

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم الدقيقة

قسم علوم المادة



مذكرة ماستر

ميدان علوم المادة

فرع الفيزياء

تخصص فيزياء المواد

رقم: أدخل رقم تسلسل المذكرة

إعداد الطالب:

زروق نريمان

يوم: 02/06/2025

دراسة الخصائص الالكترونية للنانو ترانزستور بالمحاكي Silvaco-Atlas

لجنة المناقشة:

رئيس	أ. د.	جامعة محمد خيضر - بسكرة	مفتاح أفاق
مناقش	أ. مح ب	جامعة محمد خيضر - بسكرة	حيواني فاطيمة
مقرر	أ. مح ب	جامعة محمد خيضر - بسكرة	بوذيب وهيبة

الإهداء

الحمد لله حبا وشكرا وامتنان على البدء والختام
لم تكن الرحلة قصيرة ولا الطريق محفوفًا بالتسهيلات لكنني فعلتها فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا
النهايات بفضلته

بكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي:

الى الانسانية العظيمة قوتي بعد الله داعمتي الاولى والابدية **امي**

اهديك هذا التخرج وممتنة لان الله اصطفاك لي من البشر اما

الى مصدر قوتي وضلعي الثابت الى من كانوا سندا ودعما وانتظروا هذه اللحظة كثيرا
ليفخروا بي كما افخر بوجودهم اخوتي

صلاح حفيظة ميسة خلود حنين

الى جميع من امدوني بالقوة والتوجيه الى كل من امن بي ودعمني في الاوقات الصعبة
لأصل الى ما انا عليه الان دمت لي سندا

خريجتكم زروق نزيهان

الشكر والتقدير

أود بدايةً أن أشكر الله الذي منحني القوة والصبر لإنجاز هذا العمل.

وأقدم بخالص الشكر والامتنان لمشرقي

الأستاذة "بوزيب وهيبة" على متابعتها ونصائحها وتوجيهها

طوال فترة البحث.

كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير لكل من ساندني وساعدني

كما أتقدم بالشكر الجزيل للجنة المناقشة على قبولهم مناقشة هذه المذكرة وتصحيحاتهم القيمة

وإرشاداتهم.

ملخص

مع التقدم المستمر في تكنولوجيا النانو وخاصة في مجال الإلكترونيات النانوية، أصبح تصنيع أجهزة نانوية ممكنًا، مثل ترانزستور الإلكترون الواحد (SET) ويطبق في الكثير من المجالات كالتطب، الاعلام الالي والدارات المتكاملة

في هذا البحث، قمنا بحل معادلة بواسون – شرودنجر في الاحداثيات الديكارتية باستخدام برنامج محاكاة سيلفاكو أتلانز Atlas Silvaco لدراسة الخصائص الإلكترونية لهذا الجهاز فتحصلنا على النتائج المتمثلة في مخططات الطاقة وتوزيع الكمون في هذه البنية كذلك دالة الموجة الموافقة للحالات الثلاثة الأولى من الطاقة، كما درسنا تأثير استقطاب الجهد المطبق بين طرفي المصدر والمصرف وجهد البوابة الثالثة على مخطط الطاقة كما تحصلنا على منحنى تغير جهد تيار المصرف بدلالة جهد البوابة الثالثة.

الكلمات المفتاحية: نانو ترانزستور، نقطة كمومية، الحصر الكولومبي، ترانزستور SET

Abstract

The advancements in nanotechnology, especially in the field of nanoelectronics, the fabrication of nanoscale devices has become possible, such as the single-electron transistor (SET) and has found application in many fields, including medicine, information technology, integrated circuits.....

In this research, we solved the Poisson-Schrödinger equation in Cartesian coordinates using the Silvaco Atlas simulation program to study the electronic properties of this device. We obtained results like as energy diagrams and potential distributions in this structure, as well as the wave function corresponding to the first three energy states. We also studied the effect of the polarization of the applied voltage between the source and drain and the third gate voltage on the energy diagram.

Keywords: Nano transistor, quantum dot, Coulomb confinement, transistor SET

الفهرس

I	الاهداء
II	الشكر و العرفان
III	الملخص
IV	الفهرس
V	قائمة الاشكال
VIII	قائمة الجداول
X	قائمة الرموز
1	المقدمة العامة
2	مراجع المقدمة العامة

الفصل الأول: عموميات حول النانو ترانزستور

3	1-I المقدمة
3	2-I التأثيرات الكمومية في تقنية النانو
4	1-2-I البئر الكمومي (Quantum Well)
5	2-2-I السلك الكمومي (Quantum wire)
5	3-2-I النقطة الكمومية (Quantum Dot)
5	3-I مفهوم ترانزستورات النانو
6	4-I ترانزستور الإلكترون المفرد (SET)
6	1-4-I التاريخ
6	2-4-I بنية الترانزستورات أحادية الإلكترون
7	3-4-I الوصلة النفقية
8	5-I الفيزياء الأساسية لترانزستور الإلكترون المفرد (SET)
9	6-I مبدأ تشغيل SET
10	7-I تأثير حصر كولومب
11	8-I خصائص تيار ترانزستور الإلكترون المفرد (SET)
13	9-I تطبيقات SET
13	1-9-I مستشعر الشحنة
14	2-9-I الكشف عن الأشعة تحت الحمراء
14	3-9-I كاشف موجات ميكروويف فائق الحساسية
15	4-9-I مقياس كهربائي فائق الحساسية
15	5-9-I مطيافية الإلكترون الواحد
15	6-9-I منطق ترانزستور أحادي الإلكترون قابل للبرمجة
16	10-I مزايا وعيوب ترانزستور احادي الالكترن
17	11-I تصنيع الالكترن احادي الالكترن (SET)
18	12-I الدراسة الكمية

19	1-12-I مقارنة مساحة الأنماط
19	2-12-I حساب دوال Green
20	3-12-I حساب تيار التصريف
21	مراجع الفصل الأول

الفصل الثاني: منهجية المحاكاة باستخدام برنامج Silvaco Atlas

25	1-II المقدمة
25	2-II نظرة عامة حول Silvaco Atlas
27	3-II وحدات برنامج Silvaco –TCAD
27	1-3-II الوحدة DECKBUILD
28	2-3-II الوحدة أثينا ATHENA
28	3-3-II الوحدة أطلس Atlas
28	4-3-II الوحدة Tonyplot
29	4-II منطق البرمجة
30	5-II خطوات المحاكاة
31	1-5-II تحديد البنية
31	1-1-5-II الشبكة mesh
32	2-1-5-II المناطق و المواد Region et Material
33	3-1-5-II القطب الكهربائي Electrode
34	4-1-5-II التطعيم Dopage
36	2-5-II مواصفات نماذج الأجهزة
37	3-5-II اختيار الطريقة العددية
38	6-II تحليل النتائج Results Analysis
39	7-II المعادلات والنماذج الأساسية لأنصاف النواقل في برنامج SILVACO.A
40	مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث: نتائج المحاكاة

44	1-III المقدمة
44	2-III النموذج المستخدم
45	3-III بنية النانو ترانزستور (SET)
46	4-III الدراسة الكهروستاتيكية
46	1-4-III توزيع الكمون
48	2-4-III مخطط الطاقة للترانزستور SET
49	3-4-III دالة الموجة
51	4-4-III تأثير الشبكة V_g
51	5-4-III تأثير الشبكة V_d
53	5-III خواص التيار للترانزستور SET $I_{ds} = f(V_g)$

54	مراجع الفصل الثالث
55	الخاتمة

قائمة الاشكال

4	صورة تخطيطية لأنظمة الاحتجاز الكمي منخفضة الابعاد و أسماء هياكلها تبقى حرية حركة الناقلات في كل منطقة زرقاء	الشكل 1-I
6	نانو ترانزستور	الشكل 2-I
7	بنية النانو ترانزستور	الشكل 3-I
8	دائرة ترانزستور احادي الالكترن	الشكل 4-I
8	يمثل (أ) عمليات نقل الإلكترونات واحدًا تلو الآخر في ترانزستور SET ترانزستور أحادي الالكترن ويمثل (ب) ترانزستور MOSFET التقليدي (ترانزستور تأثير المجال شبه الموصل بأكسيد المعدن) حيث تشارك العديد من الإلكترونات في تيار الاستنزاف في نفس الوقت	الشكل 5-I
10	تطور مخطط الشريط والتيار كدالة لجهد الشبكة في مجموعة. (أ) نظام حصار كولومب، (ب) $\mu_1 = EFS$ ، يمكن للتيار أن يتدفق، ذروة كولومب الأولى، (ج) $\mu_1 < EFD$ ، لم يعد التيار قادرًا على التدفق، يصبح التيار صفرًا مرة أخرى، (د) $\mu_2 = EFS$ ، بداية ذروة كولومب الثانية	الشكل 6-I
11	توصيف تيار IDS-VG لـ SET (تذبذب كولومب)	الشكل 7-I
12	ذبذبات كولومب. يتم تعديل التيار عن طريق استقطاب الشبكة، ويتم تطبيع V_g في e/C_g	الشكل 8-I
13	تغير قيم I_d الحالية كدالة لـ V_{ds} في البنية المتماثلة	الشكل 9-I
13	تغير قيم I_{ds} الحالية كدالة لـ V_{ds} في الهيكل غير المتماثل	الشكل 10-I
17	خطوات تصنيع SET (أ) ركيزة السيليكون، (ب) إضافة طبقة Al_{203} (ج) إضافة طبقة الكروم، (د) تصنيع أقطاب SET باستخدام FIB، (هـ) تصنيع فجوة بين SET قطبًا كهربائيًا، (و) ترسيب الجزيرة، (ز) تكوين الوصلات النفقية، (ح) ترسيب طبقة Al_{203} وتنشيط SET	الشكل 11-I
26	رسم توضيحي للعلاقة بين وحدات برنامج SILVACO	الشكل 1-II

27	الواجهة الرئيسية لـ Deckbuild	الشكل II-2
29	واجهة Tonyplot	الشكل II-3
32	مثال على الشبكة	الشكل II-4
33	مثال عن المناطق والمواد	الشكل II-5
34	مثال على الأقطاب الكهربائية	الشكل II-6
35	التطعيم في Atlas	الشكل II-7
45	الشكل (III-1-ج) يمثل البنية الخاصة بهذا النانو ترانزستور ويمثل الشكل (III-1-ب) الرسم التخطيطي المكافئ له	الشكل III-1
46	بنية النانو ترانزستور SET	الشكل III-2
47	توزيع الكمون على طول البنية	الشكل III-3
47	توزيع الكمون في مستوي (xy) البنية من أجل $V_{ds}=0(V)$ و $V_{g3}=0(V)$	الشكل III-4
48	مخطط الطاقة الكمومية لترانزستور	الشكل III-5
49	الدوال الموجية للحالات الثلاث الأولى E_1, E_2, E_3	الشكل III-6
50	$V_g=-0.15V$ توزيع الإلكترونات على طول البنية من أجل القيم $V_d=-0.02V$	الشكل III-7
51	رسم تخطيطي لنطاق التوصيل على طول الجهاز مع $V_d=0(V)$	الشكل III-8
52	رسم تخطيطي لنطاق التوصيل على طول الجهاز مع $V_g=-0.15(V)$	الشكل III-9
53	: تغير جهد التيار I_{ds} بدلالة جهد البوابة V_{g3} للترانزستور SET عند درجة الحرارة $T=20 K$ و $V_{ds}=0.1V$	الشكل III-10

قائمة الجداول

16	مزايا وعيوب ترانزستور احادي الالكترن	الجدول 1-I
30	الترتيب المنطقي للأوامر الأساسية في برنامج اطلس	الجدول 1-II
37	النموذج المستخدم	الجدول 1-III

قائمة الرموز

CMOS : complementary Metal-Oxide –Semiconductor

QD :Quntum Dot

1D: one Dimensional

2D : tow Dimensional

3D : three Dimensional

Fin FET : Fin Field –Effect Transistor

MOSFET : Metal-Oxide –Semiconductor

CNTFET : Carbon Nanotube

SET :Single electron Transistor

FIB : Foused Ion Beam

SNR: Single –to-Noise Ratio

NEGF : Non-Equilibrium Green's function

المقدمة العامة

أدت التطورات التكنولوجية السريعة، لاسيما في مجال تقنيات النانو، إلى إمكانية تصنيع أجهزة دقيقة للغاية بأبعاد نانوية ووفق معايير جديدة [1]، حيث تشهد تقنية النانو في الوقت الراهن تطورًا كبيرًا وأصبحت عنصرًا لا غنى عنه في معظم فروع الهندسة والعلوم، كما تعمل على دمج مواد مُصنَّعة بأحجام متناهية الصغر ضمن مكونات كبيرة للأجهزة والهيكل، ما أسهم في إحداث ثورة في الأداء من خلال ابتكار أجهزة أسرع، أصغر حجمًا، وأكثر أمانًا، وقد مكّنت الهياكل النانوية من تسهيل الحياة بطرق متعددة، بينما أتاحت جسيمات النانو تحويل ما كان يُعد مستحيلًا إلى احتمالات قابلة للتحقق [2].

أدى التقدم السريع في تقنيات التصنيع النانوي إلى إحداث نقلة نوعية في تصميم الهياكل النانوية، ما أسهم بشكل كبير في تطوير الأجهزة الإلكترونية ذات الكفاءة العالية. وقد ساهم هذا التقدم في تمكين استخدام هذه الهياكل في تطبيقات متقدمة ضمن مجالات حيوية مثل الحوسبة، والاتصالات، والرعاية الصحية. ومن بين أبرز المكونات النانوية التي أثارت اهتمامًا واسعًا في الأوساط العلمية، يبرز الترانزستور أحادي الإلكترون، الذي يعتمد على ظاهرة التحكم في انتقال الإلكترونات بشكل منفرد، ما يمنحه مزايا فريدة في تقنيات التصغير والتقليل من استهلاك الطاقة [3].

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الخصائص الالكترونية للنانو ترانزستور باستخدام المحاكى Silvaco-Atlas حيث تطرقنا في هذا البحث الى ثلاثة فصول:

❖ الفصل الأول: عرضنا فيه عموميات حول النانو ترانزستور مع التركيز على

الترانزستور احادي الالكترون (SET).

❖ الفصل الثاني: خصصنا هذا الفصل للتعريف بمبدأ عمل برنامج المحاكاة

Silvaco-Atlas.

❖ الفصل الثالث: قمنا بعرض نتائج المحاكاة للترانزستور SET و تفسيرها و

استخلاص النتائج.

في الأخير ننهي هذا العمل بخاتمة عامة تتضمن الاستنتاجات المتحصل عليها من نتائج

الدراسة.

مراجع المقدمة العامة

- [1] Waser, R. (Ed.). (2012). Nanoelectronics and information technology: advanced electronic materials and novel devices. John Wiley & Sons
- [2] Chandrasekara, B. (2013). Nanotransistors from metal and metalloid compound nanotubes. International Journal of Scientific & Engineering Research, 4(2).
- [3] Grabert, H, & Devoret, M. H. (Eds.). (2013). Single charge tunneling: Coulomb blockade phenomena in nanostructures (Vol. 294). Springer Science & Business Media.

الفصل الأول

عموميات حول النانو ترانزستور

1-I المقدمة

يرى العلماء أن تقنية النانو تمثل ثورة القرن الحادي والعشرين، وقد أطلق البعض على هذا العصر اسم "عصر النانو". وتكمن أهمية هذه التقنية في أن خصائص المواد يمكن أن تتغير بشكل مذهل عند تقليصها إلى أجزاء دقيقة جداً، خاصة عندما نصل إلى مقياس "النانو" أو أقل، فعند هذه النقطة تبدأ الجسيمات بإظهار خصائص جديدة وغير متوقعة تختلف تماماً عن خصائصها في حالتها الطبيعية ومن المتوقع أن تسهم تقنيات النانو في تصغير الأجهزة وخفض تكلفتها وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة [1].

يُعد علم النانو وتكنولوجيا النانو من أهم المجالات العلمية والهندسية الحديثة، حيث يركزان على دراسة المواد وتطويرها على مقياس النانومتر، أي على مستوى الذرات والجزيئات يتميز هذا المجال بخصائص فريدة للمواد تظهر عند تصغير أبعادها إلى النطاق النانوي، مما يؤدي إلى سلوكيات غير تقليدية مقارنة بالمواد التقليدية.

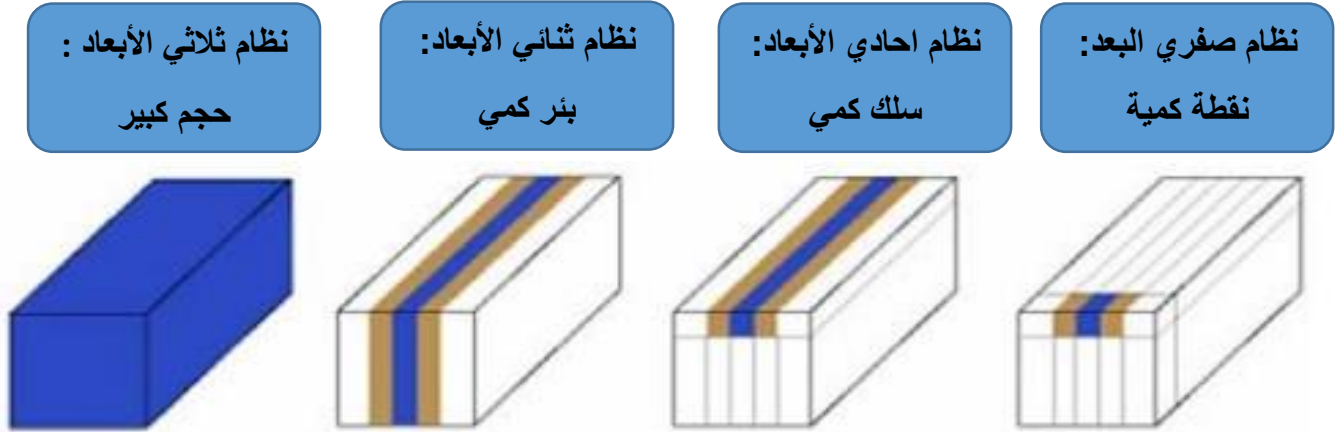
تعتمد تكنولوجيا النانو على القدرة على التحكم في بنية المادة عند هذا المستوى الدقيق [2] وتُعد تقنية النانو تقنية ناشئة ذات تطبيقات واسعة في العديد من المجالات العلمية والبحثية، مثل تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، والإلكترونيات، والطاقة، وعلم الأحياء، والتكنولوجيا الطبية، وغيرها. من خلال أدوات وتقنيات النانو، تُصنع مواد نانوية وحيوية جديدة وتُتحكم فيها، كما تُطور أجهزة نانوية متقدمة. وتهدف هذه التقنيات إلى دراسة خصائص المواد الحية وغير الحية واستجاباتها ووظائفها وضبطها بأحجام تقل عن 100 نانومتر [3].

2-I التأثيرات الكمومية في تقنية النانو

على المستوى النانوي، تبدأ ميكانيكا الكم بالتحكم في سلوك المواد، مما يؤدي إلى ظواهر مثل الاحتجاز الكمومي والنفق الكمومي. تؤثر هذه التأثيرات الكمومية على خصائص مختلفة، بما في ذلك التوصيل الكهربائي، والسلوك البصري، والقوة الميكانيكية. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي الاحتجاز الكمومي إلى مستويات طاقة منفصلة تُرى في النقاط الكمومية، مما يُغير خصائصها البصرية، بينما يمكن أن يؤثر النفق الكمومي على نقل الإلكترونات في الأجهزة النانوية.

يُعرف المقياس النانوي عادةً بأنه نطاق من 1 إلى 100 نانومتر على هذا المقياس، غالباً ما تُظهر المواد خصائص مختلفة تماماً مقارنةً بنظيراتها من المواد الخام نظراً للتأثيرات الكمومية والأهمية المتزايدة لظواهر السطح [4].

يُظهر الشكل (1-I) صورًا تخطيطية للأنظمة منخفضة الأبعاد تُسمى الظواهر الفيزيائية الخاصة بهذه الأنظمة منخفضة الأبعاد عمومًا بتأثيرات الاحتجاز الكمومي، وتُستخدم تطبيقاتها في المجالات الرائدة في تكنولوجيا النانو [5].



الشكل 1-I: صور تخطيطية لأنظمة الاحتجاز الكمومي منخفضة الأبعاد وأسماء هياكلها. تبقى حرية حركة الناقلات في كل منطقة زرقاء.

تصنف الأنظمة منخفضة الأبعاد حسب الحصر الكمومي إلى:

- بئر كمومي (Quantitative well) للنظام ثنائي الأبعاد (D2)
- سلك كمومي (Quantity wire) للنظام أحادي البعد (D1)
- نقطة كمومية (Quantum dot) للنظام صفري الأبعاد (D0)

1-2-I البئر الكمومي (Quantum Well)

يتكوّن البئر الكمومي عند تقليص بعد واحد من أبعاد المادة الصلبة إلى نطاق صغير جداً عادة في حدود عشرات النانومترات. هذا التصغير يؤدي إلى تقييد حركة حوامل الشحنة (كالإلكترونات أو الثقوب) في هذا الاتجاه، بينما تبقى حركتها حرة في الاتجاهين الآخرين، مما يعرف بالحصر أحادي البعد. نرى للإلكترونات (الثقوب) حركتها منفصلة على طول محور النمو مع الحفاظ على حركتهم الحرة في مستوى البئر (Oxy).

2-2-I السلك الكمومي (Quantum wire)

يتوافق الحصر ثنائي الابعاد D2 مع بنية تسمى السلك الكمومي. الحاملات الحرة محصورة في اتجاهين للمساحة y و z [6].

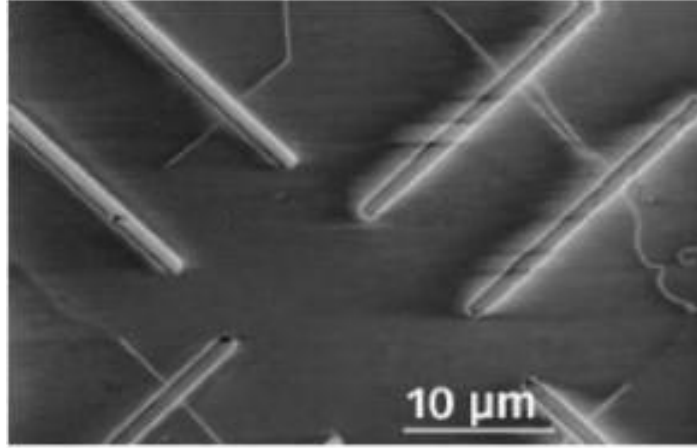
3-2-I النقطة الكمومية (Quantum Dot)

النقطة الكمومية هي بنية نانوية مصنوعة من معدن أو شبه موصل، ويتم تصنيفها كنقطة كمومية أو بئر كمومي حسب أبعادها. عندما يكون حجمها في حدود طول موجة دي برولي للإلكترونات، أي بضع عشرات من النانومترات، يتم حصر حوامل الشحنة في الأبعاد الثلاثة [7]. هذا الحصر الكامل يمنح النقطة الكمومية خصائص مشابهة لتلك الموجودة في الذرات، ولذلك تُعرف أحياناً باسم "الذرات الاصطناعية" [8].

3-I مفهوم ترانزستورات النانو

الترانزستورات النانوية الحديثة هي ترانزستورات صغيرة للغاية تستخدم تقنية النانو ومواد النانو للتغلب على قيود الحجم والأداء التي تواجهها الترانزستورات التقليدية. صُممت هذه الترانزستورات لجعل الأجهزة الإلكترونية أصغر حجماً وأسرع وأقوى وأكثر كفاءة في استخدام الطاقة. تُستخدم الترانزستورات العادية كمكونات رئيسية للدوائر الإلكترونية للتحكم في التيار ومعالجة الإشارات. ومع ذلك، كلما صغر حجم الترانزستورات التقليدية، انخفض أداؤها. يمكن أن يؤدي صغر الحجم إلى تدفق تيار أقل عبر الترانزستورات وزيادة الحرارة، مما يؤثر سلباً على أداء الأجهزة وكفاءتها في استخدام الطاقة. عند هذه النقطة، تدخل الترانزستورات النانوية التي تستخدم تقنية النانو ومواد النانو حيز التنفيذ. الترانزستورات النانوية هي ترانزستورات بحجم نانومتر مصنوعة من مواد نانوية. بفضل تقنية النانو، أصبحت خصائص المواد قابلة للتحكم على المستوى الذري. في المقاييس النانوية، تتغير الخصائص الكهربائية والحرارية والبصرية للمواد، مما يمنح مزايا كبيرة في تصميم الترانزستورات النانوية. تتوفر الترانزستورات النانوية المعاصرة بأنواع مختلفة، ولكل منها مزايا مختلفة.

من مزايا الترانزستورات النانوية قدرتها على العمل بسرعات أعلى. فصغر حجمها وسرعة حركة الإلكترونات فيها يسمحان بمعالجة أسرع للإشارات ونقل البيانات. وهذا يعني أجهزة كمبيوتر أسرع، واتصالات شبكية أسرع، وأجهزة تخزين بيانات أسرع [9].



الشكل I-2: نانو ترانزستور. [10]

4-I ترانزستور الإلكترون المفرد (SET):

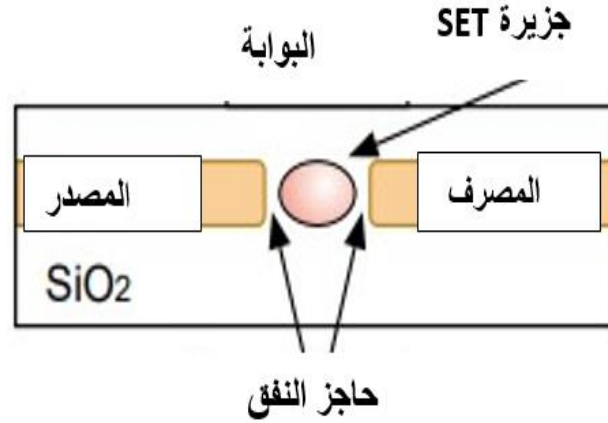
1-4-I التاريخ :

أُعلن عن أول ترانزستور أحادي الإلكترون قائم على حصار كولومب عام 1986 من قبل الباحثين D. V. Averin و K. K. Likharev. وتحقق حلمه أخيرًا باكتشاف أنبوب الكربون النانوي على يد Sumio Iijima عام 1991 في مختبر NEC في Tsukuba باليابان. أصبح هذا الاكتشاف نقطة انطلاق لعلم النانو وتكنولوجيا النانو اليوم. ومنذ ذلك الحين، بدأ العلماء والباحثون والمهندسون والتقنيون حول العالم في استكشاف طرق مختلفة لتصنيع مواد بحجم النانو، مما أدى في النهاية إلى تطوير النقاط الكمومية (QDs) النقاط الكمومية هي جسيمات نانوية تُقلص أبعادها إلى أقل من 100 نانومتر، وهي اللبنة الأساسية للترانزستور أحادي الإلكترون [11].

2-4-I بنية الترانزستورات أحادية الإلكترون

يتكون ترانزستور الإلكترون الواحد (SET) عادةً من ثلاثة مكونات رئيسية. المكون الأول هو المصدر والمصرف، وهما قطبان تدخل من خلالهما الإلكترونات إلى الجهاز وتخرج منه. المكون الثاني هو قطب البوابة، وهو طرف يتحكم في الجهد الكهروستاتيكي للجزيرة، وبالتالي ينظم نفق الإلكترونات بين المصدر والمصرف. وأخيرًا، هناك جزيرة كولومب، المعروفة أيضًا باسم النقطة الكمومية، وهي منطقة موصلة صغيرة قادرة على استيعاب عدد منفصل من الإلكترونات.

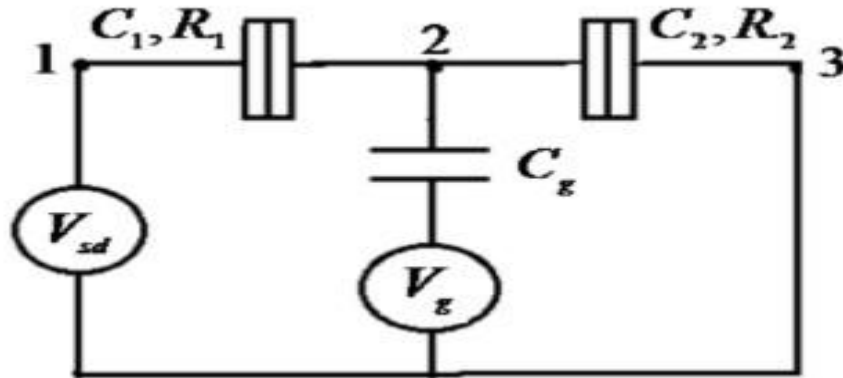
يُعد حجم هذه الجزيرة بالغ الأهمية، إذ يحدد طاقة حصار كولومب، مما يضمن تحكماً دقيقاً في حركة الإلكترونات المفردة داخل الجهاز يرتكز عمل ترانزستور الإلكترون الواحد (SET) على مبدئين أساسيين في ميكانيكا الكم؛ ظاهرة حصار كولومب والنفق الكمومي [12].



الشكل-I-3: الهيكل التخطيطي لـ SET [13]

3-4-I الوصلة النفقية

تُعتبر وصلة النفق البسيطة حاجزاً عازلاً رقيقاً بين قطبين موصلين. ووفقاً لقوانين ميكانيكا الكم، هناك احتمال محدود لأن يعبر إلكترون الحاجز العازل (النفق الكمي). لذلك، يُنشأ تيار النفق بتطبيق جهد انحياز. وتجاهل العوامل الأخرى، يتناسب تيار النفق مع جهد الانحياز. بمعنى آخر، يتشابه سلوك وصلة النفق مع سلوك مقاومة ثابتة القيمة. وهذا ينطبق على مقاومة الأوم، حيث تتغير قيمتها بشكل أسي مع سماكة الحاجز، ويتراوح حجم سماكة الحاجز من نانومتر واحد إلى عدة نانومترات. بالنسبة لوصلات النفق في SET، لا تُؤخذ المقاومة فقط في الاعتبار، بل تُؤخذ السعة أيضاً في الاعتبار. وبالتالي، يمكن تمثيل الدائرة المكافئة لوصلة نفق في SET بالدائرة المرسومة في الشكل (I-5).



الشكل 4-I : دائرة ترانزستور أحادية الإلكترون [14].

5-I الفيزياء الأساسية لترانزستور الإلكترون المفرد (SET)

يظهر الشكل (6-I) ترانزستور الإلكترون المفرد (SET) هو جهاز يعتمد على نفق إلكترون واحد عبر وصلة نانومترية. تنتقل الإلكترونات واحدًا تلو الآخر عبر القناة (على عكس ترانزستور MOSFET التقليدي) بفضل بنيته الفريدة التي تتضمن وصلات نفق مزدوجة وجزيرة موصلة.



الشكل 5-I: يمثل (أ) عمليات نقل الإلكترونات واحدًا تلو الآخر في ترانزستور SET (ترانزستور أحادي الإلكترون) ويمثل (ب) ترانزستور MOSFET التقليدي (ترانزستور تأثير المجال شبه الموصل بأكسيد المعدن) حيث تشارك العديد من الإلكترونات في تيار الاستنزاف في نفس الوقت [15].

6-I مبدأ تشغيل SET

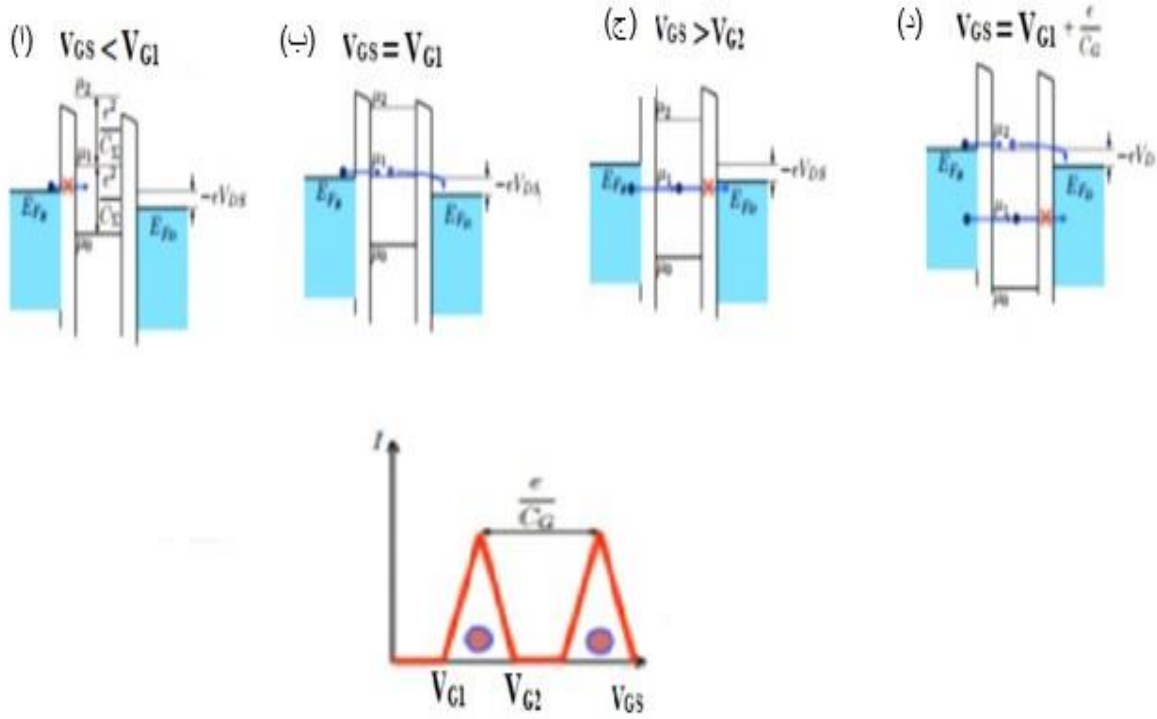
يشبه مبدأ تشغيل SET مبدأ وصلة النفق المزدوج، ويفسر نوعياً من خلال دراسة مستويات فيرمي لأقطاب المصدر والمصرف، بالإضافة إلى مستوى فيرمي في الجزيرة، كما هو موضح في (الشكل فجوة الطاقة بين مستوي n إلكترون ومستوى $n + 1$ إلكترون في النقطة الكمومية، أي الطاقة المراد

$$\frac{e^2}{C_{\Sigma}} \text{ تزويد النظام بها عبر جهد البوابة، تكون دائماً}$$

$$C_{\Sigma} = C_s + C_D + C_G \dots \dots \dots (1-I)$$

C_{Σ} : يعرض السعة الإجمالية للنقطة الكمومية

نفترض أن جهد مصدر الصرف V_{DS} أقل من جهد العتبة. طالما أن جهد البوابة غير كاف لإجبار الإلكترون الأول على المرور أي ($\mu_1 > E_{FS}$)، فلن يتمكن الإلكترون من المرور؛ فنحن في نظام حصار كولومب. عند $V_{GS} = V_{G1}$ الشكل يمكن للإلكترون المرور. ولكن عندما يزيد جهد البوابة عن V_{G2} ، يُحاصر الإلكترون في الجزيرة لأنه لا يستطيع الهروب ($\mu_1 < E_{FD}$)، الشكل وبالتالي، يكون التيار غير صفري على مدى $[V_{G1} V_{G2}]$ ، مما ينشئ ذروة في خاصية تيار-جهد البوابة. يجب الوصول إلى الجهد $V_G = V_{G1} + e/C_G$ لرؤية ظهور ذروة تيار جديدة الشكل وبالتالي، يكون فرق الجهد بين الذروتين $\frac{e}{C_G}$ ، حيث تعمل C_G بمثابة "سعة البوابة". تسمى هذه القمم في خاصية تيار الجهد للبوابة عادة "تذبذبات كولومب".



الشكل 6-I : تطور مخطط الشريط والتيار كدالة لجهد الشبكة في مجموعة. (أ) نظام حصار كولومب، (ب) $\mu_1 = E_{FS}$ ، يمكن للتيار أن يتدفق، ذروة كولومب الأولى، (ج) $\mu_1 < E_{FD}$ ، لم يعد التيار قادرًا على التدفق، يصبح التيار صفرًا مرة أخرى، (د) $\mu_2 = E_{FS}$ ، بداية ذروة كولومب الثانية [16]

7-I تأثير حصر كولومب

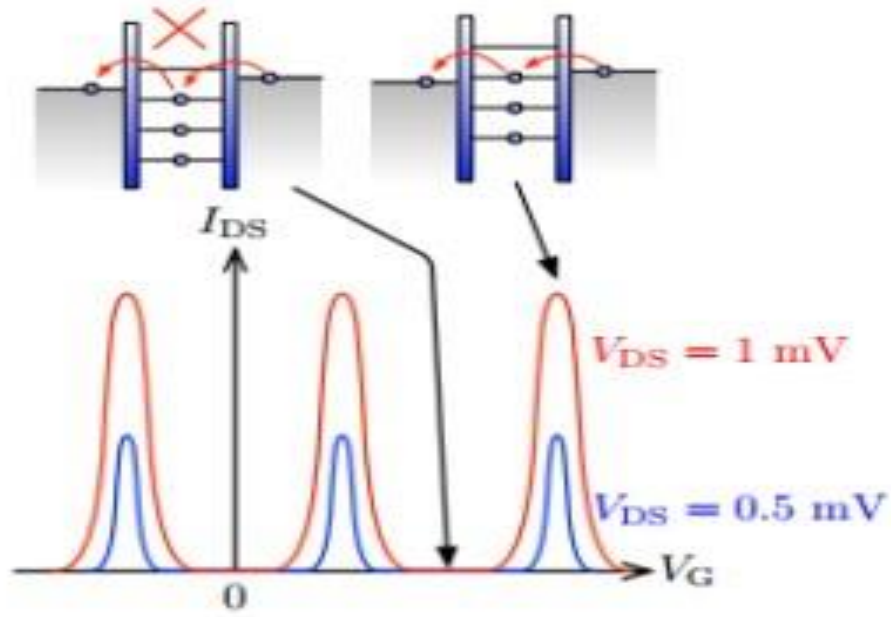
يتضمن نفق الوصلة المزدوجة السماح للإلكترونات بالمرور عبر حواجز الجهد بشرط أن تكون لديها طاقة كافية. عملياً، نحكي هذا باستخدام مكثف C موصول بالتوازي مع مقاومة نفق R_t ، وندرس تأثير النفق عبر توصيل الإلكترونات داخل هذا الجهاز. تسمى هذه الظاهرة تأثير حصار كولومب، وطاقة الشحنة E_C للجزيرة هي:

$$E_C = \frac{(q^2)}{2C_\Sigma} \dots \dots \dots (2-I)$$

من الخصائص المهمة التي يجب مراعاتها: طاقة الشحنة موجودة دائماً عند جميع درجات الحرارة. ومع ذلك، لملاحظة تأثير حصار كولومب، يجب استيفاء المعادلة التالية: [17]

$$Ec = \frac{(q^2)}{2C_{\Sigma}} \gg K_B T \dots\dots\dots (3-I)$$

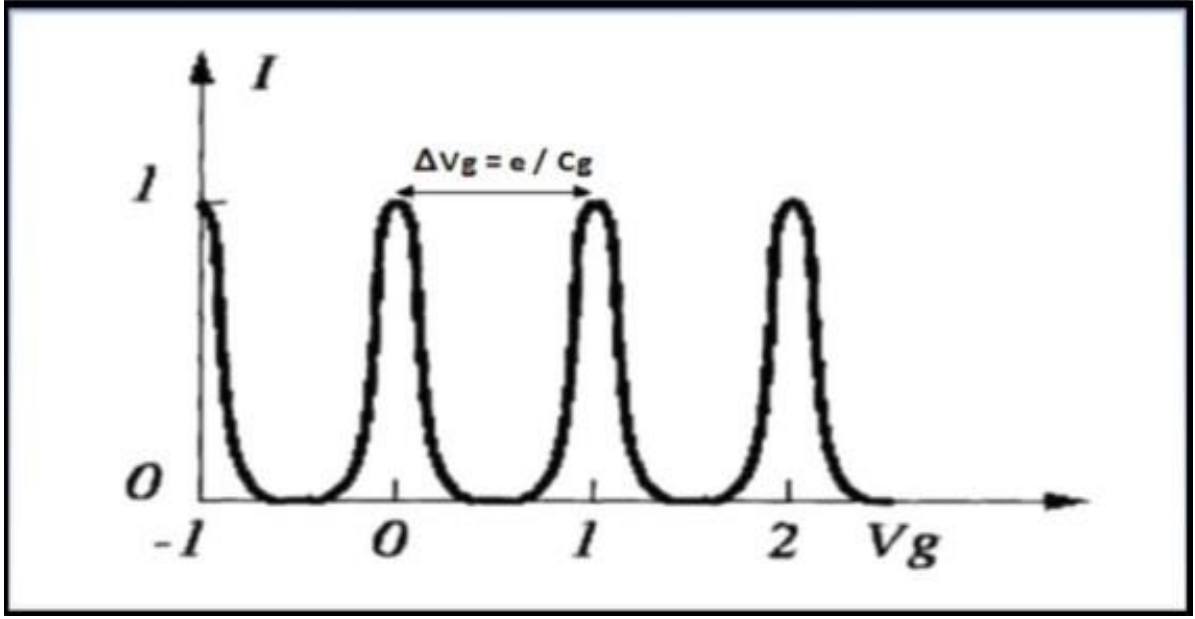
حصار كولومب هو آلية تسمح، في الهياكل منخفضة الأبعاد، بالتحكم في مرور حاملات الشحنة إلى الوحدة. تعتمد هذه الظاهرة بشكل أساسي على تكميم الشحنة الكهربائية والقدرة على المرور عبر الهياكل الرقيقة (العزل الرقيق) عن طريق النفق. [18]



الشكل-I-7: توصيف تيار IDS-VG لـ SET (تذبذب كولومب)

8-I خصائص تيار ترانزستور الإلكترون المفرد (SET)

يتغير التيار في الترانزستور أحادي الإلكترون (SET) تبعاً لجهد البوابة V_g ، حيث يمكن التبديل بين حالتين مميزتين: "الحجب" و"التوصيل"، وذلك بشكل دوري ومنتظم. تعرف هذه الظاهرة في الفيزياء الإلكترونية باسم تذبذبات كولوم (Coulomb Oscillations)، وهي ناتجة عن التأثير الكهروستاتيكي لتكميم الشحنة داخل النقطة الكمومية. [19]

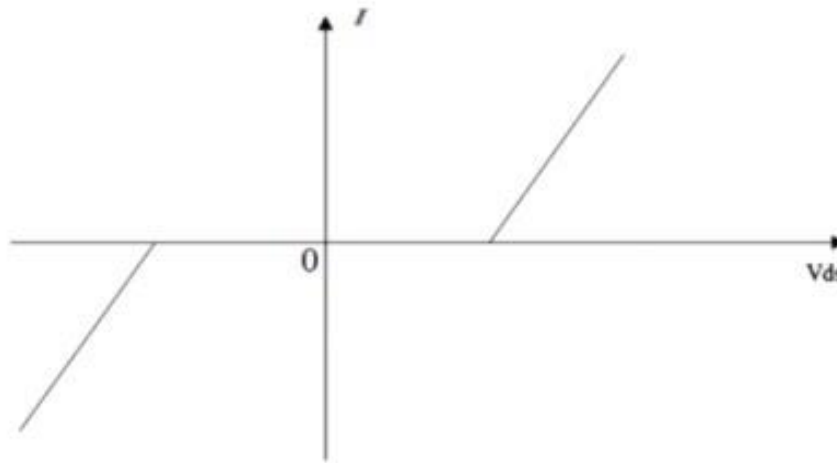


الشكل I-8:ذبذبات كولومب. يتم تعديل التيار عن طريق استقطاب الشبكة، ويتم تطبيع V_g في e/C_g

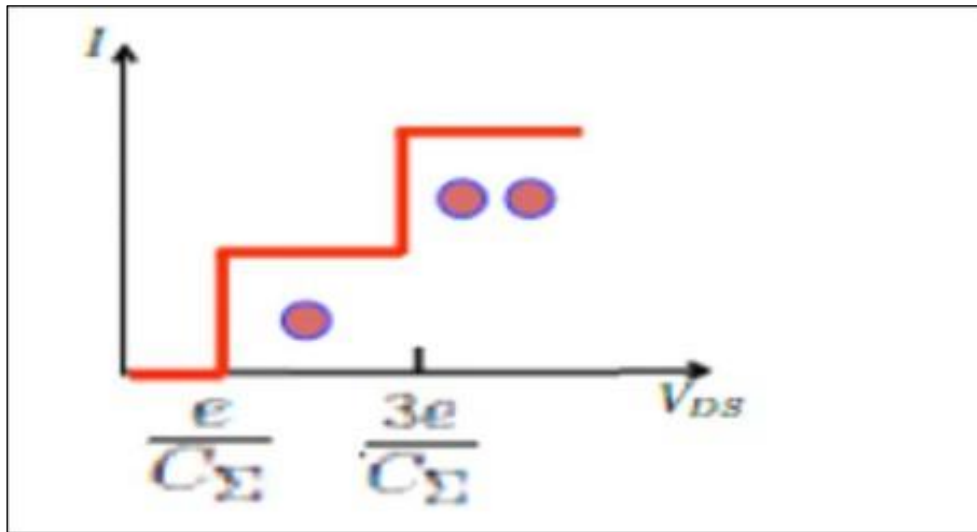
في الشكل (I-9)، نقدم تبايناً في تيار I_{ds} اعتماداً على V_{ds} في البنية المتماثلة، أي ($C_1=C_2$ و $R_{t1}=R_{t2}$) عندما يتم تطبيق جهد أقل من جهد العتبة V_b ، والذي يتم تحديده بالعلاقة التالية:

$$|V_b| > \frac{e}{2.C_g} \dots \dots \dots (4-I)$$

التيار يساوي صفراً لعدم قدرة أي إلكترون على عبور حاجز الجهد؛ يعرف هذا الجهد بـ "خطوة كولومب". عند تطبيق انحياز أعلى من العتبة، يكون الإلكترون قد انتقل إلى النقطة الكمومية، وبالتالي سيغادرها فوراً. يوضح الشكل (I-10) خاصية $I-V$ للبنية المتماثلة في المقابل، تُنتج البنية غير المتماثلة (مثلاً، $R_{t2} \gg R_{t1}$) خاصية $I-V$ على شكل سلم، تُسمى "خطوة كولومب".



الشكل 9-I: تغير قيم I_d الحالية كدالة لـ V_{ds} في البنية المتماثلة.



الشكل 10-I: تغير قيم I_{ds} الحالية كدالة لـ V_{ds} في الهيكل غير المتماثل. [20]

9-I تطبيقات SET

1-9-I مستشعر الشحنة

تُعد ترانزستورات الإلكترون الواحد (SETs) مستشعرات شحن فعّالة لقراءة الدوران. لدراسة معاملاتها السعوية، المرتبطة بنسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) أثناء قراءة البتات الكمومية،

صُنعت نقطتان كموميتان من السيليكون أحاديًا النقاط الكمومية باستخدام عملية الطباعة الحجرية على ركيزة عازلة مغطاة بالسيليكون. ونظرًا لإمكانية تحديد تكوين وأبعاد النقاط الكمومية بالتصوير المباشر، أمكن مقارنة المعاملات السعوية النظرية بالقيم المقاسة. وقد وُجد توافق جيد بين القيمة المحسوبة والقيمة المقاسة، مما يؤكد صحة طريقة الحساب. أشارت النتائج إلى أن تقليل قطر ترانزستور الإلكترون الواحد (SETs) يقلل من الاقتران السعوي بين البتات الكمومية، ولكنه يزيد من نسبة الإشارة إلى الضوضاء لكل من قياسات اللقطة الواحدة للترددات المستمرة والترددات الراديوية. نظرًا لأن هذه النتائج مستقلة عن مواد الجهاز، فهي مفيدة لوضع إرشادات لتصميم مستشعرات شحنة SET في هياكل QD-SET الجانبية القائمة على غاز إلكتروني ثنائي الأبعاد.

2-9-I الكشف عن الأشعة تحت الحمراء

يمكن استخدام ترانزستور أحادي الإلكترون أيضًا للكشف عن إشارات الأشعة تحت الحمراء في درجة حرارة الغرفة. تختلف الاستجابة عمومًا عن نظرية تيان-جوردون المعروفة للنفق بمساعدة الفوتون. في الواقع، يستند هذا إلى افتراض أحداث نفق غير مترابطة، بينما في أنظمة الإلكترون المفرد، يرتبط نقل الإلكترون عادةً بإثارة الإلكترونات عبر حاجز طاقة مُستحث كهربائيًا، ويمكن التحكم في كل من نطاق الأطوال الموجية القابلة للكشف وحساسية الجهاز. يعمل المستشعر عندما تُثير إشارة الأشعة تحت الحمراء إلكترونات نطاق التوصيل في خزان إلكترونات بعمق 25 نانومتر. تُوضع قناة عازلة من السيليكون بأبعاد 400×40 نانومتر بجوار الخزان لزيادة عدد الإلكترونات المُثارة. ثم تُوقف بوابة سفلية من بولي سيليكون الترانزستور وتُشكل حاجز طاقة كهربائيًا، مما يُنشئ عقدة تخزين على الجانب الآخر. يتم حقن الإلكترونات ذات الطاقة الأكبر من ارتفاع الحاجز في عقدة التخزين، حيث تتم قراءتها كتغيرات في التيار المتدفق عبر الترانزستور.

3-9-I كاشف موجات ميكروويف فائق الحساسية

يمكن لترانزستور أحادي الإلكترون تشغيل جزيرة كاشف موجات ميكروويف فائق الحساسية، وهي متصلة بشكل ضعيف بدائرة تحيز عبر وصلتين نفقيتين صغيرتين للسعة وبوابة سعوية. عند جهد تحيز ودرجات حرارة منخفضة، لا يمكن إدخال شبه جسيم واحد إلى الجزيرة إلا من خلال نفق بمساعدة الفوتون. بمجرد حدوث ذلك، يُحتجز شبه الجسيم في الجزيرة لأن نفقه يستغرق وقتًا طويلًا نسبيًا. أثناء احتجازه، تنتقل الشحنة عبر النظام إلكترونيًا في كل مرة. ونظرًا لأن الانتقال بمساعدة الفوتون يُغير تيار الكاشف في هذا الجهاز، فإنه لا يقتصر على إلكترون واحد يمر عبر النظام لكل فوتون مُمتص. هذا يجعل الجهاز كاشفًا فائق الحساسية ومفيدًا لإشعاع الموجات الميكروية.

4-9-I مقياس كهربائي فائق الحساسية

كُنّت الحساسية العالية للترانزستورات أحادية الإلكترون من استخدامها كمقاييس كهربائية في تجارب فيزيائية فريدة. على سبيل المثال، أتاحت هذه المقاييس رصدًا دقيقًا لتأثيرات التكافؤ في الموصلات الفائقة. وتم إثبات قياسات مطلقة لتيارات تيار مستمر منخفضة للغاية (~10-20 أمبير). كما استُخدمت الترانزستورات في أولى قياسات تأثيرات الإلكترون المفرد في صناديق ومصادر الإلكترون المفرد. واستُخدمت نسخة معدلة من الترانزستور لأول دليل على وجود إثارات شحنة جزئية في تأثير هول الكمي الجزئي.

5-9-I مطيافية الإلكترون الواحد

يُعد قياس طاقات إضافة الإلكترونات (وبالتالي توزيع مستويات الطاقة) في النقاط الكمومية وغيرها من الأجسام النانوية أحد أهم تطبيقات مطيافية الإلكترون الواحد.

6-9-I معايير درجة الحرارة

أظهر التحليل النظري القائم على النظرية التقليدية أن $\Delta V = 5.44NkBT/e$ مستقر بشكل مدهش بالنسبة لأي تغيرات في معلمات المصفوفة تقريبًا (مع استثناء مهم يتمثل في التباين الكبير في مقاومات الوصلات)، مما يوفر فرصة رائعة لاستخدام المصفوفات في القياس الحراري المطلق، نظرًا لدقة معرفة الثوابت الأساسية. قد تُعطي كل مصفوفة دقة عالية (1%) في أقل من عقد من تغيرات درجة الحرارة، ولكن بالنسبة للمصفوفات ذات أحجام الجزر المختلفة، قد تتغير هذه النطاقات وتتداخل. وبالتالي، من الممكن الحصول على معيار مطلق لدرجة الحرارة بنطاق إجمالي واسع جدًا (مثل عقدين) من عدة دوائر مُصنّعة على شريحة واحدة. إن هذا التطور مشجع للغاية، ولكن بما أن كل هذا العمل حديث، فإننا نحتاج إلى بعض الوقت لمعرفة ما إذا كانت هذه الأجهزة الجديدة ستكون قادرة على منافسة (أو حتى استبدال) معايير درجة الحرارة المعمول بها.

7-9-I منطق ترانزستور أحادي الإلكترون قابل للبرمجة

يُعد SET ذو دالة ذاكرة غير متطايرة مفتاحًا لمنطق SET القابل للبرمجة. يجعل إزاحة الطور نصف الفترة وظيفة SET مُكملة لـ SETs التقليدية. ونتيجةً لذلك، تتمتع SETs ذات دالة الذاكرة غير المتطايرة بوظائف كلٍّ من SETs التقليدية مثل (n-MOS) وSETs المُكملة مثل (p-MOS) باستخدام هذه الحقيقة، يُمكن برمجة وظيفة دائرة SET بناءً على الدالة المُخزّنة بواسطة دالة الذاكرة.

تُغيّر الشحنة حول QD لـ SET، أي جزيرة SET، طور تذبذب كولومب، وتُنتج عملية الكتابة/المسح لدالة الذاكرة التي تُحقن/تُخرج الشحنة من/إلى عقدة الذاكرة القريبة من جزيرة SET ضبط طور تذبذب كولومب. إذا كانت الشحنة المُحقنة كافية، يكون إزاحة الطور نصف فترة تذبذب كولومب. [21]

10-I مزايا وعيوب ترانزستور احادي الالكترون

مزايا	عيوب
• حجم صغير • استهلاك منخفض للطاقة • حساسية عالية • سرعة تشغيل عالية • دائرة مبسطة • مبدأ تشغيل بسيط • تكامل مباشر مع دوائر CMOS التقليدية	• لاستخدام SET في درجة حرارة الغرفة يشترط ان يكون حجم الجزيرة اقل من 10 نانومتر وهو امر يصعب تصنيعه • صعوبة في عملية التصنيع • تعمل معظم SETs في درجات حرارة منخفضة للغاية حوالي 100 mK • مشكلة شحن الخلفية • انخفاض كسب الجهد • يزداد الجهد حتى تصل طاقة الشحن الى رتبة 0.1KPa ثم ينخفض

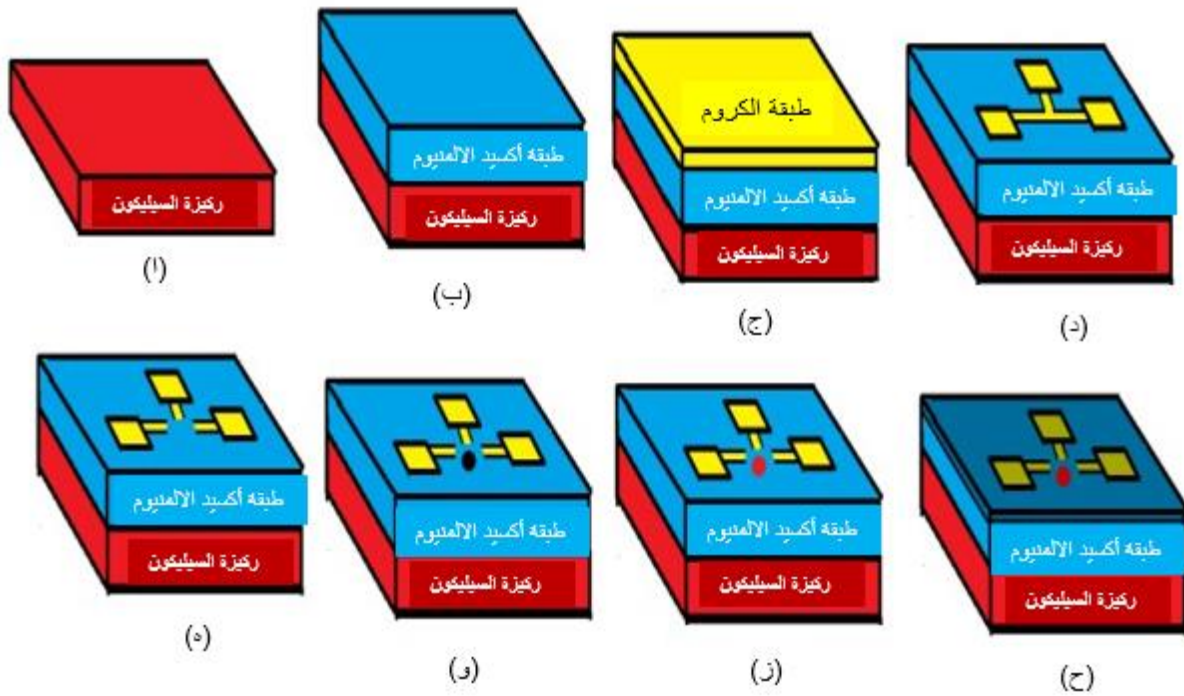
الجدول 1-I: مزايا وعيوب ترانزستور احادي الالكترون [22].

11-I تصنيع ترانزستور أحادي الإلكترون (SET)

تُستخدم مواد مختلفة في تصنيع ترانزستور أحادي الإلكترون (SET) ، وفيما يلي مثال يوضح خطوات إنتاجه:

تبدأ العملية باختيار ركيزة من السيليكون، ثم تُنظف باستخدام محلول البيرانا لإزالة الملوثات. بعد ذلك، تُرسب طبقة من أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) لتعمل كعازل كهربائي بين الركيزة وبنية الترانزستور.

تُضاف فوق هذه الطبقة طبقة رقيقة من الكروم لتكون الجزء النشط في الجهاز. يتم تشكيل ثلاثة أقطاب كهربائية باستخدام تقنية النقش بحزمة الأيونات المركزة (FIB) ، حيث تُنقش الأنماط وتُجهز الوسادات التوصيلية. كما تُصنع الفجوات النانوية بين الأقطاب ويُرسب ما يُعرف بالجزيرة النانوية باستخدام النظام نفسه. تُجرى بعد ذلك عملية أكسدة كيميائية لتشكيل الوصلات النفقية، وفي الخطوة النهائية، تُرسب طبقة إضافية من Al_2O_3 لتثبيت الترانزستور وحمايته.



الشكل 11-I: خطوات تصنيع SET (أ) ركيزة السيليكون، (ب) إضافة طبقة Al_2O_3 (ج) إضافة طبقة الكروم، (د) تصنيع أقطاب SET باستخدام FIB ، (هـ) تصنيع فجوة بين SET قطبًا كهربائيًا، (و) ترسيب الجزيرة، (ز) تكوين الوصلات النفقية، (ح) ترسيب طبقة Al_2O_3 وتثبيت SET [23]

12-I الدراسة الكمية

تدرس ظاهرة النقل الكمي في الترانزستور أحادي الإلكترون حيث يتكوّن الجهاز الإلكتروني عادةً من منطقة نشطة (QD)، وهي متصلة بخزانين كبيرين يُطلق عليهما المصدر (S) والمصرف (D) ونظرًا لكبر حجمهما مقارنةً بالمنطقة (QD)، يُفترض أن المصدر والمصرف في حالة توازن حراري دائم، أي أن جميع الظواهر غير المتوازنة تحدث فقط داخل المنطقة النشطة (QD)

يستخدم في هذا السياق نهج يُعرف باسم دوال غرين خارج التوازن (NEGF)، والذي يسمح بدراسة المنطقة (QD) كنظام مفتوح، مع أخذ تأثير الاتصال مع المصدر والمصرف في الحسبان من خلال عناصر تُعرف باسم "الطاقة الذاتية (SELF-ENERGY) [24]

لحل المعادلات المقترنة شرودنجر-بواسون في بعدين (2D) باستخدام هذا المنهج، فإن الأمر يتطلب أدوات حسابية قوية جدًا وزمن حساب طويل. ومن أجل تقليل التعقيد الحسابي، يمكن في بعض الحالات استخدام ما يُعرف بـ "فضاء الأنماط" أو "فضاء الحزم"، والذي يسمح بتحويل المسألة ثنائية الأبعاد إلى عدة مسائل مستقلة أحادية البعد (1D)، مما يُسهّل من عملية الحساب بشكل كبير.

تكتب معادلة شرودنجر في الحالة الديكارتية ثنائية الأبعاد على النحو التالي:

$$\frac{-\hbar}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m^*} \left(\frac{\partial \psi(x,y)}{\partial x} \right) \right) \right) - \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{m^*} \left(\frac{\partial \psi(x,y)}{\partial y} \right) \right) \right) + U\psi(x,y) = E\psi(x,y) \dots (5-I)$$

حيث:

- $\hbar$: ثابت بلانك
- U : طاقة الجهد الكهروستاتيكي
- m^* : كتلة الإلكترون الفعالة
- $\psi(x, y)$: دالة الموجة
- E : الطاقة في الجزيرة

تعطى معادلة بواسون (Poisson) في الحالة ديكارتيه ثنائية الأبعاد على النحو التالي:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \rho = 0 \dots (6-I)$$

$$\rho = -q[p - n + N_D - N_A] \dots (7-I)$$

حيث :

V : الإمكانات الالكتروستاتيكية

ϵ : ثابت العزل الكهربائي للمادة

ρ : كثافة الحاملات

p : تركيز الثقوب

n : تركيز الإلكترونات

N_D : تركيز الذرات المانحة

N_A : تركيز ذرات الأخذة

q : الشحنة العنصرية

1-12-I مقارنة مساحة الأنماط :

المقاربة المعروفة بـ فضاء الوضعيات أوفضاء الأنماط تُستخدم بشكل واسع لدراسة التأثيرات الكمومية بطريقة فعالة. وتهدف هذه المقاربة إلى فك ترابط معادلة شرودنجر الثابتة ثنائية الأبعاد. تسمح مقارنة فضاء الوضعيات تحت شروط معينة، بتحويل مشكلة ثنائية الأبعاد إلى مشكلة أحادية البعد مستقلة. وبالتالي تصبح المعادلة

$$\frac{-\hbar^2}{2m_x^*} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \tilde{\psi}_i + U\tilde{\psi}_i(x) = E_i \tilde{\psi}_i(x) \dots\dots\dots (8-I)$$

E_i : الطاقة الطولية

$\tilde{\psi}_i(x)$: معامل التوسع للدالة $\psi(x, y)$

2-12-I حساب دوال Green

تشكل صيغة دالة غرين غير المتوازنة (NEGF) طريقة ذات صلة لوصف التأثيرات الكمومية للنانو ترانزستورات، وتجعل من الممكن وصف الخصائص الكهربائية والفيزيائية للقناة (وخاصة التيار والشحنات). في الواقع، تسمح GREEN FUNCTION بالتركيز على الجزء النشط للمكون واستبدال تأثير الاتصالات الخارجية بالطاقات الذاتية. يمكن لمفهوم الطاقة الذاتية أن تُستخدم أيضًا لوصف تفاعلات الإلكترون-الإلكترون والإلكترون-الفونون.

أولاً، حدد مصفوفة G لدالة GREEN المتأخرة والتي تمثل استجابة (انتشار) النظام بعد إثارته على طول محور المصدر-الصرف بواسطة طاقة E بالنسبة للنطاق الفرعي i ، يتم إعطاء بواسطة G

$$G(E) = [EI - H - \sum_S - \sum_D]^{-1} \dots \dots \dots (9-I)$$

حيث:

$\sum_S$ و $\sum_D$ هي الطاقات الذاتية للمصدر والمصرف على التوالي.

E: الطاقة الطولية (x)

I : مصفوفة الوحدة

H: يمثل مصفوفة هاملتونيان [25].

3-12-I حساب تيار التصريف

يتم حساب تيار التصريف بناءً على معامل انتقال التيار من المصدر إلى التصريف

يتم إعطاؤها بواسطة دالة GREEN :

$$T_{SD} = T_r [T_r G T_D G^T] \equiv T_{SD} \equiv T_r [\Gamma_S \Gamma_D] \dots \dots \dots (10-I)$$

ثم يتم كتابة التيار المنقول في القناة:

$$I \left(E_i = \frac{q}{h} \right) \int_0^{+\infty} D \times [f(u_D - E_i - E_{kj}) - f(u_D - E_i - E_{kj}) A_D] T_r [\Gamma_S A_D] \cdot d \dots \dots \dots (11-I)$$

حيث:

$$D = \frac{2}{\pi h} \sqrt{\frac{m^* y}{2 E_{kj}}} \quad \text{الكثافة العرضية للحالات}$$

الدالة $f(u - E)$ هي توزيع فيرمي ديراك المعطى بواسطة:

$$f(u - E) = \frac{1}{1 + e^{(u-E)/KBT}} \dots \dots \dots (12-I)$$

$f_{-1/2}$ هو تكامل فيرمي ديراك الذي يأخذ في الاعتبار مساهمة الأوضاع المستعرضة

حيث

u_S و u_D : عرض مستوى فيرمي للمصدر والمصرف على التوالي

A_S و A_D : هي وظائف الكثافة الطيفية للاتصالات ثم يتم التعبير عنها بواسطة

$$A_D = G\Gamma_D G^T \text{ و } A_S = G\Gamma_S G^T \dots\dots\dots(13-I)$$

هي مصفوفة النقل

حيث: G^T هي المصفوفة المنقولة

لاحظ ان T_{SD} لا تعتمد على الطاقة المستعرضة، ويمكن نقلها خارج التكامل وبالتالي المعادلة [24]

$$I(E_i) = \frac{q}{h^2} \sqrt{\frac{m_s^* K_{BT}}{2\pi^3}} \times [f_{-1/2}(u_s - E_i) - f_{-1/2}(u_D - u_i)] Tr[\Gamma_S A_D](E_i) \dots\dots(14-I)$$

- [1] درباله، ع.، & حمزة، أ. (2017). تكنولوجيا النانو وتطبيقات في مجالات عديدة: الزراعة - تكنولوجيا الغذاء - المياه - البيئة مكافحة الآفات. دار الكتب العلمية.
- [2] Friedrich, K., Fakirov, S., & Zhang, Z. (Eds.). (2005). Polymer composites: From nano-to macro-scale. Springer Science & Business Media.
- [3] Logothetidis, S. (2011). Nanotechnology: Principles and applications. In Nanostructured materials and their applications (pp. 1–22). Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Gedam, V., Pimplapure, A., Sen, P., Namdeo, Y., Mishra, T. K., & Sahu, P. K. (2024). Quantum confinement and nanostructures: Foundations and frontiers in nano science and nanotechnology. *Cahiers Magellanes-NS*, 6(2), 5727–5734.
- [5] Shibuya, K., Inadama, N., Yoshida, E., Yamaya, T., Murayama, H., Koshimizu, M., & Asai, K. (2005, October). Quantum confinement effects in semiconducting scintillators. In *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2005 (Vol. 3, pp. 1503–1507). IEEE.
- [6] khalifa,B. (2016). Dispositifs à blocage de Coulomb.
- [7] Hanson, G. W. (2019). Fundamentals of nanoelectronics. Pearson Education.
- [8] Kouwenhoven, L. P, Austing, D. G, & Tarucha. S. (2001). Few-electron quantum dots. *Reports on progress in physics*, 64(6), 701.
- [9] Khanmamadova, E. (2023). Modern nano-transistors. *Collection of Scientific Papers « ΛΟΓΟΣ»*, (May 26, 2023; Boston, USA), 163–165.
- [10] Gayathri, A., & Satyanarayana, T. (2018). Applications of nanotechnology in electronics and communication engineering. *International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences*, 8(2), 698–705.

- [11] Kumar, A., & Dubey, D. (2013). Single electron transistor: Applications and limitations. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(1), 57-62.
- [12] Nasri, A., Boubaker, A., & Kalboussi, A. (2025). Principles design and applications of single electron transistors in memory devices, logic gates, neural networks and gas sensor. *Discover Electronics*, 2(1), 12.
- [13] Takahashi, Y., Ono, Y., Fujiwara, A., & Inokawa, H. (2002). Silicon single-electron devices. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(39), R995.
- [14] Mohammadmoradi, Y., Javadifar, N., & Skandarnezhad, A. (2022). A review of single electron transistors. *Journal of Applied Dynamic Systems and Control*, 5(2), 30–34.
- [15] Abdelkrim, M. O. S. T. E. F. A. I. (2019). Modeling and simulation of single-electron transistor (SET) with aluminum island using neural network. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 12(1), 23–28.
- [16] Talbo, V. (2012). Étude théorique du transport électronique dans les nanodispositifs à boîtes quantiques semiconductrices (Doctoral dissertation, Paris11).
- [17] ky TRINH, F., MAELHOT, F., & CALMON, F. (2013). Simulation d'un réseau de neurones à l'aide de transistors set.
- [18] Physique quantique :
- http://www.physiquequantique.wikibis.com/blocage_de_coulomb.php
- [19] Kanoun, M, Caractérisations électriques des structures MOS à nanocristaux de Ge pour des applications mémoires non volatiles, Lyon, 2004

- [20] . Ishikuroa, T. Hiramotob, Quantum mechanical effects in the silicon quantum dot in a singleelectron transistor , Applied physics Letters , p 3691-3693, 1997
- [22] Rai, C., Khursheed, A., & Haque, F. Z. (2019). Review on single electron transistor (SET): Emerging device in nanotechnology. Austin Journal of Nanomedicine and Nanotechnology, 7, 1–11.
- [23] Bennabi, M. (2009). Étude et simulation d'un nano-MOSFET double grille (Doctoral dissertation, Université Abdelkader Benamara).
- [24] Venugopal, R., Paulsson, M., Goasguen, S., Datta, S., & Lundstrom, M. S. (2003). A simple quantum mechanical treatment of scattering in nanoscale transistors. Journal of Applied Physics, 93(9), 5613–5625.
- [25] Venugopal, R., Ren, Z., Datta, S., Lundstrom, M. S., & Jovanovic, D. (2002). Simulating quantum transport in nanoscale transistors: Real versus mode-space approaches. Journal of Applied Physics, 92(7), 3730–3739

الفصل الثاني
منهجية المحاكاة باستخدام برنامج
Silvaco Atlas

1-II المقدمة

في هذا الفصل، نستعرض الأدوات والمنهجية المستخدمة في برنامج **Silvaco Atlas** لمحاكاة الخصائص الإلكترونية للمركبات النانوية. يُعتبر هذا البرنامج من أقوى أدوات **TCAD** المستخدمة في تحليل وتصميم الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، حيث يسمح بنمذجة تأثيرات مختلفة كالتوصيلية الكهربائية، والانتقالات الطاقوية، والخصائص البصرية والحرارية.

2-II نظرة عامة حول Silvaco Atlas

يُعد برنامج **Silvaco** أحد منتجات شركة **Silvaco International**، التي يقع مقرها الرئيسي في سانتا كلارا، كاليفورنيا. وتُعد الشركة رائدة في مجال تطوير البرمجيات الخاصة بأتمتة تصميم الدوائر الإلكترونية (**EDA – Electronic Design Automation**)، حيث تتمتع بحضور قوي في السوق العالمي. كما تمتلك الشركة عدة فروع في أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا، مما يعزز من انتشارها وتأثيرها في هذا المجال.

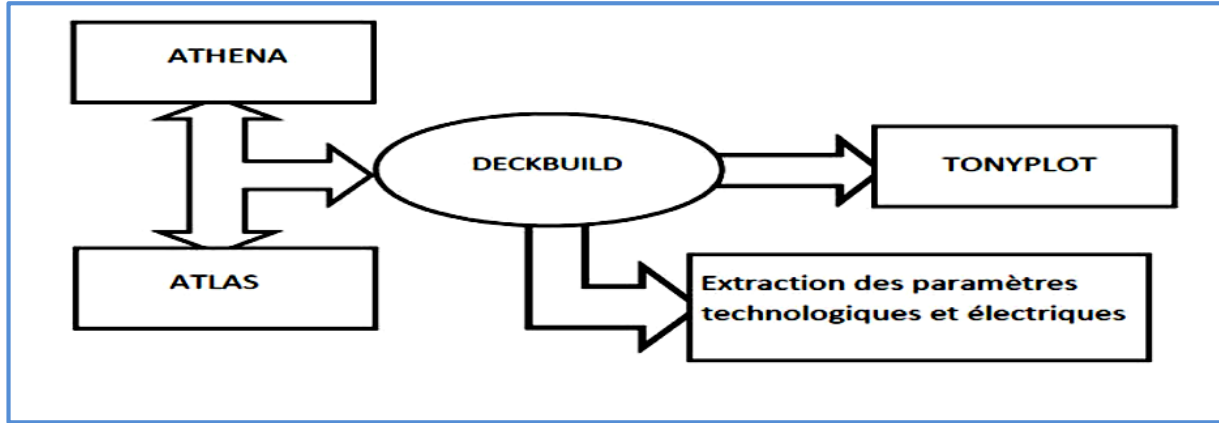
في عام 1984، قام الدكتور إيفان بيسيتش (Dr. Ivan Pesic) بتطوير الإصدار الأول من برنامج **Silvaco-TCAD**، حيث يُشير مصطلح **TCAD** إلى التصميم التكنولوجي بمساعدة الكمبيوتر (**Technology Computer-Aided Design**). أما اسم **SILVACO** فهو اختصار لـ **Silicon Valley Corporation**، والذي يُمثل شركة متخصصة في تطوير حلول المحاكاة الفيزيائية للأجهزة والأنظمة الإلكترونية القائمة على أشباه الموصلات. [1]

برنامج **SILVACO-ATLAS** هو مُحاكٍ لأجهزة أشباه الموصلات، يعتمد على مبادئ فيزيائية ثنائية وثلاثية الأبعاد، ما يعني أنه قادر على التنبؤ بالخصائص الكهربائية المرتبطة بهياكل فيزيائية محددة بدقة وظروف انحياز. يتحقق ذلك من خلال محاكاة تشغيل جهاز على شبكة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، تتألف من عدد من نقاط الشبكة تُسمى العقد. بتطبيق مجموعة من المعادلات التفاضلية، المستمدة من قوانين

ماكسويل على هذه الشبكة، يُمكننا محاكاة انتقال الناقلات عبر هيكل. هذا يعني أنه يُمكن الآن نمذجة الكفاءة الكهربائية للجهاز في أوضاع التشغيل المستمرة، والمتقطعة، أو المؤقتة [2].

يتضمن برنامج SILVCO TCAD العديد من وحدات محاكاة أجهزة أشباه الموصلات، مثل ATHENA و ATLAS تُستخدم ATHENA لمحاكاة عملية التصنيع، بينما تُستخدم ATLAS لأداء الأجهزة الكهربائية. تعمل ATHENA و ATLAS ضمن منصة تُسمى DECKBUILD. DECKBUILD هي بيئة تشغيل رسومية تفاعلية لتطوير الواجهة الأمامية ومحاكاة العمليات والأجهزة [4].

يمكن تمثيل هذا الترابط المعقد من خلال المخطط التوضيحي (1-II).

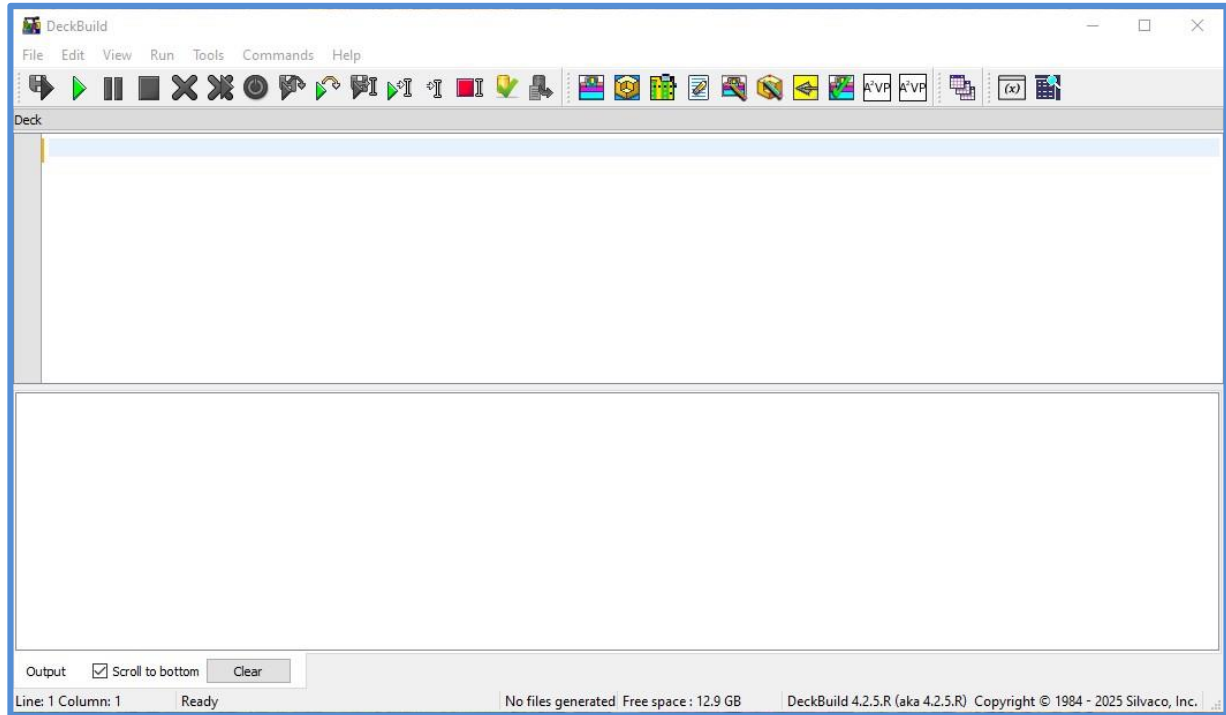


الشكل 1-II : رسم توضيحي للعلاقة بين وحدات برنامج SILVACO [3]

3-II وحدات برنامج Silvaco –TCAD

1-3-II الوحدة DECKBUILD : الواجهة التي تتيح تنفيذ عمليات المحاكاة، وتُعتبر النافذة

الرئيسية لبرنامج SILVACO حيث يمكن التحكم في جميع برامج المحاكاة [6].



الشكل II-2: الواجهة الرئيسية لـ Deckbuild

تتكون وحدة DECKBUILD أساسًا من نافذتين رئيسيتين [3] :

- نافذة الأوامر : (Deck Window) مخصصة لإدخال الأوامر.
- نافذة النتائج : (Output Window) مخصصة لعرض النتائج.

II-3-2 الوحدة أثينا ATHENA: محاكي عمليات مسؤول عن بناء الأجهزة المحددة.

يجدر بالذكر أن برنامج Athena قد تم تصميمه وتطويره استنادًا إلى برنامج SUPREM التابع لجامعة ستانفورد، والذي يُعدّ من أوائل البرامج المتخصصة في محاكاة تقنيات تصنيع أشباه الموصلات..

3-3-II الوحدة أطلس Atlas:

يعد Atlas وحدة فرعية ضمن بيئة Silvaco، متخصصة في محاكاة الخصائص الكهربائية، الضوئية، والحرارية للأجهزة الإلكترونية المدروسة، مثل الوصلات $p-n$ ، الترانزستورات، والخلايا الشمسية، وذلك تحت تأثير مختلف حالات الاستقطاب (مستمر، متناوب، مباشر، أو عكسي). إلى جانب تحليل السلوك الكهربائي، يوفر Atlas معلومات مفصلة حول التوزيع الداخلي لمتغيرات الفيزياء الكهربائية، مثل خطوط التيار، المجال الكهربائي، والجهد. كما يقدم منصة متكاملة لتحليل استجابات الأجهزة المعتمدة على أشباه الموصلات ضمن أبعاد ثنائية أو ثلاثية، تحت أي نوع من الاستقطاب

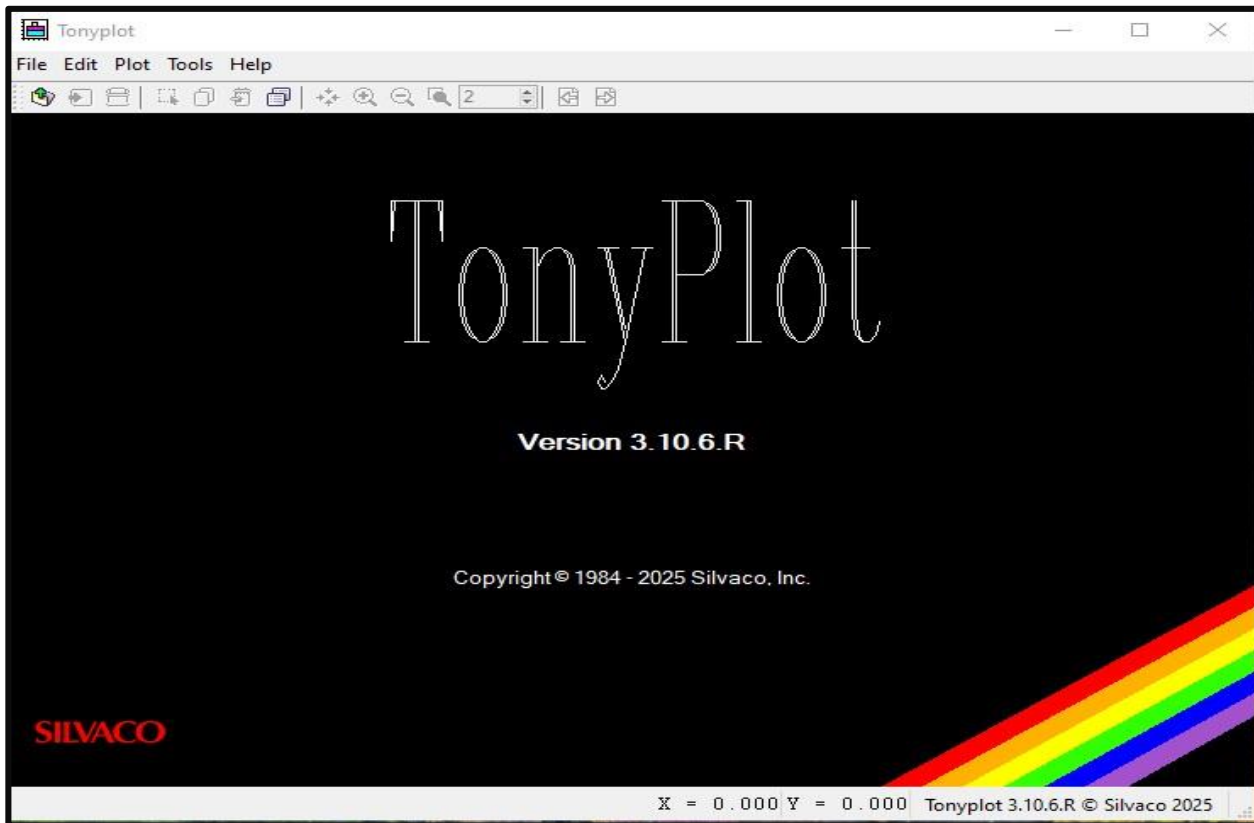
4-3-II الوحدة Tonyplot:

هي أداة متخصصة في مرحلة ما بعد المعالجة، تُستخدم مع جميع محاكيات Silvaco والأدوات التفاعلية مثل DeckBuild، VWF، و SPDB. توفر هذه الأداة إمكانيات متقدمة لعرض وتحليل مخرجات المحاكاة، يدعم TonyPlot مجموعة واسعة من الرسوم البيانية، بما في ذلك المخططات ثنائية وثلاثية الأبعاد، والبيانات $X-Y$ ذات المحاور الخطية أو اللوغاريتمية، إضافةً إلى التمثيلات القطبية والسطحية والمقاطع العرضية. كما يتيح إمكانية تحميل ملفات متعددة وتراكبها على نفس المنصة للمقارنة.

علاوة على ذلك، يدمج TonyPlot أدوات تحليل متقدمة، مثل المقطع العرضي 1D للمخططات

ثنائية الأبعاد، والمسار، والمسبار، وأدوات التكامل. وأخيرًا، يوفر إمكانية إجراء عمليات قطع

للمخططات ثنائية الأبعاد باستخدام شرائح 1D متعددة، يتم التحكم فيها بشكل مستقل [5]



الشكل II-3: واجهة Tonyplot

II-4-منطق البرمجة:

يتم تطوير البنية المطلوبة في أطلس باستخدام لغة برمجة تعريفية. يقدم ما يلي لمحة عامة موجزة عن بناء ومحاكاة بنية في أطلس [6].

يحتوي ملف إدخال أطلس على سلسلة من أسطر الأوامر. يتكون كل سطر من عدد من العبارات التي تحدد الأمر ومجموعة من المعلمات.

تُعرض مجموعات الأوامر في الجدول (II-1)[7].

الخطوة	الأوامر المستعملة
تحديد البنية	▪ Mesh ▪ Region ▪ Electrode ▪ Doping
تحديد المواد والنماذج الفيزيائية المستعملة	▪ Material ▪ Models ▪ Contact ▪ Interface
تحديد طرق الحل الرقمية	▪ Method
تخصيص الحلول	▪ Log ▪ Solve ▪ Load ▪ Save
إظهار النتائج	▪ Extract ▪ Tonyplot

الجدول (II-1): الترتيب المنطقي للأوامر الأساسية في برنامج أطلس

II-5 خطوات المحاكاة :

تتم طريقة محاكاة وإدخال المعلومات في هذا البرنامج عبر خمسة مراحل تقريبا وهي

كآلاتي:

II-5-1 تحديد البنية

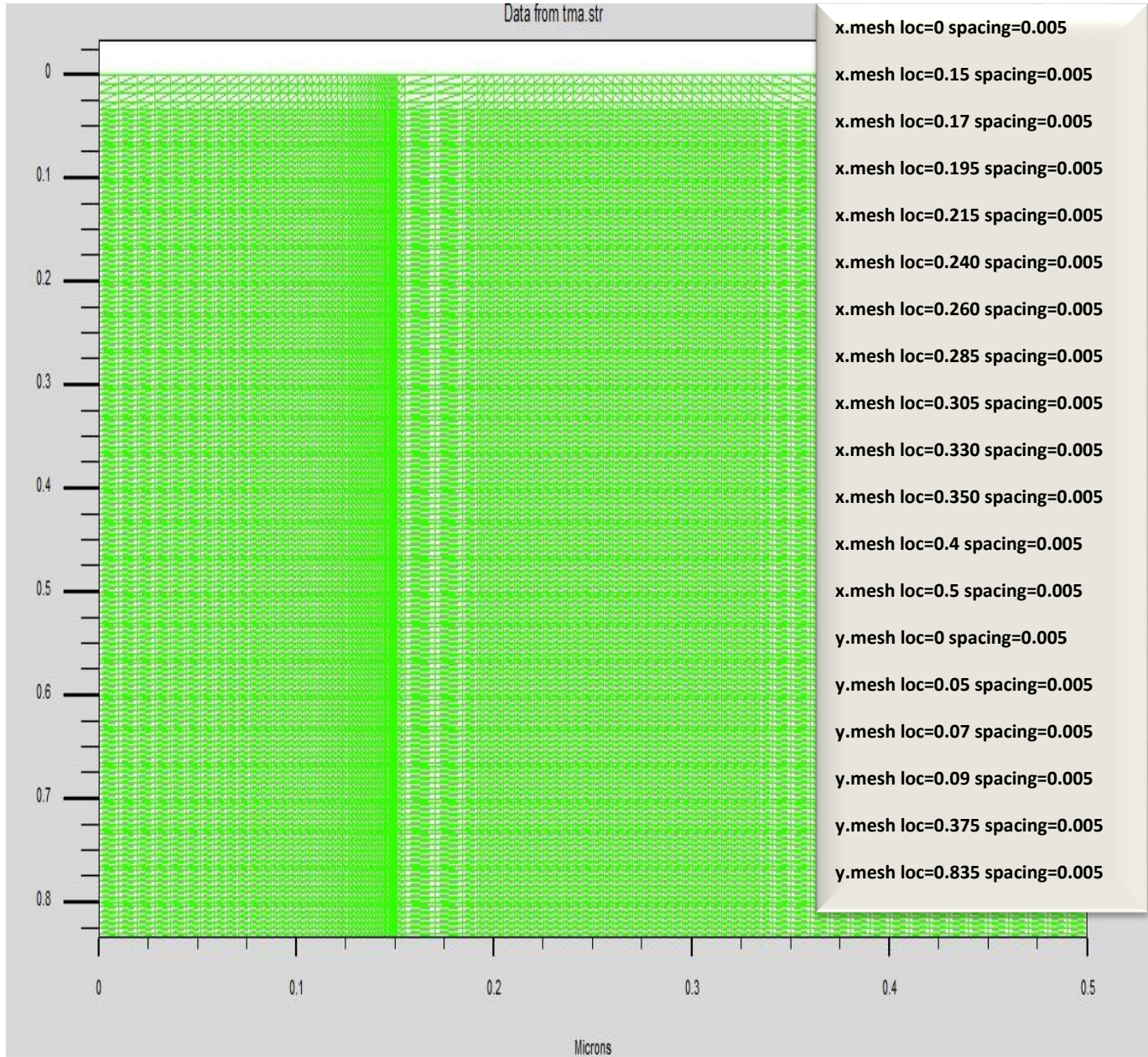
Mesh الشبكة 1-1-5-II

تتمثل الخطوة الأولى في بناء الجهاز، بعد كتابة التعليمة go atlas، في تحديد الشبكة (Mesh) تمثل الشبكة مجموعة من الخطوط التي تغطي المنطقة الفيزيائية التي يتم فيها إنشاء الجهاز ومحاكاته. يتم إنشاء هذه الشبكة ببساطة من خلال سلسلة من الخطوط الأفقية والعمودية التي يحددها المستخدم، مع ضبط المسافات بينها وفقاً للمتطلبات المحددة [8].

الصيغة العامة لتعريف mesh هي:

x.mesh location=<value> spacing=<value>

y.mesh location=<value> spacing=<value>

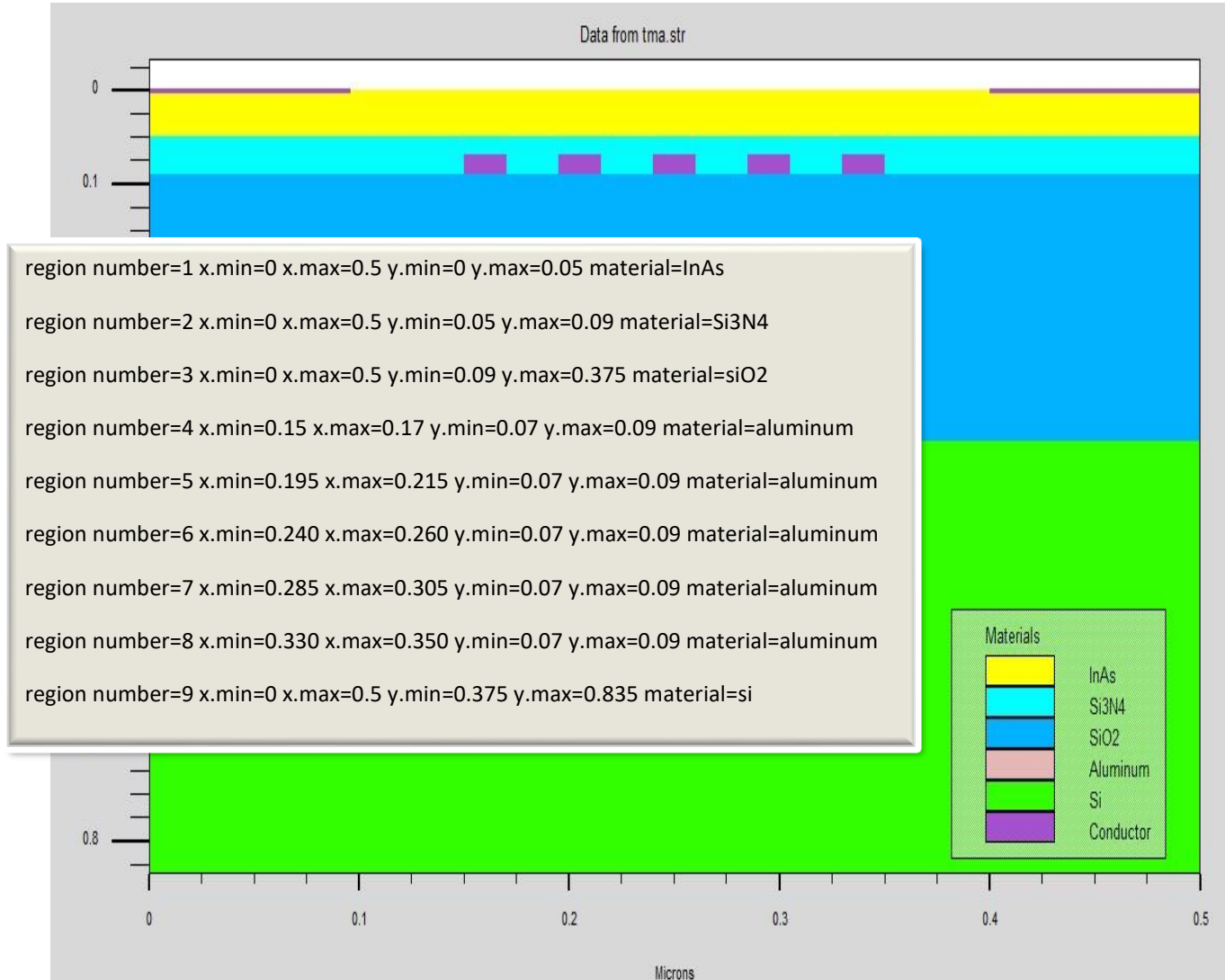


الشكل II-4: مثال على الشبكة

II-5-1-2 المناطق و المواد Region et Material

بعد تحديد الشبكة، يجب أيضًا تعريف المناطق من خلال تعيين أرقامها وتحديد نوع المادة المكونة لكل منها.

ينبغي ترتيب المناطق تصاعدياً، حيث لا يمكن، على سبيل المثال، تعريف المنطقة 5 قبل المنطقة 4 .
في Atlas، يتم استخدام الأمر région لتحديد هذه المناطق.



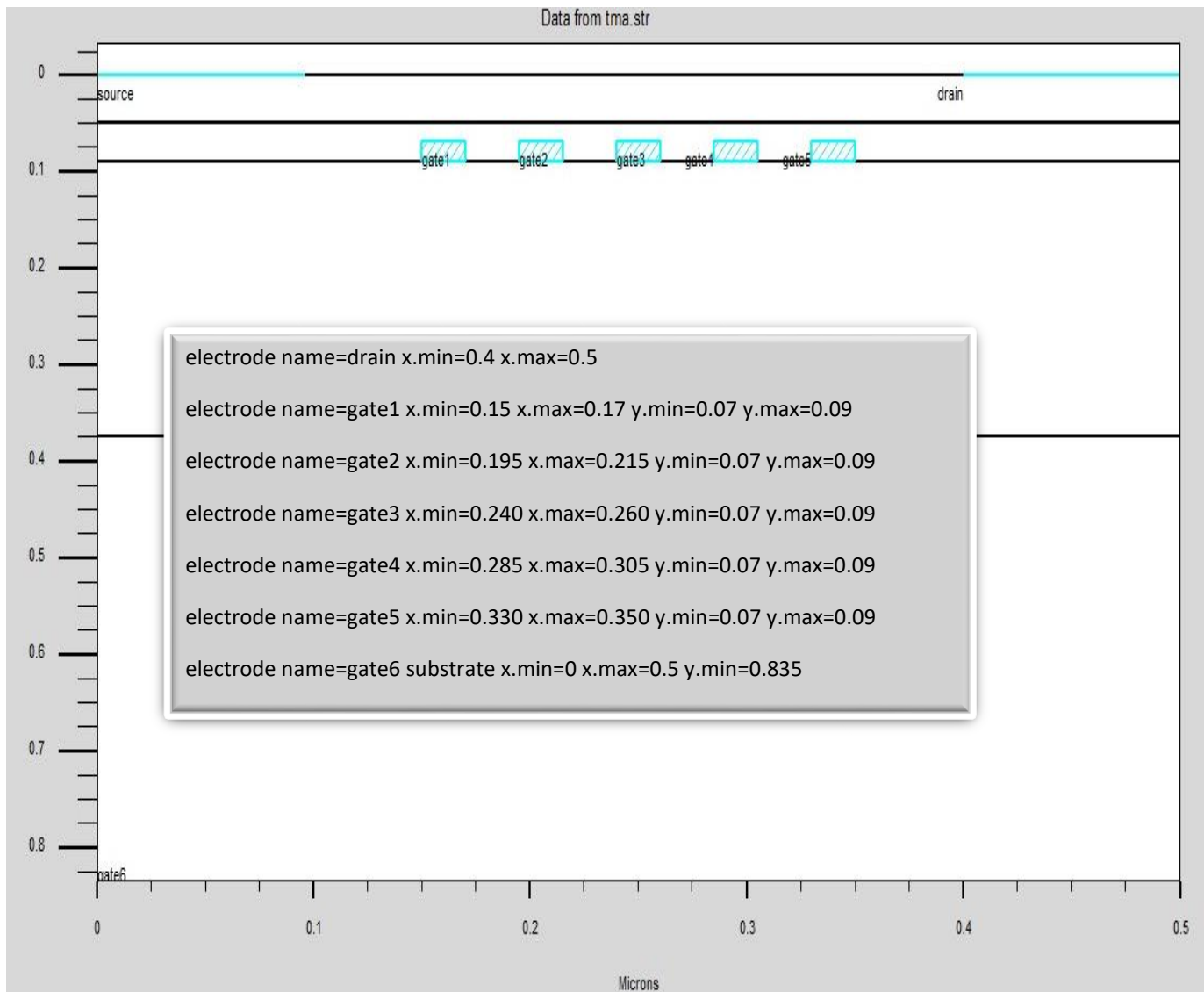
الشكل II-5: مثال عن المناطق والمواد

II-5-1-3 القطب الكهربائي Electrode:

يتيح ATLAS تحديد ما يصل إلى 50 قطبًا كهربائيًا. يتم تعريف القطب الكهربائي

وفقًا للصيغة التالية:

Electrode nombre =<integer>name = <nomdel'électrode><positiondesparamètres>

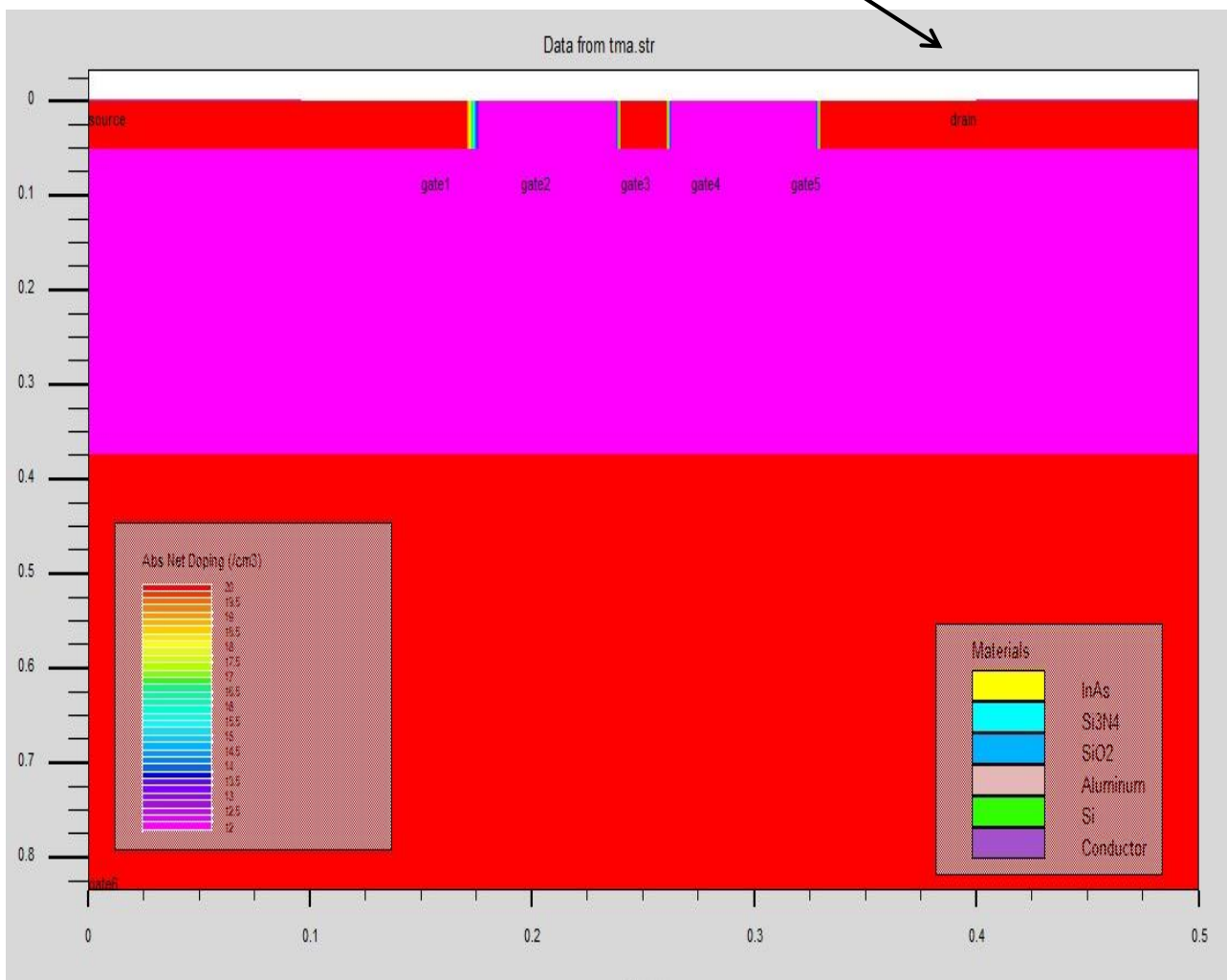


الشكل II-6: مثال على الأقطاب الكهربائية [9]

4-1-5-II : Dopage

العنصر الأخير الذي يجب تحديده عند توصيف البنية، كما هو موضح في الشكل (II-7)

doping n.type uniform conc=1.0E20 x.min=0 x.max=0.17 y.min=0 y.max=0.05
 doping n.type uniform conc=1.0E20 x.min=0.240 x.max=0.260 y.min=0 y.max=0.05
 doping n.type uniform conc=1.0E20 x.min=0.330 x.max=0.5 y.min=0 y.max=0.05
 doping p.type uniform conc=1.0E20 x.min=0 x.max=0.5 y.min=0.375 y.max=0.835



الشكل II-7: التطعيم في Atlas

يتم تعريف التطعيم وفقًا للصيغة التالية [10]:

DOPING < type de distribution > < type de dopant > / < position des paramètres >

II-5-2 مواصفات نماذج الأجهزة

بعد بناء الهيكل، من الضروري تحديد النماذج الفيزيائية وتحديد المواد. يتضمن تحديد النماذج والمواد أربع خطوات :

❖ المواد

يحتوي أطلس على قاعدة بيانات كبيرة لخصائص كل من المواد المحددة مسبقاً. خصائص المواد ليست ثابتة حيث أنها يمكن أن تتأثر بعوامل عديدة. لذلك يسمح لك Atlas بتعديل خصائص المواد المستخدمة في المحاكاة.

❖ النماذج

يعتمد اختيار النماذج على المواد المختارة للمحاكاة وبيئتها وأبعادها. يعتمد اختيار النموذج على المواد المختارة للمحاكاة. ويستشهد المثال أدناه ببعض النماذج. درجة الحرارة: تحدد درجة الحرارة بالكلفن.

SCHRO: ينشط حل **Poisson-Schrödinger**

❖ اتصال

يحدد الاتصال تعيينات الأقطاب الكهربائية. بناء جملة الاتصال هو

التالي: اسم جهة الاتصال = **<property_specification><name>**

❖ الواجهة

يتم استخدام إعلان الواجهة لتحديد كثافة الشحنة

معدل إعادة تركيب الواجهة والسطح عند الواجهات بين أشباه الموصلات والعوازل.

3-5-II اختيار الطريقة العددية:

❖ **الطريقة:** هناك عدة طرق عددية لحساب الحلول لمشاكل الأجهزة أشباه الموصلات. هناك ثلاثة

أنواع من تقنيات الحل المستخدم في محاكي Silvaco Atlas: Gummel NEWTON

BLOCK.

طريقة جوميل تحل كل المجهول مع الاحتفاظ بجميع المجهولات الأخرى الثابتة. يتم تكرار العملية حتى الوصول إلى حل مستقر. طريقة نيوتن يحل جميع المجهولات في وقت واحد. طريقة BLOC تحل بعض المعادلات بطريقة جوميل والمعادلات الأخرى بطريقة نيوتن. العملية يتم استخدام Gummel لنظام المعادلات التي تكون مقترنة بشكل ضعيف وعندما يكون هناك التقارب الخطي. يتم استخدام طريقة نيوتن عندما تكون المعادلات قوية مقترنة بالتقارب التربيعي. في هذا المثال، يتم حل المعادلات بواسطة طريقة نيوتن. يتم تقديم الأساليب العددية في التعليمات طريقة إدخال الملف

❖ **مواصفات الحل:**

بعد الانتهاء من اختيار الطريقة العددية، فإن الخطوة التالية هي تحديد الحل. يتم تقسيم مواصفات الحل إلى هذه البيانات:

السجل: LOG OUTFILE=<filename>

حل: <bias_points>

تحميل: تحميل الملف = < اسم الملف >

حفظ: حفظ الملف الخارجي = < اسم الملف > [9]

6-II تحليل النتائج: Results Analysis

بمجرد ايجاد حل لمشكلة جهاز أنصاف النواقل، يمكن عرض المعلومات بشكل رسومات

• EXTRACT :

تُستخدم الأوامر من هذا النوع الاستخراج قيم دقيقة لخاصية من نوعي ملفات السجل (log) أو الهيكل

(Structure) .

• TONYPLOT :

يبدأ تشغيل برنامج TONYPLOT الذي يسمح بالتمثيل الرسومات للبيانات.

7-II المعادلات والنماذج الأساسية لأنصاف النواقل في برنامج SILVACO.A:

❖ معادلات بواسون:

معادلة بواسون معروفة كالتالي: [11]

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = \rho \dots \dots \dots (1-II)$$

حيث :

ψ : هو الجهد الكهروستاتيكي.

ϵ : هي سماحية الوسط المحلية.

ρ : هي كثافة الشحنة الحجمية.

$$\rho = (P - n + N_D^+ - N_A^-) \dots \dots \dots (2-II)$$

❖ معادلات الاستمرارية

تعتبر معادلات الاستمرارية عن معدل تغير تركيز حاملات الشحنة مع الزمن. تُعطى معادلات

الاستمرارية للإلكترونات والثقوب بالصيغتين التاليتين: [12]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \dots \dots \dots (3-II)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \dots \dots \dots (4-II)$$

حيث أن :

G_p و G_n هما تركيز الإلكترونات والثقوب على التوالي .

R_p و R_n هما معدلا إعادة التركيب لداخلي لإلكترونات والثقوب على التوالي .

j_p و j_n هما كثافتا التيار لإلكترونات والثقوب على التوالي.

❖ معادلات النقل

في أنصاف النواقل، يُعد الانجراف والانتشار نمطي النقل الأساسيين [13]

$$\vec{J}_n = qn u_n \vec{E} + q D_n \frac{dn}{dx} \dots \dots \dots (5-II)$$

$$\vec{J}_p = qp u_p \vec{E} - q D_p \frac{dp}{dx} \dots \dots \dots (6-II)$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad \psi} \dots \dots \dots (7-II)$$

حيث :

u_p و u_n هما قابلية حركة الإلكترونات والثقوب.

D_p و D_n هما معاملات الانتشار للإلكترونات والثقوب، وترتبط بقابليات الحركة من خلال علاقة

أينشتاين:

$$D_n = \left(\frac{kt}{q}\right) u_n \dots \dots \dots (8-II)$$

$$D_p = \left(\frac{kt}{q}\right) u_p \dots \dots \dots (9-II)$$

- [1] Boukortt, N. E. (2017). Study and simulation of a nanoscale structure of a multigate MOS transistor Master's thesis, Mostaganem University.
- [2] ATLAS User's Manuel.(2011). Device simulation software, SILVACO International, California.
- [3] CHAHBAOUI FAYCAL, B. E. N. Étude numérique des propriétés électriques d'un transistor HEMT par le simulateur Atlas Silvaco.
- [4] Atlas User's Manual.(2005). Device Simulation Software, Santa Clara.
- [5] "ATLAS User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE", Silvaco, Santa clara, California, USA, 2014.
- [6] anayiotis Michalopoulos, A novel approach for the development and optimization of state-of the art photovomtique devices using silvaco, thèse de master, Monterey California, 2002.
- [7] ATLAS User's Manuel, SILVACO International, 2005.
- [8] Raounek, M. Etude Numérique d'un Transistor à un Electron en Graphène par le Simulateur Atlas Silvaco.
- [9] CHAHBAOUI FAYCAL, B. E. N. Étude numérique des propriétés électriques d'un transistor HEMT par le simulateur Atlas Silvaco.
- [10] Mordi, N, Simulation, modélisation et caractérisations électriques des transistors HEMT's à base de composés III-V nitrurés, Doctoral dissertation, 2018.
- [11] Green, M.A., Solar cells: operating principles, technology, and system applications .Englewood Cliffs, (1982).
- [12] Manual, A.U.s., Device Simulation Software, Version 5.20. 2. R, SILVACO International, Santa Clara, CA, (2015).

[13] Sze, S.M. and M.-K. Lee, Semiconductor Devices: Physics and Technology: Physics and Technology 2012: Wiley Global Education.

الفصل الثالث

نتائج المحاكاة

1-III مقدمة

في هذا الفصل سوف نقدم نتائج دراسة الخصائص الالكترونية لترانزستور النقطة الكمومية (SET) باستخدام برنامج Silvaco Atlas، قمنا بحل معادلات شرودنجر-بوسون في الإحداثيات الديكارتية ثنائية الابعاد، لحساب مستويات الطاقة، دالة الموجة، وتركيز الالكترونات بالإضافة إلى ذلك، تم حساب الطاقة و توزيع الكمون في هذه البنية تحت تأثير جهد المصرف V_d ، وجهد البوابة الثالثة V_G .

2-III النموذج المستخدم :

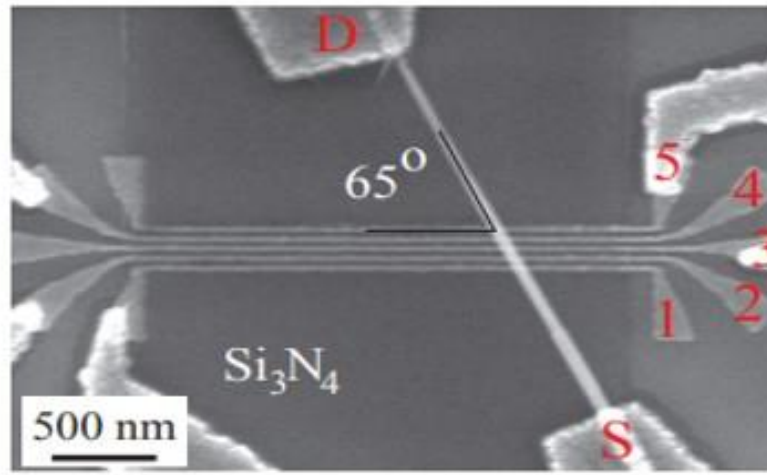
المكون	القيمة
قطر السلك النانوي	55 ± 5 نانومتر (ضمن مدى 40–80 نانومتر)
سمك طبقة العزل Si_3N_4	20 نانومتر
سمك طبقة SiO_2 على الركيزة	285 نانومتر
المسافة بين الأقطاب السفلية	25–30 نانومتر
عرض الأقطاب السفلية	30 نانومتر
عرض عصابة الطاقة الممنوعة (InAs)	$E_g = 0.354 \text{ eV}$
جهد البوابة 1 و 5	حوالي +500 mv
جهد البوابة 2 و 4	حوالي -1 v
السماحية النسبية (InAs)	$\epsilon_r = 15.15$
السماحية المطلقة (InAs)	$\epsilon \approx 1.34 \times 10^{-10} \text{ F/m}$

الجدول 1-III: النموذج المستخدم

3-III بنية النانو ترانزستور (SET) :

يمثل الشكل (III-1-أ) مركب النانو ترانزستور الذي تم دراسته تجريبيا من طرف الباحث (Nadj-Perge) الذي يتكون من سلك النانوي (InAs) وخمس بوابات (Gates) بينما يمثل الشكل (III-1-ب) الرسم التخطيطي المكافئ له.

(أ)

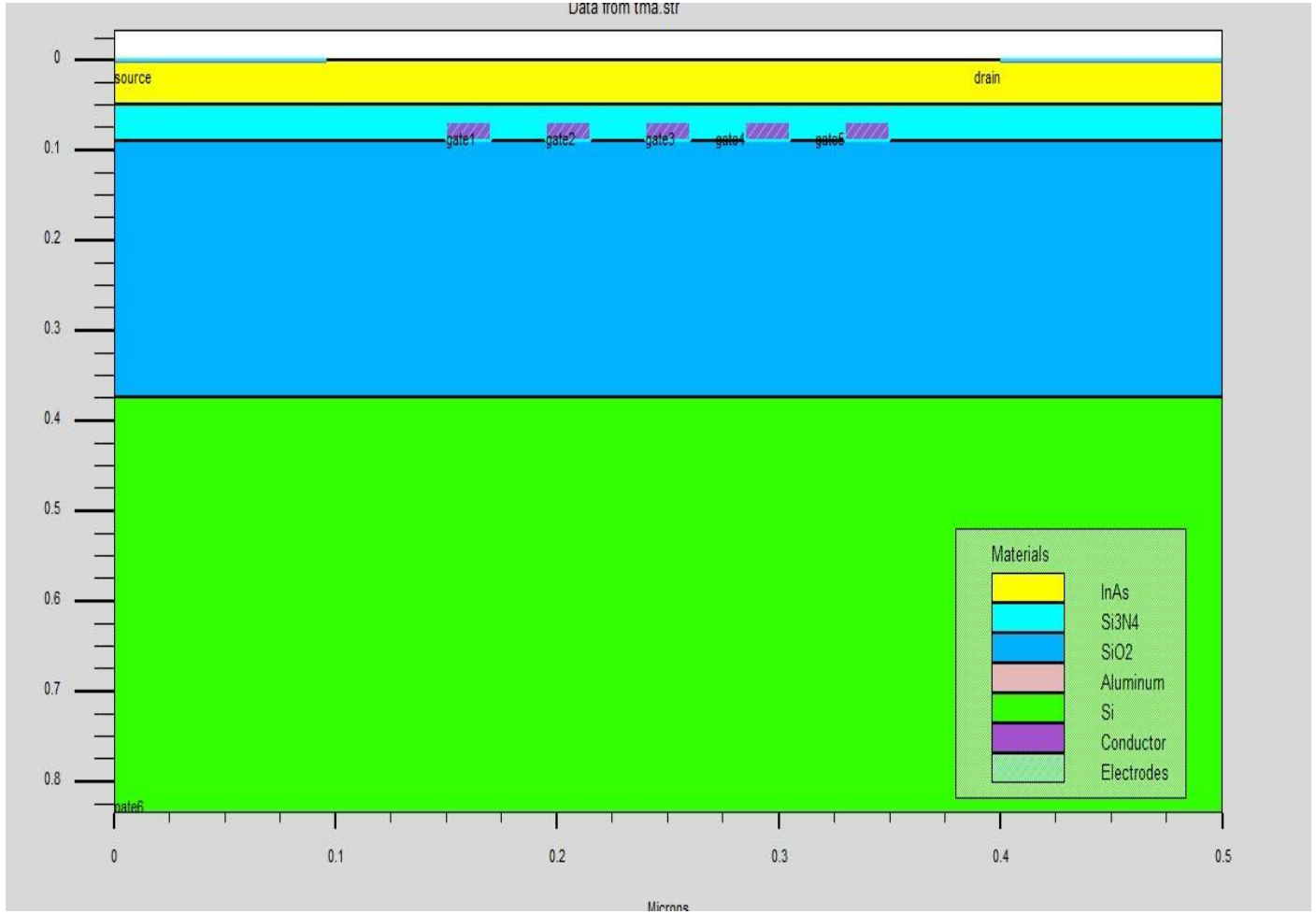


(ب)



الشكل III-1: الشكل (III-1-ج) يمثل البنية الخاصة بهذا النانو ترانزستور ويمثل

الشكل (III-1-ب) الرسم التخطيطي المكافئ له [1]

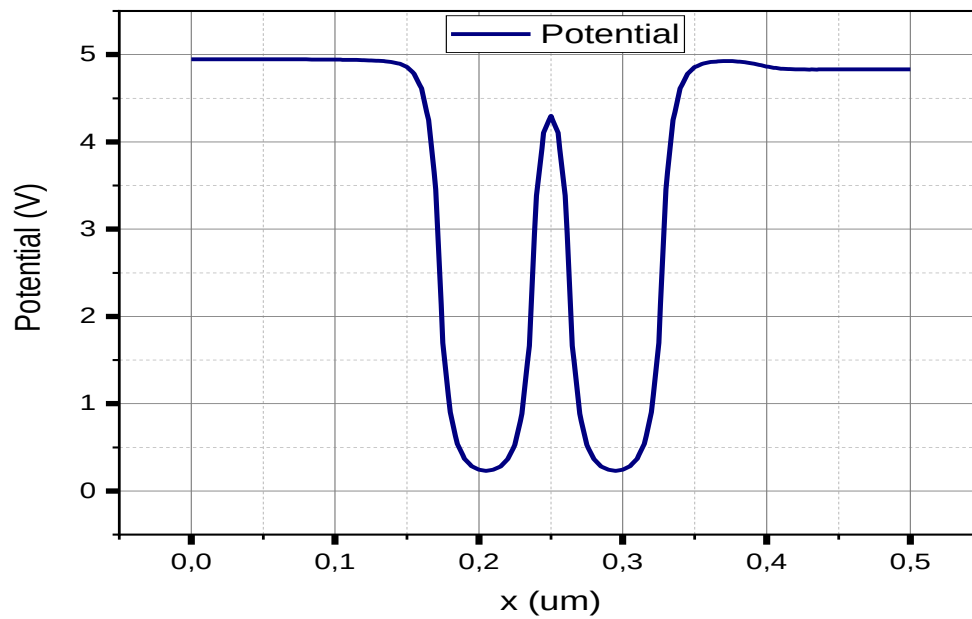


الشكل III-2: بنية النانو ترانزستور SET.

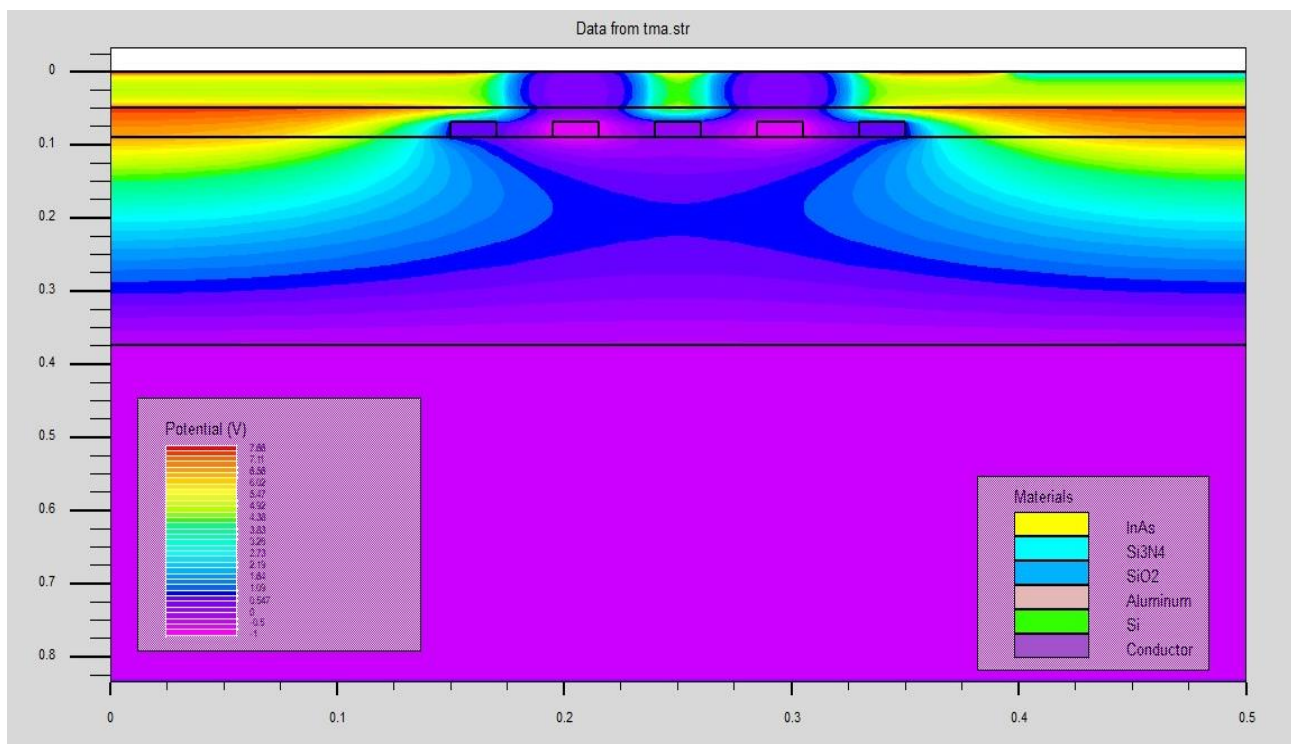
III-4 الدراسة الكهروستاتيكية:

III-4-1 توزيع الكمون

يمثل الشكل (III-3) توزيع الكمون على طول السلك النانوي من أجل الاستقطاب: $V_{ds} = 0(V)$ و $V_{g3} = 0(V)$ حيث نلاحظ ان توزيع الكمون يأخذ شكل قطع مكافئ ومتناظر بالنسبة للنقطة الكمومية ويأخذ قيم جد عالية عند القطبين (Source – drain) مما يفسران الطاقة اقل ما يمكن ، وهذا الانخفاض يؤدي الي تجمع الالكترونات بتركيز عالي من جهة القطبين. بينما توزيع الكمون في المستوي (xy) يكون موضح في الشكل (III-4) من أجل $V_{ds} = 0(V)$ و $V_{g3} = 0(V)$.



الشكل III-3 : توزيع الكمون على طول البنية



الشكل III-4 : توزيع الكمون في مستوي (xy) البنية من اجل

$$V_{ds} = 0(V) \text{ و } V_{g3} = 0(V)$$

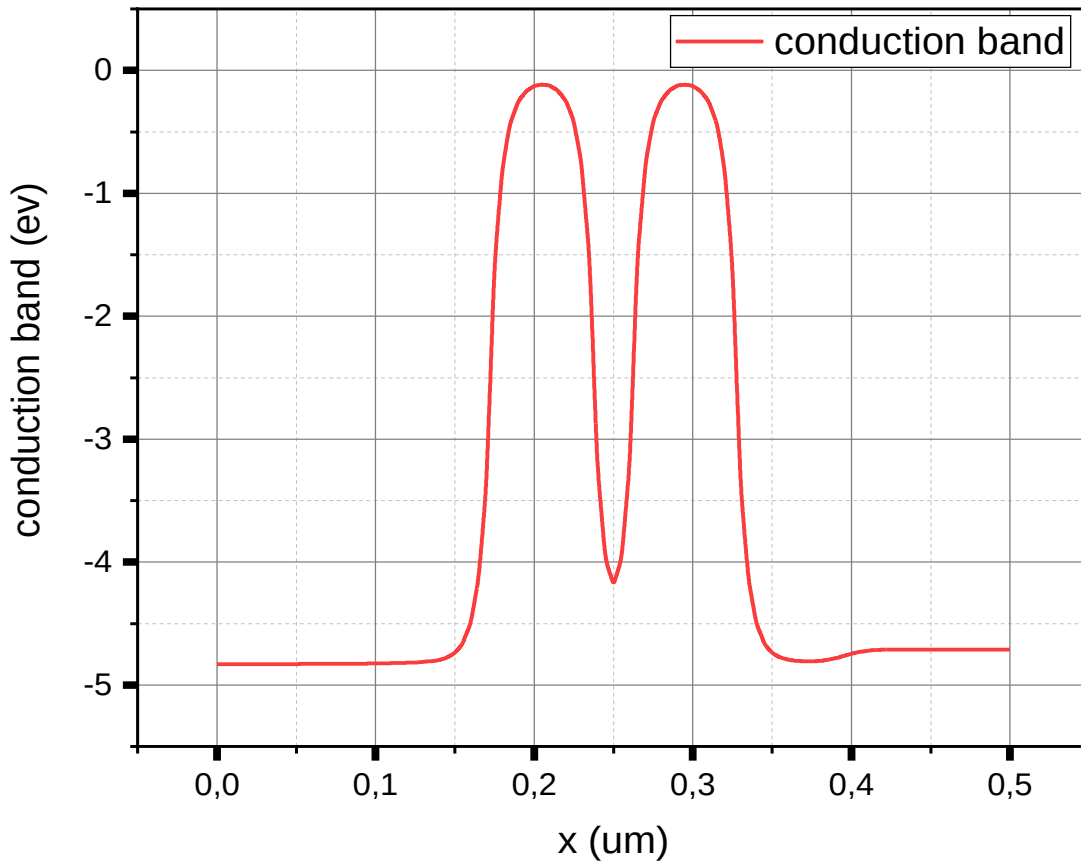
III-2-4 مخطط الطاقة للترانزستور SET:

في هذه الدراسة قمنا بحل معادلة شرودنجر - بواسون (Schrödinger- Poisson) من أجل القيم الكمومية التالية:

$$V_{g2} = V_{g4} = -1 \text{ (V)} \quad V_{g1} = V_{g5} = 0.5 \text{ (V)}, V_{ds} = V_{g3} = 0 \text{ (V)}$$

حيث حصلنا على مخطط الطاقة الموضح في الشكل (III-5)، نلاحظ تشكل حاجزان كمونيان مرتفعان ناتجان عن تأثير البوابتان الثانية والرابعة مما أدى الى تشكل منطقة منخفضة بينهما تمثل النقطة الكمومية التي يتم التحكم فيها من طرف البوابة الثالثة لهذا الترانزستور.

بينما ينتج عن تأثير البوابة الأولى والخامسة كثافة الكترونية عالية عند المصدر والمصرف (Source – drain) وهذا راجع الى الاستقطاب الموجب (+500 mv).



الشكل III-5 : مخطط الطاقة الكمومية لترانزستور.

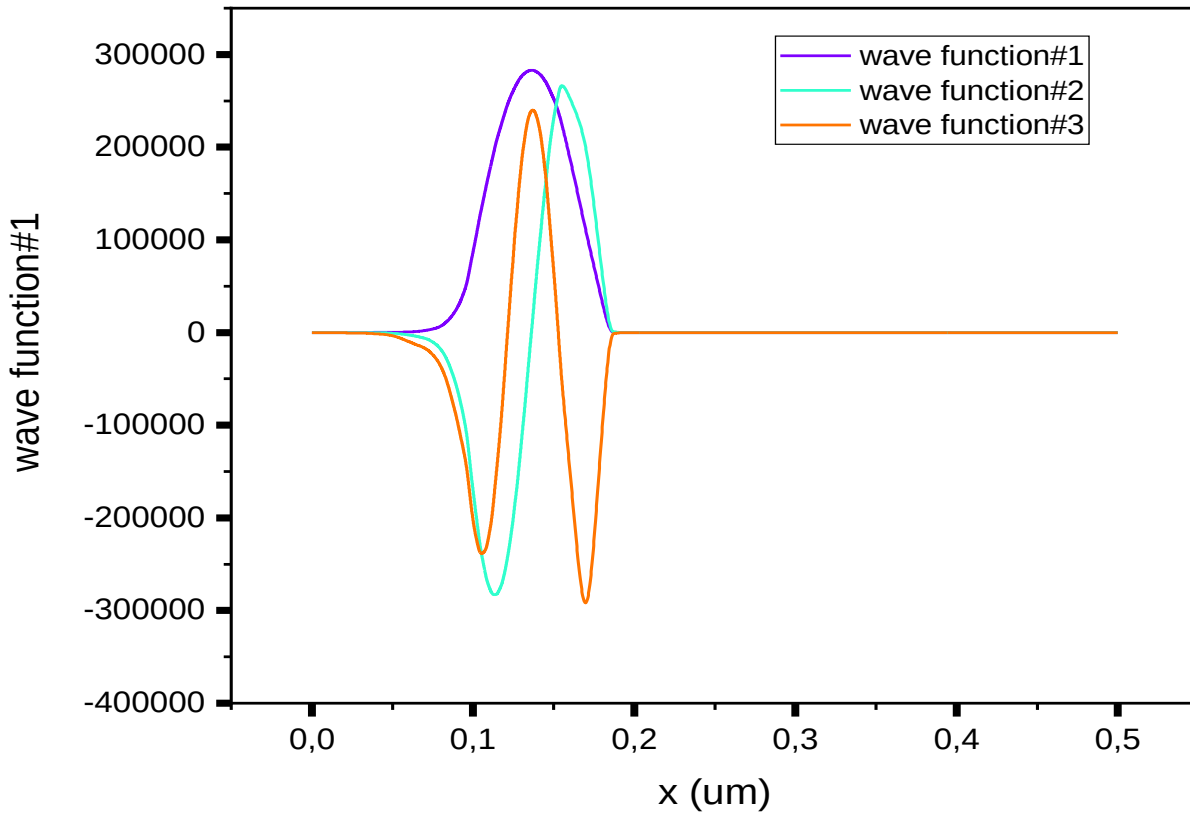
III-4-3 دالة الموجة:

يظهر الشكل (III-6) الدوال الموجية للحالات الثلاث الأولى E_1, E_2, E_3 من الطاقات من أجل القيم $V_{ds} = 0 \text{ V}$ و $V_{g3} = -0.15 \text{ V}$ حيث يكون تركيز الجهد مرتفعاً بجوار المصدر (source)، كل دالة موجية تمثل حالة طاقة مكممة وتتصف بعدد معين من العقد هذه الدوال تعكس توزيع احتمال وجود الإلكترون داخل البنية و يوضح الشكل ان الدوال الموجية للحالات الثلاث الأولى تتركز بجوار المصدر (source) اين يكون الحد الأدنى من الطاقة. بحيث نلاحظ ان:

الدالة الموجية الأولى (باللون الازرق) تتميز بعدم وجود عقد.

الدالة الموجية الثانية (باللون الاخضر) نلاحظ تشكل عقدة واحدة .

الدالة الموجية الثالثة (باللون الاحمر) تحتوي على عقدتين.

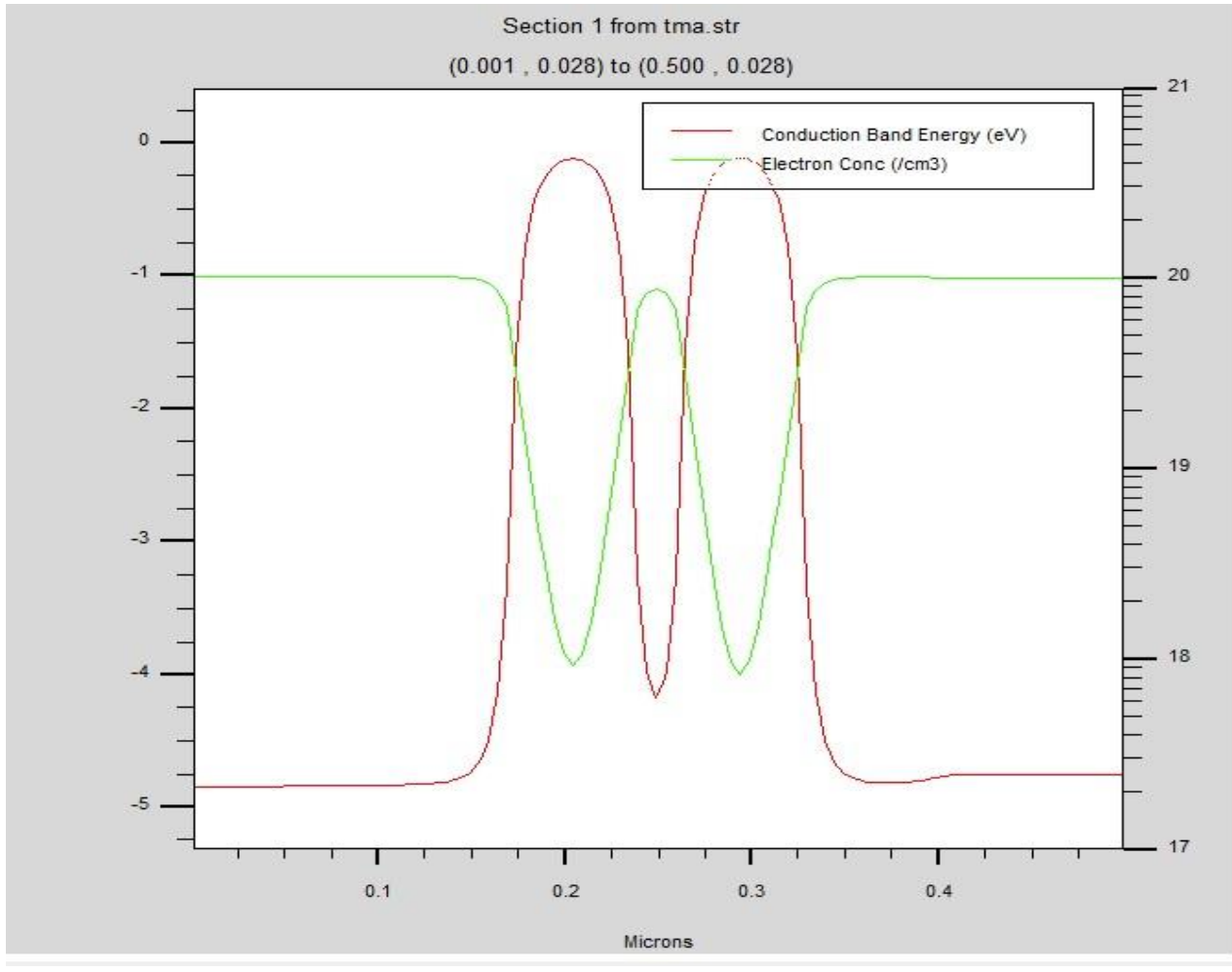


الشكل III-6 : الدوال الموجية للحالات الثلاث الأولى E_1, E_2, E_3

III-4-4 تركيز الإلكترونات في SET

يمثل الشكل (III-7) توزيع الإلكترونات ومخطط الطاقة في النانو ترانزستور من أجل القيم $V_{ds} = -0.02V$ و $V_{g3} = -0.15V$ حيث نلاحظ انخفاض في طاقة الوسط بين الموضعين $0.15\mu m$ و $0.35\mu m$ وهذا يشير الى وجود نقطة كمومية حيث تكون الطاقة اقل منها في الجانبين وهذا ما يؤدي الى حصر الإلكترونات داخل هذه المنطقة.

اما بالنسبة لمنحنى تركيز الإلكترونات نلاحظ وجود قمم داخل منطقة البئر هذه القمم تمثل توزيع دالة الموجة للإلكترونات المحصورة في مستويات طاقة محددة اما خارج البئر يكون التركيز منخفض لان الإلكترونات محصورة في البئر.

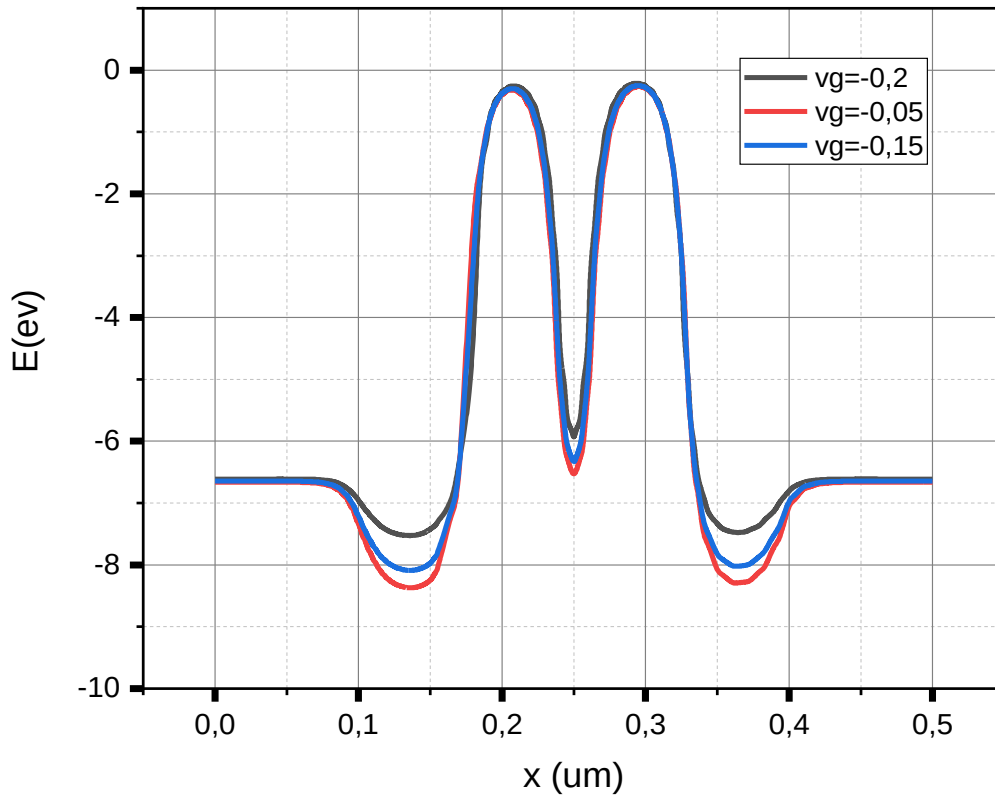


الشكل III-7 : توزيع الإلكترونات على طول البنية من أجل القيم $V_{g3} = -0.15V$

$V_{ds} = -0.02V$

III-4-5 تأثير الجهد V_g :

يعرض الشكل (III-8) تأثير الجهد البوابة الثالثة V_{g3} على لنطاق التوصيل بحيث نلاحظ انه كلما زاد الجهد نلاحظ ان النقطة الكمومية تنخفض مما يؤدي الي زيادة عمق البئر الكمومي أي زيادة في مستويات الطاقة التي ممكن يشغلها الالكترونون، كما نلاحظ تأثير هذا الجهد على الجانبين المصرف والمنبع، هذا الانخفاض يسمح بزيادة تجمع الالكترونات على الحاجرين الأول والثاني أي زيادة تركيزهم.

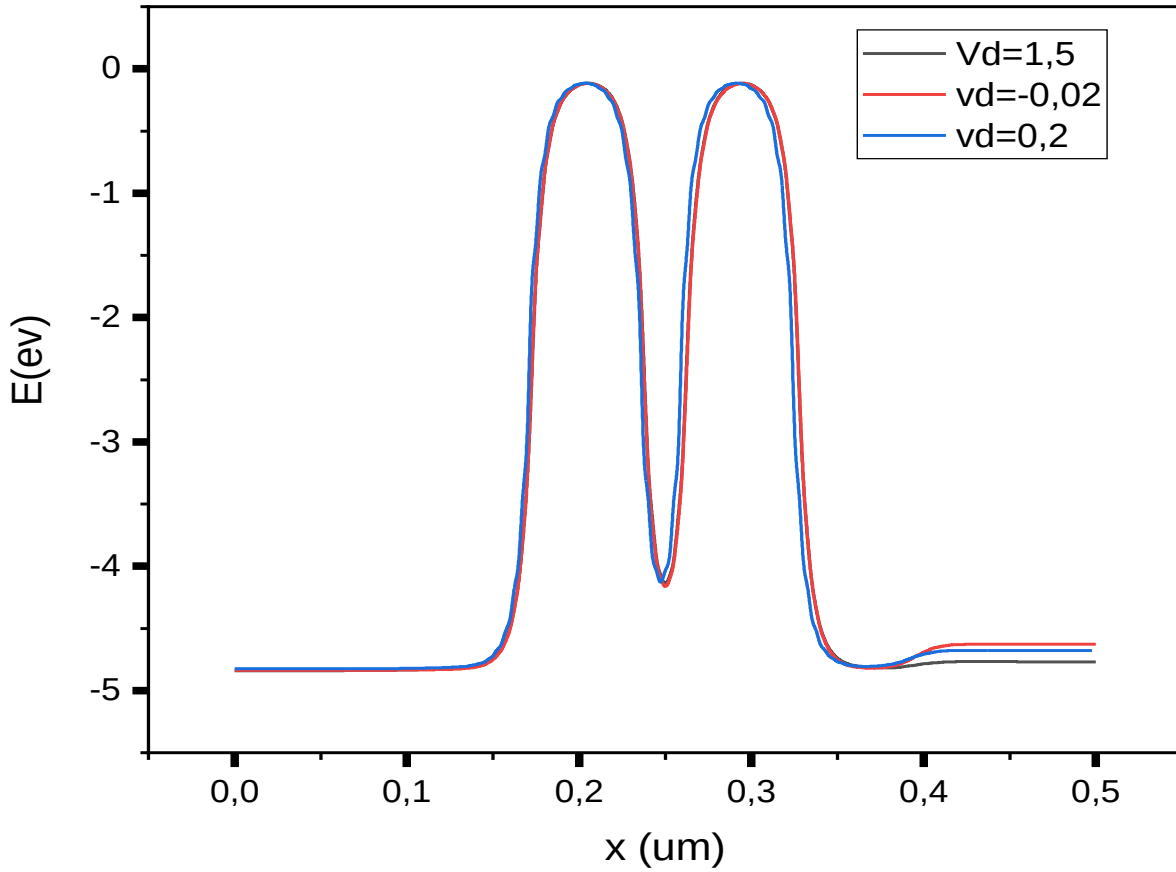


الشكل III-8: رسم تخطيطي لنطاق التوصيل على طول الجهاز مع $V_d=0$ (V)

III-4-6 تأثير الجهد V_d :

بينما عندما نغير في جهد التصريف V_{ds} ونثبت الجهد المطبق على البوابة الثالثة $V_{g3} = -0.15$ (V) نلاحظ نطاق التوصيل يتأثر فقط في جهة المصرف drain وهذا يؤدي الي خلق فرق في الكمون بين المنبع والمصرف مما يساعد على انتقال الالكترونون من المنبع الي النقطة الكمومية باختراق الحاجز الأول

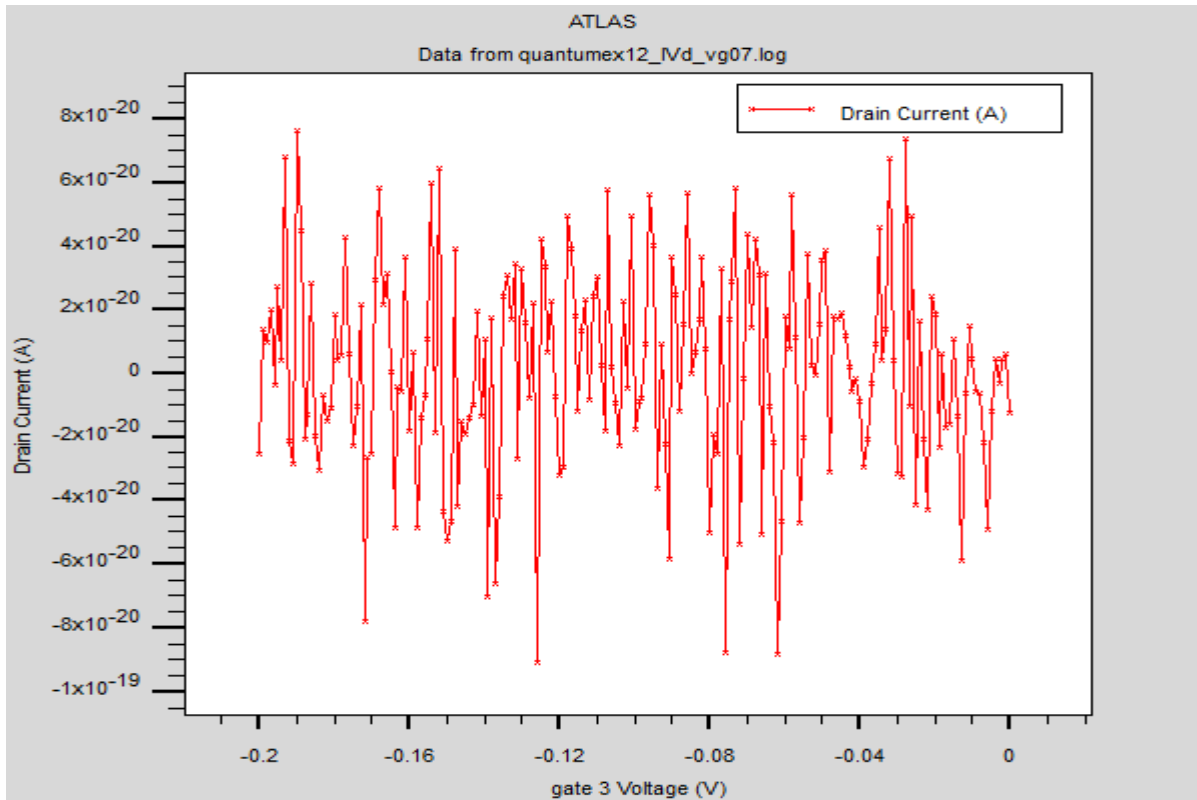
وإذا كانت طاقته كافية فإنه يستطيع أن يخترق الحاجز الثاني وبالتالي ينتج تيار. إذن تغير الجهد المصروف له دور كبير في انتقال الإلكترونات.



الشكل III-9: رسم تخطيطي لنطاق التوصيل على طول الجهاز مع $V_g = -0.15$ (V)

5-III خواص التيار للترانزستور SET : $I_{ds} = f(V_{g3})$

من خواص تيار الترانزستور SET انه تيار اهتزازي او ما يعرف باهتزازات كولومب وهذا كما نلاحظه في الشكل 9-III بحيث نلاحظ انه عندما نغير جهد البوابة رقم 3 (V_{g3}) من $[-0.2 \text{ V}, 0 \text{ V}]$ و $V_{ds}=0.1 \text{ V}$ ذبذبات كولومب وهذا ما يفسر انتقالات الإلكترون الغير مستمرة من المنبع الي المصرف بسبب الحصر الكولومبي الناتج عن الحاجزين الكموميين بحيث ينتقل الإلكترون من المنبع الي النقطة الكمومية بالفعل النفقي ثم يبقى في النقطة الكمومية حتى يمتلك الطاقة اللازمة لاختراق الحاجز الثاني وهذا بتغير جهد البوابة الثالثة وهكذا يتم انتقالات الكترونات SET الواحد تلوى الاخر.



الشكل 10-III: تغير جهد التيار I_{ds} بدلالة جهد البوابة V_{g3} للترانزستور SET عند درجة الحرارة $T=20 \text{ K}$ و $V_{ds}=0.1 \text{ V}$.

[1]Nadj-perge,S.(2010).Single spin in semiconductor nanowire (Doctorl
dissertation,Technische Universiteit Delft).

الخاتمة العامة

بفضل تطورات النانو تكنولوجي في الكثير من المجالات العلمية من بينها المجال الالكتروني أدى الى تطوير وتصميم الأجهزة الالكترونية منها النانو ترانزستور الذي يعتمد في مبدا عمله على الحصر الكولومبي والانتقال المفرد للإلكترونات من خلال حل معادلات Poisson-Schrödinger في الإحداثيات الديكارتية باستخدام المحاكى SILVACO-Atlas، قمنا بدراسة الخواص الالكترونية لهذا الترانزستور فتحصلنا على مخططات الطاقة وتوزيع الكمون والالكترونات في هذه البنية ودالة الموجة الموافقة للحالات الثلاثة الأولى، كما درسنا تأثير استقطاب الجهد المطبق بين طرفي المصدر والمصرف فتحصلنا على النتائج التالية:

- نلاحظ تشكل حاجزان كمونيان الناتجان عن تأثير البوابتان الثانية والرابعة مما أدى الى تشكل البئر الكموني الذي يمثل النقطة الكمومية التي يتم التحكم فيها من طرف البوابة الثالثة لهذا الترانزستور.
- انه كلما زاد الجهد المطبق V_d ينخفض نطاق التوصيل من هذه الجهة
- وعند تغيير جهد البوابة الثالثة V_{g3} بقيم مختلفة مع تثبيت جهد بوابة المصرف V_d لاحظنا ان عمق البئر وبالتالي زيادة في مستويات الطاقة .
- يكون تمثيل الدوال الموجية للحالات الثلاثة الأولى بجوار المصدر حيث أنا الالكترونات تتراكم عند الحد الأدنى من الطاقة.
- من خواص تيار الترانزستور SET انه تيار اهتزازي حيث بتغير جهد البوابة الثالثة ينتج عنه تذبذبات كولومب وهو مايفسر انتقالات الالكترون الغير مستمرة من المنبع الي المصرف بسبب الحصر الكولومبي



Département des Sciences de la matière

Filière: Physique

قسم : علوم المادة

شعبة : الفيزياء

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث

(ملحق القرار 1082 المؤرخ في 27/12/2021)

أنا الممضي أسفله،

السيد(ة):
.....

تخصص:
.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم:
.....

المسجل بكلية:
.....

والمكلف بإنجاز أعمال بحث : مذكرة

عنوانها:
.....

.....
.....

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه وفق ما ينص عليه القرار رقم 1082 المؤرخ في 27/12/2021 المحدد للقواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

التاريخ: 28/05/2025

إمضاء المعني بالأمر