. وقد حددنا في البند (2.1-2) عدد الالكترونات والشقوق الذاتية لكل من الجرمانيوم والسيلكون، وقد وجدنا انه بالنسبة للسيلكون يكون عدد الحاملات في وحدة الحجم $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{16}$ وعند اضافة شوائب من مواد خماسية التكافؤ الى السيلكون النقي بنسبة ذرة الى كل مليون ذرة من السيلكون، فان عدد الكترونات الشوائب Nd لكل وحدة حجم يساوي نسبة كثافة الذرات 6×10^{23} ذرة/م³ الى كثافة الشائب.

$$Nd = \frac{6 \times 10^{23}}{106} = 6 \times 10^{22}$$

وبذلك تكون نسبة حاملات التيار الناتجة عن الشوائب الى حاملات التيار الذاتية هي

$$\frac{6 \times 10^{22}}{1.5 \times 10^{16}} = 4 \times 10^6$$

وبذلك يصبح العدد الكلي للالكترونات في وحدة الحجم هو

$$1.5 \times 10^{16} + 6 \times 10^{22} \approx 6 \times 10^{22}$$

ونجد أن العدد الكلي للفجوات لم يتغير ويساوي 1.5×10^{16} في وحدة الحجم.

مما سبق نستطيع استنتاج ما يلي

- في اشباه الموصلات من النوع n- تكون الالكترونات هي حاملات التيار الأغلبية (Majority Carriers) وتكون الفجوات هي حاملات التيار الأقلية (Minority Carriers).
- في اشباه الموصلات من النوع P- تكون الفجوات هي حاملات التيار الأغلبية (Majority Carriers) وتكون الالكترونات هي حاملات التيار الأقلية (Minority Carriers).

وعلى الرغم من ان عدد حاملات التيار الغالبة يكون أكبر كثيراً من حاملات التيار الأقلية الا ان للأخيرة أهمية كبيرة وخاصة عند دراسة الديودات والترانزستورات.

4-2 معدل التوليد واعادة الاتحاد

Generation and Recombination Rates

لقد وجدنا ان اضافة الشوائب الى اشباه الموصلات التقية تؤدي الى ظهور حاملات تيار غالبة وحاملات تيار أقلية. اي ان كثافة اي من الالكترونات أو الفجوات قد تزداد أو تقل تبعاً لنوع مادة شبه الموصل المطعمة بالشوائب. كما ان اضافة الشوائب تؤدي الى انخفاض نسبة حاملات التيار الأقلية الذاتية.

لقد وجدنا من العلاقة (1-2) ان عدد الالكترونات الحرة في وحدة الحجم يساوي مع عدد الفجوات قبل اضافة الشوائب. أي ان عدد حاملات التيار الذاتية قبل اضافة الشوائب هو

$$n_i = p_i$$

وتعتمد فرصة اعادة الاتحاد على احتمال تواجد الكترون بالقرب من احدى الفجوات. لذلك فانه كلما ازداد عدد كل من الالكترونات والفجوات كلما ازدادت فرصة اعادة الاتحاد. ونجد ان معدل اعادة الاتحاد يعتمد على كثافة كل من الالكترونات والفجوات حسب العلاقة التالية

$$R = K n_i p_i \quad (3-2)$$

حيث R معدل إعادة الاتحاد
 K ثابت

وعند الاستقرار يكون معدل اعادة الاتحاد مساوياً لمعدل توليد أزواج من الالكترونات والفجوات اي ان

الاقلية في وحدة الحجم، حيث نجد ان عدد الحاملات الاقلية في وحدة الحجم بالنسبة لشبه الموصل من النوع n يساوي

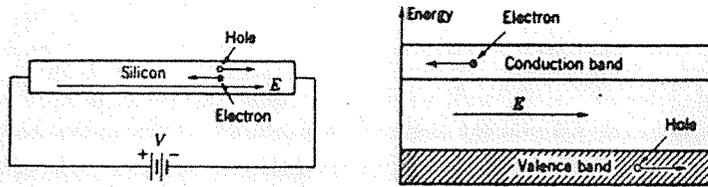
$$(11-2) \quad P = \frac{n_i^2}{N_d}$$

كما ان عدد الحاملات الاقلية في وحدة الحجم بالنسبة لشبه الموصل من النوع P هو

$$(12-2) \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

5-2 التوصيل عند تواجد مجال كهربائي

لقد وجدنا ان شبه الموصل النقي يتميز بوجود عدد من الالكترونات الحرة في وحدة الحجم مساوياً تماماً لعدد الفجوات. كما ان الموصلية الكهربائية في شبه الموصل النقي تتكون من موصلية الكترونية واخرى فجواتية كما هو مبين بالشكل (9)، حيث أن الموصلية الالكترونية تكون هي الغالبة على الرغم من تساوي عدد الالكترونات والفجوات. ويرجع السبب في ذلك الى ان الالكترونات تتحرك باتجاه القطب الموجب بسرعة اكبر بكثير من حركة الفجوات باتجاه القطب السالب. حيث ان الفجوة تنتقل من ذرة الى ذرة اخرى مجاورة لها في النسق البلوري فتحصل منها على الكترون فتصبح الاولى متعادلة وتتكون الفجوة في الذرة المجاورة. لذلك نجد ان احتمالية امتلاك الالكترون لطاقة كافية تمكنه من الحركة الى حالة فارغة (empty state) في نطاق التوصيل (الذي يكون غالباً فارغ) اكبر بكثير من احتمالية اختلال الالكترون لطاقة كافية تمكنه من الحركة الى حالة فارغة في نطاق التكافؤ (الذي يكون في الغالب مليء). وبالتالي ان التيار الناتج عن حركة الالكترون في نطاق التوصيل يكون أكبر من التيار الناتج عن حركة الفجوات. ومع ذلك فان التيار المجمع يكون صغيراً لان المادة هي مادة شبه موصل نقي.



شكل 9 حركة الالكترونات والفجوات عند تواجد مجال كهربائي

$$(4-2) \quad g = R = K n_i p_i$$

حيث g معدل التوليد

وبما أن اضافة الشوائب لا تؤثر في معدل توليد ازواج الالكترونات والفجوات الذاتية. لذلك فان اضافة الشوائب يبقي معدل التوليد ثابتاً وهو

$$(5-2) \quad g = KnP$$

حيث n كثافة الالكترونات عند اضافة الشوائب (عدد الالكترونات في وحدة الحجم) و p كثافة الفجوات عند اضافة الشوائب (عدد الفجوات في وحدة الحجم).

وبالمقارنة بين العلاقتين (4-2) و (5-2) نجد أن

$$(6-2) \quad np_i = nP = n_i^2 = P_i^2$$

وهذا يعني أنه نتيجة لاضافة الشوائب، اذا ما زادت قيمة اي من n أو p فان ذلك يؤدي الى انخفاض في عدد الفجوات الذاتية او الالكترونات الذاتية وذلك للمحافظة على حاصل الضرب ثابتاً في العلاقة السابقة.

وهذا يقودنا الى ان عدد حاملات التيار لشبه الموصل من النوع n - والذي يحتوي على شوائب واهبه (donor Impurity) عددها N_d ذرة لكل متر مكعب هو كما يلي

$$(7-2) \quad n = n_i + N_d$$

وبما أن قيمة N_d اكبر كثيراً من قيمة n_i لذلك يمكن تقريب العلاقة (7-2) الى العلاقة التالية

$$(8-2) \quad n \cong N_d$$

أما بالنسبة لشبه الموصل من النوع p - والذي يحتوي على شوائب كاسبه (Acceptor Impurity) عددها N_A ذرة لكل متر مكعب فان عدد حاملات التيار هو

$$(9-2) \quad P = P_i + N_A$$

ولكن وبما أن $P_i \ll N_A$ لذلك يمكن تقريب العلاقة (9-2) الى العلاقة التالية

$$(10-2) \quad P \cong N_A$$

وبتعويض كل من العلاقتين (8-2) و (10-2) في العلاقة (6-2) يمكن تحديد عدد الحاملات

2-6 التوصيل عند تواجد تفاوت كثافي:

بالإضافة الى التيار الناتج عن تأثير المجال الكهربائي على اشباه الموصلات، فإنه من الممكن ان توجد تيارات اخرى ناتجة عن اختلاف تركيز حاملات التيار من موضع الى آخر. حيث تسمى هذه التيارات بتيارات الانتشار (Diffusion Currents) وتكون قيمة تيار الانتشار متناسبة مع قيمة التفاوت الكثافي للشحنات.

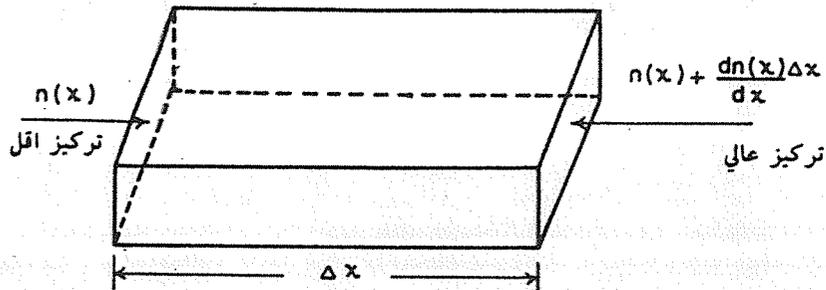
ان انتشار الحاملات من الوسط الاكثر تركيزاً الى الوسط الاقل تركيزاً يخضع لنفس قوانين انتشار جزيئات الغاز. لذا فإن قوانين الانتشار للغازات هي نفسها المستخدمة لانتشار الحاملات. لتعرض ان كثافة الشحنات عند النقطة x هي $n(x)$ وبالرجوع الى الشكل (10) نجد أن الالكترونات تنتشر باتجاه x وينتج عن انتشارها تيار انتشار قيمته كما يلي

$$J_{nd} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (18-2)$$

حيث ان D_n معامل الانتشار للالكترونات. أما بالنسبة للفجوات

$$J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (19-2)$$

حيث أن D_p معامل الانتشار للفجوات. والاشارة السالبة في العلاقة (19-2) تدل على ان تيار انتشار الفجوات هو في الاتجاه المعاكس لتيار سريان الفجوات نتيجة تأثير مجال كهربائي على مادة شبه الموصل.



شكل 10 انتشار حاملات التيار

لقد وجدنا في البند (5-1) ان الالكترونات اثناء حركته بين ذرات النسق البلوري يغير اتجاه حركته نتيجة لتصادمه مع ذرات النسق البلوري. فاذا اخذنا في الاعتبار ان اعداد كبيرة من الالكترونات الحرة تتحرك فاننا نجد أن محصلة هذه الحركة تكون مساوية للصفر وبالتالي لا ينتج عن هذه الحركة اي تيار كهربائي. أما في حالة وجود مجال كهربائي فإنه بالإضافة الى حركة الالكترونات العشوائية توجد سرعة سحب لهذه الالكترونات ناتجة عن هذا المجال الكهربائي ويكون اتجاهها في اتجاه القوة المؤثرة على الالكترونات.

فاذا كان لدينا مادة شبه موصل تحتوي على عدد من الالكترونات في وحدة الحجم n وعدد من الفجوات p . فاننا نجد ان كثافة التيار الناتجة عن حركة الالكترونات تساوي

$$J_n = -qn\mu_n E \quad (13-2)$$

حيث ان q هي شحنة الالكترون، μ_n هي الناقلية للالكترونات كما ان كثافة التيار الناتجة عن حركة الفجوات هي

$$J_p = +q p\mu_p E \quad (14-2)$$

حيث ان μ_p هي الناقلية للفجوات.

وبما أن للتيار مركبتين احدها ناتجة عن حركة الالكترونات والاخرى ناتجة عن حركة الفجوات بعكس اتجاه حركة الالكترونات. أي أن

$$J = J_n + J_p \quad (15-2)$$

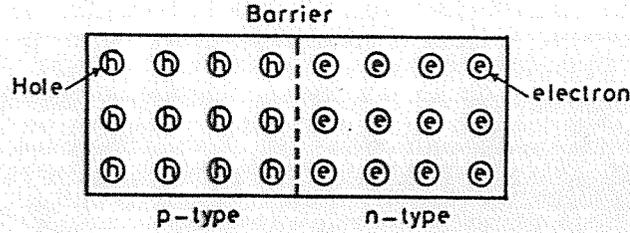
وبتعويض العلاقاتين (13-2) و (14-2) في العلاقة (15-2) نجد أن التيار المجمع الذي يمر بشبه الموصل هو

$$J = qn\mu_n E + qp\mu_p E = (n\mu_n + p\mu_p) qE \quad (16-2)$$

وبالتالي نجد أن موصلية شبه الموصل تساوي

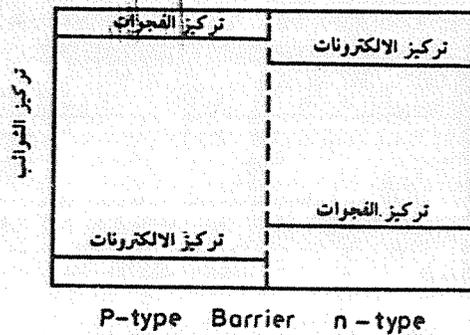
$$\begin{aligned} \sigma &= J/E \\ \sigma &= q (n\mu_n + p\mu_p) \\ &= \sigma_n + \sigma_p \end{aligned} \quad (17-2)$$

حاملات التيار في الجزء الايمن والذي يحتوي على مادة نوع n هي الكترونات. وقد رمزنا في هذا الشكل الى الفجوات المتولدة في الجزء الايسر بدوائر بداخلها حرف h كما رمزنا الى الالكترونات المتولدة في الجزء الايمن بدوائر بداخلها حرف e .



شكل 11 تركيب ثنائي الوصلة $p-n$

وبين الشكل (12) تركيز كل من الالكترونات والفجوات على جانبي الحاجز أو الملتقى عند درجة حرارة الغرفة وعندما يكون تركيز الشوائب بنسبة ذرة الى كل مليون ذرة.



شكل 12 تركيز كل من الالكترونات والفجوات على جانبي الحاجز

8-2 ثنائي الوصلة $p-n$ عند الاستقرار

لقد اوضحنا في البند (4-2) ان تركيز الفجوات في المادة نوع p يساوي تركيز الذرات الكاسبه ($p = N_A$) كما أن تركيز الالكترونات في المادة نوع n يساوي تركيز الذرات الواهبه (N_D)

وبالتالي نجد أن كثافة تيار الانتشار الكلي هو

$$(20-2) \quad J = qD_n \frac{dn(x)}{dx} - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

ونستطيع تحديد العلاقة بين الحركية ومعامل الانتشار حسب معادلة اينشتين كما يلي

$$(21-2) \quad \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{\mu_n}{D_n} = \frac{q}{KT}$$

حيث K ثابت بولتزمان

T درجة الحرارة المطلقة

وبذلك تكون كثافة التيار الناتج عن المجال الكهربائي وعن التعاون الكثافي لشبه الموصل هو

$$(22-2) \quad J = qn\mu_n E + qp\mu_p E + qD_n \frac{dn(x)}{dx} - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

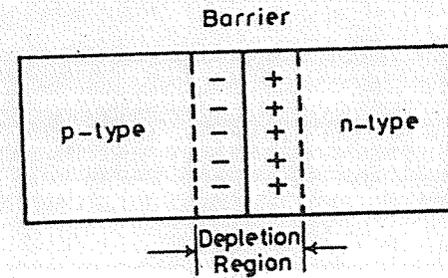
7-2 ثنائي الوصلة $p-n$

The $p-n$ Junction Diode

تسلك مادة شبه الموصل المطعمة بالنوع n أو النوع p سلوك الموصل للتيار الكهربائي. ولاستنباط قطع الكترونية تعمل بخاصية بعيدة عن سلوك شبه الموصل المنفرد لا بد من استخدام النوعين n و p في تشكيل هذه القطع.

يتم تشكيل ثنائي الوصلة $p-n$ (الديود) على بلورة احادية ومتصلة (single and Continuous Crystal) من مادة شبه موصل نقي (سيلكون أو جرمانيوم) طعم احدي اجزاء هذه البلورة بشوائب ماخه (Donor) وطعم الجزء الاخر بشوائب كاسبه (Acceptor) ويتم تطعيم هذه البلورة بالشوائب بطرق مختلفة اثناء اعداد البلورة الاحادية أو بعد اعدادها. وجدير بالذكر انه لا يمكن تشكيل ثنائي الوصلة $p-n$ بمجرد وضع قطعة من مادة شبه موصل نوع n ملاصقة لمادة نوع p لان عدم الاستمرارية في البناء البلوري لمادة شبه الموصل يؤدي الى ضياع كل الصفات التي شكل الديود من اجلها. وبين شكل (11) تركيب ثنائي الوصلة $p-n$ حيث يحتوي هذا التركيب على حاجز (Barrier) بين مادة شبه الموصل نوع p وبين المادة نوع n ، ونظراً لهذا التركيب تكون غالبية حاملات التيار في الجزء الايسر والذي يحتوي على مادة نوع p فجوات (Holes)، بينما تكون غالبية

($n =$ عند تشكيل ثنائي الوصلة $p-n$ يكون تركيز كل من الالكترونات والفجوات على جانبي الحاجز الفاصل بين المادتين n و p كما هو مبين في الشكل (12). ونتيجة لهذا الاختلاف في التركيز على جانبي الحاجز الفاصل فان حاملات التيار سوف تنتشر من الوسط الاكثر تركيزاً الى الوسط الاقل تركيزاً. حيث تنتشر الفجوات من المادة p الى المادة n كما تنتشر الالكترونات من المادة n الى المادة p . لذا نجد ان الفجوات القريبة من الحاجز الفاصل قد اختفت نتيجة انتشارها الى المادة نوع n واتحادها مع الالكترونات التي انتشرت هي الاخرى من المادة نوع n الى المادة نوع p . ونتيجة لعملية الانتشار والاتحاد هذه نجد ان المنطقة القريبة من الحاجز الفاصل اصحت لا تحتوي على الكترونات او فجوات حرة كما ان الشحنة في هذه المنطقة اصحت غير متعادلة لان الالكترون الذي يعبر الى المنطقة p يترك خلفه ذرته الام على شكل ايون موجب كما ان الفجوة التي تعبر من المنطقة p الى المنطقة n تبقى ذرتها الام على شكل ايون سالب. وهكذا تتكون شحنة فراغية (space-charge) على جانبي الحاجز الفاصل وتدعى هذه المنطقة التي تكونت فيها الشحنة الفراغية بمنطقة الاستنزاف (Depletion Region) أو منطقة الانتقال (Transition Region) أو بمنطقة الشحنة الفراغية. وبين الشكل (13) منطقة الاستنزاف في ثنائي الوصلة $p-n$.



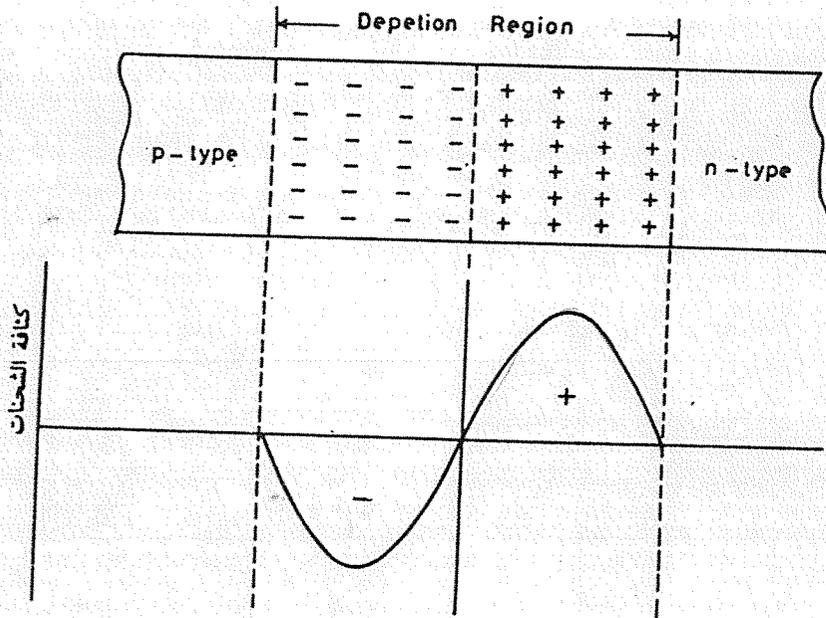
شكل 13 منطقة الاستنزاف في ثنائي الوصلة $p-n$

ويعتمد عرض منطقة الاستنزاف على نسبة تركيز الشوائب وعلى طريقة تشكيل البلورة.

2.2.1. تغير كثافة الشحنات في ثنائي الوصلة $p-n$

كما ذكرنا سابقاً انه نتيجة لانتشار الفجوات عبر الحاجز الفاصل من المنطقة p الى المنطقة n ، وعبور الالكترونات من المنطقة n الى المنطقة p ، نجد أن كثافة الالكترونات وكثافة الفجوات في منطقة الاستنزاف قد اصحت خالية تقريباً من حاملات الشحنة. وقد ذكرنا ان حاملات الشحنة

خارج منطقة الاستنزاف تكون أكبر بكثير منها داخل هذه المنطقة. وبين الشكل (14) كيفية تغير كثافة الشحنات سواء في منطقة الحاجز الفاصل او بعيداً عنها. ونلاحظ من الشكل (14) ان كثافة الشحنات الثابتة في الموقع تكون مساوية للصفر خارج منطقة الاستنزاف. نظراً لان الشحنات الثابتة في الموقع هي عبارة عن ايونات موجبة على الجانب n من الحاجز الفاصل وايونات سالبة على الجانب p من الحاجز الفاصل وهذه الايونات لا تساهم في التوصيل الكهربائي لانها ثابتة في المواقع المعينة للذرات في البلورة.



شكل 14 تغير كثافة الشحنات في ثنائي الوصلة $p-n$

2.2.2. توزيع المجال الكهربائي في ثنائي الوصلة $p-n$

لقد وجدنا ان الشحنة الفراغية داخل منطقة الاستنزاف تكون موجبة الشحنة في الجانب n وسالبة الشحنة في الجانب p . ونتيجة لهذا التوزيع للشحنات يتكون مجال كهربائي يكون اتجاهه من الشحنة الموجبة الى الشحنة السالبة اي من الجانب n الى الجانب p كما هو مبين في الشكل (15) يؤدي الى عرقلة انتشار الالكترونات الى الجانب p والفجوات الى الجانب n . وبذلك نجد أن الشحنة الفراغية في منطقة الاستنزاف يستمر تكوينها حتى تصبح شدة المجال الكهربائي المتولدة عنها

وبنفس الخطرات السابقة نستطيع اثبات ان القوة الكهربائية الناتجة عن المجال الكهربائي تساوي قوة الانتشار للثقوب اي أن:

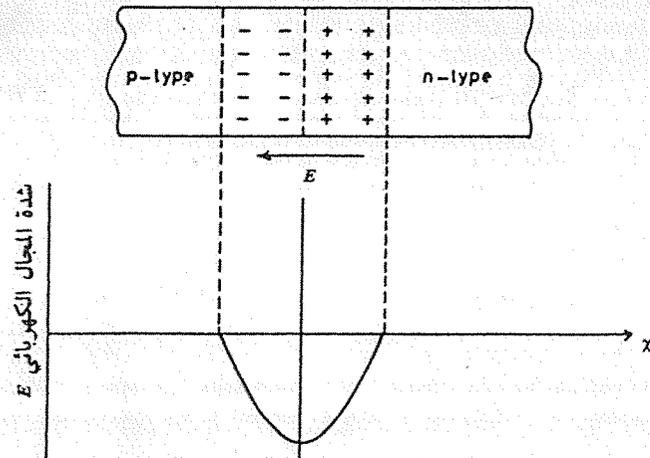
$$(29-2) \quad F_e = \frac{KT}{p} \frac{dp(x)}{dx}$$

نستنتج مما سبق ان قوة الانتشار للشحنات F_D تتساوى مع القوة الكهربائية الناتجة عن المجال الكهربائي F_e عندما يتوقف انتشار الشحنات، أي عندما تتحقق المعادلة التالية

$$(30-2) \quad qE = \frac{KT}{p} \frac{dp(x)}{dx} = - \frac{KT}{n} \frac{dn(x)}{dx}$$

ونتيجة للمجال الكهربائي المتولد عن الشحنة الفراغية في منطقة الاستنزاف يحدث انتقال معاكس لحاملات الشحنة، حيث تنتقل الالكترونات (الحاملات الاقلية) من الجانب p الى الجانب n كما تنتقل الحاملات الاقلية (الفجوات) من الجانب n الى الجانب p ، حيث تقل نتيجة لذلك شدة المجال الكهربائي فتبدأ الالكترونات بالانتشار من الجانب n الى الجانب p والفجوات من الجانب p الى الجانب n . وعند درجة حرارة معينة وعندما يكون ثنائي الوصلة $p-n$ في حالة اتزان تتساوى الحاملات المنتشرة من جانب مع عدد الحاملات المنتشرة من الجانب الآخر، وبذلك يصبح التيار الكهربائي خلال الحاجز الفاصل مساوياً للصفر. ونظراً لخلو منطقة الاستنزاف من الشحنات الحرة تكون مقاومة هذه المنطقة عالية جداً.

وبين الشكل (15) توزيع المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة الفراغية في ثنائي الوجه $p-n$.



شكل 15 شدة المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة الفراغية

كافية لمنع انتشار الشحنات ويتوقف انتشار الشحنات عندما تكون القوة الكهربائية الناتجة عن المجال الكهربائي F_e متساوية مع قوة الانتشار للشحنات F_D ، اي ان

$$(23-2) \quad F_e = E_D$$

ولكن وكما هو معروف ان القوة الكهربائية تساوي

$$(24-2) \quad F_e = -qE$$

ومن المعادلة (5-1) نستطيع الربط بين المجال الكهربائي وسرعة السحب v حيث ان

$$v = \mu E$$

وبتعويض العلاقة السابقة في العلاقة (24-2) نجد أن القوة الكهربائية الناتجة عن المجال الكهربائي تساوي

$$(25-2) \quad F_e = q \frac{v}{\mu}$$

وبما أن العلاقة بين كثافة التيار الكهربائي J وسرعة السحب كما هي معطى في المعادلة (6-1) هي

$$J = nq v$$

وبتعويض قيمة v من العلاقة السابقة في العلاقة (25-2) تصبح القوة الكهربائية تساوي

$$(26-2) \quad F_e = - \frac{J}{n} \frac{1}{\mu n}$$

وكما بينت لنا العلاقة (2-18) ان تيار الانتشار للالكترونات يساوي

$$J = q D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

وبالتعويض عن قيمة J من العلاقة السابقة في العلاقة (26-2) نجد أن

$$(27-2) \quad F_e = - \frac{q}{n} \frac{D_n}{\mu n} \frac{dn(x)}{dx}$$

وبالتعويض عن قيمة $D_n/\mu n$ من العلاقة (21-2) حيث أن $\frac{\mu n}{D_n} = \frac{q}{Kt}$ في العلاقة (27-2) نجد أن القوة الكهربائية تساوي

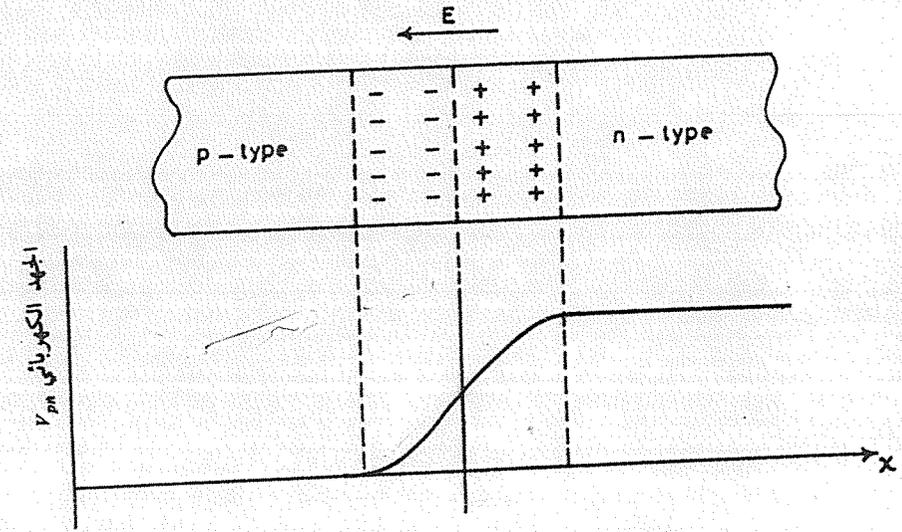
$$(28-2) \quad F_e = - \frac{KT}{n} \frac{dn(x)}{dx}$$

3.2 توزيع الجهد الكهربائي في ثنائي الوصلة p-n

لقد تعرفنا في البند السابق على توزيع المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة الفراغية في منطقة الاستنزاف. وقد درسنا تغير قيمة المجال الكهربائي مع المسافة x في ثنائي الوصلة p-n. وبذلك نجد أنه من السهل علينا توزيع الجهد الكهربائي لأن الجهد الكهربائي V_{pn} يحتل تكامل المجال الكهربائي حسب العلاقة التالية

$$V_{pn} = - \int E dx \quad (31-2)$$

والاشارة السالبة في المعادلة السابقة موجودة لأن فرق الجهد يكون موجياً في الاتجاه المعاكس لاتجاه المجال الكهربائي وذلك حسب تعريف المجال الكهربائي. وبما أن التكامل يمثل المساحة تحت المنحنى للمجال الكهربائي المبين في الشكل (15) نجد ان الجهد الكهربائي يكون كما هو مبين في الشكل (16).



شكل 16 توزيع الجهد الكهربائي في ثنائي الوصلة p-n

وجدير بالذكر ان الجهد الكهربائي V_{pn} هو الجهد الناتج عن الشحنة الفراغية في حالة عدم توصيل ثنائي الوصلة p-n مع منبع للجهد ويدعى الجهد V_{pn} بجهد العتبة في ثنائي الوصلة p-n

9-2 ثنائي الوصلة p-n عند تأثير جهد انحياز

The p-n Junction Diode with Applied Bias

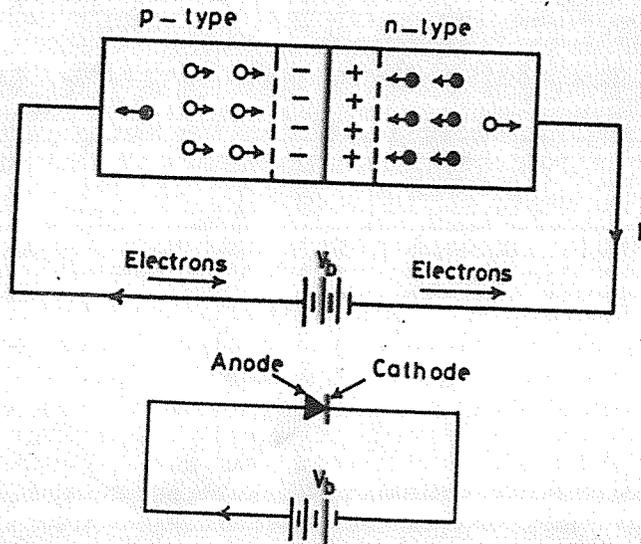
عند التأثير على ثنائي الوصلة p-n بجهد انحياز فان ذلك يؤدي الى اختلال في التوازن بين حاملات الشحنة في المنطقة p والمنطقة n من ثنائي الوصلة p-n عن ذلك التوازن بين حاملات الشحنة عند الاستقرار وقبل التأثير بجهد انحياز.

وجدير بالذكر انه يوجد هناك نوعين من الانحياز هما الانحياز الامامي (Forward Bias) والذي يكون عنده جهد المنطقة p موجياً مقارنة بالمنطقة n. والانحياز العكسي (Reverse Bias) والذي يكون عنده جهد المنطقة p سالبا مقارنة بالمنطقة n. وسوف نتناول في هذا البند دراسة نوعي الانحياز.

Forward Bias

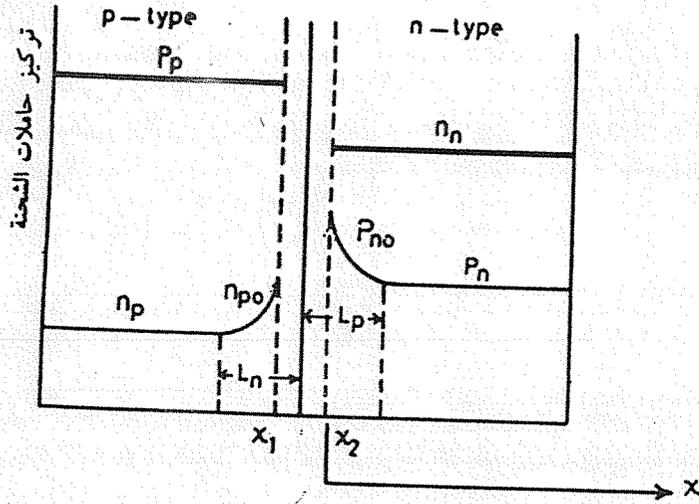
1-2 الانحياز الامامي:

عند وصل ثنائي الوصلة p-n بطارية بحيث يكون الجانب p- للثنائي (الديود) موصولاً بالقطب الموجب للبطارية والجانب n- للديود موصولاً بالقطب السالب للبطارية كما هو موضح بالشكل (17)، عند ذلك يقال ان الديود موصول في حالة انحياز امامي.



شكل 17 الديود في حالة انحياز امامي

الالكترونات الى المادة نوع p - تزداد كثافة الالكترونات (الحاملات الاقلية) في هذه المنطقة بالقرب من الحاجز الفاصل ويصبح تركيزها عند نهاية منطقة الاستنزاف يساوي n_{p0} . وبنفس الطريقة يزداد تركيز الفجوات بالقرب من الحاجز الفاصل في المادة نوع n - ويصبح تركيزها p_{n0} . وتنخفض قيمة كل من n_{p0} و p_{n0} كلما ابتعدنا عن منطقة الاستنزاف بحيث تعود الى قيمها في حالة الاستقرار n_p و p_n وذلك نتيجة عملية اعادة الاتحاد مع الحاملات الغالبة للتيار. ويوضح الشكل (18) تركيز حاملات الشحنة عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً امامياً.



شكل 18 تركيز حاملات الشحنة عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً امامياً.

والآن بإمكاننا إيجاد العلاقة بين كثافة الحاملات الاقلية للشحنة والمسافة من حدود منطقة الاستنزاف. وتكون هذه العلاقة بالنسبة للفجوات في المادة نوع n - هي كما يلي

$$p = (p_{n0} - p_n) e^{-x/L_p} + p_n \quad (34-2)$$

حيث تقاس المسافة x من نهاية منطقة الاستنزاف اي من النقطة x_2 . وتعرف المسافة L_p بطول الانتشار للشحوب وتكون في حدود 0.1 سم لكل من السيلكون والجرمانيوم. أما بالنسبة الى الالكترونات في المادة نوع p - فتكون العلاقة هي كما يلي

لنفرض الآن ان جهد البطارية مساوياً للصفر، في هذه الحالة لا يمر اي تيار في الدائرة، ويرجع السبب في ذلك الى تولد فروق جهد عند تلامس جانبي الديود مع اسلاك التوصيل وذلك لتغير كثافة الشحنة بين المعدن وجانبي الديود. ويكون اتجاه فروق الجهد عند الجانبين متساوياً في المقدار ومختلفاً في الاتجاه مع فرق الجهد عند الحاجز الفاصل.

عند ازدياد قيمة جهد البطارية V_b الى قيمة اكبر من الصفر، تُدفع الالكترونات داخل المادة نوع n - من الطرف السالب للبطارية وتنسحب الالكترونات من المادة نوع p - الى الطرف الموجب للبطارية. وبذلك يقل عدد الايونات الموجبة في الجانب n - من منطقة الاستنزاف ويقل عدد الايونات السالبة في الجانب p - من منطقة الاستنزاف وكنتيجه لذلك تضيق منطقة الاستنزاف.

اما اذا زادت قيمة جهد البطارية الى قيمة مناسبة، فإن عرض منطقة الاستنزاف سوف يقل الى الحد الذي يسمح به للالكترونات من ان تنساب من القطب السالب للبطارية عبر سلك التوصيل حتى تصل الى المنطقة نوع n - وتمر بها كحاملات غالبة للتيار. وعند الحاجز الفاصل سرعان ما تتحدد هذه الالكترونات مع الفجوات عند دخولها للمادة نوع p - لذا نجد ان غالبية حاملات التيار في المادة نوع p - هي فجوات. وعند اتصال المادة نوع p - مع سلك التوصيل تتحول الفجوات مرة اخرى الى الكترونات. ويبين الشكل (17) اتجاه ونوع حاملات الشحنة في جميع اجزاء الدائرة الكهربائية للديود في حالة الانحياز الامامي.

وبذلك نجد أنه عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً امامياً فإن ذلك يؤدي الى سريان تيار كهربائي في الدائرة، ويؤدي هذا التيار الى حدوث انخفاض في فرق الجهد في كل من المادة نوع n - والمادة نوع p - تكون قيمة هذا الانخفاض في الجهد قليلة لدرجة انه يمكن اهمالها بحيث يمكن اعتبار ان فرق جهد البطارية يطبق جميعه على منطقة الاستنزاف. ويكون فرق الجهد على جانبي منطقة الاستنزاف V_j هو

$$V_j = V_{pn} - V_b \quad (32-2)$$

حيث V_{pn} هو فرق الجهد الناتج عن الشحنة الفراغية في حالة عدم وجود بطارية وبذلك نجد أن شدة المجال الكهربائي تقل نتيجة انخفاض فرق الجهد على جانبي منطقة الاستنزاف وتصبح قوة الانتشار للشحنات اكبر من القوة الكهربائية الناتجة عن المجال الكهربائي. اي ان:

$$F_D > F_e \quad (33-2)$$

ونتيجة لذلك تندفع الالكترونات الى المادة نوع p - والفجوات الى المادة نوع n - ويمر تيار كهربائي عبر الديود. وبالتالي فان نسب تركيز حاملات الشحنة سوف تتغير. ونظراً لانتشار

ويمكننا اثبات العلاقة التالية أيضاً باستخدام نفس الأسلوب

$$(41-2) \quad n_{po} = n_p \exp\left(\frac{q V_b}{KT}\right)$$

كما سبق يتضح لنا ان الديود عندما يكون منحازاً انحيازاً امامياً فان الالكترونات سوف تنتشر من المادة نوع n الى المادة نوع p كما ان الفجوات سوف تنتشر من المادة نوع p الى المادة نوع n . ونتيجة لهذا الانتشار يمر خلال الديود تيار كهربائي مباشر له مركبتين الاولى هي المركبة الناتجة عن انتشار الفجوات والاخرى هي المركبة الناتجة عن انتشار الالكترونات، وهذا التيار ناتج عن انتشار حاملات التيار الغالبية. لايجاد قيمة التيار المباشر ومعرفة للعوامل المؤثرة على قيمته، سوف نأخذ معادلة كثافة التيار المبينة بالعلاقة (19-2) والتي تبين كثافة التيار للمركبة الناتجة عن انتشار الفجوات.

$$J_{pD} = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

وبالتعويض عن قيمة p المبينة بالعلاقة (34-2) وعن قيمة P_{no} الموضحة بالعلاقة (40-2) نحصل على العلاقة التالية

$$(42-2) \quad J_{pD} = \frac{qD_p P_{no}}{L_p} \left[\left(\exp\left(\frac{q V_b}{KT}\right) - 1 \right) \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \right]$$

وعند طرف منطقة الاستنزاف اي عندما تكون $x = 0$

$$(43-2) \quad J_{pD} = \frac{qD_p P_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) - 1 \right]$$

وبنفس الطريقة السابقة يمكن ايجاد كثافة تيار المركبة الالكترونية عند حافة منطقة الاستنزاف، وهذه المركبة تساوي

$$(44-2) \quad J_{nD} = \frac{qD_n n_p}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) - 1 \right]$$

وكما ذكرنا سابقاً أن التيار المباشر عند منطقة الاستنزاف هو عبارة عن مجموع المركبتين في العلاقة (43-2) و (44-2)

$$(45-2) \quad J_D = J_{pD} + J_{nD} = \left[\frac{qD_p P_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \right] \left[\exp\left(\frac{q V_b}{KT}\right) - 1 \right]$$

$$(35-2) \quad n = (n_{po} - n_p) \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) + n_p$$

حيث يعرف L_n بطول الانتشار للفجوات ويكون في حدود 0.1 سم أيضاً وتقاس المسافة x في هذه الحالة من النقطة $x=0$ وفي الاتجاه السالب.

وبالرجوع الى العلاقة (30-2) يصبح بإمكاننا ايجاد قيمة الشحنة الفراغية P_{no} عند حافتي منطقة الاستنزاف وذلك بضرب طرفي المعادلة في القيمة $-dx$ ومن ثم اجراء التكامل لطرفي المعادلة.

$$(36-2) \quad qE = \frac{KT}{p} \frac{dp}{dx}$$

$$q \int_{x_1}^{x_2} -E dx = - \int_{P_p}^{P_{no}} KT \frac{dp}{p} = -KT \ln\left(\frac{P_{no}}{P_p}\right)$$

ولكن وكما هو معروف ان

$$- \int_{x_1}^{x_2} E dx = V_j = V_{pn} - V_b$$

إذا نجد ان

$$(37-2) \quad q(V_{pn} - V_b) = -KT \ln\left(\frac{P_{no}}{P_p}\right)$$

وبالتالي وباستخدام العلاقة (37-2) نجد أن

$$(38-2) \quad P_{no} = P_p \exp\left(\frac{q(V_b - V_{pn})}{KT}\right)$$

وعندما يكون جهد البطارية V_b مساوياً للصفر يكون P_{no} مساوياً P_n اي ان

$$(39-2) \quad P_n = P_p \exp\left(\frac{-q V_{pn}}{KT}\right)$$

وبالتعويض عن قيمة P_p من المعادلة (39-2) في المعادلة (36-2)

$$(40-2) \quad P_{no} = P_n \exp\left(\frac{q V_b}{KT}\right)$$

لنفرض ان

$$J_s = \frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \quad (46-2)$$

وبذلك تكون كثافة التيار المباشر الكلي المار خلال الديود كما يلي

$$J_o = J_s \left[\exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) - 1 \right] \quad (47-2)$$

فاذا كانت مساحة مقطع منطقة الاستنزاف هي A فان شدة التيار المار خلال الديود تساوي

$$I_o = AJ_o$$

$$= AJ_s \left[\exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) - 1 \right]$$

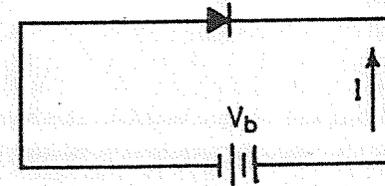
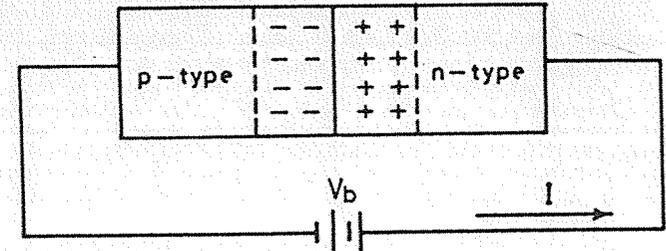
$$= I_s \left[\exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) - 1 \right] \quad (48-20)$$

حيث أن $I_s = AJ_s$ ويعرف انه تيار التشبع. وتتوقف قيمة التيار المباشر كما هو واضح من العلاقة (48-2) على قيمة الجهد المباشر V_b وعلى درجة الحرارة.

2-9-2 الانحياز العكسي:

Reverse Bias

كما هو مبين بالشكل (19) عند توصيل ثنائي الوصلة $p-n$ بمصدر للجهد بحيث يكون الجانب p



شكل 19 الديود في حالة الانحياز العكسي

للثنائي (الديود) موصولاً بالقطب السالب لمصدر الجهد والجانب n للثنائي موصولاً بالقطب الموجب لمصدر الجهد، عند ذلك فان الديود يكون منحازاً انحيازاً عكسياً (Reverse Bias).

وعندما يكون الديود منحازاً انحيازاً عكسياً تزداد كثافة الشحنة الفراغية في منطقة الاستنزاف كما يزداد عرض هذه المنطقة وتزداد شدة المجال الكهربائي. وفي حالة الانحياز العكسي للديود نجد أن الالكترونات تتحرك في المنطقة n الى اليمين بعيداً عن الحاجز الفاصل وتتحرك الفجوات الى اليسار مبتعدة ايضاً عن الحاجز الفاصل. ونتيجة لزيادة شدة المجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف تنتقل الالكترونات من الجانب p الى الجانب n كما تنتقل الفجوات من الجانب n الى الجانب p . وبذلك نجد أن التيار العكسي المار عبر الديود يكون صغيراً جداً، لأن هذا التيار ناتج عن انتشار حاملات الشحنة الاقلية، حيث ان الالكترونات في الجانب p والفجوات في الجانب n هما الحاملات الاقلية.

وكما ذكرنا سابقاً انه ينتج عن الانحياز العكسي للديود مرور تيار عكسي في الديود. ويمكن إيجاد قيمة هذا التيار بالاعتماد على العلاقة (48-2) وبوضع $-V_b$ بدلاً من V_b .

$$I_r = I_o = I_s \left[\exp\left(\frac{-qV_b}{KT}\right) - 1 \right]$$

$$= -I_s \left[1 - \exp\left(\frac{qV_b}{KT}\right) \right] \quad (49-2)$$

وعند زيادة قيمة الجهد العكسي الى قيمة معينة يصبح التيار العكسي ثابتاً ولا يعتمد على قيمة الجهد اي ان اقصى قيمة للتيار العكسي تساوي تيار التشبع ويعتمد هذا التيار على كثافة الحاملات الاقلية.

$$I_r = I_s \quad (50-2)$$

ومن الملاحظ ان كثافة الحاملات الاقلية تعتمد على نسبة الشوائب في شبه الموصل كما انها تعتمد على درجة الحرارة وحيث ان نسبة الشوائب في الثنائي ثابتة فان درجة الحرارة تشكل العامل الاساسي في تحديد قيمة التيار العكسي المار في الديود.

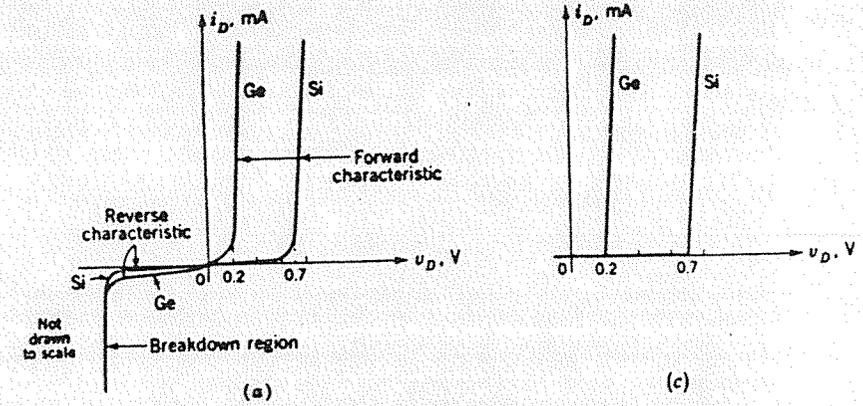
10-2 مميزة (منحنى الخواص) للديود شبه الموصل

Characteristics of the Semiconductor Diode

يبين الشكل (20) منحنى الخواص للديود من الجيرمانيوم (Ge) واخر من السيلكون (Si). ويعرف منحنى الخواص للديود على انه العلاقة بين التيار المار من خلال الديود وبين الجهد المطبق

عليه سواء في حالة الانحياز الامامي او الانحياز العكسي. ومن الجدير بالذكر ان نلاحظ انه استخدم مقياس رسم مختلف لكل من التيار الامامي (Forward Current) والتيار العكسي (Reverse Current) وذلك لأن التيار العكسي يكون دائماً اقل من التيار الامامي مئات أو آلاف المرات.

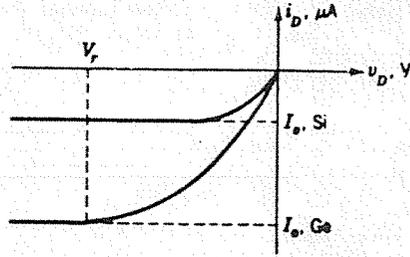
يبين الجزء الايمن من المنحنى الموضح بالشكل (a-20) التغير السريع في قيمة التيار الامامي عند تغير الجهد الامامي المطبق على الديود، وعندما تزداد قيمة الجهد الامامي زيادة ملحوظة يكون قانون اوم هو الانسب لتحديد العلاقة بين التيار والجهد الامامي. والسبب في ذلك انه عند زيادة الجهد الامامي تخفني الشحنة الفراغية من منطقة الاستنزاف وتصبح موصلية منطقة الاستنزاف متجانسة مع موصلية باقي اجزاء الديود. وفي هذه الحالة يمكن تقرب المنحنى المبين في الشكل



شكل 20 مميزة (منحنى الخواص) للديود.

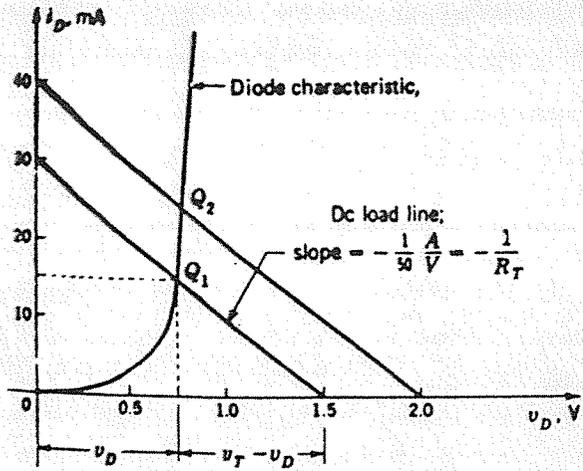
(a-20) الى خط مستقيم كما هو واضح في الشكل (c-20). ومن الملاحظ ان الديود يبدأ بالعمل في حالة الانحياز الامامي عند فرق جهد يساوي 0.2V اذا كان الديود مصنوع من الجرمانيوم و 0.7V اذا كان مصنوع من السيلكون ويظهر ذلك بوضوح من الشكل (b-20) والذي يبين منحنى الخواص للديود مأخوذاً على جهاز راسم الاشارة.

ويبين الجزء الايسر من المنحنى المبين بالشكل (a-20) تغير التيار العكسي تبعاً لتغير الجهد العكسي ومن الملاحظ انه عند زيادة الجهد العكسي سرعان ما يصل التيار العكسي الى قيمة التشبع ويصبح ثابتاً كما هو موضح بالشكل (21) ويتضح من الشكل ان قيمة التيار العكسي في حالة التشبع للديود المصنوع من الجرمانيوم اكبر بضعفين الى ثلاث اضعاف منه للديود المصنوع من السيلكون.



شكل 21 منحنى الخواص للديود في حالة الانحياز العكسي

هذا ويبقى التيار العكسي ثابتاً مع زيادة الجهد العكسي الى قيم كبيرة وعند قيمة معينة لكل ديود يزداد التيار العكسي فجأة ويرجع السبب في ذلك الى زيادة شدة المجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف حيث تتولد ازواج من الالكترونات - الفجوات جديدة تحت تأثير هذا المجال الكهربائي على ذرات النسق البلوري وتدعى هذه الظاهرة بظاهرة انهيار زينر (Breakdown Zener) ويسمى فرق الجهد الذي يحدث عنده الانهيار بجهد زينر V_z ، كما يحدث نوع اخر من الانهيار يدعى بالانهيار المتتابع (Avalanche Breakdown)، ويرجع السبب في هذا النوع من الانهيار الى الطاقة الكبيرة التي تكتسبها حاملات الشحنة عند اجتيازها للمجال الكهربائي الكبير عند منطقة الحاجز الفاصل. حيث تتولد ازواج من الالكترونات - الفجوات عند اصطدام حاملات الشحنة ذات الطاقة العالية بذرات النسق البلوري مما يؤدي الى توينها.



شكل 23 منحنى الخواص للديود - وخطوط الحمل ونقاط الحمل

ولرسم خط الحمل الاستاتيكي والمعطى بالمعادلة (51-2) على منحنى الخواص الموضح بالشكل (23). نلاحظ ان هذا الخط يتقاطع مع المحور العمودي والذي يمثل منحنى التيار i_D عندما يكون فرق الجهد المطبق على الديود $v_D = 0$ اي عندما

$$(53-2) \quad i_D = \frac{v_i}{r_i + R_L}$$

كما يتقاطع خط الحمل مع محور الجهد v_D عندما يكون $i_D = 0$ اي عندما يكون

$$(54-2) \quad v_D = v_i$$

وللسهولة سوف نفرض ان قيمة $r_i = 20\Omega$ و $R_L = 30\Omega$ و $v_i = 1.5V$ وبذلك نجد ان خط الحمل يتقاطع مع محور التيار عند $i_D = 30mA$ ويتقاطع ايضاً مع محور الجهد عند $v_D = 1.5V$ ، كما نجد ان خط الحمل يتقاطع مع منحنى الخواص عند النقطة Q_1 وتدعى هذه النقطة بنقطة العمل. وعند هذه النقطة يمكن تحديد قيمة التيار المار في الدائرة وهو يساوي $15mA$ ويكون فرق الجهد الواقع على الثنائي يساوي $0.75V$ كما انه بالامكان ايجاد قيمة الجهد الواقع على مقاومة الحمل والمقاومة r_i حيث يساوي

$$(55-2) \quad v_i - v_D = i_D (r_i + R_L)$$

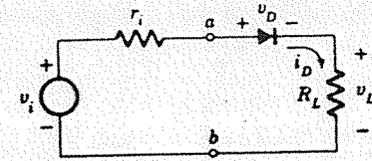
The Basic Diode Circuit

1-10-2 الدائرة الاساسية للديود:

خط الحمل الاستاتيكي ونقطة الحمل

كما هو موضح بالشكل (22) تتكون الدائرة الاساسية للديود من ثلاث عناصر اساسية هي الديود والذي يمثل العنصر الغير خطي (Nonlinearelement) في الدائرة ومصدر الجهد ومقاومة الدائرة.

ونتيجة لوجود مقاومة الحمل R_L والمقاومة r_i فان التيار i_D المار خلال الديود لا يعتمد على قيمة فرق الجهد المطبق على الديود v_D فقط وانما يعتمد ايضاً على قيمة مقاومة الحمل R_L والمقاومة r_i .



شكل 22 الدائرة الاساسية للديود

ولتعيين خط الحمل الاستاتيكي (DC Load Line) للديود وكذلك نقطة العمل (Operating point) سوف نقوم بدراسة الدائرة المبينة بالشكل (22). فعند تطبيق قانون كيرشوف لفرق الجهد نجد ان فرق الجهد على الديود يمكن تحديده من العلاقة

$$(51-2) \quad v_i = v_D + i_D (r_i + R_L)$$

ومن الملاحظ ان هذه العلاقة لا تكفي لتحديد قيمة كل من v_D و i_D حيث ان العلاقة السابقة تحتوي على مجهولين لذا سوف نستخدم علاقة اخرى بين كل من v_D و i_D وهي منحنى الخواص للديود والذي يمثل علاقة v_D و i_D حسب العلاقة التالية

$$(52-2) \quad i_D = f(v_D)$$

وهذه العلاقة والتي تمثل منحنى الخواص للديود موضحة في الشكل (23).

وباستخدام العلاقة (51-2) والعلاقة (52-2) والموضحة بالشكل (23) يصبح عندنا معادلتين ومجهولين باستطاعتنا ايجاد كل منهما.

$$(57-2) \quad \text{slope} = -\frac{1}{r_f + R_L}$$

وعند اختلاف قيمة المقاومات السابقة فان ميل الخطوط سوف يختلف تبعاً لذلك.

لنفرض ان مصدر جهد التغذية v_f يعطينا جهداً متغيراً ac جيئياً

$$v_f = v_T = 1.5 \sin \omega t$$

ولاييجاد قيمة وشكل موجة التيار i_D سوف نتبع حلاً بيانياً كما هو موضح بالشكل (24)

Diode resistance

2-10-2 مقاومة الديود :

- المقاومة الاستاتيكية R_{dc} :

تعرف المقاومة الاستاتيكية (DC resistance) للديود على انها النسبة بين فرق الجهد الواقع على الديود v_D والتيار المار خلال الديود i_D عند نقطة معينة على منحنى الخواص للديود حيث تمثل هذه النقطة نقطة العمل للدائرة عند ظرف معين. اي ان قيمة المقاومة الاستاتيكية تعطى حسب العلاقة التالية

$$(58-2) \quad R_{dc} = \frac{v_D}{i_D}$$

وجدير بالذكر ان قيمة المقاومة الاستاتيكية تختلف باختلاف الجهد ويلاحظ ان قيمة هذه المقاومة تتغير كثيراً من نقطة الى نقطة اخرى على المنحنى لأن المنحنى يمثل علاقة غير خطية.

مثال :

أوجد قيمة المقاومة الاستاتيكية R_{dc} للديود الموضح بالشكل (22) عندما يكون جهد مصدر التغذية يساوي 1.5V

الحل :

عندما يكون جهد المصدر يساوي 1.5V وبالرجوع الى منحنى الخواص الموضح بالشكل (23) ومن تحديد خط الحمل ونقطة العمل عند هذه الظروف نجد أن قيمة $i_D = 15 \text{ mA}$ وان قيمة $v_D = 0.75 \text{ V}$ وبتطبيق العلاقة (58-2)

$$R_{dc} = \frac{v_D}{i_D} = \frac{0.75}{15 \text{ m}} = 50 \Omega$$

$$= 15 \times 10^{-3} (20 + 30)$$

$$= 0.75 \text{ V}$$

كما انه يمكن إيجاد قيمة الجهد الواقع على مقاومة الحمل ويساوي

(56-2)

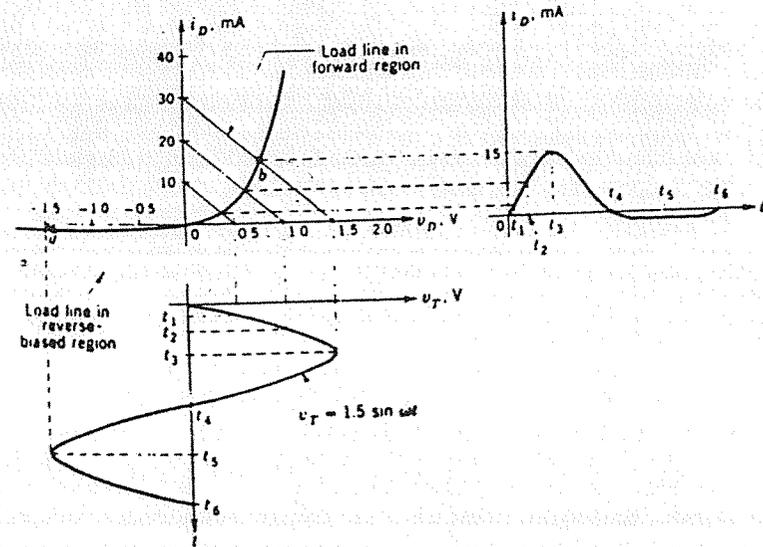
$$V_L = i_D R_L$$

$$= 15 \times 10^{-3} \times 30$$

$$= 0.45 \text{ V}$$

وعند تغير جهد المصدر v_f الى قيمة اخرى يتغير تبعاً لذلك خط الحمل فعندما يكون $v_f = 2 \text{ V}$ عند ذلك نجد أن خط الحمل يتقاطع مع محور الجهد عند $v_D = 2 \text{ V}$ ، كما نجد ان خط الحمل يتقاطع مع محور التيار عند $i_D = 40 \text{ mA}$ ويتقاطع مع منحنى الخواص عند النقطة Q_2 والتي تمثل نقطة عمل اخرى للدائرة.

وهكذا يمكن تكرار نفس العملية ورسم خطوط الحمل لقيم مختلفة لجهد مصدر التغذية وتحديد نقاط العمل للدائرة في كل مرة. وجدير بالذكر ان خطوط الحمل المختلفة تكون متوازية طالما كانت المقاومات R_L و r_f ثابتة حيث ان ميل الخط (slope) يساوي



شكل 24 الحل البياني لايهاز قيمة وشكل موجة التيار i_D عندما يكون جهد التغذية متغيراً جيئياً

- المقاومة الديناميكية: Dynamic Resistance

تعتبر المقاومة الديناميكية المقاومة الاكثر اهمية بالنسبة للديود ويمكن تحديد هذه المقاومة وذلك بإيجاد مقلوب ميل المنحنى عند نقطة العمل Q حسب العلاقة التالية

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta i_D} \Big|_{Q \text{ point}} \quad (59-2)$$

$$= \frac{dv_D}{d i_D} \Big|_{Q \text{ point}}$$

ويوجد للديود مقاومة ديناميكية امامية r_r تكون قيمة هذه المقاومة صغيرة في حالة انحياز الديود انحيازاً امامياً، كما وتوجد مقاومة عكسية اخرى r_f تكون قيمتها كبيرة جداً عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً عكسياً.

11-2 الديوذات الخاصة

لقد تعرفنا فيما سبق على خواص ثنائي الوصلة (Junction diode) ومناطق عمله، وسوف نتعرض في مكان اخر من هذا الكتاب الى اهم التطبيقات المختلفة والكثيرة للديود.

أما الآن فسوف نتناول في هذا البند انواع اخرى من الديوذات والتي لها تطبيقات واستعمالات خاصة تختلف في خواصها عن الديوذ شبه الموصل العادي.

1.11-2 ديود زينر Zener Diode

يعمل هذا النوع من الديوذات في حالة الانحياز العكسي، فاذا ما القينا نظرة على منحنى الخواص للديوذ فانتا نجد ان التيار العكسي يبقى ثابتاً مع زيادة الجهد العكسي الى قيم كبيرة وعند زيادة الجهد العكسي عن قيمة معينة لكل ديود فان التيار العكسي يزداد فجأة. ويرجع السبب في ذلك الى زيادة شدة المجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف بحيث يتم توليد ازواج من الالكترونات - الفجوات جديدة تحت تأثير هذا المجال، ويدعى فرق الجهد الذي يحدث عنده الازدياد المفاجيء للتيار بفرق جهد الانهيار (Breakdown Voltage)، وفي الديوذات العادية تؤدي حالة الانهيار هذه الى تلف الديوذ، بسبب ارتفاع درجة حرارة الديوذ نتيجة لازدياد شدة التيار الكهربائي المار فيه.

في حالة الانحياز العكسي للديوذ تحدث ظاهرتان تحدثان الانهيار فيه هما

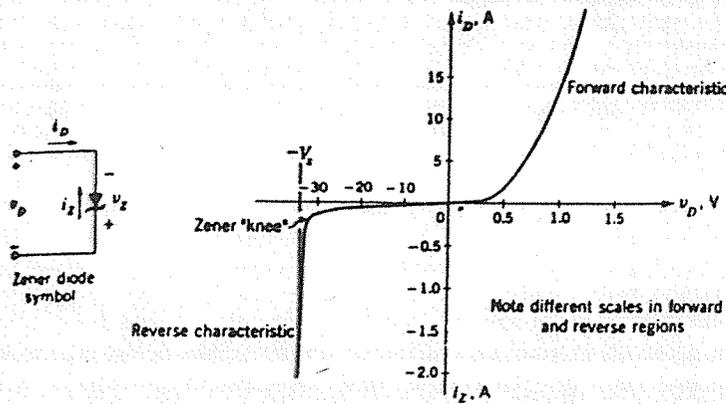
- ظاهرة زينر (تأثير) Zener Effect
- ظاهرة الانهيار (تأثير) Avalanche Effect

تحدث ظاهرة زينر كما ذكرنا سابقاً عند زيادة شدة المجال الكهربائي على ذرات النسق البللوري، مما يؤدي الى تمزق الروابط التساهمية بين الذرات، ونتيجة لذلك تتولد ازواج جديدة من الالكترونات - الفجوات تؤدي الى زيادة التيار دون زيادة تذكر في قيمة فرق الجهد عبر الديوذ. كما تسمى هذه الظاهرة بالانهيار زينر (Zener Breakdown) ويسمى الجهد الذي يحدث عنده هذا الانهيار بجهد زينر V_z .

ومن الجدير بالذكر ان ظاهرة زينر تحدث في الديوذات التي تكون نسبة تطعيم الشوائب فيها عالية. حيث يؤدي التطعيم المركز للشوائب الى قيم صغيرة في جهد الانهيار يمكن السيطرة عليه بصورة دقيقة جداً خلال التصنيع. حيث تقل قيمة جهد الانهيار للديوذ كلما ازدادت نسبة الشوائب المطعمة فيه.

أما بالنسبة لظاهرة الانهيار المتتابع (Avalanche Breakdown). فيحدث هذا الانهيار عندما تكتسب حاملات الشحنة طاقة كبيرة عند اجتيازها للمجال الكهربائي الشديد في منطقة الاستنزاف. وعند اصطدام حاملات الشحنة ذات الطاقة المكتسبة العالية بذرات النسق البللوري فانها تؤينها وتتولد بالتالي ازواج جديدة من الالكترونات - الفجوات. وتحدث هذه الظاهرة في الديوذات التي تكون نسبة الشوائب المطعمة فيها قليلة نسبياً.

وجدير بالذكر انه لا يحدث اي تغييرات في منطقة الاستنزاف ولا يتحطم البناء البللوري للمادة نتيجة هذه التصادمات بل توجد ثنائيات تعمل عند جهد زينر أو الجهد الانهاري وتعرف باسم ثنائيات زينر.



شكل 25 منحنى الخواص لثنائي زينر

ان هذين الأثرين لتثبيت الجهد يعتمدان على منطقة عمل الديود اي عندما يعمل الديود عند ركة زير (Zener Knee) او قبلها كما ويعتمد على قيمة المقاومة

مثال

في الدائرة الموضحة بالشكل (26) اذا علمنا ان جهد زير V_Z يساوي $7.2V$ كما ان تيار الحمل يتغير من $12mA$ الى $100mA$. احسب قيمة المقاومة r_i المطلوبة للحفاظ على تيار الحمل اذا كانت قيمة جهد المصدر $V_{dc}=12V$.

ملاحظة: في مثل هذا النوع من مشبات الجهد يكون معامل الديود يساوي 0.1 اي ان اكبر تيار حل يستخدم كاقبل تيار يمر في ديود زير.

الحل:

ما سبق نستنتج ان اقل تيار يمر في ديود زير هو على الاقل يساوي $10mA$. بتطبيق قانون كيرشوف على الدائرة.

$$r_i = \frac{V_{dc} - V_L}{I_z + I_L}$$

وبالتالي نجد ان الجهد المطبق على المقاومة r_i هو V_{ri}

$$V_{ri} = V_{dc} - V_L = 12 - 7.2 = 4.8V$$

في مدى تثبيت الجهد يكون اقل تيار يمر في ديود زير عندما يكون تيار الحمل اكبر ما يمكن

$$r_i = \frac{V_{dc} - V_L}{I_{z,min} + I_{L,max}} = \frac{V_{dc} - V_L}{(1+0.1) I_{L,max}} = \frac{4.8}{0.11} = 43.5 \Omega$$

Varactor Diode

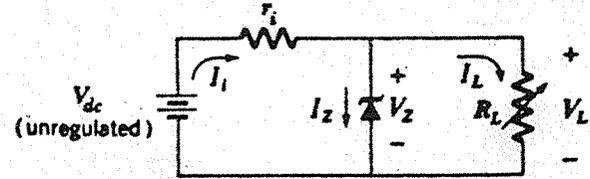
2-11-2 الديود ذو السعة المتغيرة

لقد وجدنا فيما سبق ان كثافة الشحنة الفراغية تتغير بتغير جهد الانحياز للديود. فعندما يكون الديود منحازاً انحيازاً عكسياً تزداد كثافة الشحنة الفراغية عند الحاجز الفاصل بزيادة الجهد

يمكن اعتبار ثنائي زير بانه ثنائي شبه موصل عادي يمكن التحكم او السيطرة على خصائصه في حالة الانحياز العكسي وذلك عن طريق السيطرة على نسبة الشوائب المطعمة للثنائي. وبين الشكل (25) منحنى الخواص لثنائي زير والزمر التمثيلي لهذا الثنائي.

وكما هو واضح من شكل (25) ان ديود زير له نفس خواص الديود العادي في حالة الانحياز الامامي. اما في حالة الانحياز العكسي فان جهد زير V_Z يمكن ان تتغير تبعاً لتغير نسبة الشوائب المطعمة للديود وتتراوح قيمة جهد زير ما بين $2V$ الى $200V$ بقدرته تصل الى اكثر من $100W$ في بعض الاحيان.

ومن اكثر استخدامات ديود زير شيوعاً استخدامه كمثبت (منظم) لفرق الجهد (Regulator Voltage). وبين الشكل (26) الدائرة العملية البسيطة لتثبيت فرق جهد مقاومة الحمل V_L عند قيمة تساوي فرق جهد زير V_Z .



شكل 26 دائرة بسيطة لتثبيت فرق جهد الحمل باستخدام ديود زير

ويتلخص مبدأ عمل هذه الدائرة في تثبيت جهد الحمل V_L عند جهد يساوي جهد زير V_Z اذا تغير جهد الدخل V_{dc} وتغيرت قيمة مقاومة الحمل R_L تغيراً كبيراً نسبياً. ويمكن الاستعانة بمنحنى الخواص الموضح بالشكل (25) لتوضيح عمل دائرة تثبيت الجهد. اذا ما حصلت زيادة في جهد الدخل V_{dc} فان الديود يحافظ على جهد الحمل ثابتاً عند قيمة تساوي V_Z وهذا يؤدي الى زيادة الجهد المطبق على المقاومة r_i . وبالتالي يزداد التيار I_i المتدفق عبر الديود وهكذا يبقى التيار المار خلال مقاومة الحمل ثابتاً.

اما عند تثبيت جهد الدخل V_{dc} وتقليل قيمة مقاومة الحمل R_L . فان هذا يتطلب زيادة في تيار الحمل. وهذه الزيادة في التيار لا تأتي من تيار المصدر لان تيار المصدر يبقى ثابتاً بدون تغيير عندما يكون الديود في مدى التثبيت (Regulating range)، ولكن هذه الزيادة في التيار تأتي نتيجة نقصان في التيار المار عبر ديود زير.

العكسي. ولما كان هذا التغير في الشحنة الفراغية ناتجاً عن تغير جهد الانحياز لذا يمكن اعتبار ذلك سعة للديود حيث انه اذا تغيرت الشحنة الفراغية بمقدار dQ نتيجة لتغير جهد الانحياز بمقدار dV نجد أن السعة الناتجة للديود هي

$$C_t = \frac{dQ}{dV} \quad (60-2)$$

وإذا حدث هذا التغير في جهد الانحياز خلال فترة زمنية مقدارها dt فإنه ينتج عن ذلك تيار مقداره يساوي

$$i = C_t \frac{dv}{dt} \quad (61-2)$$

كما سبق يتضح أهمية معرفة قيمة سعة الديود لتأثيرها على قيمة التيار المتردد المار خلال الديود. ومن الجدير بالذكر أن السعة C_t تدعى بسعة الانتقال (Transition Capacitance). وقيمة هذه السعة غير ثابتة وإنما تتغير بتغير الجهد العكسي المطبق على الديود. ومن الممكن اثبات العلاقة التالية

$$C_t = \frac{EA}{L_p + L_n} \quad (62-2)$$

حيث E ساحة المادة، A مساحة مقطع الديود، $(L_p + L_n)$ عرض منطقة الشحنة الفراغية وتعتمد قيمته على الجهد العكسي المطبق على الديود كما تعتمد على تركيز الشوائب المطعمة. وقد وجدنا سابقاً أن عرض منطقة الاستنزاف يزداد بزيادة الجهد العكسي، لذا فإنه طبقاً للعلاقة السابقة تقل سعة الانتقال بزيادة الجهد العكسي، وهذا ويمكن استخدام هذه الظاهرة في عمل ما يعرف بديود السعة المتغيرة (Varactor diode) والذي يستخدم في الدوائر الالكترونية كمكشوف متغير السعة ويرمز له في الدوائر الالكترونية بالرمز الموضح بالشكل (27).



شكل 27 الديود ذو السعة المتغيرة

أما عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً امامياً، تظهر سعة اخرى للديود تدعى بسعة الانتشار (Diffusion Capacitance) وتكون قيمة هذه السعة اكبر بكثير من سعة الانتقال، ويرجع السبب

في ذلك الى انتقال الشحنة المخزونة خارج منطقة الاستنزاف مباشرة وتوزيع حاملات الشحنة بأسلوب اخر وتعطى قيمة سعة الانتشار C_d بالعلاقة التالية

$$C_d = \frac{L_p^2 I_p}{D_p K T} + \frac{L_n^2 I_n}{D_n K T} \quad (63-2)$$

حيث ان I_p, I_n هي قيمة كل من مركبة التيار الناتجة عن انتقال الفجوات وانتقال الالكترونات على التوالي، ويتضح من العلاقة السابقة ان قيمة هذه السعة تتناسب تناسباً طردياً مع التيار، لذا فمن الممكن اهمال هذه السعة عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً عكسياً لكون التيار المار خلال الديود صغير جداً، اما عندما يكون الديود منحازاً انحيازاً امامياً فتمثل هذه السعة السعة الاساسية للديود وتصل قيمتها لعدة عشرات من الميكروفاراد. وجدير بالذكر ان قيمة سعة الانتقال للديود عندما يكون منحازاً انحيازاً عكسياً قد تقل الى عدة عشرات من الميكروفاراد.

Tunnel Diode

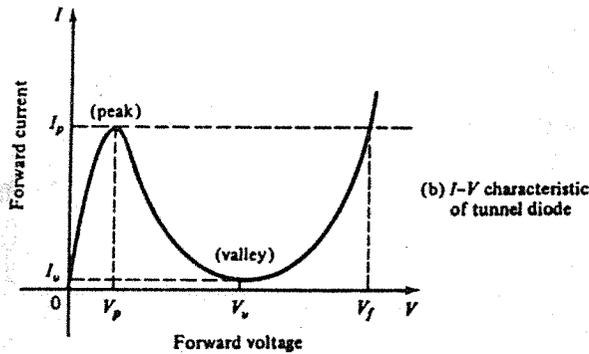
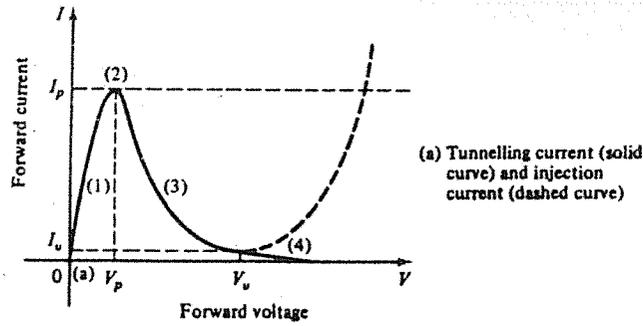
3-11-2 الديود النفقي

يعرف الديود النفقي على انه المقاومة السالبة لثنائي الوصلة $p-n$ شبه الموصل. ويمكن خلق المقاومة السالبة وذلك باستخدام اثر تنفيق (tunneleffect) الالكترونات في ثنائي الوصلة $p-n$ ، والذي فسره العالم ازاكي (Esaki) عام 1958. لقد لاحظ العلماء ظاهرة التنفيق قبل عام 1958 ولكنهم لم يضعوا لهذه الظاهرة اي تفسير لأن النظرية الكلاسيكية التي اعتمدت في شرح مواضع اشباه الموصلات لم توصلهم الى تفسير لهذه الظاهرة، حيث ان النظرية الكلاسيكية تقول انه لا يمكن لأي شحنة حاملة للتيار عبور الجهد الحاجز مالم تمتلك الطاقة الكافية للاجتياز الا ان النظرية الحديثة لميكانيك الكم تناقض النظرية الكلاسيكية وتقول انه في الامكان لاي شحنة حتى ولو لم تمتلك الطاقة الكافية، اجتياز الحاجز وذلك خلال نفق (Tunnel) في الجهد الحاجز. كما وتستطيع هذه النظرية التنبؤ باحتمالية حدوث التنفيق، فاحتمالية التنفيق تكون صفراً اذا لم يكن سمك منطقة الاستنزاف صغيراً جداً ولهذا السبب لا يحدث التنفيق في الديودات العادية.

لذلك نجد أن نسبة تطعيم الشوائب في الديود النفقي عالية جداً وتكون نسبة تركيز هذه الشوائب من 10^{19} الى 10^{20} ذرة لكل سنتيمتر مكعب ($atoms/cm^3$)، يكون سمك منطقة الاستنزاف قليل جداً ويساوي حوالي 100Å ($10^{-6}cm$)

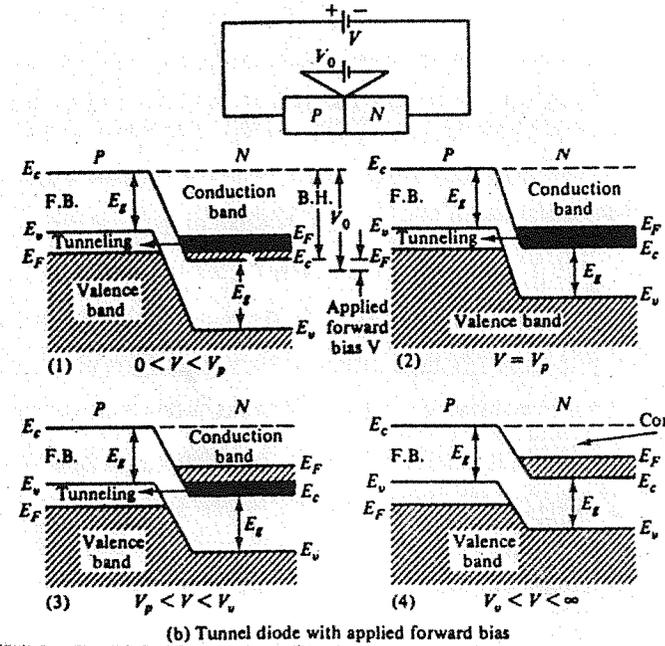
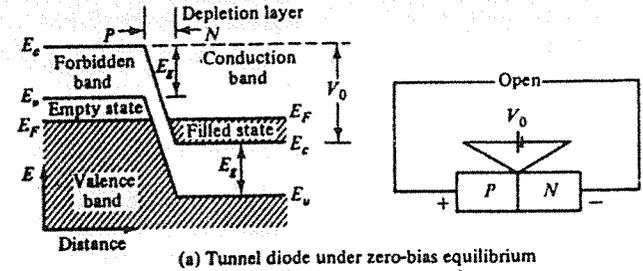
لتوضيح كيفية عمل الديود النفقي سوف نعلم على مخطط نطاقات الطاقة المبين بالشكل (28).

عندما يكون جهد الانحياز للديود النفقي يساوي صفر ($V=0$) اي عندما تكون الدائرة مفتوحة (open-circuit). فان المستويات العليا لطاقة الالكترونات لمنطقة n ومنطقة p يكون لها



شكل 29 منحني الخواص للتيار والجهد الخاص بالديود النفقي.

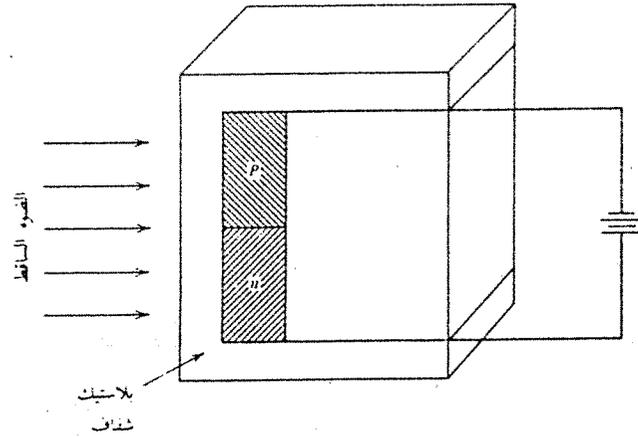
كما هو معروف ان مستوى فيرمي في الديودات العادية يقع في منطقة النطاق المحظور (Forbidden band). وبسبب كون الديود النفقي مطعم بنسبة عالية من الشوائب نجد أن مستوى فيرمي يقع في نطاق التكافؤ (Valence band) في المنطقة نوع p كما يقع في نطاق التوصيل (Conduction BAND) في المنطقة نوع n لأشياء الموصلات. اذا كان الديود النفقي منحازاً انحيازاً امامياً بجهد اكبر من صفر واقل من الجهد الذي يعطينا قيمة التيار النفقي I_p ($0 < V < V_p$) نجد أن مخطط نطاقات الطاقة يكون كما هو مبين في الشكل (28-b-1) وكما هو واضح من الشكل أن الجهد الحاجز V_0 (potential barrier) يقل بمقدار يساوي قيمة جهد الانحياز الامامي المطبق على الديود. وبذلك يصبح هناك اختلاف في مستويات فيرمي في طرفي الوصلة $p-n$. حيث نجد أنه أصبح هناك حالات مملوءة بالالكترونات في نطاق التوصيل في المنطقة نوع n وعند نفس مستوى الطاقة هذا نجد ان هناك حالات فارغة نهائياً من الالكترونات في نطاق التكافؤ في المنطقة نوع n الى المنطقة نوع



شكل 28 مخطط نطاقات الطاقة للديود النفقي

نفس مستوى فيرمي (Fermi level) كما هو مبين في الشكل (28-a). ولا يكون اي من هذين المستويين مملوء بالالكترونات وانما تكون فارغة تماماً في طرفي الوصلة $p-n$. وبالتالي نجد انه ليس بالامكان انتقال الالكترونات او شحنات من مستوى لآخر على اطراف الحاجز الفاصل، وتكون قيمة التيار نتيجة لذلك تساوي صفر كما يظهر ذلك من منحني التيار والجهد الموضح في الشكل (29) عند النقطة (a).

مادة نوع n - والآخرى من مادة نوع p - وتوضع هذه الشريحة داخل غلاف من البلاستيك الشفاف. ويسمح بمرور الضوء من جانب واحد عبر الحاجز الفاصل وتغطي الجوانب الأخرى بطلاء أسود لمنع مرور الضوء من هذه الجوانب. وبين الشكل (30) مكونات الديود الضوئي والرمز التمثيلي له.



شكل 30 مكونات الديود الضوئي والرمز التمثيلي له

فعندما يكون الديود منحازاً انحيازاً عكسياً يمر تيار ثابت خلال الديود هو تيار التشبع العكسي الذي لا يعتمد على جهد الانحياز. وير هذا التيار نتيجة للحاملات الأقلية المتولدة حرارياً ويدعى هذا التيار بتيار الإظلام (dark current)، وعند سقوط الضوء أو الفوتونات على مادة شبه الموصل فإن بعض الكثرونات التكافؤ تكتسب طاقة إضافية فتخرج هذه الكثرونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل مكونة أزواجاً من الكثرونات والفجوات. وتشترك هذه الكثرونات والفجوات في التوصيل الكهربائي ويزداد التيار العكسي نتيجة لذلك وتصحح قيمة التيار العكسي هي

$$I = I_p + I_o$$

$$I = I_p + I_o$$

p -، وهذا يؤدي إلى زيادة في التيار النفقي الامامي (forward tunneling Current) من المادة نوع p - إلى المادة نوع n - كما يظهر ذلك واضحاً في المنحنى (1) في الشكل (29).

وعند زيادة جهد الانحياز الامامي للديود إلى قيمة تساوي V_p فإن منحنى نطاقات الطاقة يكون كما هو موضح بالشكل (28-b-2). إن أكبر عدد من الكثرونات التي تُنفق (tunnel) عبر الحاجز الفاصل من الحالات المملوءة بالكثرونات في المادة نوع n - إلى الحالات الفارغة من الكثرونات في المادة نوع p -، تعطي زيادة في قيمة التيار I_p . وعند زيادة جهد الانحياز إلى قيمة أكبر من V_p وأقل من V_o ($V_p < V < V_o$) فإن نطاقات الطاقة تصبح كما هو مبين في الشكل (28-b-3). حيث يظهر أن التيار النفقي (tunneling current) يقل كما هو مبين في المنحنى (3) في الشكل (29). وأخيراً عند زيادة جهد الانحياز الامامي للديود النفقي أكبر من القيمة V_p فإن نطاقات الطاقة تصبح كما هو مبين في الشكل (28-b-4) حيث يظهر أنه لم يعد هناك حالات فارغة في المادة نوع p - عند نفس مستوى الطاقة للحالات المملوءة بالكثرونات في المادة نوع n -، وبالتالي فإنه يصبح من غير الممكن حصول تنفيق في الكثرونات عبر الحاجز الفاصل ويصبح تيار التنفيق يساوي صفرًا كما يظهر ذلك في المنحنى (4) في الشكل (29).

وعند زيادة الجهد v إلى قيمة أكبر بكثير من القيمة v_o فإن سلوك الديود النفقي يصبح كسلوك الديود العادي كما يظهر ذلك في المنحنى المتقطع الموضح بالشكل (29). وبذلك نجد أن منحنى الخواص للديود النفقي كما هو مبين في الشكل (29-b).

ونظراً لظاهرة التنفيق فإن الديود النفقي له تطبيقات كثيرة في مجال الترددات العالية حيث يستخدم كمكبر ومولد للإشارات كما يستخدم في بعض الدوائر المنطقية السريعة والذاكرات وذلك لخفة وزنه وقلة تكلفته وسرعته العالية واستهلاكه القليل للطاقة.

photo diode

4-11-2 الديود الضوئي

لقد لاحظنا عند دراستنا لاشباه الموصلات أن الحرارة تعتبر مصدر طاقة يستطيع توليد أزواج من الكثرونات والفجوات. وقد وجد أن الضوء أو الأشعة الكهرومغناطيسية هي مصدر آخر للطاقة تستطيع توليد أزواج من الكثرونات والفجوات. فعند سقوط الضوء على الديود المحيز انحيازاً عكسياً يزداد التيار العكسي المار خلال الديود ويعتمد التيار العكسي على شدة الضوء الساقط. وقد استخدمت هذه الظاهرة في تجهيز الديود الضوئي.

ويتكون الديود الضوئي من شريحة دقيقة من مادة السيلكون أو الجرمانيوم لها جانبيين أحدهما من

كهرومغناطيسية عندما ينتقل الكترون من مستوى طاقة عالية الى مستوى طاقة اخر ذو طاقة اقل .
وكما هو معروف انه يوجد مستويات للطاقة هما نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ وينفصل هذان
المستويان عن بعضها بالنطاق المحظور الذي يخلو من الالكترونات الحرة . وعند اطباق فرق جهد
امامي على هذا الديود فان الشحنات فيه سوف تتحرك خلال الحاجز الفاصل بين طرفي الديود
وبالتالي فانها سوف تعبر مستويات طاقة مختلفة . وبما انها اكتسبت طاقة اثناء توليد ازواج من
الالكترونات والفجوات فان هذه الطاقة سوف تشع اثناء اعادة اتحاد الالكترونات مع الفجوات
وتكون هذه الطاقة على هيئة حرارة في ديودات السيلكون والجرمانيوم .

وعند استعمال اشباه موصلات اخرى لوحظ ان الطاقة المشعة تكون على شكل ضوء ويكون تردد
هذا الضوء حسب العلاقة التالية

$$(65-2) \quad f = E/h$$

حيث E عرض النطاق المحظور او الفرق في الطاقة بين نطاقي التوصيل والتكافؤ، h هو ثابت
بلانك، f تردد الضوء . اما طول موجة الضوء المنبعث من الديود الضوئي فانه يكون حسب العلاقة .

$$(66-2) \quad \lambda = c/f$$

حيث c سرعة الضوء وتساوي $3 \times 10^8 m/s$. ويعتمد طول موجة الضوء المشع من الديود الضوئي
على نوع المادة المصنع منها ، فعند استخدام ديود مصنوع من غاليوم - الالمنيوم - ارسنايت ($AlAs$
 Ga) فان طول موجة الضوء المشع تساوي من $800nm$ الى $900nm$ ، اما عند استخدام انديوم -
غاليوم - ارسنايت - فوسفيد ($InGaAsP$) فان طول موجة الضوء المشع تتراوح بين $1\mu m$ الى حوالي
 $1.7\mu m$

وبما أن لون الضوء يعتمد اعتماداً مباشراً على طول موجة الضوء المشع فإننا نجد ان الديود المصنوع
من ($GaAsP$) يعطينا ضوء ذو لون احمر او برتقالي ، أما اذا كان الديود مصنوع من (GaP) فان
لون الضوء المشع يكون اصفر او اخضر .

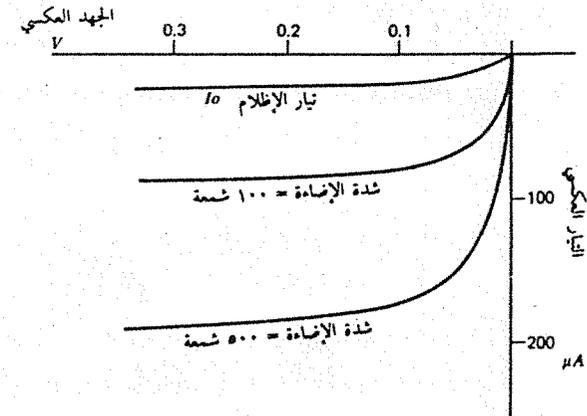
ومن اهم استخدامات الديودات الضوئية استخدامها كمصدر لارسال معلومات في انظمة
الاتصالات الضوئية (Optical Fiber Communications) كما تستخدم في حاسبات الجيب وذلك
لاظهار الارقام والحروف والاشارات والرموز .

6-11-2 ديود PIN

يعتبر ديود PIN من الديودات الخاصة المستخدمة في مجال الترددات العالية . وتصنع مثل هذه

$$(64-2) \quad = I_p + I_s \left(1 - \exp \left(\frac{-qV}{KT} \right) \right)$$

حيث I_s تيار التشبع العكسي، I_p هو التيار الناتج عن الحاملات المتولدة بفعل الضوء . وكما يظهر
من العلاقة السابقة ان قيمة التيار العكسي تعتمد اعتماداً مباشراً على قيمة التيار I_p وتتناسب قيمة هذا
التيار تناسباً طردياً مع شدة الاضاءة وبين الشكل (31) منحنى الخواص الفولت - امبير للديود
الضوئي عن شدة اضاءة مختلفة .



شكل 31 منحنى الخواص الفولت - امبير للديود الضوئي

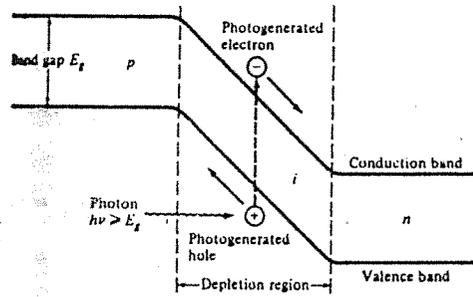
كما ويوجد تطبيقات كثيرة للديود الضوئي منها تحويل رموز البطاقات المثقبة في الحاسبات
الالكترونية الى اشارات كهربائية كما يستعمل في كاشفات الضوء . وهناك نوع اخر من الديودات
الضوئية يدعى ديود الخلية الضوئية يقوم بتحويل الضوء الى طاقة كهربائية ومن اهمها الخلايا
الشمسية (solar cell) والتي يكثر استعمالها في الاقمار الصناعية وسفن الفضاء .

5-11-2 الديود الباعث للضوء (LED) (Light - Emitting Diode)

ان عمل هذا الديود هو عكس عمل الديود الضوئي اذ يقوم الديود الباعث للضوء بتحويل
الطاقة الكهربائية الى طاقة ضوئية . ويتلخص مبدأ عمل هذا الديود في اجاث اشعاعات

ومن أكثر استخدامات هذا الديود شيوعاً استخدامه في انظمة الاتصالات الضوئية كاكاشف ضوئي (Photodetector) في اجهزة استقبال المعلومات، وبين الشكل (33) الدائرة العملية لذلك.

وكما هو واضح من الشكل انه يطبق على هذا الديود فرق جهد انحياز عكسي، ويتلخص مبدأ العمل لهذه الدائرة فيما يلي: عند ارسال فوتون يمتلك طاقة اكبر أو تساوي فرق الطاقة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ (فجوة الطاقة)، فان هذا الفوتون سوف يعطي طاقة كافية لتهديج (excite) الكترون واثارته مما يؤدي الى انتقال هذا الالكترون من نطاق التكافؤ الى نطاق التوصيل. ان هذه العملية تساعد على توليد ازواج حرة من الالكترونات والفجوات وهذه ما تدعى بالفوتوكوير (photocarriers). وبين الشكل (34) نطاقات الطاقة في حالة اشارة الكترون.



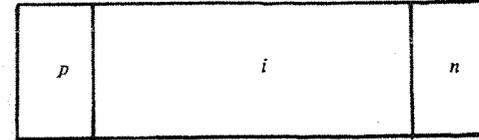
شكل 34 نطاقات الطاقة لديود PIN كاكاشف ضوئي

7-11-2 ديود IMPATT

يعتبر هذا الديود من الديودات الخاصة التي تستخدم في توليد الاشارات في مجال الترددات الميكروية (Microwave)، حيث يولد هذا الديود ترددات تصل الى اكثر من 100GHZ وبقدرات متوسطة. قام بوضع النظرية التي يعمل عليها هذا الديود العالم ريد (Read) عام 1958 والذي سمي هذا الديود باسمه فيما بعد، ولكن أول تجريب عملي على هذا الديود قام به العالم لي (Lee) في عام 1965.

وبين الشكل (35a) تركيب هذا الديود، كما ويوضح الشكل (35-b) توزيع المجال الكهربائي (Field distribution) لمختلف طبقات هذا الديود، اما الشكل (35-c) فيوضح تركيز نسبة الشوائب في مختلف طبقات هذا الديود.

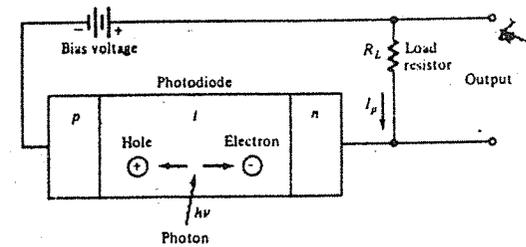
الديودات من مادة السيلكون، حيث يتكون هذا الديود من طبقتين احدهما من مادة نوع p - والأخرى من مادة نوع n - معزولتين عن بعضها بطبقة من السيلكون غير المحتوي على الشوائب (وقد تكون هذه الطبقة مطعمة بنسبة قليلة جداً من الشوائب نوع n -) وتدعى هذه الطبقة بطبقة i - (intrinsic region) وتكون نسبة الشوائب في المنطقتين n و p عالية. وبين الشكل (32) تركيب ديود PIN.



شكل 32 تركيب ديود PIN

عند اطباق فرق جهد عكسي على هذا الديود، نجد أن الطبقة الوسطى i تكون خالية تقريباً من حاملات الشحنة وبالتالي فان التيار المار خلال هذه الطبقة يكون قليل جداً. اما عند اطباق فرق جهد امامي على هذا الديود فان الطبقة الوسطى i تكون مسرّحاً لانتقال الالكترونات من المنطقة ذات النوع n - والفجوات من المنطقة ذات النوع p -، ويرجع السبب في ذلك الى ارتفاع حاجزي الجهد عند سطحي الالتصاق. وبذلك نجد أن المنطقة الوسطى i تكون مملوءة بحاملات الشحنة في حالة الانحياز الامامي بينما تكون خالية تقريباً من حاملات الشحنة في حالة اطباق فرق جهد عكسي على ديود PIN، وبالتالي فانه بالامكان استخدام هذا الديود كمفتاح (switch) عند ترددات تتراوح قيمتها بين 1.5 MHz و 40GHz وعند قدرات عالية جداً.

وقد وجد ان هذا الديود يعمل كمقاومة نقية عند الترددات الراديوية في حالة الانحياز الامامي حيث يمكن التحكم بقيمة هذه المقاومة عن طريق التحكم بجهد الانحياز.



شكل 33 الدائرة العملية لاستخدام ديود PIN ككاشف ضوئي

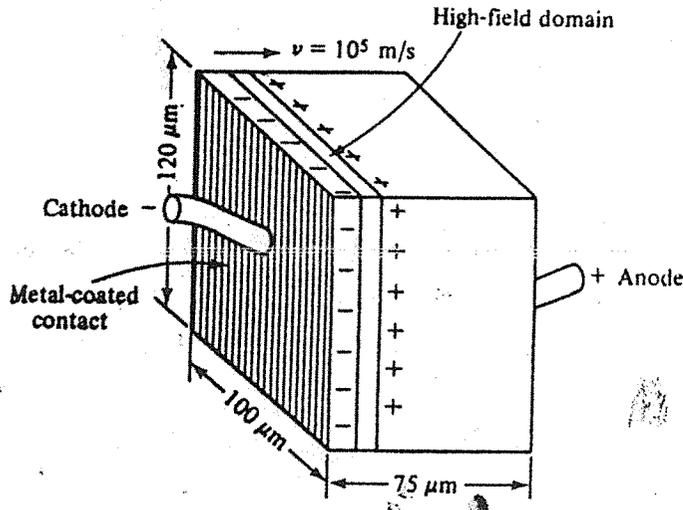
حيث يعمل جهد الانحياز العكسي على اخلاء طبقتي i و p من حاملات الشحنة، ويتولد نتيجة لذلك مجال كهربائي عالي بين الطبقة p والطبقة n^+ . ومع الاستمرار في زيادة هذا الجهد العكسي فان المجال الكهربائي يصل الى قيمة كبيرة تدعى القيمة الحرجة حيث تحدث عملية الانهيار فتدخل الالكترونات الى الطبقة n^+ والتي من الممكن اهمالها. اما الفجوات فتعبر منطقة الشحنة الفراغية وتسرع الى الطبقة p^+ مسببة مرور تيار كهربائي في الدائرة.

8-11-2 ديود Gunn

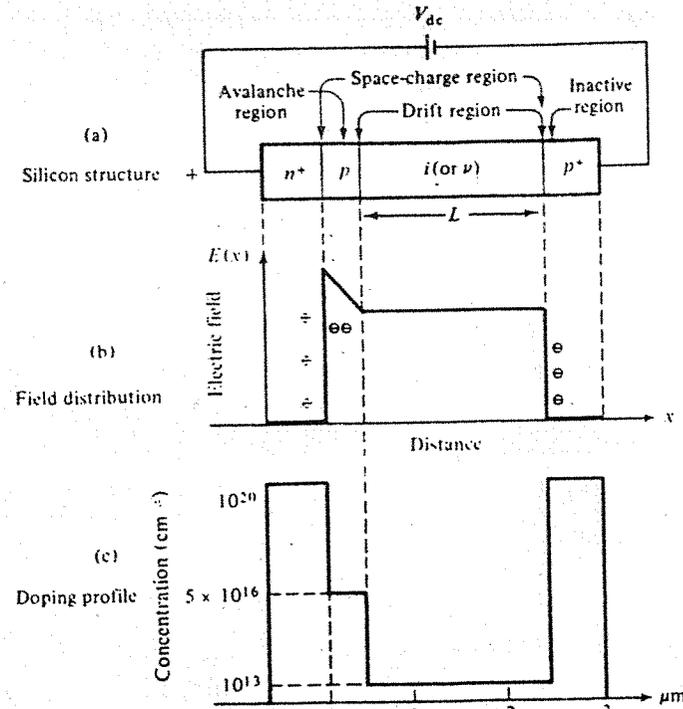
كما ذكرنا سابقاً ان الديودات PIV ، $Impatt$ هي ديودات ذات تركيب خاص - لها استعمالات خاصة. فيستخدم النوع الاول كمفتاح للترددات العالية أو كاكاشف ضوئي في انظمة الاتصالات الضوئية في حين يستخدم النوع الثاني لتوليد الاشارات في مجال الترددات الميكروية.

ان ديود Gunn هو ايضاً نوع خاص من الديودات والذي يستخدم لتوليد الاشارات والنبضات في مجال الترددات الميكروية.

سُمي هذا الديود بديود Gunn نسبةً الى العالم Gunn والذي اكتشف هذا الديود عام 1963. يتكون هذا الديود من مادة الغاليوم ارسنيت ($GaAs$) ذات النوع n والمزودة بوصلات معدنية (Metal Contacts) عند طرفيها. ويبين الشكل 36 تركيب ديود Gunn.



شكل 36 تركيب ديود Gunn



شكل 35 ديود IMPATT

وكما هو واضح من الشكل (35) فان هذا الديود يتكون من اربع طبقات هي n^+p-i-p^+ ، حيث ترمز الاشارة + الى ان مادة شبه الموصل مطعمة بنسبة عالية جداً من الشوائب، أما الرمز i ، v غيرمزان الى ان مادة شبه الموصل نقية وغير مطعمة بالشوائب.

يحتوي ديود IMPATT على طبقتين. احدها ضيقة وهي الطبقة التي تحتوي على مادة نوع p والتي يحدث عندها الانهيار المتضاعف (avalanche multiplication) وتدعى هذه المنطقة ايضاً بمنطقة المجال العالي أو بمنطقة الانهيار. اما المنطقة الثانية فهي المنطقة i والتي تتحرك فيها الفجوات المتولدة الى المنطقة p^+ . تدعى المنطقة الواقعة بين الوصلة n^+p والوصلة $i-p^+$ بمنطقة الشحنة الفراغية (space-charge region) أو منطقة الاستنزاف.

ومن اجل استخدام ديود IMPATT لتوليد الاشارات فانه يطبق عليه فرق جهد انحياز عكسي،

ترانزستور ثنائي القطبية BJT Bipolar - Junction Transistor

في اوائل الخمسينات من هذا القرن، تمكن فريق من علماء الفيزياء الامريكيين (شوكلي، وباردين، وبراتين) من اختراع عنصر الكتروني جديد من مواد أشباه الموصلات سمّوه ترانزستوراً transistor. لقد أدى هذا الاختراع الى احداث نقلة نوعية وتقدماً كبيراً في علم الالكترونيات وتكنولوجيا تصنيع العناصر الالكترونية والدارات المتكاملة.

يعتبر الترانزستور من العناصر الالكترونية الهامة والشائعة الاستعمال، وقد ساعدت عدة عوامل إلى انتشاره بشكل كبير، منها: صغر حجمه، وقلة تكاليفه، وسهولة تصنيعه، واستهلاكه القليل للطاقة الكهربائية. يستخدم الترانزستور بشكل عام في مكبرات الاشارات الكهربائية والمفاتيح الالكترونية المختلفة.

تصنّف الترانزستورات الى الأنواع الآتية: -

- ترانزستور وصله احادي الاستقطاب UJT
- ترانزستور ثنائي القطبية BJT
- ترانزستور تأثير المجال FET
- Field Effect Transistor

لقد خصصت هذه الوحدة لتعريف القارئ بترانزستور ثنائي القطبية BJT فقط. أما أنواع الترانزستور الأخرى سوف توضح في الوحدات اللاحقة في هذا الكتاب إن شاء الله.

يتكون الترانزستور BJT من وصلتي P-N مربوطتين على التوالي بحيث تشترك الوصلتان في المنطقة الوسطى، وبذلك يصبح الترانزستور مكوناً من 3 مناطق: P-N-P أو N-P-N اعتماداً على طريقة ربط الوصلتين. تسمى المنطقة الوسطى بالقاعدة Base. أما المنطقتان الطرفيتان فتسمى احدهما بالباعث Emitter والأخرى بالمجمع Collector. واخيراً تجدر الإشارة أن طبيعة عمل الترانزستور BJT تعتمد على حركة الالكترونات والفجوات معاً على عكس الترانزستورات UJT

تمتاز مادة الغاليوم ارسينيت (Ga As) بانقسام نطاق التوصيل فيها الى مستويي طاقة احدها يدعى المستوى العالي للطاقة والآخر المستوى المنخفض للطاقة.

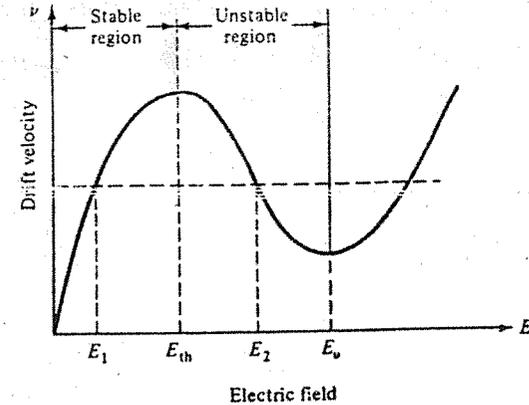
عند غياب فرق جهد الانحياز تكون تقريباً جميع الالكترونات في مستوى الطاقة المنخفض وعند زيادة قيمة جهد الانحياز الى حد معين تقفز جميع الالكترونات الى مستوى الطاقة العالي وهذا يعني ان سرعتها تقل. بعد ذلك تأتي الالكترونات من مصدر فرق الجهد (جهد الانحياز) الى المهبط بسرعة معينة ولكنها تتحرك خلال شبه الموصل بسرعة اقل.

وهذا يعني تراكم الالكترونات عند المهبط ويستمر ذلك الى ان تهبط شدة المجال الى قيمة تحت القيمة الحرجة (threshold value) وتعرف القيمة الحرجة على انها قيمة شدة المجال التي يتم عندها انتقال الالكترونات من مستوى الطاقة المنخفض الى مستوى الطاقة العالي.

وهذا يؤدي الى عودة الالكترونات الى المهبط مرة ثانية بسرعة تحددها شدة المجال الكهربائي المؤثر وتكون حركتها على شكل دفعة أو نبضة ضيقة (spike). بعد ذلك ترتفع شدة المجال عند المهبط ثانية وتتكرر العملية.

ونستطيع التحكم بالتردد من خلال التحكم بسرعة حركة الالكترونات وطول الدبود.

ويبين الشكل (37) العلاقة بين شدة المجال وسرعة انسياب الالكترونات.



شكل 37 علاقة شدة المجال بسرعة الانسياب للالكترونات في دبود Gunn

تطبيقات الديود (الثاني)

مقدمة:

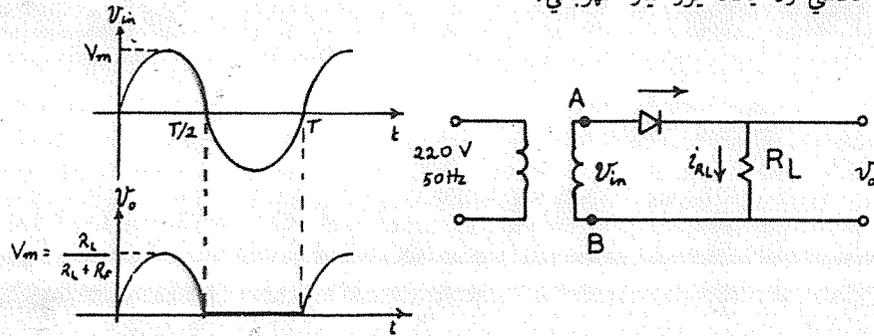
لليود استخدامات كثيرة، بعضها يعتمد على خواصه الخطية والآخر على خواصه غير الخطية. وستحدث في هذا الباب عن بعض استخداماته، حيث يقوم الديود بتقوم الاشارة المترددة كما هو الحال في تقويم نصف الموجه وتقويم الموجه الكاملة، ويمكن استخدامه (ديود الزنر) في تثبيت الجهد، ويستخدم أيضاً في دوائر الخلط (يستفاد من خصائصه غير الخطية لهذه الغاية)، وفي الدوائر المنطقية والرقمية، وفي دوائر الازلام، وفي الكشف عن الامواج، وغيرها.

1-7 توحيد نصف الموجه والموجه الكاملة

سوف نتحدث في هذا البند عن اهم استخدامات الديود، حيث يستخدم في توحيد او تقويم الاشارات المترددة.

1.1-7 توحيد نصف الموجه

خلال النصف الاول من الدورة وكما هو مبين بالشكل (1) يكون جهد النقطة (A) موجياً بالنسبة الى النقطة (B) لذلك يمر تيار كهربائي في الدائرة بالاتجاه المبين. في النصف الثاني من الدورة، يكون جهد النقطة (A) سالباً بالنسبة الى النقطة (B) لذلك يصبح الديود في حالة انخياز عكسي ولا يكاد يمر تيار كهربائي.



شكل 1 الدائرة الكهربائية لموحّد نصف الموجه، وشكل الاشارة على مدخل ومخرج هذه الدائرة

حيث I_m هو متوسط (معدل) التيار

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \, d\alpha \right]$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} I_m (-\cos \alpha) \Big|_0^{\pi} = \frac{1}{2\pi} I_m (1+1) = \frac{I_m}{\pi}$$

(6-7)

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = \left(\frac{I_m}{\pi} \right) R_L = \frac{V_m}{(R_L + R_f)\pi} R_L = \frac{V_m}{\pi} \left(\frac{R_L}{R_L + R_f} \right)$$

حيث V_m القيمة العظمى الجهد المدخل
 R_f مقاومة الديود في الانحياز الامامي
 R_L مقاومة الحمل

$$(7-7) \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\alpha) \, d\alpha}$$

$$(8-7) \quad = \left(\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \alpha \, d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \, d\alpha \right] \right)^{1/2}$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi} I_m^2 \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha \, d\alpha \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{2\pi} I_m^2 \int_0^{\pi} \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha) \, d\alpha \right]^{1/2}$$

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} I_m^2 \cdot \frac{1}{2} \left[\alpha \right]_0^{\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{I_m^2 \pi}{4\pi} \right]^{1/2} = \frac{I_m}{2}$$

(9-7)

$$V_{rms} = I_{rms} R_L = \left(\frac{I_m}{2} \right) R_L = \frac{V_m}{2(R_L + R_f)} R_L$$

أما بالنسبة لتردد الاشارة الخارجة فيكون التردد مساوياً لتردد المصدر. كذلك اقصى جهد يتعرض له الديود في حالة الانحياز المكسي (P.I.V) يساوي V_m .

2.1-7 توحيد الموجة الكاملة

- توحيد الموجة الكاملة باستخدام ديودين:

في المحول المبين بالشكل (2) (center-tapped transf) عندما يكون جهد النقطة (A) موجياً بالنسبة الى النقطة (B)، يكون جهد النقطة (B) موجياً بالنسبة الى النقطة (C).

الجهد على مقاومة الحمل = تيار مقاومة الحمل × مقاومة الحمل

لذلك يوجد جهد على مقاومة الحمل خلال النصف الموجب من الدورة ويكون الجهد يساوي صفرأ تقريباً خلال النصف السالب من الدورة (إهمال التيار العكسي) والان لنقوم بحساب التيار I_{DC} وفرق الجهد (V_{dc}).

لنفرض أن الاشارة V_{in} هي اشارة جيبية كما في العلاقة التالية

(1-7)

$$V_{in} = V_m \sin \omega t \\ = V_m \sin \alpha \quad \text{where } (\omega t = \alpha)$$

ومن العلاقة السابقة يمكن إيجاد التيار حسب العلاقة التالية

(2-7)

$$i = \frac{V_{in}}{R_{tot}}$$

إذا اعتبرنا مقاومة الديود في حالة الانحياز الامامي تساوي R_f . كانت القيمة العظمى لـ V_{in} اكبر بكثير من V_f (جهد القطع، جهد العتبة) فإن التيار يكون:

(3-7)

$$i = \frac{V_{in}}{(R_f + R_L)} = \frac{V_m \sin \alpha}{R_f + R_L}$$

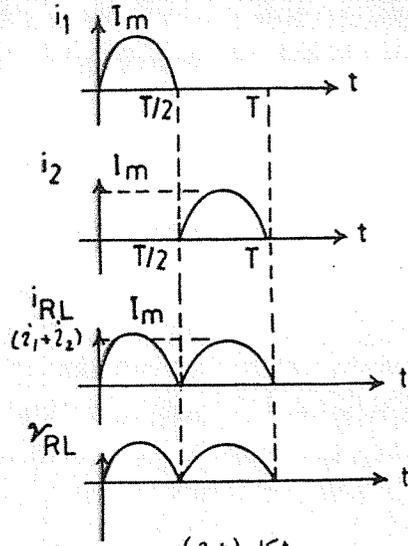
(4-7)

$$i = I_m \sin \alpha \quad \text{where } I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L}$$

(5-7)

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\alpha) \, d\alpha$$

$$\text{where } i = \begin{cases} I_m \sin \alpha & 0 < \alpha < \pi \\ 0 & \pi < \alpha < 2\pi \end{cases}$$



شكل (2.b)

تردد اشارة المخرج = ضعف تردد اشارة المصدر

(14-7)

$$f_{out} = 2f_{Line}$$

في هذه الدائرة (ديودين)، اذا اخذنا الحلقة الخارجية يكون احد الديودين في حالة انحياز امامي والديود الآخر في حالة انحياز عكسي. لذلك يكون أقصى جهد على الديود في حالة الانحياز العكسي

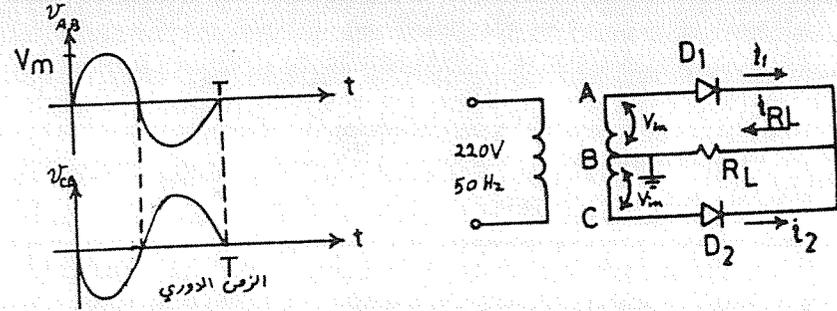
$$2V_m =$$

(15-7)

$$\text{Peak Inverse Voltage} = 2V_m$$

- توحيد الموجه الكاملة باستخدام الموحد الجسري (The Bridge Rectifier)

يبين الشكل (3) الدائرة الكهربائية للموحد الجسري كما يبين أيضاً أشكال الاشارات على مدخل ومخرج هذه الدائرة وكما يظهر من الشكل انه خلال النصف الاول من الدورة يكون جهد النقطة (E) موجباً بالنسبة الى النقطة (F) لذلك يمر التيار الكهربائي من (F) الى (E) الى (A) ثم عبر الديود (D1) الذي يكون في حالة انحياز امامي، ثم الى النقطة B ثم عبر (RL) الى النقطة (D) ثم الى النقطة (C) عبر الديود (D3) الذي يكون في حالة انحياز امامي ثم الى النقطة (F). خلال النصف الثاني من الدورة، يكون جهد النقطة (E) سالباً بالنسبة الى النقطة (F) لذلك يمر التيار من النقطة (E) الى النقطة (F)، الى النقطة (C) الى (B) عن طريق (D2) الذي يكون في حالة انحياز أمامي، ثم عبر مقاومة الحمل الى النقطة (D) ثم الى النقطة (A) عن طريق (D4) الذي



شكل (2) الدارة الكهربائية لموحد الموجه الكاملة وشكل الاشارة على مدخل ومخرج هذه الدائرة في النصف الاول من الدورة كما هو مبين بالشكل (2-ب) يكون جهد النقطة (A) موجباً بالنسبة الى النقطة (B) وجهد النقطة (C) سالباً بالنسبة الى النقطة (B)، لذلك يكون الديود الاول (D1) في حالة انحياز امامي فيمر تيار (i1)، ويكون الديود الثاني (D3) في حالة انحياز عكسي فيكون التيار (i2) تقريباً مساوياً صفراً. لذلك يمر تيار بمقاومة الحمل $\approx i_1$. أما في النصف الثاني من الدورة فتنعكس الأمور اذ يصبح جهد النقطة (A) سالباً بالنسبة الى النقطة (B)، وجهد النقطة (C) موجباً بالنسبة الى النقطة (B)، فيصبح الديود الاول (D1) في حالة انحياز عكسي، والديود الثاني (D3) في حالة انحياز امامي. لذلك يكون التيار (i1) يساوي صفر تقريباً. والتيار (i2) يمر عبر مقاومة الحمل ويمكن حساب قيمة التيار I_{dc} حسب العلاقة التالية:

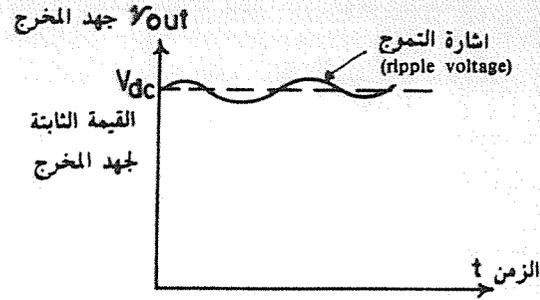
$$I_{dc} = 2 \frac{I_m}{\pi} \quad (10-7)$$

$$V_{dc} = I_{dc} R_L = \frac{2I_m}{\pi} R_L \quad (11-7)$$

$$= \frac{2}{\pi} \frac{V_m}{(R_L + R_f)} R_L = \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{R_L}{R_L + R_f} \right)$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (12-7)$$

$$V_{rms(output)} = I_{rms} R_L \quad (13-7)$$



شكل (4) شكل الاشارة على مخرج المقومات عند استخدام دائرة مرشح. وهو يبين المركبة المستمرة والمركبة المترددة.

$$(18-7) \quad \text{معامل التموج } (r) = \frac{\text{القيمة الفعالة لجهد التموج}}{\text{القيمة الثابتة لجهد المخرج}}$$

1.2.7 حساب معامل التموج لمقوم نصف الموجة ولمقوم الموجة الكاملة من المعروف أن:

$$(19-7) \quad \text{القدرة الكلية للحمل} = \text{القدرة الثابتة} + \text{القدرة المتناوبة لاشارة التموج}$$

$$(20-7) \quad V_{rms}^2 = V_{dc}^2 + V_{rms}^2 \text{ (ripple voltage)}$$

$$(21-7) \quad V_{rms} \text{ (ripple voltage)} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}$$

ولكن معامل التموج:

$$(22-7) \quad r = \frac{V_{rms} \text{ (ripple voltage)}}{V_{dc}}$$

بالتمويض ينتج:

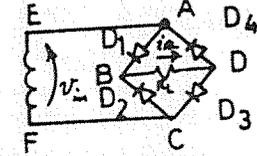
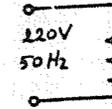
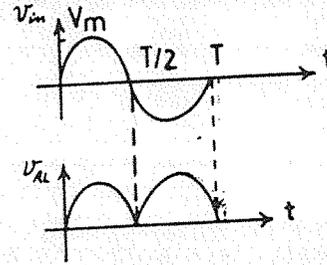
$$(23-7) \quad r = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}}$$

$$= \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1}$$

عند استخدام مقوم نصف الموجة (half-wave rectifier) فينتج:

$$(24-7) \quad r = \sqrt{\left(\frac{V_m/2}{V_m/\pi}\right)^2 - 1}$$



شكل (3) الدارة الكهربائية للموحد الجسري، والاشارات على مدخل ومخرج هذه الدائرة يكون في حالة انحياز امامي ثم الى النقطة (E). لذلك يمر التيار الكهربائي عبر المقاومة (RL) بنفس الاتجاه سواء في النصف الاول أو النصف الثاني من الدورة.

$$f_{out} = 2f_{line}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{dc} = 2 \frac{I_m}{\pi}$$

في هذه الدائرة، اذا اخذنا الحلقة (FEA BCF) يكون احد الديودين في حالة انحياز امامي الجهد عليه قليل جداً)، والديود الآخر في حالة انحياز عكسي، لذلك اقصى جهد معرض له يساوي V_m وبالتالي:

$$\text{Peak Inverse voltage (P.I.V)} = V_m$$

لذلك يفضل استخدام هذه الدائرة اذا كان الجهد (V_m) كبيراً.

2.7 معامل التموج (r)

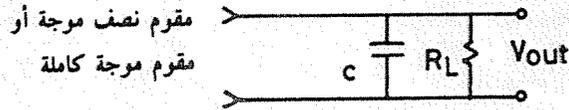
جهد المخرج المأخوذ من دوائر المقومات مؤلف من مركبتين كما هو مبين بالشكل (4) وهاتان المركبتان هما: المركبة الثابتة (dc) والمركبة المتناوبة (ac)، وتسمى المركبة المتناوبة باشارة التموج. وتعرف النسبة بين القيمة الفعالة لجهد التموج إلى القيمة الثابتة لجهد المخرج بمعامل التموج.

3-7 دوائر تصفية الموجة الموحدة

لتقليل التموج (ripple) في إشارة المخرج يمكن استخدام إحدى دوائر التصفية التالية:

1. 3-7 استخدام المكثف على التوازي مع مقاومة الحمل

يبين الشكل (5) الدائرة الكهربائية لمصفي استخدام فيه المكثف مع مقاومة الحمل على التوازي. وفي هذه الدائرة يتناسب جهد التموج تناسباً عكسياً مع التردد، مع سعة المكثف، ومع مقاومة الحمل. والقانون التالي يوضح ذلك:



شكل (5) الدائرة الكهربائية لمصفي استخدم فيه المكثف مع مقاومة الحمل على التوازي

$$(26-7) \quad r = \frac{1}{2\sqrt{3} f_C R_L}$$

وكما هو معروف ان التردد f يساوي التردد f_{line} لمقوم نصف الموجه كما يساوي ضعف التردد f_{line} لمقوم الموجة الكاملة

لذلك، تحت نفس الظروف، يكون التموج أقل عند استخدام مقوم الموجة الكاملة وعندما تكون دائرة المخرج مفتوحة ($R_L \rightarrow \infty$)، يكون معامل التموج يساوي صفراً ويكون:

$$V_{dc} = V_m$$

2. 3-7 استخدام الملف على التوالي مع مقاومة الحمل:

يبين الشكل (6) الدائرة الكهربائية لمصفي استخدام فيه الملف مع مقاومة الحمل على التوالي وفي هذا المصفي يتناسب جهد التموج وبالتالي معامل التموج طردياً مع مقاومة الحمل وعكسياً مع التردد، ومع حثية الملف حيث نجد أن.

لاحظ ان: r يمكن ان تكون حرف (C) بالترتيب معادلات

$$V_{rms} = V_m/2$$

$$V_{dc} = V_m/\pi$$

وبالتالي نجد أن معامل التموج هو:

$$r = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} = 1.211$$

وبالتالي نجد أن معامل التموج لنصف الموجة يساوي (1.211)

وعند استخدام مقوم الموجة الكاملة (full-wave rectifier):

$$V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$$

$$V_{dc} = 2V_m/\pi$$

وبالتعويض بالعلاقة (23-7) نجد أن معامل التموج يساوي

$$(25-7) \quad r = \sqrt{\left(\frac{V_m/\sqrt{2}}{2V_m/\pi}\right)^2 - 1}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1}$$

وبالتالي نجد أن معامل التموج للموجة الكاملة يساوي (0.483).

لاحظ أن معامل التموج يساوي (1.211) لمقوم نصف الموجة ويساوي (0.483) لمقوم الموجة الكاملة، وهاتان القيمتان كبيرتان نسبياً، ولتقليل معامل التموج والحصول على إشارة ثابتة خالية من التموج، تستخدم دوائر التصفية المختلفة من مكثفات وملفات كما يستخدم منظم للجهد (مثل ديود الزنر) على مخرج الدائرة لتنظيم وتثبيت الجهد ضد التغيرات في مقاومة الحمل.

% Voltage regulation

4-7 النسبة المثوية للتنظيم
يمكن تعريف النسبة المثوية للتنظيم كما يلي:

$$(33-7) \text{ \% Voltage regulation} = \frac{V_{No Load} - V_{Load}}{V_{Load}} \times 100 \%$$

حيث $V_{No Load}$ تعني جهد المخرج (dc) في حالة عدم وجود مقاومة الحمل.

V_{Load} تعني جهد المخرج (dc) في حالة وجود مقاومة الحمل.

إذا كان جهد المخرج لا يتغير مع مقاومة الحمل (تيار الحمل) تكون نسبة التنظيم تساوي صفرأً. وكلما كانت النسبة المثوية للتنظيم أقل كلما كان مصدر الجهد ينظم الجهد بشكل أفضل.

Rectifier Efficiency,

5-7 كفاءة المقوم η

كفاءة المقوم هي النسبة بين القدرة المستمرة (P_{dc}) المستهلكة في الحمل الى القدرة المتناوبة المستهلكة (P_{ac}) في الدائرة

$$(34-7) \quad \eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

لاحظ ان

$$(35-7) \quad P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \text{ (for load)}$$

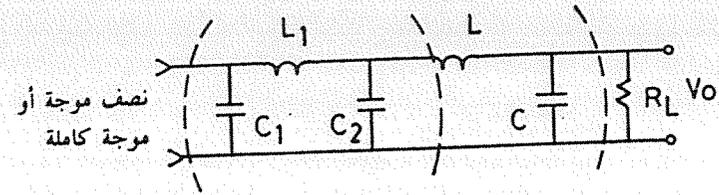
$$(36-7) \quad P_{ac} = I_{rms} V_{rms}$$

1.5-7 حساب الكفاءة لمقوم نصف الموجة:

عند التعويض في العلاقات السابقة، ينتج:

$$(37-7) \quad \eta_{hw} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{I_m}{\pi}}{\frac{V_m}{2} \cdot \frac{I_m}{2}} = \frac{4}{\pi^2} = 40.6 \%$$

وذلك عند اهمال المقاومة الامامية للديود



شكل (10) الدائرة الاساسية للمصفي نوع ($\pi + nL$)

$$(32-7) \quad r = r(\pi) \left(\frac{X_C}{X_L} \right)^n$$

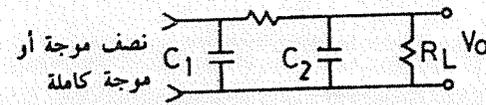
حيث:

$r(\pi)$ تمثل معامل التموج لمقطع (π)

7.3-7 المصفي نوع Rπ

R π-section filter

يبين الشكل (11) دائرة المصفي نوع Rπ وفي هذا النوع اذا كانت $R = X_L$ يكون معامل التموج (r) كما هو الحال في (π -section). ولكن التنظيم يكون رديئاً ويمكن استخدام هذا المعنى اذا كان التيار صغيراً جداً.



شكل (11) الدائرة الكهربائية للمصفي نوع Rπ

أما اذا كان تيار الحمل كبيراً، أو لتنظيم الجهد بشكل جيد، يستخدم مصفي الملف. وعندما يكون التيار أقل، يكون تنظيم الجهد أقل أهمية، يستخدم مصفي π (π -section). أما مصفي π باستخدام المقاومة مكان الملف (π -section Resistor) يمكن استخدامه عندما يكون تيار الحمل صغيراً جداً.

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{I_{dc}^2 R_L}{V_{rms} I_{rms}}$$

$$= \frac{(52.96)^2 (500)}{(30) (58.82)}$$

$$= 79.47 \%$$

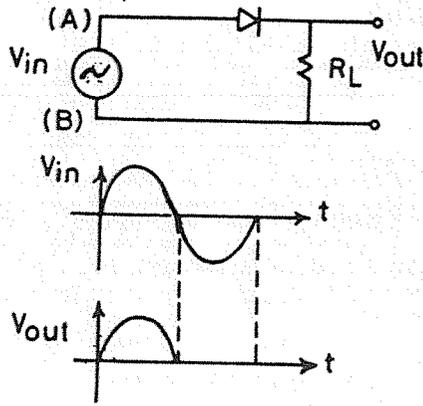
6-7 استخدام الديود في تحديد وتشكيل الإشارة

Series Limiter & Wave Shaping

Series Limiter

1. 6-7 محدد التوالي

في الدائرة المبينة بالشكل (12) خلال النصف الموجب للموجة، تكون النقطة (A) موجبة بالنسبة للنقطة (B)، انحياز أمامي للديود، فيكون جهد المخرج (V_{out}) تقريباً يساوي جهد المدخل.



شكل (12) دائرة محدد التوالي

في النصف السالب للإشارة، تصبح النقطة (A) سالبة بالنسبة للنقطة (B)، فيصبح الديود في حالة انحياز عكسي، لذلك التيار المار تقريباً يساوي صفراً، لذلك يكون جهد المخرج تقريباً صفراً، كما هو مبين بالرسم في الشكل (12).

أما في الدائرة المبينة بالشكل (13) خلال النصف الموجب (A موجبة بالنسبة إلى B) يكون

2. 5-7 حساب الكفاءة لمقوم الموجة الكاملة:
يمكن حساب كفاءة هذا المقوم كما يلي:

$$\eta_{fw} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\frac{2V_m}{\pi} \cdot \frac{2I_m}{\pi}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}}} = \frac{8}{\pi^2}$$

$$= 81.2 \%$$

مثال (1):

دائرة مقوم جسري، المقاومة الامامية لكل ديود فيها تساوي (5Ω)، المقاومة العكسية تقترب من اللانهاية. مقاومة الحمل (500Ω)، الجهد المتناوب الداخل للدائرة قيمته $V_{rm} = 30$. احسب:

أ. متوسط تيار الحمل I_{dc}
ب. كفاءة المقوم.

الحل:

المقوم الجسري عبارة عن مقوم مرجحة كاملة لذلك:

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}$$

القيمة العظمى للتيار المار بمقاومة الحمل:

$$I_m = \frac{V_m}{R_{tot}}$$

ير التيار خلال ديودين فقط، لذلك تكون القيمة العظمى للتيار:

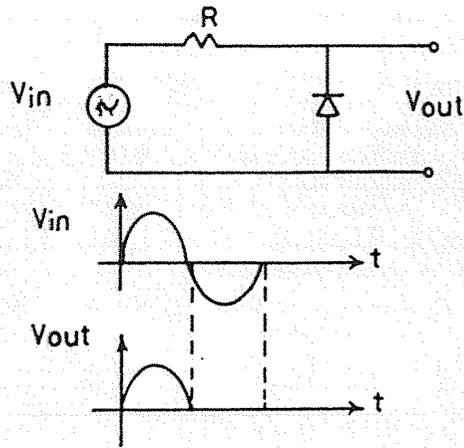
$$I_m = \frac{30\sqrt{2}}{500+5+5} = \frac{30\sqrt{2}}{510} A = 83.19 mA$$

فيكون متوسط التيار:

$$I_{dc} = \frac{2(83.19)}{\pi} = 52.96 mA$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{83.19}{\sqrt{2}} = 58.82 A$$

خلال النصف الموجب لاشارة المدخل، يكون الديود في حالة انحياز امامي، الجهد الواقع عليه ضئيل، لذلك يكون جهد المخرج تقريباً يساوي صفراً.
 في حالة النصف السالب لاشارة المدخل، يصبح الديود في حالة الانحياز عكسي، لذلك التيار المار صغير جداً. (جهد المخرج = جهد المدخل - جهد المقاومة) لذلك يكون جهد المخرج يساوي تقريباً جهد المدخل.



شكل (15) الدائرة الكهربائية لمحدد التوازي العكسي

أما في الدائرة المبينة بالشكل (15)، خلال النصف الموجب لاشارة المدخل يكون الديود في حالة انحياز عكسي، لذلك يكون التيار المار صغيراً جداً. إذا أهملنا هذا التيار يكون جهد المقاومة صفراً، تبعاً لذلك يكون جهد المخرج يساوي جهد المدخل.

خلال النصف السالب لاشارة المدخل، يصبح الديود في حالة انحياز امامي، الجهد الواقع عليه صغير. إذا أهملنا هذا الجهد، يكون جهد المخرج يساوي صفراً. كما هو مبين بالشكل (15).

Biased - Parallel Limiter

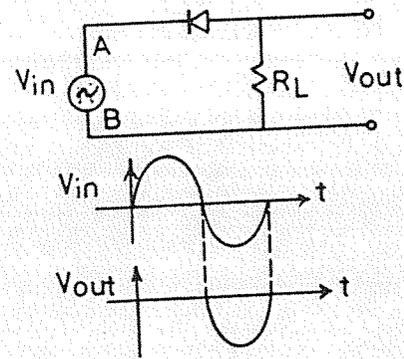
3. 6-7 محدد التوازي المنحاز

في الدائرة الموضحة بالشكل (16). حتى يحصل قطع للاشارة يجب ان تكون القيمة العظمى لجهد المدخل أكبر من الجهد V_{AA} .

خلال النصف الموجب لاشارة المدخل، الديود يمكن ان يكون في حالة انحياز عكسي أو امامي حسب قيمة (V_{in}) بالنسبة الى V_{AA} .

الديود في حالة انحياز عكسي، لذلك التيار المار يساوي تقريباً صفراً، لذلك جهد المخرج يساوي تقريباً صفراً.

خلال النصف السالب تنعكس الامور، فيصبح الديود في حالة انحياز امامي، لذلك اذا أهملنا الجهد الواقع عليه، يكون جهد المخرج يساوي جهد المدخل كما هو مبين بالرسم الموضح بالشكل (13).

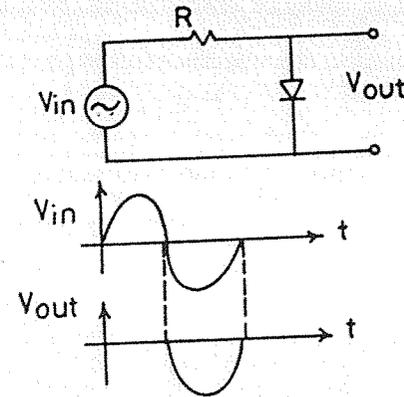


شكل (13) دائرة محدّد توازي عكسي

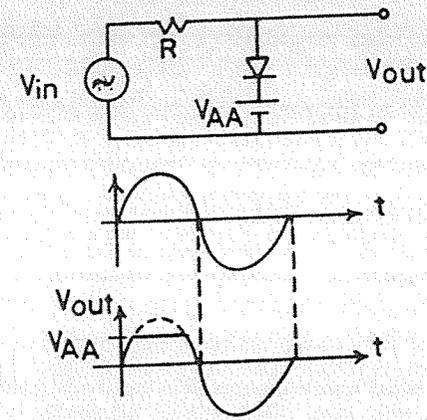
Parallel Limiter

2. 6-7 محدد التوازي

- في محدد التوازي يؤخذ جهد المخرج على التوازي مع الديود كما هو موضح بالشكل (14).

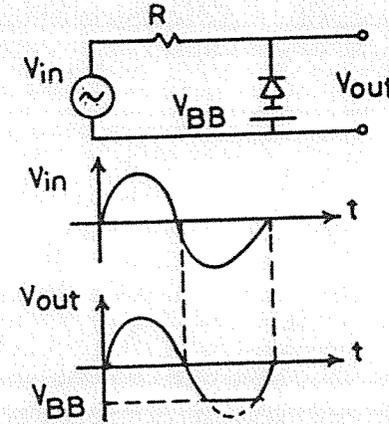


شكل (14) الدائرة الكهربائية لمحدد التوازي،



شكل (16) الدائرة الكهربائية لمحدد التوازي المنحاز

في البداية تكون $V_{in} < V_{AA}$ ، لذلك يكون الديود في حالة انحياز عكسي، تبعاً لذلك يكون التيار المار صغيراً جداً. فيكون جهد المقاومة يساوي تقريباً صفراً، لذلك يكون جهد المخرج يساوي تقريباً جهد المدخل (V_{in}). يزداد الجهد (V_{in}) تدريجياً وعندما يصبح قيمته أكبر من V_{AA} يتغير انحياز الديود، فيصبح منحازاً أمامياً. ويمر تيار في الدائرة. يكون الجهد الواقع على الديود ضئيلاً. فإذا أهملنا هذا الجهد يصبح جهد المخرج يساوي جهد البطارية (V_{AA}). ثم يتناقص الجهد (V_{in}) تدريجياً حتى يصبح أقل من (V_{AA})، لذلك يصبح انحياز الديود انحيازاً عكسياً ويصبح الجهد على المقاومة (R) يساوي تقريباً صفراً. لذلك يكون جهد المخرج يساوي جهد المدخل (V_{in}).



شكل (17) الدائرة الكهربائية لمحدد التوازي المنحاز، النموذج العكسي

خلال النصف السالب لاشارة المدخل، يكون الديود في حالة انحياز عكسي. جهد المقاومة يساوي صفر، جهد المخرج يساوي تقريباً جهد المدخل.

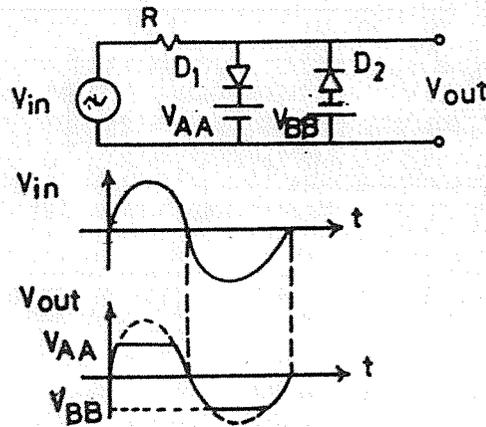
أما في الدائرة الموضحة بالشكل (17) حتى يحصل قطع في الاشارة يجب أن تكون القيمة العظمى لجهد المدخل (V_{in}) أكبر من (V_{BB}). خلال النصف الموجب لاشارة المدخل يكون الديود في حالة انحياز عكسي، لذلك جهد المقاومة يساوي تقريباً صفر، ولذلك V_{in} يساوي تقريباً V_{out} .

خلال النصف السالب في البداية تكون قيمة (V_{in}) أصغر من V_{BB} ، لذلك انحياز عكسي، جهد المقاومة يساوي تقريباً صفر. V_{in} يساوي تقريباً V_{out} ثم يصبح قيمة (V_{in}) أكبر من V_{BB} لذلك يصبح الديود في حالة انحياز أمامي فيمر تيار كهربائي في الدائرة، ويكون الجهد الواقع على الديود ضئيلاً، لذلك يصبح V_{BB} يساوي تقريباً V_{out} . ثم يتناقص الجهد V_{in} ، وعندما يصبح أقل من V_{BB} يصبح انحياز الديود عكسياً، فيصبح جهد المقاومة يساوي تقريباً صفر، V_{in} يساوي تقريباً V_{out} .

Double Biased Parallel Limiter

4.6.7 محدد التوازي المنحاز المزدوج

في الدائرة المبينة بالشكل (18) خلال النصف الموجب، يبقى الديود الثاني (D_2) في حالة انحياز عكسي. فيكون التيار المار خلاله يساوي تقريباً صفر.



شكل (18) الدائرة الكهربائية لمحدد التوازي المنحاز المزدوج

في البداية يكون V_{in} أصغر من V_{AA} لذلك يكون الديود الاول (D_1) في حالة انحياز عكسي والتيار المار ضئيلاً جداً لذلك يكون تيار المقاومة ضئيل والجهد الواقع عليها مهمل. فيكون ($V_{out} \approx V_{in}$). ثم يصبح V_{in} أكبر من V_{AA} فيصبح (D_1) في حالة انحياز أمامي، لذلك $V_{out} \approx V_{AA}$.

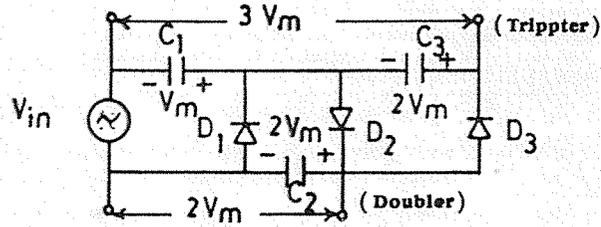
العظمى لجهد المدخل (V_m) ويكون D_1 في حالة انحياز أمامي. خلال النصف الموجب يكون (D_2) في حالة انحياز أمامي ويشحن المكثف الثاني (C_2) الى ضعف القيمة العظمى (جهد C_1 $V_{in,max} +$ لذلك يكون جهد المخرج يساوي ضعف القيمة العظمى لجهد للدخل.

$$V_{out} = 2V_m$$

Voltage Tripler

3. 7-7 ثلاث أضعاف المدخل

في الدائرة المبينة بالشكل (21) خلال النصف السالب لاشارة المدخل يكون D_1 في حالة انحياز امامي وكذلك D_3 . خلال النصف الموجب يكون D_2 في حالة انحياز أمامي.



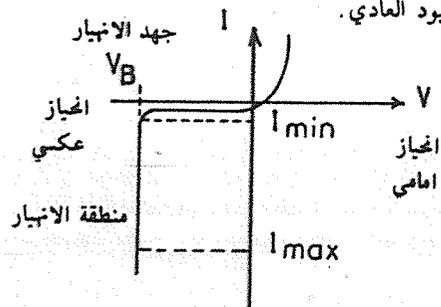
شكل (21) الدائرة الكهربائية لثلاث اضعاف جهد المدخل

يشحن المكثف (C_1) الى القيمة العظمى V_m . يشحن المكثف الثاني الى ضعف القيمة العظمى ($2V_m$)، وكذلك يشحن المكثف الثالث الى ضعف القيمة العظمى ($2V_m$).

لذلك اذا اخذنا الجهد على المكثف (C_1) والمكثف (C_3) يكون الجهد يساوي ثلاثة اضعاف القيمة العظمى لجهد المدخل ($3V_m$) كذلك يمكن مضاعفة الجهد اكثر باضافة مكثف وديود في كل مرة.

3.7 استخدام ديود الزنر في تثبيت الجهد

يبين الشكل (22) منحنى الخواص لديود الزنر وكما يظهر من الشكل ان منحنى الخواص لديود الزنر في حالة الانحياز الامامي شبيه بالديود العادي.



شكل (22) منحنى الخواص لديود زنر

V_{out} . ثم يتناقص الجهد (V_{in}) فيصبح الديود (D_1) في حالة انحياز عكسي لذلك ($V_{out} \cong V_{in}$) في حالة النصف السالب يبقى (D_1) في حالة انحياز عكسي أما الديود الثاني، فيكون في البداية انحيازه عكسي، ثم أمامي، ثم عكسي. لذلك يكون جهد المخرج يساوي تقريباً V_{in} ثم V_{BB} ، ثم يساوي تقريباً V_{in} . كما هو مبين بالرسم الموضح بالشكل (18).

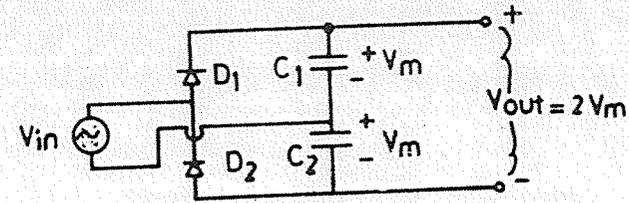
7-7 استخدام الديود كمضاعف للجهد (Voltage Doubler)

يوجد هناك عدة أنواع من مضاعفات الجهد وسوف نذكر اهمها في البنود التالية:

Full-Wave Voltage Doubler

1, 7-7 مضاعف الجهد ذو الموجة الكاملة

في الدائرة الموضحة بالشكل (19) النصف الموجب لاشارة المدخل (V_{in}) يكون D_1 في حالة



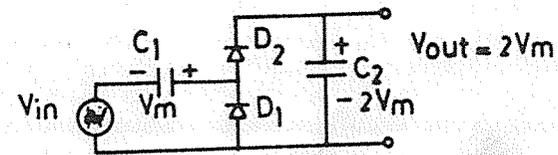
شكل (19) الدائرة الكهربائية لمضاعف الجهد ذو الموجة الكاملة

انحياز امامي، D_2 في حالة انحياز عكسي، لذلك يشحن المكثف (C_1) الى القيمة العظمى لجهد المدخل (V_m)، وحسب القطبية المبينة بالرسم. خلال النصف السالب يكون D_1 في حالة انحياز عكسي، والديود الثاني (D_2) في حالة انحياز أمامي لذلك يشحن المكثف الثاني (C_2) الى القيمة العظمى لجهد المدخل (V_m). جهد المخرج يساوي الجهد على المكثف الاول مضافاً اليه الجهد على المكثف الثاني وبالتالي يساوي $2V_m$.

Half-Wave Voltage Doubler

2. 7-7 مضاعف الجهد (نصف الموجة)

في الدائرة الموضحة بالشكل (20) خلال النصف السالب يشحن المكثف الاول الى القيمة



شكل (20) الدائرة الكهربائية لمضاعف الجهد (نصف الموجة)

الحل:

$$V_{out} = V_Z \text{ (breakdown)} = 30 \text{ volts}$$

$$I_{Load} = \frac{V_{load}}{R_L} = \frac{30}{2} = 15 \text{ mA}$$

$$I_{total, min.} = I_{z, min} + I_{Load} = 1 + 15 = 16 \text{ mA}$$

$$V_{R_S} = I_{R_S} \times R_S = 16 \times 1 = 1.6 \text{ volts}$$

$$V_{S, min.} = 1.6 + 30 = 31.6 \text{ volts}$$

$$I_{tot, max} = I_{Z, max} + I_{Load} = 40 + 15 = 55 \text{ mA}$$

$$V_{R_S} = (55) (0.1) = 5.5 \text{ volts}$$

$$V_{S, max} = 5.5 + 30 = 35.5 \text{ volts}$$

$$31.5 < V_S < 35.5$$

حسب هذا المثال، يقوم الزنر ديود بتثبيت الجهد على (30 فولت) بشرط الا يقل جهد المصدر عن (31.5 فولت)، ولا يزيد عن 35.5 فولت.

الآن نفرض أن الجهد (V_Z) نُبت على القيمة (35 volts) احسب الى أي مدى يمكننا تغيير مقاومة الحمل (R_L) بحيث يبقى الزنر ديود يقوم بتثبيت الجهد.

$$V_{RS} = V_S - V_Z = 35 - 30 = 5 \text{ volts}$$

$$I_{tot} = I_{RS} = \frac{5}{0.1k\Omega} \text{ volts} = 50 \text{ mA}$$

$$I_{Load, max} = 50 - I_{z, min} = 50 - 1 = 49 \text{ mA}$$

$$R_{L, min} = \frac{V_Z}{I_{Load, max}} = \frac{30}{49} \text{ K}\Omega$$

$$\cong .6K \Omega$$

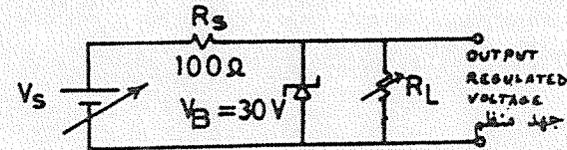
في حالة الانهيار المكسي يكون التيار صغيراً جداً في البداية وعندما يصبح الجهد يساوي جهد الانهيار (V_B). تحصل زيادة كبيرة في التيار مع بقاء الجهد ثابتاً، لذلك يستخدم ديود الزنر في عملية تثبيت الجهد، وتصمم الدائرة كهربائية بحيث يعمل الزنر في منطقة الانهيار.

ويحدث الانهيار بسبب احدى الظاهرتين:

- تضاعف افلانس (Avalanche Multiplication)

- انهيار زنر (Zener Breakdown)

عند استخدام ديود الزنر (Zener Diode) في تثبيت الجهد، يجب الا يقل التيار المار به عن قيمة معينة (I_{min})، ويجب الا يزيد عن قيمة معينة (I_{max}). اذا قل التيار عن (I_{min}) لا يقوم ديود الزنر بتثبيت الجهد، واذا زاد التيار المار به عن (I_{max}) يكون عرضة للانهيار.



شكل (23) الدائرة الكهربائية لتنظيم الجهد باستخدام ديود زنر

1.8-7 دائرة تمثل تنظيم الجهد بواسطة ديود الزنر

ديود الزنر يقوم بتثبيت الجهد على المخرج ضد التغيرات في قيمة (V_Z) أو التغيرات في (R_L) ضمن مدى معين وبين الشكل (23) دائرة تنظيم الجهد باستخدام ديود الزنر.

مثال (2):

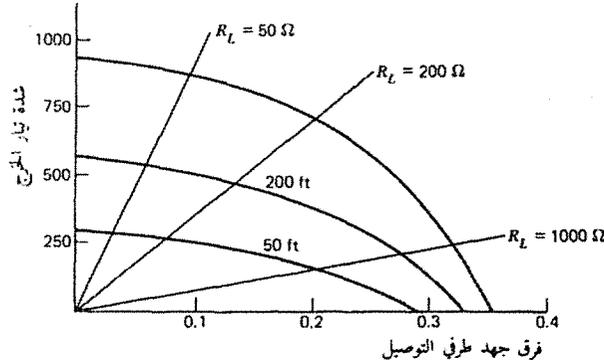
افرض ان جهد الانهيار لديود الزنر = 30 فولت كذلك $I_{z, min} = 1 \text{ mA}$, $I_{z, max} = 40 \text{ mA}$

فإذا علمنا ان قيمة المقاومة (R_S) = 100 أوم وان قيمة R_L تثبت على ($2K\Omega$).

احسب أقل قيمة للجهد (V_Z) واكبر قيمة بحيث تبقى الدائرة تقوم بتنظيم الجهد.

الشبكة المعدنية رفيعة جداً حتى تحقق أكبر تعرض لسطح الخلية للضوء . وبالنسبة للخلايا ذات المساحة الصغيرة فإنه يستغنى عن هذه الشبكة ويكتفى بالتوصيل عن طريق الشريحة الجانبية فقط .

وبين شكل ١٧-٥ العلاقة بين التيار خلال مقاومة التحميل R_L وبين الجهد لأحد الخلايا الشمسية عند قيم مختلفة لشدة الضوء الساقط . ويلاحظ من هذا الشكل أن أقصى فرق جهد يتولد هو حوالي ٠.٣٥ فولت عندما تكون مقاومة التحميل $(R_L = \infty)$. في حين أن أقصى تيار يمكن أن يمر والدائرة مغلقة (أي $R_L = 0$) لا يتعدى عدة ميلي أمبيرات . ويتضح من هذا الشكل أن الجهد أو التيار المتولد من خلية واحدة لا يكفي للتغذية بالقدرة الكهربائية اللازمة . لذا يستخدم عدد كبير من هذه الخلايا توصل فيما بينها على التوالي (لزيادة الجهد) وعلى التوازي (لزيادة التيار) .



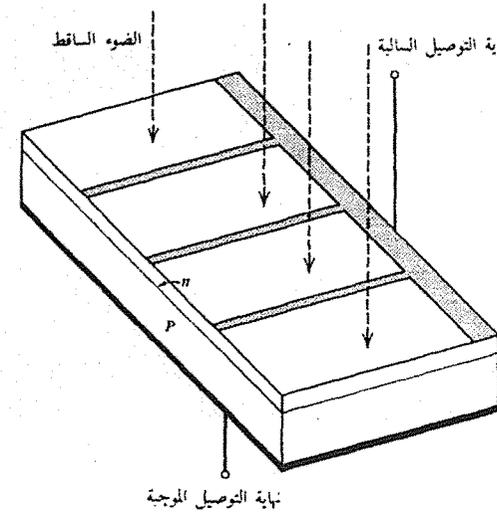
شكل ١٧-٥

١٢-٥ ترازستور الوصلة

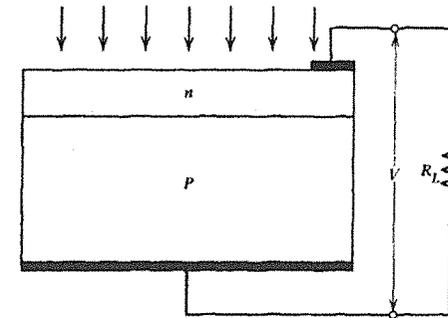
يتكون الترازستور من قطعة واحدة من الجرمانيوم أو السليكون مقسمة إلى ثلاث مناطق ذات نوعية مختلفة بحيث تكون المنطقة الوسطى من نوع معين والمنطقتان الطرفيتان من نوع آخر . فإذا كانت المنطقة الوسطى من النوع الإلكتروني تكون المنطقتان الطرفيتان من النوع الثقبى (شكل ١٨-٥ أ) ويسمى الترازستور في هذه الحالة بالوصلة $p-n-p$ أما إذا كانت المنطقة الوسطى من النوع الثقبى تكون المنطقتان الطرفيتان من النوع الإلكتروني (شكل ١٨-٥ ب) ويسمى الترازستور في هذه الحالة بالوصلة $n-p-n$. وتسمى المنطقة الوسطى في كلا الحالتين بالقاعدة Base . أما المنطقتان الطرفيتان فتسمى إحداهما بالباعث Emitter والأخرى بالجمع Collector ويرمز للترازستور عند استخدامه كعنصر من عناصر الدارة الإلكترونية بالرمز المبين في الشكل ١٨-٥ ج أو ١٨-٥ د إذا كان من النوع $p-n-p$ أو $n-p-n$ بالتتابع . ولتحديد الباعث يرسم عليه سهم يشير إلى اتجاه التيار عندما يكون ملتحق الباعث - قاعدة محبباً تحبيراً مباشراً (أي عندما يمر تيار مباشر بين الباعث والقاعدة) ويتضح من هذا الشكل أن اتجاه التيار في الترازستور $p-n-p$ يكون من الباعث إلى القاعدة (أي في اتجاه حركة الثقوب) . أما بالنسبة للترازستور $n-p-n$ فيكون اتجاه التيار خارجاً من القاعدة إلى الباعث (أي عكس اتجاه حركة الإلكترونات) .

وعموماً يكون حجم الترازستور صغيراً ويوضع داخل حافظة من البلاستيك أو المعدن محكمة القفل حتى لا يتعرض للرطوبة والعوامل الجوية الأخرى . وتتميز منطقة الباعث في كلا النوعين بتوصيلية عالية أي بنسبة تركيز

ثقبى . فهي تتكون من طبقة رقيقة من السليكون ذي الشوائب الثقبية (شكل ١٥-٥) . وتبلغ مساحة سطحها حوالي ٢ سم^٢ . وتتكون المادة الإلكترونية على السطح العلوي بغرس طبقة رقيقة جداً (حوالي ٠.٥ ميكرون) من الشوائب الإلكترونية (مثل الفسفور) . وعند سقوط الضوء على الخلية من السطح العلوي يتكون فرق الجهد الفوتوفولتي الذي يؤدي إلى مرور تيار كهربائي عند تحميل الخلية (شكل ١٦-٥) . ويغطي السطح السفلي للخلية (المادة p) بأكملها بطبقة معدنية رقيقة تستخدم كنهاية توصيل للمادة الثقبية وهي نهاية التوصيل الموجبة أما السطح العلوي للخلية (المادة n) فتغطي منه شريحة رفيعة على أحد الأجناب بالطبقة المعدنية لاستخدامها كنهاية توصيل سالبة وذلك حتى تتعرض أكبر مساحة من هذا السطح للضوء الساقط . ولتحسين التوصيل الكهربائي وتقليل عدد الثقوب التي يمكن أن تعيد إنتاجها مع الإلكترونات في المنطقة n فإنه يتم عمل شبكة رقيقة من الغطاء المعدني بحيث يقسم السطح العلوي كما هو مبين في شكل ١٥-٥ . ويجب أن تكون



شكل ١٥-٥



شكل ١٦-٥

لتحيز الترانزستور. فإذا كان جهد المنبعين مساوياً للصفر يحدث الإتران الديناميكي في كل من ملتقى الباعث — قاعدة وملتقى القاعدة — مجمع، وتكون التيارات المارة عبر هذين الملتقين مساوية للصفر. وبالتالي تكون تيارات كل من الباعث والقاعدة والمجمع مساوية للصفر. وعند استخدام الترانزستور كمكثف في الدارات الإلكترونية، يكون تحيز ملتقى الباعث — قاعدة تحيزاً مباشراً في حين يحيز ملتقى المجمع قاعدة تحيزاً عكسياً (كالمبين في (شكل ١٩—٥)). ويقال في هذه الحالة إن الترانزستور محيز في المنطقة النشطة.

١٤—٥ مركبات التيار في الترانزستور

Transistor Current Components

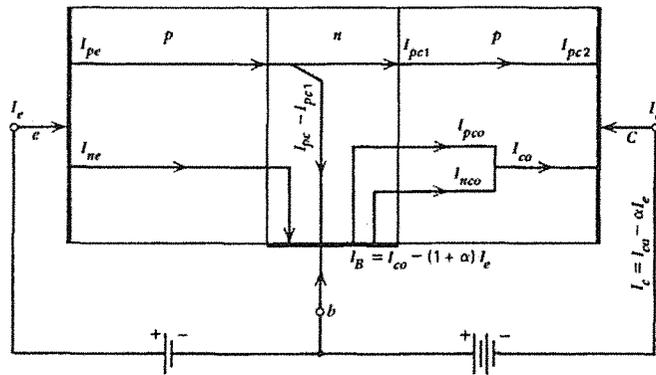
عند تحيز ملتقى الباعث قاعدة تحيزاً مباشراً يتكون تيار الباعث من مركبتين وهما المركبة الثقبية I_{pe} وتنتج عن إنتشار الثقب من الباعث (المادة p) إلى القاعدة، والمركبة الإلكترونية I_{ne} وتنتج عن إنتشار الإلكترونات من القاعدة (المادة n) إلى الباعث. ويكون تيار المركبتين في نفس الإتجاه كالمبين بالشكل ١٤—٥. وبذلك يكون تيار الباعث الكلي I_e عبارة عن مجموع هاتين المركبتين أي أن:

$$I_e = I_{pe} + I_{ne} \quad (٢٩—٥)$$

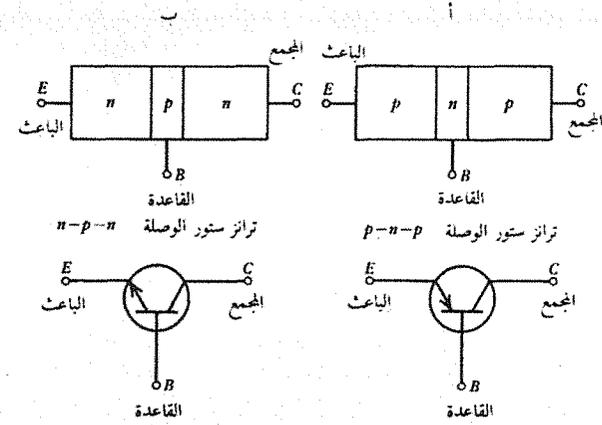
ولما كان تركيز الحاملات الغالبية في الباعث أعلى بكثير من تركيزها في القاعدة (حيث أن نسبة الشوائب في الباعث أعلى بكثير منها في القاعدة) تكون المركبة الإلكترونية I_{ne} صغيرة جداً بالمقارنة بالمركبة الثقبية (بالنسبة للترانزستور $(p-n-p)$) أي أنه يمكن إعتبار أن

$$I_e \approx I_{pe} \quad (٣٠—٥)$$

ويجب ملاحظه أن المركبة الإلكترونية I_{ne} تمر في الدارة الصغرى المكونة من الباعث والقاعدة. أما الثقب فستمر في حركتها الإنسيابية بعد دخولها القاعدة. فإذا كان عرض القاعدة أقل بكثير من متوسط المر الحر للثقب فيها تمر معظم الثقب عبر القاعدة وتصل إلى ملتقى المجمع — قاعدة دون أن تعيد إتخاذها مع



شكل ٢٠—٥



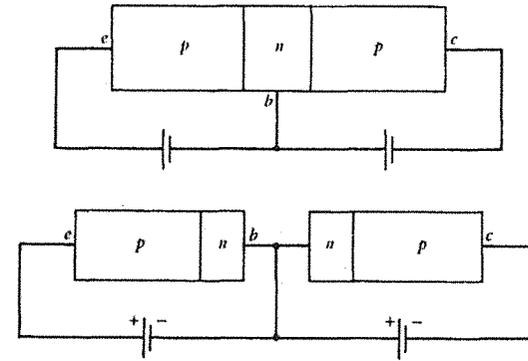
شكل ١٨—٥

عالية للشوائب، في حين يتميز المجمع بتوصيلية ضعيفة أي بنسبة تركيز منخفضة للشوائب. أما القاعدة فتتميز بتوصيلية متوسطة ويكون عرضها صغير جداً (وقد رسمت مكبرة لفرض الإيضاح) ويجب أن يكون عرض القاعدة أقل من متوسط المر الحر (طول الإنتشار) للحاملات الأقلية فيها. ولما كان طول الإنتشار في حدود 10^{-3} سم فإنه يجب أن يكون عرض القاعدة في حدود 10^{-3} سم.

The Transistor Biasing

١٣—٥ تحيز الترانزستور

سوف تقصر المناقشة على ترانزستور الوصلة $p-n-p$ أما بالنسبة للترانزستور $n-p-n$ فينطبق عليه نفس القول بعد تبديل دور كل من الإلكترونات والثقب وكذلك تبديل إشارة الجهد اللازم للتحيز. وهكذا فإنه يمكن إعتبار أن ترانزستور الوصلة $p-n-p$ مكافئاً لثنائي وصلة $p-n$ يتبعه ثنائي آخر $n-p$ (شكل ١٩—٥) وذلك لإمكان استخدام نفس النظريات والعلاقات الخاصة بثنائي الوصلة. لذا فإنه يلزم استخدام منبهي جهد



شكل ١٩—٥

أنه في حالة ترانزستور الوصلة $p-n-p$ وعند أخذ العلاقتين (٢٩-٥) ، (٣٠-٥) في الاعتبار تكون كفاءة الباعث هي

$$\gamma \equiv \frac{I_{pe}}{I_e} = \frac{I_{pe}}{I_{pe} + I_{ne}} \ll 1 \quad (٣٦-٥)$$

وكما كانت كفاءة الباعث قريبة من الواحد الصحيح كانت نوعية الترانزستور أفضل ولذا يجب أن يكون تركيز الشوائب في الباعث أعلى ما يمكن .

Transport Factor

ب — معامل النقل β

ويبين هذا المعامل نسبة الثقب (في حالة ترانزستور الوصلة $p-n-p$) التي تعبر خلال القاعدة (دون إعادة الإيجاد مع الإلكترونات) إلى الثقب التي حقت للقاعدة من الباعث . وبالرجوع إلى شكل (٢٠-٥) والعلاقة (٣١-٥) يكون معامل النقل هو

$$\beta \equiv \frac{I_{pc1}}{I_{pe}} \ll 1 \quad (٣٧-٥)$$

وبنفس الأسلوب فكلما كان معامل النقل قريباً من الواحد الصحيح كانت نوعية الترانزستور أفضل .

Multiplication Factor

ج — معامل التضاعف δ

وهو عبارة عن نسبة الثقب (في حالة ترانزستور الوصلة $p-n-p$) التي تصل إلى نهاية المجمع إلى الثقب التي تحقن من القاعدة . أي أن

$$\delta \equiv \frac{I_{pc2}}{I_{pc1}} \gg 1 \quad (٣٨-٥)$$

ويكون هذا المعامل مساوياً للواحد الصحيح عندما يكون جهد التحيز العكسي صغيراً . أما إذا زاد جهد التحيز العكسي يصبح هذا المعامل أكبر من الواحد الصحيح بقليل نتيجة تولد أزواج إلكترونات ثقبية جديدة .

The Current Gain

د — معامل كسب التيار α

هو عبارة عن نسبة تغير تيار المجمع بتغير تيار الباعث (عند بقاء تحيز قاعدة ثابتاً) مأخوذة بإشارة سالبة أي

$$\alpha \equiv -\frac{(I_e - I_{co})}{I_e - 0} \quad (٣٩-٥)$$

وباستخدام العلاقات (٣٨-٥) ، (٣٥-٥) نجد أن

$$-\alpha = \frac{I_{pc2}}{I_e} = \frac{I_{pc2}}{I_{pc1}} \times \frac{I_{pc1}}{I_{pe}} \times \frac{I_{pe}}{I_e} = \gamma\beta\delta \approx 1 \quad (٤٠-٥)$$

الإلكترونات (وهي الحاملات الغالبة في القاعدة) مكونة بذلك تياراً مقداره I_{pc} عند هذا الملتقى الأخير . وأما الثقب القليلة التي أعادت إنتاجها مع إلكترونات القاعدة فإنها تؤدي إلى تكوين تيار مقداره $I_{pe} - I_{pc1}$ يمر في الدارة الصغرى بين الباعث والقاعدة (شكل ٢٠-٥) وتعتمد قيمة هذا التيار الأخير على كل من عرض القاعدة وتركيز الإلكترونات بها حيث نقل قيمته كلما قل عرض القاعدة وكلما قلت نسبة تركيز الإلكترونات بها والعكس صحيح . فإذا كان عرض القاعدة W ومتوسط الممر الحر للثقب L_p وتحقق الشرط $W \ll L_p$ فإنه يمكن اعتبار أن

$$I_{pc1} \gg I_{pe} - I_{pc1} \quad (٣١-٥)$$

أي أن

$$I_{pc1} \approx I_{pe} \quad (٣٢-٥)$$

وإذا أريد عمل ترانزستورات ذات أداء جيد فإنه يجب أن يكون عرض القاعدة ونسبة تركيز الشوائب فيها محققاً للعلاقة (٣٢-٥) .

وحيث أن ملتقى المجمع قاعدة محيزاً تحيزاً عكسياً يكون المجال الكهربائي الناتج في هذا الملتقى مجالاً معجلاً لهذه الثقب فتزداد سرعتها عند عبوره ثم تستمر في تحركها كحاملات غالبة في منطقة المجمع إلى أن تصل لنهايته . فإذا كان جهد المجمع العكسي عالياً يمكن أن تنكسب هذه الثقب طاقة حركة كبيرة أثناء عبورها ملتقى المجمع — قاعدة وتصبح بالتالي قادرة على توليد أزواج إلكترونات — ثقبية جديدة مما يؤدي إلى زيادة عدد الثقب التي تصل إلى المجمع عن العدد الداخل من ملتقى المجمع قاعدة . فإذا كان التيار الثقب الواصل لنهاية المجمع هو I_{pc2} فإنه يمكن اعتبار أن $I_{pc2} \gg I_{pc1}$ وذلك تبعاً لقيمة الجهد العكسي .

والآن نفرض أن دارة الباعث — قاعدة كانت مفتوحة (أي أن $I_p = 0$) مع بقاء ملتقى المجمع . قاعدة محيزاً تحيزاً عكسياً . في هذه الحالة يمر في الثاني المكون من المجمع والقاعدة تيار عكسي مكون من مركبتين إحداهما I_{nc0} وهي ناتجة عن انتشار الإلكترونات الأقلية من المجمع إلى القاعدة والأخرى I_{pc0} وهي ناتجة عن انتشار الثقب الأقلية من القاعدة إلى المجمع . ولما كالت اتجاه المركبتين واحداً فإنه ينتج عنها تيار عكسي I_{co} مقداره

$$-I_{co} = I_{pc0} + I_{nc0} \quad (٣٣-٥)$$

وهذا التيار هو عبارة عن تيار التشبع العكسي وهو يمر في الدارة الصغرى المكونة من المجمع والقاعدة . أي أن تيار المجمع في هذه الحالة هو

$$I_e = I_{co} \quad (٣٤-٥)$$

وعند إغلاق دارة الباعث — قاعدة يصبح التيار الكلي المار في المجمع هو

$$-I_e = I_{co} + I_{pc2} \quad (٣٥-٥)$$

ولنتعرف الآن على بعض الخصائص المميزة للترانزستور :

Emitter Efficiency

١ — كفاءة الباعث (γ)

كفاءة الباعث هي النسبة بين تيار الحاملات المحقونة من الباعث للقاعدة إلى التيار الكلي للباعث . أي

ويعرف هذا المعامل بإسم معامل كسب التيار للنضبات الكبيرة للترانزستور ذات القاعدة المشتركة وهو عبارة عن حاصل ضرب كل من كفاءة الباعث ومعامل النقل ومعامل التضاعف وتكون قيمته العددية لمعظم الترانزستورات في حدود ٠,٨٥-٠,٩٨، وللمعامل α أهمية كبيرة في نظرية الترانزستورات وتعتمد قيمته على كل من تيار الباعث I_e وجهد المجمع العكسي ودرجة الحرارة. والإشارة السالبة تعني أنه — إذا كان تيار الباعث متجهاً إلى الداخل يكون تيار المجمع متجهاً إلى خارج الترانزستور. وبالرجوع إلى العلاقة (٥-٣٥) نجد أن

$$I_c = I_{co} + I_{pc2} = I_{co} - \alpha I_e \quad (٤١-٥)$$

ولما كان تيار التشيع العكسي I_{co} تياراً صغيراً جداً والمعامل α قريب من الواحد الصحيح فإنه يمكن اعتبار أن تيار المجمع مساوٍ تقريباً لتيار الباعث، وهذا يعني أن تيار القاعدة صغير ويمكن إيجاد قيمته باستخدام قانون كيرشوف للتيار.

$$I_b + I_c - I_e = 0 \quad (٤٢-٥)$$

أي أن

$$I_b = I_c - I_e = I_{co} - \alpha I_e - I_e = I_{co} - (1 + \alpha) I_e \quad (٤٣-٥)$$

وهكذا ثبت أن تيار القاعدة صغير جداً حيث أن المعامل $1 + \alpha \gg 1$.

وجدير بالذكر أن الباعث في الترانزستور يلعب دور الكاثود في الصمام الثلاثي في حين تقوم القاعدة في الترانزستور بدور شبكة التحكم في الصمام. فالتغير في فرق الجهد بين الباعث والقاعدة يؤدي إلى تغير تيار الباعث، وينتقل هذا التغير بأكمله تقريباً إلى المجمع. أي أن القاعدة تتحكم في تيار المجمع مثلاً تتحكم شبكة التحكم في تيار الأنود. ويمثل الاختلاف في أن بعض الثقوب (في حالة ترانزستور الوصلة $p-n-p$) تعيد إتحادها في القاعدة فيؤدي هذا إلى سريان تيار قيمته $(1 + \alpha) I_e$ في القاعدة.

أما المجمع في الترانزستور فيلعب دور الأنود في الصمام. وجدير بالذكر أن الجهد العكسي للمنتقى المجمع — قاعدة لا يؤثر في تيار المجمع طالما كانت قيمته كبيرة بحيث يكون تيار التشيع العكسي قد وصل إلى قيمة التشيع. ويمكن إثبات أن تيار المجمع يعتمد على جهد المجمع العكسي طبقاً للعلاقة

$$I_c = I_{co} (i - \exp \frac{eV_c}{KT}) - \alpha I_e \quad (٤٤-٥)$$

فإذا وصل الجهد إلى قيمة سالبة كبيرة (حوالي ٠,١٠ فولت) نجد أن الحد الأسّي يصبح مساوياً للصفر ونحصل بالتالي على نفس العلاقة (٤١-٥). وتعرف العلاقة (٤٤-٥) بالعلاقة العامة للترانزستور. (يجدر الذكر بأن التيارات في الترانزستور سواء I_c ، I_b ، I_e تعتبر موجبة إذا كانت متجهة إلى داخل الترانزستور وسالبة إذا كان إتجاهها خارجاً من الترانزستور).

١٥-٥ المميزات الإستاتيكية للترانزستور

Transistor Static Characteristics

يوجد في الترانزستورات ترابط بين أربعة متغيرات وهي (تيار المجمع I_c وفرق الجهد بين المجمع والقاعدة

V_{cb} وتيار الباعث I_e وفرق الجهد بين الباعث والقاعدة V_{cb} . وعموماً تصعب دراسة العلاقات بين هذه المتغيرات الأربعة في نفس الوقت. لذا فإنه يجب تثبيت متغيرين عند قيم محددة ودراسة علاقة المتغير الثالث بالمتغير الرابع.

ومن الجدير بالذكر أنه توجد طرق ثلاث لتوصيل الترانزستور في الدارة الإلكترونية التي تحتوي عادة على دارتين صغيرتين تعتبر إحداها بمثابة دارة الدخل the input والأخرى بمثابة دارة الخرج the output. فإذا كانت القاعدة مشتركة في الدارتين يسمى توصيل الترانزستور في هذه الحالة بالتوصيل ذات القاعدة المشتركة The Common-Base Configuration (CB) وإذا كان الباعث هو المشترك في الدارتين يكون التوصيل ذا باعث مشترك The Common-Emitter Configuration (CE) وأما الطريقة الثالثة فتعرف بالتوصيل ذات المجمع المشترك The Common-Collector Configuration (CC) وفيها يكون المجمع هو المشترك في الدارتين. وفي كل طريقة من الطرق الثلاث يمكن دراسة منحنيات الخواص (المميزات) الإستاتيكية للترانزستور وذلك بتقسيمها إلى مجموعتين. الأولى هي مجموعة منحنيات (مميزة) الخرج والثانية هي مميزة الدخل.

١٦-٥ مميزة التوصيل بقاعدة مشتركة

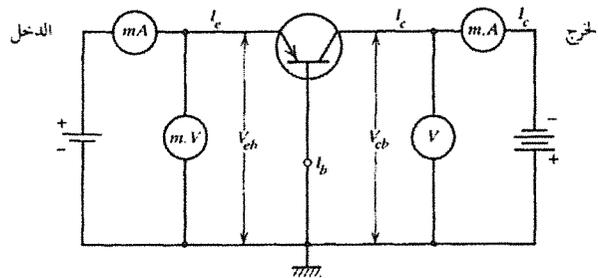
The Common-Base Characteristics

في هذه الحالة تكون القاعدة مشتركة بين دارة الدخل ودارة الخرج كالملين في شكل ٥-٢١. وبالنظر للعلاقة ٥-٤٤ يتضح أن تيار المجمع I_c (والذي يعتبر تيار الخرج) يمكن أن يحدد بمعرفة كل من تيار الباعث I_e (الذي يعتبر تيار الدخل) وجهد الخرج V_{cb} (فرق الجهد بين المجمع والقاعدة). أي أنه يمكن اعتبار كل من I_c ، V_{cb} متغيرات مستقلة تؤثر على المتغير الثالث I_e . لذلك فإنه يمكن كتابة علاقة الخرج كالتالي

$$I_c = f_1(V_{cb}, I_e) \quad (٤٥-٥)$$

كذلك فإنه يمكن إختيار كل V_{cb} ، I_e كمتغيرات مستقلة وتحديد كيفية اعتماد جهد الدخل V_{cb} عليها. أي أنه يمكن اعتبار أن العلاقة

$$V_{cb} = f_2(V_{cb}, I_e) \quad (٤٦-٥)$$



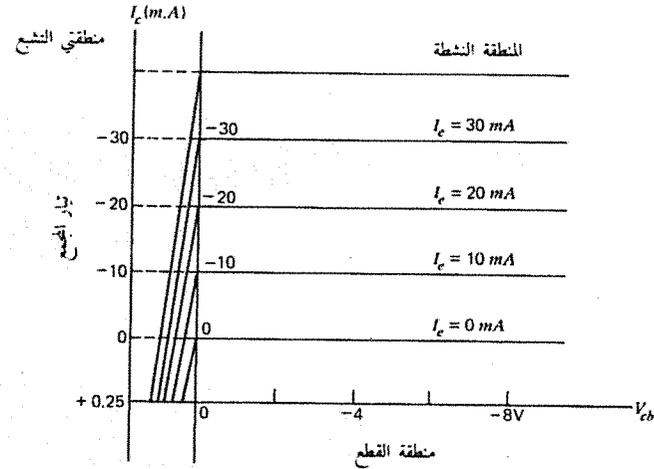
شكل ٥-٢١

هي التي تحدد مميزة الدخل للترانزستور .

The Output Characteristics

أ — مميزة الخرج

يبين شكل ٢٢-٥ مجموعة مميزة الخرج الإستاتيكية للترانزستور ذي القاعدة المشتركة وهي عبارة عن علاقة تيار المجمع بجهد المجمع قاعدة عند قيم مختلفة لتيار الباعث . ويجدر الذكر أن إتجاه كل من I_c ، I_{em} يكون سالباً للترانزستور $p-n-p$ وموجباً للترانزستور $n-p-n$ وتنقسم هذه المميزة إلى ثلاث مناطق متباينة هي .



شكل ٢٢-٥

١ — المنطقة النشطة

وهو المربع العلوي الأيمن من الشكل ٢٢-٥ وفيه يكون ملتقى المجمع قاعدة محيزاً تحيزاً عكسياً في حين يكون ملتقى الباعث — قاعدة محيزاً تحيزاً مباشراً . فإذا ما كان تيار الباعث مساوٍ للصفر $I_e = 0$ يكون تيار المجمع I_c صغيراً جداً ومساوياً لتيار التشبع العكسي $I_c = I_{co}$ (لا يتعدى عدة ميكروأمبيرات للترانزستور الجرمانيومي وعدة نانوامبيرات للترانزستور السليكوني) . أما إذا كان تيار الباعث مساوٍ لقيمة معينة يمر الجزء الأكبر منه وهو αI_e — خلال المجمع وعندئذ تحدد العلاقة ٤١-٥ تيار المجمع .

وهكذا نجد أنه في المنطقة النشطة يعتمد تيار المجمع على تيار الباعث اعتماداً كبيراً في حين يؤثر جهد المجمع في تيار المجمع تأثيراً ضعيفاً (لا يتعدى ٠.٥٪) بسبب تغير فروق الجهد في ملتقى المجمع — قاعدة والذي يؤثر بدوره على المركبة الصغيرة لتيار الباعث . ولما كانت قيمة α قريبة من الواحد الصحيح ولكن أصغر منه يكون تيار المجمع دائماً أقل بقليل من تيار الباعث .

٢ — منطقة التشبع

وهي المنطقة الواقعة على يسار محور تيار المجمع . ونجد في هذه المنطقة أن كلاً من ملتقى المجمع — قاعدة

والباعث — قاعدة محيز تحيزاً مباشراً . فيؤدي ذلك إلى مرور تيارين في إتجاهين متضادين ، أحدهما هو تيار الباعث والآخر تيار المجمع (حيث يعمل المجمع كالباعث تماماً) . بذلك يصبح التيار المار خلال المجمع هو عبارة عن الفرق بين هذين التيارين . فإذا كان جهد المجمع المباشر كبيراً فإنه يمكن أن يصبح تيار المجمع المباشر أكبر من تيار الباعث المباشر . وبالتالي يغير تيار المجمع إتجاهه وتصبح قيمته موجبه .

٣ — منطقة القطع

وهي المنطقة الواقعة تحت محور I_e حيث يكون تحيز كل من ملتقى المجمع — قاعدة وملتقى الباعث — قاعدة تحيزاً عكسياً . وبالتالي يكون تيار كل من الباعث والمجمع عبارة عن تيار التشبع العكسي .

The Input Characteristics

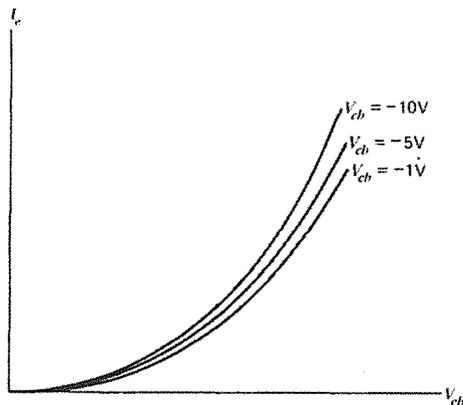
ب — مميزة الدخل

وهي عبارة عن علاقة تيار الباعث بفرق الجهد بين ملتقى الباعث — قاعدة عند قيم مختلفة لجهد المجمع العكسي . وهي لا تختلف من حيث المبدأ عن مميزة الثنائي شبه الموصل إلا في وجود عدة منحنيات تمثل قيماً مختلفة لجهد التحيز العكسي للمجمع . ويلاحظ أنه بزيادة جهد التحيز العكسي يقل تيار الباعث وذلك بسبب نقص عرض المنطقة الفعالة من القاعدة والتي تحتوي على الحاملات الحرة مما يؤدي إلى نقص الحاملات الغالبية وزيادة الحاملات الأقلية في القاعدة وتعرف هذه الظاهرة باسم ظاهرة «إيرلي» early ، ويبين شكل ٢٣-٥ مجموعة مميزة الدخل للترانزستور ذي القاعدة المشتركة .

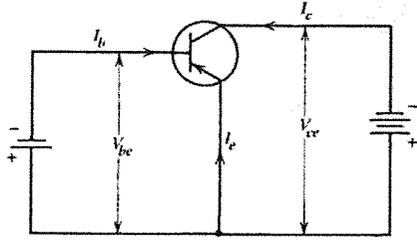
١٧-٥ بارامترات الترانزستور عند التوصيل بقاعدة مشتركة

Transistor CB Parameters

تستخدم مجموعتي مميزة الترانزستور عند التوصيل بقاعدة مشتركة في تحديد عدة بارامترات تعبر عن العلاقة بين المتغيرات المختلفة . وهذه البارامترات هي



شكل ٢٣-٥



شكل ٢٤-٥

دائرة الخرج) وبنفس الأسلوب فإنه يمكن إعتبار كل من $I_b - V_{ce}$ متغيرات مستقلة في حين تعتبر كل من V_{be} ، I_c متغيرات تابعة أي أن

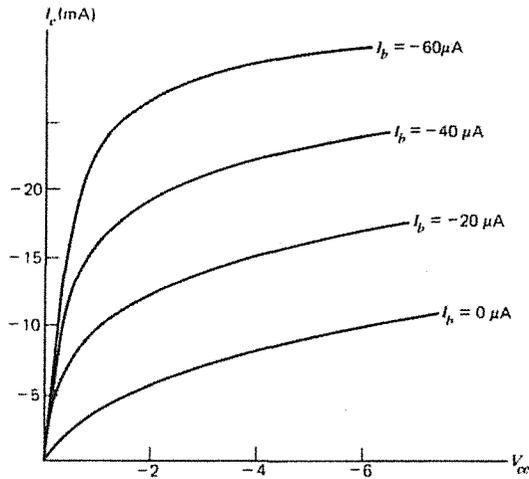
$$(٥٠-٥) \quad V_{be} = f_1(V_{ce}, I_b)$$

$$(٥١-٥) \quad I_c = f_2(V_{ce}, I_b)$$

وتمثل العلاقة (٥١-٥) مميزة الخرج للترانزستور ذي الباعث المشترك في حين تمثل العلاقة (٥٠-٥) مميزة الدخل له.

أ — مميزة الخرج للتوصيل بباعث مشترك The CE Output Characteristics

يبين شكل (٢٥-٥) مميزة الخرج لتوصيل الترانزستور بباعث مشترك. وهذه المميزة هي عبارة عن علاقة تيار المجمع (بالملي أمبير) I_c بجهد المجمع. باعث V_{ce} (بالفولت) عند قيم مختلفة لتيار القاعدة I_b



شكل ٢٥-٥

أ — مقاومة المجمع r_c

وهو عبارة عن مقلوب معدل تغير تيار المجمع بتغير جهد المجمع — قاعدة عند بقاء تيار الباعث ثابتاً أي أن

$$(٤٧-٥) \quad r_c = \left. \frac{\Delta V_{cb}}{\Delta I_c} \right|_{I_e = \text{const.}} = \frac{\partial V_{cb}}{\partial I_c}$$

وتحدد هذه المقاومة من مجموعة مميزة الخرج، وتكون قيمتها عالية (حوالي ١ ميغا أوم) حيث أنها تمثل المقاومة العكسية للتناهي مجمع — قاعدة.

ب — معامل كسب التيار α

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار الباعث مع بقاء جهد المجمع — قاعدة ثابتاً أي أن

$$(٤٨-٥) \quad \alpha = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \right|_{V_{cb} = \text{const.}} = \frac{\partial I_c}{\partial I_e}$$

ج — مقاومة الباعث r_e

وهي عبارة عن مقلوب معدل تغير تيار الباعث بتغير جهد الباعث — قاعدة مع بقاء جهد المجمع — قاعدة ثابتاً أي أن

$$(٤٩-٥) \quad r_e = \left. \frac{\Delta V_{eb}}{\Delta I_e} \right|_{V_{cb} = \text{const.}} = \frac{\partial V_{eb}}{\partial I_e}$$

وتحدد هذه المقاومة من مجموعة مميزة الدخل وتعتمد اعتماداً كبيراً على تيار الباعث وتكون قيمتها عادة صغيرة حيث أنها تعتبر بمثابة المقاومة المباشرة للتناهي باعث — قاعدة.

١٨-٥ مميزة التوصيل بباعث مشترك

The Common-Emitter Characteristics

في معظم الدارات الإلكترونية يفضل توصيل الباعث كطرف مشترك بين دائرة الدخل ودائرة الخرج لما لهذا التوصيل من مميزات كثيرة بالمقارنة بالتوصيل بالقاعدة المشترك. وأهم هذه المميزات هي إمكانية استخدام الترانزستور كمكبر للتيار، وزيادة استقرار تشغيله بالنسبة لتغير جهود التحيز أو درجة الحرارة. ويعرف التوصيل في هذه الحالة والمبين في شكل ٢٤-٥ بالتوصيل ذي الباعث المشترك ويجدر الذكر أن الترانزستور يجب أن يبقى محيزاً في المنطقة النشطة (أي يكون الباعث موجياً بالنسبة للقاعدة والمجمع سالباً بالنسبة للقاعدة وذلك للترانزستور $p-n-p$). وعند التوصيل بالباعث المشترك تصبح المتغيرات الأربعة هي تيار القاعدة I_b وجهد القاعدة — باعث V_{be} (وهي متغيرات دائرة الدخل) وتيار المجمع I_c وجهد المجمع — باعث V_{ce} (وهي متغيرات

وهكذا نجد أن توصيل الترانزستور بباعث مشترك يؤدي إلى تكبير تيار التشيع العكسي للمنتج المجمع - قاعدة بمقدار $1/1-\alpha$ مره . فإذا كان المعامل α للترانزستور مساو ٠,٩٥ وكان تيار التشيع I_{co} مساو ٥ ميكروامبير (في حين تيار القاعدة مساو - للضف) فإننا نجد أن تيار المجمع $I_c = 0.1 \text{ mA}$.
ويدل هذا على مدى تأثير تيار التشيع العكسي (الذي يعتمد أساساً على درجة الحرارة) على تيار المجمع في حالة التوصيل بباعث مشترك . وسوف يتضح فيما بعد كيفية إستقرار تشغيل الترانزستور الموصل بباعث مشترك بالنسبة لتغير درجة الحرارة . كذلك يلاحظ أن أي تغير في تيار القاعدة ينعكس على المجمع مكمراً بمقدار $|\alpha| - 1$ مرة $|\alpha|/|\alpha| - 1$. ويوضح هذا دور توصيل الترانزستور بباعث مشترك بغرض تكبير تيار الدخل .

ويعتبر المعامل $|\alpha| - 1$ بارامتراً هاماً لتوصيل الترانزستور بباعث مشترك ويعرف بإسم معامل تكبير التيار للترانزستور بباعث مشترك .

معامل تكبير التيار β :

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار القاعدة عند بقاء جهد المجمع - باعث ثابتاً . أي أن

$$(٥٤-٥) \quad \beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \Big|_{V_{ce} = \text{const}} = \frac{\partial I_c}{\partial I_b} = \frac{\alpha}{1-|\alpha|}$$

معامل الإستقرار : S

وهو عبارة عن معدل تغير تيار المجمع بتغير تيار التشيع العكسي . أي أن

$$(٥٥-٥) \quad S = \frac{\partial I_c}{\partial I_{co}} = \frac{1}{1-|\alpha|}$$

ويعكس هذا المعامل كيفية تأثير تيار المجمع وعدم إستقراره بتغير درجة الحرارة .

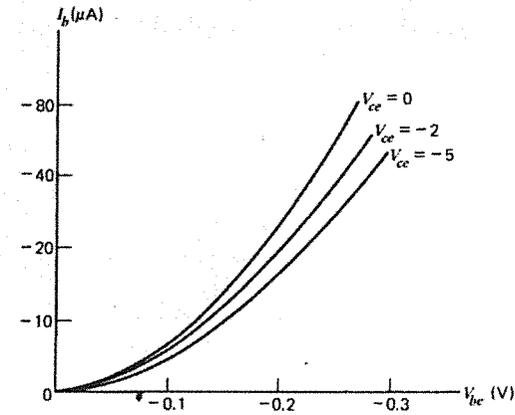
أسئلة

- ١ - إرسم منحنى يبين توزيع الشحنة والمجال الكهربائي في ثنائي الوصلة . أذكر مما تتكون هذه الشحنة ؟
- ٢ - ما هي القيمة التقريبية لعرض منطقة الشحنة الفراغية . وما هي العوامل المؤثرة على هذه القيمة .
- ٣ - هل يزداد أم يقل عرض منطقة الشحنة الفراغية عند تحيز ثنائي الوصلة تحيزاً عكسياً ؟ كيف يتأثر المجال الكهربائي للمنتج بالمجهود العكسي ؟
- ٤ - إرسم مخططاً يبين كيفية توزيع حاملات الشحنة في ثنائي الوصلة ؟
- ٥ - أوجد كثافة التيار المباشر لثنائي الوصلة ؟
- ٦ - أوجد قيمة تيار التشيع لثنائي الوصلة . وما هي العلاقة بينه وبين التيار المباشر ؟
- ٧ - ما هو التيار العكسي في الثنائي شبه الموصل . وما هي العوامل المؤثرة في قيمته ؟
- ٨ - كيف يتأثر التيار العكسي بتغير درجة الحرارة ؟
- ٩ - إرسم منحنى الخواص الإستاتيكية لثنائي الوصلة وإشرح كيفية تغير التيار كدالة من الجهد المباشر والعكسي بالنسبة للأجزاء المختلفة من المنحنى ؟

(بالميكروامبير) ويظهر من هذه المنحنيات أن تيار المجمع لا يعتمد كثيراً على جهد المجمع - باعث وإنما يعتمد بالدرجة الأولى على تيار القاعدة . ويلاحظ أن ميل المنحنيات أكثر وضوحاً عما هو بالنسبة لتوصيل الترانزستور بقاعدة مشتركة . وتعتبر مميزة الخرج للتوصيل بباعث مشترك أكثر حساسية من مميزة الخرج للتوصيل بقاعدة مشتركة مما يؤدي إلى إمكان تحديد تيار القاعدة مباشرة من المميزة بدلاً من تحديده حسابياً في حالة القاعدة المشتركة .

ب - مميزة الدخل للتوصيل بباعث مشترك The CE Input Characteristics

وهي عبارة عن علاقة تيار القاعدة (بالميكروامبير) بجهد القاعدة - باعث V_{be} (بالملي فولت) عند قيم مختلفة لجهد المجمع - باعث V_{ce} (بالفولت) . ويلاحظ من الشكل (٥-٢٦) الذي يوضح صورة مميزة الدخل أن تيار القاعدة يتأثر تأثيراً ضعيفاً بتغير جهد المجمع - باعث في حين يلعب V_{be} الدور الرئيسي في تحديد قيمة هذا التيار . ويرجع السبب في تغير تيار القاعدة بتغير جهد المجمع العكسي إلى ظاهرة «إيرلي»



شكل ٥-٢٦

٥-١٩ بارامترات الترانزستور عند التوصيل بباعث مشترك

Transistor (CE) Parameters

يلاحظ عند توصيل الترانزستور بباعث مشترك أن تيار الدخل هو تيار القاعدة وليس تيار الباعث . لذا يجب تحديد تيار المجمع كدالة من تيار القاعدة . وباستخدام العلاقات (٥-٤١) ، (٥-٤٣) فإنه يمكن إيجاد تيار المجمع في الشكل الآتي :

$$(٥٢-٥) \quad I_c = \frac{\alpha I_b}{1-|\alpha|} + \frac{I_{co}}{1-|\alpha|}$$

فإذا كان $I_b = 0$ نجد أن

$$(٥٣-٥) \quad I_c = -\frac{I_{co}}{1-|\alpha|}$$

- ٣٥ — ثنائي سليكوني يعمل عند جهد مباشر مقداره ٠,٥ فولت وعند درجة حرارة ٢٥° م . إحصى قيمة الزيادة في التيار عند ٥٠° م .
- ٣٦ — أوجد قيمة معامل كسب التيار α عند توصيل الترانزستورات بقاعدة مشتركة إذا علمت أن معامل تكبير التيار β لهذه الترانزستورات هي ٥٠ ، ١٠٠ ، ١٢٥ ، ١٥٠ ، ١٨٥ .
- ٣٧ — أوجد قيمة β للترانزستورات التي تتميز بقيم α التالية
0.95 و 0.97 ، 0.98 ، 0.990 ، 0.995
- ٣٨ — إذا كان تيار القاعدة في ترانزستور عبارة عن ٢٠ ميكرو أمبير عندما كان تيار الباعث ٦,٤ ميلي أمبير . أوجد قيمة كل من α ، β لهذا الترانزستور .

- ١٠ — عرف كل من ثنائي زنر وثنائي متغير السعة . إشرح كيفية عمل كل منها ؟
- ١١ — ما هي أهم بارامترات الثنائي شبه الموصل ؟
- ١٢ — عرف كل من المقاومة المباشرة والعكسية ومقاومة زنر لثنائي الوصلة . وكيف يمكن تحديدها عملياً . أذكر القيم التقريبية لهذه المقاومات ؟
- ١٣ — ارسم الدارة المزمية لتوحي الترانزستور مبنياً إتجاه التيار في كل منها ؟
- ١٤ — بين الفرق بين مناطق الترانزستور الثلاث .
- ١٥ — كيف يميز الترانزستور في المنطقة النشطة ؟
- ١٦ — بين بإستخدام الرسم مركبات التيار في الترانزستور . وما هو أصل كل من هذه المركبات ؟
- ١٧ — عرف كل من كفاءة الباعث ومعامل النقل ومعامل التضاعف . وما القيمة التقريبية لكل منها وشرح كيفية إرتباط هذه القيم بخصائص مناطق الترانزستور ؟
- ١٨ — عرف معامل كسب التيار في الترانزستور ذي القاعدة المشتركة . وما هي قيمته التقريبية مع ذكر العوامل المؤثرة على هذه القيمة ؟
- ١٩ — أوجد قيمة تيار المجمع بدلالة تيار الباعث للترانزستور ذي القاعدة المشتركة .
- ٢٠ — ترانزستور من النوع $p-n-p$ يحيز في المنطقة النشطة . ما هي إشارة كل من تيار الباعث والمجمع والقاعدة وجهد الباعث قاعدة والمجمع قاعدة ؟
- ٢١ — ارسم مجموعة مميزة الخرج لترانزستور موصلاً بقاعدة مشتركة . ما هي خصائص المناطق الثلاث للمميزة . إشرح شكل المنحنيات ؟
- ٢٢ — ارسم مجموعة مميزة الدخل لترانزستور موصلاً بقاعدة مشتركة مع شرح المنحنيات .
- ٢٣ — ما هي أهم بارامترات الترانزستور الموصل بقاعدة مشتركة . وكيف يمكن تحديدها عملياً .
- ٢٤ — ارسم دائرة لترانزستور موصلاً بباعث مشترك . أذكر بعض مزايا التوصيل بباعث مشترك .
- ٢٥ — ارسم مجموعة مميزة الخرج لترانزستور موصلاً بباعث مشترك . قارن بين هذه المجموعة ومجموعة الخرج للقاعدة المشتركة .
- ٢٦ — ما هي أهم بارامترات الترانزستور ذي الباعث المشترك . أوجد تيار المجمع للترانزستور الموصل بباعث مشترك .
- ٢٧ — إشرح كيفية تأثير الحرارة على تيار المجمع في حالة توصيل الترانزستور بباعث مشترك .
- ٢٨ — عرف الثنائي الضوئي شبه الموصل . وإشرح بميزته الفولت — أمبيرية .
- ٢٩ — كيف يعتمد تيار الثنائي الضوئي شبه الموصل على بعد الإضاءة عن الملتق ؟
- ٣٠ — ما هو الأثر الفوتوفولتي ؟ إشرح كيف يتولد الجهد الفوتوفولتي . وما هي القيمة القصوى لهذا الجهد ؟
- ٣١ — إشرح بالتفصيل تركيب الخلية الشمسية وكيفية عملها .
- ٣٢ — إذا كان تيار التشبع العكسي لثنائي هو ٥ ميكرو أمبير . أحسب قيمة التيار المباشر لهذا الثنائي عندما تكون قيم الجهد المباشر هي ٠,١ ، ٠,٢ ، ٠,٤ ، فولت .
- ٣٣ — أحسب قيمة الجهد العكسي الذي يصبح عنده التيار العكسي مساوياً ٩٠٪ من قيمة تيار التشبع العكسي لثنائي من الجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة .
- ٣٤ — باعتبار أن مميزة الثنائي محددة بعلاقة خطية (شكل ٥-٩) . أحسب التيار المباشر المار خلال ثنائي موصل على التوالي بمقاومة ١٠٠ أوم . ومنبع جهد ١٠ فولت إذا علمت أن $V_r = 0.2$ وأن r_r للثنائي = ٢٥ أوم .