

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z



كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

اسئلة ووراك محلولة

الالكترونيات نانوية

A 2 Z LIBRARY

مكتبة A to Z : Facebook Group

كلية العلوم (فيزياء ، كيمياء ، رياضيات ، علم الحياة)

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

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

السؤال الأول: (30 درجة)

تبين لدى دراستنا للأطوال الإلكترونية الأساسية في الأجسام الصلبة أن الطول المميز في الجسم الصلب المتبلور هو ثابت الشبكة البلورية a_0 ولكن المقاييس ذات الصلة بحاملات الشحنة عادة ما تكون أكبر بكثير من a_0 ثم إن الطول الأكثر أهمية لإلكترون متوقّف في جسم صلب هو طول موجة دوبروي؛ والمطلوب: أولاً- كيف يكون طول موجة دوبروي من أجل إلكترون في تركيب نانوي نصف ناقل؛ وضح العلاقة التي تربط بينه وبين طاقة الإلكترون والكتلة الفعالة ودرجة حرارة الوسط المحيط مع المناقشة والرسم.

ثانياً- كيف يمكن التمييز بين الحالات ثلاثية البعد 3D وثلاثية البعد 2D وأحادية البعد 1D وصفرية البعد 0D تبعاً لأبعاد الجملة المدروسة النصف ناقلة $(L_x; L_y; L_z)$ مع شرح ما يلزم. وضح هذه الفكرة بالتفصيل.

ثالثاً- اذكر الأسباب التي تجعل حاملات الشحنة تفقد سلوكها الشبيه بالموجة وشرحها بإيجاز بما لا يتجاوز خمسة أسطر.

السؤال الثاني: (30 درجة)

إن التحكم بمقاومة التراكيب المتغايرة الفردية ضروري للحصول على نبائط مفيدة؛ والمطلوب:

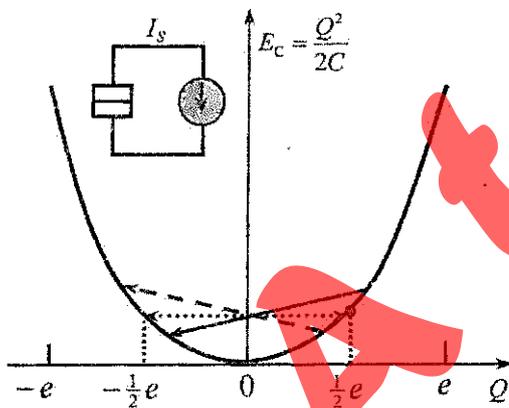
أولاً- دراسة احتمالية تغير الناقلية الكهربائية لوصلة فردية متغايرة محجوبة عن طريق ضبط التركيز الإلكتروني.

ثانياً- شرح آلية التوصيل في الحالة العادية Normally-on وآلية الفصل في الحالة العادية Normally-off موضحاً إجابتك بالرسم.

ثالثاً- شرح كيفية التحكم بناقلية نبائط جريان الناقلية الكهربائية وتوضيح أهمية تشكل المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة.

رابعاً- شرح تأثير سماكة المياعد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثالث: (30 درجة)



من طرائق النقل الإلكتروني في أنصاف النواقل والتراكيب النانوية نذكر النقل

الإلكتروني الفردي، والمطلوب: أولاً- اشرح مفهوم النقل الإلكتروني الفردي

بالتفصيل مستنتجاً خلال ذلك المعايير الموافقة لهذا النقل الفردي.

ثانياً- ادرس فيزيائياً النقل الإلكتروني الفردي من أجل دائرة تحوي وصلة نفق

مشحونة بمصدر تيار مستمر مستفيداً من الرسم المجاور.

ثالثاً- ارسم الصفة المميزة (تيار - جهد) الموافقة. ماذا تستنتج. وماذا يسمى

المفعول الفيزيائي الناتج؟

الجزء العملي (10 درجات)؛ يجيب على هذا السؤال فقط الطلاب الذين ليس لديهم

علامة عملي:

اكتب علاقات الطيف الطافي المتماثل المناحي فقط للإلكترونات لجملة إلكترونية واقعة في درجات حرارة منخفضة ($T \rightarrow 0$) عندما

تكون الجملة المدروسة 3D و 2D و 1D موضحاً كيف تكون الحركة الإلكترونية في كل منها.

بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2025/08/25

أ.د. حسن عبد الكريم سليمان

سليم فوزيع المرزا - أسئلة من الامتحان لأبوية
المادة: الفيزياء - السنة: للعام الدراسي 2017-2018

توزيع الدرجات على جواب السؤال الأول (30 درجة)

أولاً- كيف يكون طول موجة دوبروي من أجل إلكترون في تركيب نانوي نصف ناقل كتلته الفعالة m^* ؛ وضح العلاقة التي تربط بينه وبين طاقة الإلكترون والكتلة الفعالة ودرجة حرارة الوسط المحيط مع المناقشة والرسم.

ثانياً- كيف يمكن التمييز بين الحالات ثلاثية البعد 3D وثنائية البعد 2D وأحادية البعد 1D وصفرية البعد 0D تبعاً لأبعاد الجملة المدروسة النصف ناقلة $(L_x; L_y; L_z)$ الموضحة بالشكل المرافق مع شرح ما يلزم. وضح هذه الفكرة بالتفصيل.

ثالثاً- اذكر الأسباب التي تجعل حاملات الشحنة تفقد سلوكها الشبيه بالموجة وأشرحها بإيجاز بما لا يتجاوز خمسة أسطر.

أولاً- إن طول موجة دوبروي λ من أجل إلكترون في بنية نانوية نصف ناقلة كتلته الفعالة m^* يكون عادةً أكبر منه من أجل إلكترون حر λ_0 ويخضع للعلاقة:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m^*E}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{m_0}{m^*}}; \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0E}}$$

حيث E طاقة الإلكترون و m_0 كتلة الإلكترون في الخلاء.

نستنتج من العلاقة الأخيرة أن قيمة λ تتناسب عكساً مع الجذر التربيعي

للكتلة الفعالة ودرجة حرارة الوسط المحيط؛

حيث يوضح الشكل المجاور ذلك: تُشير النقاط من 1 إلى 4 الظاهرة على

المنحني للأطوال الموجية من أجل الإلكترونات في GaAs و InSb و

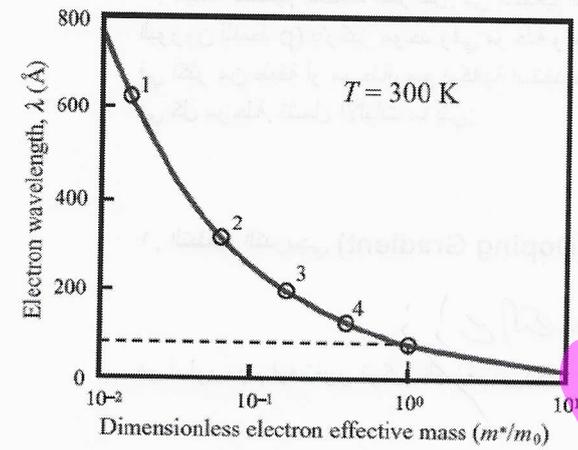
GaN و SiC على الترتيب ذوات الكتل الفعالة، m^*/m_0 ، المساوية

(0.014)، و (0.06)، و (0.172)، و (0.41)، على الترتيب؛ وافترضنا

أن طاقة الإلكترون تساوي $E = k_B T$ ، حيث $T = 300K$ درجة حرارة

الوسط المحيط و k_B ثابت بولتزمان.

كما نلاحظ أن طول موجة دوبروي لإلكترون في أنصاف النواقل النموذجية



ذات الكتلة الفعالة m^* الواقعة في المجال $(0.01-1)m_0$ يساوي $(73-730) \text{ \AA}$ ، أي إنه فعلاً أكبر بكثير من ثابت الشبكة البلورية من أجل المواد المدروسة هنا في.

و حالما تنخفض درجة الحرارة إلى 3 K يزداد طول موجة دوبروي بمقدار مرتبة واحدة. وهكذا يصبح الطول الموجي قريباً من أبعاد تراكيب وبنائ نصف ناقلة تم تصنيعها بتكنولوجيا التصنيع النانوية الحديثة.

ثانياً- يمكن التمييز بين الحالات ثلاثية البعد 3D وثنائية البعد 2D وأحادية البعد 1D وصفرية البعد 0D تبعاً لأبعاد الجملة المدروسة النصف ناقلة بالشكل الآتي:

(3) (a) الحالة ثلاثية البعد أو الحالة شبه الحجمية؛ عندما لا تكون تكمية الطيف الإلكتروني مهمة على الإطلاق، فإن طول موجة دوبروي يكون أقل بكثير من أبعاد النبيطة كافةً:

$$\lambda \ll L_x, L_y, L_z,$$

ويسلك الإلكترون عندها سلوكاً مشابهاً لسلوك جسم حر يتصف بكتلة فعالة m^* .

(4) (b) الحالة ثنائية البعد أو حالة بئر كمومي؛ عندما تحدث تكمية الحركة الإلكترونية في اتجاه واحد في حين إن الحركة الإلكترونية في الاتجاهين الآخرين حرة، فإن طول موجة دوبروي يكون مساوياً لسماكة النبيطة تقريباً ولكنه أصغر بكثير

$$\lambda \cong L_z \ll L_y, L_x.$$

من بعديها الآخرين (طولها وعرضها، مثلاً):

تُعطى الطاقة الإلكترونية من أجل هذه الحالة على شاكلة عصابات طاقة جزئية ثنائية البعد.

(c) الحالة أحادية البعد أو حالة سلك كمومي؛ عندما تحدث تكمية الحركة الإلكترونية في اتجاهين بحيث ينتقل الإلكترون بشكل حر فقط في اتجاه واحد - على طول السلك، فإن طول موجة دوبروي أصغر بكثير من طول النبيلة ويكون من مرتبة البعدين الآخرين:

$$L_x \cong L_y \cong \lambda \ll L_x.$$

تُعطي الطاقة الإلكترونية من أجل هذه الحالة على شاكلة عصابات طاقة جزئية أحادية البعد.

(d) الحالة صفرية البعد أو حالة صندوق كمومي (نقطة كمومية)؛ عندما تحدث تكمية الحركة الإلكترونية في الاتجاهات كافة وليس بمقدور الإلكترون الانتقال بحرية في أي اتجاه، فإن طول موجة دوبروي يكون من مرتبة أبعاد النبيلة كافة:

$$L_x \cong L_y \cong L_z \cong \lambda. \quad (5-6)$$

والطيف الطافي هنا يكون منقطعاً.

توضح الحالات الثلاث الأخيرة أيضاً مفعول تكمية الأبعاد؛ في بعد واحد، وبعدين، وثلاثة أبعاد على الترتيب: فإذا كان بعد هندسي واحد على الأقل لنبيلة أو جملة مساوياً تقريباً لطول موجة الإلكترون فلا بد من معالجة كمومية حتمية للمسألة المطروحة.

ثالثاً - الأسباب التي تجعل حاملات الشحنة تفقد سلوكها الشبيه بالموجة هي:

السبب الأول هو عدم مثالية الجملة الذي يؤدي إلى التبعثر الإلكتروني على العيوب البلورية، والشوائب، واهتزازات الشبكة البلورية، وخشونة السطح الفاصل، الخ.

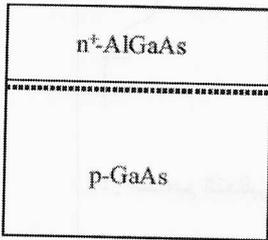
والسبب الثاني مرتبط بدرجة الحرارة المحدودة للجملة وإحصاء الإلكترونات، مما يستوجب إجراء عملية توسيط للسلوك الكمومي على إحصاء الإلكترونات بسبب التأثير الحراري؛ إذ في درجات الحرارة المحدودة توجد إلكترونات بطاقات مختلفة كفاية، وهذا ما يؤدي إلى تباين كبير في أطوار التابع الموجي الموافق لها فيتشوه الترابط في المنظومة الإلكترونية.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني (30 درجة)

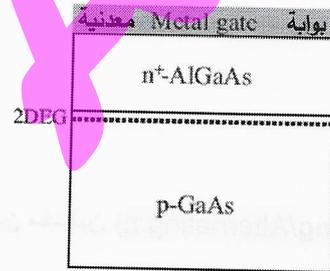
أولاً- ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغيرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغيرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبة تسمى باختصار وصلة متغيرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً

ونقارنها مع الشكل (a) الذي يُظهر وصلة متغيرة أخرى غير محجوبة.

(a) وصلة متغيرة غير محجوبة



(b) وصلة متغيرة محجوبة



الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - AlGaAs$ في التركيب المحجوب: تسمى هذه الجملة المؤلفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب MES.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعدُّ تراكيب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النبايط، لأن هذه المواد لا تحوي أكسيداً طبيعياً مستقراً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النبايط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكيب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكيب إلى ما يسمى بتراكيب شوتكي المحجوبة.

- يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-التشكّل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو 0.8 V.
- وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.

ثانياً- يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من M/AlGaAs/GaAs بسماكتين للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُباعدٌ غير مُطعمٍ يفصل المنطقة المُطعّمة، من النوع-n، عن الوصلة:

- إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،
- أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 Å وأكثر.
- وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل AlGaAs/GaAs وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛

→ تكون هنا طبقة الـ n^+ -AlGaAs رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمونية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقية جزئية.

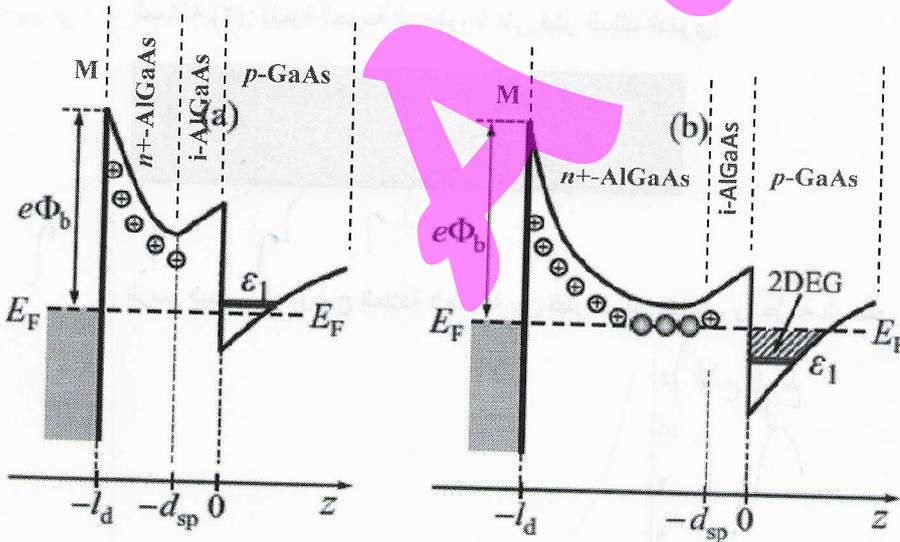
→ ومن ثمّ لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغاير يساوي الصفر على الأغلب.

→ فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء - نصف الناقلية - من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.

→ ومن أجل تشغيل ناقلية النبيلة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

آلية تشكّل نبائط Normally-on:

- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكّل بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة-جزئية وتُسكن الإلكترونات القناة من دون انحيازٍ بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AlGaAs سميكة كفاية؛ أكبر من 600 Å.
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط



تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيلة إلى حالة فصلٍ (أي إلى قفلٍ) off.

ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة يؤدي إلى تشكّل حقول كهروستاتيكية ناتجة من إعادة

توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_F ثابتاً عبر المواد المتماصة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكّل بئر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماصة. (3)

رابعاً- يُعدّ المُباعد عنصراً مهماً للتراكيب متغيرة- التطعيم، لأنه يمنع جزئياً تبعثر إلكترونات القناة في طرف التركيب- المتغاير المُطعّم بشدة ويُزيد الحركية الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُباعد؛ إذ إن زيادة سماكة المُباعد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُباعد ومن ثمّ إلى تخفيض الكمون الكهرساكن الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُباعداً سميكاً يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني. (5)

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (30 درجة)

أولاً- النقل الإلكتروني الفردي:

افتراضنا في حالات النقل الإلكتروني العادي أنّ عدد الإلكترونات المُساهم في هذا النقل كبير جداً لدرجة أنّ الطبيعة الانفصالية للإلكترونات ليست ذات قيمة: إنّ هذا الافتراض لا يُعدّ صالحاً بعد الآن من أجل نبائط صغيرة تعمل بتيارات ضعيفة؛ وبدلاً منه طُوّر نوعٌ جديدٌ من النقل الإلكتروني المرتبط بالشحنة هو النقل بإلكترونٍ فردي؛ وفيما يلي المفاهيم الأساسية لنظام النقل هذا.

عموماً، إنّ الانفصال (التفرد) الإلكتروني في المواد شبه الحجمية والنبائط الماكروسكوبية لا يظهر في خصائصها المميزة الوسطية؛ كالكثافة الإلكترونية الموضعية، والتيار الكهربائي الكلي، الخ؛ غير أنه من المعلوم جيداً أنّ هذا الانفصال يُعلن عن نفسه من خلال مساهمته في ضجيج تيارٍ (ترجّحات) حتى من أجل عيّات ماركوسكوبية. فمثلاً ينتج ما يسمى الضجيج الطلّقي بسبب انفصال الشحنة الإلكترونية؛ إذ ينشأ بسبب عشوائية عملية دخول الإلكترونات النببطة. يزداد دور انفصال الشحنة لدى تخفيض أبعاد النبائط:

ففي حالة النبائط فائقة الصغر يؤدي انفصال الشحنة الإلكترونية إلى مفاعيل جديدة تماماً في ظاهرة النقل الإلكتروني؛ إذ يُصبح هذا النقل مترابطاً، أي أنّ انتقال إلكترون واحد عبر النببطة مرتبطاً بانتقال الإلكترونات الأخرى. ويظهر هذا الترابط بفضل التآثر الكولوني بين الإلكترونات الفردية؛

إنّ مفعول الإلكترون الفردي يعتمد على عملية شحنٍ تحدث لدى دخول الإلكترونات عيّنة ناقلة صغيرة جداً. فعندما تكون عيّنة ناقلة بالغة الصغر (تسمى جزيرة فلزية *Metallic Island* عادةً)، فإن الكمون الكهرساكن للجزيرة الفلزية يزداد بشكلٍ ملحوظٍ حتى لدى دخولها إلكترون واحد فقط؛ وبشكل عام، تساوي طاقة الشحن لعيّنة:

$$E_C = \frac{Q^2}{2C}, \quad (126-6)$$

حيث Q الشحنة و C سعة العيّنة.

ومن أجل جزيرة كروية نصف قطرها r يمكن أن تُقدّر السعة، C ، بالمساواة الآتية:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r. \quad (127-6)$$

فعلى سبيل المثال:

تملك جزيرة نصف قطرها $r = 10 \text{ nm}$ سعة من رتبة $10^{-17} \text{ F} = 10 \text{ aF}$ ، حيث F فاراد- وحدة قياس السعة، C .

وعندها، عند ازدياد الجهد، $\Delta\Phi$ (الذي يساوي e/C ، حيث $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ شحنة الإلكترون، تزداد الطاقة بمقدار، $\Delta E = e\Delta\Phi$ ، يبلغ القيمة 16 meV ، التي يمكن مقارنتها "بطاقة الضجيج الحراري" في درجة حرارة الغرفة، $k_B T \approx 26 \text{ meV}$.

فإذا انتقل إلكترون واحد إلى الجزيرة، فإن التدافع الكولوني يمنع الإلكترونات الأخرى من الدخول إليها ما لم يُخَفَّض كُمون الجزيرة قصداً من خلال تطبيق جهد انحياز خارجي؛ فإذا خُفِّض كُمون الجزيرة تدريجياً يُصبح بمقدور إلكترونات أخرى دخول الجزيرة إلكتروناتاً - إلكتروناتاً فقط وباستطاعة تبديد مهملة.

يمكننا تعريف نبیطة الإلكترون - الفردي بأنها تركيب نانوي بسعة صغيرة لدرجة أن إضافة إلكترون واحد إلى النبیطة تولد فيها تغير جهد يمكن قياسه. بمقدورنا وصف الخصائص الأساسية لنبائط الإلكترون الفردي على مثال "جملة فيزيائية بأبعاد خاصة"، مؤلفة من:

وصلة نفق عازلة، I ، تقع بين لبوسين ناقلين، M (هما مناطق نصف ناقلة مطعمة بشدة أو فلزات). لتكن هذه الوصلة موصوفة بالسعة، C ، والناقلية، G :

يمكننا فرض السعة متناسبة طردياً تقريباً مع المقطع - العرضي، S ، لهذه الوصلة. في هذه الحالة يفترض المقطع - العرضي الصغير سعة صغيرة. ثم إن ناقلية الوصلة، G ، تكون صغيرة بشكل كافٍ لدراسة الجملة كمكثفة تسريب.

لتكن لدى الجملة شحنة، Q ، ومن ثم عند تسرب إلكترون واحد عبر العازل، فإن حادثة كهذه تُغيِّر الشحنة الكهراكية الأولية فقط بمقدار الشحنة العنصرية، $e: (Q - e) \rightarrow Q$. ومن ثم تبعاً للمعادلة (6-126) الطاقة الكهراكية للوصلة تتغير بمقدار:

$$\Delta E_C = \frac{(Q - e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{e^2}{2C} - \frac{2Qe}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = -\frac{e(2Q - e)}{2C}$$

ويتغير فرق الكُمون بين الصفيحتين من القيمة $\Phi_1 = \frac{Q}{C}$ إلى القيمة $\Phi_2 = \frac{(Q - e)}{C}$

وعندها يؤدي انتقال الإلكترون الفردي إلى ترجح جهد بين طرفي الوصلة يساوي:

$$\Delta I = G \Delta \Phi$$

يمكن تقدير التيار المرتبط بنقل الإلكترون الفردي من الدراسات الوصفية الآتية:

تسمح علاقة الشك؛ $\Delta E \Delta t \geq h$ ، بين الطاقة والزمن بتقييم الحد الفاصل لزمن العبور بالنفق، τ_t ، من أجل الوصلة المدروسة:

$$\tau_t \geq \frac{h}{\Delta E_C}$$

وبدوره التيار الكهربائي؛ $I_t = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ المرتبط بانتقال إلكترون فردي بطريقة النفق ($\Delta Q = e$) و $\Delta t = \tau_t$

$$I_t \approx \frac{e}{\tau_t} \geq \frac{e^3}{2hC} \quad (\Delta E_C = -e^2/2C) \text{ يساوي:}$$

إذا فاق هذا التيار، I_t ، ترجحات التيار نفسه بسبب ترجحات الجهد، $\Delta \Phi$ ، وبوجه خاص، إذا $I_t \geq \Delta I = G \Delta \Phi = G \frac{e}{C}$

فإن عمليات نقل الإلكترون الفردي تضبط التيار الكهربائي المار في الوصلة وتتحكم به.

$$\frac{e^2}{h} \gg G \text{ المعيار (6-136)،}$$

نلاحظ أن القيمة في الطرف الأيسر من هذا المعيار تُطابق كم الناقلية، $G_0 \equiv e^2/h$ ، تماماً والذي تم الحصول عليه من علاقة لاندواير.

نستطيع بنتيجة هذا التحليل أن نضع قانوناً مفاده أنه إذا كانت الطاقة الكولونية لشحن النبیطة أكبر من الطاقة الحرارية، $k_B T$ ، وأن التيار، I ، المرتبط بنقل الإلكترون الفردي أكبر من ترجحات تيار التسرب، فإن النقل الإلكتروني يكون

متربطاً وتكون مفعولات الإلكترون الفردي ملحوظة ولها أهميتها. ويمكن صياغة معيار من أجل نقل الإلكترون الفردي هذا

$$G \ll \frac{e^2}{h} \quad \text{و} \quad C \ll \frac{e^2}{k_B T} \quad \text{بالشكل:}$$

أي أنّ سعة النبيلة وناقلية التّسرب الخاصة بها يجب أن تكونان صغيرتين.

10 - بمقدورنا الآن أن نناقش فيزياء نقل الإلكترون الفردي من خلال استعمال دائرة كهربائية يوضحها الشكل المجاور.

نفترض حالة، تكون فيها وصلة النفق في الدارة مشحونة بمصدر تيار، I_s .

■ انطلاقاً من عدم توافر شحنة إجمالية على صفيحتي المكثفة في لحظة البدء، يبدأ منبع التيار بشحن الوصلة ببطء.

■ من أجل معدّل شحن معطى وتدرجات زمنية قصيرة تكون الشحنة الإضافية على صفيحتي المكثفة أقل من الشحنة العنصرية؛ $Q < e$.

■ من المهم الإشارة هنا إلى أنه بمقدور صفائح ماكروسكوبية أن تتشحن بشحنة أقل من شحنة إلكترون فردي بإزاحة إلكترونات الناقلية في الصفائح بالنسبة لأيونات الشبكة البلورية الموجبة (أي بما يسمى استقطاب الشحنة).

■ عندما يشحن منبع التيار إحدى صفيحتي المكثفة بحيث تُصبح الشحنة عند هذه الصفيحة مساوية $+\frac{1}{2}e$ والشحنة على الصفيحة الأخرى $-\frac{1}{2}e$ ، فإنه ينشأ فرق شحنة بين الصفيحتين مقداره $1e$.

■ وعندها تبلغ الطاقة الكهراكدة للوصلة القيمة المشار إليها بالنقطة المصمتة Dot في الشكل المعطى في نص السؤال؛ وعندها بمقدور الشحنة $1e$ أن تعبر الوصلة بطريقة النفق، وفق السهم المنقط في الشكل المعطى.

■ إذن، قُبيل العبور النفقي كانت الشحنات الأولية على الصفائح مساوية $(+\frac{1}{2}e, -\frac{1}{2}e)$ ، في حين إنّ الشحنات عليها، بعد العبور بطريقة النفق، أصبحت تساوي $(-\frac{1}{2}e, +\frac{1}{2}e)$.

■ نرى من الشكل المعطى أنّ انتقال الشحنة لم يُغيّر طاقة الوصلة:

→ فعلياً، إنّ هيكليتي الشحنتين متطابقتان، وبسبب ذلك، لا شيء بمقدوره إيقاف الإلكترون ويمنعه من النفق عبر الوصلة عائداً إلى موضعه الأولي (أي حالته الطاقية الأولى)، وهكذا دواليك.

→ غير أنّ منبع التيار يستمر بشحن الصفيحتين ويُصبح العبور النفقي للإلكترون المشار إليه، في الشكل المعطى، بالسهم المتصل مفضلاً طاقياً (يُصبح المقدار ΔE_C سالباً)، وغير مفضل طاقياً من أجل عبوره النفقي في الاتجاه المعاكس ليعود إلى صفيحته الأولية.

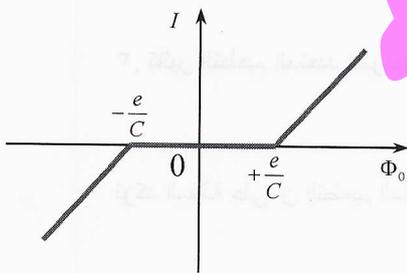
■ بهذه الطريقة، نحصل في حقيقة الأمر على عبور نفقي لإلكترون فردي

وجملة (فلز - عازل - فلز) تبدأ بتكديس الشحنة بغرض تأمين العبور النفقي

للإلكترون اللاحق - هذا العبور الذي يجري بعد انقضاء برهة من الزمن. إنّ

نجاح حوادث عبور الإلكترون بطريقة النفق يعني أن التدفق الإلكتروني

متربط بشدة. 8



يوضح الشكل المعطى كل حوادث العبور النفقي التي تمت مناقشتها أعلاه تخطيطياً.

يمكننا أن نرى من الدراسات القائمة على المعادلة $\Delta E_C = -\frac{e(2Q-e)}{2C}$ ، أنّ أيّ انتقال إلكتروني يكون ممنوعاً

(فالمقدار ΔE_C موجب من أجل هكذا شحنة، Q)، إذا كانت الشحنة الأولية للمكثفة صغيرة، $-\frac{1}{2}e < Q < \frac{1}{2}e$. يسمى هذا

المفعول الفيزيائي حصاراً كولونياً: إذن، إذا تحقق الشرطان المذكوران، فإن طاقة الشحن تؤدي دوراً حاسماً في الجملة، ويكون عبور الإلكترون بطريقة النفق غير مفضل طاقياً، وفي درجة الحرارة المنخفضة يكون العبور بالنفق غير مسموح على الإطلاق (إذا كان محاصراً). هذا كله يقودنا إلى الحصول على صفة مميزة (تيار - جهد) نوعية يوضحها الشكل المجاور. السمة الرئيسية تمثل هذه الصفة المميزة تكمن في سحق التيار تماماً في مجالٍ محدودٍ لانحيات الجهد الخارجية، $-e/C < \Phi_0 < +e/C$.

توزيع العلامة على جواب السؤال البديل للعملي: (10) درجات

من أجل الجملة 3D: $E(\vec{k}) = E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$ وتكون الحركة الإلكترونية في بلورة حجمية حرة في الأبعاد الثلاثة، (3)

من أجل الجملة 2D: $E_{l_3}(\vec{k}_{||}) = \varepsilon_{l_3} + \frac{\hbar^2 k_{||}^2}{2m^*}$ وتكون الحركة الإلكترونية في بئر كمومية حرة في بعدين حرة ومقيدة في البعد

الثالث وفق ثخانة البئر، (4)

ومن أجل الجملة 1D: $E_{l_2, l_3}(k_x) = \varepsilon_{l_2, l_3} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$ وتكون الحركة الإلكترونية في سلك كمومي مقيدة ببعدين وحررة في البعد

الثالث على طول محور السلك. (3)

أستاذ المر
أ. د. هادي الحام

السؤال الأول: (30 درجة)

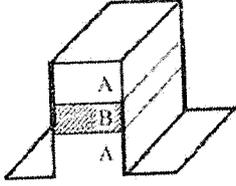
إن التحكم بمقاومة التراكيب المتغايرة الفردية ضروري للحصول على نبائط مفيدة؛ والمطلوب:

أولاً- دراسة احتمالية تغير الناقلية الكهربائية لوصلة فردية متغايرة محجوبة عن طريق ضبط التركيز الإلكتروني.

ثانياً- شرح آلية التوصيل في الحالة العادية Normally-on وآلية الفصل في الحالة العادية Normally-off موضحاً إجابتك بالرسم. ثالثاً- شرح كيفية التحكم بناقلية نبائط جريان الناقلية الكهربائية وتوضيح أهمية تشكل المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة. رابعاً- شرح تأثير سماكة المبعاد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثاني (30 درجة)

يوضح الشكل المرافق سلكاً كمومياً مصنوعاً من $B(\text{AlGaAs})/\text{A}(\text{GaAs})$ بطريقة التمشيش والإزالة،
والمطلوب:



أولاً- اشرح آلية النقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية من أجل السلك المذكور أعلاه كمثال. ارسم نابعية الناقلية، G ، لجهد البوابة، V_g ، للسلك الكمومي المدروس من أجل سبعة أطوال مختلفة. ماذا تستنتج؟

ثانياً- اشرح آلية حدوث النقل الإلكتروني في الأنابيب الكربونية المعلقة وغير المعلقة موضحاً نتائج قياسات المنحني المميز (جهد- تيار) الموافقة لها بالرسم.

السؤال الثالث: (30 درجة)

أولاً- اشرح مبدأ عمل الديودات التبددية ذات التراكيب النانوية القصيرة بإيجاز موضحاً طبيعة النقل الإلكتروني فيها ثم اكتب علاقة كثافة التيار الموافقة له (علاقة موت- غيرني)؛ ثانياً- اشرح مبدأ عمل الديود الباليستي بإيجاز واطب علاقة كثافة التيار الموافقة له (علاقة تشايلد) ثم اذكر الفرق بينه وبين الديود التبددي.

ثالثاً- اكتب علاقة الزمن الوسطي للنقل الإلكتروني عبر الديودين التبددي والباليستي مع شرح ما يلزم ثم أوجد نسبة أحدهما إلى الآخر بدلالة المسار الحر الوسطي الأعظمي l_e والسرعة الإلكترونية؛ ناقش العلاقة التي تحصل عليها. ماذا تستنتج؟ القصوى.

بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2025/02/26

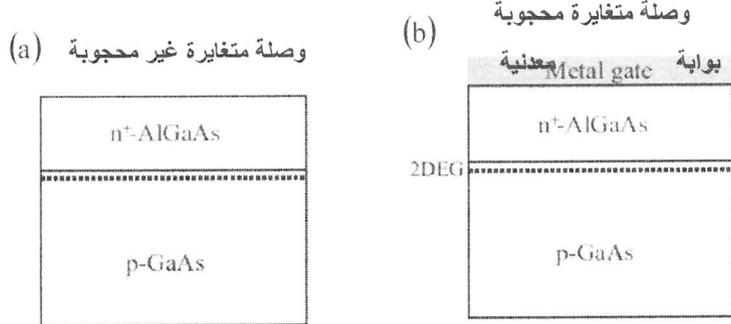
مدرس المقرر
أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

أولاً: ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبة تسمى باختصار وصلة متغايرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً ونقارنها مع الشكل (a) الذي يُظهر وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة.

الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - AlGaAs$ في التركيب المحجوب:

تسمى هذه الجملة المولفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب MES.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعدُّ تراكيب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النبايط، لأن هذه المواد لا تحوي أكسيداً طبيعياً مستقراً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النبايط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكيب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكيب إلى ما يسمى بتراكيب شوتكي المحجوبة.



يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-النشغل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو 0.8 V.

وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.

ثانياً: يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من $M/AlGaAs/GaAs$ بسماكتين للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُباعِدٌ غير مُطعَمٍ يفصل المنطقة المُطعَمة، من النوع-n، عن الوصلة:

- إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،
- أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 Å وأكثر.
- وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل $AlGaAs/GaAs$ وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛

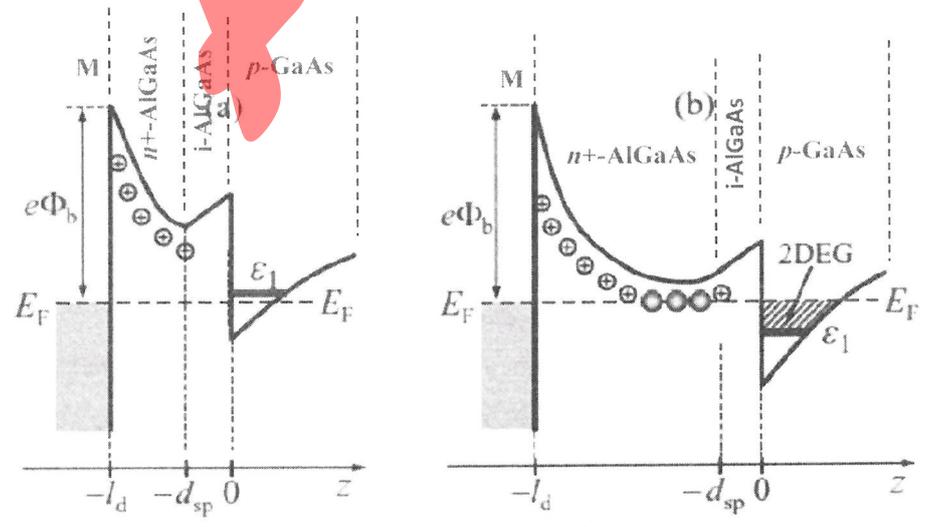
→ تكون هنا طبقة الـ $n^+ - AlGaAs$ رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمومية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقة جزئية.

→ ومن ثمّ لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغاير يساوي الصفر على الأغلب.

→ فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعَمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء - نصف الناقلية - من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.

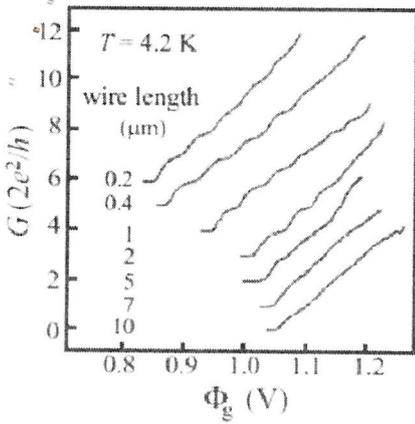
→ ومن أجل تشغيل ناقلية النبيطة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

تشكل



آلية
 نبايط

- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكل بين طرفي طبقة AIGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة-جزئية وتسكن الإلكترونات القناة من دون انحياز بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AIGaAs سميكة كافية؛ أكبر من 600 \AA .



- وبهذه الطريقة يمكن، في نباتات تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية - Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيلة إلى حالة فصل (أي إلى قفل) off.

ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغيرة يؤدي إلى تشكل حقول كهرساكن ناتجة من إعادة توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_F ثابتاً عبر المواد المتماصة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكل بنر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماصة.

- رابعاً- يُعدُّ المُباعِدُ عنصراً مهماً للتركيب متغيرة- التطعيم، لأنه يمنع جزئياً تبعثر الإلكترونات القناة في طرف التركيب- المتغير المُطعم بشدة ويزيد الحركة الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُباعِد؛ إذ إن زيادة سماكة المُباعِد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُباعِد ومن ثمّ إلى تخفيض الكمون الكهرساكن الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُباعداً سميكا يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (30 درجة)

- يوضح الشكل المرافق سلكاً كمومياً مصنوعاً من B(AIGaAs)/A(GaAs) بطريقة التنميش والإزالة، والمطلوب:
 - أولاً- اشرح آلية النقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية من أجل السلك المذكور أعلاه كمثال. ارسم تابعة الناقلية، G ، لجهد البوابة، V_g ، للسلك الكمومي المدروس من أجل سبعة أطوال مختلفة. ماذا تستنتج؟
 - ثانياً- اشرح آلية حدوث النقل الإلكتروني في الأنابيب الكربونية المعلقة وغير المعلقة موضحاً نتائج قياسات المنحني المميز (جهد- تيار) الموافقة لها بالرسم.
- أولاً- ترتبط الصفات المميزة الرئيسية للنقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية بتكمية لاندواير للناقلية. إذ يمكن رصد هذه التكمية في التراكيب السلكية المثالية في درجات الحرارة المنخفضة؛
 - وتم تقدير عدد الإلكترونات عند السطح الفاصل المتغير- المُطعم انتقائياً AIGaAs/GaAs، قُبيل عملية التنميش والإزالة، بكثافة بلغت نحو $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ وبحركية عالية تراجعت قيمها في المجال $(1-2) \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
 - في درجة الحرارة المنخفضة، 4 K ، يتحلل الغاز الإلكتروني ويُقدَّر المسار الحر الوسطي للإلكترونات ذوات الطاقات المساوية لطاقة فيرمي بالقيم الواقعة في المجال $(10-20) \mu\text{m}$ ؛
 - ومن ثمّ، من المتوقع تكمية لاندواير (الناقلية G تساوي عدداً صحيحاً من $2e^2/h$) من أجل الأسلاك الكمومية التي تم تصنيعها بأطوال أقل من $10 \mu\text{m}$.
 - وللتحكم بعصابات الطاقة الجزئية الأحادية البعد في الأسلاك الكمومية تم ترسيب بوابة ألنسيوم بطريقة التبخير أعلى التركيب ثم طُبِقَ جهد عليها غير كمون الحصر وطاقات العصابات الجزئية.
 - يوضح الشكل المجاور النتائج التي تم الحصول عليها من أجل أطوال مختلفة لسلك كمومي (من $0.2 \mu\text{m}$ إلى $10 \mu\text{m}$) حيث تبرز تكمية الناقلية بوضوح من أجل الأسلاك التي تقل أطوالها عن $5 \mu\text{m}$. إذ تظهر في الناقلية حتى العشر "دُرَجَات"؛ أي أنه يمكن رصد نحو عشر عصابات طاقة جزئية ببعد واحد من خلال تغيير جهد البوابة.
 - فضلاً عن أن التجارب التي أجريت بوجود حقل مغنطيسي وتغيير درجة الحرارة أظهرت مفعول التكمية وسمحت بتحديد تركيز الإلكترونات ببعد واحد؛ فقد وجدت تراكيز إلكترونية بلغت $n_{ID} = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ وتباعداً بين العصابات الطاقية الجزئية بلغ $\Delta E_{1,2} \approx 12.5 \text{ meV}$ وهي قيم نموذجية؛

→ فالتباعد بين العصابات الجزئية الكبير نسبياً والمكافئ لدرجة الحرارة 140 K تقريباً يفترض ألا يتغير السلوك الأحادي البعد للحركة الإلكترونية حتى في درجات الحرارة التي تكون من رتبة بضعة عشرات كلفن.

4

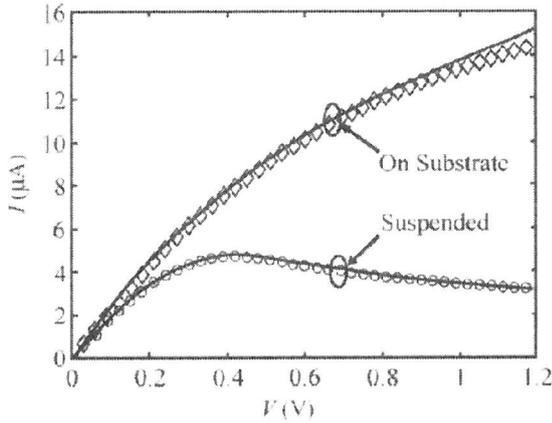
→ أما من أجل درجات الحرارة الأعلى التي تصبح عندها الحركة الإلكترونية شبه تقليدية، فإن خصائص الناقلية الكهربائية لأسلاك كمومية، قوامها تراكيب متغايرة نصف ناقلة، تشابه تلك الخصائص للبر الكمومية وحتى المواد شبه الحجمية الصرفة.

→ إذن، ثمة أسلاك كمومية مُطعّمة انتقائياً سئبدي حركيات إلكترونية عالية بوجود حقول كهربائية منخفضة وسرعات انسياق عالية تمتاز بها الإلكترونات الحارة بوجود الحقول الكهربائية العالية.

ثانياً- إن الوضع مختلف تماماً عند حدوث النقل الإلكتروني في الأنابيب الكربونية؛

● فعند وجود حقول عالية يمكن أن تبلغ سرعات الانسياق الإلكتروني قيمة تقع في المجال $(2-4) \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ وهي أعلى من سرعات الانسياق في المركبات المثالية الناقلة III-V.

● غير أن الخصائص الكهربائية تتأثر بشدة بالوسط المحيط الذي يكمن تأثيره في إزالة كمية من الحرارة من الأنابيب النانوية الحاملة للتيار الكهربائي: فعلى سبيل المثال، هناك أنابيب نانوية معلقة تُبدي نقلاً إلكترونياً مختلفاً تماماً عن ذلك النقل الذي تُبديه تلك الأنابيب النانوية المترسبة على ركائز:



يظهر الشكل المبين أدناه نتائج قياسات المنحني المميز (جهد-تيار) من أجل مقاطع معلقة وأخرى غير معلقة لأنابيب نانوية بطول $3 \mu\text{m}$ وأقطار من 2 nm إلى 3 nm ، وذلك في درجة حرارة الغرفة في الخلاء؛ حيث يمكن رؤية أن المقطع الموافق لأنبوب نانوي غير معلق يُظهر زيادة رتبية في التيار حتى نحو $20 \mu\text{A}$ عند زيادة الجهد، V ، في حين يبلغ التيار في أنبوب معلق قيمة قصوى تساوي نحو $5 \mu\text{A}$ يليها هبوط واضح للتيار.

إن هذا الاختلاف المُلفت للنظر ناجم من مفاعيل التسخين-الذاتي الكبير للأسلاك الكمومية التي تجري فيها تيارات كهربائية بكثافات عالية للغاية؛ فعلياً، في حالة الأنبوب المعلق لا يمكن إزالة حرارة جول بفعالية، لأن التدفقات الحرارية ممكنة فقط عبر تماسات الأنبوب النانوي، وبالنتيجة ترتفع درجة حرارة الأنبوب، لاسيما في منطقة الوسط (أي في مركزه).

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (30 درجة) أولاً- تُعدّ الحركية صفة مميزة للمادة الناقلة المنتظمة؛ إذ أن الحقل الكهربائي في عينة، بُعدها الممتد L_x مثلاً، يكون منتظماً على الأغلب، ويمكن تقييمه من العلاقة $F = \Phi_0 / L_x$ حيث $\Phi_0 = \Phi(x = L_x)$ هو الجهد المطبق على العينة؛ فالحركية تُحدّد بصورة أساسية المقاومة الكهربائية والتيار الكهربائي وفقاً للمعادلة $I = \Phi_0 / R$.

في العينات القصيرة ثمة مفعول كهربائي آخر يمكن أن يسهم في النقل الإلكتروني والتيار الكهربائي بشكل كبير جداً. ينشأ هذا المفعول بسبب إعادة التوزع اللامنظم للإلكترونات، ومن ثمّ إعادة توزع الشحنة الكهربائية بين طرفي العينة القصيرة. فالشحنة المتحرّضة بالتيار (تيار حقن الإلكترونات من باعث الديود نحو قاعدته) تؤثر على توزع الكمون على طول العينة جاعلةً هذا التوزع شديد عدم الانتظام ومرتبباً بالتيار ارتباطاً وثيقاً؛ وبنسبة ذلك، لم تُعدّ تابعة التيار الكلي للجهد المطبق خطية؛ يسمى النقل الإلكتروني في هذا النظام المحدود بالشحنة الفراغية. تأخذ علاقة موت-غيرني الشكل

$$J_0 \equiv J_{0,d} = \frac{9 \epsilon_0 \epsilon \mu \Phi_0^2}{8 L_0^3}$$

حيث μ الحركية المميزة من أجل قاعدة الديود غير المُطعّمة، و L_0 طول الديود، و $\epsilon_0 \epsilon$ ثابت العزل الكهربائي.

إذن، الخاصية المميزة (أمبير-جهد) ليست خطية ($J_0 \sim \Phi_0^2$) تماماً بسبب مفعول الشحنة الفراغية.

ثانياً- اشرح مبدأ عمل الديود الباليستي بايجاز واكتب علاقة كثافة التيار الموافقة له (علاقة تشايلد) ثم اذكر الفرق بينه وبين الديود التبددي.

يحدث النظام الباليستي التقليدي بدون تصادم في العينات القصيرة جداً وذلك تبعاً للشرط $l_e > L_x$ ، أي عندما المسار الحر الوسطي للإلكترونات أكبر من طول الديود الباليستي، حيث لا تتعرض الإلكترونات أثناء طيرانها لأي تبعثر؛ فقيمتا التيار

والمقاومة الكهربائية المحدودين يحدثان في حالة كهذه - بصورة استثنائية- بسبب مفاعيل الشحنة الفراغية. وتأخذ علاقة تشايد الشكل

$$J_{0,b} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{\epsilon_0 \epsilon}{L_x^2} \sqrt{\frac{2e}{m^*}} \Phi_0^{3/2},$$

حيث m^* الكتلة الفعالة للإلكترون.

ثالثاً- زمن انتقال الإلكترونات عبر الديود التبددي:

$$t_{tr,d} = \frac{4}{3} t_{0,d} = \frac{4}{3} \frac{L_x^2}{\mu \Phi_0}$$

$$t_{tr,b} = \frac{3}{2} t_{0,b}, \quad t_{0,b} = L_x \sqrt{\frac{2m^*}{e\Phi_0}},$$

حيث $t_{0,b}$ زمن انتقال الإلكترونات المقذوفة بغياب مفعول الشحنة- الفراغية؛ إذ يُزيد هذا المفعول زمن انتقال الإلكترونات، $t_{tr,b}$ ، بمقدار العامل $3/2$. ومن ثم

$$\frac{t_{tr,b}}{t_{tr,d}} = \frac{9 \sqrt{m^* \Phi_0} \mu}{4 \sqrt{2e} L_x} = \frac{9 \tau_c \sqrt{e\Phi_0}}{4 \sqrt{2m^*} L_x} = \frac{9 l_e}{8 L_x} \ll 1,$$

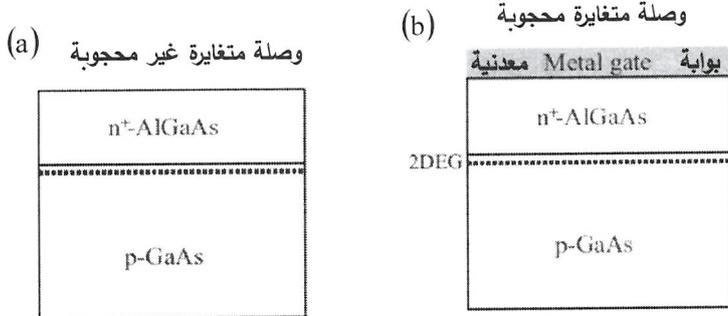
حيث $\mu = e\tau_c / m^*$ و $l_e = \tau_c v_m$ المسار الحر الوسطي الأعظمي، و $v_m = \sqrt{2e\Phi_0 / m^*}$ السرعة الإلكترونية القصوى:

- إن النسبة التي تم الحصول عليها صغيرة القيمة وتنسجم مع شرط النقل التبددي، الممثل بالشرط $L_x \gg l_e$. وهذا يعني أن الديودات الباليستية تستطيع تأمين منظومات عمل أسرع بكثير من تلك التي يمكن أن تؤمنها الديودات التبددية.
- وبشكل مشابه، يمكن أن نجد، أنه من أجل انحياز كهربائي معطى، تكون التيارات في الديود الباليستي أكبر بكثير منها في الديود التبددي:

$$\frac{J_{0,b}}{J_{0,d}} = \frac{8}{9} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{L_x}{l_e} \gg 1.$$

ولهذا السبب، يتصف النقل الإلكتروني الأعظمي- الخالي من التصادمات بعدد من المزايا يتفوق فيها على النقل الإلكتروني التبددي، وذلك، بفضل سرعة الإلكترونات الأعلى في النقل الباليستي.

أولاً- ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبة تسمى باختصار وصلة متغايرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً ونقارنها مع الشكل (a) الذي يُظهر وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة.



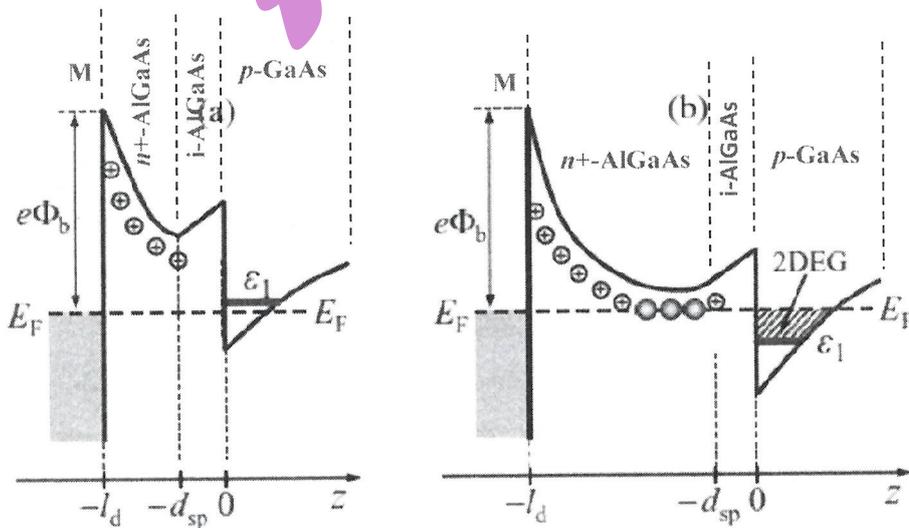
الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحازر $n^+ - AlGaAs$ في التركيب المحجوب: تسمى هذه الجملة المؤلفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب MES.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعد تراكييب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النانوط، لأن هذه المواد لا تحوي أكسيداً طبيعياً مستقراً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النانوط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكييب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكييب إلى ما يسمى بتراكيب شوتكي المحجوبة.

- يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-التشكل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو 0.8 V.
- وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.

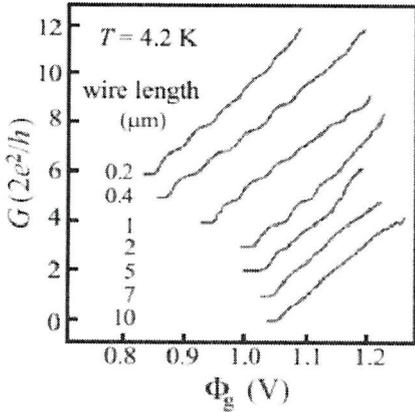
ثانياً- يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من $M/AlGaAs/GaAs$ بسماكتين للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُبعدٌ غير مُطعمٍ يفصل المنطقة المُطعمّة، من النوع-n، عن الوصلة:

- إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،
- أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 Å وأكثر.
- وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل $AlGaAs/GaAs$



وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛

→ تكون هنا طبقة الـ n^+ - AlGaAs رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمونية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقة جزئية.



→ ومن ثم لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغير يساوي الصفر على الأغلب.

→ فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء - نصف الناقلية - من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.

→ ومن أجل تشغيل ناقلية النبيتة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

آلية تشكل نبائط Normally-on:

- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكل بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة-جزئية وتساكن الإلكترونات القناة من دون انحياز بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AlGaAs سميكة كفاية؛ أكبر من 600 \AA .
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيتة إلى حالة فصل (أي إلى قفل) off.

ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغيرة يؤدي إلى تشكّل حقول كهروستاتيكية ناتجة من إعادة توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_F ثابتاً عبر المواد المتماصة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكّل بئر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماصة.

رابعاً- يُعدّ المُبعد عنصراً مهماً للتركيب متغيرة- التطعيم، لأنه يمنع جزئياً تبعثر إلكترونات القناة في طرف التركيب-المتغير المُطعّم بشدة ويزيد الحركة الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُبعد؛ إذ إن زيادة سماكة المُبعد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُبعد ومن ثمّ إلى تخفيض الكمون الكهروستاتيكي الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُبعداً سميكاً يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (30 درجة)

يوضح الشكل المرافق سلكاً كمومياً مصنوعاً من $B(\text{AlGaAs})/A(\text{GaAs})$ بطريقة التتميش والإزالة، والمطلوب:
أولاً- ترتبط الصفات المميزة الرئيسية للنقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية بتكمية لاندواير للناقلية. إذ يمكن رصد هذه التكمية في التركيب السلكية المثالية في درجات الحرارة المنخفضة؛

- وتم تقدير عدد الإلكترونات عند السطح الفاصل المتغير - المُطعّم انتقائياً $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ، قُبيل عملية التتميش والإزالة، بكثافة بلغت نحو $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ وبحركية عالية تأرجحت قيمها في المجال $(1-2) \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
- في درجة الحرارة المنخفضة، 4 K، يتحلل الغاز الإلكتروني ويُقدّر المسار الحر الوسطي للإلكترونات ذوات الطاقات المساوية لطاقة فيرمي بالقيم الواقعة في المجال $(10-20) \mu\text{m}$ ؛

○ ومن ثم، من المتوقع تكمية لاندواير (الناقلية G تساوي عدداً صحيحاً من $2e^2/h$) من أجل الأسلاك الكمومية التي تم تصنيعها بأطوال أقل من $10 \mu\text{m}$.

○ وللتحكم بعصابات الطاقة الجزئية الأحادية البعد في الأسلاك الكمومية تم ترسيب بوابة ألومنيوم بطريقة التبخير أعلى التركيب ثم طُبق جهد عليها غير كمون الحصر وطاقت العصابات الجزئية.

○ يوضح الشكل المجاور النتائج التي تم الحصول عليها من أجل أطوال مختلفة لسلك كمومي (من $0.2 \mu\text{m}$ إلى $10 \mu\text{m}$) حيث تبرز تكمية الناقلية بوضوح من أجل الأسلاك التي تقل أطوالها عن $5 \mu\text{m}$. إذ تظهر في الناقلية حتى العشر "تُرَجَّات"؛ أي أنه يمكن رصد نحو عشر عصابات طاقة جزئية ببعد واحد من خلال تغيير جهد البوابة.

○ فضلاً عن أن التجارب التي أجريت بوجود حقل

مغناطيسي وتغير درجة الحرارة أظهرت مفعول التكمية وسمحت بتحديد تركيز الإلكترونات ببعد واحد؛ فقد وجدت تراكيز إلكترونية بلغت $n_{\text{ID}} = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ وتباعداً بين العصابات الطاقية الجزئية بلغ $\Delta\epsilon_{1,2} \approx 12.5 \text{ meV}$ وهي قيم نموذجية؛

→ فالتباعد بين العصابات الجزئية الكبير نسبياً والمكافئ لدرجة الحرارة 140 K تقريباً يفترض ألا يتغير السلوك الأحادي البعد للحركة

الإلكترونية حتى في درجات الحرارة التي تكون من رتبة بضع عشرات كلفن.

→ أمّا من أجل درجات الحرارة الأعلى التي تصبح عندها الحركة الإلكترونية شبه تقليدية، فإن خصائص الناقلية الكهربائية لأسلاك كمومية، قوامها تراكيب متغايرة نصف ناقلة، تشابه تلك الخصائص للبنى الكمومية وحتى المواد شبه الحجمية الصرفة.

→ إذن، ثمة أسلاك كمومية مُطعّمة انتقائياً سبدي حركيات إلكترونية عالية بوجود حقول كهربائية منخفضة وسرعات انسياق عالية تمتاز بها الإلكترونات الحارة بوجود الحقول الكهربائية العالية.

ثانياً- إن الوضع مختلف تماماً عند حدوث النقل الإلكتروني في الأنابيب الكربونية؛

● فعند وجود حقول عالية يمكن أن تبلغ سرعات الانسياق الإلكتروني قيمة تقع في المجال $(2-4) \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ وهي أعلى من سرعات الانسياق في المركبات المثالية النصف الناقلية III-V.

● غير أن الخصائص الكهربائية تتأثر بشدة بالوسط المحيط الذي يكمن تأثيره في إزالة كمية من الحرارة من الأنابيب النانوية الحاملة للتيار الكهربائي: فعلى سبيل المثال، هناك أنابيب نانوية معلقة تُبدي نقلاً إلكترونياً مختلفاً تماماً عن

ذلك النقل الذي تُبديه تلك الأنابيب النانوية المترسبة على ركائز:

يظهر الشكل المبين أدناه نتائج قياسات المنحني المميز (جهد-تيار) من أجل مقاطع معلقة وأخرى غير معلقة لأنابيب نانوية بطول $3 \mu\text{m}$ وأقطار من 2 nm إلى 3 nm ، وذلك في درجة حرارة الغرفة في الخلاء؛ حيث يمكن رؤية أن المقطع الموافق لأنبوب نانوي غير معلق يُظهر زيادة رتيبة في التيار حتى نحو $20 \mu\text{A}$ عند زيادة الجهد، V ، في حين يبلغ التيار في أنبوب معلق قيمة قصوى تساوي نحو $5 \mu\text{A}$ يليها هبوط واضح للتيار.

إن هذا الاختلاف المُلفت للنظر ناجمٌ من مفاعيل التسخين - الذاتي الكبير للأسلاك الكومومية التي تجري فيها تيارات كهربائية بكثافات عالية للغاية؛ فعلياً، في حالة الأنبوب المُعلّق لا يمكن إزالة حرارة جول بفعالية، لأن التدفقات الحرارية ممكنة فقط عبر تماسات الأنبوب النانوي، وبالنتيجة ترتفع درجة حرارة الأنبوب، لاسيما في منطقة الوسط (أي في مركزه).

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (30 درجة)

أولاً- تُعدُّ الحركية صفة مميزة للمادة الناقلة المنتظمة؛ إذ أن الحقل الكهربائي في عينة، بُعدها الممتد L_x مثلاً، يكون منتظماً على الأغلب، ويمكن تقييمه من العلاقة $F = \Phi_0/L_x$ حيث $\Phi_0 = \Phi(x = L_x)$ هو الجهد المطبّق على العينة؛ فالحركية تُحدّد بصورة أساسية المقاومة الكهربائية والتيار الكهربائي وفقاً للمعادلة $I = \Phi_0/R$.

في العينات القصيرة ثمة مفعول كهربائي آخر يمكن أن يُسهم في النقل الإلكتروني والتيار الكهربائي بشكلٍ كبير جداً. ينشأ هذا المفعول بسبب إعادة التوزع اللامتظم للإلكترونات، ومن ثمّ إعادة توزع الشحنة الكهربائية بين طرفي العينة القصيرة. فالشحنة المتحرّضة بالتيار (تيار حقن الإلكترونات من باعث الديود نحو قاعدته) تؤثر على توزع الكمون على طول العينة جاعلةً هذا التوزع شديد عدم الانتظام ومرتبباً بالتيار ارتباطاً وثيقاً؛ وبنتيجة ذلك، لم تُعدّ تابعة التيار الكلي للجهد المطبّق خطية؛ يسمى النقل الإلكتروني في هذا النظام النقل المحدود بالشحنة الفراغية.

تأخذ علاقة موت- غيرني الشكل

$$J_0 \equiv J_{0,d} = \frac{9 \epsilon_0 \epsilon \mu \Phi_0^2}{8 L_0^3},$$

حيث μ الحركية المميزة من أجل قاعدة الديود غير المُطعّمة، و L_0 طول الديود، و $\epsilon_0 \epsilon$ ثابت العزل الكهربائي.

إذن، الخاصية المميزة (أمبير - جهد) ليست خطية ($J_0 \sim \Phi_0^2$) تماماً بسبب مفعول الشحنة الفراغية.

ثانياً- يحدث النظام الباليستي التقليدي بدون تصادم في العينات القصيرة جداً وذلك تبعاً للشرط $l_e > L_x$ ، أي عندما المسار الحر الوسطي للإلكترونات أكبر من طول الديود الباليستي، حيث لا تتعرّض الإلكترونات أثناء طيرانها لأي تبعثر؛ فقيمتا التيار والمقاومة الكهربائيتين المحدودين يحدثان في حالة كهذه - بصورة استثنائية- بسبب مفاعيل الشحنة الفراغية. وتأخذ علاقة تشايلد الشكل

$$J_{0,b} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{\epsilon_0 \epsilon}{L_x^2} \sqrt{\frac{2e}{m^*}} \Phi_0^{3/2},$$

حيث m^* الكتلة الفعّالة للإلكترون.

ثالثاً- اكتب علاقة الزمن الوسطي للنقل الإلكتروني عبر الديودين التبددي والباليستي مع شرح ما يلزم ثمّ أوجد نسبة أحدهما

إلى الآخر بدلالة المسار الحر الوسطي الأعظمي l_e والسرعة الإلكترونية؛ ناقش العلاقة التي تحصل عليها. ماذا تستنتج؟.

زمن انتقال الإلكترونات عبر الديود التبددي:

$$t_{tr,d} = \frac{4}{3} t_{0,d} = \frac{4}{3} \frac{L_x^2}{\mu \Phi_0}$$

$$t_{tr,b} = \frac{3}{2} t_{0,b}, \quad t_{0,b} = L_x \sqrt{\frac{2m^*}{e \Phi_0}},$$

حيث $t_{0,b}$ زمن انتقال الإلكترونات المقذوفة بغياب مفعول الشحنة- الفراغية؛ إذ يُزيد هذا المفعول زمن انتقال الإلكترونات، $t_{tr,b}$ ، بمقدار العامل $3/2$.
ومن ثمَّ

$$\frac{t_{tr,b}}{t_{tr,d}} = \frac{9\sqrt{m^*\Phi_0}\mu}{4\sqrt{2e}L_x} = \frac{9\tau_e\sqrt{e\Phi_0}}{4\sqrt{2m^*}L_x} = \frac{9l_e}{8L_x} \ll 1,$$

2

حيث $l_e = \tau_e v_m$ و $\mu = e\tau_e/m^*$ المسار الحر الوسطي الأعظمي، و $v_m = \sqrt{2e\Phi_0/m^*}$ السرعة الإلكترونية القصوى:
 • إن النسبة التي تم الحصول عليها صغيرة القيمة وتتسجم مع شرط النقل التبددي، الممثل بالشرط $L_x \gg l_e$. وهذا يعني أنَّ الديودات الباليستية تستطيع تأمين منظومات عمل أسرع بكثير من تلك التي يمكن أن تؤمنها الديودات التبددية.
 • وبشكل مشابه، يمكن أن نجد، أنه من أجل انحياز كهربائي معطى، تكون التيارات في الديود الباليستي أكبر بكثير منها في الديود التبددي:

$$\frac{J_{0,b}}{J_{0,d}} = \frac{8}{9} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{L_x}{l_e} \gg 1.$$

4

ولهذا السبب، يتصف النقل الإلكتروني الأعظمي- الخالي من التصادمات بعددٍ من المزايا يتفوق فيها على النقل الإلكتروني التبددي، وذلك، بفضل سرعة الإلكترونات الأعلى في النقل الباليستي.

أستاذة العز

السؤال الأول: (30 درجة)

تبيّن لدى دراستنا للأطوال الإلكترونية الأساسية في الأجسام الصلبة أنّ الطول المميز في الجسم الصلب المتبلور هو ثابت الشبكة البلورية a_0 ولكن المقاييس ذات الصلة بحاملات الشحنة عادةً ما تكون أكبر بكثير من a_0 ثم إنّ الطول الأكثر أهمية للإلكترون متوقّف في جسم صلب هو طول موجة دوبروي؛ والمطلوب:

أولاً- كيف يكون طول موجة دوبروي من أجل إلكترون في تركيب نانوي نصف ناقل؛ وضّح العلاقة التي تربط بينه وبين طاقة الإلكترون والكتلة الفعّالة ودرجة حرارة الوسط المحيط مع المناقشة والرسم.

ثانياً- كيف يمكن التمييز بين الحالات ثلاثية البعد 3D وثنائية البعد 2D وإحادية البعد 1D وصفرية البعد 0D تبعاً لأبعاد الجملة المدروسة النصف ناقلة $(L_x; L_y; L_z)$ مع شرح ما يلزم. وضّح هذه الفكرة بالتفصيل.

ثالثاً- اذكر الأسباب التي تجعل حاملات الشحنة تفقد سلوكها الشبيه بالموجة وأشرحها بإيجاز بما لا يتجاوز خمسة أسطر.

السؤال الثاني- أجب على أحد السؤالين الآتيين A أو B: (30 درجة)

A- أولاً- اكتب علاقات الطيف الطاقي المتماثل المنحني للإلكترونات لجملة إلكترونية واقعة في درجات حرارة منخفضة $(T \rightarrow 0)$ عندما تكون الجملة المدروسة 3D و 2D و 1D مع شرح ما يلزم (ماذا تستنتج؟).

ثانياً- اكتب علاقات كثافة الحالات الطاقية من أجل جملة إلكترونية 3D و 2D و 1D و 0D (ماذا تستنتج؟) ثمّ رسم المنحنيات

البيانية الموافقة لها مع ذكر التسميات عليها بشكل واضح مع شرح ما يلزم.

B- يوضح الشكل المرافق سلماً كمومياً مصنوعاً من B(AIGaAs)/A(GaAs) بطريقة التتميش والإزالة، والمطلوب:

أولاً- اشرح آلية النقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية من أجل السلك المذكور أعلاه كمثال. ارسم تابيعية الناقلية، G ، لجهد البوابة، V_g ، لسلك الكمومي المدروس من أجل سبعة أطوال مختلفة. ماذا تستنتج؟.

ثانياً- اشرح آلية حدوث النقل الإلكتروني في الأنابيب الكربونية المعلّقة وغير المعلّقة موضحاً نتائج قياسات المنحني المميز (جهد- تيار) الموافقة لها بالرسم.

السؤال الثالث: (30 درجة)

أولاً- اشرح مبدأ عمل الديودات التبددية ذات التراكيب النانوية القصيرة بإيجاز موضحاً طبيعة النقل الإلكتروني فيها ثمّ اكتب علاقة كثافة التيار الموافقة له (علاقة موت- غيرني)؛ ثانياً- اشرح مبدأ عمل الديود الباليستي بإيجاز وكتب علاقة كثافة التيار الموافقة له (علاقة تشايد) ثمّ اذكر الفرق بينه وبين الديود التبددي.

ثالثاً- اكتب علاقة الزمن الوسطي للنقل الإلكتروني عبر الديودين التبددي والباليستي مع شرح ما يلزم ثمّ أوجد نسبة أحدهما إلى الآخر بدلالة المسار الحر الوسطي الأعظمي l_e والسرعة الإلكترونية؛ ناقش العلاقة التي تحصل عليها. ماذا تستنتج؟

تمنياتي للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2024/07/14

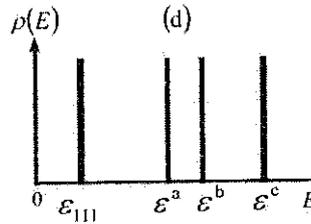
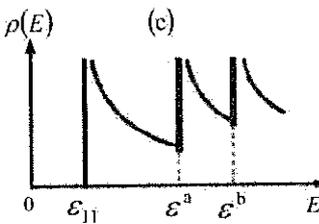
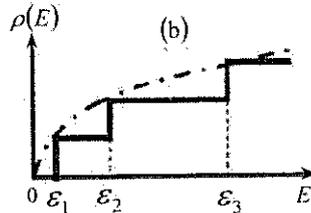
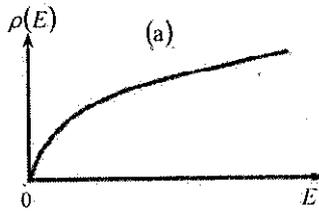
مدرس المقرر

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

الجملة الإلكترونية	7 درجات	3 درجات	6 درجات
الجملة الإلكترونية	كثافة الحالات الطاقية	طاقة فرمي	الطيف الطاقية للإلكترونات
3D	$\rho_{3D}(E) = \frac{V}{\pi^2} \left(\frac{m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{2E}$	$E_F = (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2 n_{3D}^{2/3}}{2m^*}$	$E(\vec{k}) = E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$
2D	$\rho_{2D}(E) = \frac{Sm^*}{\pi \hbar^2} \sum_{l_3} \Theta(E - \varepsilon_{l_3})$	$E_F = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_{2D}$	$E_{l_3}(\vec{k}_{ }) = \varepsilon_{l_3} + \frac{\hbar^2 k_{ }^2}{2m^*}$
1D	$\rho_{1D,l_3}(E) = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{\Theta(E - \varepsilon_{l_2,l_3})}{\sqrt{E - \varepsilon_{l_2,l_3}}}$	$E_F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m^*} n_{1D}^2$	$E_{l_2,l_3}(k_x) = \varepsilon_{l_2,l_3} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$
0D	مجموعة قمم لها شكل التابع δ		للرسم الصحيح 6 درجات

تكون الحركة الإلكترونية في بلورة حجمية حرة في الأبعاد الثلاثة، وتكون الحركة الإلكترونية في بئر كمومية حرة في بعدين حرة ومقيدة في البعد الثالث وفق ثخانة البئر، تكون الحركة الإلكترونية في سلك كمومي مقيدة ببعدين وحرة في البعد الثالث على طول محور السلك، يمكننا أن نستنتج من مقارنة طاقات فيرمي الحاصلة من أجل أبعاد مختلفة للغاز الإلكتروني أن تخفيض الأبعاد- أبعاد الغاز يؤدي إلى زيادة E_F بشكل متسارع عند زيادة تركيز الإلكترونات من أجل جمل منخفضة- البعد.

تتميز الصفة المميزة لكثافة الحالات أحادية البعد في: تعاودها بجوار قاع كل من العصابات الجزئية أحادية- البعد. ثم إن كثافة الحالات الإلكترونية تتناقص حالما تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات؛ ويُعد هذا السلوك رائعاً جداً لكونه يؤدي إلى مفاعيل كهربائية وبصرية جديدة تمتاز بها الأسلاك الكمومية. من أجل إلكترونات تقع في نقط كمومية؛ فبعاً لتعريف المعادلة $\rho(E) = \sum_{\nu} \delta(E - E_{\nu})$ (حيث E_{ν} الطاقة ذات الحالة الكمومية ν) تكون الأطياف الطاقية في حالة النقط الكمومية منفصلة (أي منقطعة)، وبالتالي، فإن كثافة الحالات ببساطة هي مجموعة قمم لها شكل التابع δ ، كما يوضح الشكل (d). تكون القمم من أجل جملة مثالية ضيقة جداً وارتفاعاتها لانهائية. 8 درجات



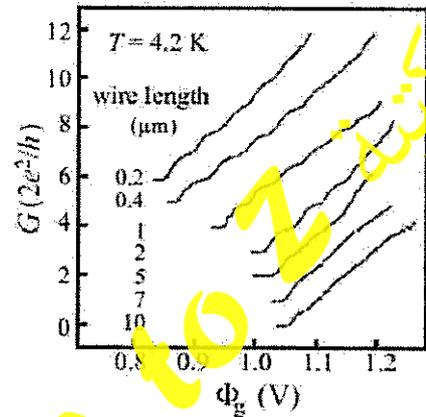
B توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (30 درجة)

أولاً- ترتبط الصفات المميزة الرئيسية للنقل الإلكتروني في الأسلاك الكمومية بتكمية لانداوير للناقلية. إذ يمكن رصد هذه التكمية في التراكيب السلكية المثالية في درجات الحرارة المنخفضة؛

وتم تقدير عدد الإلكترونات عند السطح الفاصل المتغير- المُطَعَّم انتقائياً AIGaAs/GaAs، قُبيل عملية التمشيش والإزالة، بكثافة بلغت نحو $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ وبحركية عالية تأرجحت قيمها في المجال $(1-2) \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

في درجة الحرارة المنخفضة، 4 K، يتحلل الغاز الإلكتروني ويُقَدَّر المسار الحر الوسطي للإلكترونات ذوات الطاقات المساوية لطاقة فيرمي بالقيم الواقعة في المجال $(10-20) \mu\text{m}$ ؛

ومن ثم، من المتوقع تكمية لانداوير (الناقلية G تساوي عدداً صحيحاً من $2e^2/h$) من أجل الأسلاك الكمومية التي تم تصنيعها بأطوال أقل من $10 \mu\text{m}$.



وللتحكم بعصابات الطاقة الجزئية الأحادية البعد في الأسلاك الكمومية تم ترسيب بوابة ألمنيوم بطريقة التبخير أعلى التركيب ثم طُبِّق جهد عليها غير كمون الحصر وطاقات العصابات الجزئية.

يوضح الشكل المجاور النتائج التي تم الحصول عليها من أجل أطوال مختلفة لسلك كمومي (من $0.2 \mu\text{m}$ إلى $10 \mu\text{m}$) حيث تبرز تكمية الناقلية بوضوح من أجل الأسلاك التي تقل أطوالها عن $5 \mu\text{m}$. إذ تظهر في الناقلية حتى العشر "ذُرَجَات"؛ أي أنه يمكن رصد نحو عشر عصابات طاقة جزئية ببعد واحد من خلال تغير جهد البوابة.

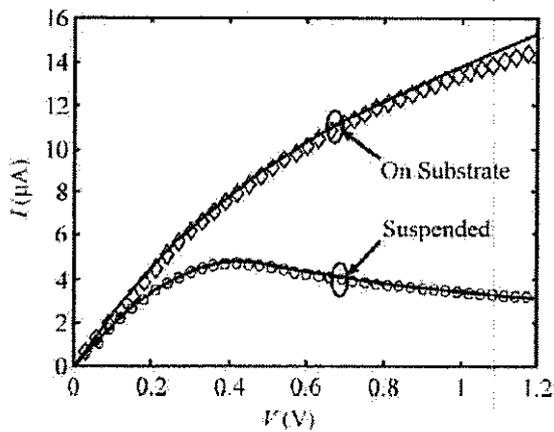
فضلاً عن أن التجارب التي أجريت بوجود حقل مغناطيسي وتغير درجة الحرارة أظهرت مفعول التكمية وسمحت بتحديد تركيز الإلكترونات ببعد واحد؛ فقد وجدت تراكيز إلكترونية

بلغت $n_{\text{ID}} = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ وتباعداً بين العصابات الطاقية الجزئية بلغ $\Delta \epsilon_{1,2} \approx 12.5 \text{ meV}$ وهي قيم نموذجية؛

فالتباعد بين العصابات الجزئية الكبير نسبياً والمكافئ لدرجة الحرارة 140 K تقريباً يفترض ألا يتغير السلوك الأحادي البعد للحركة الإلكترونية حتى في درجات الحرارة التي تكون من رتبة بضعة عشرات كلفن.

أمّا من أجل درجات الحرارة الأعلى التي تُصبح عندها الحركة الإلكترونية شبه تقليدية، فإن خصائص الناقلية الكهربائية لأسلاك كمومية، قوامها تراكيب متغايرة نصف ناقلة؛ تشابه تلك الخصائص للبيتر الكمومية وحتى المواد شبه الحجمية الصرفة.

إذن، ثمة أسلاك كمومية مُطَعَّمَة انتقائياً تُبدي حركيات إلكترونية عالية بوجود حقول كهربائية منخفضة وسرعات انسياق عالية تمتاز بها الإلكترونات الحارة بوجود الحقول الكهربائية العالية.



ثانياً- إن الوضع مختلف تماماً عند حدوث النقل الإلكتروني في

الأنابيب الكربونية؛

فعند وجود حقول عالية يمكن أن تبلغ سرعات الانسياق الإلكتروني قيماً تقع في المجال $(2-4) \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ وهي أعلى من سرعات

الانسياق في المركبات المثالية النصف الناقلة III-V.

غير أن الخصائص الكهربائية تتأثر بشدة بالوسط المحيط الذي يمكن تأثيره في إزالة كمية من الحرارة من الأنابيب النانوية الحاملة للتيار

الكهربائي؛ فعلى سبيل المثال، هناك أنابيب نانوية معلقة تُبدي نقلاً إلكترونياً مختلفاً تماماً عن ذلك النقل الذي تُبديه تلك الأنابيب النانوية

المترسبة على ركائز:

يظهر الشكل المبين أدناه نتائج قياسات المنحني المميز (جهد- تيار) من أجل مقاطع مُعلّقة وأخرى غير مُعلّقة لأنابيب نانوية بطول $3\ \mu\text{m}$ وأقطار من $2\ \text{nm}$ إلى $3\ \text{nm}$ ، وذلك في درجة حرارة الغرفة في الخلاء؛ حيث يمكن رؤية أن المقطع الموافق لأنبوب نانوي غير مُعلّق يُظهر زيادة رتيبة في التيار حتى نحو $20\ \mu\text{A}$ عند زيادة الجهد، في حين يبلغ التيار في أنبوب مُعلّق قيمة قصوى تساوي نحو $5\ \mu\text{A}$ يليها هبوط واضح للتيار.

إن هذا الاختلاف المُلفت للنظر ناجمٌ من مقاعيل التسخين- الذاتي الكبير للأسلاك الكمومية التي تجري فيها تيارات كهربائية بكثافات عالية للغاية؛ فعلياً، في حالة الأنابيب المُعلّق لا يمكن إزالة حرارة جول بفعالية، لأن التدفقات الحرارية ممكنة فقط عبر تماسات الأنابيب النانوي، وبالنتيجة ترتفع درجة حرارة الأنبوب، لاسيما في منطقة الوسط (أي في مركزه).

مكتبة A to Z

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (30 درجة)

أولاً- (11 درجة) تُعدُّ الحركية صفة مميزة للمادة الناقلة المنتظمة؛ إذ أن الحقل الكهربائي في عينة، بُعدها الممتد L_x مثلاً، يكون منتظماً على الأغلب، ويمكن تقييمه من العلاقة $F = \Phi_0/L_x$ حيث $\Phi_0 = \Phi(x=L_x)$ هو الجهد المطبق على العينة؛ فالحركية تُحدِّد بصورة أساسية المقاومة الكهربائية والتيار الكهربائي وفقاً للمعادلة $I = \Phi_0/R$.

في العينات القصيرة ثمة مفعول كهربائي آخر يمكن أن يُسهم في النقل الإلكتروني والتيار الكهربائي بشكلٍ كبير جداً. ينشأ هذا المفعول بسبب إعادة التوزع اللامنظم للإلكترونات، ومن ثمَّ إعادة توزع الشحنة الكهربائية بين طرفي العينة القصيرة. فالشحنة المتحرّضة بالتيار (تيار حقن الإلكترونات من باعث الديود نحو قاعدته) تؤثر على توزع الكون على طول العينة جاعلةً هذا التوزع شديد عدم الانتظام ومرتبطةً بالتيار ارتباطاً وثيقاً؛ وبنتيجة ذلك، لم تُعدَّ تابعة التيار الكلي للجهد المطبق خطيةً؛ يسمى النقل الإلكتروني في هذا النظام النقل المحدود بالشحنة الفراغية.

$$J_0 \equiv J_{0,d} = \frac{9 \epsilon_0 \epsilon \mu \Phi_0^2}{8 L_0^3},$$

تأخذ علاقة موت-غيرني الشكل

حيث μ الحركية المميزة من أجل قاعدة الديود غير المُطعّمة، و L_0 طول الديود، و $\epsilon_0 \epsilon$ ثابت العزل الكهربائي.

إذن، الخاصية المميزة (أمبير-جهد) ليست خطيةً ($J_0 \sim \Phi_0^2$) تماماً بسبب مفعول الشحنة الفراغية.

ثانياً- (5 درجات) يحدث النظام الباليستي التقليدي بدون تصادم في العينات القصيرة جداً وذلك تبعاً للشرط $l_e > L_x$ ، أي عندما المسار الحر الواسطي للإلكترونات أقل من طول الديود الباليستي، حيث لا تتعرض الإلكترونات أثناء طيرانها لأي تبعثر؛ فتتأثر التيار والمقاومة الكهربائيتين المحدودين يحدثان في حالة كهذه - بصورة استثنائية - بسبب مفاعيل الشحنة الفراغية. وتأخذ علاقة تشايف الشكل

$$J_{0,b} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{\epsilon_0 \epsilon \sqrt{2e}}{L_x^2} \sqrt{\frac{2e}{m^*}} \Phi_0^{3/2},$$

ثالثاً- (14 درجة) زمن انتقال الإلكترونات عبر الديود التبددي: $t_{tr,d} = \frac{4}{3} t_{0,d} = \frac{4}{3} \frac{L_x^2}{\mu \Phi_0}$

$$t_{tr,b} = \frac{3}{2} t_{0,b}, \quad t_{0,b} = L_x \sqrt{\frac{2m^*}{e\Phi_0}},$$

حيث $t_{0,b}$ زمن انتقال الإلكترونات المقذوفة بغياب مفعول الشحنة-الفراغية؛ إذ يُزيد هذا المفعول زمن انتقال الإلكترونات، $t_{tr,b}$ بمقدار

$$\frac{t_{tr,b}}{t_{tr,d}} = \frac{9 \sqrt{m^* \Phi_0} \mu}{4 \sqrt{2e} L_x} = \frac{9 \tau_e \sqrt{e\Phi_0}}{4 \sqrt{2m^*} L_x} = \frac{9 l_e}{8 L_x} \ll 1,$$

العامل 3/2. ومن ثمَّ

حيث $\mu = e\tau_e/m^*$ و $l_e = \tau_e v_m = \sqrt{2e\Phi_0/m^*}$ السرعة الإلكترونية القصوى:

إن النسبة التي تم الحصول عليها صغيرة القيمة وتتسجم مع شرط النقل التبددي، الممثل بالشرط $L_x \gg l_e$. وهذا يعني أنَّ الديودات الباليستية تستطيع تأمين منظومات عمل أسرع بكثير من تلك التي يمكن أن تؤمنها الديودات التبددية. وبشكلٍ مشابه، يمكن أن نجد، أنه من أجل انحياز كهربائي معطى، تكون التيارات في الديود الباليستي أكبر بكثير منها في الديود التبددي:

$$\frac{J_{0,b}}{J_{0,d}} = \frac{8}{9} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{L_x}{l_e} \gg 1.$$

ولهذا السبب، يتصف النقل الإلكتروني الأعظمي - الخالي من التصادمات بعددٍ من المزايا يتفوق فيها على النقل الإلكتروني التبددي، وذلك، بفضل سرعة الإلكترونات الأعلى في النقل الباليستي.

السؤال الأول: (20 درجة)

أولاً- ماذا يُقصد بالنقطة الكمومية وماذا تشمل؟.

ثانياً- اذكر كيف تُصنَّع النقايد الكمومية وأنواعها الأساسية وأبرز ما يُميزها.

ثالثاً- إذا علمت أنه يمكن عدّ النقطة الكمومية ذرة ضخمة، فادرس امكانية مرور التيار الكهربائي فيها.

السؤال الثاني: (30 درجة)

إن التحكم بمقاومة التراكيب المتنايرة الفردية ضروري للحصول على نبائط مفيدة؛

أولاً- ادرس احتمالية تغير الناقية لوصلة فردية متغايرة محجوبة عن طريق ضبط التركيز الإلكتروني.

ثانياً- أ- عيّن بالرسم والمشرح آلية التوصيل في الحالة العادية Normally-on والبنية القفل (الفصل) في الحالة العادية

Normally-off.

ثانياً- كيف يمكن التحكم بناقلية نبائط جريان الناقلية ثمّ وضح أهمية تشكّل المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية

متغايرة.

رابعاً- اشرح كيف تؤثر سماكة المبعاد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثالث: (40 درجة)

اشرح الأساس الفيزيائي لمفعول العبور بالنفق التجاوبي من خلال دراسة مثال على ديود العبور بالنفق التجاوبي والمؤلف من

تركيب متغاير ثنائي الحاجز والذي يحوي طبقات متناوية: طبقة GaAs مُطعمّة من النوع n^- (بمثابة ركيزة وأحد التماسين)،

وطبقة AlGaAs غير مُطعمّة (بمثابة حاجز)، وطبقة GaAs مُطعمّة من النوع n^+ ، موضحاً إجابتك بالرسم.

تمنياتي للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2024/02/15

مدرس المقرر

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

توزيع الدرجات على جواب السؤال الأول: (20 درجة)

2 أولاً- النقطة الكمومية هي جملة مادية تُحبس الإلكترونات فيها في الاتجاهات كافة؛ وتشمل: الجذر النانوية نصف الناقل وذاتية التشكل، والعناقيد، والبلورات النانوية، الخ.

ثانياً- يمكن تصنيع النقاط الكمومية بطرائق مختلفة، بما فيها الطريقة المباشرة.

3 نبدأ بتركيب ذي إلكترونات ثنائية البعد ثم نستخدم عملية تنميش وإزالة لفرض قيود هندسية على الإلكترونات في الاتجاهين الإضافيين. وتستطيع بوابة فلزية صغيرة أيضاً، تُصنَّع على تركيب متغاير ثنائي البعد، تأمين الحبس الإلكتروني الضروري وذلك تحت تأثير جهد سالب يُطبَّق على البوابة.

أهم أنواع النقاط الكمومية هي ثلاثة:

2 1. جزيرة نانوية- تشكَّلت ذاتياً في نظام إنماءٍ خاصٍ،

2. وبلورات نانوية في مادة غروية،

3. و"صندوق نانوي" تمَّ تحضيره بطريقة مضبوطة من تركيب متغاير ثنائي- البعد (تقنية التنميش والإزالة).

3 وأبرز ما يُميِّز النقاط الكمومية يكمن في أن كل درجات الحرية لانتشار الإلكترون تكون مُكبَّاة إذا كان الكمون الحابس عميقاً وأمكن مقارنة أبعاد التركيب فيه مع طول موجة دوبروي للإلكترون.

ثالثاً- يمكن للتيار الكهربائي الجريان في الذرة الضخمة بفضل عبور الإلكترونات بالنفق بين المستويات الكمومية العائدة للذرة الضخمة. ويحدث نقل الشحنة دوماً على هيئة كمَّات من الشحنة العنصرية للإلكترون. وليس لهذا التقطُّع أهمية عملية من أجل

4 تيار يتدفق في مواد حجمية، وفي تراكيب ثنائية- البعد، ولا حتى في أسلاك كمومية، لأن أعداد الإلكترونات المنتقلة كبيرة.

→ فنقل الشحنة في جُمَلٍ نقطية- كمومية مختلف تماماً. في الحقيقة، إنه يحدث كعبور إلكترون بالنفق من مهبط عبر النقطة الكمومية إلى مصعد.

→ أي أن التباعد البيني بين المهبط والمصعد يجب دراسته بمثابة حاجز كمونٍ تنغمس فيه نقطة كمومية.

→ لقد وجدنا عند دراسة مفعول النفق أن احتمالية العبور بالنفق تتعلق بسماكة الحاجز وارتفاعه بشكل كبير جداً:

○ إذ من أجل سماكة وارتفاع كبيرين كفايةً، فإن العبور بالنفق يُسحق،

○ ولكن احتمالية العبور بالنفق من خلال حالة متقطعة متوضَّعة في الحاجز تكون أعلى بكثير.

○ يمكن عدّ عملية النفق بأكملها بمثابة عملية متتالية: اقتناص إلكترون من المهبط إلى الحالة المتوضَّعة ثم إصدارها إلى المصعد.

○ وبالنتيجة، أسهل طريقة لنقل الإلكترونات من المهبط إلى المصعد هي العبور بالنفق عبر النقطة الكمومية.

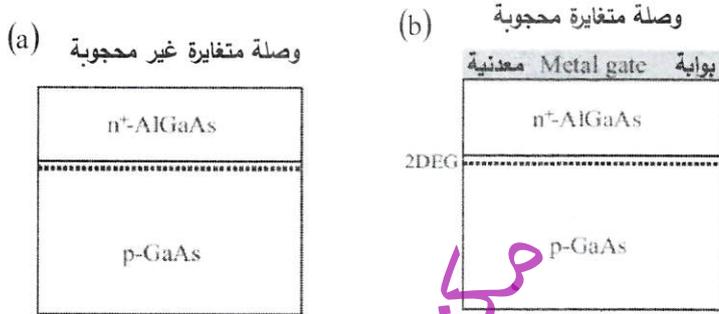
○ وبعد ذلك، يمنع الإلكترون المُقتنص بالنقطة الكمومية عبور الإلكترونات الأخرى بالنفق منعاً تاماً.

○ ويحدث نقل إلكتروني بأسلوب مترابط للغاية- إلكترونات- إلكترونات- على الأقل في درجات الحرارة المنخفضة.

○ وبهذه الطريقة، يجري التيار الكهربائي عبر نقطة كمومية وفق نظام النقل الإلكتروني الفردي.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (30 درجة)

8 أولاً- ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبة تسمى باختصار وصلة متغايرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً ونقارنها مع الشكل (a) الذي يُظهر وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة.



الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - AlGaAs$ في التركيب المحجوب: تسمى هذه الجملة المؤلفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب MES.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعدّ تراكييب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النبايط، لأن هذه المواد لا تحوي أكسيداً طبيعياً مستقراً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النبايط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكييب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكييب إلى ما يسمى بتراكييب شوتكي المحجوبة.

- يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-التشكّل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو 0.8 V.
- وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.

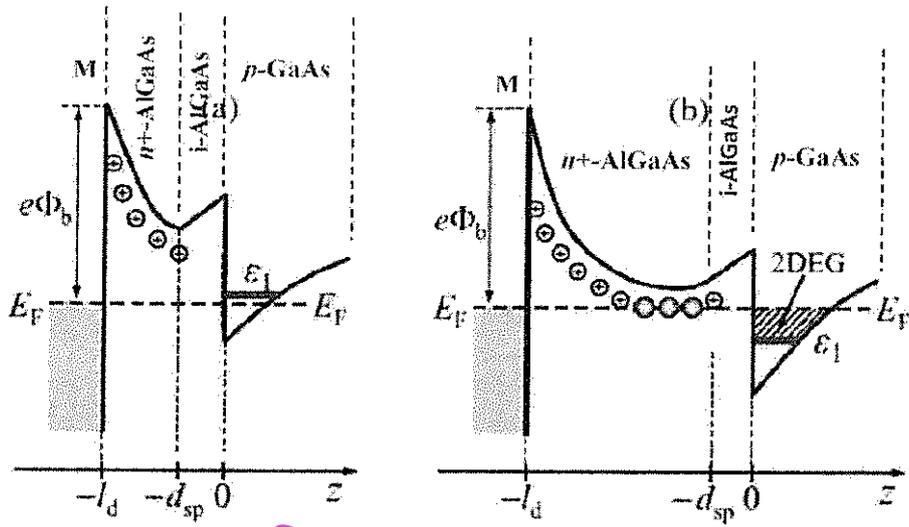
12 ثانياً- يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من M/AlGaAs/GaAs بسماكتين للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُباعِدٌ غير مُطعَّمٍ يفصل المنطقة المُطعَّمة، من النوع-n، عن الوصلة: 10^{-15} سم

- إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،
- أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 Å وأكثر.
- وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل AlGaAs/GaAs وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛
- تكون هنا طبقة الـ $n^+ - AlGaAs$ رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمونية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقية جزئية.
- ومن ثمّ لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغاير يساوي الصفر على الأغلب.
- فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعَّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء- نصف الناقلية- من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.

→ ومن أجل تشغيل ناقلية النبيطة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

آلية تشكل نبايط Normally-on: 5

- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكّل بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة-جزئية وتسكن الإلكترونات القناة من دون انحياز بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.



- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AlGaAs سميكة كفاية؛ أكبر من 600 Å
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيطة إلى حالة فصل (أي إلى قفل) off.

2- ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغيرة يؤدي إلى تشكّل حقول كهرساكن ناتجة من إعادة توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_F ثابتاً عبر المواد المتماصة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكّل بئر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماصة.

3- رابعاً- يُعدّ المُباعِد عنصراً مهماً للتراكيب متغيرة- التطعيم، لأنه يمنع جزئياً تبعثر إلكترونات القناة في طرف التركيب- المتغاير المُطعّم بشدة ويؤيد الحركية الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُباعِد؛ إذ إن زيادة سماكة المُباعِد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُباعِد ومن ثمّ إلى تخفيض الكمون الكهرساكن الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُباعِداً سميكاً يسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (40 درجة)

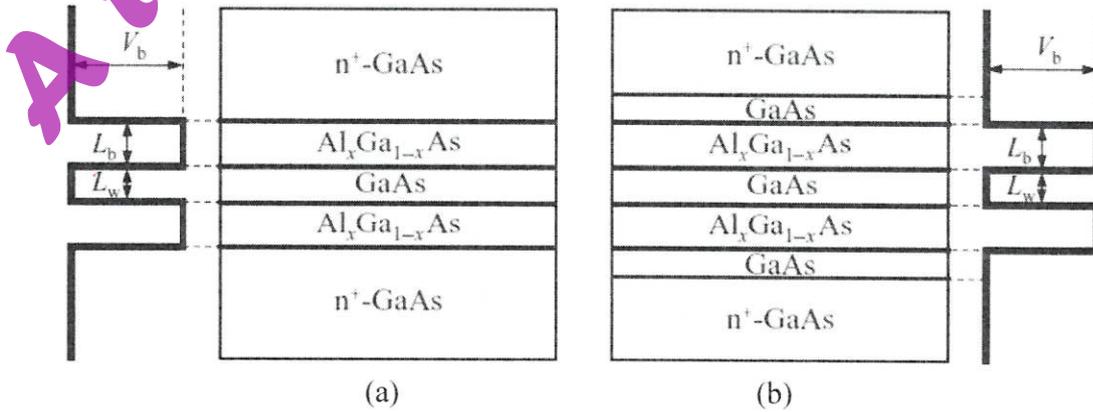
ينص السؤال على أن ديودات العبور بالنفق التجاوبي هي تراكيب متغايرة ثنائية الحاجز مؤلفة من سلسلة من الطبقات. ترتيب هذه الطبقات ومكوناتها هي:

- الأجزاء العلوية والسفلية في هذا التركيب هي مناطق مُطعّمة، في حين إنَّ الحواجز والطبقات الكمونية ليست مُطعّمة.
- ثمَّ إنَّ الشكل (a) يوضح تركيباً نوعياً فيه طبقة حفرة الكمون - GaAs منغمسة بين طبقتي حاجز من الـ $Al_x Ga_{1-x} As$ ، فضلاً عن أن المنطقتين العلوية والسفلية - n^+ -GaAs المُطعّمتين تُستعملان بمثابة تماسات توصيل.

ويُظهر الشكل (b) أيضاً تصميماً مختلفاً بعض الشيء، حيث يحوي طبقتي تباعد إضافيتين تفصلان بين المناطق المُطعّمة وبين جزئي الحاجز الثنائي من التركيب؛ إذ يكمن الغرض من طبقتي التباعد في منع تبعثر إلكترونات العبور بالنفق على الشوائب في مناطق التماس.

إنَّ سماكات البئر، والحواجز، والمباعدات يمكن أن تتغير بشكل كبير جداً. ويمكن أن تتوافر داخل الحُفر الكمونية (البئر الكمونية) بعض المستويات المُكمّاة؛

→ في الواقع، هذه المستويات الطاقية هي حالات شبه-مقيدة، لأنه ثمة إمكانية صغيرة ولكنها محدودة لعبور الإلكترونات بالنفق من الحُفر الكمونية والعبور بالنفق الكمومي مسؤول عن فترات الحياة المحدودة للإلكترونات في مثل تلك الحالات ويؤدي إلى بعض التعرّض في الحالات الطاقية للبئر الكمومي.

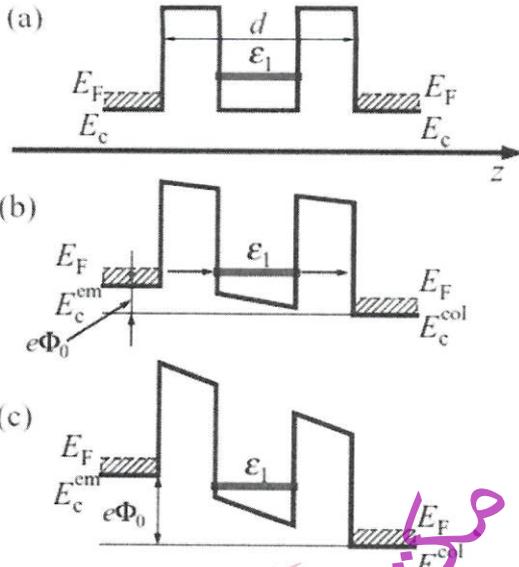


بهذه الطريقة، يمكن النظر إلى الديود النفقي- التجاوبي على أنه منظومة بتماسين فيها حالات إلكترونية ثلاثية البعد وبئر كموميّ بجملة إلكترونية ثنائية البعد. هذه الجمل- الجزئية الثلاث مترابطة بالعبور بالنفق بشكل ضعيف.

يوضح الشكل الآتي مخططات العصابات الطاقية للتركيب المذكور أعلاه من أجل ثلاثة انحيازات جهدٍ مختلفة:

○ يوافق الشكل (a) حالة التوازن عند عدم وجود جهد انحياز؛ إذ يتوافر في الحفرة المدروسة مستوى شبه-مقيد واحد على الأقل، حيث يظهر في الشكل حالة مستوى فردي للطاقة، ϵ_1 . فعلياً، الطاقة ϵ_1 هي قاع العصابة الجزئية ثنائية البعد الأدنى، بسبب وجود حركة إلكترونية حرة في المستوى.

○ لقد اختيرت متحولات الديود بحيث يقع المستوى شبه-المقيد، ϵ_1 ، في حالة عدم انحياز الديود، فوق طاقة فيرمي، F_F ، في التماسات، كما يوضح الشكل (a).



○ وعند تطبيق انحياز جهد على التماسات يمكن تحريض انزياح المستوى الطاقى في البئر نحو الأسفل، ومن ثم، يكون احتمال العبور بالنفق، عبر التركيب ذي الحاجز المضاعف، من أجل إلكترونات بطاقات اختيارية صغير جداً.

○ فضلاً عن أن التركيب يُصمَّم بطريقة تمنع الانتقال الإلكتروني الحراري من فوق الحاجز.

○ ولذلك، ثمة حالة واحدة فقط مُفضَّلة لنفوذ إلكترونات عبر التركيب؛ تحدث عندما يقع المستوى شبه-المقيّد تحت طاقة فيرمي، F_F ، ولكنه فوق قيعان عصابة الناقلية للتماسات.

○ في هذه الحالة، الإلكترونات التي تنفذ من الباعث (التماس الواقع من جهة اليسار) عبر التركيب باحتمالية محدودة، هي تلك الإلكترونات التي تتطابق من أجلها الطاقة الحركية للحركة المستوية (العمودية)، $E_{\perp} = \hbar^2 k_{\perp}^2 / (2m^*)$ ، مع E_1 .

○ تُسهم هذه العملية، التي تسمى عملية العبور التجاوبي بالنفق، بشكل كبير في إظهار مقاومة تفاضلية سالبة. تفسير ظهور المقاومة التفاضلية السالبة:

- قبل أن يبلغ المستوى الطاقى للحفرة الكوانتية موقع التجاوب يكون التيار عبر الديود صغيراً جداً، لأنه يُضبط بعبور غير تجاوبي بالنفق وبانتقال من فوق الحواجز، ولكل منهما احتمالية حدوث صغيرة.
- عندما يوافق الانحياز حالة طاقات التجاوب، كما يظهر في الشكل (b)، فإن معامل النفوذ والتيار الكهربائي المار في الديود يزدادان بصورة حادة.
- والزيادة اللاحقة في التيار عند ازدياد الانحياز بالجهد تستمر ما لم يتجاوز مستوى التجاوب قاع عصابة الناقلية للباعث.

○ لا تتوافر إلكترونات (تقع عصابة الناقلية فوق مستوى فيرمي، F_F)، كما يوضح الشكل (c)، لكي تعبر بالنفق تجاوبياً فيتناقص التيار بصرف النظر عن الزيادة الحاصلة في جهد الانحياز، ومن ثم، فإن المنحني المميز (جهد-تيار) للتركيب يحوي مقطعاً يُبدي مقاومة تفاضلية سالبة.

Handwritten signature in blue ink.

الاسم:
المدّة: ساعتان
الدرجة القصوى: 90

امتحان مقرر الإلكترونيات النانوية
لطلاب السنة الرابعة فيزياء
للعام الدراسي 2022-2023/الدورة الفصلية الثانية

جامعة طرطوس
كلية العلوم
قسم الفيزياء

السؤال الأول: (30 درجة)

أولاً- اكتب علاقات الطيف المتماثل المناحي للإلكترونات (علاقات التبدد) لجملة إلكترونية واقعة في درجات حرارة منخفضة ($T \rightarrow 0$) عندما تكون الجملة المدروسة ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد مع شرح ما يلزم (ماذا تستنتج؟).
ثانياً- اكتب علاقات طاقة فرمي عندما تكون الجملة المدروسة ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد مع شرح ما يلزم. ماذا تستنتج؟.
ثالثاً- اكتب علاقات كثافة الحالات الطاقية من أجل جملة إلكترونية ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد وصفرية البعد. ماذا تستنتج؟.
رابعاً- ارسم المنحنيات البيانية الموافقة للجمل الإلكترونية في البلّورات الحجمية والأفلام الرقيقة (البئر الكمومية) والأسلاك الكمومية والنقط الكمومية مع ذكر المسميات عليها بشكل واضح مع شرح ما يلزم.

السؤال الثاني: (30 درجة)

إن التحكم بمقاومة التراكيب المتغايرة الفردية ضروري للحصول على نبائط مفيدة؛
أولاً- ادرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة فردية متغايرة محجوبة عن طريق ضبط التركيز الإلكتروني.
ثانياً- عيّن بالرسم والشرح آلية التوصيل في الحالة العادية Normally-on وآلية القفل (الفصل) في الحالة العادية Normally-off.
ثالثاً- كيف يمكن التحكم بناقلية نبائط جريان الناقلية ثمّ وضح أهمية تشكّل المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة.

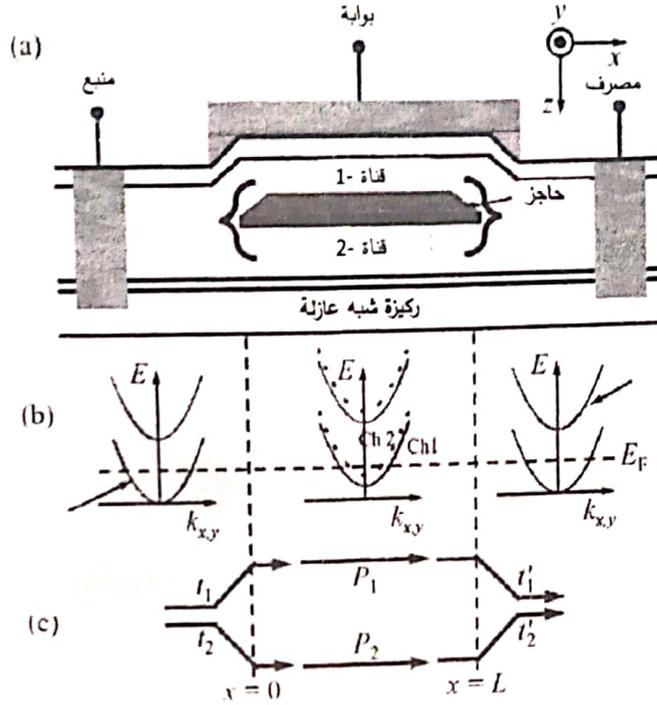
رابعاً- اشرح كيف تؤثر سماكة المبعاد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثالث: (30 درجة)

1. عرّف ترانزستورات التداخل الكومومي QUIT وشرح مبدأ عملها.
2. صيّف الرسم التخطيطي الموضح على الوجه الآخر لورقة الأسئلة.
3. وضح ماذا يحدث لدى تطبيق جهد انحياز على البوابة واكتب علاقة أطيايف الطاقة الإلكترونية الموافقة مع شرح ما يلزم.
4. يُعطى معامل النفوذ الكلي من أجل النبيطة المدروسة بالعلاقة $T(E) = 2 |t_1 t_1'|^2 (1 + \cos \theta)$ ، والمطلوب تفسير الطرف الأيمن لها واستنتاج علاقة الزاوية θ بدلالة السرعة الإلكترونية وفق الاتجاه x وطول النبيطة التي شطرت القناة والطاقات مع شرح ما يلزم.
5. اكتب علاقة لانداوير بدلالة العلاقة المعطاة في الطلب 4 ثمّ استنتج قيمتها العظمى وقيمتها الدنيا مع شرح المعنى الفيزيائي لهما.

يتبع على الوجه الآخر ←

$$\frac{1 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2}{11} = \frac{13}{11}$$



تمنياتى للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2023/07/23

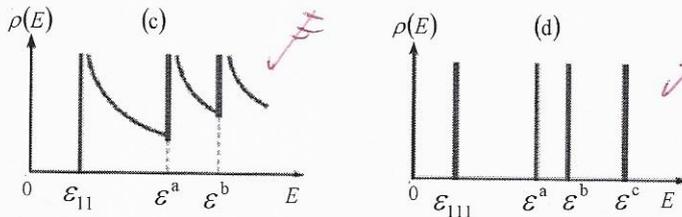
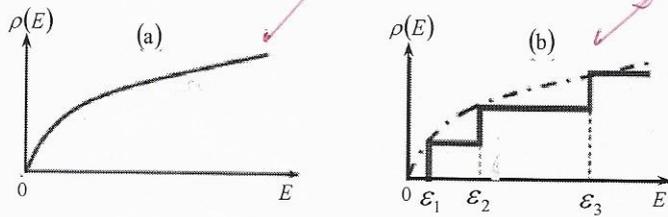
مدرس المقرر
أ. د. حسين عبد الكريم سليمان

الجملة الإلكترونية	كثافة الحالات الطاقية	طاقة فرمي	الطيف الطاقية للإلكترونات
3D	$\rho_{3D}(E) = \frac{V}{\pi^2} \left(\frac{m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{2E}$	$E_F = (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2 n_{3D}^{2/3}}{2m^*}$	$E(\vec{k}) = E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$
2D	$\rho_{2D}(E) = \frac{S m^*}{\pi \hbar^2} \sum_{l_3} \Theta(E - \varepsilon_{l_3})$	$E_F = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_{2D}$	$E_{l_3}(\vec{k}_{ }) = \varepsilon_{l_3} + \frac{\hbar^2 k_{ }^2}{2m^*}$
1D	$\rho_{1D}(E) = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{\Theta(E - \varepsilon_{l_2,l_3})}{\sqrt{E - \varepsilon_{l_2,l_3}}}$	$E_F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m^*} n_{1D}^2$	$E_{l_2,l_3}(k_x) = \varepsilon_{l_2,l_3} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$
0D	مجموعة قمم لها شكل التابع δ		

تكون الحركة الإلكترونية في بلورة حجمية حرة في الأبعاد الثلاثة، وتكون الحركة الإلكترونية في بئر كمومية حرة في بعدين حرة ومقيدة في البعد الثالث وفق ثخانة البئر، تكون الحركة الإلكترونية في سلك كمومي مقيدة ببعدين وحررة في البعد الثالث على طول محور السلك، يمكننا أن نستنتج من مقارنة طاقات فيرمي الحاصلة من أجل أبعاد مختلفة للغاز الإلكتروني أن تخفيض الأبعاد - أبعاد الغاز يؤدي إلى زيادة E_F بشكل متسارع عند زيادة تركيز الإلكترونات من أجل جمل منخفضة - البعد. تتم الصفة المميزة لكثافة الحالات أحادية البعد في: تباعدها بجوار قاع كل من العصابات الجزئية أحادية - البعد. ثم إن كثافة الحالات الإلكترونية تتناقص حالما تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات؛ ويُعد هذا السلوك رابعاً جداً لكونه يؤدي إلى مفاعيل كهربائية وبصرية جديدة تمتاز بها الأسلاك الكمومية.

من أجل إلكترونات تقع في نقط كمومية؛ فتبعاً لتعريف المعادلة $\rho(E) = \sum_v \delta(E - E_v)$ (حيث E_v الطاقة ذات الحالة

الكمومية v) تكون الأطياف الطاقية في حالة النقط الكمومية منفصلة (أي متقطعة)، وبالتالي، فإن كثافة الحالات ببساطة هي مجموعة قمم لها شكل التابع δ ، كما يوضح الشكل (d). تكون القمم من أجل جملة متالية ضيقة جداً وارتفاعاتها لانهاية.

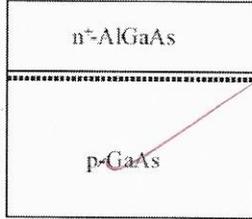


توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (30 درجة)

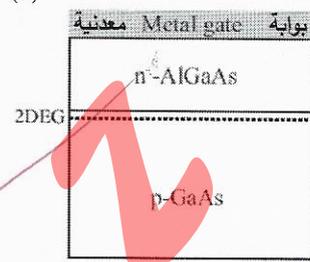
10

أولاً- ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبة تسمى باختصار وصلة متغايرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً ونقارنها مع الشكل (a) الذي يظهر وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة.

(a) وصلة متغايرة غير محجوبة



(b) وصلة متغايرة محجوبة



الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - AlGaAs$ في التركيب المحجوب:

تسمى هذه الجملة المؤلفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب **MES**.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعدُّ تراكيب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النبايط، لأن هذه

المواد لا تحوي أكسيدا طبيعياً مستقرّاً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النبايط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكيب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكيب إلى ما يسمى بتراكيب شوتكي المحجوبة.

■ يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-

التشكّل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو $0.8 V$.

■ وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.

ثانياً- يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من $M/AlGaAs/GaAs$ بسماكتين

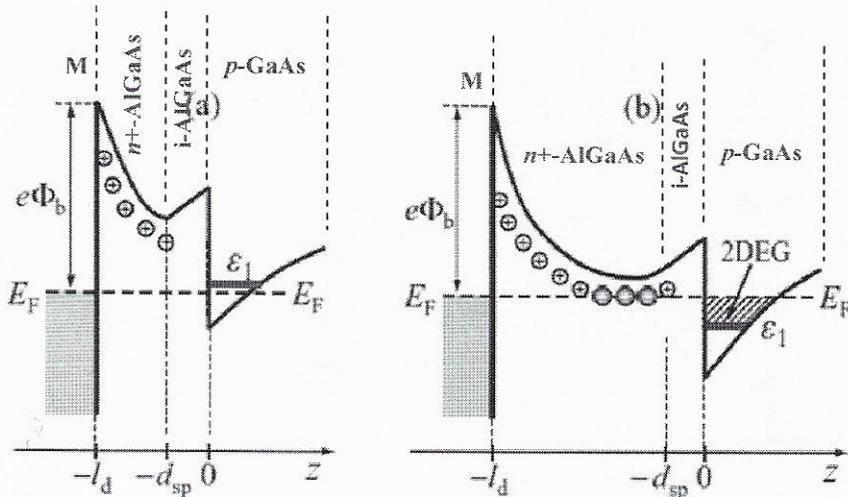
10

للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُباعَدٌ غير مُطعَمٍ يفصل المنطقة المُطعّمة، من النوع-n، عن الوصلة:

■ إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،

■ أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 \AA وأكثر.

■ وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل $AlGaAs/GaAs$



4

آلية تشكل نبائط Norm. off

وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛

→ تكون هنا طبقة الـ n^+ -AlGaAs رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمونية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقة جزئية.

→ ومن ثم لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغاير يساوي الصفر على الأغلب.

→ فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء - نصف الناقلي - من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.

→ ومن أجل تشغيل ناقلية النبيطة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

آلية تشكل نبائط Normally-on:

- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكل بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة-جزئية وتسكن الإلكترونات القناة من دون انحياز بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AlGaAs سميكة كفاية؛ أكبر من 600 \AA .
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيطة إلى حالة فصل (أي إلى قفل) off.

ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة يؤدي إلى تشكل حقول كهروستاتيكية ناتجة من إعادة توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_f ثابتاً عبر المواد المتماصة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكل بئر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماصة.

رابعاً- يُعدّ المُبعد عنصراً مهماً للتركيب متغيرة-التطعيم، لأنه يمنع جزئياً تبعثر إلكترونات القناة في طرف التركيب-المتغاير المُطعّم بشدة ويُزيد الحركة الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُبعد؛ إذ إن زيادة سماكة المُبعد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُبعد ومن ثمّ إلى تخفيض الكمون الكهروستاتيكي الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُبعداً سميكاً يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (30 درجة)

1. هي نبیطة میزوسكوبیة یستند مبدأ عمل QUIT على ظاهرة النقل الإلكتروني البالیستی الكمومی ویکون طول الترابط، l_p ، فیها أكبر من البعد المميز للنبیطة، $L: l_p > L$ ، ویجتلی مبدأ عملها فی التحكم بنمط تداخل إلكترونات الناقلیة (حاملات التيار الكهربائی) بجهد خارجي.

2. یوضح الشكل (a) المعطى رسماً تخطيطياً للنبیطة تداخل - كمومی بقناتین؛

- وهذه النبیطة هی ترانزستور حقلی FET عادی بقناة قصیرة وحاجز مواز لاتجاه التيار.
- وهذا الحاجز منغمس فی المنطقة الوسطی من النبیطة ویشطر القناة الرئیسة إلى قناتین: 1 و 2.
- یوجد أيضاً تماسان على القناة الرئیسة، هما المنبع والمصرف. والبوابة تقع فی أعلى النبیطة.
- یؤدي تطبیق جهد على البوابة إلى تخرب تناظر القناتین 1 و 2. والمسافة بین التماسین، L ، تحقق المتراحة المذكورة أعلاه.
- فضلاً عن أن عرض القناة الأساسیة وعرضی القناتین المنشطرتین صغیرة إلى درجة یوجد عندها تكمیة حالات

إلكترونیة عرضانیة فی الاتجاه z .

یوضح الشكل (b) عصابتین جزئیتین ثنائیتین البعد؛ إذ تم رسم العصابات الجزئیة، $E(k_x, k_y)$ ، وطاقة فرمی، F_F ، من أجل ثلاث مناطق رئیسیة للنبیطة؛ ویمکننا أن نفرض، بغرض التبسیط، أن أخفض عصابة جزئیة فقط فی كل منطقة من مناطق النبیطة تكون مسكونة بإلكترونات.

3. إذا طُبِق الآن جهد على البوابة، فإن قاع كل من العصابتین الجزئیتین، ϵ_1 و ϵ_2 ، فی المنطقة الوسطی من أجل القناتین 1 و 2 یكون مختلفاً عن قاع كل من العصابتین الجزئیتین، ϵ_1 و ϵ_2 ، فی المنطقتین الواقعتین على یسارهما ویمینهما بشكل عام؛ وعندها تأخذ أطياف الطاقة الإلكترونية الشكل الآتی:

$$E = \epsilon_1 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,1}^2 + k_y^2) = \epsilon_2 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,2}^2 + k_y^2),$$

حیث E طاقة إلكترون وارد، و k_x و k_y مركبتا متجهته الموجیة فی مستوی النبیطة. من الواضح أن الطاقة E لا تتغیر على طول القناة؛ كما أن المركبة k_y مُصانة، لأننا فرضنا عدم وجود قوى تؤثر على طول الاتجاه y . إذن، تسمح المعادلة الأخيرة للمركبات k_x فقط بأن تختلف عن بعضها البعض فی القنوات.

4. تُمَثَّل الزاویة θ الانزياح الطوري النسبی للقناتین (فرق الطور بین القناتین) وتساوی

$$\theta = (k_{x,2} - k_{x,1}) L$$

وإذا أدخلنا السرعة الإلكترونية الوسطیة،

$$v_x = \frac{\hbar (k_{x,1} + k_{x,2})}{2m^*},$$

یمکننا التعبير عن الفارق بین المتجهتین الموجیتین بالمساواة الآتیة:

$$k_{x,2} - k_{x,1} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\hbar v_x}.$$

وبالتالی يأخذ الانزياح الطوري الشكل الآتی:

$$\theta = \frac{L}{v_x} \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\hbar}.$$

إن منشأ الانزياح الطوري واضح: فإذا كانت $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ ، فإن فارقاً بين الطاقات الحركية في القناتين يُسبب انزياحات مختلفة للأمواج القادمة إلى منطقة النبيلة اليمنى؛ وبالطبع، هذه الفوارق الطورية تؤدي إلى تداخل كمومي.

$$G = \frac{2e^2}{h} T(E) = \frac{4e^2}{h} |t_1 t_2|^2 (1 + \cos \theta). \quad .5$$

6. ينتج الحد الثاني الواقع ضمن قوسين صغيرين، في الطرف الأيمن من المعادلة الأخيرة، من التداخل الإلكتروني. إذ يمكن أن نرى أن التداخل يتحكم بناقلية النبيلة. فإذا كان الانزياح الطوري للأمواج المنشطرة معدوماً، $\theta = 0$ ($\Phi_{12} = 0$)، فإن

$$G_{\max} = \frac{8e^2}{h} |t_1 t_2|^2$$

التداخل بناءً، ومن ثمّ تبلغ الناقلية قيمة قصوى:

أمّا إذا كان $\theta = \pi$ ، أي إذا تحققت المساواة: $e\Phi_{12} = \frac{\hbar\pi v_x}{L}$ (ثمّثل القيمة Φ_{12} الفارق بين الكمونات المتوسطة في القنوات الذي يُحدد النفوذ عبر النبيلة)، فإنّ التداخل هدام ومن ثمّ تتلاشى الناقلية.

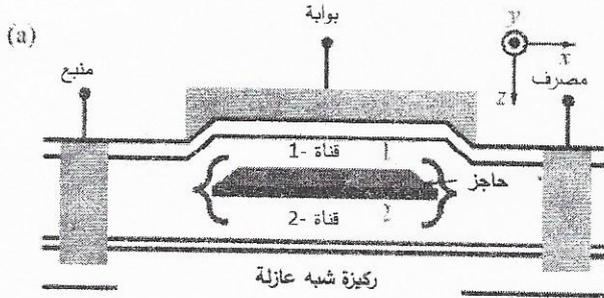
السؤال الأول: (35 درجة)

أولاً- وضح ماذا يُقصد بالنقطة الكمومية QD وماذا تشمل؟
ثانياً- اذكر كيف تُصنّع النقاط الكمومية QDs وأنواعها الأساسية وأبرز ما يُميّزها.
ثالثاً- إذا علمت أنه يمكن عدّ النقطة الكمومية QD ذرة ضخمة، فادرس إمكانية مرور التيار الكهربائي فيها.
رابعاً- ادرس إمكانية التحكم الضوئي بالنقاط الكمومية والتوابع الإلكترونية- الضوئية لنقاط صفرية البعد موضحاً إجابتك بالرسم وأعط مثلاً مناسباً على ذلك.

السؤال الثاني: (20 درجة)

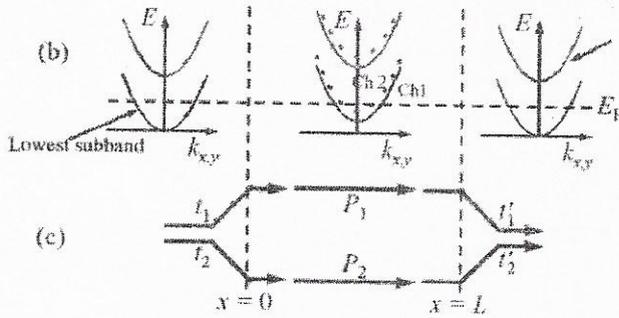
أولاً- اكتب العلاقة التي تربط بين طول موجة دوبروي من أجل إلكترون يتحرك في بنية نصف ناقل نانوية الأبعاد بدلالة كتلته الفعّالة التي يمكن أن تختلف عن كتلته في الحلاء ثمّ أعط تفسيراً فيزيائياً لها مع ذكر الأمثلة والرسم.

ثانياً- صنّف نظم النقل الإلكتروني مع الشرح المفصّل تبعاً للعلاقة بين الأطوال المميزة للإلكترون المتحرك في نبيطة نانوية وأبعادها؛ على فرض أنّ انتقال الإلكترون يجري على طول بعد واحد، في الاتجاه x .



السؤال الثالث: (35 درجة):

أولاً- عرّف ترانزستورات التداخل الكومومي QUIT وشرح مبدأ عملها. ثانياً- صيّف الرسم التخطيطي الموضح بالشكل المجاور.
ثالثاً- وضح ماذا يحدث لدى تطبيق جهد انحياز على البوابة وكتب علاقة أطيف الطاقة الإلكترونية الموافقة مع شرح ما يلزم.



رابعاً- يُعطى معامل النفوذ الكلي من أجل النبيطة المدروسة بالعلاقة $T(E) = 2 |t_1 t_1'|^2 (1 + \cos \theta)$ ، والمطلوب تفسير الطرف الأيمن لها واستنتاج علاقة الزاوية θ بدلالة السرعة الإلكترونية وفق الاتجاه x وطول النبيطة التي شطرت القناة والطاقت مع شرح ما يلزم.

خامساً- اكتب علاقة لاندواين بدلالة العلاقة المعطاة في الطلب الرابع ثمّ استنتج قيمتها العظمى وقيمتها الدنيا مع شرح المعنى الفيزيائي لهما.

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

أولاً- النقطة الكمومية هي جملة مادية تُحبس الإلكترونات فيها في الاتجاهات كافة؛ وتشمل: الجُذر النانوية نصف الناقلية وذاتية التشكل، والعناقيد، والبلورات النانوية، الخ.

ثانياً- يمكن تصنيع النقاط الكمومية بطرائق مختلفة، بما فيها الطريقة المباشرة. نبدأ بتركيب ذي إلكترونات ثنائية البعد ثم نستخدم عملية تنميش وإزالة لفرض قيود هندسية على الإلكترونات في الاتجاهين الإضافيين. وتستطيع بوابة فلزية صغيرة أيضاً، تُصنَّع على تركيب متغاير ثنائي البعد، تأمين الحبس الإلكتروني الضروري وذلك تحت تأثير جهد سالب يُطبَّق على البوابة. أهم أنواع النقاط الكمومية هي ثلاثة: جزيرة نانوية- تشكَّلت ذاتياً في نظام إنماءٍ خاص، وبلورات نانوية في مادة غروية، و"صندوق نانوي" تمَّ تحضيره بطريقة مضبوطة من تركيب متغاير ثنائي- البعد (ك تقنية التنميش والإزالة). وأبرز ما يُميِّز النقاط الكمومية يكمن في أن كل درجات الحرية لانتشار الإلكترون تكون مُكمَّاة إذا كان الكمون الحابس عميقاً وأمكن مقارنة أبعاد التركيب فيه مع طول موجة دوبروي للإلكترون.

ثالثاً- يمكن للتيار الكهربائي الجريان في الذرة الضخمة بفضل عبور الإلكترونات بالنفق بين المستويات الكمومية العائدة للذرة الضخمة.

ويحدث نقل الشحنة دوماً على هيئة كمَّات من الشحنة العنصرية للإلكترون. وليس لهذا التقطُّع أهمية عملية من أجل تيار يتدفق في مواد حجمية، وفي تراكيب ثنائية- البعد، ولا حتى في أسلاك كمومية، لأن أعداد الإلكترونات المنتقلة كبيرة. فنقل الشحنة في جُمَلٍ نقطية- كمومية مختلف تماماً. في الحقيقة، إنه يحدث كعبور إلكترون بالنفق من مهبطٍ عبر النقطة الكمومية إلى مصعدٍ. أي أن التباعد البيني بين المهبط والمصعد يجب دراسته بمثابة حاجز كمونٍ تنغمس فيه نقطة كمومية.

لقد وجدنا عند دراسة مفعول النفق أن احتمالية العبور بالنفق تتعلق بسماكة الحاجز وارتفاعه بشكل كبير جداً:

○ إذ من أجل سماكة وارتفاع كبيرين كفايةً، فإن العبور بالنفق يُسحق، ولكن احتمالية العبور بالنفق من خلال حالة متقطعة متوضِّعة في الحاجز تكون أعلى بكثير.

○ يمكن عدَّ عملية النفق بأكملها بمثابة عملية متتالية: اقتناص إلكترون من المهبط إلى الحالة المتوضِّعة ثم إصدارها إلى المصعد. وبالنتيجة، أسهل طريقة لنقل الإلكترونات من المهبط إلى المصعد هي العبور بالنفق عبر النقطة الكمومية.

○ وبعد ذلك، يمنع الإلكترون المُقتنص بالنقطة الكمومية عبور الإلكترونات الأخرى بالنفق منعاً تاماً.

○ ويحدث نقل إلكتروني بأسلوب مترابط للغاية- إلكترونات- إلكترونات- على الأقل في درجات الحرارة المنخفضة.

○ وبهذه الطريقة، يجري التيار الكهربائي عبر نقطة كمومية وفق نظام النقل الإلكتروني الفردي.

رابعاً- إن المميزات الرئيسة للخصائص الضوئية للنقاط الكمومية تنبثق من

التكمية الإلكترونية والثقبية:

إذ تأخذ طاقات الحاجز في نقاط كمومية تمَّ تحضيرها باستعمال تركيب متغاير

من النوع-I الشكل الآتي:

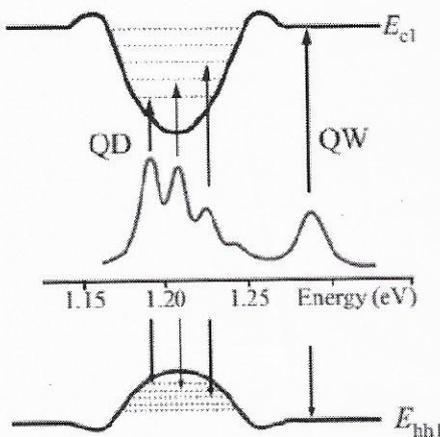
$$E_e^{QD} = E_g^{QD} + \varepsilon_n(n_1, n_2, n_3), \quad E_h^{QD} = -\varepsilon_p(n'_1, n'_2, n'_3),$$

حيث E_g^{QD} الفجوة الطاقية الأساسية لمادة النقاط الكمومية؛ وتكون

الطاقة E_g^{QD} من أجل تركيب متغاير من النوع-I أقل من الفجوة الطاقية

للمادة المحيطة التي تنغمس فيها النقاط الكمومية، والطاقات ε_p و ε_n

تتعلقان بمجموعة ثلاثة أعداد كمومية منفصلة؛ $\{n_1, n_2, n_3\}$



و $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ من أجل الإلكترونات والثقوب، على الترتيب. وتتحدد التابعية النوعية للطاقتين E_c^{QD} و E_h^{QD} للأعداد الكمومية بالمواد المستخدمة في كلٍ من النقاط الكمومية ومحيطها، وبهندسة هذه النقاط، الخ. (8)

→ يمكن استعمال نموذج التابيعيات من الشكل $V(\vec{r}) = 0$ داخل النقطة الكمومية و $V(\vec{r}) = \infty$ خارجها) من أجل تقدير المستويات الطاقية. وبسبب هذه الأطياف الطاقية المتقطعة تتأثر النقاط الكمومية قبل كل شيء مع فوتونات الطاقات المتقطعة: (7)

$$\hbar\omega = E_c^{QD} - E_h^{QD};$$

ومن ثم

$$\hbar\omega \equiv \frac{2\pi\hbar c}{\lambda} = E_g^{QD} + \varepsilon_n(n_1, n_2, n_3) + \varepsilon_p(n'_1, n'_2, n'_3),$$

حيث c سرعة انتشار الضوء في الخلاء و λ طول موجة الضوء.

إن التوليفات المختلفة للأعداد الكمومية $\{n_1, n_2, n_3\}$ و $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ تعطي سلسلةً من الخطوط الطيفية الضوئية التي من أجلها يكون التأثير بين النقاط الكمومية والضوء فعالاً كفايةً.

من المهم الإشارة إلى حقيقة أن المتراجحة $E_g^{QD} < E_g$ تدل ضمناً على أن الضوء المتأثر مع النقاط الكمومية لا يمتص من قبل المادة المحيطة بها؛ والشكل المعطى يوضح هذه الاعتبارات ويأخذها بالحسبان؛

→ إذ تظهر فيه المنحنيات العامة الممكنة لعصابة الناقلية، E_c ، وعصابة التكافؤ لتقرب ثقيل، E_{hh} ، الجزء العلوي من الشكل.

→ وتمثل البئر الكمومية من أجل الإلكترونات والثقوب كمونات الحصر للنقطة الكمومية.

→ كما تظهر في الشكل مستويات كمّاء من أجل الإلكترونات والثقوب؛ إذ تُشير الأسهم إلى الانتقالات الضوئية الممكنة بين حالات كمّاء مختلفة، ومن أجل كل من هذه الانتقالات يظهر خط طيفي مميز للطيف الضوئي؛

→ فمثلاً، تنشأ من أجل نقطة كمومية من مادة InGaAs (الضيقة الفجوة الطاقية) منمّاء داخل بئر كمومي من مادة GaAs (الواسعة الفجوة الطاقية) خطوط طيفية في منطقة طاقات الفوتون من 1.1 eV إلى 1.3 eV، كما يوضح الشكل المعطى.

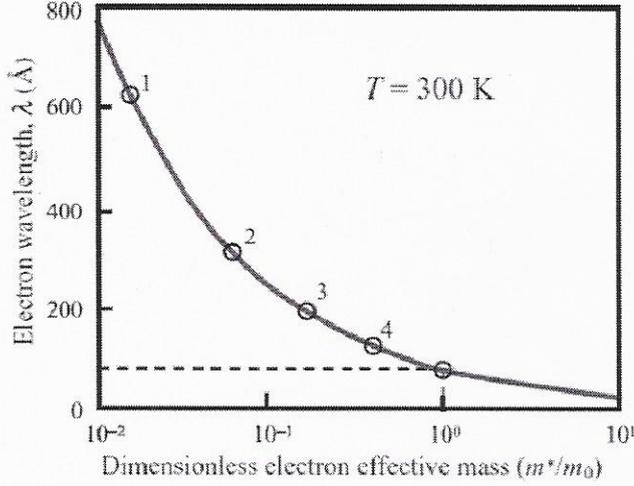
→ إذ يتعلق عرض الخطوط الطيفية الناتجة في المقام الأول بعاملين؛ يكمن الأول في أن سبب تعرّض الخطوط الطيفية هو عمليات الاسترخاء في الجملة المدروسة، والعامل الثاني الذي يُعدُّ اعتيادياً في تجارب التيار الضوئي يكمن في أنّ الضوء يتأثر مع عدد كبير من النقاط الكمومية المتباينة في أبعادها بعض الشيء؛ وهذا ما يُسبب تبايناً في مواقع المستويات الطاقية وتعرّضاً خطئياً إضافياً.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: 20 درجة

أولاً- اكتب العلاقة التي تربط بين طول موجة دوبروي من أجل إلكترون يتحرك في بنية نصف ناقل نانوية الأبعاد بدلالة كتلته الفعالة (يمكن أن تختلف عن كتلته في الخلاء) ثم أعط تفسيراً فيزيائياً لها مع ذكر الأمثلة والرسم.
يُعدُّ طول موجة دوبروي لإلكترون متوقَّف في جسم صلب الطول الأكثر أهمية؛ فمن أجل إلكترون في بنية نانوية نصف ناقلة كتلته الفعالة m^* يكون طول موجة دوبروي λ عادةً أكبر منه من أجل إلكترون حر λ_0 :

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m^*E}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{m_0}{m^*}}; \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0E}}$$

حيث E طاقة الإلكترون و m_0 كتلة الإلكترون في الخلاء.



نستنتج من العلاقة الأخيرة أنَّ قيمة λ تتناسب عكساً مع الجذر التربيعي للكتلة الفعالة؛ حيث يوضح الشكل المجاور ذلك: تُشير النقاط من 1 إلى 4 الظاهرة على المنحني للأطوال الموجية من أجل الإلكترونات في InSb و GaAs و GaN و SiC على الترتيب. لقد استخدمنا من أجل هذه المواد الكتل الفعالة، m^*/m_0 ، المساوية (0.014)، و (0.06)، و (0.172)، و (0.41)، على الترتيب؛ وافترضنا أن طاقة الإلكترون تساوي $E = k_B T$ ، حيث $T = 300K$ درجة حرارة الوسط المحيط و k_B ثابت بولتزمان.

نلاحظ أن طول موجة دوبروي لإلكترون في أنصاف النواقل النموذجية ذات الكتلة الفعالة m^* الواقعة في

المجال $m_0 (0.01 - 1)$ يساوي $(73 - 730) \text{ \AA}$ ، أي إنه فعلاً أكبر بكثير من ثابت الشبكة البلورية من أجل المواد المدرجة في الجدول 4-8. وحالما تنخفض درجة الحرارة إلى 3 K يزداد طول موجة دوبروي بمقدار مرتبة واحدة. وهكذا يصبح الطول الموجي قريباً من أبعاد تراكيب ونبائط نصف ناقلة تم تصنيعها بتكنولوجيا التصنيع النانوية الحديثة.

ثانياً- صنّف نظم النقل الإلكتروني مع الشرح المفصّل تبعاً للعلاقة بين الأطوال المميزة للإلكترون المتحرك في نبيطة نانوية وأبعادها؛ على فرض أنَّ انتقال الإلكترون يجري على طول بعد واحد، في الاتجاه x .

1. نظم النقل الكمومية والميزوسكوبية:

يمكننا تعيين نظامي النقل الإلكتروني غير التقليديين - الكمومي والميزوسكوبي وفق الآتي:

- إذا كان طول موجة دوبروي يفوق الطول المفترض للنبيطة L_x ؛ $\lambda \geq L_x$ ، فإن المسار الحر الوسطي الإلكتروني يفوق طول موجة دوبروي الموافقة بكثير، $\lambda \gg l_e$ ، وعندها يوصف النقل الإلكتروني بنظام النقل الباليستي الكوانتي.
- وإذا كان طول الترابط l_e (مقدار التباين الطوري) يفوق L_x و λ ؛ $l_e > L_x$ ، فإن النقل الإلكتروني يوصف بنظام النقل الميزوسكوبي.

2. نظام النقل الإلكتروني التقليدي:

- في الحالة التي يكون فيها البعد L_x أكبر من طول التباين الطوري؛ $L_x > l_e$ ، يوصف النقل الإلكتروني بالنظام التقليدي.

■ وإذا كان البعد L_x أقل من المسار الحر الوسطي؛ $l_e > L_x$ ، فيوصف النقل الإلكتروني بالنظام الباليستي التقليدي الذي يعني أن بمقدور الإلكترونات الانتقال في النبيلة على طول المساط التقليدي من دون تصادمات.

■ إذا كان البعد L_x أكبر بكثير من المسار الحر الوسطي؛ $L_x \gg l_e$ ، فإن النقل الإلكتروني يكون من طبيعة انتشارية.

■ وإذا كان $L_x \sim l_e \gg l_e$ ، فإن الإلكترونات لا تفقد طاقاتها أثناء حركتها عبر المقطعين الآخرين للنبيلة (المسارات العرضانية العمودية على طول النبيلة) - y و z .

■ ويسمى مثل هذا النقل نقلاً شبه باليستي. إذ بغياب الحقل الكهربائي تُحافظ الإلكترونات على طاقاتها في النظام شبه الباليستي.

■ بجمع المترجمات التي تمت مناقشتها أعلاه، يمكن أن نجد ثلاثة نظم للنقل التقليدي من أجل الإلكترونات؛ في بعد، وبعدين، وثلاثة أبعاد.

■ إذا كان كل بعد من البعدين العرضانيين L_y و L_z أكبر من طول موجة دوبروي ولكنهما من مرتبة أحد الأطوال التقليدية

المميزة، فإن نظام النقل الإلكتروني يوصف بما يسمى بمفعول البعد التقليدي العرضاني.

■ في هذه الحالة، تؤثر التصادمات مع حدود النبيلة على النقل الإلكتروني فيها. فمثلاً، إذا كان بعد عرضاني واحد أو كلا البعدين

العرضانيين من مرتبة المسار الحر الوسطي؛ $L_y, L_z \sim l_e$ ، فإن مقاومة النبيلة تتعلق بخصائص الحدود الجانبية للنبيلة بشدة.

■ يجدر بالذكر أن خشونة الحدود تزيد من المقاومة وتسيطر عليها بشكل كامل إذا تحققت المترجمة $L_y, L_z \ll l_e$.

■ إذا أصبحت الأبعاد العرضانية من رتبة أحد أطوال الانتثار، فإننا نتعامل مع نوع آخر من مفعول البعد التقليدي، لاسيما مفعولات

البعد الانتثاري التقليدي؛ فمثلاً، إذا كان البعد L_z أو L_y من مرتبة طول استرخاء الطاقة l_e ، فإن حدود النبيلة تضمن قناة استرخاء

طاقة إضافية. يُسيطر مفعول البعد الانتثاري هذا على الطاقة الوسطية للإلكترونات اللامتوازنة ويتحكم بها.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: 35 درجة

1. هي نبيلة ميزوسكوبية تعتمد في عملها على ظاهرة النقل الإلكتروني الباليستي الكمومي ويكون طول الترابط l_e ، فيها أكبر من البعد المميز للنبيلة L ؛ $l_e > L$ ، ويتجلى مبدأ عملها في التحكم بنمط تداخل إلكترونات الناقلية (حاملات التيار الكهربائي) بجهد خارجي.

2. يوضح الشكل (a) المعطى رسماً تخطيطياً لنبيلة تداخل - كمومي بقناتين؛

■ وهذه النبيلة هي ترانزستور حقلي FET عادي بقناة قصيرة وحاجز مواز لاتجاه التيار.

■ وهذا الحاجز منغمس في المنطقة الوسطى من النبيلة ويشطر القناة الرئيسة إلى قناتين: 1 و 2.

■ يوجد أيضاً تماسان على القناة الرئيسة، هما المنبع والمصرف. والبوابة تقع في أعلى النبيلة.

■ يؤدي تطبيق جهد على البوابة إلى تخريب تناظر القناتين 1 و 2. والمسافة بين التماسين، L ، تحقق المترجمة المذكورة

أعلاه. $l_e > L$

■ فضلاً عن أن عرض القناة الأساسية وعرضي القناتين المنشطرتين صغيرة إلى درجة يوجد عندها تكمية حالات

إلكترونية عرضانية في الاتجاه z . ويوضح الشكل (b) عصابتين جزئيتين ثنائيتي البعد؛ إذ تم رسم العصابات

الجزئية، $E(k_x, k_y)$ ، وطاقة فرمي، F_F ، من أجل ثلاث مناطق رئيسية للنبيلة؛ ويمكننا أن نفرض، بغرض التبسيط،

أن أخفض عصابة جزئية فقط في كل منطقة من مناطق النبيلة تكون مسكونة بالإلكترونات.

3. إذا طُبّق الآن جهد على البوابة، فإن قاع كل من العصابتين الجزئيتين، ϵ_1 و ϵ_2 ، في المنطقة الوسطى من أجل القناتين 1

و 2 يكون مختلفاً عن قاع كل من العصابتين الجزئيتين، ϵ_1 و ϵ_2 ، في المنطقتين الواقعتين على يسارهما ويمينهما بشكل

$$E = \epsilon_1 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,1}^2 + k_y^2) = \epsilon_2 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,2}^2 + k_y^2)$$

حيث E طاقة إلكترون وارد، و k_x و k_y مركبتا متجهته الموجية في مستوي النبيلة.

من الواضح أن الطاقة E لا تتغير على طول القناة؛ كما أن المركبة k_y مُصانة، لأننا فرضنا عدم وجود قوى تؤثر على طول الاتجاه y . إذن، تسمح المعادلة الأخيرة للمركبات k_x فقط بأن تختلف عن بعضها البعض في القنوات.

تمثل الزاوية θ الانزياح الطوري النسبي للقناتين (فرق الطور بين القناتين) وتساوي $\theta = (k_{x,2} - k_{x,1})L$

4. إذا أدخلنا السرعة الإلكترونية الوسطية، $v_x = \frac{\hbar(k_{x,1} + k_{x,2})}{2m^*}$ يمكننا التعبير عن الفارق بين المتجهتين الموجبتين بالمساواة:

$$\theta = \frac{L}{v_x} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\hbar} \quad \text{وبالتالي يأخذ الانزياح الطوري الشكل:} \quad k_{x,2} - k_{x,1} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\hbar v_x}$$

إن منشأ الانزياح الطوري واضح: فإذا كانت $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ ، فإن فارقاً بين الطاقات الحركية في القناتين يُسبب انزياحات مختلفة للأمواج القادمة إلى منطقة النبيلة اليمنى؛ وبالطبع، هذه الفوارق الطورية تؤدي إلى تداخل كمومي.

5. ينتج الحد الثاني الواقع ضمن قوسين صغيرين، في الطرف الأيمن من

المعادلة $G = 4e^2 / h T(E) = 4e^2 / h |t_1 t_2|^2 (1 + \cos \theta)$ ، من التداخل الإلكتروني. إذ يمكن أن نرى أن التداخل يتحكم بناقلية النبيلة. فإذا كان الانزياح الطوري للأمواج المنشطرة معدوماً، $\theta = 0$ ($\Phi_{12} = 0$)، فإن التداخل بناءً، ومن ثمّ تبلغ

الناقلية قيمةً قصوى: $G_{\max} = \frac{8e^2}{h} |t_1 t_2|^2$ أمّا إذا كان $\theta = \pi$ ، أي إذا تحققت المساواة: $e\Phi_{12} = \frac{\hbar\pi v_x}{L}$ (تمثل

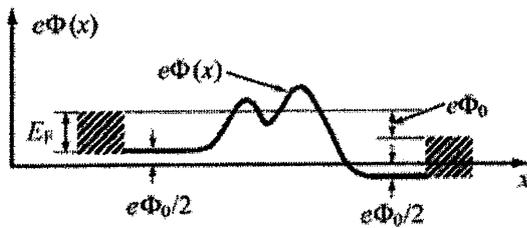
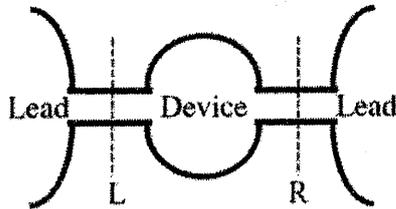
القيمة Φ_{12} الفارق بين الكمونات المتوسطة في القنوات الذي يُحدد النفوذ عبر النبيلة)، فإنّ التداخل هدام ومن ثمّ تتلاشى الناقلية.

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

السؤال الأول:

أولاً- أكتب العلاقة التي تربط بين طول موجة دوبروي من أجل إلكترون يتحرك في بنية نصف ناقل نانوية الأبعاد بدلالة كتلته الفعّالة (يمكن أن تختلف عن كتلته في الخلاء) ثم أعط تفسيراً فيزيائياً لها مع ذكر الأمثلة والرسم.
ثانياً- صنّف نظم النقل الإلكتروني مع الشرح المفصّل تبعاً للعلاقة بين الأطوال المميزة للإلكترون المتحرك في نبيطة نانوية وأبعادها؛ على فرض أنّ انتقال الإلكترون يجري على طول بعد واحد، في الاتجاه x .

السؤال الثاني:



نستخدم من أجل دراسة النقل الباليستي الكوموي وعلاقة لاندير نبيطة ميزوسكوبية نانوية البنية، يوضح الشكل المجاور رسماً تخطيطياً لها بالإضافة إلى شكل الطاقة الكامنة الموافق لدى انحيازها بالجهد Φ_0 .

أولاً- وضح مما تتألف الجملة المدروسة بالتفصيل ثم صّف شكل الطاقة الكامنة الموضّح بالجزء السفلي من الشكل المجاور بالتفصيل أيضاً.

ثانياً- تعطى علاقة كثافة التيار الكليّ المار في النبيطة المدروسة بالشكل

$$J = -e \frac{m^* k_B T}{\pi \hbar^2} \int \frac{dE_{||}}{2\pi \hbar} T(E_{||}) \ln \left[\frac{1 + \exp \left(\frac{E_F - E_{||} + \frac{1}{2} e \Phi_0}{k_B T} \right)}{1 + \exp \left(\frac{E_F - E_{||} - \frac{1}{2} e \Phi_0}{k_B T} \right)} \right]$$

والمطلوب: شرح هذه العلاقة بالتفصيل.

ثالثاً- تُعطى علاقة الناقلية في درجات الحرارة المنخفضة بالشكل: $G = \frac{e^2}{h} \sum_{n,m,s} T(E_F, n, m) = 2 \frac{e^2}{h} \sum_{n,m} T(E_F, n, m)$ حيث يمتد المجموع على الحالات الطاقية الإلكترونية (n, m) ذات

الطاقات $E < E_F$ فقط؛ والمطلوب، تفسير هذه العلاقة بالتفصيل.

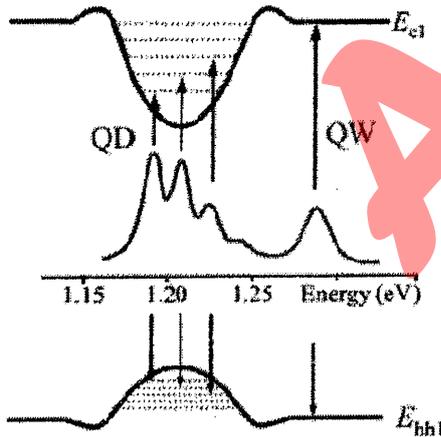
السؤال الثالث:

أولاً- ماذا يُقصد بالنقطة الكمومية وماذا تشمل؟.

ثانياً- اذكر كيف تُصنّع النقاط الكمومية وأنواعها الأساسية وأبرز ما يميّزها.

ثالثاً- إذا علمت أنّه يمكن عدّ النقطة الكمومية ذرة ضخمة، فادرس إمكانية مرور التيار الكهربائي فيها.

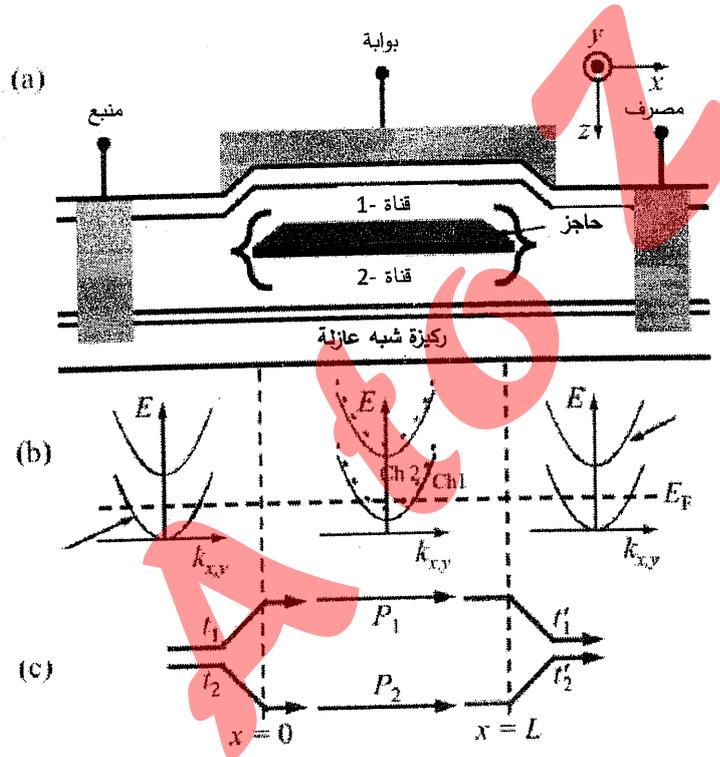
رابعاً- ادرس إمكانية التحكم الضوئي بالنقاط الكمومية والتوابع الإلكترونية-الضوئية لنقاط صفرية البعد مستفيداً من الشكل المجاور وأعط مثلاً مناسباً على ذلك.



يتبع على الوجه الثاني

السؤال الرابع:

1. عرّف ترانزستورات التداخل الكومومي QUIT وأشرح مبدأ عملها.
2. صيغ الرسم التخطيطي الموضح أدناه.
3. وضح ماذا يحدث لدى تطبيق جهد انحياز على البوابة واكتب علاقة أطيف الطاقة الإلكترونية الموافقة مع شرح ما يلزم.
4. يُعطى معامل النفوذ الكلي من أجل النبيطة المدروسة بالعلاقة $T(E) = 2 |t_1 t_1'|^2 (1 + \cos \theta)$ ، والمطلوب تفسير الطرف الأيمن لها واستنتاج علاقة الزاوية θ بدلالة السرعة الإلكترونية وفق الاتجاه x وطول النبيطة التي شطرت القناة والطاقات مع شرح ما يلزم.
5. اكتب علاقة لاندوير بدلالة العلاقة المعطاة في الطلب 4 ثم استنتج قيمتها العظمى وقيمتها الدنيا مع شرح المعنى الفيزيائي لهما.

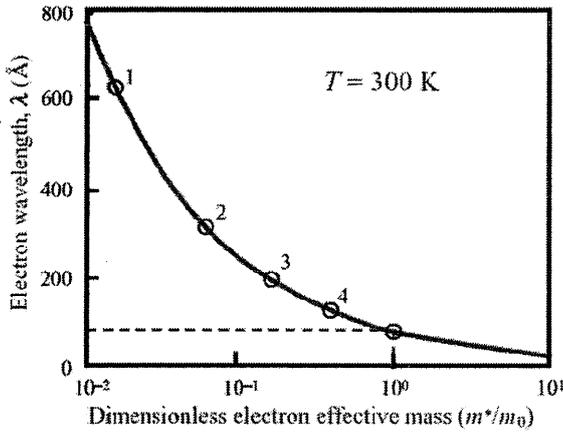


ملاحظة: للرموز المستخدمة مدلولاتها الفيزيائية المعروفة

بالتوفيق والنجاح للجميع

طرطوس في 2022/07/17

أ.د. حسن عبد الكريم سليمان



أولاً- يُعدُّ طول موجة دوبروي لإلكترون متوقِّفٍ في جسمٍ صلبٍ الطول الأكثر أهمية؛ فمن أجل إلكترونٍ في بنية نانوية نصف ناقلة كتلته الفعالة m^* يكون طول موجة دوبروي λ عادةً أكبر منه من أجل إلكترونٍ حرٍ λ_0 :

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m^*E}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{m_0}{m^*}}; \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0E}}$$

حيث E طاقة الإلكترون و m_0 كتلة الإلكترون في الخلاء.

نستنتج من العلاقة الأخيرة أنَّ قيمة λ تتناسب عكساً مع الجذر التربيعي للكتلة الفعالة؛ حيث يوضح الشكل المجاور ذلك: تُشير النقاط من 1 إلى 4 الظاهرة على المنحني للأطوال الموجية من أجل الإلكترونات في GaAs و InSb و

GaN و SiC على الترتيب. لقد استخدمنا من أجل هذه المواد الكتل الفعالة، m^*/m_0 ، المساوية (0.014)، و (0.06)، و (0.172)، و

(0.41)، على الترتيب؛ وافترضنا أن طاقة الإلكترون تساوي $E = k_B T$ ، حيث $T = 300K$ درجة حرارة الوسط المحيط و k_B ثابت بولتزمان.

نلاحظ أن طول موجة دوبروي لإلكترونٍ في أنصاف النواقل النموذجية ذات الكتلة الفعالة m^* الواقعة في المجال $(0.01-1)m_0$

يساوي $(73-730) \text{Å}$ ، أي إنه فعلاً أكبر بكثير من ثابت الشبكة البلورية من أجل المواد المُدرجة في الجدول 4-8. وحالما تنخفض درجة

الحرارة إلى $3K$ يزداد طول موجة دوبروي بمقدار مرتبة واحدة. وهكذا يُصبح الطول الموجي قريباً من أبعاد تراكيب ونبائط نصف ناقلة تم

تحصيلها بتكنولوجيا التصنيع النانوية الحديثة.

ثانياً- صنّف نظم النقل الإلكتروني مع الشرح المفصّل تبعاً للعلاقة بين الأطوال المميزة للإلكترون المتحرك في نبيطة نانوية وأبعادها؛ على فرض

أنَّ انتقال الإلكترون يجري على طول بعد واحد، في الاتجاه x .

1. نظم النقل الكمومية والميزوسكوبية:

يمكننا تعيين نظامي النقل الإلكتروني غير التقليديين - الكمومي والميزوسكوبي وفق الآتي:

■ إذا كان طول موجة دوبروي يفوق الطول المفترض للنبيطة L_x ؛ $\lambda \geq L_x$ ، فإن المسار الحر الوسطي الإلكتروني يفوق طول موجة

دوبروي الموافقة بكثير، $\lambda \gg l_e$ ، وعندها يوصف النقل الإلكتروني بنظام النقل الباليستي الكوانتي.

■ وإذا كان طول الترابيط l_ϕ (مقدار التباين الطوري) يفوق L_x و λ ؛ $l_\phi > L_x$ ، فإن النقل الإلكتروني يوصف بنظام النقل

الميزوسكوبي.

2. نظام النقل الإلكتروني التقليدي:

■ في الحالة التي يكون فيها البعد L_x أكبر من طول التباين الطوري؛ $L_x > l_\phi$ ، يوصف النقل الإلكتروني بالنظام التقليدي.

■ وإذا كان البعد L_x أقل من المسار الحر الوسطي؛ $l_e > L_x$ ، فيوصف النقل الإلكتروني بالنظام الباليستي التقليدي الذي يعني أنَّ

بمقدور الإلكترونات الانتقال في النبيطة على طول المساقط التقليدية من دون تصادمات.

إذا كان البعد L_x أكبر بكثير من المسار الحر الوسطي؛ $L_x \gg l_e$ ، فإن النقل الإلكتروني يكون من طبيعة انتشارية.

وإذا كان $L_x \sim l_e \gg l_e$ ، فإن الإلكترونات لا تفقد طاقاتها أثناء حركتها عبر المقطعين الآخرين للنبيطة (المسارات العرضانية العمودية على

طول النبيطة) - y و z .

ويسمى مثل هذا النقل نقلاً شبيهاً بالباليستي. إذ بغياب الحقل الكهربائي تُحافظ الإلكترونات على طاقاتها في النظام شبه الباليستي.

بجمع المترجمات التي تمت مناقشتها أعلاه، يمكن أن نجد ثلاثة نظم للنقل التقليدي من أجل الإلكترونات؛ في بعدٍ، وبعدين، وثلاثة أبعاد.

إذا كان كل بعد من البعدين العرضيين L_x و L_y أكبر من طول موجة دوبروي ولكنهما من مرتبة أحد الأطوال التقليدية المميزة، فإن نظام النقل الإلكتروني يوصف بما يسمى بمفعول البعد التقليدي العرضي.

في هذه الحالة، تؤثر التصادمات مع حدود النبيلة على النقل الإلكتروني فيها. فمثلاً، إذا كان بعد عرضي واحد أو كلا البعدين العرضيين من مرتبة المسار الحر الوسطي؛ $L_x, L_y \sim l_0$ ، فإن مقاومة النبيلة تتعلق بخصائص الحدود الجانبية للنبيلة بشدة. يجدر بالذكر أن خشونة الحدود تزيد من المقاومة وتسيطر عليها بشكل كامل إذا تحققت المتراجحة $L_x, L_y \ll l_0$.

إذا أصبحت الأبعاد العرضية من مرتبة أحد أطوال الانتثار، فإننا نتعامل مع نوع آخر من مفعول البعد التقليدي، لاسيما مفعولات البعد الانتثاري التقليدية؛ فمثلاً، إذا كان البعد L_x أو L_y من مرتبة طول استرخاء الطاقة l_E ، فإن حدود النبيلة تضمن قناة استرخاء طاقة إضافية. يُسيطر مفعول البعد الانتثاري هذا على الطاقة الوسطية للإلكترونات اللامتوازنة ويتحكم بها.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (18 درجة)

8) أولاً- تتألف الجملة من توصيلتين يُطبَّق عليهما جهد انحياز، و"دليلي موجة إلكترونيين"؛ L و R (يمكن عدُّهما بمثابة أسلاك كمومية)، والنبيلة بحد ذاتها. ولتفادي ضرورة التوصيف المفصّل للتوصيلات نفترض أنها خزانات إلكترونية حيث تكون عمليات استرخاء الطاقة والاندفاع فعّالة إلى درجة تبقى عندها الإلكترونات في حالة توازن حتى في شروط الانحياز بالجهد المطبق المعطى.

إذن، يُفترض أن تكون الشروط الحدية عند السطح الفاصل بين التوصيلات والنبيلة معينةً بتابع توزّع فرمي المتوازن.

إنّ التركيز الإلكتروني في التوصيلات كبير جداً لدرجة أنّ الكمون الكهراكمي في كل توصيلة يجب عدُّه ثابتاً، كما في حالة فلز.

■ فإذا كان E_F طاقة فرمي للإلكترونات في التوصيلات بغياب الانحياز؛ فعند تطبيق جهد انحياز Φ_0 ، يُصبح مستوى فرمي

مساوياً في إحدى التوصيلتين $E - \frac{1}{2}e\Phi_0$ وفي التوصيلة الأخرى $E + \frac{1}{2}e\Phi_0$ ، كما يوضح الشكل المعطى.

■ ولذلك، تكون توابع التوزّع الإلكتروني في التوصيلتين اليسرى واليمنى من الشكل

$$F_F\left(E - \frac{1}{2}e\Phi_0 - E_F\right) \quad \text{و} \quad F_F\left(E + \frac{1}{2}e\Phi_0 - E_F\right)$$

على الترتيب، حيث E الطاقة الحركية للإلكترونات.

5) ثانياً- تُعدّ المعادلة المعطاة نتيجة مفيدة، تسمح بحساب الخاصية المميزة (تيار - جهد) لنبيلة نانوية البنية، وإيجاد تابعيتها لتركيز

الإلكترونات، ودرجة الحرارة، الخ؛ ومن المفيد الحصول على تيار محدود *Finite Current* في هذه النبيلة الواقعة تحت تأثير جهد

انحياز حيث لا يوجد تعبير، مما يعني أنّ النبيلة تمتلك مقاومة كهربائية يمكن تفسيرها بمعاملين؛ الأول بالانعكاس الكومومي

للموجات الإلكترونية داخل النبيلة، والثاني بعدد الإلكترونات المحدود الذي يمكن حقه في النبيلة.

يجدر بالذكر أنّ إعادة توزّع الشحنة الكهربائية لم تُدرس هنا، مما يعني أنّها فرضت تيارات صغيرة نسبياً.

5) ثالثاً- يسمى المعامل الواقع أمام إشارة المجموع في المعادلة؛ $G_0 = e^2 / h$ كمّ الناقلية الكهربائية حيث h ثابت بلانك.

إن كمّ الناقلية يساوي $G_0 = 39.6 \mu S$ ومقلوب هذا الكمّ يساوي $1/G_0 = 25.2 k\Omega$. تسمى المعادلة المعطاة عادةً علاقة لانداوير.

من الملائم أحياناً دراسة حالات إلكترونية توافق أعداد كمومية (n, m) مختلفة في إطار قنوات منفصلة لنقل الإلكترونات؛ وفي

هذا السياق، يمكن إعادة كتابة العلاقة الأخيرة بالشكل الآتي:

$$G = 2 G_0 \sum_{n,m} T_{n,m} \quad \text{with} \quad T_{n,m} = T(E_F, n, m),$$

حيث تُسهم كل قناة (n, m) في الناقلية، G ، بالمقدار $G_0 T_{n,m}$.

فإذا كانت القناة الموافقة للحالة الكمومية (n, m) شفافةً للإلكترونات، فإن $T_{n,m} = 1$ ، ومساهمة هذه القناة تساوي كمّ الناقلية.

يُعزى هذا النظام - نظام النقل الإلكتروني المدروس أعلاه إلى ما يسمى النقل الباليستي الكمومي أيضاً. وهكذا نجد أن نبيطةً نانويةً تتصف بنقلٍ باليستيٍّ كموميٍّ تُبدي ناقليةً محدودة. وعموماً، تتعلق الناقلية بكل من: معامل النفوذ للنبيطة وبتتابع توزع فرمي في التوصيلات؛ وعلى وجه الخصوص، حتى وإن كانت النبيطة شفافةً للموجة الإلكترونية تماماً، $T=1$ ، فإن الناقلية تبقى محدودة وتساوي كم الناقلية G_0 . إنَّ أي زيادة في إسكان العصابات - الجزئية العلوية منخفضة البعد، تؤدي إلى سلوكٍ غير اعتيادي للناقلية: في الواقع، في درجة الحرارة المنخفضة، لاسيما عندما $k_B T \ll E_F$ ، فإن العصابات - الجزئية التي من أجلها طاقة قيعانها أقل من طاقة فرمي، $\epsilon_{n,m} < E_F$ ، تكون هي المشغولة دون سواها بالإلكترونات. وإذا بدأت عصابة - جزئية جديدة بالانشغال، بنتيجة تغير طاقة فرمي F_F ، فإن ناقلية النبيطة تزداد بأسلوبٍ شبيهٍ بتتابع - الخطوة بصورة مستقلة عن كمية الإلكترونات التي تشغل هذه العصابة - الجزئية الجديدة. وفي الختام، يجدر بالذكر أن علاقة لاندواير تصف نقلاً كمومياً للإلكترونات في نبائط ميزوسكوبية؛ وهي صالحة من أجل درجة حرارة منخفضةٍ وعند تطبيق جهد انحيازٍ صغيرٍ.

وبما أنَّ قوى فاندرفالس ضعيفة نسبياً، فإن جزيئات الفولورين تنتشر بسهولة على السطح ويمكنها أن تُشكِّل جزراً مترابطة سلسلية بتركيز كبيرة وتستطيع كريات بكي نفسها أن تُشكِّل بلورات مكعبية متمركزة الوجوه FCC في درجة حرارة الغرفة بطاقة تماسك كبيرة (1.6 eV لكل جزيء). من المهم الإشارة إلى أنَّ ثابت الشبكة البلورية للبلورة C_{60} يأخذ قيمة كبيرة غير اعتيادية، تبلغ نحو 1.42 nm. وبالنتيجة الفولورينات معتدلة كهربائياً وتُعدُّ مكونات نانوية مستقرة جداً، تتصف بعدد من الخصائص الفيزيائية والكيميائية الرائعة التي يمكن التحكم بها واستخدامها في تطبيقات علم النانو.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: 30 درجة

أولاً - النقطة الكمومية هي جملة مادية تُحبس الإلكترونات فيها في الاتجاهات كافة؛ وتشمل: الجُذر النانوية نصف الناقلية وذاتية التشكل، والعناقيد، والبلورات النانوية، الخ.

ثانياً - يمكن تصنيع النقاط الكمومية بطرائق مختلفة، بما فيها الطريقة المباشرة. نبدأ بتركيب ذي إلكترونات ثنائية البعد ثم نستخدم عملية تنميش وإزالة لفرض قيودٍ هندسيةٍ على الإلكترونات في الاتجاهين الإضافيين. وتستطيع بوابة فلزية صغيرة أيضاً، تُصنَّع على تركيب متغاير ثنائي البعد، تأمين الحبس الإلكتروني الضروري وذلك تحت تأثير جهد سالب يُطبَّق على البوابة. أهم أنواع النقاط الكمومية هي ثلاثة: جزيرة نانوية - تشكَّلت ذاتياً في نظام إنماءٍ خاصٍ، وبلورات نانوية في مادة غروية، و"صندوق نانوي" تم تحضيره بطريقة مضبوطة من تركيب متغاير ثنائي - البعد (كثنية التنميش والإزالة).

وأبرز ما يُميِّز النقاط الكمومية يكمن في أن كل درجات الحرية لانتشار الإلكترون تكون مُكمَّاة إذا كان الكمون الحابس عميقاً وأمكن مقارنة أبعاد التركيب فيه مع طول موجة دوبروي للإلكترون.

ثالثاً - يمكن للتيار الكهربائي الجريان في الذرة الضخمة بفضل عبور الإلكترونات بالنفق بين المستويات الكمومية العائدة للذرة الضخمة. ويحدث نقل الشحنة دوماً على هيئة كمَّات من الشحنة العنصرية للإلكترون. وليس لهذا النقط أهمية عملية من أجل تيار يتدفق في مواد حجمية، وفي تراكيب ثنائية - البعد، ولا حتى في أسلاك كمومية، لأن أعداد الإلكترونات المنتقلة كبيرة.

→ فنقل الشحنة في جُمَلٍ نقطية - كمومية مختلف تماماً. في الحقيقة، إنه يحدث كعبور إلكترون بالنفق من مهبطٍ عبر النقطة الكمومية إلى مصعدٍ.

→ أي أن التباعد البيني بين المهبط والمصعد يجب دراسته بمثابة حاجز كمونٍ تنغمس فيه نقطة كمومية.

→ لقد وجدنا عند دراسة مفعول النفق أن احتمالية العبور بالنفق تتعلق بسماكة الحاجز وارتفاعه بشكل كبير جداً:

○ إذ من أجل سماكة وارتفاع كبيرين كفايةً، فإن العبور بالنفق يُسحق،

○ ولكن احتمالية العبور بالنفق من خلال حالة متقطعة متوضعة في الحاجز تكون أعلى بكثير.

○ يمكن عدّ عملية النفق بأكملها بمثابة عملية متتالية: اقتناص إلكترون من المهبط إلى الحالة المتوّصّعة ثم إصدارها إلى المصدر.

- وبالنتيجة، أسهل طريقة لنقل الإلكترونات من المهبط إلى المصدر هي العبور بالنفق عبر النقطة الكمومية.
- وبعد ذلك، يمنع الإلكترون المُقتنص بالنقطة الكمومية عبور الإلكترونات الأخرى بالنفق منعاً تاماً.
- ويحدث نقل إلكتروني بأسلوب مترابط للغاية- إلكتروناً- إلكتروناً- على الأقل في درجات الحرارة المنخفضة.
- وبهذه الطريقة، يجري التيار الكهربائي عبر نقطة كمومية وفق نظام النقل الإلكتروني الفردي.

رابعاً- (14) إن المميزات الرئيسة للخصائص الضوئية للنقاط الكمومية تنبثق من التكمية الإلكترونية والتقبية: إذ تأخذ طاقات الحاجز في نقاط كمومية تمّ تحضيرها باستعمال تركيب متغاير من النوع-I الشكل الآتي:

$$E_e^{\text{QD}} = E_g^{\text{QD}} + \varepsilon_n(n_1, n_2, n_3), \quad E_h^{\text{QD}} = -\varepsilon_p(n'_1, n'_2, n'_3),$$

حيث: E_g^{QD} الفجوة الطاقية الأساسية لمادة النقاط الكمومية؛ وتكون الطاقة E_g^{QD} من أجل تركيب متغاير من النوع-I أقل من الفجوة الطاقية E_g للمادة المحيطة التي تنغمس فيها النقاط الكمومية، والطاقتان ε_n و ε_p تتعلقان بمجموعة ثلاثة أعداد كمومية منفصلة؛ $\{n_1, n_2, n_3\}$ و $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ من أجل الإلكترونات والثقوب، على الترتيب.

→ وتتحدد التابعية النوعية للطاقتين E_e^{QD} و E_h^{QD} للأعداد الكمومية بالمواد المستخدمة في كلٍ من النقاط الكمومية ومحيطها، ويهندس هذه النقاط، الخ.

→ يمكن استعمال نموذج التابعيات من الشكل $V(\vec{r})=0$ داخل النقطة الكمومية و $V(\vec{r})=\infty$ خارجها) من أجل تقدير المستويات الطاقية. وبسبب هذه الأطياف الطاقية المتقطعة تتأثر النقاط الكمومية قبل كل شيء مع فوتونات الطاقات المتقطعة:

$$\hbar\omega = E_e^{\text{QD}} - E_h^{\text{QD}} ;$$

ومن ثمّ

$$\hbar\omega \equiv \frac{2\pi\hbar c}{\lambda} = E_g^{\text{QD}} + \varepsilon_n(n_1, n_2, n_3) + \varepsilon_p(n'_1, n'_2, n'_3),$$

حيث c سرعة انتشار الضوء في الخلاء و λ طول موجة الضوء.

إن التوليفات المختلفة للأعداد الكمومية $\{n_1, n_2, n_3\}$ و $\{n'_1, n'_2, n'_3\}$ تعطي سلسلةً من الخطوط الطيفية الضوئية التي من أجلها يكون التأثير بين النقاط الكمومية والضوء فعالاً كفايةً.

من المهم الإشارة إلى حقيقة أن المتراجحة $E_g^{\text{QD}} < E_g$ تدل ضمناً على أن الضوء المتأثر مع النقاط الكمومية لا يُمتص من قبل المادة المحيطة بها؛ والشكل المعطى يوضح هذه الاعتبارات ويأخذها بالحسبان؛

→ إذ تظهر فيه المنحنيات العامة الممكنة لعصابة الناقلية، E_c ، وعصابة التكافؤ لثقب ثقيل، E_{hh} ، الجزء العلوي من الشكل.

→ وتُمثّل البئر الكمومية من أجل الإلكترونات والثقوب كمونات الحصر للنقطة الكمومية.

→ كما تظهر في الشكل مستويات مكّمة من أجل الإلكترونات والثقوب؛ إذ تُشير الأسهم إلى الانتقالات الضوئية الممكنة بين

حالات مكّمة مختلفة، ومن أجل كل من هذه الانتقالات يظهر خط طيفي مميز للطيف الضوئي؛

→ فمثلاً، تنشأ من أجل نقطة كمومية من مادة **InGaAs** (الضيقة الفجوة الطاقية) منمّاة داخل بئر كمومي من مادة **GaAs**

(الواسعة الفجوة الطاقية) خطوط طيفية في منطقة طاقات الفوتون من 1.1 eV إلى 1.3 eV، كما يوضح الشكل المعطى.

→ إذ يتعلق عرض الخطوط الطيفية الناتجة في المقام الأول بعاملين؛

- ✓ يكمن الأول في أن سبب تعرّض الخطوط الطيفية هو عمليات الاسترخاء في الجملة المدروسة،
 ✓ والعامل الثاني الذي يُعدُّ اعتيادياً في تجارب التيار الضوئي يكمن في أنّ الضوء يتأثر مع عدد كبير من النقاط الكمومية المتباينة في أبعادها بعض الشيء؛ وهذا ما يُسبب تبايناً في مواقع المستويات الطاقية وتعرّضاً خطئياً إضافياً.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الرابع: 27 درجة

1. (2) هي نبيطة ميزوسكوبية يستند مبدأ عمل QUIT على ظاهرة النقل الإلكتروني الباليستي الكومومي ويكون طول الترابط، l_p ، فيها أكبر من البعد المميز للنبيطة، $L: l_p > L$ ، ويتجلى مبدأ عملها في التحكم بنمط تداخل إلكترونات الناقلية (حاملات التيار الكهربائي) بجهد خارجي.

2. (4) يوضح الشكل (a) المعطى رسماً تخطيطياً لنبيطة تداخل- كمومي بقناتين؛
 ■ وهذه النبيطة هي ترانزستور حثلي FET عادي بقناة قصيرة وحاجز مواز لاتجاه التيار.
 ■ وهذا الحاجز منغمس في المنطقة الوسطى من النبيطة ويشطر القناة الرئيسية إلى قناتين: 1 و 2.
 ■ يوجد أيضاً تماسان على القناة الرئيسية، هما المنبع والمصرف. والبوابة تقع في أعلى النبيطة.
 ■ يؤدي تطبيق جهد على البوابة إلى تخريب تناظر القناتين 1 و 2. والمسافة بين التماسين، L ، تحقق المتراجحة المذكورة أعلاه.
 ■ فضلاً عن أن عرض القناة الأساسية وعرضي القناتين المنشطتين صغيراً إلى درجة يوجد عندها تكمية حالات إلكترونية عرضانية في الاتجاه z .

يوضح الشكل (b) عصابتين جزئيتين ثنائيتي البعد؛ إذ تم رسم العصابات الجزئية، $E(k_x, k_y)$ ، وطاقة فرمي، F_F ، من أجل ثلاث مناطق رئيسية للنبيطة؛ ويمكننا أن نفرض، بغرض التبسيط، أن أخفض عصابة جزئية فقط في كل منطقة من مناطق النبيطة تكون مسكونة بالإلكترونات.

3. (8) إذا طُبّق الآن جهد على البوابة، فإن قاع كل من العصابتين الجزئيتين، ϵ_1 و ϵ_2 ، في المنطقة الوسطى من أجل القناتين 1 و 2 يكون مختلفاً عن قاع كل من العصابتين الجزئيتين، ϵ_1 و ϵ_2 ، في المنطقتين الواقعتين على يسارهما ويمينهما بشكل عام؛ وعندها تأخذ أطيايف الطاقة الإلكترونية الشكل الآتي:

$$E = \epsilon_1 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,1}^2 + k_y^2) = \epsilon_2 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_{x,2}^2 + k_y^2),$$

حيث E طاقة إلكترون وارد، و k_x و k_y مركبتا متجهته الموجية في مستوى النبيطة.
 من الواضح أن الطاقة E لا تتغير على طول القناة؛ كما أن المركبة k_y مُصانة، لأننا فرضنا عدم وجود قوى تؤثر على طول الاتجاه y . إذن، تسمح المعادلة الأخيرة للمركبات k_x فقط بأن تختلف عن بعضها البعض في القنوات.

4. (7) تُمثّل الزاوية θ الانزياح الطوري النسبي للقناتين (فرق الطور بين القناتين) وتساوي

$$\theta = (k_{x,2} - k_{x,1}) L$$

$$\text{وإذا أدخلنا السرعة الإلكترونية الوسطية، } v_x = \frac{\hbar(k_{x,1} + k_{x,2})}{2m^*},$$

يمكننا التعبير عن الفارق بين المتجهتين الموجيتين بالمساواة الآتية: $k_{x,2} - k_{x,1} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\hbar v_x}$.

وبالتالي يأخذ الانزياح الطوري الشكل الآتي: $\theta = \frac{L}{v_x} \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\hbar}$.

إن منشأ الانزياح الطوري واضح: فإذا كانت $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ ، فإن farkاً بين الطاقات الحركية في القناتين يُسبب انزياحات مختلفة للأمواج القادمة إلى منطقة النبيطة اليمنى؛ وبالطبع، هذه الفوارق الطورية تؤدي إلى تداخل كمومي.

5. (6) ينتج الحد الثاني الواقع ضمن قوسين صغيرين، في الطرف الأيمن من المعادلة الأخيرة، من التداخل الإلكتروني. إذ يمكن أن نرى أن التداخل يتحكّم بناقلية النبيطة. فإذا كان الانزياح الطوري للأمواج المنشطرة معدوماً، $\theta = 0$ ($\Phi_{12} = 0$)، فإن

$$G_{\max} = \frac{8e^2}{h} |t_1 t_2|^2 \quad \text{التداخل بناءً، ومن ثمّ تبلغ الناقلية قيمةً قصوى:}$$

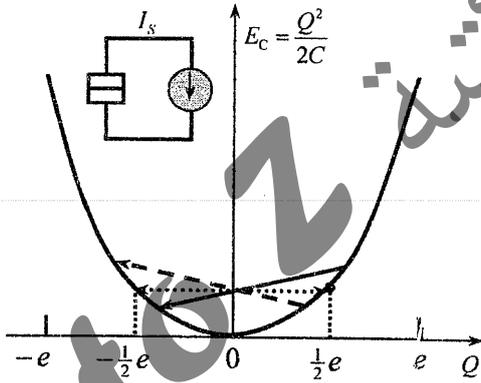
أمّا إذا كان $\theta = \pi$ ، أي إذا تحققت المساواة: $e\Phi_{12} = \frac{\hbar\pi v_x}{L}$ (تمثّل القيمة Φ_{12} الفارق بين الكمونات المتوسطة في القنوات الذي يُحدد النفوذ عبر النبيطة)، فإنّ التداخل هدام ومن ثمّ تتلاشى الناقلية.

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان



Auton

السؤال الأول: (30 درجة)



من طرائق النقل الإلكتروني في أنصاف النواقل والتراكيب النانوية نذكر النقل الإلكتروني الفردي، والمطلوب:

أولاً- اشرح مفهوم النقل الإلكتروني الفردي بالتفصيل مستنتجاً خلال ذلك المعايير الموافقة لهذا النقل الفردي.

ثانياً- ادرس فيزيائية النقل الإلكتروني الفردي من أجل دارة تحوي وصلة نفق مشحونة بمصدر تيار مستمر مستفيداً من الرسم المجاور.

ثالثاً- ارسم الصفة المميزة (تيار- جهد) الموافقة. ماذا تستنتج. وماذا يسمى المفعول الفيزيائي الناتج؟.

السؤال الثاني: (28 درجة)

أولاً- مما تتألف ديودات العبور بالنفق التجاوبي. أعط مثلاً على ذلك.

ثانياً- اشرح الأساس الفيزيائي لمفعول (لظاهرة) العبور بالنفق التجاوبي في حالات التوازن، والتجاوب وعدم التجاوب موضحاً إجابتك برسم المخطط الطاقوي الذي يصف هذه الظاهرة مع ذكر المسميات على الرسم بدقة.

ثالثاً- اشرح كيف تظهر المقاومة التفاضلية السالبة في ديود العبور بالنفق التجاوبي.

السؤال الثالث: (32 درجة)

يؤدي ترابط النقل الإلكتروني بالحركة الميكانيكية للنظم الكهروميكانيكية النانوية NEMS إلى مفاعيل جديدة يمكن أن تكون مفيدة من أجل الكثير من التطبيقات؛ إذ يمكن دراسة ما يسمى بالمكوك الإلكتروني Electron Shuttle كمثال على هذا الترابط. أولاً- مما يتألف المكوك الإلكتروني وارسم الدارة الموافقة له.

ثانياً- وضح كيفية عمل المكوك الإلكتروني واذكر الشكل الموافق لمنحني تيار (المنبع- مصرف) كتابع للتردد.

ثالثاً- من المتحولات الأساسية التي تُحدد أداء NEMS المختلفة الوظائف نذكر زمن الاستجابة أو التردد المميز والمطلوب دراسة دور هذا المتحول بالتفصيل من خلال دراسة NEMS؛ كهزاز ميكانيكي عند التردد الزاوي الطبيعي؛ $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ ، حيث K ثابت نابض فعّال و M كتلة الهزاز الميكانيكي.

تمنياتنا للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2022/02/09

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان

توزيع الدرجات على جواب السؤال الأول: (30 درجة)

أولاً- النقل الإلكتروني الفردي:

افتراضنا في حالات النقل الإلكتروني العادي أن عدد الإلكترونات المُساهم في هذا النقل كبير جداً لدرجة أن الطبيعة الانفصالية للإلكترونات ليست ذات قيمة: إن هذا الافتراض لا يُعدُّ صالحاً بعد الآن من أجل نبائط صغيرة تعمل بتيارات ضعيفة؛ وبدلاً منه طُوِّر نوعٌ جديدٌ من النقل الإلكتروني المرتبط بالشحنة هو النقل بالكترون فردي؛ وفيما يلي المفاهيم الأساسية لنظام النقل هذا.

عموماً، إن الانفصال (التفرد) الإلكتروني في المواد شبه الحجمية والنبائط الماكروسكوبية لا يظهر في خصائصها المميزة الوسطية؛ كالكثافة الإلكترونية الموضعية، والتيار الكهربائي الكلي، الخ؛ غير أنه من المعلوم جيداً أن هذا الانفصال يُعلن عن نفسه من خلال مساهمته في ضجيج تيار (ترجُّحات) حتى من أجل عيّات ماكروسكوبية. فمثلاً ينتج ما يسمى الضجيج الطلقي بسبب انفصال الشحنة الإلكترونية؛ إذ ينشأ بسبب عشوائية عملية دخول الإلكترونات النبائط.

يزداد دور انفصال الشحنة لدى تخفيض أبعاد النبائط:

ففي حالة النبائط فائقة الصغر يؤدي انفصال الشحنة الإلكترونية إلى مفاعيل جديدة تماماً في ظاهرة النقل الإلكتروني؛ إذ يُصبح هذا النقل مترابطاً، أي أن انتقال إلكترون واحد عبر النبائط مرتبطٌ بانتقال الإلكترونات الأخرى. ويظهر هذا الترابط بفضل التأثير الكولوني بين الإلكترونات الفردية؛

ثانياً- إن مفعول الإلكترون الفردي يعتمد على عملية شحن تحدث لدى دخول الإلكترونات عيّنة ناقلة صغيرة جداً. فعندما تكون عيّنة ناقلة بالغة الصغر (تسمى جزيرة فلزية *Metallic Island* عادة)، فإن الكمون الكهراكي للجزيرة الفلزية يزداد بشكل ملحوظ حتى لدى دخولها إلكترون واحد فقط؛ وبشكل عام، تساوي طاقة الشحن لعينة:

$$E_C = \frac{Q^2}{2C}, \quad (1)$$

حيث Q الشحنة و C سعة العينة.

ومن أجل جزيرة كروية نصف قطرها r يمكن أن تُقدَّر السعة، C ، بالمساواة الآتية:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r. \quad (2)$$

فعلى سبيل المثال:

تملك جزيرة نصف قطرها $r = 10 \text{ nm}$ سعة من رتبة $10 \text{ aF} = 10^{-17} \text{ F}$ ، حيث F فاراد- وحدة قياس السعة، C .

وعندها، عند ازدياد الجهد، $\Delta\Phi$ ($\Delta\Phi = \Delta Q/C$)، الذي يساوي e/C ، حيث $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ شحنة الإلكترون، تزداد الطاقة بمقدار، $\Delta E = e\Delta\Phi$ ، يبلغ القيمة 16 meV ، التي يمكن مقارنتها "بطاقة الضجيج الحراري" في درجة حرارة الغرفة، $k_B T \approx 26 \text{ meV}$.

فإذا انتقل إلكترون واحد إلى الجزيرة، فإن التدافع الكولوني يمنع الإلكترونات الأخرى من الدخول إليها ما لم يُخفَّض كمون الجزيرة قسداً من خلال تطبيق جهد انحياز خارجي؛ فإذا خُفَّض كمون الجزيرة تدريجياً يُصبح بمقدور إلكترونات أخرى دخول الجزيرة إلكترونات إلكترونات فقط وباستطاعة تبديدها مهملة.

يمكننا تعريف نبيطة الإلكترون- الفردي بأنها تركيب نانوي بسعة صغيرة لدرجة أن إضافة إلكترون واحد إلى النبائط تولد فيها تغير جهد يمكن قياسه. بمقدورنا وصف الخصائص الأساسية لنبائط الإلكترون الفردي على مثال "جملة فيزيائية بأبعاد خاصة"، مؤلفة من:

وصلة نفق عازلة، I ، تقع بين لبوسين ناقلين، M (هما مناطق نصف ناقلة مطعّمة بشدة أو فلزات). لتكن هذه الوصلة موصوفة بالسعة، C ، والناقلية، G :

يمكننا فرض السعة متناسبة طردياً تقريباً مع المقطع- العرضي، S ، لهذه الوصلة. في هذه الحالة يفترض المقطع- العرضي الصغير سعة صغيرة. ثم إن ناقلية الوصلة، G ، تكون صغيرة بشكل كافٍ لدراسة الجملة كمكثفة تسريب. لتكن لدى الجملة شحنة، Q ، ومن ثمّ عند تسرب إلكترون واحد عبر العازل، فإنّ حادثة كهذه تُغيّر الشحنة الكهراكدة الأولية فقط بمقدار الشحنة العنصرية، e : $Q \rightarrow (Q - e)$. ومن ثمّ تبعاً للمعادلة (11) الطاقة الكهراكدة للوصلة تتغير بمقدار:

$$\Delta E_C = \frac{(Q-e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{2C} + \frac{e^2}{2C} - \frac{2Qe}{2C} - \frac{Q^2}{2C};$$

$$\Delta E_C = -\frac{e(2Q-e)}{2C}.$$

ويتغير فرق الكمون بين الصفيحتين من القيمة $\Phi_1 = \frac{Q}{C}$ إلى القيمة $\Phi_2 = \frac{(Q-e)}{C}$

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{e}{C}$$

وعندها يؤدي انتقال الإلكترون الفردي إلى ترّجّح جهد بين طرفي الوصلة يساوي:

$$\Delta I = G \Delta \Phi$$

يمكن تقدير التيار المرتبط بنقل الإلكترون الفردي من الدراسات الوصفية الآتية:

تسمح علاقة الشك؛ $\Delta E \Delta t \geq h$ ، بين الطاقة والزمن بتقييم الحد الفاصل لزمان العبور بالنفق، τ_1 ، من أجل الوصلة المدروسة:

$$\tau_1 \geq \frac{h}{\Delta E_C}.$$

وبدوره التيار الكهربائي؛ $I_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ المرتبط بانتقال إلكترون فردي بطريقة النفق ($\Delta Q = e$ ، و $\Delta t = \tau_1$ ،

$$I_1 \approx \frac{e}{\tau_1} \geq \frac{e^3}{2hC} \quad (\Delta E_C = -e^2/2C) \text{ يساوي:}$$

إذا فاق هذا التيار، I_1 ، ترّجّحات التيار نفسه بسبب ترّجّحات الجهد، $\Delta \Phi$ ، وبوجه خاص، إذا $I_1 \geq \Delta I = G \Delta \Phi = G \frac{e}{C}$

$$\frac{e^3}{2hc} \gg G \frac{e}{C}$$

فإنّ عمليات نقل الإلكترون الفردي تضبط التيار الكهربائي المار في الوصلة وتتحكم به.

$$G_0 \equiv \frac{e^2}{h} \gg G \text{ المعيار (136-6)،}$$

نلاحظ أنّ القيمة في الطرف الأيسر من هذا المعيار تُطابق كمّ الناقلية، $G_0 \equiv e^2/h$ ، تماماً والذي تم الحصول عليه من علاقة لاندواير.

نستطيع بنتيجة هذا التحليل أن نضع قانوناً مفاده أنه إذا كانت الطاقة الكولونية لشحن النبيطة أكبر من الطاقة الحرارية، $k_B T$ ، وأن التيار، I ، المرتبط بنقل الإلكترون الفردي أكبر من ترّجّحات تيار التسرب، فإنّ النقل الإلكتروني يكون مترابطاً وتكون مفعولات الإلكترون الفردي ملحوظة ولها أهميتها. ويمكن صياغة معيار من أجل نقل الإلكترون الفردي هذا

$$G \ll \frac{e^2}{h} \quad \text{و} \quad C \ll \frac{e^2}{k_B T} \quad \text{بالشكل:}$$

أي أنّ سعة النبيطة وناقلية التسرب الخاصة بها يجب أن تكونان صغيرتين.

بمقدورنا الآن أن نناقش فيزياء نقل الإلكترون الفردي من خلال استعمال دارة كهربائية يوضحها الشكل المجاور.

نفترض حالة، تكون فيها وصلة النفق في الدارة مشحونة بمصدر تيار، I_s .

- انطلاقاً من عدم توافر شحنة إجمالية على صفيحتي المكثفة في لحظة البدء، يبدأ منبع التيار بشحن الوصلة ببطء.
- من أجل معدّل شحن معطى وتدرجات زمنية قصيرة تكون الشحنة الإضافية على صفيحتي المكثفة أقل من الشحنة العنصرية؛ $Q < e$.

من المهم الإشارة هنا إلى أنه بمقدور صفائح ماكروسكوبية أن تتشحن بشحنة أقل من شحنة إلكترون فردي بإزاحة إلكترونات الناقلية في الصفائح بالنسبة لأيونات الشبكة البلورية الموجبة (أي بما يسمى استقطاب الشحنة).

- عندما يشحن منبع التيار إحدى صفيحتي المكثفة بحيث تُصبح الشحنة عند هذه الصفيحة مساوية $\frac{1}{2}e$ والشحنة على الصفيحة الأخرى $-\frac{1}{2}e$ ، فإنه ينشأ فرق شحنة بين الصفيحتين مقداره $1e$.

وعندها تبلغ الطاقة الكهراكتة للوصلة القيمة المُشار إليها بالنقطة المصممة Dot في الشكل المعطى في نص السؤال؛ ومن ثمّ بمقدور الشحنة $1e$ أن تعبر الوصلة بطريقة النفق، وفق السهم المنقط في الشكل المعطى.

- إذن، قُبيل العبور النفقي كانت الشحنات الأولية على الصفائح مساوية $(+\frac{1}{2}e, -\frac{1}{2}e)$ ، في حين إنّ الشحنات عليها، بعد العبور بطريقة النفق، أصبحت تساوي $(-\frac{1}{2}e, +\frac{1}{2}e)$.

نرى من الشكل المعطى أنّ انتقال الشحنة لم يُغيّر طاقة الوصلة:

→ فعلياً، إنّ هيكليتي الشحنتين متطابقتان، وبسبب ذلك، لا شيء بمقدوره إيقاف الإلكترون ويمنعه من النفق عبر الوصلة

عائداً إلى موضعه الأولي (أي حالته الطاقية الأولى)، وهكذا دواليك.

→ غير أنّ منبع التيار يستمر بشحن الصفيحتين ويُصبح العبور النفقي للإلكترون المُشار إليه، في الشكل المعطى،

بالسهم المتصل مفضلاً طاقياً (يُصبح المقدار ΔE_C سالباً)، وغير مفضل طاقياً من أجل عبوره النفقي في الاتجاه

المعكس ليعود إلى صفيحته الأولية.

■ بهذه الطريقة، نحصل في حقيقة الأمر على عبور نفقي لإلكترون فردي وجملة (فلز - عازل - فلز) تبدأ بتكديس الشحنة

بغرض تأمين العبور النفقي للإلكترون اللاحق - هذا العبور الذي يجري بعد انقضاء برهة من الزمن. إنّ نجاح حوادث

عبور الإلكترون بطريقة النفق يعني أنّ التدفق الإلكتروني مترابط بشدة.

يوضح الشكل المعطى كل حوادث العبور النفقي التي تمت مناقشتها أعلاه تخطيطياً.

يمكننا أن نرى من الدراسات القائمة على المعادلة $\Delta E_C = -\frac{e(2Q-e)}{2C}$ ، أنّ أيّ

انتقال إلكتروني يكون ممنوعاً (فالمقدار ΔE_C موجب من أجل هكذا شحنة، Q)،

إذا كانت الشحنة الأولية للمكثفة صغيرة، $-\frac{1}{2}e < Q < \frac{1}{2}e$. يسمى هذا المفعول

الفيزيائي حصاراً كولونياً؛ إذن، إذا تحقق الشرطان المذكوران، فإن طاقة الشحن

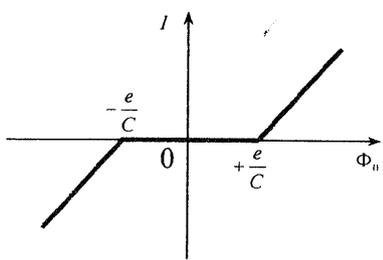
تؤدي دوراً حاسماً في الجملة، ويكون عبور الإلكترون بطريقة النفق غير مفضل

طاقياً، وفي درجة الحرارة المنخفضة يكون العبور بالنفق غير مسموح على

الإطلاق (إذا كان محاصراً). هذا كله يقودنا إلى الحصول على صفة مميزة

(تيار - جهد) نوعية يوضحها الشكل المجاور. السمة الرئيسية لمثل هذه الصفة المميزة تكمن في سحق التيار تماماً في مجال

محدودٍ لانحيازات الجهد الخارجية، $-e/C < \Phi_0 < +e/C$.



توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (28 درجة)

ديودات العبور بالنفق التجاوبي هي تراكيب متغايرة ثنائية الحاجر مؤلفة من سلسلة من الطبقات حيث:

■ الأجزاء العلوية والسفلية في هذا التركيب هي مناطق مُطَعَّمة، في حين إنَّ الحواجز والطبقات الكمونية ليست مُطَعَّمة.

■ ثمَّ إنَّ الشكل (a) يوضح تركيباً نوعياً فيه طبقة حفرة الكمون - GaAs منغمسة بين طبقتي حاجر من الـ $Al_x Ga_{1-x} As$ ، فضلاً عن أن المنطقتين العلوية والسفلية - GaAs n^+ المُطَعَّمتين تُستعملان بمثابة تماسات توصيل.

■ ويظهر الشكل (b) أيضاً تصميمات مختلفة لبعض الشيء، حيث يحوي طبقتي تباعد إضافيتين تفصلان بين المناطق المُطَعَّمة وبين جزئي الحاجر الثنائي من التركيب؛ إذ يكمن الغرض من طبقتي التباعد في منع تبعثر إلكترونات العبور بالنفق على الشوائب في مناطق التماس.

■ إنَّ سماكات البئر، والحواجز، والمباعدات يمكن أن تتغير بشكل كبير جداً. ويمكن أن تتوافر داخل الخُفر الكمونية (البئر الكمونية) بعض المستويات المُكَمَّاة؛

→ في الواقع، هذه المستويات الطاقية هي حالات شبه-مقيدة، لأنه ثمة إمكانية صغيرة ولكنها محدودة لعبور

الإلكترونات بالنفق من الخُفر الكمونية والعبور بالنفق الكمومي مسؤول عن فترات الحياة المحدودة

للإلكترونات في مثل تلك الحالات ويؤدي إلى بعض

التعرض (التوسع) في الحالات الطاقية للبئر الكمومي.

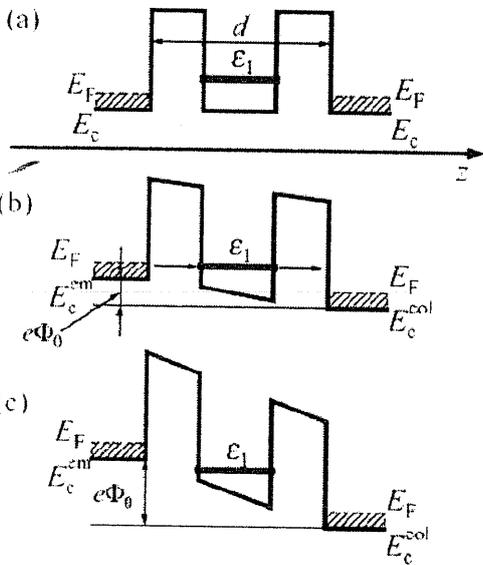
بهذه الطريقة، يمكن النظر إلى الديود النفقي - التجاوبي على أنه

منظومة بتماسين فيها حالات إلكترونية ثلاثية البعد وبئر كمومي بجملة

إلكترونية ثنائية البعد. هذه الجمل - الجزئية الثلاث مترابطة بالعبور

بالنفق بشكل ضعيف. يوضح الشكل (c) مخططات العصابات الطاقية

للتراكيب المذكور أعلاه من أجل ثلاثة انحيازات جهدي مختلفة:



○ يوافق الشكل (a) حالة التوازن عند عدم وجود جهد انحياز؛ إذ

يتوافر في الحفرة المدروسة مستوى شبه-مقيد واحد على الأقل،

حيث يظهر في الشكل حالة مستوى فردي للطاقة، ϵ_1 . فعلياً،

الطاقة ϵ_1 هي قاع العصابة الجزئية ثنائية البعد الأدنى، بسبب

وجود حركة إلكترونية حرة في المستوي.

○ لقد اختيرت متحولات الديود بحيث يقع المستوى شبه-المقيد، ϵ_1 ، في حالة عدم انحياز الديود، فوق طاقة

فيرمي، F_F ، في التماسات، كما يوضح الشكل (a).

○ وعند تطبيق انحياز جهد على التماسات يمكن تحريض انزياح المستوى الطاقية في البئر نحو الأسفل، ومن ثمَّ، يكون

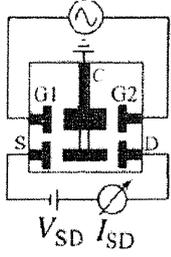
احتمال العبور بالنفق، عبر التركيب ذي الحاجر المضاعف، من أجل إلكترونات بطاقات اختيارية صغير جداً.

○ فضلاً عن أن التركيب يُصمَّم بطريقة تمنع الانتقال الإلكتروني الحراري من فوق الحاجر.

○ ولذلك، ثمة حالة واحدة فقط مُفضَّلة لنفوذ إلكترونات عبر التركيب؛ تحدث عندما يقع المستوى شبه-المقيد تحت طاقة

فيرمي، F_F ، ولكنه فوق قيعان عصابة الناقلية للتماسات.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (32 درجة)

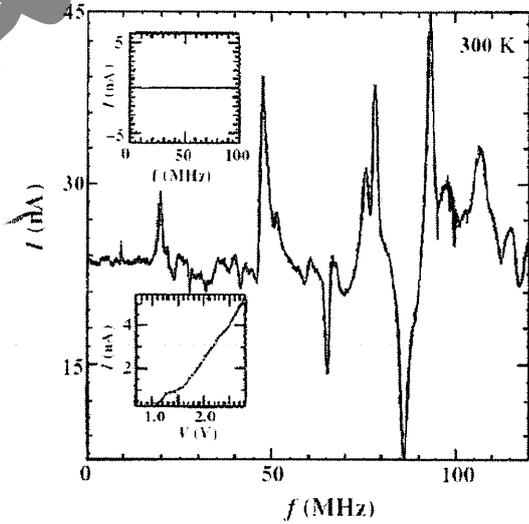


أولاً- تشمل بنية المكوك الإلكتروني كابولي مُعدن (C) معلق بين مسريين فلزيين، كما يوضح الشكل، والذي يُظهر صورة مجهرية لمكوك إلكتروني؛

- تُصنَّع في هذا التركيب بوابتان بغرض تشغيل الكابولي بالكهرباء الساكنة.
- إذ يمكن تشغيل الكابولي بالجهد، $V_{G_1G_2}$ ، بحيث يمكن أن يتلامس تقريباً مع كل مسرى من المساري المتباعدة فراغياً.

ثانياً- يُطبَّق جهد V_{SD} بين طرفي مسريين يمكن عدّهما بمثابة منبع S ومصرف D.

- إذا لم يكن تردد الجهد المطبق على البوابتين، $V_{G_1G_2}$ ، متطابقاً مع تردد التجاوب للكابولي، فإن مطال اهتزازات الكابولي يكون صغيراً. ومن ثمّ لا يتلامس الكابولي مع المسريين ميكانيكياً؛ المنبع والمصرف، ومن ثمّ يُسحق النقل الإلكتروني.
- وحالما يتوافق تردد الجهد المُسلَّط على البوابتين $V_{G_1G_2}$ مع التجاوب الميكانيكي يتلامس الكابولي مع المسريين خلال كل دورة من الحركة الميكانيكية، وعندما يتلامس الكابولي مع المسريين بالتعاقب ينشحن طرفه المُعدن وينفرغ، وتنتقل الإلكترونات بين المنبع والمصرف.



- يوضح الشكل التالي نتائج قياسات تيار (المنبع-مصرف): إذ يوافق بعض القمم في منحنى التيار أنماط اهتزاز تجاوبية مختلفة للكابولي. ومن أجل هذه التجاوبات فقط تكون مطالات الاهتزازات كبيرة كفاية لدعم النقل الإلكتروني عبر التركيب النانوية.
- إذا كانت حركة الكابولي ممنوعة فلا يُرصد تيار كهربائي، كما يتضح من الشكل- الجزئي العلوي في الشكل. ويُظهر الشكل- الجزئي السفلي قيمة إحدى قمم التيار كتابع للجهد V_{SD} عند تردد تجاوب معطى.
- إذن، يُمثِّل هذا النظام الكهرميكانيكي النانومتري NEMS-

عملياً- مكوكاً إلكترونياً. ويتعلق عدد الإلكترونات المنقولة بأبعاد الجزيرة المُعدنة على الكابولي. إذ بتخفيض بُعد الجزيرة يُصبح من الممكن نقل إلكترون واحد في كل مرة.

ثالثاً- دور زمن الاستجابة أو التردد في تحديد أداء المنظومات الكهرميكانيكية النانوية NEMSs مختلفة الوظائف:

على أساس الاصطلاحات "الفعالة" المعطاة في نص السؤال توجد مجموعة معقدة من معادلات المرونة التي تُحدد الاستجابة الميكانيكية لهذه المنظومات وتتحكم بها. فإذا خفّضنا أبعاد النببطة الميكانيكية بحيث نُحافظ على شكلها العام، فإن التردد الأساس، ω_0 ، يزداد بتناقص البعد الخطّي للهزاز. وهذا واضح، لأن: الكتلة تتناسب طردياً مع حجم الهزاز الميكانيكي، في حين إن ثابت النابض الفعال من أجل تشوهات الإنثناء (الالتواء) يزداد بتناقص طوله.

السؤال الأول: (42 درجة)

I. يُعبّر عن التيار الكلي المار في نبیطة بالعلاقة

$$I = \int \frac{e}{2\pi\hbar} T(E_{||}) \left[F_v \left(E_{||} + \frac{1}{2} e\Phi_0 - E_F \right) - F_v \left(E_{||} - \frac{1}{2} e\Phi_0 - E_F \right) \right] dE_{||}$$

والمطلوب: أولاً- كتابة علاقة نايج توزع فرمي المرتبط بالطاقة المركبة $E_{||}$ من أجل نبیطة كهيرة ماكرو سكوبياً في الاتجاهات العرضانية ومساحة مقطعها S ووضّحاً ماذا يتضمن تابع التوزع هذا. ثانياً- استنتاج علاقة كثافة التيار الموافقة للنبیطة المدروسة وتوضیح أهمیة وفائدة هذه العلاقة بالتفصیل.

II. ادریس حالة نبیطة ناقلة لتيار من أجل النقل الإلكتروني شبه المتوازن في درجات الحرارة المنخفضة ثم استنتاج علاقة

ناقلية النبیطة. دلالة علاقة لانداوير، وادرسها بالتفصیل علماً بأن تيار المار في النبیطة يُعطي بالعلاقة

$$I = -\frac{2e}{L_0} \sum_{n,m} \sum_{k_x} v_{||} T(E_{||}) \left[F_v \left(E(k_x, n, m) + \frac{1}{2} e\Phi_0 - E_F \right) - F_v \left(E(k_x, n, m) - \frac{1}{2} e\Phi_0 - E_F \right) \right]$$

حيث لا ترتبط لا السرعة الإلكترونية ولا معالم النود من أجل النبیطة المدروسة بالأعداد الكمومية العرضانية؛ n و m ؛ و

$$\sum_{k_x} \{ \dots \} = L_0 \int \frac{dE_{||}}{2\pi\hbar v_{||}} \{ \dots \}$$

السؤال الثاني: (32 درجة)

أولاً- ادریس احتمالية تغير الناقلية لوصلة فريدية متغايرة محبوبة عن طريق تعديل التركيز الإلكتروني.

ثانياً- حید بالرسوم والتشرح آلية توصيل النبیطة $(n\text{-AlGaAs/GaAs})$ On وفصلها Off في الحالة الاحتيادية.

ثالثاً- وبنسج كيف يمكن التحكم بناقلية نياط جريان الناقلية ثم ادریس أهمیة تشكل الممانيات الطاقية في الوصلات الفريدية النانوية المتغايرة. رابعاً- اشرح كيف تؤثر سماكة المبعاد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثالث: (20 درجة)

اشرح ظاهرة الرصد الميكانيكي للتصوير التجاوبي المغنطيسي بالتفصیل موضعاً اجابتك بالرسوم.

للمرور المستخدمة مدلولاتها الفيزيائية المعروفة.

تمنياتنا للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2021/09/28

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان



الاسم:	امتحان مقرر الإلكترونيات النانوية	جامعة طرطوس
المدّة: ساعتان	لطلاب السنة الرابعة فيزياء	كلية العلوم
الدرجة القصوى: 90	للعام الدراسي 2020-2021/الدورة الفصلية الثانية	قسم الفيزياء

السؤال الأول: (48 درجة)

أولاً- اكتب علاقات الطيف الطاقي المتماثل للمناحي للإلكترونات (علاقات التبدد) لجملة إلكترونية واقعة في درجات حرارة منخفضة ($T \rightarrow 0$) عندما تكون الجملة المدروسة ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد مع شرح ما يلزم (ماذا تنتج؟).

ثانياً- اكتب علاقات طاقة فرمي عندما تكون الجملة المدروسة ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد مع شرح ما يلزم. ماذا تنتج؟.

ثالثاً- اكتب علاقات كثافة الحالات الطاقية من أجل جملة إلكترونية ثلاثية البعد وثنائية البعد وأحادية البعد وصغرية البعد. ماذا تنتج؟.

رابعاً- ارسم المنحنيات البيانية الموافقة للجمال الإلكترونية في البلورات الحجمية والأفلام الرقيقة (البئر الكمومية) والأسلاك الكمومية والنقط الكمومية مع ذكر التسميات عليها بشكل واضح مع شرح ما يلزم.

السؤال الثاني: (22 درجة)

أولاً- اشرح ظاهرة السرعة العابرة ثم وضحها من أجل Si و GaAs مستعيناً بالرسم المناسب.

ثانياً- وضح كيفية الاستفادة من مفعول تجاوز سرعة العبور في تكوين نبائط قصيرة.

السؤال الثالث: (20 درجة)

يؤدي ترابط النقل الإلكتروني بالحركة الميكانيكية للنظم الكهروميكانيكية النانوية NEMS إلى مفاعيل جديدة يمكن أن تكون مفيدة من أجل الكثير من التطبيقات؛ إذ يمكن دراسة ما يسمى بالمكوك الإلكتروني Electron Shuttle كمثال على هذا الترابط.

أولاً- مما يتألف المكوك الإلكتروني وارسم الدارة الموافقة له.

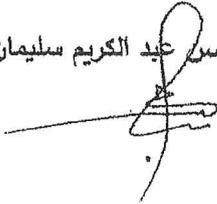
ثانياً- وضح كيفية عمل المكوك الإلكتروني واذكر الشكل الموافق لمنحني تيار (المنبع مصرف) كتابع للتردد.

ثالثاً- ما هي المتحولات الأساسية التي تُحدد أداء النظم الكهروميكانيكية النانوية المختلفة الوظائف ومن ضمنها المكوك الإلكتروني.

تمنياتنا للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2021/07/26

أ. د. حسّان عبد الكريم سليمان



توزيع الدرجات على جواب السؤال الأول: (48 درجة)

الجملة الإلكترونية	9 درجات	9 درجات	9 درجات
	كثافة الحالات الطاقية	طاقة فرمي	الطيف الطاقية للإلكترونات
3D	$\rho_{3D}(E) = \frac{V}{\pi^2} \left(\frac{m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{2E}$	$E_F = (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2 n_{3D}^{2/3}}{2m^*}$	$E(\vec{k}) = E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$
2D	$\rho_{2D}(E) = \frac{Sm^*}{\pi \hbar^2} \sum_{l_s} \Theta(E - \varepsilon_{l_s})$	$E_F = \frac{\pi \hbar^2}{m^*} n_{2D}$	$E_{l_s}(\vec{k}_{ }) = \varepsilon_{l_s} + \frac{\hbar^2 k_{ }^2}{2m^*}$
1D	$\rho_{1D}(E) = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}} \frac{\Theta(E - \varepsilon_{l_x, l_y})}{\sqrt{E - \varepsilon_{l_x, l_y}}}$	$E_F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m^*} n_{1D}^2$	$E_{l_x, l_y}(k_x) = \varepsilon_{l_x, l_y} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$
0D	مجموعة قم لها شكل التابع δ		الرسم 10 درجات

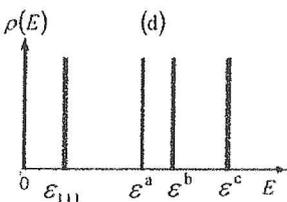
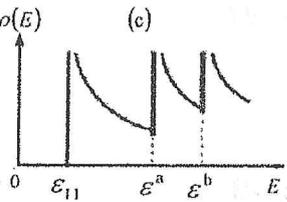
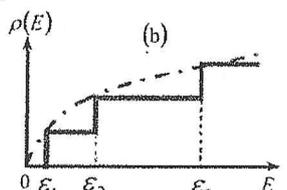
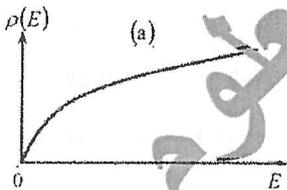
27

تكون الحركة الإلكترونية في بؤرة حجمية حرة في الأبعاد الثلاثة، 2 وتكون الحركة الإلكترونية في بئر كمومية حرة في بعدين حرة ومقيدة في البعد الثالث وفق ثخانة البئر، 2 تكون الحركة الإلكترونية في سلك كمومي مقيدة ببعدين وحررة في البعد الثالث على طول محور السلك، 2 يمكننا أن نستنتج من مقارنة طاقات فيرمي الحاصلة من أجل أبعاد مختلفة للغاز الإلكتروني أن تخفيض الأبعاد - أبعاد الغاز يؤدي إلى زيادة E_F بشكل متسارع عند زيادة تركيز الإلكترونات من أجل جمل منخفضة - البعد. 3 درجات تكمن الصفة المميزة لكثافة الحالات أحادية البعد في: تباينها بجوار قاع كل من العصابات الجزئية أحادية - البعد. 3 ثم إن كثافة الحالات الإلكترونية تتناقص حالما تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات؛ ويُعدُّ هذا السلوك رائعاً جداً لكونه يؤدي إلى مفاعيل كهربائية وبصرية جديدة تمتاز بها الأسلاك الكمومية. 3 درجات من أجل إلكترونات تقع في نقط كمومية؛ فتبعاً لتعريف المعادلة $\rho(E) = \sum \delta(E - E_n)$ (حيث E_n الطاقة ذات الحالة الكمومية n) تكون الأطياف الطاقية في حالة النقط الكمومية منفصلة (أي متقطعة)، وبالتالي، فإن كثافة الحالات ببساطة هي

مجموعة قم لها شكل التابع δ ، كما يوضح

الشكل (d). تكون القمم من أجل جملة متتالية

ضيقة جداً وارتفاعاتها لانهائية. 3 درجات

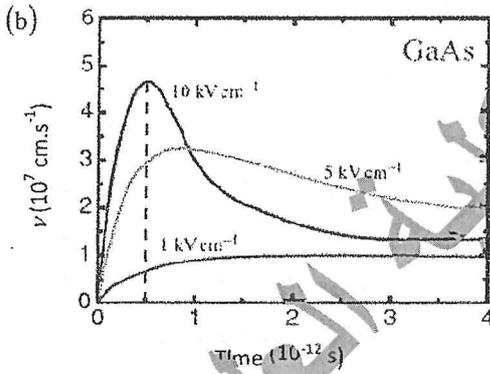
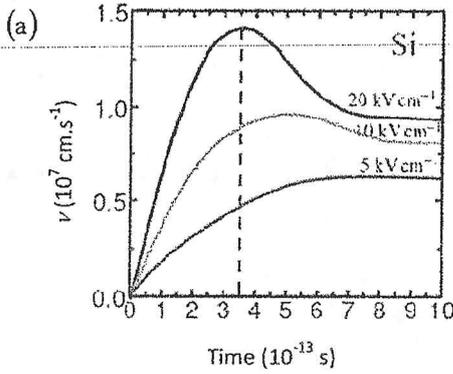


توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (25 درجة)

أولاً- ظاهرة السرعة العابرة (السرعة الانتقائية) Transient Overshooting Effects:

يمكن تجاوز الحدود المفروضة على سرعة الانسياب المميزة لمادة معينة باستخدام مفعول الإلكترون الحار المعروف تحت مسمى ظاهرة السرعة العابرة *Velocity Overshoot*؛ ولشرح هذه الظاهرة نستعرض الاستنتاجات التي حصلنا عليها من أجل مسألة الحالة المستقرة، التي يكون فيها توزع الإلكترونات مستقرًا؛ حيث تمت دراسة الخصائص الإلكترونية المتوسطة على أزمنة أطول بكثير من الأزمنة المميزة للجمل المدروسة؛ كزمن الطيران الحر الوسطي، وزمن استرخاء الطاقة، وزمن استرخاء الاندفاع، الخ.

سندرس الآن العمليات التي تحدث في الجملة الإلكترونية بعد انحرافها عن حالة التوازن مباشرة؛ إذ سنركز في هذه الحالة الخاصة على استجابتها للحقل الكهربائي النبضي الذي له شكل



تابع- الخطوة.

إن زمن استرخاء الاندفاع، τ_e ، الداخل في المعادلة $\vec{v} = -e\tau_e/m \vec{F}$ ، بشكل عام، أقصر من زمن استرخاء الطاقة، τ_E ، الذي يُحدد الطاقة الإلكترونية؛ ولهذا السبب، فإن استجابة السرعة لخطوة الحقل الكهربائي أسرع من استجابة الطاقة من أجل الحالة الموصوفة

$$\frac{dE}{dt} = e(\vec{v} \cdot \vec{F}) - \frac{E - E_{eq}}{\tau_E}$$

وعادةً، إذا ازداد معدّل التبعر بأزيد من الطاقة الإلكترونية، فيمكن للسرعة الإلكترونية أن تفوق السرعة المستقرة خلال فاصل زمني من رتبة τ_E ؛ بتعبير آخر، السرعة العابرة ليست مجرد تابع للحقل الكهربائي وحسب، بل للطاقة الإلكترونية أيضاً:

فعلياً، تُكثف "السرعة نفسها، بسرعة، مع التغيرات البطيئة جداً للطاقة و"تواكبها"، بمعنى تتعقبها، حتى تبلغ هذه الطاقة الحالة المستقرة؛ إذ في البداية، عندما لا تبلغ الطاقة الإلكترونية القيمة المستقرة تكون السرعة الإلكترونية الموافقة للطاقة العابرة أعلى من السرعة الموافقة للطاقة المستقرة.

يوضح الشكل ظاهرة السرعة العابرة من أجل Si و GaAs:

ثمّثل سرعة الانسياب كتابع للزمن من أجل بضعة حقول كهربائية؛ إذ يُفترض تطبيق الحقل الكهربائي بين طرفي العينة المدروسة في اللحظة $t=0$ ؛ تبرز ظاهرة السرعة العابرة عند توقّف حقول كهربائية عالية القيمة ويمكن لذروة السرعة العابرة أن تتجاوز سرعة الإشباع- المستقرة بمرتين إلى أربع مرات.

يمكننا من خلال الشرح الفيزيائي لظاهرة السرعة العابرة أن ندرك ما هي إمكانية الاستفادة منها:

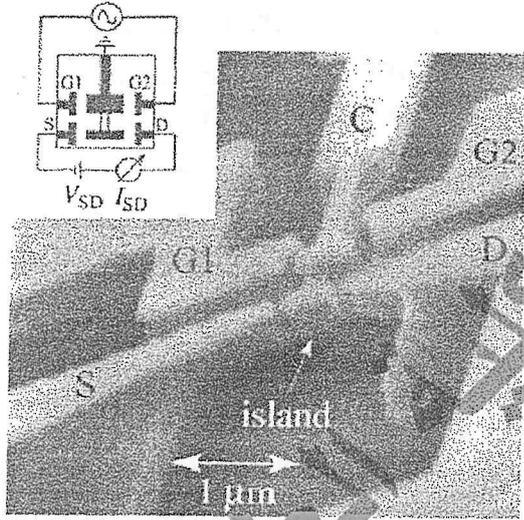
• لتتصور أن إلكترونات باردة دخلت منطقة نشطة لنبيطة نصف ناقلة من أحد تماساتها؛

فإذا توفّر في المنطقة النشطة حقل كهربائي كبير، فإن الإلكترونات ستتسارع؛ وعلى مسافة ما من التماس الحاقن ستبلغ الإلكترونات السرعة العابرة القصوى، وبعد ذلك، ستتناقص سرعتها تدريجياً نحو القيمة المستقرة.

- فإذا كانت المنطقة النشطة للنبیطة قصيرة وأمكن مقارنتها بالمسافة التي تحصل فيها الظاهرة العابرة، فإن نقلاً إلكترونياً يحدث عبر هذه المنطقة النشطة بسرعة أعلى من السرعة المستقرة ويصبح زمن النقل الإلكتروني الإجمالي أقصر، ومن ثمّ ستكون النبیطة قادرة على العمل بمعدل سرعة وتردد أعلى.
- يساوي الزمن المميز للظاهرة العابرة من أجل GaAs، كما يبدو من الشكل، نحو $\tau_{tr} = 0.5 \times 10^{-12}$ s. وعند تقدير السرعة الوسطية، في شروط العبور، بالقيمة $v_m = (2-4) \times 10^7$ cm/s يمكننا الحصول على تقدير لطول النبیطة اللازم لتحقيق ظاهرة السرعة العابرة قيد الدراسة: $L_r \leq v_m \tau_{tr} = (2-4) \times 10^7$ cm/s $\times 0.5 \times 10^{-12}$ s
- ومن ثمّ $L_r \leq (0.1-0.2) \mu\text{m}$ وهذا يعني أنه يمكن بلوغ ظاهرة السرعة العابرة والحصول على إلكترونات فائقة السرعة في عينات قصيرة (من رتبة أجزاء من واحد ميكرون).

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (20 درجة)

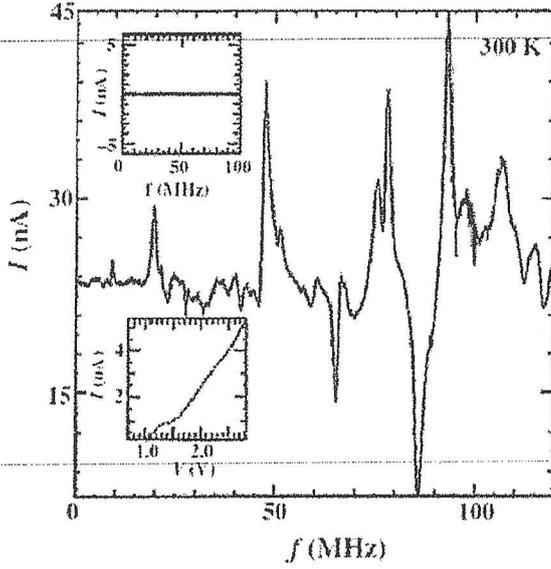
أولاً- تشمل بنية المكوك الإلكتروني كابولي مُعدن (C) معلق بين مسريين فلزين، كما يوضح الشكل، والذي يُظهر صورة مجهرية لمكوك إلكتروني؛



المركبة الإلكترونية- نبیطة ناقية إلكترونية تؤمنها الحركة الميكانيكية لذراع الكابولي (C)، و S و D تماسا المنبع والمصرف و G_1 تماس البوابة الأولى و G_2 تماس البوابة الثانية.

- تُصنّع في هذا التركيب بوابتان بحريتين تشغيل الكابولي بالكهرباء الساكنة.
- إذ يمكن تشغيل الكابولي بالجهد، V_{G_1, G_2} بحيث يمكن أن يتلامس تقريباً مع كل مسرى من المساري المتباعدة فراغياً.
- يُطبّق جهد V_{SD} بين طرفي مسريين يمكن عدّهما بمثابة منبع S ومصرف D.
- إذا لم يكن تردد الجهد المطبق على البوابتين، V_{G_1, G_2} ، متطابقاً مع تردد التجاوب للكابولي، فإن مطال اهتزازات الكابولي يكون صغيراً. ومن ثمّ لا يتلامس الكابولي مع المسريين ميكانيكياً؛ المنبع والمصرف، ومن ثمّ يُسحق النقل الإلكتروني.
- وحالما يتوافق تردد الجهد المُسلط على البوابتين V_{G_1, G_2} مع التجاوب الميكانيكي يتلامس الكابولي مع المسريين خلال كل دورة من الحركة الميكانيكية، وعندما يتلامس الكابولي مع المسريين بالتعاقب ينشحن طرفه المُعدن وينفرغ، وتنتقل الإلكترونات بين المنبع والمصرف.

وینفرغ، وتنتقل الإلكترونات بین المنبع والمصرف.



تغير التيار الكهربائي في المركبة الإلكترونية عند تغير التردد في دارة البوابة. في الشكل العلوي الجزئي؛ ذراع الكابولي مقفل ولا يوجد تيار. وفي السفلي؛ تغير تيار المركبة عند تغير جهد المنبع- مصرف من أجل تردد معطى في دارة البوابة.

- يوضح الشكل التالي نتائج قياسات تيار (المنبع- مصرف): إذ يوافق بعض القمم في منحني التيار أنماط اهتزاز تجاوبية مختلفة للكابولي. ومن أجل هذه التجاوبات فقط تكون مطالات الاهتزازات كبيرة كفاية لدعم النقل الإلكتروني عبر التركيب النانوية.
- إذا كانت حركة الكابولي ممنوعة فلا يرمد تيار كهربائي، كما يتضح من الشكل- الجزئي العلوي في الشكل. ويُظهر الشكل- الجزئي السفلي قيمة إحدى قمم التيار كتابع للجهد V_{SD} عند تردد تجاوب معطى.
- إن، يُمثل هذا النظام الكهروميكانيكي النانومتري NEMS- عملياً- مكوكاً إلكترونياً. ويتعلق عدد الإلكترونات المنقولة بأبعاد الجزيرة المُعدنة على الكابولي. إذ بتخفّض بُعد الجزيرة يُصبح من الممكن نقل إلكترون واحد في كل مرة.
- المتحولات الأساسية التي تُحدد أداء المنظومات الكهروميكانيكية النانوية NEMSs مختلفة الوظائف، عملياً هي نفسها من أجل النبيلة الإلكترونية:

- زمن الاستجابة أو التردد المميز،
- وعامل الجودة (ضياع الطاقة)،
- واستطاعة التشغيل،
- ونسبة الإشارة/ضجيج (الحساسية)، الخ.

السؤال الأول: (16 درجة)

ليكن لدينا جملة (نبيطة) أبعادها $L_x \times L_y \times L_z$ ، والمطلوب:

اشرح كيف يمكن التمييز بين الحالات ثلاثية وثنائية وأحادية وصفرية البعد لهذه الجملة موضحاً سلوك الإلكترون في كلٍ منها وحتمية المعالجة الكوانتية للمسألة المطروحة.

السؤال الثاني: (29 درجة)

أولاً- اشرح كيف يمكن تشكيل غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين نصفي ناقلين بألفنتين إلكترونيتين مختلفتين تسببان انقطاعاً في عصابتي ناقليتهما (ويشكّلان وصلة فردية متغايرة معدلة التطعيم) موضحاً إجابتك بالرسم.

ثانياً- اذكر النتائج التي تحصل عليها من هذه الدراسة الوصفية بالتفصيل.

السؤال الثالث: (25 درجة)

أولاً- اشرح بالتفصيل مفهوم كلٍ من الإلكترونات الحارة والإلكترونات الساخنة.

ثانياً- اشرح مفعول تجاوز سرعة العبور ثمّ وضح هذا المفعول من أجل Si و GaAs مستعيناً بالرسم.

ثالثاً- وضح كيفية الاستفادة من مفعول تجاوز سرعة العبور في تكوين نبائط قصيرة..

السؤال الرابع: (20 درجة)

يمكن تفسير التحكّم بالتيار الكهربائي عبر النقاط الكوانتية ضوئياً عن طريق ما يسمى الديود الضوئي ذو النقطة الكوانتية Single-Quantum-Dot Photodiode:

أولاً- مما يتألف مثل هذا الديود؟ ارسم مخططاً طاقياً لمثل هذا الديود عندما يكون في حالة توازن.

ثانياً- وضح ماذا يحدث لدى تطبيق انحياز بين طرفيه.

ثالثاً- وضح ماذا يحدث لدى تعريضه لضوء.

رابعاً- ارسم شكل التيار الضوئي كتابع لجهد الانحياز من أجل بعض الأطوال الموجية وذلك في درجة الهليوم

السائل من أجل الوصلة ذي البنية المتغايرة من النوع I (AlGaAs/GaAs)؛ موضحاً سلوك هذه التابعية من أجل

الوصلة المذكورة أعلاه.

تمنياتنا للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2021/01/27

مدرسا المقرر

أ.د. حسن سليمان د. حسن البستاني

السؤال الأول: (20 درجة)

لطول موجة دوبروي أهمية كبيرة في الإلكترونيات النانوية
أولاً- وضح هذه الأهمية واكتب العلاقة العامة الموافقة له من أجل إلكترون في جسم صلب، واذكر المسميات.
ثانياً- ارسم الشكل العام لتغير طول موجة دوبروي عند تغير الكتلة الفعالة بشكل دقيق (مع ذكر التدرجات على المحاور الإحداثية) من أجل
الإلكترونات المتوافرة في كل من InSb ، و GaAs ، و GaNs ، و SiC . ماذا تستنتج؟
ثالثاً- اذكر كيف يتغير طول موجة دوبروي مع درجة الحرارة.
رابعاً- اشرح وبالتفصيل الأسباب العامة التي تجعل حاملات الشحنة تفقد سلوكها الشبيه بالموجة.
السؤال الثاني: (25 درجة)

إن التحكم بمقاومة التراكيب المتغايرة الفردية ضروري للحصول على نبائط مفيدة؛
أولاً- ادرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة فردية متغايرة محجوبة عن طريق ضبط التركيز الإلكتروني.
ثانياً- عيّن بالرسم والشرح آلية Normally-on وآلية Normally-off.
ثالثاً- كيف يمكن التحكم بناقلية نبائط جريان الناقلية ثم وضح أهمية تشكل المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة.
رابعاً- اشرح كيف تؤثر سماكة المبعاد على الوصلات النانوية المتغايرة.

السؤال الثالث: (20 درجة)

يمكن تفسير التحكم بالتيار الكهربائي عبر النقاط الكوانتية ضوئياً عن طريق ما يسمى الديود الضوئي ذو النقطة الكوانتية Single-Quantum-Dot
Photodiode:
أولاً- مما يتألف مثل هذا الديود؟. وارسم مخططاً طاقياً لمثل هذا الديود عندما يكون في حالة توازن.
ثانياً- وضح ماذا يحدث لدى تطبيق انحياز بين طرفيه.
ثالثاً- وضح ماذا يحدث لدى تعريضه لضوء.
رابعاً- ارسم شكل التيار الضوئي كتابع لجهد الانحياز من أجل بعض الأطوال الموجية وذلك في الدرجة 4.2 K من أجل الوصلة ذي البنية
المتغايرة من النوع-I (AlGaAs/GaAs)؛ موضحاً سلوك هذه التابعية من أجل الوصلة المنكورة أعلاه.
السؤال الرابع: (25 درجة)

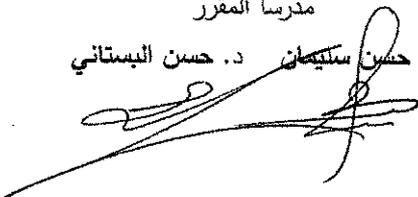
أولاً- اشرح بالتفصيل مفهوم الإلكترونات الحارة والإلكترونات الساخنة.
ثانياً- اشرح مفعول تجاوز سرعة العبور ثم وضح هذا المفعول من أجل Si و GaAs مستعيناً بالرسم.
ثالثاً- وضح كيفية الاستفادة من مفعول تجاوز سرعة العبور في تكوين نبائط قصيرة.

تمنياتنا للجميع بالتوفيق والنجاح

طرطوس في 2020/09/02

مدرسا المقرر

أ.د. حسن سليمان د. حسن البستاني



سلم توزيع الدرجات على أجوبة مقرر الإلكترونيات النانوية

توزيع الدرجات على جواب السؤال الأول: (20 درجة)

أولاً- يمكن توضيح أهمية طول موجة دوبروي لإلكترون متوافر في تركيب نانوي نصف ناقل ككتلة الفعالة m^* يكون طول موجة دوبروي λ عادة أكبر منه من أجل إلكترون حر λ_0 :

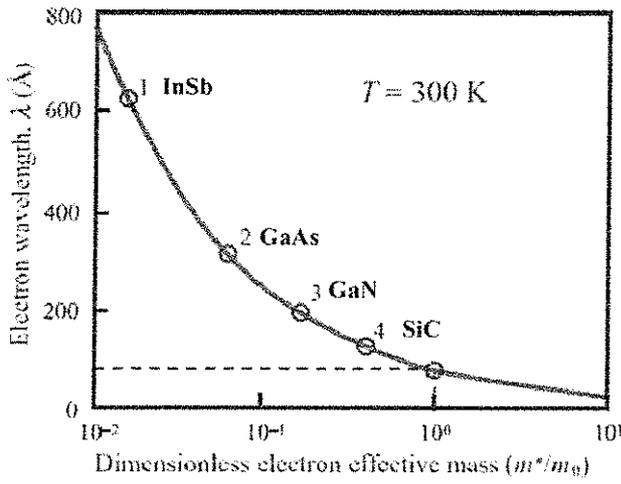
$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m^*E}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{m_0}{m^*}}, \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_0E}}$$

حيث E طاقة الإلكترون و m_0 كتلة الإلكترون في الخلاء.

ثانياً- يوضح الشكل المجاور تابعية قيمة λ للنسبة m^*/m_0 :

تُشير النقاط من 1 إلى 4 الظاهرة على المنحني إلى الأطوال الموجية من أجل إلكترونات متوافرة في InSb و GaAs و GaNs و SiC، على الترتيب؛ حيث استخدمنا من أجل هذه المواد الكتل الفعالة، m^*/m_0 ، المساوية (0.014)، و (0.06)، و (0.172)، و (0.41)، على الترتيب؛ وافترضنا أن طاقة الإلكترون تساوي $E = k_B T$ ، حيث $T = 300$ K درجة حرارة الوسط المحيط و k_B ثابت بولتزمان.

الاستنتاج:



نلاحظ أن طول موجة دوبروي لإلكترون متوافر في أنصاف نواقل نموذجية بكتلة فعالة m^* تقع في المجال $m_0(0.01-1)$ يساوي $(73-730)$ Å، أي إنه فعلاً أكبر بكثير من ثابت الشبكة البلورية من أجل المواد المشار إليها في الشكل المجاور.

ثالثاً- حالما تنخفض درجة الحرارة إلى 3 K يزداد طول موجة دوبروي بمقدار مرتبة واحدة (عشر مرات). وهكذا يُصبح الطول الموجي قريباً من أبعاد تراكيب بنائط نصف ناقلة تم تصنيعها بتكنولوجيا تصنيع نانوية حديثة. رابعاً-

1. السبب الأول عدم مثالية الجملة الذي تقود إلى تبعثر

إلكتروني (مرن ولامرن)؛ المرن لا يؤدي إلى تشوه تراكيب الحركة الإلكترونية في حين إن اللامرّن فيشوه هذه الحركة؛

2. السبب الثاني يستوجب إجراء عملية توسيط للسلوك الكومومي على إحصاء الإلكترونات يكمن في التأثير الحراري؛

في الواقع، في درجات الحرارة المحدودة تتوافر إلكترونات بطاقات مختلفة كفاية، وهذا ما يؤدي إلى تشتت كبير في أطوار التابع الموجي الموافق لها فيتشوه التراكيب في الجملة الإلكترونية

في الواقع، تخضع الإلكترونات في بنائط الحالة الصلبة للتبعثر على العيوب البلورية، والشوائب، واهتزازات الشبكة البلورية، وخشونة

السطح الفاصل، الخ. إذ تُقسّم عمليات التبعثر هذه إلى مجموعتين:

• مجموعة تبعثر مرن

• مجموعة تبعثر غير مرن.

في الفيزياء التقليدية يؤدي الاصطدام المرن إلى تغيير فقط في كمية حركة (اندفاع) الجسم (أو في المتجه الموجي للجسيم)، في حين إن الاصطدام اللامرّن يؤدي إلى تغيير في اندفاع الجسم وفي طاقته. ثمة خاصية جوهرية للاصطدام المرن تكمن في كونه لا يشوه طور الإلكترون.

في الواقع، بعد تبعثر مرن تبقى الطاقة مصونة ولا تتغير ويتألف التابع الموجي $\Psi(\vec{r}, t)$ من مركبات مختلفة تأخذ الشكل $e^{-i\Omega t} e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}}$

وتمتلك كل المركبات نفس الطور المتعلق بالزمن $e^{-i\Omega t}$. ولذلك، فإن التوزيع المكاني للكثافة الإلكترونية $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 = |\Psi(\vec{r})|^2$ يبقى مستقلاً عن الزمن.

بتعبير آخر، التبعثر المرين لا يشوّه تماسك (ترابط) الحركة الإلكترونية.

يمكننا باستعمال لغة الفيزياء شبه التقليدية تعيين المسار الحر الوسطي للإلكترونات بين حوادث التبعثر المرين بالعلاقة:

$$l_e = \tau_e v$$

حيث τ_e الزمن الوسطي بين حادثتي تبعثر مرين و v السرعة الوسطية للإلكترون.

ولذلك، حتى من أجل مسافات تتجاوز l_e ، تكون الخصائص شبه الموجية للإلكترونات مترابطة.

يؤدي التبعثر اللامرني إلى نتيجة أخرى؛ إذ يوُلّد هذا التبعثر أمواجاً إلكترونية بطاقات مختلفة ويمتلك التابع الموجي الناتج تابعة معقدة لكل من المكان والزمان.

يؤدي خفقان المركبات الموجية المختلفة بالزمن إلى اضطراب مفاعيل الترابط:

لكن τ_e الزمن الوسطي بين تصادمين غير مرنيين؛ إن المسافة التي ينتشرها (ينقلها) الإلكترون بين هذين التصادمين تسمى أحياناً طول التبعثر اللامرني، l_E .

يُحافظ الإلكترون على ترابطه الكومومي من أجل مسافات أقل من l_e ويفقده من أجل المسافات الأكبر. وعموماً، $l_e > \lambda$ ما لم تتوافر شروط عدم توازن حاد. وعادةً l_e يفوق المسار الحر الوسطي l_e ؛ في هذه الحالة، يتعرض الإلكترون للعديد من التصادمات المرنية قبل أن يفقد طاقته، وتُعرف هذه العملية على أنها عملية انتشار للإلكترون ويُعطى انزياحه في أثناء الزمن الوسطي τ_e بين تصادمين غير مرنيين بالمساواة:

$$l_E = \sqrt{D\tau_e} \quad (\tau_e \gg \tau_c),$$

حيث يُعطى معامل الانتشار D بالمساواة $D = v^2 \tau_e / \alpha$ ، علماً بأن $\alpha = 3$ من أجل غاز إلكتروني ثلاثي البعد؛ و $\alpha = 2$ من أجل غاز إلكتروني ثنائي البعد؛ و $\alpha = 1$ من أجل غاز إلكتروني أحادي البعد؛ وعادةً، l_E و τ_e يتناقصان عند ارتفاع درجة حرارة الجملة.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثاني: (25 درجة)

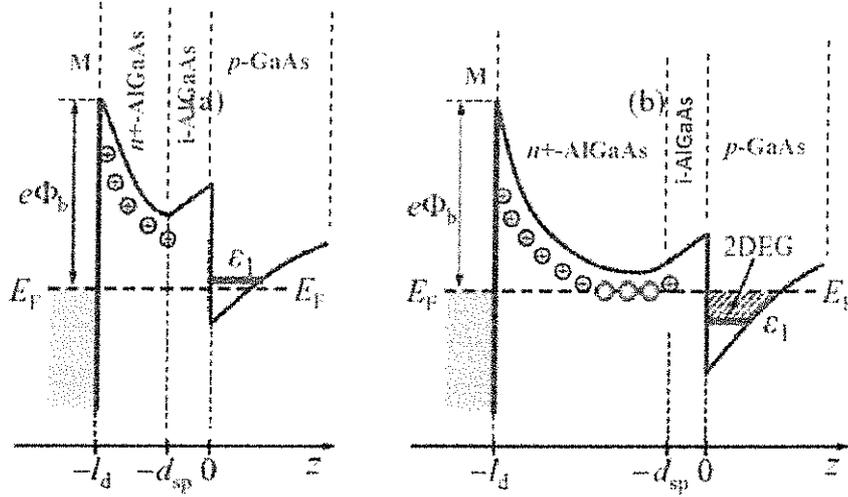
أولاً- ندرس احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة عن طريق التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ ومن أجل تحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة وضعت عليها بوابة معدنية حاجبية تسمى باختصار وصلة متغايرة محجوبة يوضحها الشكل (b) تخطيطياً ونقارنها مع الشكل (a) الذي يُظهر وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة.

الفارق ما بين التركيبين يكمن في توافر تماس معدني (M) فقط توضع على أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - \text{AlGaAs}$ في التركيب المحجوب:

تسمى هذه الجملة المؤلفة من معدن ونصف ناقل بالتركيب MES.

ومن أجل المواد الشبيهة بالمركب GaAs تُعدُّ تراكييب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النباائط، لأن هذه المواد لا تحوي أكسيدياً طبيعياً مستقرّاً، بخلاف حالة الكوارتز SiO_2 المتوضع على السليكون Si. ولذلك، فإن معظم النباائط الإلكترونية التي قوامها GaAs تستعمل تراكييب MES. يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكييب إلى ما يسمى بتراكييب شوتكي المحجوبة.

يوجد عادةً تحت البوابة المعدنية في مواد شبيهة بـ GaAs مناطق استنفاد ممتدة تنشأ بسبب جهد شوتكي العالي ذاتي-التشكّل، Φ_b ، والذي يبلغ نحو 0.8 V. وتُعرف منطقة استنفاد كهذه بمنطقة استنفاد شوتكي.



ثانياً- يوضح الشكل الآتي مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من M/ AlGaAs/GaAs بسماكتين للطبقة AlGaAs: حيث يوجد مُباعِدٌ غير مُطعَّم يفصل المنطقة المُطعَّمة، من النوع-n، عن الوصلة:

- * إن التركيب الذي يوضحه الشكل (a) هو من أجل طبقة AlGaAs رقيقة نسبياً،
- * أمّا الشكل (b) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs أسمك؛ إذ تبلغ نحو 60 \AA وأكثر.
- * وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة استنفاد تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل AlGaAs/GaAs وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛
- تكون هنا طبقة الـ n^+ - AlGaAs رقيقة؛ ومن أجل الطبقة p-GaAs ينزاح قاع الحفرة الكمومية نحو الأعلى؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع تحت أدنى عصابة طاقية جزئية.
- ومن ثمّ لا توجد إلكترونات داخل القناة والناقلية النوعية على طول التركيب المتغاير يساوي الصفر على الأغلب.
- فالمانحات الموجودة في المنطقة AlGaAs المُطعَّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك الجزء - نصف الناقلية - من التركيب الذي قد أصبح مشحوناً إيجابياً.
- ومن أجل تشغيل الناقلية النبيلة الإلكترونية لا بد من تطبيق جهد موجب على البوابة المعدنية (الحاجب المعدني).

آلية تشكل نبائط Normally-on:

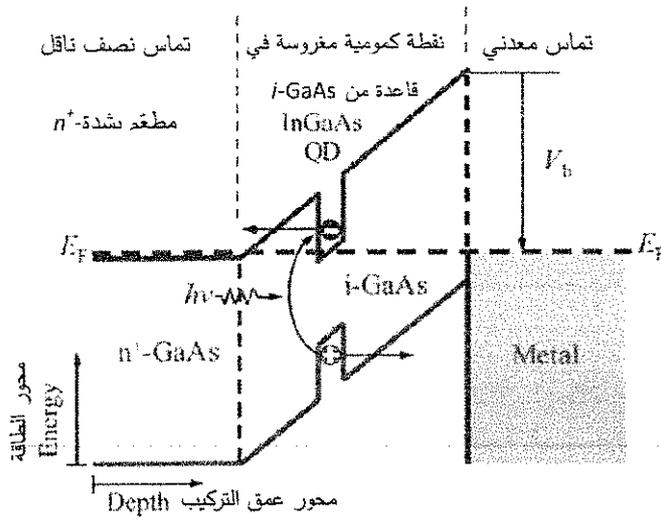
- في هذه الحالة يتوزع الجهد ذاتي التشكل بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي فوق أعلى عصابة- جزئية وتسكن الإلكترونات القناة من دون انحياز بجهد خارجي. وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى توافر طبقات AlGaAs سميكة كفاية؛ أكبر من 600 \AA .
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط تشغيل الناقلية في الحالة الاعتيادية Normally-on، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق جهد سالب على المعدن؛ إذ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمّ يمكن تحويل النبيلة إلى حالة فصل (أي إلى قفل) off.

ثالثاً- إن وجود المجانبات الطاقية في الوصلات الفردية النانوية المتغايرة يؤدي إلى تشكل حقول كهساكن ناتجة من إعادة توزيع الشحنة الكهربائية، حيث تلوي هذه الحقول حدود عصابات الطاقة ويصبح مستوى فيرمي E_F ثابتاً عبر المواد المتماسكة؛ وهذا بدوره يؤدي إلى تشكل بئر كمون فيها إلكترونات حرة مما يعني توافر غاز إلكتروني عند السطح الفاصل بين المواد المتماسكة.

أبعاً- يُعدُّ المُباعِد عنصرًا مهمًّا للتراكيب متغيرة- التطعيم، لأنه يمنع جزئيًّا تبعثر إلكترونات القناة في طرف التركيب- المتغاير المُطعَّم بشدة ويُزيد الحركية الإلكترونية. ولكن، ثمة مفعول سلبي للمُباعِد؛ إذ إن زيادة سماكة المُباعِد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُباعِد ومن ثمَّ إلى تخفيض الكمون الكهرساكن الذي يحصر إلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ ولهذا السبب، فإن مُباعِدًا سميكًا يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الثالث: (20 درجة)

أولاً- يتألف الديويد الضوئي من جملة مؤلفة من تماس معدني ونصف ناقل من GaAs ذاتي مغروسة فيه نقطة كمومية تسمى قاعدته ونصف ناقل آخر من n^+ -GaAs. والشكل الآتي يوضح رسماً تخطيطياً للعصابات الطاقية لمثل هذا الديويد الضوئي الواقع في حالة توازن عندما يكون مستوى فيرمي، E_F ، واحداً عبر كامل التركيب؛ إذ ينشأ عند الوصلة- المتغايرة (نصف ناقل/ معدن) حاجز كمون V_0 (حاجز شوتكي).



ثانياً- عند تطبيق انحياز كهربائي في شروط الانحياز العكسي بين طرفي الجملة المدروسة المتمثلين، ضمن الشروط المعتبرة في الدراسة، بالمنطقة n^+ (الواقعة من جهة اليسار) والتماس المعدني (تماس شوتكي) الواقع من جهة اليمين؛ ثمة تيار كهربائي يمكن أن يتدفق عبر الجملة المدروسة من حيث المبدأ بفضل آلية العبور بالنفق بين العصابات. ولكن احتمالية مثل هذا العبور بالنفق صغيرة للغاية والتيار يكون مهماً حتى وإن انغمست نقطة كمومية في القاعدة.

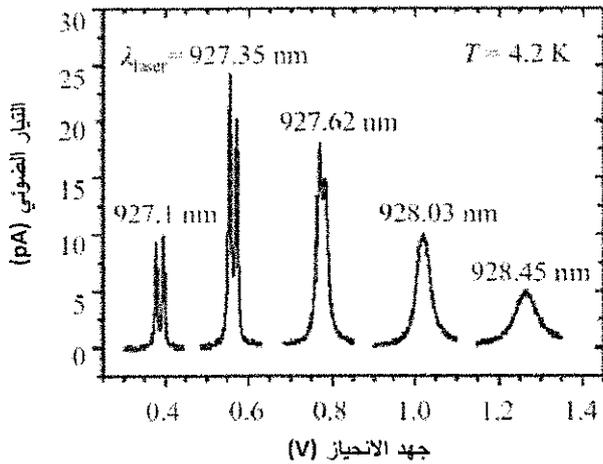
ثالثاً- إذا تعرّض الديويد لضوء، يتجاوب مع انتقالات ضوئية بين مستويات متقطعة؛ إلكترونية وأخرى ثقبية،

فإنَّ هذا الضوء يؤدي إلى تهيج زوج إلكتروني- ثقبي داخل النقطة الكمومية.

وعندها بمقدور الإلكترون والنقب العبور بالنفق ببسر من النقطة الكمومية إلى منطقة زرنيخيد الغاليوم الذاتية (i -GaAs) ويسهمان في التيار الكهربائي- "التيار الضوئي".

نعرض في الشكل الآتي النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من تهيج الحالة الأرضية ($n_1 = n_2 = n_3 = n'_1 = n'_2 = n'_3 = 1$) لنقطة كمومية فردية؛ مصنوعة من $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ بطريقة التجمّع- الذاتي، ومنغمسة في طبقة ذاتية $GaAs$ بسماكة 360 nm . بما أن التراكيب المتغايرة $InGaAs/GaAs$ هي من النوع-I، فإن الجزء النشط ضوئياً من هذه التراكيب هو النقطة الكمومية الفردية $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ فقط.

● ولقد أجريت تجارب في هذا السياق عند الدرجة 4.2 K ؛ إذ يوضح الشكل المجاور تغير التيار الضوئي كتابع لجهد



الانحياز الكهربائي من أجل أطوال موجية مختلفة للضوء الذي يتعرّض له التركيب المدروس حيث تمت الإشارة إلى هذه الأطوال الموجية على منحنيات التيار الضوئي.

ويمكن أن نرى أن التابعيات (تابعية التيار الضوئي للجهد) تسلك، في الواقع، سلوكاً تجاوبياً واضحاً؛ وهذا ما يمكن تفسيره من حقيقة أن الطاقات الإلكترونية والتقبية المُكمّأة انزاحت تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبّق، كما هو متوقع من ما يسمى مفعول ستارك الذي أمكن رصده عند دراسة الذرات والجزيئات؛

فعندما تكون هذه الطاقات بحيث يوافق الطول الموجي طول موجة ضوء التعرّض، فإن الضوء يُهَيِّج إلكترونات وثقوب داخل البئر الكمومي تُنتج بدورها التيار الضوئي المقيس؛

وعند ازدياد الانحياز المطبق تنزاح الطاقات المشار إليها نحو القيم الأصغر فضلاً عن ازدياد طول موجة التجاوب.

ويوضح أيضاً الشكل المذكور أطيفاً من أجل تهيج الحالة الأرضية ذاتها للنقطة الكمومية من أجل انحيازات جهد مختلفة:

→ إن أطيف التيار الضوئي الملاحظة ضيقة جداً بسبب وجود نقطة كمومية فردية.

→ ويُصبح التعرّض الطيفي مرئياً، أي ملحوظاً، عند انحيازات جهد عالية عندما تنخفض المستويات الطاقية الإلكترونية والتقبية بنتيجة ارتفاع معدّل (سرعة) العبور بالنفق من النقطة الكمومية.

توزيع الدرجات على جواب السؤال الرابع: (25 درجة)

أولاً- للإجابة على السؤال المطروح ندرس البلورات الكبيرة المنتظمة لدراسة تأثير الحقول الكهربائية عالية القيم على السرعة الانسيابية والخصائص المميزة (تيار - جهد). نحصل على المعادلات لهذه المسألة تحت شرط مفاده، أن زمن الاسترخاء، τ_e ، ثابت؛ أي إنه لا يتعلق بقيمة الحقل الكهربائي المطبّق. لدى ازدياد قيمة الحقل المطبّق على البلورة المدروسة يبتعد الغاز الإلكتروني عن حالة التوازن. وعلى وجه الخصوص، تزداد الطاقة الإلكترونية الوسطية للغاز؛ يمكن فهم ذلك من الدراسات الوصفية الآتية:

$$\frac{dE}{dt} = e(\bar{v} \cdot \bar{F}) - \frac{E - E_{eq}}{\tau_E} \quad (1)$$

♦ يوافق الحد الأول في الطرف الأيمن من المعادلة (1) الاستطاعة التي يكتسبها الإلكترون من الحقل الكهربائي؛

♦ ويُمثّل الحد الثاني معدّل ضياعات الطاقة الإلكترونية. تتناسب هذه الضياعات تناسباً طردياً مع انحراف الطاقة الإلكترونية، E ، عن قيمتها في حالة التوازن، E_{eq} ، وعكسياً مع زمن استرخاء الطاقة، τ_E .

♦ تزداد الطاقة الإلكترونية في الحقل الكهربائي وتستمر بذلك إلى أن يترسّح التوازن الطاقوي الإجمالي. وفي الحالة المستقرة، عندما $dE/dt = 0$ ، نحصل من المعادلة (1) على طاقة الإلكترون، E ، التي تُعطى بالمعادلة الآتية:

$$E = E_{eq} + e(\bar{v} \cdot \bar{F})\tau_E \quad (2)$$

ثمّ إنّ السرعة تتناسب، \bar{v} ، تناسباً خطياً مع الحقل الكهربائي \bar{F} .

بناءً على ما تقدم تتناسب الطاقة الإلكترونية الوسطية مع مربع الحقل الكهربائي وتُفوق قيمتها المتوازنة، E_{eq} . ومن الملائم هنا دراسة

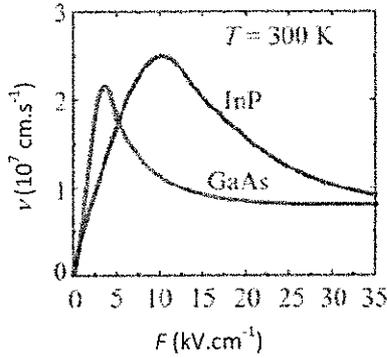
درجة الحرارة الإلكترونية الفعّالة، T_e ، بدلاً من الطاقة الإلكترونية الوسطية؛ مثل هذه الدراسة شائعة في إلكترونات أنصاف النواقل؛ إذ يمكن إيجاد العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الوسطية في حالة التوازن: $E = \frac{1}{2} \alpha k_B T_e$ حيث يمثّل العامل α أبعاد البنية المدروسة. من الواضح، أن درجة الحرارة الإلكترونية، T_e ، تتطابق في شروط التوازن الحراري مع درجة حرارة الشبكة البلورية، T ، وفي شروط عدم التوازن يمكن أن تختلفان.

يُعبّر عن درجة الحرارة الإلكترونية الفعّالة عن طريق الطاقة الإلكترونية الوسطية التي تُستخدم؛ كمعيارٍ لحالة عدم التوازن.

♦ إذا تجاوزت T_e درجة حرارة الشبكة البلورية T بشكلٍ طفيف فقط، وبقي الانتقال الإلكتروني خاضعاً لقانون أوم، يكون لدينا إلكترونات

"ساخنة" Warm.

- أما الشرط $T \gg T_e$ فيوافق الحالة التي تتعدد فيها الإلكترونات عن حالة التوازن؛ ومن أجل حالة كهذه تسمى الإلكترونات أحياناً إلكترونات "حارة" Hot.



- يمكن لدرجة الحرارة الإلكترونية أن تبلغ قيماً من رتبة بضعة آلاف درجات الكلفن، في حين إن الشبكة البلورية تبقى باردة.

وضمن تقديرات بسيطة؛ من المتفق عليه أن الانتقال من نظام الإلكترونات الساخنة إلى نظام الإلكترونات الحارة يحدث عند الحقل الكهربائي $F = F_{hc}$ ، عندما $e(\vec{v} \cdot \vec{F})\tau_E$ يساوي $E_{eq} = \alpha k_B T$. يمكن بسهولة تقدير حقل التسخين الكهربائي، F_{hc} في الواقع، يمكن تقدير سرعة الانسياب، \vec{v} ، الداخلة في المعادلة (2) من المساواة $\vec{v} = -\mu \vec{F}$ ؛ إذ يساوي حقل التسخين المعياري:

$$F_{hc} = \sqrt{\frac{\alpha k_B T}{e \mu \tau_E}} \quad (81-6)$$

ومن أجل الإلكترونات الحارة تُصبح عمليات التبعثر بحد ذاتها متعلقةً بالحقل. وفي هذا السياق، فإن العلاقة الخطية لقانون أوم، لم تعد صالحة والخصائص المميزة (تيار - جهد)، $J = J(F)$ ، وتابعة سرعة الانسياب للحقل، $v = v(F)$ ، يمكن أن تُبدي وبشدة سلوكاً غير خطي يتعلق ببنية عصابات الطاقة للإلكترونات وآليات التبعثر النوعي. وعلى وجه الخصوص، تكون هذه التابعيات مختلفة الشكل في أهم مادتين؛ → في المواد نصف الناقلة للمجموعة الرابعة IV تُظهر التابعيتان $J = J(F)$ و $v = v(F)$ مفعول الإشباع عند توفر حقول كبيرة.

→ في حين يتعرّض منحني التيار والسرعة من أجل مركبات المجموعتين III-V، بعد جزء متزايد بشكل غير خطي، لتناقص في مجال ما للحقل الكهربائي، كما يوضح الشكل.

→ وكما ينتج من التحليل الذي أُجري على أنظمة الانتقال الإلكتروني المختلفة، من أجل النبايط عالية السرعة، يتمثل المتحول الأساسي لمادة النبیطة في القيمة القصوى لسرعة الانسياب التي يمكن بلوغها بوجود الحقول الكهربائية الكبيرة.

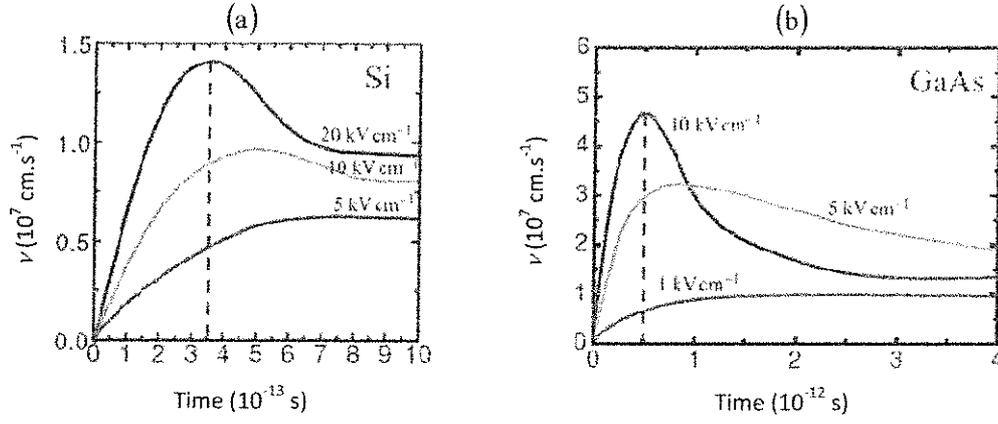
ثانياً- يمكن تجاوز الحدود المفروضة على سرعة الانسياب المميزة لمادة معينة باستخدام مفعول الإلكترون الحار المعروف تحت مسمى ظاهرة تجاوز التسرعة؛ بهدف شرح هذه الظاهرة لتتذكر الاستنتاجات التي حصلنا عليها من أجل مسألة الحالة المستقرة، التي يكون فيها توزيع الإلكترونات مستقر؛ بتعبير آخر، نسبنا التحليل السابق إلى الخصائص الإلكترونية المتوسطة على أزمنة أطول بكثير من الأزمنة المميزة للجمل المدروسة؛ كزمن الطيران الحر الوسطي، وزمن استرخاء الطاقة وزمن استرخاء الاندفاع، الخ.

سندرس الآن العمليات التي تحدث في الجملة الإلكترونية بعد انحرافها عن حالة التوازن مباشرة؛ إذ سنركز في هذه الحالة الخاصة على الاستجابة للحقل الكهربائي النبضي الذي له شكل تابع- الخطوة (الذرجة).

إن زمن استرخاء الاندفاع، τ_e أقصر من زمن استرخاء الطاقة، τ_E ، الذي يُحدد الطاقة الإلكترونية؛ ولهذا السبب، فإن استجابة السرعة لخطوة الحقل الكهربائي أسرع من استجابة الطاقة من أجل الحالة الموصوفة بالمعادلة (1).

عادةً، إذا ازداد معدل التبعثر بازدياد الطاقة الإلكترونية، فيمكن للسرعة الإلكترونية أن تفوق السرعة المستقرة خلال فاصل زمني من رتبة τ_E ؛ بتعبير آخر، سرعة العبور *Transient* ليست مجرد تابع للحقل الكهربائي وحسب، بل للطاقة الإلكترونية أيضاً؛ فعلياً، "تُكَيّف" السرعة نفسها، بسرعة، مع التغيرات البطيئة جداً للطاقة و"تواكبها" *Follows*، بمعنى تتعقبها، حتى تبلغ هذه الطاقة الحالة المستقرة؛ إذ في البداية، عندما لا تبلغ الطاقة الإلكترونية القيمة المستقرة تكون السرعة الإلكترونية الموافقة لطاقة العبور أعلى من السرعة الموافقة للطاقة المستقرة.

يوضح الشكل الآتي مفعول تجاوز السرعة من أجل Si و GaAs. تُمثل سرعة الانسياب كتابح للزمن من أجل بضعة حقول كهربائية؛ إذ يفترض تطبيق الحقل الكهربائي بين طرفي العينة المدروسة في اللحظة $t = 0$. يظهر مفعول التجاوز عند توافر حقول كهربائية عالية القيمة ويمكن لذروة سرعة العبور أن تتجاوز سرعة الإشباع- المستقرة من مرتين إلى أربع مرات.



ثالثاً- من خلال الشرح الفيزيائي لمفعول التجاوز أن نفهم ونُدرك ما هي إمكانية الاستفادة من هذا المفعول. لتتصور أن إلكترونات باردة دخلت منطقة نشطة لنبيطة نصف ناقلة من أحد تماساتها؛ فإذا توافر في المنطقة النشطة حقل كهربائي كبير، فإن الإلكترونات ستتسارع؛ فعلى مسافة ما من التماس الحاقن ستبلغ الإلكترونات سرعة التجاوز القصوى، وبعد ذلك، ستتناقص سرعتها تدريجياً نحو القيمة المستقرة. فإذا كانت المنطقة النشطة للنبيطة قصيرة وأمكن مقارنتها بالمسافة التي يحصل فيها مفعول التجاوز، فإن انتقالاً إلكترونياً يحدث عبر هذه المنطقة النشطة بسرعة أعلى من السرعة المستقرة ويصبح زمن الانتقال (العبور) الإجمالي أقصر، ومن ثم ستكون النبيطة شاردة على العسل كجهد مسرعة وتردد أعلى. وهذا يعني أنه يمكن بلوغ مفعول التجاوز والإلكترونات فائقة السرعة في عينات قصيرة (من رتبة أجزاء من واحد ميكرون).

