2-1 التحركية والايصالية :

مما سبق واعتمادا على ظاهرة تداخل حرمنا التكافؤ والتوصيل في الموصلات يمكن القول ان حزمة التكافؤ لن تكون مملوءة تماما ولا يوجد ما يحظر على الالكترون ان يتعدى إلى أي من مستويات الطاقة فاعتمادا على نوع المعدن هناك على الأقل الكترونا واحداً في كل ما ذكر حر الحركة ان لم يكن الكترونين أو أكثر. ونتيجة لحركة الالكترونات المستمرة لانها تصطدم بالذرات الأخرى مغيرة بذلك اتجاه حركتها (اي حركة الالكترونات) عند كل اصطدام ومن هنا جاء مصطلح معدل المسافة بين الاصطدامات ليعني متوسط المسا ر الحر mean free - path ولعشوائية حركة الالكترون في حالة انعدام التأثيرات الخارجية فإن معدل عدد الالكترونات المارة خلال مساحة ما ووقت ما وفي اي اتجاه كان يساوي معدل عدد الالكترونات المارة بعكس الاتجاه وبذلك تكون محصلة النهار صفرا

أما عند تسليط مجال كهربائي خارجي ثابت مقداره Ɛ، بين طرفي المعدن فان الالكترونات ستكتسب تعجيلا باتجاه الطرف الموجب (يعكس اتجاه المجال الخارجي) ولولا الاصطدامات التي تحدث في الاجسام الصلبة لانطبقت هنا نفس القوانين المستعملة للإلكترونات المعجلة ولكن ولنتيجة الاصطدامات فان الالكترونات تساق بمعدل سرعة ثابتة تسمى سرعة الانسياق drift speed (V) بموجب العلاقة التالية

$$V = \mu\, \mathcal{E} \quad \text{.....(1)}$$

حيث ترمز التحركية الالكترون electron mobility وتقاس بالمتر المربع لكل فولت ثانية ان السياق الالكترونات نحو الطرف الموجب من الموصل الصلب والحاوي على اعلى طاقة موجبة مؤثرة على الموصل يحقق تيارا ذا اتجاه (تقليدي) معاكس لاتجاه حركة الالكترونات فإذا قطعت N من الالكترونات سلكا طوله 1 ومساحة مقطعه A في زمن مقداره : فان التيار 1 يكون

$$I = \frac{N\, e}{t} \quad \text{..... (2)}$$

حيث e تمثل شحنة الالكترون الواحد وكثافة التيار هذا توزيعه على المساحة المقطعية) تكون

$$J = \frac{I}{A} = \frac{Ne}{t\,A} \quad \text{.....(3)}$$

$$J = \frac{NeV}{LA} \quad \text{.....(4)}$$

$$J = \text{n ev} \quad \text{.....(5)}$$

حيث تمثل n كثافة الالكترونات وبالتعويض عن v من المعادلة 1 في المعادلة 5

$$J = \text{n e } \mu\, \mathcal{E} \quad \text{.....(6)}$$

$$J = \sigma\, \mathcal{E} \quad \text{.....(7)}$$

$$J = \text{n e } \mu \quad \text{.....(8)}$$

وتسمى موصلية او ايصالية المعدن conductivity ووحدة قياسها الأساسية (اوم.متر)

اما المعادلة (6) فهي بالحقيقة صيغة من قانون اوم القائل بان تيار التوصيل يتناسب طرديا مع الجهد المسلط الخارجي

بلاحظ من المعادلة (7) أن التوصيل يتناسب طردياً مع كثافة الالكترونات الحرة n فبالنسبة للموصلات الجديدة تكون هذه الكثافة عالية جداً (حوالي 10^{28} الكترون / المتر المكعب) بينما تقل كثيراً في العوازل (حوالي 10^{7} الكترون / المتر المكعب (أما في اشباه الموصلات فانها بين هاتين القيمتين

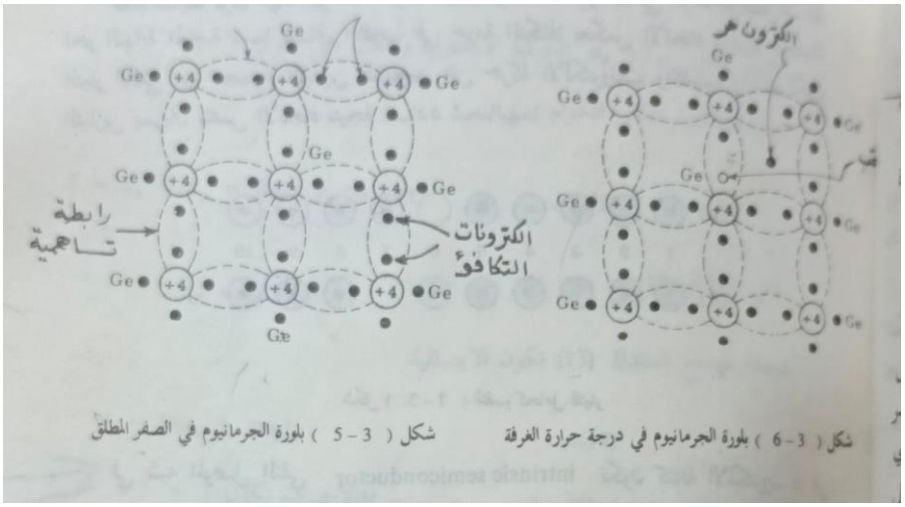
(التي وحدتها resistivity الإيصالية هي مقلوب المقاومية)

3 شبه الموصل النقي

يعتبر عنصـــرا الســـيليكون والجرمانيوم من اهم اشـــباه الموصـــلات المســـتعملة في الاغراض الالكترونية ويقعان ضمن المجموعة الرابعة group IV أو رباعية التكافؤ من عناصر

الجدول الدوري . ولعنصـــر الســـيليكون 14 الكترونا في تركيبه الذري , بينما تمتلك ذرة الجرمانيوم 32 الكترونا، ولكى تتعادل ذرات كل منهما تكون نواتهما على التوالي 14+ و 32+ . ومن الخواص الفريدة كون الذرات قادرة على الاتحاد فيما بينها عن طريق ترابط الكترونات التكافؤ للذرات المتجاورة وتكوين ما يسمى باصرة او رابطة تساهمية covalent bond ويكون التركيب العام عبارة عن مجموعة من الذرات مرتبة ترتيبا هندســـيا دقيقا على ابعاد معينة من بعضـــها طولا وعرضـــا وارتفاعا ويطلق على هذا التركيب بالتركيب البلوري crystalline structureوعلى قطعة المادة بالبلورة crystal يوضـــح الشـــكل (4,1) تركيب بلورة الجرمانيوم في درجة الصـــفر المطلق وقد رســـمت ذراتها على بعد ين وبصـــورة رمزية حسـب نموذج بوهر Bohr المبسـط للذرة (وذلك برسـم الكترونات التكافؤ فقط وما يعادلها هي الشـحنة الموجبة) . وعند توصـيل جهد ما الى مثل هذه البلورة فلن يحدث أي توصـيل بسـبب امتلاء حزمة التكافؤ وخلو حزمة التوصـــيل في هذا التركيب البلوري من الالكترونات الحرة ، حيث ان الالكترونات للذرات المجاورة اصـبحت مرتبطة ببعضـها لسد حزمة التكافؤ لجميع تلك الذرات المتجاورة والمشـــاركة لهذه الالكترونات. أما اذا تعرضـــت البلورة لمؤثرات خارجية ضوئية كانت ام حرارية فإن ارتباط الالكترونات التكافؤية يضعف وتتحرر عندئذ. وتكفي درجة حرارة الغرفة لمثل هذا التأثير خصوصا لبلورة الجرمانيوم .

وبين الشـــكل (6-1) الكترونا تم اعتافه من حزمة التكافؤ فى بلورة الجرمانيوم وقد عبر فجوة الحرمة واصـبح طليقا في حزمة التوصـيل عليه فقد اصـبح التوصـيل الكهربائي ممكنا لبعض الشيء الآن

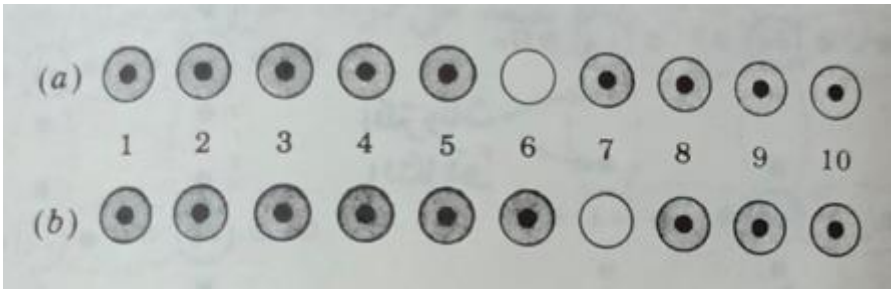


ان الطاقة E_0 الكافية لفك الرابطة التســـاهمية في بلورة الجرمانيوم في درجة حرارة الغرفة نسـاوي 0.7 eV ولبلورة السـيليكون تسـاوي1.1 eV وترمز الدائرة الصـغيرة في الشـكل (6-1) الى الحيز الذي يمثل غياب الالكترون ويدعى الفجوة او الثقب hole ولهذا الثقب اهميته الخاصة حيث يعتبر حاملا للكهربائية مثلما تعتبر الالكترونات الحرة كذلك .

فعندما تتحرك الالكترونات من حزمة التكافؤ فانها تترك شاعرا في الآصرة التكافؤية يمكن ملئه نتيجة حركة الكترون راجع من حزمة التوصـيل او الكترون من اصـرة تكافؤية اخرى من الذرات المجاورة. اما اذا حدث الاحتمال الاخير فان شاغرا جديدا سيتكون في تلك الذرة له اتجاه حركة بعكس اتجاه الالكترون المتحرر والشـــكل (3-7) يوضـــح ذلك حيث ترمز الدائرة ذات النقطة المركزية الى اصـرة متكاملة بينما تمثل الدائرة الفارغة أصـرة ممزقة (حاوية على ثقب او شـاغر) وفي الشـكل (a) يوجد الثقب في الاصـرة رقم (6) . فإذا انتقل الكترون من الاصـرة رقم (7) الى الشـاغر في الاصـرة (6) ينتج الشـكل (6) وبمقارنة الشـكلين يمكن الاسـتنتاج بان الثقب قد تحرك من الاصرة (6) الى (7) وهذا يعني

ان انتقال الالكترون فى اتجاه ما يصحبه انتقال ثقب (شحنة معاكسة لنفس المسافة يعني وبعكس الاتجاه. وبمعنى اخران الثقب يقوم مقام شحنة (خيالية موجبة مساوية القيمة شحنة الالكترون

فعند تسليط فرق جهد عبر اشباه الموصلات تكون الالكترونات في حزمة التوصيل مسافة نحو النهاية الموجبة بينما تنساق الثقوب في حزمة التكافؤ بعكس الاتجاه وتكون محصلة التيار الكلي من مجموع التيارين الناتجين عن حركة الالكترونات والثقوب وذلك لكون التيارين يسريان بنفس الاتجاه نتيجة تضادد شحناتيهما



شكل (1- 7) الثقب كحامل للتيار

في شـــبه الموصـــل النقي intrinsic semiconductor تكون كثافة الالكترون n في حزمة التوصـــيل مســـاوية لكثافة الثقوب P التي خلفتها تلك الالكترونات في حزمة التكافؤ وهذه الكثافة تعرف بالكثافة النقية او الاصـــيلة intrinsic density ويرمز لها بالحرف ni وطالما بقيت المحفزات الخارجية (كالحرارة) فان عملية توليد ازواج جديدة من الالكترونات والثقوب تستمر في حين تختفي ازواج أخرى نتيجة اعادة الالتحام recombination بين الالكترونات والثقوب .ويمكن القول بصـورة عامة ان تسـاوي المتوسـط الهندسـي لكثافة الالكترونات وكنانة الثقوب p اي

$$n_p = {n_I}^2$$

عند تسليط مجال كهربائي $\mathcal{E}$ على شبه موصل فان كثافة التيار الناتج عن الالكترونات يكون

$$J_n = ne\mu_n\mathcal{E}$$

وكثافة التيار الناتجة عن الثقوب

$$J_p = pe\mu_p\mathcal{E}$$

حيث تمثل μ_n و μ_p تحركية الالكترون والثقوب على التوالي اما كثافة التيار الكلي فتكون

$$J = J_n + J_p = (n\mu_n + p\mu_{p)\,e}\varepsilon$$

$$J = \sigma\,\varepsilon$$

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_{p)\,e}$$

وبالنسبة للشبه الموصل النقي ($n=p=n_i$) ,فالايصالية تكون

$$\sigma = (\mu_n + \mu_{p)\,\mathrm{ni}\ e}$$

ان ni تتغير بتغير درجة الحرارة حيث

$$n_i^2\ \alpha\ T^3\ e^{E_{G_0}/KT}$$

وتمثل E_{G_0} فجوة الحزمة عند الصفر المطلق

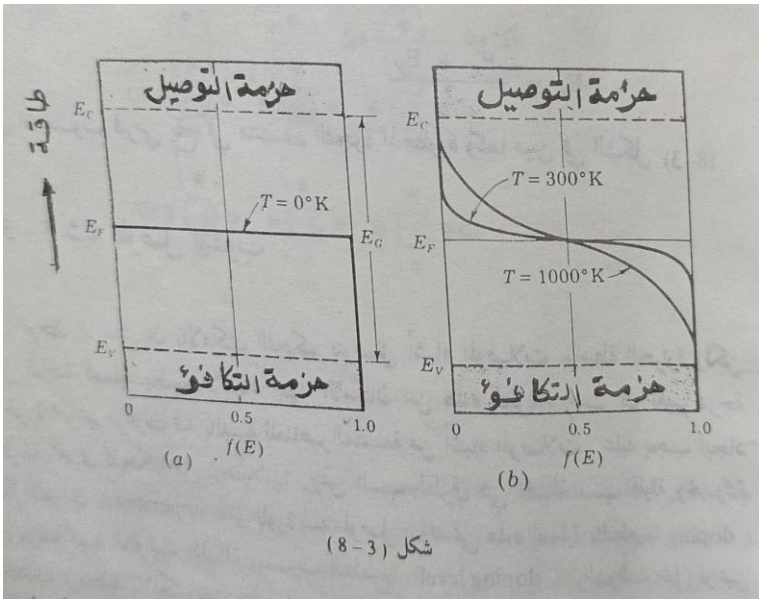
وبالنسبة للجرمانيوم فان الكثافة (في السنتمتر المكعب) تتغير بتغير الحرارة كالاتي

$$n_i^2 = 3.1 \times \quad 10^{32}\ T^3\ e^{-9101/KT}$$

$$n_i^2 = 1.5 \times \quad 10^{33}\ T^3\ e^{-14028/KT}$$

نستنتج من هاتين المعادلتين بان الايصالية في الجرمانيوم تزداد بنسبة 6 بالمئة كلما زادت درجة الحرارة درجة مئوية واحدة اما في السليكون فتبلغ الزيادة 8 بالمئة

ما الشكل (8 - 3) b فيوضح تأثير الحرارة التي تحفز الالكترونات الى مستوى طاقة أعلى وبذلك تملا بعض المستويات قرب قعر حزمة التوصيل E c. ونتيجة لذلك فإن احتمال ملء حزمة التكافؤ Ev بالإلكترونات ستقل عما كانت عليه أي عن 100 بالمائة .



شكل (3 - 8)

وتوضح المعادلة التالية تغيير تركيز) أو كثافة الالكترون في حزمة التوصيل مع الحرارة

$$n = N_c\, e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad \text{.....(17)}$$

حيث تمثل N_c الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في حزمة التوصيل. أما تغير تركيز الثقوب مع الحرارة في حزمة التكافؤ فيتبع العلاقة التالية :

$$P = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad \text{.....(18)}$$

حيث تمثل N_V الكثافة الفعالة لمستويات الطاقة في حزمة التكافؤ . وبالنسبة لشبه الموصل النقي حيث n=p=ni

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

$$E_F = \frac{E_C + E_F}{2} - KT\, ln \frac{N_C}{N_V}$$

واذا ما تساوت N_C و N_V فان

$$E_F = \frac{E_C + E_F}{2}$$

اي ان منوب فيرمي يقع في منتصف الفجوة المحظورة وكما مبين في الشكل (3-8).