

# Extrinsic Semiconductor

## تنبيه الموصل الخارجي

36

انه اضافة نسبة قليلة جداً من بعض العناصر (شلاً واحداً من  
دليون) الى مادة شبه موصلة نقية (ذاتية intrinsic) يتسبب  
في زيادة التوصيلية الكهربائية بألف المرات . شبه الموصل الناتج من  
هذه العملية يتسم بالخارجي Extrinsic (لاضافة عناصر خارجية)  
ويعرف أيضاً باسم شبه الموصل الشائبي (تكون العناصر الخارجية المضافة  
بنسبة قليلة هي في الواقع شوائب impurities نسبة الى المادة الاصلية  
والتي تعرف بالمادة المضيفة host material) ويعرف أيضاً باسم  
شبه الموصل المطعم doped semiconductor (تكون العناصر الخارجية  
المضافة تضاف الى المادة المضيفة كطعم) . وقد وجد انه الزيادة في  
التوصيلية تنبثق من اما زيادة في تركيز الالكترونات (n) او زيادة في تركيز  
الثقوب (p) . عليه هناك نوعان من شبه الموصل الخارجي الزيادة في التوصيل  
عليه من اضافة شوائب الى شبه موصل نقي (ذاتي) . النوع الاول لديه زيادة  
في تركيز الالكترونات ويعرف بالنوع-n (n-type) والنوع الثاني لديه زيادة  
في تركيز الثقوب ويعرف بالنوع-p (p-type) . وللتذكير فانه شبه موصل  
النقي - او الذاتي لديه عدد متساوي من الالكترونات والثقوب  $n = p$  .  
بالنسبة للموصل على نوع-n يجب اضافة عناصر مثل :  
الليثيوم N - المغنيسيوم P - الارينيك As - الانتيكون Sb وهي عناصر  
المجموعة الخامسة من الجدول الدوري . والموصل على نوع-p يجب اضافة عناصر  
مثل : البورون B - الألمنيوم Al - الجاليوم Ga - الانديوم In وهي عناصر  
المجموعة الثالثة من الجدول الدوري . (وكذلك الجروانيوم) من عناصر  
المجموعة الرابعة من الجدول الدوري . والسؤال الذي قد يتبادر الى الذهن هو:  
لماذا اضافة عناصر المجموعة الخامسة يؤدي الى زيادة تركيز الالكترونات ؟  
ولماذا اضافة عناصر المجموعة الثالثة يؤدي الى زيادة تركيز الثقوب ؟  
للإجابة على السؤال الاول ، نلاحظ ان عناصر المجموعة الرابعة (ذاتي) تمتلك  
اربعة إلكترونات خارجية (الالكترونات التكافؤ  $n_s^2 n_p^2$ ) في حين عناصر

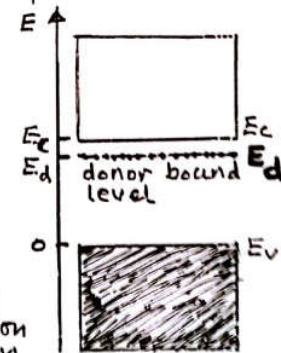
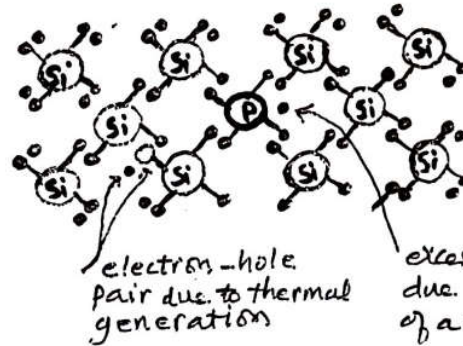
أربعة إلكترونات خارجية (الالكترونات التكافؤ)  $(ns^2 np^2)$  في حين عناصر  
 المجموعة الخامسة ( $N, P, As, Sb$ ) تمتلك خمسة إلكترونات خارجية  $(ns^2 np^3)$   
 وإذا أضفنا السليكون كمثال  $14$  وإضافة عنصر غاليوم التكافؤ  $13$  فإننا نلاحظ إلكترون  
 إضافي (يذهب) مثل الفسفور  $P$  إليه، وجهاً ذرة الفسفور  $P$  تحتل موقعاً محلياً  
 ذرات السليكون  $Si$  في الشبكة البلورية وأربعة إلكترونات إضافية  
 تشترك في أربع روابط تساهمية متناظرة في الفراغ تماماً كما تفعل ذرة  
 السليكون  $Si$  ووجهاً قوة الربط (التجاذب) التي تربط الإلكترون الخامس  
 بذرة  $Si$  (الفسفور  $P$ ) تضعف مقدار  $(1/4)$  حيث  $m_e$  هو ثابت عزل المادة  
 المضيفة ( $m_e = 11.8$ ) (السليكون) وبذلك يتغير هذا الإلكترون من ذرة  $Si$  إلى  
 بكل سهولة عند درجات حرارة الغرفة ( $T = 300K$ ) - عليه فزيادة تركيز الالكترونات  
 تنقسم هذه الالكترونات الإضافية، وتوصف حالة الالكترونات الخاملة حول  
 الذرة  $Si$  يستخدم الفيزيائيون نموذج بوهلر للذرة،  $Si$  مع الأخذ بنظر الاعتبار  
 عاملان هما ثابت العزل الكهربائي  $\epsilon_r$  للمادة المضيفة وكتلة الإلكترون الخاملة  $m_e^*$   
 للإلكترون في البلورة، وحسب هذا النموذج فإن نصف قطر الإلكترون الخامل حول  
 الذرة  $Si$   $a_d$  وطاقة تأينها (من الذرة إلى قوسية التوصيل  $E_c - E_d$ )  
 تعطى بالعلاقات التالية:

$$a_d = \frac{2\epsilon_r \hbar^2}{e^2 m_e^*} = (0.53 \text{ \AA}) \left( \frac{\epsilon_r}{(m_e^*/m_0)} \right) = (0.53) \left( \frac{11.8}{0.2} \right) \approx 31 \text{ \AA} \text{ for Si}$$

$$E_c - E_d \approx E_g - E_d = \frac{m_e^* e^4}{8\epsilon_r^2 \hbar^2} = \frac{13.6}{\epsilon_r^2} \left( \frac{m_e^*}{m_0} \right) \text{ eV} = \frac{13.6}{11.8^2} (0.2) \approx 0.02 \text{ eV for Si}$$

يلاحظ أن طاقة التأين  $0.02 \text{ eV}$  مقاربة لطاقة الحرارة ( $kT = 0.026 \text{ eV}$ ) عند درجة حرارة الغرفة  
 عليه فإنما الغالبية العظمى من هذه الالكترونات تتفقد في حزمة التوصيل وتكون مهيبة لتوصيل  
 التيار الكهربائي. ويلاحظ أيضاً أن نصف قطر بوهلر لهذا الإلكترون ( $a_d = 31 \text{ \AA}$ ) أكبر  
 نسبياً نسبة إلى المسافة بين ذرات مادة الوسط (المسافة بين ذرات السليكون  $0.357 \text{ nm}$ )  
 وعليه أثر هذه القيمة الكبيرة لـ  $(a_d)$  فإن التداخل (overlap) بين الأوربتال  
 الالكترونية لهذه الالكترونات تحصل عند تركيز غير عالية وبذلك تتكون حزمة  
 طاقة خاصة بالمادة الثابتة تعرف بحزمة الشوائب impurity band.  
 منهجية نظر فخر الطاقة فإن الالكترونات الخاملة قبل تحررها من ذرة  $Si$  تتواجد في

- (23) مستوى طاقة  $(E_d)$  أسفل قعر حزمة التوصيل  $(E_c)$  يتوافق كما هو مبين  
 أدناه في الشكل التالي. وعندما ترتفع درجة الحرارة فإن هذه الإلكترونات  
 تحرر من ذرة الام (أو من ذرة الام متأينة) وتصبح في حزمة التوصيل.  
 هذا النوع من الشوائب في العناصر فاسية التكافؤ تسمى بالشوائب المانحة donors  
 لأنها تمنح الإلكترونات إلى المادة المضيف (host). ترمز لتركيز الذرات  
 المانحة في المادة المضيف بالرمز  $N_D$  وعندما تتأين وتصبح أيونات  
 موجبة بالرمز  $N_D^+$ . والمناقشة أعلاه تبين أنه عند درجة حرارة الغرفة فإن  
 جميع الذرات المانحة تكون أيونات موجبة وبما أن كل أيون موجب يجب  
 أن يكون له إلكترونات فأن تركيز الإلكترونات الإضافية  $n$  يساوي  $N_D^+$  أي أن  $n = N_D^+$ .  
 ولكن عند خفض درجة الحرارة بدرجة كبيرة فإن الإلكترونات الإضافية هذه  
 تعود إلى ذراتها الأم وتصبح الذرات المانحة في حالة متعادلة (neutral)  
 وبذلك تقل قابلية المادة على التوصيل الكهربائي. هذه الحالة تسمى بحالة  
 التجمد (Freeze out) أي أن الإلكترونات الإضافية متجمدة في مواقعها  
 الأصلية مع الذرة الأم.



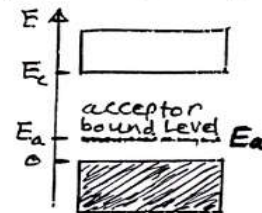
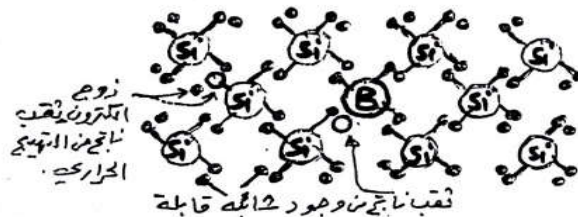
Donor impurity and energy level in an extrinsic semiconductor



39 (24)

بالنسبة للإشعاع الناتج، عناصر المجموعة الثالثة ( $Al, Ga, In$ ) تتصلق  
ثلاثة إلكترونات ظاهرة (إلكترونات التكافؤ  $ns^2 np^1$ ) وايضاً عند إضافة  
هذه العناصر كإواب إلى الـ  $Al$  يكون فان الذرة الثانية (أو لنقل البورون  $B$ )  
تحتل موقع ذرة  $Z$  في ذرات الـ  $Al$  في الشبكة البلورية وبفضل الإلكترونات  
الثلاثة ترتبط الذرات ذرات مجاورة بروابط تساهمية، وتكون المواقع محاطة  
بأربع ذرات على نفس المسافة فقد وجد أن الرابطة الرابعة الناقصة  
(تتصرف إلكترونات) تحاول اقتران إلكترون من حزمة التكافؤ الخاصة  
بالمادة المضافة (مادة الـ  $Al$  في هذا المثال) - أي من الروابط الأخرى  
الخالية. وعندما تقترب الذرة الثانية لثلاثة التكافؤ هذه إلكترونات  
تتجهل إلى الأيون  $Al^{3+}$  وهذا التبع يشير هذا النوع من الروابط  
بالروابط القابلة  $acceptor$  لأنها تقبل إلكترونات الوسط المحيط.

عندما تقتصر الكثرونات لتصبح ايونات سالبة تمرزها بالرمز  $NA^-$  .  
وعندما تقتصر هذه الشوائب الكثرونات ما هيئة التلوانو للماوة الخفيفة  
فانها تترك في خلفها في هيئة التلوانو (تقوياً 1000) ، فكل ذرة سالبة  
تقتصر الكثرناً وتخلو تقياً في هيئة التلوانو ، عليه فان تركيز الشقوب  
في هيئة التلوانو تزداد بمقدار  $NA^-$  ، اذ ان تركيز الشقوب الاصلية  $P$   
تساوي  $NA^- - CA^-$  ، ان عليه ان تضاف الكثرات ما هيئة التلوانو وتطارد  
قدراً من الطاقة (تتولد بفعل عام بطانة التنشيط  $activation energy$ ) لذا  
فلا بد ان تكون درجة الحرارة (T) من الارتفاع بحيث ان الكثرات ما هيئة التلوانو  
تحصل عن طاقة التنشيط هذه من الطاقة الحرارية للشبيكة ، عليه فمن وجهة نظر  
حرارة الطاقة يتحمل المتولد الذي يكون عليه الاكثرون المتشوق بالذرة السالبة  
للحرارة التلوانو اعلى بقليل عن مستوى  $E_v$  الفرمي مثل قمة هيئة التلوانو .



(18)

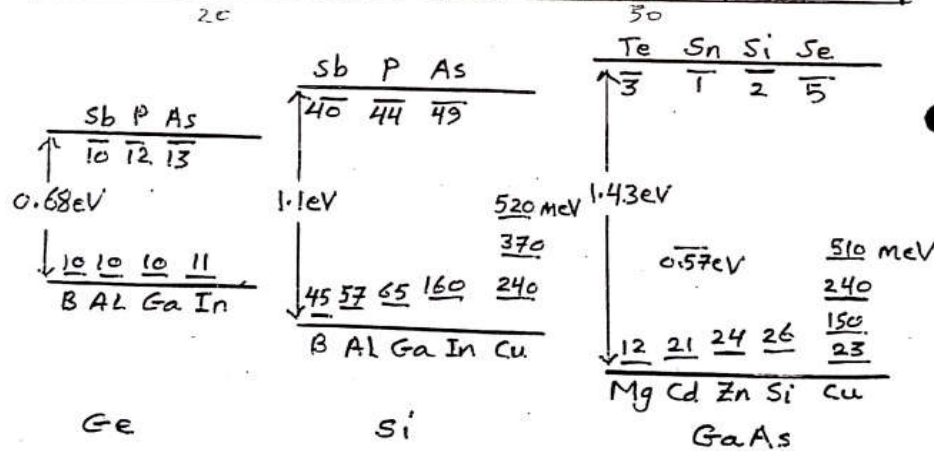
40 (25) وايضاً يتعين النظر في نموذج بوهلر للذرة لتقدير نصف قطر مدار الالكترون الملتصق بالذرة الناتجة القابلة ( $a_B$ ) وسداس طاقة التثبيط

$$E_A - E_V = \frac{m_h^* e^4}{8 \epsilon^2 h^2} = \frac{13.6}{\epsilon_r^2} \left( \frac{m_h^*}{m} \right) \text{eV} = \frac{13.6}{11.8^2} (0.5) = 0.05 \text{ eV for Si}$$

والجهد التالي يعطي قيم طاقة التثبيط (أو طاقة التثبيط) لبعض الشوائب في السليكون والجرما늄 والمستقيمة في الفجوات العنصرية - وبالإضافة إلى النموذج البسيط (نموذج بوهلر) لا يأخذ في الحسبان تأثير المربطة ولكنه يفترض أن الذرة وهذا متوقع لكون نموذج بوهلر بسيط وتكون قيم التثبيط العنصرية في الواقع غير القيم التي عرضناها وذلك بسبب تعقيدات التداخل (anisotropy).

مستويات طاقة التثبيط (التثبيط) بوحدة إلكترون فولت

المادة	donors				acceptors				
	P	As	Sb		B	Al	Ga	In	
Ge	12	13	9.6		10.4	10	10.8	11.2	
Si	45	49	39		45	57	65	16	



Ionization energies for various impurities in Ge, Si, and GaAs at 300K (After Sze [3]).