كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

المادة : الكترونيات نانوية

المحاضرة : الخامسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

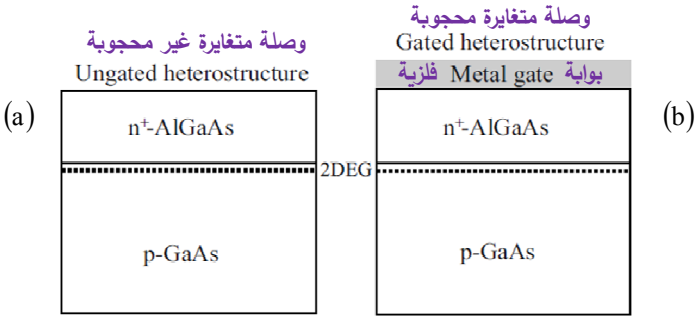


يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

### 4-2-7 التحكم بنقل الشحنة الكهربائية Control of Charge Transfer:

إن التحكم **بالناقلية النوعية** *Conductivity* للتركيب، أو بدقة أكثر، ضبط مقاومته Resistance ضروري من أجل الحصول على **نبائط مفيدة**.

**لندرس** الآن **احتمالية تغير الناقلية لوصلة متغايرة** من خلال التحكم بالتركيز الإلكتروني؛ لتحقيق هذا الهدف ندرس وصلة متغايرة **وضعت عليها بوابة فلزية حاجبة** تسمى باختصار **وصلة متغايرة محجوبة** *Gated Heterojunction* يوضحها الشكل (4b-7) تخطيطياً؛ ومن أجل المقارنة تمّ في الشكل (4a-7) إظهار وصلة متغايرة أخرى غير محجوبة تمت دراستها سابقاً. الفارق ما بين التركيبين يكمن **في وجود** تماس فلزي (M) **فقط** تَوضَّع أعلى طبقة مادة الحاجز $n^+ - Al\,Ga\,As$ في **التركيب المحجوب**:




**الشكل (7-4): رسم تخطيطي لتراكيب متغايرة غير محجوبة (a) وأخرى محجوبة (b) تحوي غازاً إلكترونياً ثنائي البعد (2DEG).**

- تسمى هذه الجملة المؤلفة من فلز ونصف ناقل Metal Semiconductor System **بالتركيب MES**.

ومن أجل المواد الشبيهة بمركب GaAs تُعدُّ تراكيب MES أكثر أهمية من أجل تطبيقات النبائط، لأن هذه المواد، وبخلاف حالة الكوارتز $SiO_2$ الذي يتوضع على السليكون Si، لا تحوي أكسيداً طبيعياً مستقراً. ولذلك، فإن **معظم النبائط الإلكترونية التي قوامها** GaAs **تستعمل تراكيب MES**.

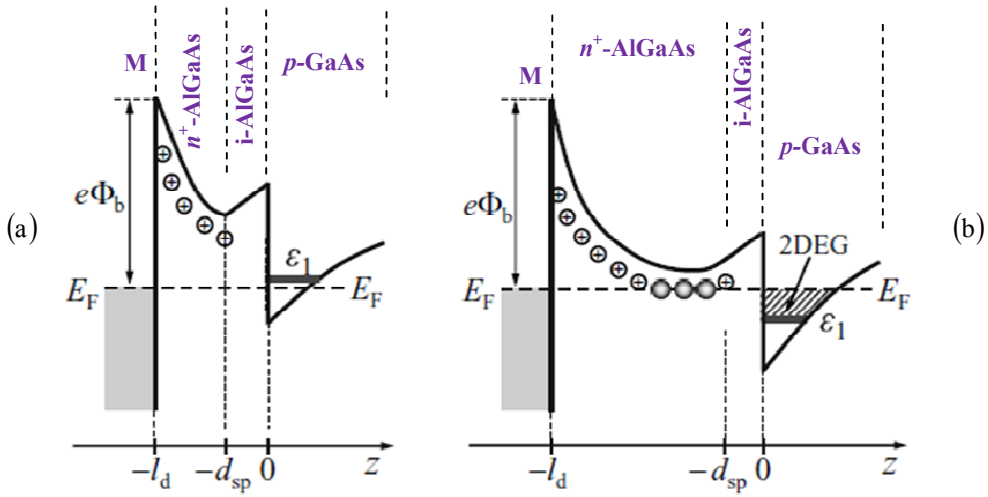
- يمكن أيضاً أن تُنسب هذه التراكيب إلى ما يسمى **بتراكيب شوتكي المحجوبة** *Schottky Gated*.

⟵ **يوجد** عادةً تحت البوابة الفلزية في مواد شبيهة بـ GaAs **مناطق نضوب ممتدة** تنشأ بسبب **جهد شوتكي العالي ذاتي- التشكّل** *High Built-in*، $\Phi_b$، والذي يبلغ نحو 0.8 V.

⟵ **وتُعرف** مثل منطقة النضوب هذه **بمنطقة نضوب شوتكي** *Schottky Depletion*

يوضح الشكل (5-7) مخططاً طاقياً لعصابة الناقلية من أجل تركيب متغاير مؤلف من M/AlGaAs/GaAs بسماكتين للطبقة AlGaAs : حيث يوجد مُباعدٌ غير مُطَّعَّمٍ يفصل المنطقة المُطَّعَّمة، من النوع-*n*، عن الوصلة:

- إن التركيب الذي يوضحه الشكل (5a-7) هو من أجل طبقة AlGaAs **رقيقة نسبياً**،
- أمَّا الشكل (5b-7) فيعرض تركيباً بطبقة AlGaAs **أسمك**؛ إذْ تبلغ نحو $600\ \text{Å} = 60\ \text{nm}$ وأكثر.
- وتوجد من أجل كلتا الحالتين منطقة نضوبٍ تؤثر في القناة الإلكترونية المتشكلة عند السطح الفاصل $Al\,Ga\,As/Ga\,As$ وتضمن إمكانيتين لضبط التركيب؛
  - **تركيب فصلٍ في الحالة الاعتيادية** *Normally-off* يوافق الشكل (5a-7)؛




**الشكل (7-5): مخططات طاقية لعصابات الناقلية من أجل التراكيب المتغايرة M/AlGaAs/GaAs. يتحكم جهد شوتكي الداخلي هنا بمنطقة النضوب الواقعة تحت البوابة الفلزية حيث يؤدي في (a) إلى نبيطة فصلٍ Off في الحالة العادية عندما يكون الحاجز ضيقاً وفي (b) إلى نبيطة توصيلٍ On في الحالة العادية عندما يكون الحاجز واسعاً (60 nm أو أكثر) حيث يظهر فيها بئر كمونٍ مشغولٍ بغازٍ إلكترونيٍ ثنائي البعد.**

⟵ إذْ تمتد منطقة النضوب إلى كلٍ من الطبقة AlGaAs والوصلة؛

⟵ وقاع الحفرة الكمونية **ينزاح نحو الأعلى**؛ ثم إن مستوى فيرمي يقع **تحت** أدنى عصابة طاقية جزئية.

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

⟵ فالمانحات الموجودة في منطقة AlGaAs المُطَّعَّمة تأينت والإلكترونات غادرت ذلك **الجزء** – نصف الناقل– من التركيب **الذي** أصبح مشحوناً إيجابياً.

⟵ ولجعل النبيطة الإلكترونية في حالة توصيلٍ لا بد من تطبيق **جهد موجب** على البوابة الفلزية.

إذن، يمكن تصنيع تراكيب فصلٍ في الحالة الاعتيادية باستعمال حاجزٍ رقيقٍ من AlGaAs .

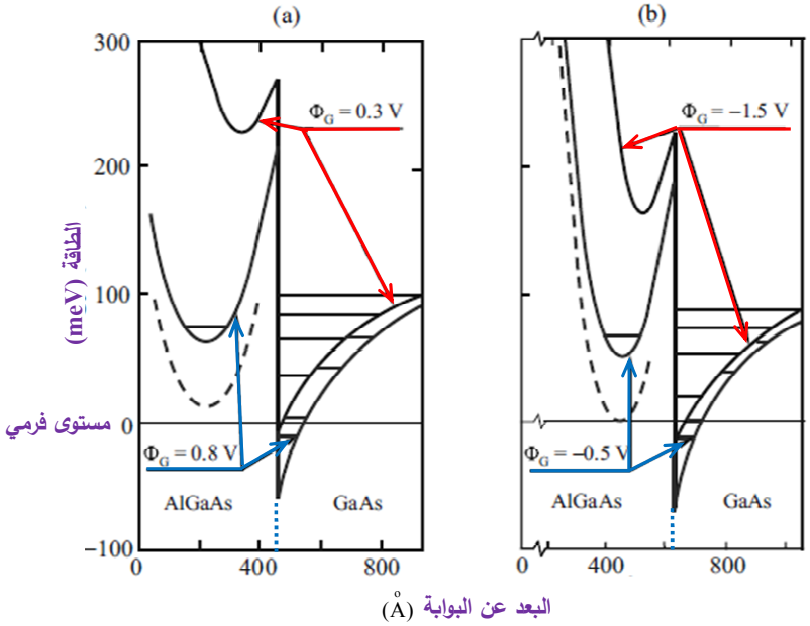
- **تركيب وصلٍ في الحالة الاعتيادية** *Normally-on* يوافق الشكل (7-5**b**)؛

- في هذه الحالة يهبط الجهد ذاتي التشكّل (بمعنى يتوزع) بين طرفي طبقة AlGaAs سميكة بحيث يقع مستوى فيرمي **فوق** أعلى عصابة جزئية وتسكن الإلكترونات القناة من دون انحيازٍ بجهد خارجي.
- وتتصف هذه القناة بناقلية نوعية محدودة في الشروط العادية.
- يمكن تحقيق هذه الحالة لدى وجود طبقات AlGaAs سميكة كفايةً.
- وبهذه الطريقة يمكن، في نبائط التوصيل في الحالة الاعتيادية *Normally-on*، ضبط ناقلية القناة من خلال تطبيق **جهدٍ سالبٍ** على الفلز؛ إذْ أن جهداً كبيراً يؤدي إلى تجريد "تطهير" القناة من الإلكترونات ومن ثمَّ يمكن تحويل النبيطة إلى حالة فصلٍ Switch off.

يوضح الشكل (7-6) **الطاقة الكامنة والسويات الطاقية المكمَّاة** المحسوبة لكلتا النبيطتين؛

**نبيطة قفلٍ ونبيطة توصيلٍ في الحالة الاعتيادية** من أجل جهود بوابة، $\Phi_G$، مختلفة حيث يُحتسب مستوى فيرمي على أنه الطاقة الصفرية؛ تمّ حساب القيم من أجل نبيطة قفلٍ في الحالة الاعتيادية من أجل طبقة AlGaAs **بسماكة** نحو 400 Å، راجع الشكل (7-6a).

- يحوي البئر الكمومي المتشكل على السطح الفاصل حتى **أربعة مستويات طاقة مكمَّاة**.
- وثمة جهد موجب **يُخفِّض** قاع عصابة الناقلية لـ Ga As عند السطح الفاصل. إذْ يلامس القاع مستوى فيرمي عند جهد البوابة $\Phi_G = 0.3\ V$ والنبيطة تعمل عند جهد إشباع يساوي نحو $+0.8\ V$، عندما يلامس المستوى الأول المكمَّى مستوى فيرمي (ويتجاوزه).




**الشكل (7-6): يوضح كمونات التوافق– الذاتي المحسوبة من أجل إلكترونات الناقلية في تركيبين** M/AlGaAs/GaAs **متغايرين؛ (a) ويوافق نبيطة قفلٍ و (b) نبيطة توصيلٍ في الحالة الاعتيادية في درجة حرارة الغرفة. يقع مستوى فيرمي عند الطاقة** $E = 0$. **وتُمثِّل الخطوط الأفقية قيعان الطاقة الأخفض لأربع عصابات طاقية جزئية؛ والخطوط المتقطعة تُشير إلى سويات المانح.**

- أضف إلى ذلك تنشأ **نهاية كمون صغرى** *Potential Minimum* في طبقة الحاجز AlGaAs والتي من الواضح أنَّها تسعى للانخفاض عند زيادة جهد البوابة؛ **ويمكن لهذه الظاهرة أن تُسبب مفعولاً سلبياً**، إذْ أنَّ تَشكّل **قناةٍ ثانيةٍ** في هذه الطبقة (حيث ستقوم القناة بتجمِّيع إلكترونات) يحجب جهد البوابة، ويُسبب خسارة في التحكم بتركيز الغاز الإلكتروني ثنائي البعد عند السطح الفاصل بين مادتي الوصلة المتغايرة المدروسة.

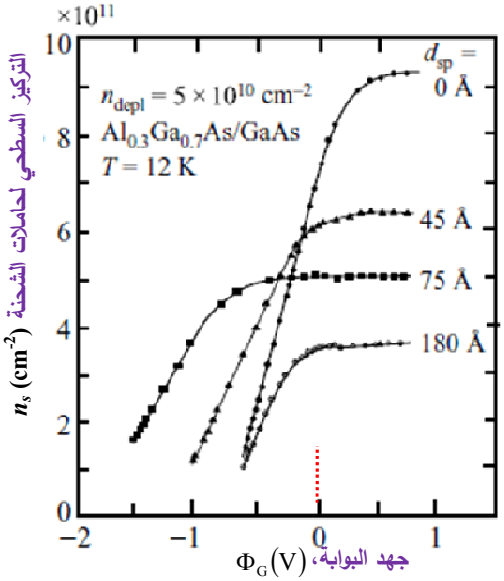
يوضح الشكل (7-6b) نبيطة توصيلٍ في الحالة الاعتيادية: تحوي هذه النبيطة طبقة AlGaAs بسماكة **أكبر** من 600 Å ويمكن تحويلها إلى **قفلٍ** Switch off عند تطبيق جهد **سالب** على البوابة يساوي نحو $-0.5\ V$.

**لندرس الآن بعض المعطيات التجريبية** ذات الصلة بمسألة التراكيب المتغايرة متغيرة التطعيم حيث تم قياس تراكيز حاملات الشحنة وحركياتها بآن معاً. يُظهر الشكل (7-7) التركيز الإلكتروني السطحي المضبوط بجهد البوابة من أجل جملٍ Al/AlGaAs/GaAs صُنِّعَت من أجل **ترانزستورات عالية الحركية الإلكترونية** .**H**igh-**E**lectron-**M**obility **T**ransistors (HEMTs)

- توافق المنحنيات سماكات مختلفة للمُباعد، $d_{sp}$. يمكن أن نلاحظ أنه يمكن تغيير التركيز الإلكتروني بمقدار عشر مرات؛
- فضلاً عن أن إشباع هذا التركيز **عند تطبيق جهد موجب** ناجم عن انتقال الإلكترونات إلى الحفرة الكمونية التي تشكَّلت في منتصف منطقة الحاجز المستنفدة، كما ذكرنا سابقاً.
- يوضح الشكل (7-7) حدوث تغيرات ملحوظة في خصائص التراكيب عند تغيّر سماكة المُباعد.

← ومن ضمن التراكيب المختلفة، التي يوضحها الشكل (7-7)، يُعدُّ التركيب الخالي من المُباعد، $d_{sp} = 0$، من أكثر التراكيب المحتمل الاستفادة منها في تصنيع نبيطة فصلٍ في الحالة الاعتيادية؛ في الواقع، يمكن عبر تطبيق جهد **موجب** على البوابة، أن يزداد التركيز الإلكتروني في القناة.

← والتراكيب– بمُباعد أسمك– تلاءم نبائط التوصيل في الحالة الاعتيادية على نحوٍ جيدٍ؛ **إذْ في هذه التراكيب لا يُغيِّر الجهد الموجب التركيز، في حين إنَّ جهداً سالباً يُخفِّضه بصورة حادة.**

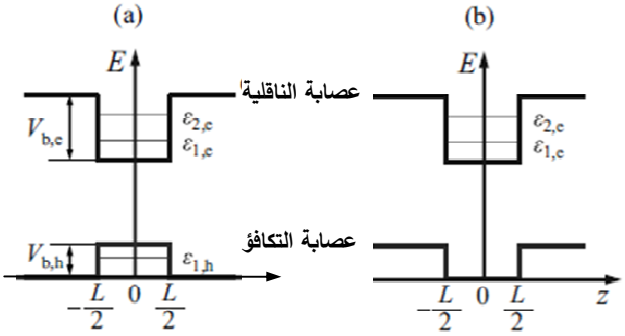



**الشكل (7-7): يوضح تغير الكثافة الإلكترونية ثنائية البعد المقاسة والمتشكلة في القناة في التراكيب $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ في الدرجة 12 K عند تغير جهد البوابة واختلاف سماكة المُباعد، $I_{sp}$. جميع العينات المدروسة سليكونية مُطعّمة، باستثناء العيّنة ذات المباعد 180 أنغستروم حيث $N_D = 9.2x10^{17}$ cm$^{-3}$. وتبلغ سماكة الطبقة $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$، 700-1200 Å. $N_D = 4.6x10^{13}$ cm$^{-3}$**

**يُعدُّ المُباعد عنصراً مهماً للتراكيب متغيرة– التطعيم، لكونه** يمنع تبعثر إلكترونات القناة جزئياً في الجهة المُطَّعَّمة بشدة من التركيب المتغاير **ويُزيد الحركية الإلكترونية. ومن جهة أخرى، ثمة مفعول سلبي للمُباعد**؛ فزيادة سماكة المُباعد تؤدي إلى زيادة الهبوط الكموني على المُباعد، ومن ثمَّ تخفيض الكمون الكهراكدي الذي يحصر الإلكترونات بجوار السطح الفاصل؛ **ولهذا السبب**، فإن مُباعداً سميكاً يُسبب انخفاضاً في التركيز الإلكتروني. هذا يعني أن تسويةً ما Trade-off بين الحركية وتركيز حاملات الشحنة تستوجب تحسين تصميم التركيب من أجل كل تطبيقٍ نبيطةٍ على حدة.

لقد درسنا هنا **نظم بوصّلةٍ متغايرةٍ فرديةٍ**. يمكن تصنيع هذه النظم باستخدام تكنولوجيا بسيطة نسبياً فضلاً عن أن لهذه النظم تطبيقات هائلة، **إلاَّ أنها تعاني من محدودية كبيرة في تركيز حاملات الشحنة في قناة الناقلية**. وكما يبدو من الشكل (7-7)، فإن التراكيز السطحية النموذجية **أقل من** $10^{12}\ \mathrm{cm}^{-2}$ من أجل نبائط الوصلة المتغايرة الفردية. **يمكن الحصول على تراكيز حاملات أعلى في القناة الناقلة عبر استعمال** منظومة ذات وصلة **مضاعفة**؛ ومثل هذه المنظومة يوضحها الشكل (7-8) تخطيطياً حيث تُعرض تراكيب متغايرة **بوصلة مضاعفة** محتملة:

- فمن أجل تراكيب متغايرة من النوع-I تتشكَّل **بئر كمونية من أجل الإلكترونات** (يظهر مستويان مكمَّان **ومن أجل الثقوب** (يظهر مستوى مكمَّى واحد)،
- في حين من أجل تركيب متغاير من النوع-II **فينشأ بئر كمونٍ من أجل الإلكترونات فقط**.




**الشكل (7-8): نوعان لمخطط عصابات الطاقة لتراكيب متغايرة مضاعفة؛ (a) من النوع- I و(b) من النوع- II.**