كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

المادة : انصاف نواقل

المحاضرة : الثالثة/نظري/

{{ A to Z مكتبة }}

Facebook Group : A to Z مكتبة

2025

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

5

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

الفصل الرابع دراسة ظواهر الحركيّة في المواد النصف الناقلة

Some of Kinetic Phenomena of Semiconductors

17 الناقلية الكهربائية للمواد نصف الناقلة (مفاهيم عامة):

Electric Conduction of Semiconductors (General Concepts)

يُطلق اسم الظواهر الحركيّة على الظواهر الفيزيائية المرتبطة بحركة الحاملات الحرة للشحنة الكهربائية التي تحدث تحت تأثير الحقول الكهربائية والمغنطيسية أو بنتيجة وجود فروق حرارية بين طرفي نصف الناقل المدروس.

وتشمل هذه الظواهر:

1. ظاهرة الناقلية الكهربائية،
2. والظواهر الكهربائية– الحرارية (الكهرحرارية)،
3. والظواهر المغنطيسية الغلفانية (المغنوغلفانية)،
4. والظواهر المغنطيسية– الحرارية (المغنوحرارية).

لدى وجود نوع واحد من الحاملات الحرة للشحنة (الإلكترونات مثلاً)، فإن الناقلية الكهربائية النوعية (**الناقلية النوعية** *Conductivity* اختصاراً) تساوي

$$\sigma_n = en\mu_n \,, \qquad (1)$$

حيث e شحنة الإلكترون، و n تركيز الإلكترونات الحرة، و μ_n **الحركيّة الانسياقية** *Drift Mobility* للإلكترونات؛

و**الحركيّة الانسياقية** للإلكترونات كما نعلم هي كميّة فيزيائية؛ تساوي عددياً **للسرعة الوسطية لانسياق** *Mean Drift Velocity* (υ_{mean}) الإلكترونات في واحدة شدة الحقل الكهربائي Ξ:

$$\boxed{\mu_n = \frac{\upsilon_{mean}}{\Xi}} \,. \qquad (2)$$

وإذا كانت حاملات الشحنة ثقوباً، فتُعيَّن ناقليتها الكهربائية وحركيّتها بشكل مشابه لما سبق.

دراسة حركيّة الإلكترونات والثقوب وآليات تبعثرها:

Study of Electrons and Holes Mobility and their Scattering Mechanisms

تساوي **السرعة الانسياقية النهائية** *Final Drift Velocity* للإلكترونات وفقاً للنظرية الإلكترونية الأولية للفلزات

$$\upsilon_f = a\tau \,, \qquad (3)$$

حيث a **التسارع** الذي اكتسبه الإلكترون تحت تأثير قوة الحقل الكهربائي، و τ **الزمن الوسطي** *Mean Time* **الفاصل بين تصادمين متتالين للإلكترون مع الشبكة البلّورية** لنصف الناقل، أي الزمن الوسطي الحر لمسار الإلكترون.

نفرض أن الحركة الموجهّة للإلكترون تهدأ بعد كل تصادم من التصادمات المتتالية التي تحدث مع الشبكة البلّورية ولذلك نَعدُّ سرعة الانسياق الأولية مساويةً للصفر $\upsilon_0 = 0$.

وبما أنَّ القوة الكهربائية تتناسب طرداً مع شدة الحقل الكهربائي Ξ ومن جهة أخرى طرداً مع التسارع a الي يكتسبه الإلكترون وفق العلاقتين:

$$F = e\Xi \; ; \qquad F = ma \; . \tag{4}$$

وبالأخذ بالحسبان العلاقة (3)، يمكننا كتابة العلاقتين الآتيتين:

$$a = \frac{e}{m}\Xi \; ; \qquad \upsilon_{mean} = \frac{\upsilon_f + \upsilon_0}{2} = \frac{e\tau}{2m}\Xi \equiv \mu_n \Xi \; . \tag{5}$$

ومن ثمَّ

$$\mu_n = \frac{e\tau}{2m} \; . \tag{6}$$

وبإتباع طريقة أكثر دقة **تأخذ بالحسبان توزّع** الإلكترونات على السرعات نحصل على المساواة الآتية:

$$\boxed{\mu_n = \frac{e\tau}{m} \; .} \tag{7}$$

تختلف العلاقة (7) عن العلاقة (6) فقط بمقام الكسر حيث توجد الكمية m عوضاً عن $2m$. وإذا استعملنا الصيغة (7) من أجل اتجاه واحد من الاتجاهات الممكنة في نصف الناقل، يمكننا كتابة العلاقة الآتية:

$$\boxed{\left(\mu_n\right)_i = \frac{e}{m_i}\tau \; ,} \tag{8}$$

حيث $\left(\mu_n\right)_i$ حركيّة الإلكترون وفق أحد الاتجاهات (وفق محور مجسم القطع الناقص الذي يُمثِّل سطح تساوي الطاقة من أجل Si و Ge، مثلاً)، و m_i المركِّبة الموافقة **لتنسور الكتلة الفعَّالة** *Effective Mass Tensor*.

في الحالة العامة، **تُعدُّ الحركيّة** (والناقلية الكهربائية بطبيعة الحال) في البلّورات النصف الناقلة **تنسوراً**، ولكن طالما توجد في البلّورات من نوع السيلكون والجرمانيوم **قيعان** (أودية) **متكافئة متناظرة**، فإن الحركيّة (والناقلية الكهربائية) لمثل هذه البلّورات تبدو **متماثلة المناحي** *Isotopic Crystals*:

$$\mu_{\sigma n} = \frac{1}{3}\left[\left(\mu_n\right)_1 + \left(\mu_n\right)_2 + \left(\mu_n\right)_3\right]. \tag{9}$$

وبشكل مشابه للعلاقة (8) يمكننا كتابة

$$\mu_{\sigma n} = \frac{e}{m_{\sigma n}}\tau \; , \tag{10}$$

ومن ثمَّ

$$\boxed{\frac{1}{m_{\sigma n}} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3}\right)} \tag{11}$$

وهذا يعني أننا حصلنا على علاقة تسمح لنا بتعيين الكتلة الفعَّالة للناقلية $m_{\sigma n}$. وعلى وجه الخصوص، يمكن إيجاد قيمة $m_{\sigma n}$ من أجل السيلكون والجرمانيوم إذْ تُعطي الحسابات القيم العددية الآتية:

$$\left(m_{\sigma n}\right)_{\mathrm{Si}} = 0.22\, m \qquad \text{و} \qquad \left(m_{\sigma n}\right)_{\mathrm{Ge}} = 0.12\, m \; .$$

خلافاً للنظرية الإلكترونية الأولية يُعيَّنُ الزمن τ؛ **كزمن استرخاءٍ** يصف عملية استعادة الحالة المتوازنة (التي جرى خرقها بالحقل الكهربائي) بعد إزالته.

تُخرق حالة التوازن الموافقة لدرجة الحرارة المعطاة **لدى تطبيق** حقل كهربائي $\mathcal{E}$ وخلق انسياقٍ لحاملات الشحنة. وإذا فصلنا الحقل الكهربائي، فإن جملة الجسيمات تؤول إلى حالة التوازن خلال فترة من الزمن. **يمكن بشكل تقريبي** أن نعدَّ **زمن الاسترخاء**، بعد فصل الحقل الذي أدى لانحراف جملة الجسيمات عن وضع التوازن، مساوياً **للزمن الوسطي لمسارها**. في الواقع، إذا فُقدت سرعة الحركة الموجَّهة لحاملات الشحنة بنتيجة تصادمٍ وحيدٍ، فإن هذه الفرضية تكون مقبولة. ولكن الطريقة الأكثر دقة تؤدي لاستنتاجٍ مفاده، أن زمن الاسترخاء والزمن الوسطي للمسار الحر يُعدَّان مقدارين من نفس الرتبة.

يمكن حدوث **تبعثر** *Scattering* إلكترونات وثقوب الناقلية على كلٍ من:

- الأيونات والشوائب الذريّة المعتدلة، والعيوب النقطية للبنية البلّورية،
- والانخلاعات، وتخوم البلّورات، وسطوح الالتحام، وتخوم الحبيبات،
- والإلكترونات والثقوب،
- والاهتزازات الحرارية للشبكة البلّورية (الفونونات).

أولاً– إن **التبعثر على أيونات الشوائب** ينشأ نتيجة تآثر الشحنات الكهربائية (التأثير المتبادل فيما بينها):

فالأيونات **المُبعثِرة** (بإشارةٍ ما) **تحرف** بحقلها الكهربائي كلاً من الإلكترونات والثقوب، ثمّ إن هذا الانحراف يكون **أقوى** كلما كانت حركة حامل الشحنة **أبطأ** وكلما **اقترب** من أيون الشائبة أكثر فأكثر.

- **يُحسب مقدار الانحراف** رياضياً من خلال إيجاد مسار حركة الجسيمة المشحونة في الحقل المركزي للأيون؛ وذلك بشكل مشابه لمسألة إيجاد تبعثر جسيمات ألفا α-Particles التي حَلَّها روذرفورد Rutherford،
- **ثمّ يجري** الحصول على **احتمال التبعثر**؛
- وبعد ذلك **نحصل** على علاقة من أجل **زمن الاسترخاء**.

فعند التبعثر على **أيونات الشائبة** *Impurity Ions* (في درجات حرارة **ليست منخفضة جداً**) في أنصاف النواقل **اللامتحللة** وجد اعتماداً على علاقة زمن الاسترخاء أن **الحركيّة تتناسب طرداً** مع المقدار $T^{3/2}$:

$$\mu_{\text{im}} = a\,T^{3/2}\ . \qquad (12)$$

يمكن أن يكون **التبعثر على أيونات الشائبة** في البلّورات الأحادية Mono-crystals، الآلية **الرئيسية** في مجال درجات الحرارة المنخفضة، وعندها يكون تقريب العلاقة (12) محققاً من أجل الحد العلوي لمجال درجات الحرارة المنخفضة. ولكن من أجل مجال درجات الحرارة العاملة– مجال عمل معظم المواد والنبائط النصف الناقلة، **تنخفض الحركيّة** عادةً بارتفاع درجة الحرارة.

ثانياً– **عند التبعثر على الاهتزازات الحرارية للشبكة البلّورية** في أنصاف النواقل اللامتحللة **تتناسب الحركيّة عكساً** مع درجة الحرارة وفق $T^{-3/2}$، ولذلك يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$\mu_{\mathrm{TV}} = bT^{-3/2} . \qquad (13)$$

بهذا الشكل، نجد أنه في **درجات الحرارة المتوسطة والمرتفعة** نسبياً، يمكن أن تتناقص الحركيّة نتيجة التأثير المسيطر للتبعثر على الاهتزازات الحرارية للشبكة.

ثالثاً– أمّا عند **التبعثر على الانخلاعات** فتم الحصول على المساواة الآتية:

$$\mu_{\mathrm{Disl}} = cT^{-1/2} . \qquad (14)$$

رابعاً– وعند التبعثر على **المراكز المعتدلة** الشحنة (الشوائب)، **لا تتعلق الحركيّة بدرجة الحرارة بشكلٍ واضحٍ**. فتأثير درجة الحرارة يظهر على تركيز الشوائب التي تبقى غير متأينة (أي غير النشطة كهربائياً) فقط؛

إذْ أن تركيز الشوائب من هذا النوع **يمكن أن ينخفض**، في مجال درجات الحرارة المرتفعة، بارتفاع درجة الحرارة، **وتزداد عندها الحركيّة** الموافقة.

عندما تؤثر **الآليات المختلفة للتبعثر** بآنٍ معاً، بصورة مستقلة عن بعضها البعض، فإن **الاحتمال الإجمالي للتبعثر يساوي لمجموع احتمالات التبعثر على كل نوع من المراكز المُبعثِرة**. ومن ثمَّ الزمن الكلي للاسترخاء يُعيَّن بالعلاقة

$$\tau^{-1} = \sum_i \tau_i^{-1} , \qquad (15)$$

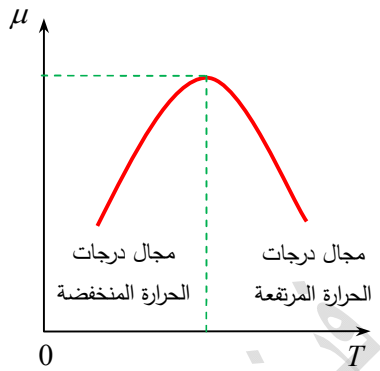
حيث τ_i الزمن الجزئي (*i-time*) للاسترخاء.

يتعيَّن الزمن الكلي للاسترخاء τ، وفق العلاقة (15)، بصورة رئيسة، بتلك العملية الجزئية التي **تتصف بأقل زمن استرخاء**؛ يُحسب زمن الاسترخاء هذا من أجل الطاقة الحرارية الوسطية $\frac{3}{2}k_BT$ للجسيمات لأن الجسيمات التي طاقاتها قريبة من الطاقة الوسطية تُشكِّلُ القسم الرئيسي من الحاملات الحرة للشحنة (في غاز غير متحلل).

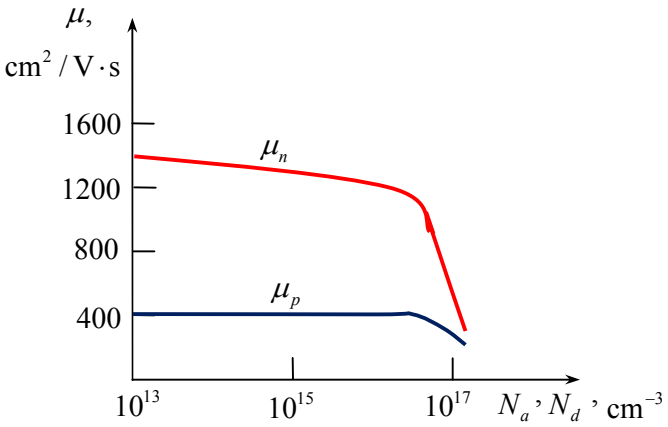
لقد تمت الإشارة إلى هذا التأثير التفضيلي (المهيمن) للعملية الجزئية المتصفة بزمن استرخاءٍ أصغريٍ سابقاً، عند دراسة الحركيّات في درجات حرارة مختلفة. تُعيَّنُ عادةً قيمة الحركيّة من العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{\mu_n} = c_1T^{-3/2} + c_2T^{3/2} . \qquad (16)$$

تمّ الاكتفاء بحدين فقط في الطرف الأيمن من العلاقة (16)، لكونهما يتصفان **بقيم وازنة** عادةً. أضف إلى ذلك، طالما التبعثر على أيونات الشوائب هو الآلية المسيطرة في درجات الحرارة المنخفضة نسبياً، وفي درجات الحرارة الأكثر ارتفاعاً يُصبح التبعثر على الاهتزازات الحرارية للشبكة البلّورية هو المسيطر، فيمكن تصوّر المسار الوصفي العام لمنحني الحركيّة، $\mu = \mu(T)$، بالصورة التي يوضحها الشكل (1).



الشكل (1): التابعية الحرارية لحركية حوامل الشحنة الكهربائية في أنصاف النواقل.



الشكل (2): تابعية وصفية لحركية الإلكترونيات عند تغير تركيز المانحات وحركية الثقوب عند تغير تركيز الآخذات في السيلكون

لا تتعلق الحركيّة بدرجة الحرارة وحسب، بل بتركيز الشوائب أيضاً. إذْ بازدياد تركيزها، كما في حالة نشوء نواقص أخرى في الشبكة البلّورية، يزداد التبعثر وتقلُّ الحركيّة، والشكل (2) يوضح تابعية حركية الإلكترونات والثقوب لتركيز الشوائب في السيلكون في الدرجة $T = 300\ \mathrm{K}$.

ومن ثمَّ، بازدياد مقاومة المادة المدروسة (السيلكون مثلاً) في المجال المشوب تزداد الحركيّة عادةً، لأن العينة الأكثر مقاومة تتصف بتركيزٍ أقل من الشوائب.

يستعرض الجدول (4) بعض متحولات بلّورات **السيلكون، والجرمانيوم، وزرنيخيد الغاليوم**، حيث تُنسب قيم الحركيّة للبلّورات النقيّة في درجة حرارة الغرفة. وقيم الكتل الفعَّالة الموضوعة في أقواس مأخوذة من المراجع. يجدر بالذكر أن السيلكون والجرمانيوم يمتلكان بنيَّة بلورية من نوع **الألماس** وزرنيخيد الغاليوم بنيَّة بلّورية من نوع **كبريتيد الزنك**.

دراسة تابعية الناقلية الكهربائية لأنصاف النواقل بدرجة الحرارة وتركيز الشوائب

تتألف الناقلية النوعية في الحالة العامة من مجموعة حدود، يتعيَّن كل حدٍ فيها بعلاقة من الشكل (1)؛ وعلى وجه الخصوص، إذا كانت حاملات الشحنة إلكترونات وثقوب، فإننا نحصل على المعادلة الآتية:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \ . \qquad (17)$$

في مجال الناقلية الذاتية يتساوى تركيز الإلكترونات مع تركيز الثقوب وعندها تُكتب علاقة الناقلية بالشكل الآتي:

$$\sigma_i = e\left(\mu_n + \mu_p\right)n_i = e\left(\mu_n + \mu_p\right)\sqrt{N_c N_\upsilon}\ \mathrm{e}^{-\frac{\Delta E_0}{2k_B T}}. \qquad (18)$$

على الرغم من أن الحركيّتين μ_n و μ_p وكذلك الأعداد الفعَّالة للحالات N_c و N_υ تتعلق بدرجة الحرارة، إلاَّ أن هذه التابعيات ضعيفة للغاية بالمقارنة مع المقدار الأُسي، $e^{-\frac{\Delta E_0}{2k_BT}}$. ولهذا السبب، فإن مسار التابع $\sigma_i = f(T)$، وفقاً للعلاقة (18)، يتصف بعامل أُسي، أمّا المعامل الواقع أمامه فيمكن عدَّهُ في مجالات واسعة من درجة الحرارة ثابتاً عملياً.

الجدول (5-4): وسطاء أنصاف النواقل

اسم الوسيط	وحدة القياس	Si	Ge	GaAs
وسيط الشبكة البلّورية في الدرجة 300 K	$\mathring{A}$	5.430	5.658	5.654
المسافة بين أقرب الذرات المجاورة	$\mathring{A}$	2.35	2.45	2.45
عدد الذرات في $1\,cm^{-3}$		5×10^{22}	4.42×10^{22}	4.43×10^{22}
عرض المنطقة المحظورة				
في الدرجة 300 K:	eV	1.105	0.665	1.43
في الدرجة 0 K:	eV	1.21	0.756	1.52
الكتلة الفعَّالة للإلكترون بواحدات كتلة الإلكترون الحر:				
لكثافة الحالات المحسوبة بالنسبة لوهدة واحدة:		0.22	0.12	0.043-0.071
		0.33	0.26	0.043-0.071
الكتلة الفعَّالة للثقب بواحدات كتلة الإلكترون الحر				
للثقوب الثقيلة:		0.49	0.43 (0.28)	0.5-068
للثقوب الخفيفة:		016; 0.24	0.04; 0.08	0.12
لكثافة الحالات:		0.59 (0.55)	0.37 (0.39)	
الحركيّة القصوى للإلكترونات المحسوبة (من أجل أكثر البلّورات نقاوةً) في الدرجة 300 K	$\frac{cm^2}{V\cdot s}$	1900	3950	11000
الحركيّة القصوى للثقوب المحسوبة (من أجل أكثر البلّورات نقاوةً) في الدرجة 300 K	$\frac{cm^2}{V\cdot s}$	425	1900	450
تركيز الإلكترونات في نصف ناقل ذاتي في الدرجة 300 K	cm^{-3}	1.5×10^{10}	2.4×10^{13}	1.4×10^{6}
المقاومة النوعية لنصف ناقل ذاتي في الدرجة 300 K	$\Omega\cdot cm$	2.3×10^{5}	46	3.7×10^{8}

ومن ثمَّ

$$\boxed{\log\sigma_i = A - \frac{0.43\,\Delta E_0}{2k_B\cdot 10^3}\cdot\frac{10^3}{T}}, \qquad (19)$$

هذا يعني أنه في مجال الناقلية النوعية الذاتية يُعدُّ المقدار $\log\sigma_i$ تابعاً خطّياً لدرجة الحرارة $(1/T)$ عملياً.

ثم إن المعامل الزاوي للمستقيم يتحدد بعرض المنطقة المحظورة، على غرار ما بدا عليه المعامل الزاوي عند إنشاء التابعية $n_i = f(T)$، ورسمها وفق العلاقة (6)، أي أنه يُشابه العلاقة (8):

$$\text{tg}\alpha = \frac{0.43\,\Delta E_0}{2k_B\cdot 10^3} \qquad \text{و} \qquad \Delta E_0 = 0.4\ \text{tg}\alpha\ \text{eV}$$

يكون أحد حدَّي العلاقة (17)، **في المجال المشوب**، **صغيراً** بالمقارنة مع الحد الآخر، لأن تركيز الحاملات **اللاأساسية** للشحنة أقل بكثير من تركيز الحاملات **الأساسية**. ومن ثمَّ تعطي العلاقة (17) تابعية أُسّية أحادية الحد لدرجة الحرارة من أجل التراكيز المتوازنة حتى بلوغ مجال نضوب الشوائب، أو في حال عدم توفّر مجال النضوب، حتى مجال الناقلية النوعية الذاتية. وهذا يعني أنه لدينا، من أجل نصف ناقل إلكتروني، المساواة الآتية:

$$\sigma_n = e\,\mu_n\sqrt{\frac{N_c N_d}{2}}\ \text{e}^{-\frac{\Delta E_d}{2k_B T}} \qquad (20)$$

وبشكلٍ موافقٍ يكون لدينا من أجل نصف ناقل ثقبي المساواة الآتية:

$$\sigma_p = e\,\mu_p\sqrt{\frac{N_\upsilon N_a}{2}}\ \text{e}^{-\frac{\Delta E_a}{2k_B T}} \qquad (21)$$

ومن المساواة (20) يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$\log\sigma_n = B - \frac{0.43\,\Delta E_d}{2k_B\cdot 10^3}\cdot\frac{10^3}{T}. \qquad (22)$$

ومنه:

$$\text{tg}\alpha_d = \frac{0.43\,\Delta E_d}{2k_B\cdot 10^3} \qquad (23)$$

ومن ثمَّ

$$\boxed{\Delta E_d = 0.4\ \text{tg}\alpha_d\ \text{eV}} \qquad (24)$$

وبشكلٍ مشابهٍ، نحصل على ما يأتي من أجل نصف الناقل الثقبي:

$$\log\sigma_p = C - \frac{0.43\,\Delta E_a}{2k_B\cdot 10^3}\cdot\frac{10^3}{T}. \qquad (25)$$

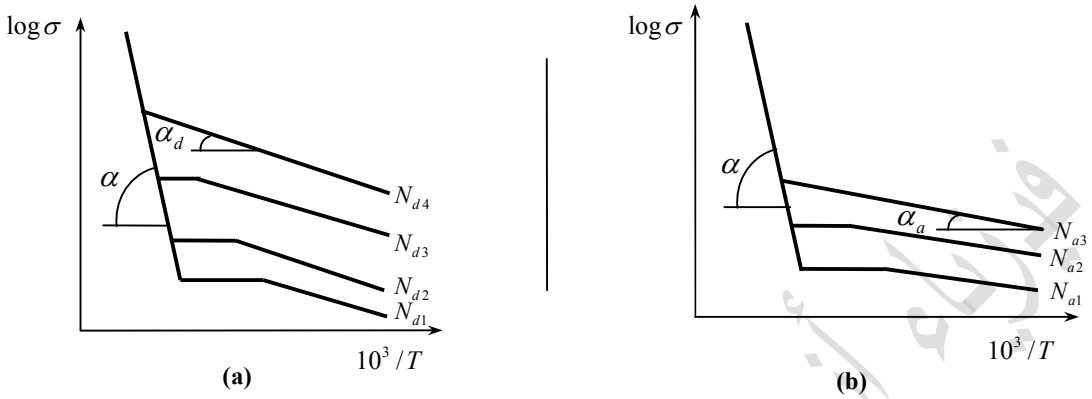
ومنه:

$$\boxed{\text{tg}\alpha_a = \frac{0.43\,\Delta E_a}{2k_B\cdot 10^3}} \qquad (26)$$

فيزياء أنصاف النواقل - د. حسن سليمان

ومن ثمَّ:

$$\boxed{\Delta E_a = 0.4\ \mathrm{tg}\alpha_a\ \mathrm{eV}.} \qquad (27)$$



الشكل (3): تابعية الناقلية الكهربائية النوعية σ لدرجة الحرارة المطلقة T في نصف الناقل الحاوي:

(a) مانحات بتراكيز مختلفة. (b) آخذات بتراكيز مختلفة (يزداد التركيز بازدياد الرقم التسلسلي).

يتحدد مسار التابع $\sigma(T)$ في مجال نضوب الشوائب بالتابعية $\mu(T)$. وعلى وجه الخصوص، إذا انخفضت الحركيّة μ في مجال النضوب مع ارتفاع درجة الحرارة T، فإن الناقلية $\sigma(T)$ أيضاً تنخفض.

يوضح الشكل (3) منحنيات التابعية $\log\sigma = f(1/T)$ من أجل نصف ناقل إلكتروني من أجل تراكيز مختلفة للمانحات، N_d، ومن أجل نصف ناقل ثقبي عند اختلاف تراكيز الآخذات، N_a. إذا درسنا في كلتا الحالتين نصف الناقل نفسه (السيلكون مثلاً)، فإن المنحنيات في مجال الناقلية النوعية الذاتية تملك الميل ذاته. إذْ تتحدد زاوية ميل المنحنيات في المجال المشوب بطاقة تأين المانحات والآخذات، أي تتعيَّن بالعلاقتين (24) و (27). ولكن مسار المنحنيات في أنصاف النواقل الحقيقية يختلف بعض الشيء عن المنحنيات المثالية، التي يوضحها الشكل (3).

دراسة الناقلية النوعية بين مستويات الشوائب في أنصاف النواقل والعوازل واستنتاج علاقة الناقلية النوعية:

Study of Conductivity between Impurity Levels in Semiconductors and Dielectrics

- في نموذج ذرات الإشابة الشبيهة بذرة الهيدروجين، والذي دُرس في الفقرة 8، لم يؤخذ تأثر الذرات (التأثير المتبادل فيما بينها) Atom Interaction بالحسبان.
- ولكن عند ازدياد تركيز الشوائب في **بلّورة الجرمانيوم** وبلوغه نحو $10^{15}\ \mathrm{cm}^{-3}$، فإن **التوابع الموجية لذرات الإشابة المتجاورة تتراكب** مع بعضها البعض بشكلٍ ملحوظٍ.
- وطالما في **البلّورات الحقيقية**، توجد عملياً وبشكلٍ دائمٍ شوائب معدِّلة جزئياً (راجع الفقرة 15)، فإنه، إذا كان $N_d > N_a$، على سبيل المثال، وتراكبت التوابع الموجية للمراكز المانحة المتجاورة، **تظهر إمكانية عبور الإلكترونات بطريقة النفق** من مراكز مانحة مشغولة إلى مراكز مانحة فارغة (شاغرة).

- وفي درجات الحرارة **المنخفضة جداً** (عندما $T \approx 0$) يبلغ تركيز المراكز المشغولة $N'_d = N_d - N_a$ ، وتركيز المراكز الشاغرة يبلغ N_a . في هذه الحالة، **حتى عندما** $T = 0$ ، **تكون الناقلية الكهربائية ممكنةً** بين الشوائب (فيما بين الحالات المتوضِّعة Localized States)**!**.

في حقيقة الأمر، لدى تطبيق حقل كهربائي على البلّورة النصف الناقلة تُلاحظ انتقالات منتظمة للإلكترونات بين المستويات الطاقية Energetic Levels للمانحات؛ من المستويات المشغولة إلى المستويات الشاغرة، أي تحصل ناقلية كهربائية بين مستويات الشوائب. وطالما أن مراكز الإشابة موزَّعة بعيدةً عن بعضها البعض، فإن حركيّة إلكترونات مستويات الشوائب أقل بشكلٍ ملحوظٍ من حركيّة إلكترونات عصابة الناقلية. **ولذلك، عند ارتفاع درجة الحرارة تسوّد الناقلية الكهربائية العصابية العادية الناتجة من انتقال الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية.**

- **عند ازدياد تركيز الشوائب**، فإن **تراكب التوابع** الموجية لإلكترونات مراكز الإشابة المتجاورة **يبدو كبيراً**، لدرجةٍ أن مستوى شائبة وحيد يتعرَّض (أي يتوسع)، مُشكِّلاً **عصابة طاقة** (تسمى عصابة شوائب)، **تتوضَّع** في المنطقة المحظورة لنصف الناقل أو العازل.
- وعند **الزيادة اللاحقة** لتركيز المانحات يمكن أن **تتلامس عصابة الشوائب مع عصابة الناقلية** (أو مع عصابة التكافؤ من أجل نصف ناقل من النوع-p عند ارتفاع تركيز الآخذات)، **بحيث تبدو كثافة الحالات مختلفةً عن الصفر** في ذلك المكان من المنطقة المحظورة– مكان نشوء عصابة الشوائب.
- بما أن العيوب المختلفة في البنية البلّورية تُكوِّنُ، على غرار ذرات الشوائب (كحالة خاصة لعيوب البنيّة البلّورية)، مستويات طاقة في المنطقة المحظورة، فمن الممكن ظهور عصابات شوائب في أنصاف النواقل والعوازل اللامتجانسة واللامنتظمة.
- توصف هذه الحالة لاحقاً بشكلٍ مفصلٍ. وهنا نُشير فقط إلى أن الناقلية الكهربائية في عصابة الشوائب (بين الحالات المتوضِّعة) يمكن أن تؤثر في الناقلية الكهربائية الإجمالية ثمَّ إنَّ مدى هذا التأثير متعلقٌ بدرجة الحرارة وبالتردد أيضاً إذا كان الحقل الكهربائي متناوباً. على الرغم من أن الناقلية الكهربائية العادية التي تحدث في عصابة التكافؤ أو عصابة الناقلية تفوق بكثير الناقلية الكهربائية في عصابة الشوائب، إلاَّ أنه وفي الكثير من الحالات، لا بد من أخذ الناقلية الأخيرة بالحسبان.