



الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

قسم هندسة ميكانيكية

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: هندسة ميكانيكية

تخصص: طاقة

من اعداد الطلبة:

عبد الباسط شفاح

عبيد خضره

آية مصباحي

طالب علي بن ناصر

الموضوع:

دراسة انتقال الحرارة داخل هياكل الأجهزة الالكترونية متعددة المقاييس

نوقشت في: 2024/06/03

أمام لجنة المناقشة:

جامعة الوادي

رئيساً

أستاذ تعليم عالي

عبد المالك عطية

جامعة الوادي

مناقشاً

أستاذ محاضر أ

علي بوخاري

جامعة الوادي

مشرفاً

أستاذ مساعد ب

أسامة زبيري

السنة الجامعية : 2024/2023

Abstract

As the size of the device decreases on the nanoscale, the heat generated influences the efficiency of the device. In this work, we studied the heat transfer within a metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) based on silicon (Si) and silicon carbide (SiC) with the effect of the specularly parameter (p) which influences the thermal conductivity of the device using the lattice Boltzmann method (LBM). The results showed that the device based on silicon carbide has less heat than the device based on silicon, and increasing the specularly coefficient has a positive effect on reducing the temperature of electronic devices.

Keywords : MOSFET; Heat transfer; Lattice Boltzmann method; silicon; silicon carbide.

المخلص

مع انخفاض حجم الجهاز على مقياس النانو، فإن الحرارة المتولدة تؤثر على كفاءة الجهاز. في هذه المذكرة قمنا بدراسة الانتقال الحراري داخل ترانزستور أكسيد المعدن شبه موصل ذو تأثير حقل (MOSFET) موسفت المعتمدة على مادة السيليكون (Si) و مادة كربيد السيليكون (SiC) مع تأثير معامل الانعكاسية (p) الذي يؤثر على التوصيل الحراري للجهاز، وذلك باستخدام طريقة شبكة بولتزمان (LBM). أظهرت النتائج أن الجهاز المعتمد على كربيد السيليكون أقل حرارة من الجهاز المعتمد على السيليكون، كما أن زيادة معامل الانعكاسية له تأثير إيجابي على خفض درجة حرارة الأجهزة الإلكترونية.

الكلمات المفتاحية : موسفت؛ انتقال الحرارة ؛ طريقة شبكة بولتزمان ؛ سيليكون؛ كربيد السيليكون

Résumé :

À mesure que la taille du dispositif diminue à l'échelle nanométrique, la chaleur générée affecte l'efficacité du dispositif. Dans cette travail, nous avons étudié le transfert de chaleur au sein d'un transistor à effet de champ à semi-conducteur à oxyde métallique (MOSFET) à base de silicium (Si) et de carbure de silicium (SiC) avec l'effet du coefficient de réflectivité (p), qui affecte la conductivité thermique de l'appareil. Cela se fait en utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau. Les résultats ont montré que le dispositif à base de carbure de silicium est moins chaud que le dispositif à base de silicium et que l'augmentation du coefficient de réflectivité a un effet positif sur la réduction de la température des appareils électroniques.

Mots clés : MOSFET ; Transfert de chaleur ; Méthode de Boltzmann sur réseau ; silicium ; Carbure de silicium

شكـر

أولاً، نشكر و نحمد الله خالقنا الذي أعطانا القوة للقيام بهذا العمل.

أود أن نعرب عن خالص امتناننا لمشرفنا الدكتور زبييري أسامة ، لتوجيهاته

الممتازة ونصائحه القيمة ودعمه القوي وتشجيعه المستمر طوال فترة هذا العمل

البحثي بجامعة الوادي. لقد كان من دواعي سرورنا وامتيازنا الكبير العمل تحت

إشرافه لإنجاز هذا البحث.

الإهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

الحمد لله الذي يسر لنا البدايات

وأكمل لنا النهايات.. وبلغنا الغايات

الحمد لله الذي ما تم جهد إلا بعونه

وما ختم سعي إلا بفضلته

والصلاة والسلام على الرسول الكريم أول المعلمين وخير المرسلين والعالمين

أما بعد :

بعد مسيرة دراسية دامت سنوات وبعد عقبات وصعوبات ها نحن اليوم نقف على عتبة تخرجنا
نقطف ثمار تعبنا ونرفع قبعاتنا بكل فخر

فالحمد لله شكرا وحبا وامتنانا فما كنا لنفعل هذا ونصل لهذا اليوم لولا فضل الله علينا فالحمد لله
على البدء والحمد لله على الختام

وبكل حب نهدي ثمرة جهدنا هذا :

إلى آبائنا الغالين الكرام تلك الشموع التي احترقت لتنير دروبنا أدامكم الله سندا لنا وحفظكم
ورعاكم.

إلى اللاتي زين حياتنا بضياء البدر إلى من منحنا القوة والعزيمة للوصول هنا أمهاتنا الحبيبات
العزيزات حفظهن الله وبارك في عمرهن.

إلى من هم انطلاقة الماضي وعون الحاضر وسند المستقبل إخواننا وأخواتنا رعاهم الله.

إلى كل من ساندنا وأيدنا وكان عوننا لنا وكل من ضمننا في دعائه وسأل الله لنا التوفيق من
أصدقاء وأقرباء وزملاء أسأل الله ان يبارك فيكم ويحفظكم بحفظه.

فهرس المحتويات

i.....	فهرس الاشكال
ii.....	فهرس الجداول
iii.....	التسميات
iv.....	المقدمة العامة:
	الفصل الاول عموميات حول الأجهزة الإلكترونية
1.....	1.1 مقدمة:
3.....	2.1 بنية الأجهزة الإلكترونية:
4.....	أ- هيكل الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة القائمة على SOI:
5.....	ب - تقنية البوابة المزدوجة MOSFET (DG):
6.....	ت - موسفت MOSFET متعدد البوابات:
6.....	ث - البوابة المحيطة موسفت MOSFET:
7.....	ج - ترانزستور التأثير الميداني (FinFET):
8.....	ح - هياكل مختلفة متعددة البوابات:
10.....	3.1 تقليل حجم الخاصية
11.....	4.1 قانون مور
11.....	5.1 نقل الحرارة في بنية دقيقة/نانوية
12.....	6.1 مواد شبه موصلة:
12.....	أ - مادة السيليكون:
13.....	ب - الجرمانيوم Ge:
15.....	ث - كربيد السيليكون Sic:
16.....	ج - الجرافين:
17.....	7.1 مجالات استخدام الترانزستور:
18.....	8.1 إيجابيات وسلبيات الترانزستور:
18.....	أ - الإيجابيات:

ب - السليبيات: 19

9.1 الخاتمة: 19

الفصل الثاني طريقة شبكية بولتزمان

1.2 مقدمة: 20

2.2 نظرية بولتزمان : 20

3.2 عملية تشتت آلية فونون: 21

4.2 معادلة النقل فونون بولتزمان: 22

5.2 منهجية شبكية بولتزمان: 23

6.2 نماذج شبكية بولتزمان: 25

أ - أحادية البعد: 25

ب -ثنائي الأبعاد: 25

ت - ثلاثي الأبعاد: 27

7.2 تطبيق طريقة شبكية بولتزمان: 28

8.2 الخاتمة: 29

الفصل الثالث دراسة النقل الحراري داخل جهاز موسفت (MOSFET)

1.3 مقدمة: 30

2.3 الكود المستعمل 32

3.3 وصف البنية و الشروط الحدية 34

4.3 نتائج المحاكاة و المناقشة: 36

5.3 الخلاصة 45

الخاتمة العامة : 46

المراجع 48

فهرس الاشكال

- 3 الشكل 1.1: حدود الترانزستور التقليدي.
- 3 الشكل 2.1: أشكال صناعية مختلفة من الترانزستور على مقياس واحد.
- 4 الشكل 3.1: الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة المستندة إلى SOI.
- 5 الشكل 4.1: البوابة المزدوجة MOSFET (DG).
- 6 الشكل 5.1: ترانزستور ثلاثي الأبعاد ثلاثي البوابات
- 7 الشكل 6.1: البوابة النهائية المحيطة MOSFET
- 8 الشكل 7.1: ترانزستور تأثير المجال الزعني (FinFET)
- 9 الشكل 8.1: هياكل مختلفة متعددة البوابات.
- 10 الشكل 9.1: حجم الميزة كدالة للوقت
- 11 الشكل 10.1: عدد الترانزستورات في معالجات إنتل المتعاقبة بتغير الزمن
- 12 الشكل 11.1: الطرق الحالية في علم النقل الحراري النانوي
- 13 الشكل 12.1: مادة السيليكون
- 14 الشكل 13.1: مادة الجرمانيوم
- 15 الشكل 14.1: مادة كربيد السيليكون
- 17 الشكل 15.1: هيكل الجرافين
- 21 الشكل 1.2: لودفيج إدوارد بولتزمان (1844-1906).
- 25 الشكل 2.2: ترتيبات الشبكة للمشكلات أحادية الأبعاد.
- 26 الشكل 3.2: نموذج الشبكة D2Q9.
- 26 الشكل 4.2: نموذج الشبكة D2Q5.
- 27 الشكل 5.2: ترتيبات الشبكة للمسائل ثلاثية الأبعاد، D3Q19.
- 27 الشكل 6.2: ترتيبات الشبكة للمسائل ثلاثية الأبعاد، D3Q15.
- 28 الشكل 7.2: مجالات تطبيق LBM المختلفة.
- 33 الشكل 1.3: منهجية المعلوماتية المستخدمة (الخوارزمية)
- 34 الشكل 2.3: جهاز موسفت المعتمد على مادة كربيد السيليكون (SiC-MOSFET)
- 35 الشكل 3.3: جهاز موسفت المعتمد على مادة السيليكون (Si-MOSFET)
- 37 الشكل 4.3: التغير الزمني لدرجة الحرارة في جهاز موسفت المعتمد على مادتي سيليكون وكربيد سيليكون
- 38 الشكل 5.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور العمودي y في جهازي موسفت عند الزمن $t=10ps$ و $t=30ps$ و $p=0.3$
- 39 الشكل 6.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور الأفقي x في جهازي موسفت عند الزمن $t=10ps$ و $t=30ps$ و $p=0.3$
- 40 الشكل 7.3: التغير الزمني في درجة الحرارة في جهازي موسفت ($y=50nm, x=50nm$) عند $p=0.3$ و $p=0.5$
- 41 الشكل 8.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور العمودي y في جهازي موسفت عند $p=0.1$ و $p=0.5$ و $t=10ps$
- 44 الشكل 9.3: التوزيع الحراري ثنائي الأبعاد (2D) سيليكون موسفت وجهاز كربيد سيليكون موسفت عند $t=10ps$ و $t=30ps$ و $p=0.3$

فهرس الجداول

35 الجدول 1.3 : الخصائص الحرارية للمواد (Si, SiC ,SiO₂)

التسميات

c	سرعة الشبكة, $m s^{-1}$	x, y	اتجاهات, m
L_c	طول القناة, m		
C	سعة حرارية حجمية, $J m^{-3} K^{-1}$	θ_D	درجة حرارة ديبياي, K
g	دالة توزيع الفونون	Λ	متوسط المسار الحر للفونون, m
\hbar	ثابت بلانك, J s	η	كثافة عدد الاهتزازات, m^{-3}
k	التوصيل الحراري, $W m^{-1} K^{-1}$	τ	وقت استرخاء الفونون, s
Kn	رقم كنودسن, Λ/L_c	ω	تردد الفونون, s^{-1}
k_B	ثابت بولتزمان, $J K^{-1}$	i	اتجاه
a	معامل	w	جدار
q_v	معدل توليد الحرارة لكل وحدة حجم, $W m^{-3}$	eq	توازن
u	كثافة طاقة الفونون, $J m^{-3}$	*	بلا أبعاد
v	سرعة مجموعة فونون, $m s^{-1}$		
t	زمن, s		
T	درجة الحرارة, K		
اختصارات			
BTE	معادلة بولتزمان للنقل		
SiC	كربيد سيليكون		
ps	بيكوثانية		
LBM	طريقة شبكية بولتزمان		
MOSFET	ترانزستور أكسيد المعدن شبه موصل ذو تأثير حقل		
Si	سيليكون		
SOI	عازل السيليكون		
TJBC	شرط قفزة درجة الحرارة		

المقدمة العامة:

مع تطورات الأجهزة الإلكترونية من عصر الصناعة وصولاً الى عصر التقنية تطورت بشكل ملحوظ فظهر منها كل شيء لجعل حياتنا أسهل وأبسط والأجهزة الإلكترونية هي آلات تم تطويرها لخدمة الإنسان لجعل بيئته وحياته أسهل في جميع المجالات ويعتبر الترانزستور أشباه الموصلات من المكونات الأساسية في كل جهاز إلكتروني بحيث تتحكم في تدفق التيار الكهربائي لأجل معالجة المعلومات والتحكم في النظام وفي السنوات الأخيرة مع تجميع مئات الملايين من أشباه الموصلات على مساحة لا تزيد عن بضعة سنتيمترات مربع للدارات المتكاملة والاتجاه الحالي نحو الإلكترونيات على نطاق النانو أدى إلى مستويات تكامل هائلة [1-3]. النوع الأكثر شيوعاً من ترانزستور تأثير الحقل المعزول للبوابة والذي يستخدم في العديد من أنواع الدوائر الإلكترونية المختلفة يسمى ترانزستور تأثير حقل أكسيد المعادن لأشباه الموصلات (MOSFET). هذا الجهاز له دور مهم في التحكم في التيار الكهربائي المار عبره [4-6].

في الدوائر المتكاملة الحالية حجم ميزة الأجهزة الإلكترونية قابل للمقارنة أو حتى أقل من متوسط المسار الحر للفونون الذي بنيت عليه الترانزستورات. تأثرت ترانزستورات بهذا التصغير وأصبحت منطقة قناة موسفت أصغر من المسار الحر للفونون. ولتحليل كفاءة الدوائر المتكاملة المكونة من ترانزستورات، فإن دراسة النقل الحراري داخل محطة موسفت النانوية مهمة جداً لإثبات الاستقرار الحراري للأجهزة وكفاءتها. في أجهزة أشباه الموصلات الصغيرة جداً، يمكن أن تكون الحرارة الناتجة عن تأثير جول عالية جداً حيث لا يمكن تقليل قوة تشغيل الجهاز تحت قيمة معينة. علاوة على ذلك، يصل وقت تبديل أجهزة موسفت إلى وقت استرخاء الفونون، وهو أقل من بيكو ثانية 100 في السيليكون [7-9]. من المعروف أن نقل الحرارة على نطاق نانوي دقيق يمكن أن يكون مختلفاً إلى حد كبير عن قانون فوربييه بسبب وقت الاسترخاء المحدود لحاملات الحرارة. يتم تطبيق معادلة النقل بولتزمان Boltzmann (BTE) وطريقة Monte

Carlo للتحقق في آلية النقل الحراري في الهياكل ، حيث تنتج طريقة meso-scale معلومات إحصائية (دالة توزيع الجسيمات) في وسط متصل فرعي بسبب حركة الجسيمات (الاهتزاز)[10-13]. إلى جانب تأثير جول (مصدر الحرارة)، يظهر مصدر حرارة آخر في جهاز موسفت (MOSFET) النانوي. ينبع هذا المصدر من تصادم جدار الفونون في واجهة MOS الترانزستور ويعبر عنه على أنه حالة حدود قفزة درجة الحرارة (TJBC)[14-16].

تم الاعتماد على المعادلات الماكروسوبية في دراسة النقل الحراري في الاجسام ذات الحجم نانومتر لكن هذه المعادلات تحتاج لمتغيرات او مركبات اضافية يجب اضافتها للمعادلة من تحسين قدرتها على دراسة الانتشار الحراري داخل الاجسام النانوية لكن تم اقتراح في هذه المذكرة لاستعمال طريقة شبكية بولتزمان المرتكزة على معادلة نقل بولتزمان لدراسة النقل الحراري داخل جهاز كريد سيليكون موسفت وسيليكون موسفت مع تاثير معامل الانعكاسية .

هذه المذكرة مقسمة الى ثلاثة فصول اساسية :

يعتبر الفصل الأول مقدمة لتكنولوجيا الترانزستور MOSFET حيث رأى الأشكال المختلفة للجهاز، وكيفية عمله، ومراحل تطوير حجم الجهاز، ومختلف الدراسات السابقة التي أجريت على. في الفصل الثاني، استند اختيار طريقة شبكية Boltzmann إلى عدة نقاط، وهي نمذجة رياضية وفيزيائية واضحة، وبرمجة سهلة، وموازية وكفاءة حسابية عالية. هذه الطريقة لديها القدرة على عدد صحيح من بنية وتنفيذ الشروط الحدودية في هذه الهندسة. عرض النتائج المحاكاة مع نموذج LBM المعتمد في الفصل الثالث.

الفصل الأول:

عموميات حول الأجهزة الإلكترونية

1.1 مقدمة:

يعتبر التطور التكنولوجي نتيجة الثورة الصناعية والتكنولوجية الهائلة التي غزت العالم في الآونة الأخيرة، حيث ظهرت مجموعة كبيرة مما يُعرف بالأجهزة الإلكترونية التي طوّرت عليها الإنسان وما زال يطور حتى تلبي احتياجاته الكثيرة والمختلفة بكل سهولة ويسر وبأقل وقت وجهد، وقد ساهمت هذه الأجهزة في تطوير العديد من المجالات، يُعرف علم الإلكترونيات على أنه علم يختص بالأجهزة الإلكترونية وكيفية عملها، والمبدأ الأساسي الذي يعتمد عليه هو سريان التيار الكهربائي في تلك الأجهزة، كما أنه يهتم بتصميم الأجهزة الإلكترونية والقطع الأساسية التي تتكوّن منها [17].

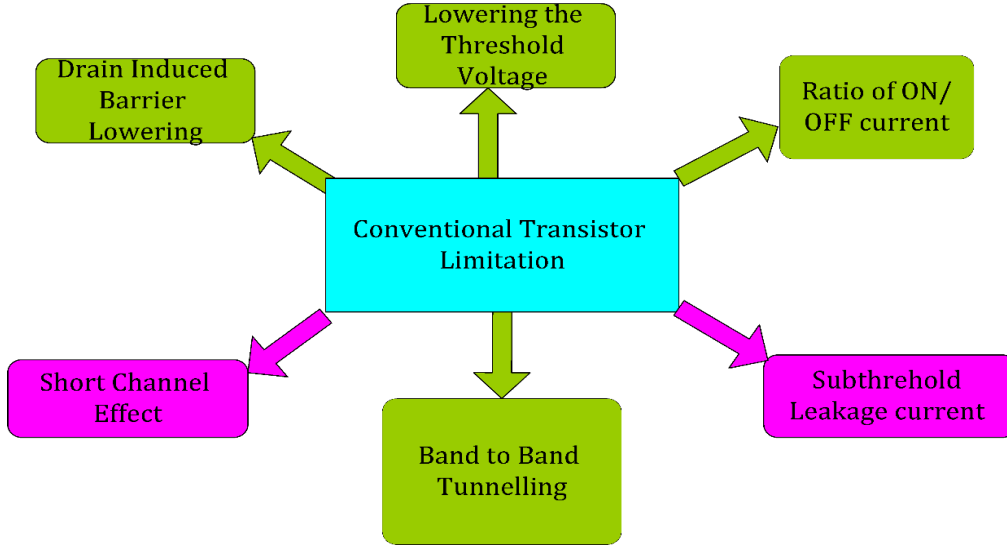
وتتكون الأجهزة الإلكترونية من مكونات للتحكم في تدفق التيار الكهربائي لاجل معالجة المعلومات والتحكم في النظام. وتشمل الأمثلة المعروفة الترانزستور (Transistor) والثنائي أو الدايمود (Diode) وتسمى هذه المجموعة (المكونات الإلكترونية). والتي عادة ما تكون الأجهزة الإلكترونية صغيرة ويمكن تجميعها معاً في حزم تسمى الدارة المتكاملة (Integrated circuit - IC) ويعتبر هذا التصغير أمراً أساسياً وحتماً في طفرة الإلكترونيات الحديثة [18].

والدارة المتكاملة المعروفة أيضاً باسم IC أو الرقاقة (Chip) أو الرقاقة الدقيقة (Microchip) عبارة عن مجموعة من الدوائر الإلكترونية على قطعة مسطحة صغيرة من مادة شبه موصلة، عادةً السيليكون. في الدارة المتكاملة، يتم دمج عدد كبير من الترانزستورات المصغرة والمكونات الإلكترونية الأخرى معاً على الشريحة. وينتج عن ذلك دوائر أصغر حجماً وأسرع وأقل تكلفة من تلك المبنية من مكونات منفصلة، مما يسمح بعدد كبير من الترانزستورات [19].

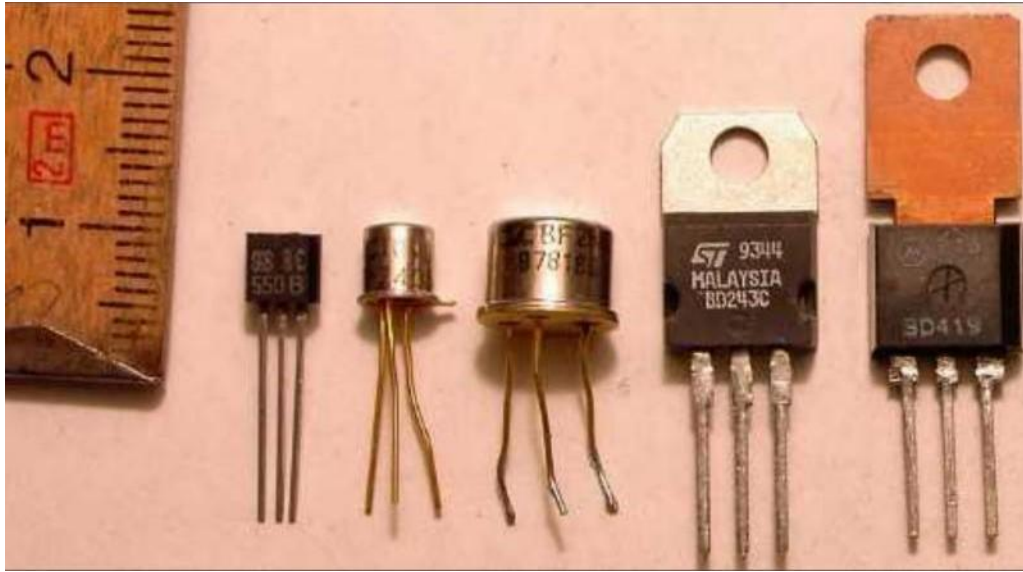
وتعتبر وظيفة الترانزستورات والثنائي (الدايمود) والدوائر المتكاملة هي التحكم في تدفق التيار الكهربائي وتضخيمه وتحويله من شكل إلى آخر [20].

تعتبر أجهزة التطبيق منخفضة الطاقة والترانزستورات غير المكلفة ضرورية للعالم التكنولوجي اليوم. حيث تم إنشاء جهاز إلكتروني نانوي 3 نانومتر من قبل الباحثين. على الرغم من أن حجم MOSFET يتقلص ويستخدم طاقة أقل [21].

تستخدم الترانزستورات، وهي اللبنة الأساسية للأنظمة الإلكترونية، على نطاق واسع. مع تقدم تكنولوجيا الترانزستور، تقلص حجم الترانزستور من مقياس الميكروميتر إلى مقياس النانو (نانومتر)، مما أتاح استخدام المزيد من الترانزستورات في الأنظمة الإلكترونية. توجد مليارات الترانزستورات في الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة وأجهزة الكمبيوتر العملاقة وغيرها من الأجهزة الإلكترونية الحالية التي غيرت الطريقة التي يعمل بها القياس على تقليل الحجم الإجمالي للجهاز دون المساس بالأداء. هناك حد للنمو أبعد من ذلك؛ يحتوي الجهاز على نتائج غير متوقعة. تريد الصناعة وأي تطبيق آخر حجمًا أصغر وأجهزة محمولة. قدم جوردون مور ملاحظة حكيمة مفادها أن تعقيد الدائرة المتكاملة (IC)، كما تم قياسه بعدد الترانزستورات التي تحتوي عليها، يتضاعف كل 18 شهرًا تقريبًا. في العصر الحديث، يتم استخدام أكثر من 40 مليون ترانزستور تأثير المجال لأشباه الموصلات من أكسيد المعدن (MOSFETs) في وقت واحد في صناعة أشباه الموصلات لإنتاج المنطق. للحصول على تصميم أفضل، ركز بشكل أساسي على كثافة الترانزستور وترابطه حيث يوضح الشكل 1.1 حدود الترانزستور التقليدي [22].



الشكل 1.1: حدود الترانزستور التقليدي [22].



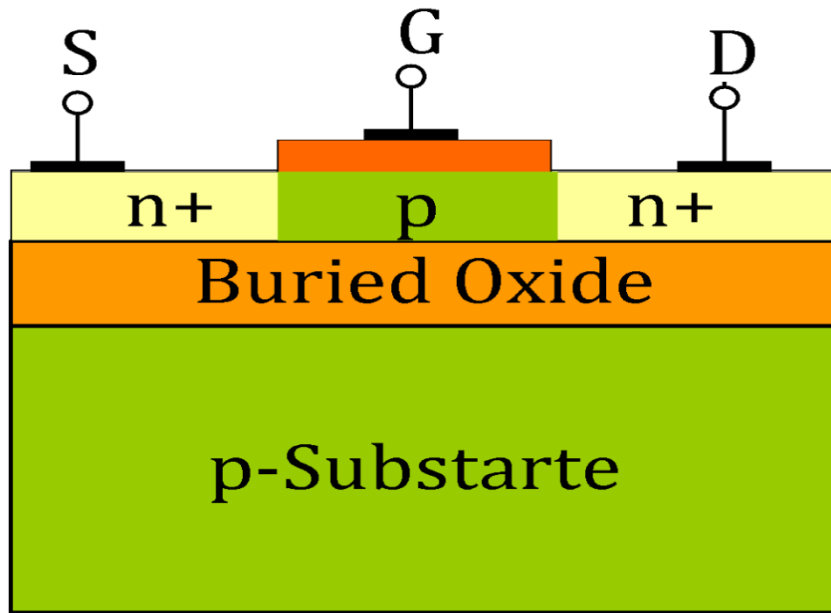
الشكل 2.1: أشكال صناعية مختلفة من الترانزستور على مقياس واحد.

2.1 بنية الأجهزة الإلكترونية:

أ- هيكل الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة القائمة على SOI:

في عام 1964، كشف روبنسون ومولر عن ترانزستور SOI. توفر تقنية SOI سعة منخفضة نظرًا لسرعتها العالية. يتم تقليل استهلاك الطاقة مع الحفاظ على السرعة المقبولة عن طريق خفض مصدر الطاقة. تتضمن تقنية SOI أيضًا القدرة على تحمل الجهد العالي ومجموعة واسعة من درجات الحرارة. في هذا التصميم، يتم وضع طبقة واسعة من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، المعروف أيضًا باسم الأكسيد المدفون، فوق طبقة رقيقة من السيليكون النشط يبلغ سمكها بضع عشرات من النانومترات فقط [23، 24].

على عكس الركييزة في SOI CMOS، فإن الركييزة في CMOS السائبة لا تفعل ذلك. ونتيجة لذلك، هناك نوعان من SOI MOSFET: SOI MOSFET المنضوب بالكامل و SOI MOSFET المنضوب جزئيًا، اعتمادًا على وضع العمل (PDSOI) [25، 26] حيث يمثل الشكل 3.1 البنية الأساسية لوحدة MOSFET القائمة على SOI.

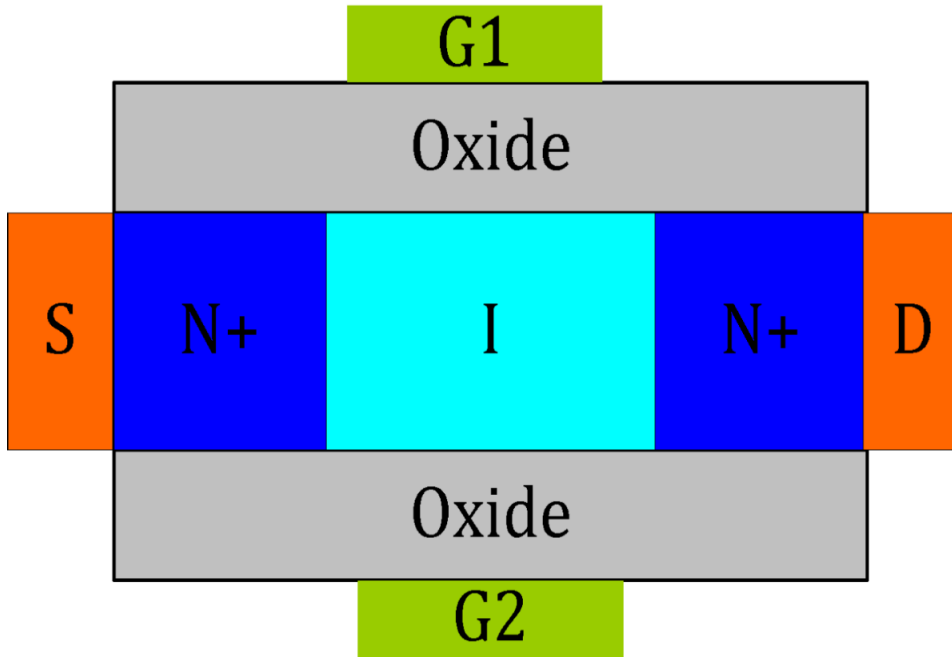


الشكل 3.1: الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة المستندة إلى SOI.

ب - تقنية البوابة المزدوجة MOSFET (DG):

للتغلب على المشكلة الموجودة في تقنية MOSFET التقليدية، يظهر DG MOSFET في الصورة. من خلال تأثير اقتران البوابة، فإنه يوفر نسبة تيار تشغيل/إيقاف أعلى وجهد عتبة أقل (V_T). يعرض الشكل 4.1 التصميم الأساسي لـ DG MOSFETS [27، 28].

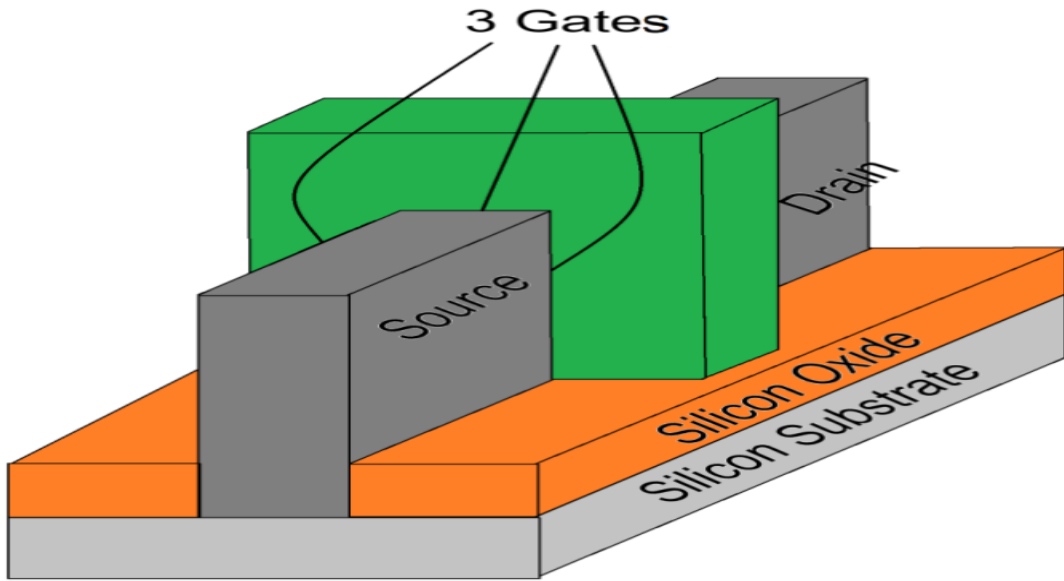
تدخل DG MOSFET في الصورة حيث تزداد صعوبة تقليص حجم تكنولوجيا MOSFET التقليدية. أصبح الجهد المنخفض (V_T) ونسبة تيار التشغيل/الإيقاف الأكبر ممكنة بفضل تأثير اقتران البوابة.



الشكل 4.1: البوابة المزدوجة MOSFET (DG) [29].

ت - موسفت MOSFET متعدد البوابات:

يشير موسفت MOSFET متعدد البوابات أو ترانزستور تأثير المجال متعدد البوابات (MuGFET) إلى ترانزستور تأثير المجال لأشباه الموصلات من أكسيد المعدن الذي يحتوي على أكثر من بوابتين مثل ثلاث بوابات (الشكل 5.1) حيث تسمح زيادة البوابات بالتحكم في تدفق الشحنة في القناة [29].

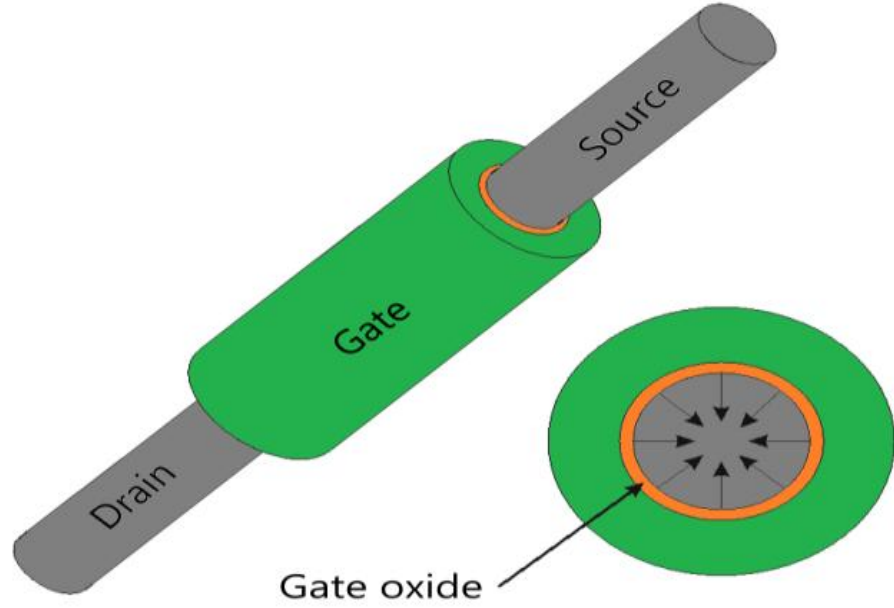


الشكل 5.1: ترانزستور ثلاثي الأبعاد ثلاثي البوابات [30].

ث - البوابة المحيطة موسفت MOSFET:

المشكلة الرئيسية في الأجهزة التي تمت مناقشتها أعلاه هي التحكم في تدفق الشحنة في القناة. لذلك، للتحكم بشكل أفضل في القناة، يمكن استخدام البوابة المحيطة MOSFET. في أجهزة البوابة المحيطة، يتم تغطية القناة بالبوابة من جميع الجوانب. إنه مشابه إلى حد ما لـ FinFet. إلى جانب توفير تحكم أفضل في تدفق الشحنة في

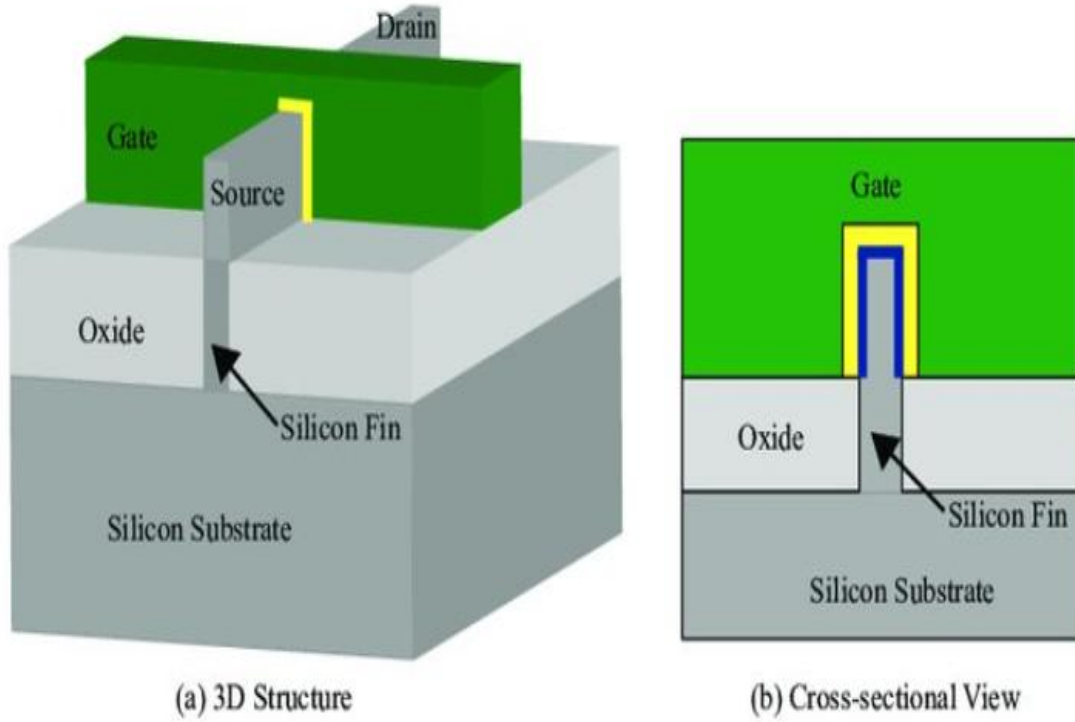
القناة، فإنه يوفر أيضًا دقة أفضل [29]. يمكن إظهار الهيكل الأساسي للبوابة المحيطة كما في الشكل 6.1.



الشكل 6.1: البوابة النهائية المحيطة MOSFET [31].

ج - ترانزستور التأثير الميداني (FinFET):

على ركيزة SOI، يتم تنفيذ ترانزستور FinFET مع بوابات على الجانبين، الثلاثة، والأربعة جوانب القناة. يتم تمثيل المصدر والصرف في هذه الطريقة بواسطة زعانف على سطح السيليكون كما هو موضح في الشكل 7.1 [32].



الشكل 7.1: ترانزستور تأثير المجال الزعنفي (FinFET).

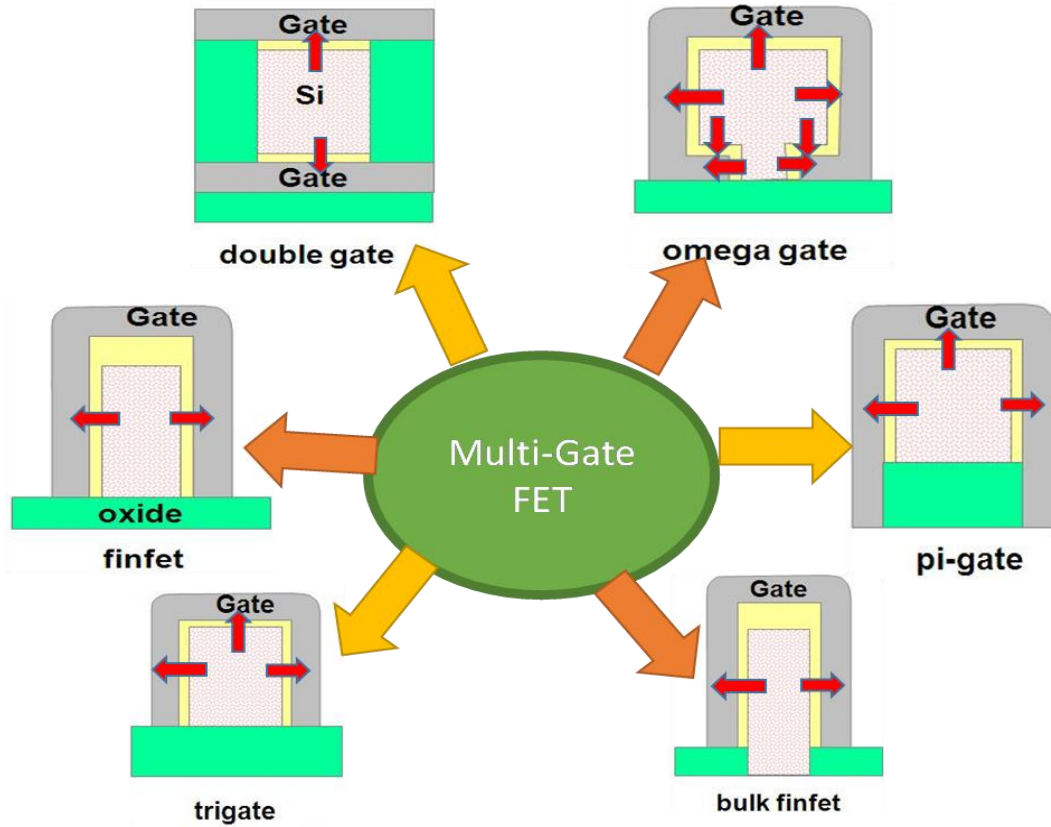
ح - هياكل مختلفة متعددة البوابات:

في جهد متواصل لتحسين فحص إمكانية التصريف من القناة يمكن استبدال الدوائر MOSFET المستوية بوحدات FET متعددة البوابات بسبب وجود بوابات إضافية [33]. يشير FET متعدد البوابات إلى عدد n (حيث يمكن أن يكون n 1، 2، 3، 4 وما إلى ذلك) من محطات البوابات المستقلة المنحازة بإمكانات مختلفة تشكلت في أجهزة ثلاثية الأبعاد كما هو موضح في الشكل 8.1.

تُعرف البوابتان FETs باسم FETs ذات البوابة المزدوجة (DGFETs)، وتشير FET ذات البوابات الثلاثة إلى FETs ثلاثية البوابات. تتم تسمية FET ذات البوابات الأربع باسم FETs ذات البوابة الرباعية مثل بوابة ملفوفة FET، و-Gate All-Around FET، وSurrounding-Gate FET. يتم تفضيل جميع هذه

البوابات الإضافية في الأجهزة متعددة البوابات لأنها تحتوي على ساعات طفيلية أقل وأكثر مقاومة لسلوك المنشطات غير المنتظم.

تتمتع Trigate FETs بسعة هامشية أقل، لكن المقايضة تمثل عملية تصنيع صعبة. في هذا العصر التكنولوجي، تسمى التقنيات الناشئة التي تستهلك طاقة أقل، وتشغل مساحة أقل، وتعمل بسرعة أكبر بـ FinFETs [34]-[35]. سيتم التركيز على FinFET وتطبيقاته المرتبطة بالاتجاه الحديث في السوق.

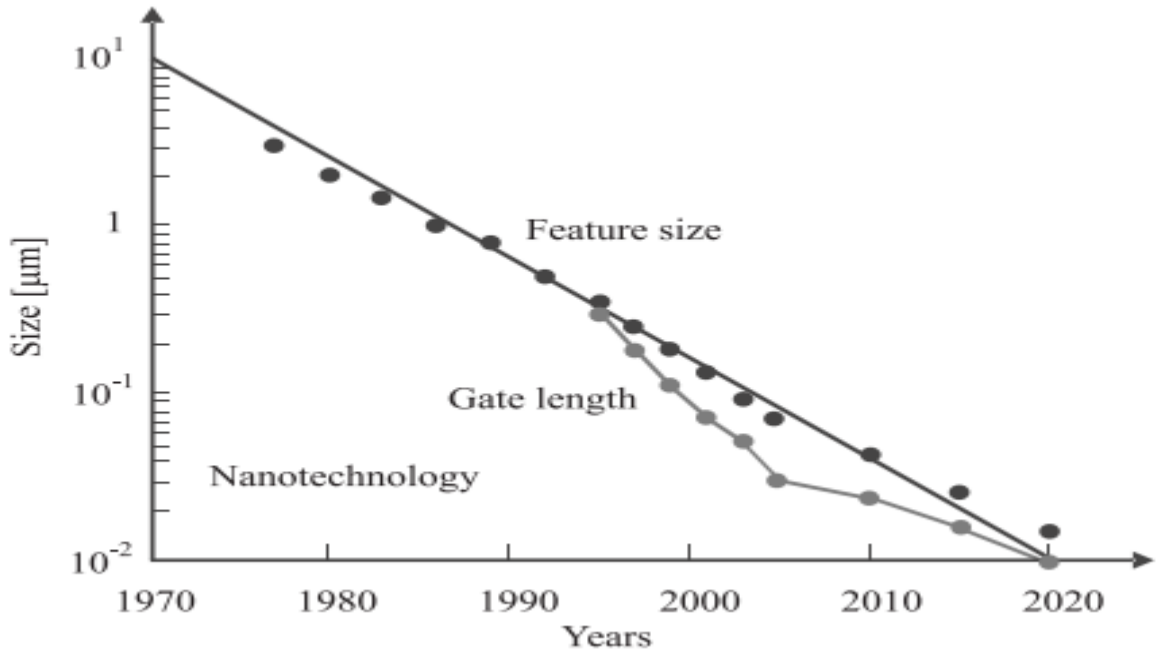


الشكل 8.1: هياكل مختلفة متعددة البوابات.

3.1 تقليل حجم الخاصية

لقد وصل تصغير الإلكترونيات إلى النطاق النانوي وبممكنك تخيل ذلك، حيث تم تجميع مئات الملايين من أشباه الموصلات على مساحة لا تزيد عن بضعة سنتيمترات مربعة، ويقترَب أصغر جهاز جانبي من 10 نانومتر [2].

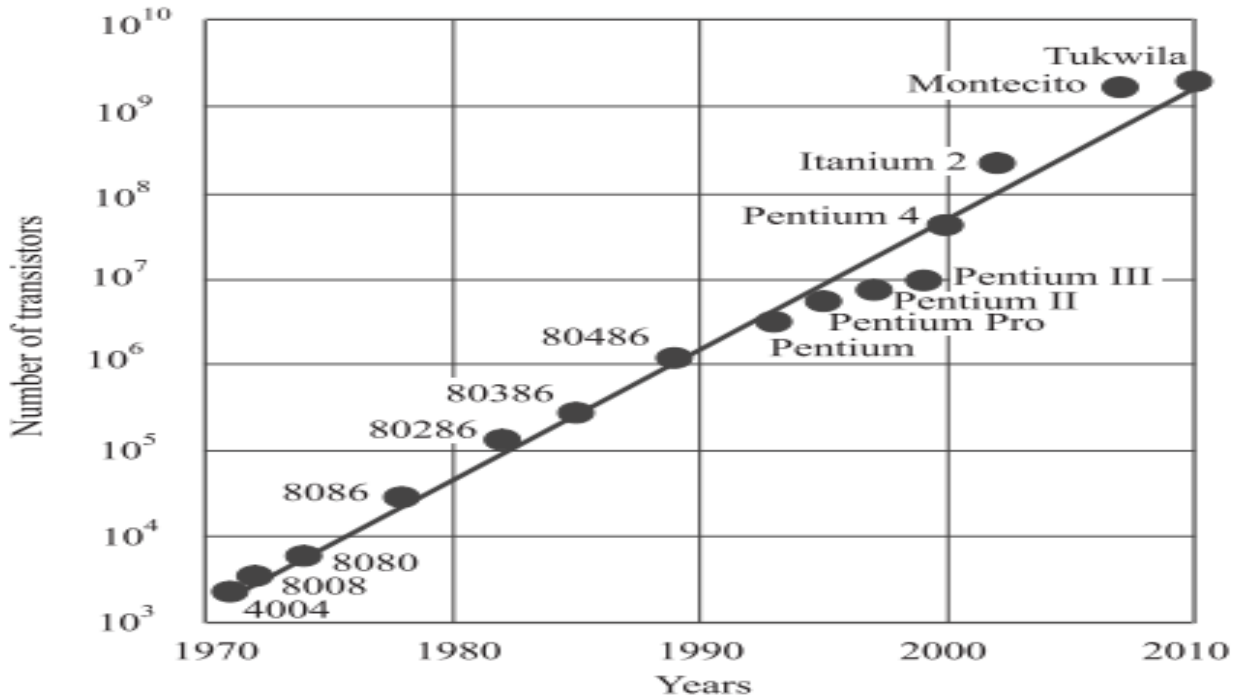
على الرغم من أن أكثر من 90% من الدوائر المتكاملة يتم تصنيعها في الوقت الحاضر بتكنولوجيا MOSFET التكميلية (CMOS). تم تحسين MOSFET مرات لا تحصى وتم تصغيرها بشكل يفوق الخيال. كان الانخفاض في حجم الميزة، كما هو موضح في الشكل 9.1، أسياً إلى حد ما [22].



الشكل 9.1 : تطور حجم الجهاز مع الزمن [4]

4.1 قانون مور

منذ بداية إلكترونيات أشباه الموصلات، تضاعف عدد الترانزستورات في دائرة متكاملة مع مرور الوقت (كل 18 شهراً). لاحظ جوردون مور هذا الاتجاه لأول مرة ويسمى قانون مور. في الشكل، يتم رسم عدد الترانزستورات في معالجات إنتل المتعاقبة كدالة للزمن.

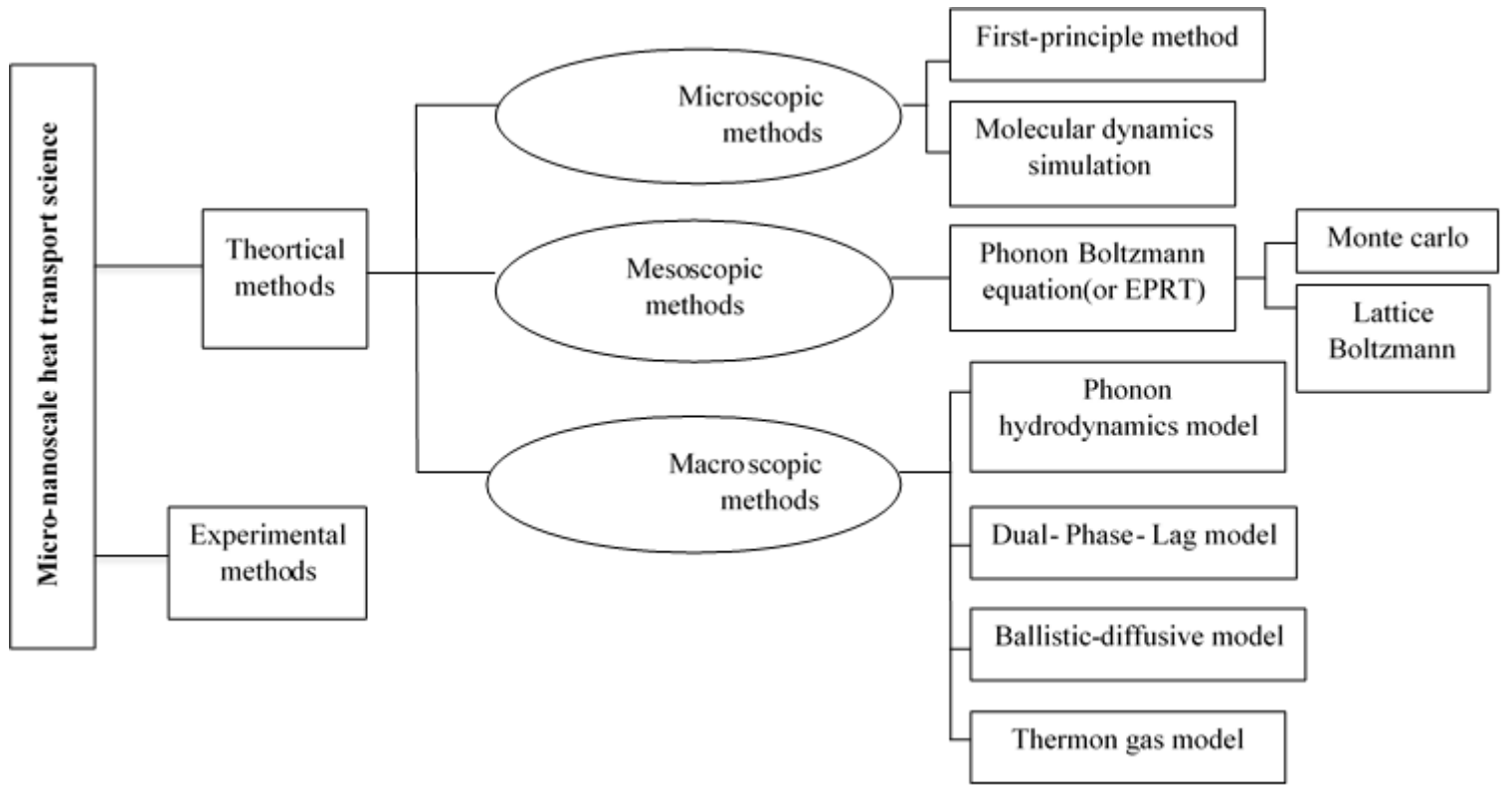


الشكل 10.1 : عدد الترانزستورات في معالجات إنتل المتعاقبة كدالة للزمن [4]

5.1 نقل الحرارة في بنية دقيقة/نانوية

ولمعالجة النقل الحراري على المقياس الدقيق والنانوي، هناك نوعان منطقيان من الطرق للتعامل مع نقل الحرارة على مقياس دقيق ونانوي: نظري وتجريبي. تنقسم الأساليب النظرية إلى: العياني، والمنظار الوسيط، والمجهري [12].

كل هذه الأساليب موجزة في الشكل. وتوفر الطريقة المجهرية معلومات ذات مقياس ذري، بينما تنتج الطريقة الميزوسكوبية معلومات إحصائية (وظيفة توزيع الجسيمات)، ولا تستخدم الطريقة الماكروسكوبية سوى عدة متغيرات في الحالة للوسائط المتصلة [13، 36، 37].



الشكل 11.1 : الطرق الحالية في علم النقل الحراري الدقيق والنانوي [38]

6.1 مواد شبه موصلة:

أ - مادة السيليكون:

المواد الأكثر استخدامًا في الصناعات الإلكترونية هي المواد شبه الموصلة. وفي السنوات القليلة الماضية، كان السيليكون (Si) هو أشباه الموصلات الأكثر

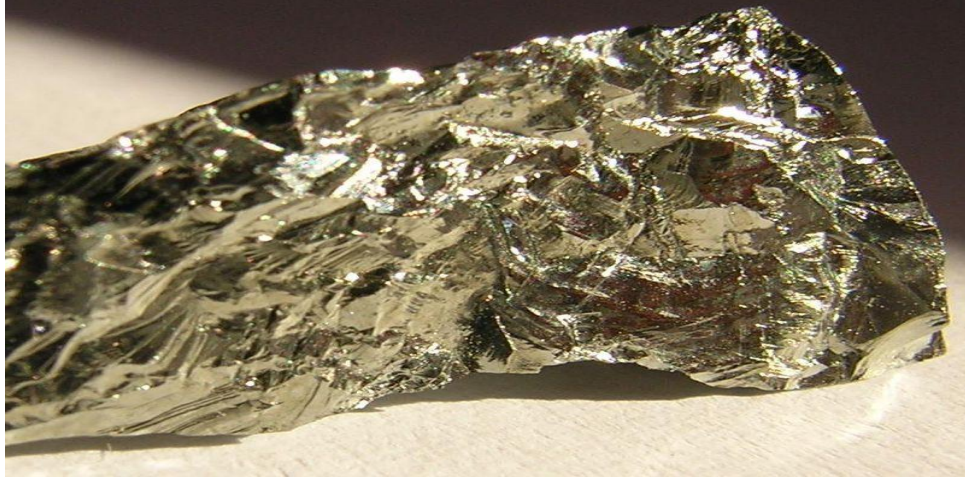
استخداماً للأجهزة الإلكترونية الدقيقة. ومع ذلك، فإن الأجهزة المعتمدة على Si وصلت إلى حدودها المادية بسبب التصغير [39، 40]



الشكل 12.1 : مادة السيليكون [39، 40]

ب - الجرمانيوم Ge:

الجرمانيوم عنصرٌ كيميائي رمزه Ge وعدده الذري 32 ، يوجد الجرمانيوم في الظروف القياسية من الضغط ودرجة الحرارة على هيئة عنصرٍ صلبٍ هشٍّ ذي لونٍ لامعٍ بين الأبيض والرمادي، وهو يشبه السيليكون في منظره وخواصه. ولا يوجد عنصر الجرمانيوم بشكله الحرّ في الطبيعة، ولكنه غالباً ما يوجد مرتبطاً مع الأكسجين في مركّبات مختلفة [41].



الشكل 13.1 : مادة الجرمانيوم [42]

يُستخدَم الجرمانيوم بشكلٍ واسعٍ في صناعة أشباه الموصلات، وخاصةً في صناعة الترانزستورات والمكونات الإلكترونية المختلفة. كما يُستخدَم حالياً في صناعة الألياف البصرية والخلايا الشمسية والثنائيات الباعثة للضوء. من جهةٍ أخرى، لا يوجد دورٌ حيويٌّ معروفٌ للجرمانيوم بالنسبة للإنسان [42].

في الحرب العالمية الثانية استُخدم الجرمانيوم على نطاقٍ صغيرٍ في الأجهزة الإلكترونية، إلا أن أهميته الاقتصادية ازدادت كثيراً بعد الحرب، عندما اكتشفت خواصه شبه الموصلة، إذ قبل سنة 1945 كانت الكميات المنتجة من الجرمانيوم لا تتجاوز بضعة مئات من الكيلوغرامات سنوياً، وحتى أوائل سبعينيات القرن العشرين كان هناك طلبٌ متزايدٌ على الجرمانيوم في صناعة أشباه الموصلات، إلى أن حلَّ السيليكون مرتفع النقاوة محلَّ الجرمانيوم في المكونات الإلكترونية مثل الترانزستورات وثنائيات المساري والمقومات [43].

تنوّعت استخدامات الجرمانيوم عالمياً في سنة 2007 بين عدّة مجالات: 35% في مجال الألياف البصرية، و30% في مجال تطبيقات الأشعة تحت الحمراء، و15% في مجال تحفيز تفاعلات البلمرة، و15% في مجال التطبيقات الإلكترونية والخلايا الشمسية، و5% في تطبيقات متفرقة. [43]

ث - كربيد السيليكون SiC:

كَرْبِيدُ السَّيْلِيكُونِ يعرف أيضاً باسم كربورندوم (هو مركب كيميائي من السيليكون والكربون، رمزه SiC ، ويوجد في الشروط القياسية في شكل صلب بلوري غامق اللون).

يصنف كربيد السيليكون ضمن المواد شبه الموصلة وكذلك من المواد السيراميكية القادرة على تحمل درجات حرارة مرتفعة [44].



الشكل 14.1 : مادة كربيد السيليكون [44]

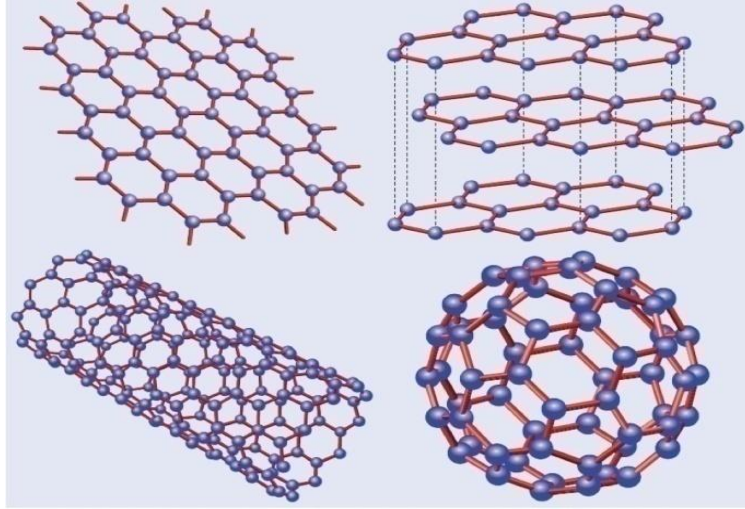
يمكن أن يحضر هذا المركب صناعياً وفق عملية أتشيسون بمفاعلة رمل السيليكا مع الكربون عند درجات حرارة مرتفعة تتراوح بين 1600° س و 2500° س. ويمكن أن يحوّل غبار السيليكا إلى كربيد السيليكون بالتسخين مع الغرافيت عند 1500° س [45].

يوجد هذا المركب في الشروط القياسية في الحالة التقنية على شكل صلب أسود غامق اللون؛ وتكون بنيته البلورية متنوعة، بحيث يمكن أن يوجد على أكثر من 250 شكل بلوري؛ كما يمكن أن يوجد على شكل زجاجي لابلوري .

لكربيد السيليكون العديد من التطبيقات الصناعية؛ فهو يدخل في تركيب مواد السحج والقطع؛ وفي صناعة البواتق الصناعية كما يستخدم المركب في صناعة أشباه الموصلات والثنائيات الباعثة للضوء(LEDs) [41]

ج - الجرافين:

أصبح الجرافين المادة العجيبة حديث المدينة بين الباحثين والعلماء والمحققين إلى جانب كونستانتين نوفوسيلوف، يعد اكتشاف أندريه جيم الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 2010 رائعاً حقاً [46]. لقد طورت التحقيقات النظرية والتجريبية بمواد لاستخدامها في الدوائر النشطة والسلبية [47]. تتمتع المادة بخصائص لا تشوبها شائبة تؤثر على مناطق الموجات الدقيقة وعالية التردد للعديد من الأجهزة مثل الترانزستورات والمرشحات والهوائي وما إلى ذلك. خصائصها الفيزيائية في هذه المناطق ممتازة وغير ملحوظة حتى الآن في المواد الموجودة. سيتم الآن مناقشة خصائص الجرافين فيما يلي قسم. تتمتع مادة الجرافين بمزايا محتملة في شكل خسائر منخفضة وتبديد للطاقة بسبب موصليتها الحرارية والكهربائية العالية وقابليتها للتنقل [48]. إنه يؤدي إلى أداء وكفاءة أفضل مقارنة بنظيراته من السيليكون في التطبيقات المختلفة. يواجه بعض تحديات التصميم والتصنيع بسبب كثافته السطحية العالية وسمكه الذري المفرد. كما يُظهر أيضاً القيود من حيث تباين فجوة النطاق وتكاليف التصنيع المرتفعة وميزات التشبع الحالية [49].



الشكل 15.1 : هيكل الجرافين [49].

7.1 مجالات استخدام الترانزستور:

الترانزستور هو عنصر أساسي في العديد من التطبيقات في الحياة اليومية،
إليك بعض التطبيقات الشائعة للترانزستور [40، 50]:

1- الهواتف الذكية: يتواجد الترانزستور في جميع هواتفنا الذكية. يتم استخدامه في وحدة المعالجة المركزية (CPU) لتنفيذ العمليات الحسابية وتشغيل التطبيقات وإدارة الذاكرة.

2- الحواسيب وأجهزة الكمبيوتر: يحتوي الكمبيوتر على ملايين الترانزستورات التي تؤدي وظائف مختلفة مثل معالجة البيانات، وتخزين المعلومات، والتواصل مع الأجهزة الخارجية.

3- الأجهزة الإلكترونية المنزلية: يدخل الترانزستور في صناعة الأجهزة المنزلية مثل التلفزيونات، وأجهزة الراديو، وشاشات العرض. يستخدم لتضخيم وتوجيه الإشارات الكهربائية وتحقيق التحكم في التردد والصوت.

4- السيارات والمركبات: يتم استخدام الترانزستورات في نظام الإشعال ونظام إدارة المحرك للسيارات الحديثة.

5- صناعة الطائرات: يدخل الترانزستور في تكنولوجيا الملاحة والاتصالات في الطائرات وفي أنظمة التحكم، وتقنيات الاستشعار.

6- أجهزة الصوت والفيديو: يدخل الترانزستور في صناعة مشغلات الفيديو ومكبرات الصوت وأجهزة التلفاز وشاشات العرض (LCD).

8.1 إيجابيات وسلبيات الترانستور [40، 50]:

أ - الإيجابيات:

هناك الكثير من أهم وأبرز فوائد الترانزستور والمزايا التي تجعله آلة مميزة وهامة للغاية، ومن أهم هذه الفوائد على النحو التالي:

ميزة المتانة:

يمكننا القول إن آلة الترانزستور تتحمل الدرجات العالية من الاهتزاز والصدمات، مما يسهل استعمالها في التطبيقات الصناعية والعسكرية والفضائية.

ميزة التبديل:

من الممكن صناعة مفاتيح إلكترونية من الترانزستور، كونها تمتاز بالقدرة على تشغيل وإغلاق التيارات للعديد من المرات في ثانية واحدة، لذا يتم استعمال الترانزستورات في أجهزة الحواسيب الرقمية كجهاز أساسي لنقل وتخزين البيانات.

ميزة الكفاءة:

من الممكن تصميم الترانزستورات لاستعمال الحد الأدنى من الطاقة، إذ من الممكن أن تعمل الملايين من الترانزستورات خلال ساعة أو آلة حاسبة تعمل للعديد من الأعوام على بطارية صغيرة الحجم.

ميزة التضخيم:

من الممكن أن تعمل الترانزستورات كمضخمات أو مكبرات، نظراً لأن النسبة الأكبر من مضخمات الصوت عبارة عن ترانزستورات.

ميزة تصميم أجهزة إلكترونية صغيرة الحجم:

من الممكن صناعة وتصميم ترانزستورات صغيرة الحجم، بما يسهل إنشاء مشغلات Mp3 وهواتف محمولة بحجم صغير يسع الجيب.

ب - السلبيات:

1-تتأثر خواص الترانزستور بتغيير الحرارة.

2-قدرة الاخراج محدودة.

3-مقاومة داخل الترانزستور محدودة.

4- وجود حدود في استخدام الترانزستور العادي عند الترددات العالية جداً.

9.1 الخاتمة:

يقدم هذا الفصل المفاهيم الرئيسية حول الترانستور وخصائصه وأنواعه، موضحاً هيكلها وأهميتها وبعض سلبياتها أو النقص لكي يعمل المستخدم على تجنبها أو تطويرها بالرغم من التطور الهائل في تقليص حجمها في فترة قصيرة حتى أصبحت غير مرئية للعين البشرية، وأصبحت المعادلات التقليدية لدراسة السلوك الحراري والكهربائي لهذه الأجهزة غير كافية. ولذلك، ينبغي استخدام المزيد من نماذج المعادلات لدراسة هذه الأنظمة النانوية.

الفصل الثاني: طريقة شبكية بولتزمان

1.2 مقدمة:

تقليدياً يتم حل مشكلة انتقال الحرارة باستخدام المعادلات التفاضلية الجزئية (EDP) التي تحكمها، مثل معادلة قانون فورييه. تعتمد معظم طرق الحل التقليدية (طريقة العناصر المحدودة: FEM، طريقة الفروق المحدودة: FDM، طريقة الحجم المحدود: FVM) في عقود الفروقات على دقة الصور التفاضلية أو التكاملية للمعادلات التفاضلية الجزئية. وتستند هذه الأساليب على تقنيات التمييز. يتم اشتقاق EDPs وتقسيمها بواسطة عناصر محدودة أو اختلافات محدودة أو أحجام محدودة عادةً في شبكات منتظمة. وبالتالي فإن الحلول التقريبية الناتجة تعتمد على مقاييس التقدير المكاني والزمني [11].

وقد تم تطوير الطرق العددية، وبدائل الطرق الكلاسيكية. كل هذه الأمور تميل إلى التحايل على الصعوبات المرتبطة بالشبكات في بناء بعض أو كل التقريبات من خلال أساليب أخرى غير التمييز المكاني حسب العناصر. ومن بين هذه الطرق الطرق التي تسمى الطرق غير الشبكية. وقد أثبتت هذه التقنيات فعاليتها في علاج المشاكل الدقيقة التي يتعين معالجتها بالطرق التقليدية. علاوة على ذلك، من المثير للاهتمام ملاحظة أن المفاهيم المنهجية و/أو الرياضية المستخدمة في هذه الأساليب المفتوحة للغاية تقدم وجهات نظر جديدة للمحاكاة العددية للظواهر المعقدة. ومن بين الطرق العددية البديلة نجد طريقة بولتزمان على الشبكة والتي لها أهمية كبيرة لتحسين دراسة الأشكال الهندسية المعقدة، هذه الطريقة تختلف تماماً عن الطرق التقليدية حيث تم التخلي عن مفهوم الاستمرارية. الفكرة الرئيسية لبولتزمان هي سد الفجوة بين النهج الجزئي والكلية من خلال عدم النظر في سلوك كل جسيم على حدة ولكن سلوك مجموعة من الجسيمات كوحدة واحدة، وهذا النهج يسمى طريقة الميزوسكوبيك [11، 51، 52].

2.2 نظرية بولتزمان :

معادلة بولتزمان للنقل (BTE) مستمدة من النظرية الحركية Ludwing Eduard بولتزمان، هذا الفيزيائي النمساوي الذي كان أعظم إنجازاته في تطوير الميكانيكا الإحصائية. تأخذ هذه المعادلة في الاعتبار حركة الجزيئات وتصف سلوكها إحصائياً بعد دالة مستمرة في الزمان والسرعة والمكان تعتمد هذه الطريقة على معادلة بولتزمان المستمدة من النظرية الحركية للودفيغ إدوارد بولتزمان ، والتي تشرح وتنبأ بكيفية الحصول على العيانية خصائص المادة مثل الكثافة واللزوجة والتوصيل الحراري

والانتشار معامل من الخصائص المجهرية. خاصية جمع الجزيئات هي ممثلة بوظيفة التوزيع $g(x,e,t)$ [53].



الشكل 1.2: لودفيج إدوارد بولتزمان [11]

(1906-1844).

3.2 عملية تشتت آلية فونون:

الفونون هو الوصف الميكانيكي الكمي للحركة الاهتزازية الأولية التي تتأرجح فيها شبكة من الذرات أو الجزيئات. تلعب الفونونات دوراً رئيسياً في العديد من الخواص الفيزيائية للمواد، مثل التوصيل الحراري. تميل عمليات تشتت الفونونات إلى تغيير بعض خصائص الفونونات اعتماداً على نوع عملية التشتت التي تخضع لها. بعض عمليات التشتت الشائعة التي يخضع لها الفونون هي [54]:

- **تشتت الشوائب:** وهي ترجع بشكل رئيسي إلى الشوائب الموجودة في البلورة، والعيوب البلورية، والعيوب في البنية البلورية وما إلى ذلك.
- **تشتت فونون-فونون:** تحدث أحداث التشتت هذه عندما يصطدم فونونان أثناء الانجراف من نقطة إلى أخرى في المجال.
- **تشتت الفونون والإلكترون:** عندما يصطدم الفونون مع الإلكترون، يحدث تشتت الفونون الإلكتروني.
- **تشتت الواجهة:** ترجع أحداث التشتت هذه إلى مادة غريبة مدمجة في مادة مضيفة كواجهة.
- **التشتت الحدودي:** التشتت الحدودي يحدث عندما يواجه الفونون حدود المجال. تعتبر هذه الانتشارات مهمة بشكل خاص في المرحلة الباليستية لنقل الفونونات حيث أن حجم المجال صغير جداً وتواجه الفونونات الحدود عدة مرات خلال حياتها.

4.2 معادلة النقل فونون بولتزمان:

الفونونات، وهي عبارة عن كميات من الاهتزازات الشبكية، هي حاملات الطاقة الحرارية الأساسية في المواد شبه الموصلة. يتم تحديد الخواص الحرارية للمواد شبه الموصلة من خلال انتشار الفونونات واصطدامها وتفاعل الفونونات مع الموجات الحاملة الأخرى. في هذا العمل، يتم استخدام BTE، الذي يمثل تشتت الفونونات، لفحص انتقال الحرارة في الترانزستورات النانوية. لإدراج تأثير النقل الحراري في الأجهزة النانوية، يتم إعطاء معادلة بولتزمان للنقل العابر للفونونات بواسطة [55-57]:

$$(1.2) \quad \frac{\partial g}{\partial t} + v \cdot \nabla g = \frac{g^{eq} - g}{\tau}$$

هنا، تمثل g و g^{eq} و v و τ على التوالي وظيفة توزيع الفونون ووظيفة توزيع التوازن وسرعة مجموعة الفونون ووقت الاسترخاء الفردي المرتبط بالتصادمات المقومة للفونونات المقدمة بواسطة [58، 59]:

$$(2.2) \quad \tau = \frac{3 \times k}{C \times v^2} = \frac{\Lambda}{v}$$

حيث تمثل k و Λ و C على التوالي التوصيل الحراري ومتوسط المسار الحر والسعة الحرارية الحجمية. يتم إعطاء وظيفة توزيع التوازن الموصوفة في نموذج بوز-آينشتاين للفونونات على النحو التالي [60، 61]:

$$(3.2) \quad g^{eq} = \frac{1}{e^{(\hbar\omega/k_B T)} - 1}$$

في المعادلة أعلاه، \hbar و k_B هما على التوالي ثابت بلانك وبولتزمان، في حين يمثل ω و T تردد الفونون ودرجة الحرارة المطلقة. يتم حساب التدفق الحراري بالمعادلة [62]:

$$(4.2) \quad q = \sum_p \int v g \hbar \omega_p D_p(\omega) d\omega$$

حيث تشير p و D_p على التوالي إلى استقطاب الفونونات ووظيفة كثافة حالة الفونون. للتبسيط ، يمكن كتابتها في كثافة طاقة الفونون BTE على النحو التالي [63]، [64]:

$$(5.2) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + v \cdot \nabla u = -\frac{u - u^{eq}}{\tau} + q_v$$

تُعرف هذه الصيغة أيضاً باسم معادلة ميكانيكا الكم للفونونات، حيث q_v هو توليد الحرارة الحجمي.

يُقترح تعريف بديل لدرجة الحرارة، على افتراض أن إجمالي طاقة الفونون في نقطة شعرية معينة مطابق لطاقة الفونون عند درجة الحرارة المقابلة. وبذلك يتم ربط طاقة الفونون ودرجة الحرارة عبر نموذج ديبياي [62، 65، 66]:

$$(6.2) \quad u(T) = \left(\frac{9\eta k_B}{\theta_D^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{z^3}{e^z - 1} dz \right) T^4$$

هنا θ_D و η و z تمثل على التوالي درجة حرارة ديبياي، وكثافة عدد المذبذبات، والمتغير بلا أبعاد.

5.2 منهجية شبكية بولتزمان:

طريقة شبكية بولتزمان هي تقنية فعالة لحل معادلة النقل بولتزمان. لقد اجتذبت هذه الطريقة اهتماماً كبيراً في السنوات الأخيرة نظراً لتقديم مزايا كبيرة لحل الحدود والتعامل بنجاح مع مشكلة الاقتران متعدد النطاق والسماح بالبرمجة السهلة. يعتبر LBM أحادي الوضع لنقل الفونون حلاً لـ BTE لتقدير وظيفة التوزيع لوضع الفونون التمثيلي. نظراً لأنه يتم اعتبار وضع تمثيلي واحد فقط بخصائص فونون متوسطة في تقريب الوضع الفردي، فإن جميع الفونونات تعتبر لها نفس وقت الاسترخاء والسرعة [13]. نظراً لأن الهدف من هذه الدراسة هو معالجة السلوك الحراري للترانزستورات النانوية باستخدام LBM لنقل الحرارة النانوية، فقد تم اعتماد LBM أحادي الوضع لأغراض البساطة والتوضيح. يقوم LBM بفصل مجال المساحة عن طريق تحديد مواضع الشبكة. أثناء محاكاة LBM، في كل خطوة تتحول وظائف التوزيع نحو السرعة المنفصلة المعينة إلى موقع الشبكة التالي، وعلى أساس مجموعة

من مبادئ الاصطدام، يتم تحديد توزيعات جديدة للخطوة التالية في كل موقع شبكي [61، 67]. المصطلحات المشتقة في المعادلة. يمكن تقسيمها على النحو التالي:

$$(7.2) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u(x, t + \Delta t) - u(x, t)}{\Delta t}$$

$$(8.2) \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x + \Delta x, t + \Delta t) - u(x, t + \Delta t)}{\Delta x}$$

ترتبط المعادلات بوظائف توزيع طاقة الفونون المنفصلة. ثم تقدير مكافئ. (II.5) معطى بواسطة [64، 68]:

$$(9.2) \quad \frac{u_i(x, t + \Delta t) - u_i(x, t)}{\Delta t} + c_i \frac{u_i(x + \Delta x, t + \Delta t) - u_i(x, t + \Delta t)}{\Delta x} = -\frac{u_i(x, t) - u_i^{eq}(x, t)}{\tau} + w_i q_v$$

حيث x هو متجه الموضع، t هو الوقت، c_i هي السرعة المنفصلة، Δt هي الخطوة الزمنية و Δx هي الخطوة الفضائية بينما تشير w_i إلى عامل الترجيح لكل اتجاه. يمكن عمل الخطوة الزمنية وخطوة الفضاء الشبكي بواسطة $\Delta x = c_i \Delta t$. وهذا يؤدي إلى LBM مع توليد الحرارة الداخلية،) يمكن إعادة كتابتها على النحو التالي:

$$(10.2) \quad u_i(x + \Delta x, t + \Delta t) - u_i(x, t) = -\frac{\Delta t}{\tau} [u_i(x, t) - u_i^{eq}(x, t)] + \Delta t w_i q_v$$

يرتبط التعبير $u_i(x, t)$ بكثافة الطاقة المستقلة للفونون والتي تتناسب مع عدد الفونون المرتبط بموقع معين في الشبكة. يمكن حساب كثافة الطاقة الإجمالية للفونونات من خلال جمع كثافات الطاقة المنفصلة للفونونات عبر جميع اتجاهات الشبكات [63]:

$$(11.2) \quad u(x, t) = \sum_{i=1}^d u_i(x, t) = \sum_{i=1}^d u_i^{eq}(x, t)$$

يمكن حساب كثافة طاقة الفونون المتوازنة بواسطة المعادلة بافتراض أنها واحدة في جميع اتجاهات الشبكة:

$$(12.2) \quad u_i^{eq}(x,t) = \frac{u(x,t)}{d}$$

6.2 نماذج شبكية بولتزمان:

المصطلح الشائع المستخدم في LBM هو الإشارة إلى بُعد المشكلة وعدد السرعات باستخدام DnQm، حيث تمثل n بُعد المشكلة (1 لـ D-1، 2 لـ D-2، و 3 لـ D-3) ويشير m إلى نموذج السرعة وعدد الروابط [61].

أ- أحادية البعد:

يوضح الشكل II.1 الشبكة المستخدمة لوصف النموذجين D1Q2 و D1Q3



الشكل 2.2: ترتيبات الشبكة للمشكلات أحادية الأبعاد [69].

بالنسبة إلى D1Q3، يتم تحديد مجموعة السرعة المنفصلة بواسطة:

$$\{c_0 = (0,0)c, c_1 = (1,0)c, c_2 = (0,-1)c\}$$

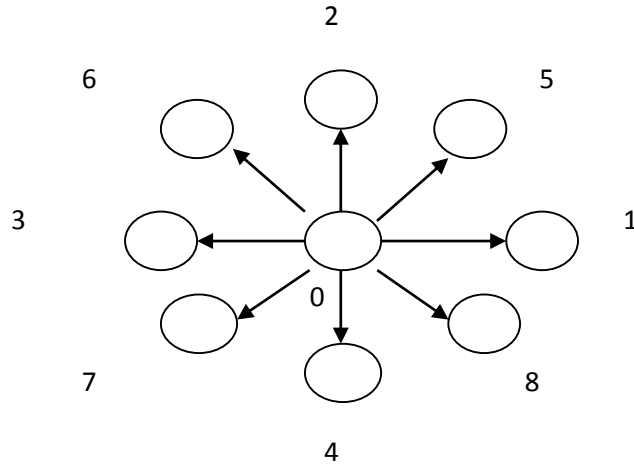
نحن نتحدث عن النموذج D1Q2 عندما لا نأخذ في الاعتبار الجسيم (0) الساكن. يتم تقديم السرعة المنفصلة على النحو التالي [69]:

$$\{c_1 = (1,0)c, c_2 = (0,-1)c\}$$

ب- ثنائي الأبعاد:

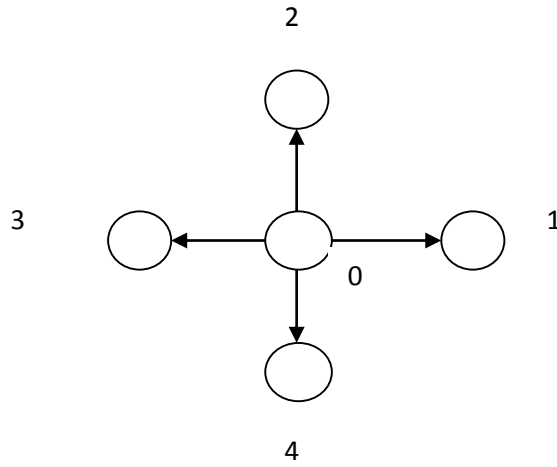
يوضح الشكل II.2 نموذج D2Q9 ومجموعة السرعة المنفصلة هي [69]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_0 = (0,0)c, c_1 = (1,0)c, c_2 = (0,1)c, c_3 = (-1,0)c, c_4 = (0,-1)c, \\ c_5 = (1,1)c, c_6 = (-1,1)c, c_7 = (-1,-1)c, c_8 = (1,-1)c \end{array} \right\}$$



الشكل 3.2: نموذج الشبكة D2Q9 [69]

يوضح الشكل نموذج D2Q5 ومجموعة السرعة المنفصلة هي:



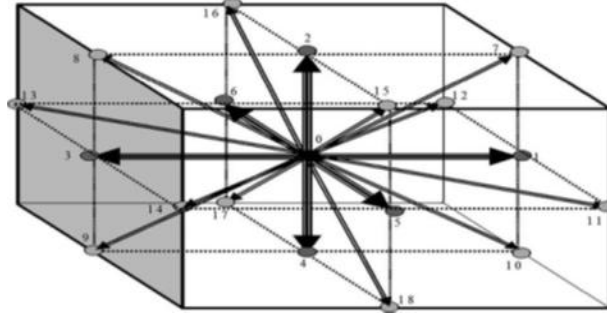
الشكل 4.2: نموذج الشبكة D2Q5 [69]

$$\{c_0 = (0,0)c, c_1 = (1,0)c, c_2 = (0,1)c, c_3 = (-1,0)c, c_4 = (0,-1)c\}$$

ت - ثلاثي الأبعاد:

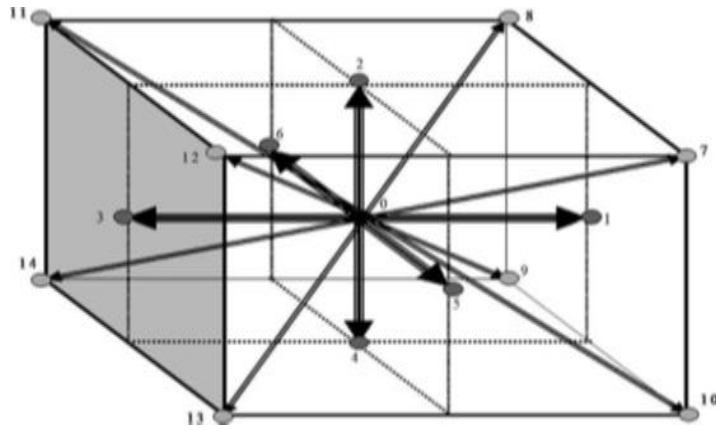
بشكل عام يتم استخدام نموذجين في محاكاة المسائل ثلاثية الأبعاد، D3Q15 و D3Q19

$$c_i \left\{ \begin{array}{ll} (0,0,0)c & i = 0 \\ (\pm 1,0,0)c, (0,\pm 1,0)c, (0,0,\pm 1)c & i = 1..6 \\ (\pm 1,\pm 1,0)c, (\pm 1,0,\pm 1)c, (0,\pm 1,\pm 1)c & i = 7..18 \end{array} \right\}$$



الشكل 5.2: ترتيبات الشبكة للمسائل ثلاثية الأبعاد، D3Q19 [69].

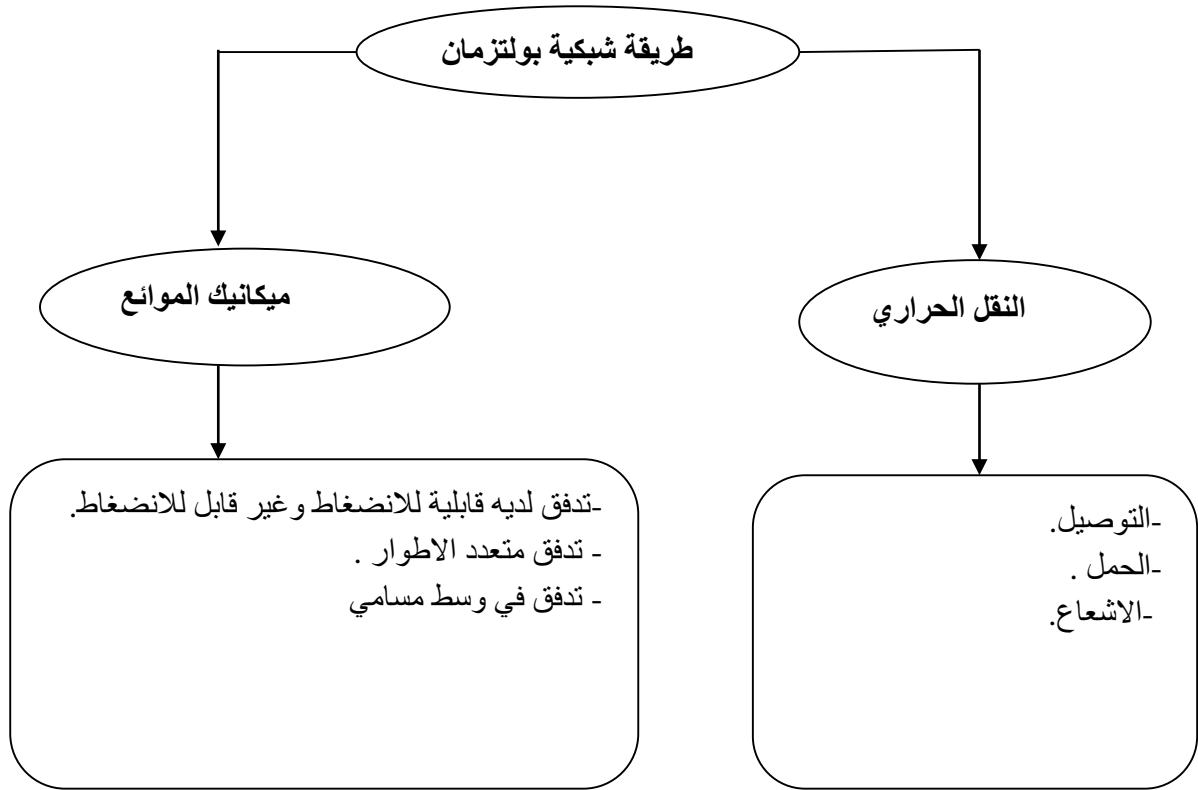
$$c_i \left\{ \begin{array}{ll} (0,0,0)c & i = 0 \\ (\pm 1,0,0)c, (0,\pm 1,0)c, (0,0,\pm 1)c & i = 1..6 \\ (\pm 1,\pm 1,\pm 1) & i = 7..14 \end{array} \right\}$$



الشكل 6.2: ترتيبات الشبكة للمسائل ثلاثية الأبعاد، D3Q15 [69].

7.2 تطبيق طريقة شبكية بولتزمان:

أظهرت طريقة LB قدرة كبيرة على محاكاة الأنظمة الهيدروديناميكية، ومتعددة الأطوار، والتدفقات متعددة المكونات، في الوسط المسامي وانتقال الحرارة [38، 70، 71]. يوضح الشكل بعض مجالات تطبيق طريقة LB.



الشكل 7.2: مجالات تطبيق LBM المختلفة [11].

8.2 الخاتمة:

تعد المحاكاة العددية بالطرق البديلة موضوعاً للعديد من الأبحاث في العالم. عند تنفيذ هذه الأساليب، لم يعد يتم تمثيل مجالات نقل الحرارة والبنية من خلال شبكة، ولكن من خلال مجموعة من نقاط التحكم التي تمثل الأحجام الأولية للمادة التي يتم تتبعها في حركتها. لسنوات عديدة، تم تطبيق طريقة بولتزمان الشبكية (LBM) بنجاح لمحاكاة تدفقات السوائل وظواهر النقل، على عكس الطرق التقليدية.

الفصل الثالث:

دراسة النقل الحراري داخل جهاز موسفت
(MOSFET)

1.3 مقدمة:

لقد عزز ظهور التكنولوجيا النانوية التطور السريع للترانزستورات النانوية القائمة على مادة أشباه الموصلات [4]. في العقود القليلة الماضية، كان هناك اهتمام متزايد بتأثيرات نقل حرارة الفونون على أداء الترانزستور النانوي [72]. أكثر أشباه الموصلات استخدامًا للأجهزة الإلكترونية الدقيقة هو السيليكون (Si). ولكن بسبب التصغير إلى مقياس نانوي، تقترب الأجهزة القائمة على السيليكون من حدودها المادية. وقد حظيت أنظمة الأجهزة القائمة على مادة الجرافين مثلاً باهتمام كبير بسبب خصائصها الكهربائية البارزة مثل الثقب العالي وحركة الإلكترون في الحرارة المنخفضة والتركيز العالي للمنشطات، وموصليتها الحرارية العالية. يتم تضمين مادة كربيد سيليكون القائمة على الكربون في العديد من التطبيقات مثل الإلكترونيات النانوية المرنة، وأجهزة ترانزستور، والثنائيات الباعثة للضوء، والخلايا الشمسية [73-75]. قانون فورييه مهم لعملية النقل الحراري، مما يشير إلى أن النقل الحراري يمر في نظام الانتشار. ومع ذلك، فمن المعروف أن معادلة التوصيل الحراري الكلاسيكية لا يمكن تطبيقها على نقل الحرارة في الهيكل النانوي عندما يكون عدد كنودسن مرتفعاً (النظام الباليستي) لأن طول الهيكل يصل إلى الفونون يعني المسار الحر للمواد. ونتيجة لذلك، تختلف الخصائص الحرارية اختلافاً ملحوظاً عن الخصائص الحرارية للكتل الكبيرة. تم تطوير بعض النظريات بدلاً من قانون فورييه لوصف السلوك الحراري في الهياكل النانوية، بما في ذلك ديناميكيات الفونون ونظرية الكتلة الحرارية والديناميكا المائية الفونون [10]، [76، 77]. وفيما يتعلق بأهمية انتقال الحرارة في هذه المواد النانوية القائمة على مادة السيليكون، تم الإبلاغ عن العديد من الدراسات النظرية العيانية. ولكن بسبب ذلك، يبدو أن النظام الباليستي ذو قيمة عالية لعدد Knudsen، يصبح الهيكل المادي لمOSFET متبايناً. وهذا يسبب تغيراً في الخواص الحرارية وفي الموصلية الحرارية الفعالة [36، 78، 79]. استخدم العمل الحالي طريقة نظرية متوسطة المستوى تستند

إلى معادلة بولتزمان الشبكية لدراسة النقل الحراري في ترانزستور النانوي بالنظر إلى تأثيرات الموصلية الحرارية الفعالة. في تحليل الانتقال الحراري داخل الهياكل النانوية، يعتبر النموذج المقترح نهجاً فعالاً معارضاً للطرق العيانية. ويرجع ذلك إلى أن الوسط المادي شبه مستمر في وجود حركة الجسيمات [10، 16، 57، 72، 77، 80].

بشكل عام، يحد اهتزاز الجسيمات (الفونون) من الانتقال الحراري داخل نطاق نانوي حيث يؤثر انخفاض بُعد الهيكل إلى متوسط المسار الحر للمادة مع تشتت الفونون عند الحدود على عملية التوصيل الحراري. والجملة المستندة إلى الموصلية الحرارية مصممة على غرار محلول نموذج عملية نقل الفونون بولتزمان حيث ترتبط ETC برقم كنودسن. وبالتالي، يمكن التعبير عن ETC المعتمدة على الطول عبر نظام جهاز القناة على النحو التالي [76، 77، 81]:

$$(1.3) \quad k_e(Kn) = k \left[1 - \frac{2 \times Kn \times \tanh(1 / (2 \times Kn))}{1 + c_p \times \tanh(1 / (2 \times Kn))} \right]$$

هنا c_p و Kn هما ثابتان مرتبطان بخاصية المادة و رقم Knudsen، على التوالي، بينما $c_p = 2(1 + p) / (1 - p)$ حيث p هو معامل الانعكاسية الذي تم تحديده على أنه احتمال لعملية تشتت الفونون عند الحدود. بالإضافة إلى ذلك، فإن وقت الاسترخاء المرتبط بتبعثر الفونون عند الحدود يُعرف بأنه:

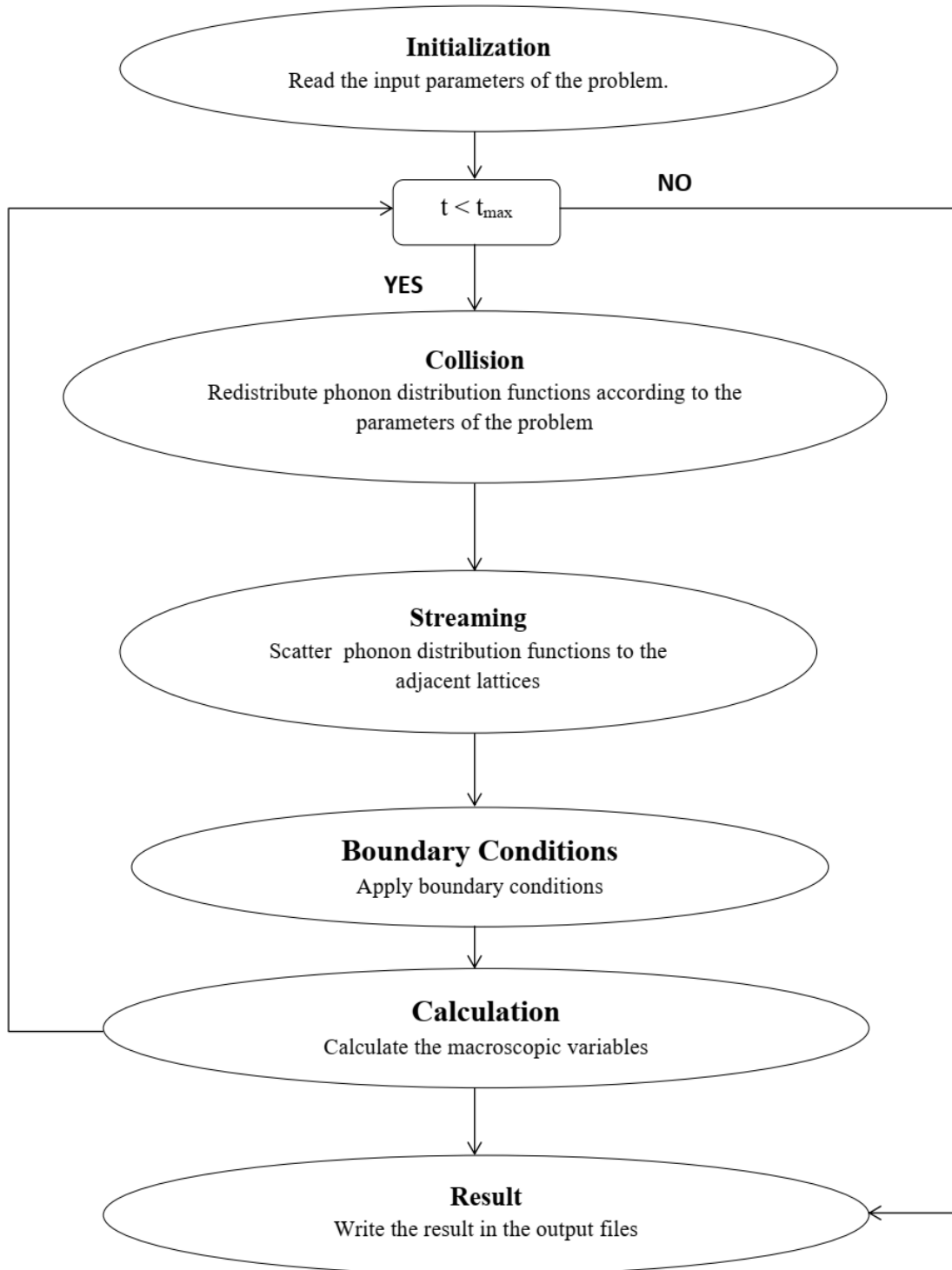
$$(2.3) \quad \tau_b = \frac{3 \times k_e}{C \times v^2}$$

في هذه الحالة،:

$$(3.3) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + v \cdot \nabla u = -\frac{u - u^{eq}}{\tau_b} + q_v$$

2.3 الكود المستعمل

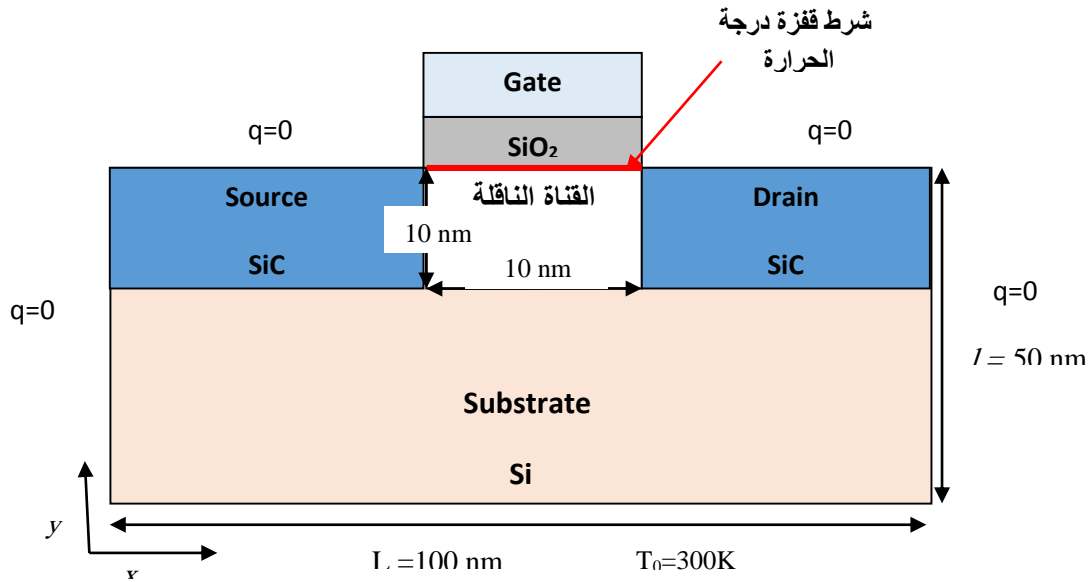
تم إجراء محاكاة نقل الحرارة الموصوف في هذا العمل باستخدام طريقة بولتزمان الشبكية المعتمدة المطبقة في لغة برمجة فورتران. يتم تطبيق السمات المشتركة لـ LBM والتصادم والتشتت وشروط الحدود المختلفة وحساب متغيرات القيم. يتم تقديم المعلوماتية المطورة في الشكل 1.3 . الكود لديه القدرة على اعطاء القيم في استخراج البيانات . ولعرض النتائج، يتم استخدام برنامج Tecplot لقراءة ورسم ملفات بيانات المستخرجة.



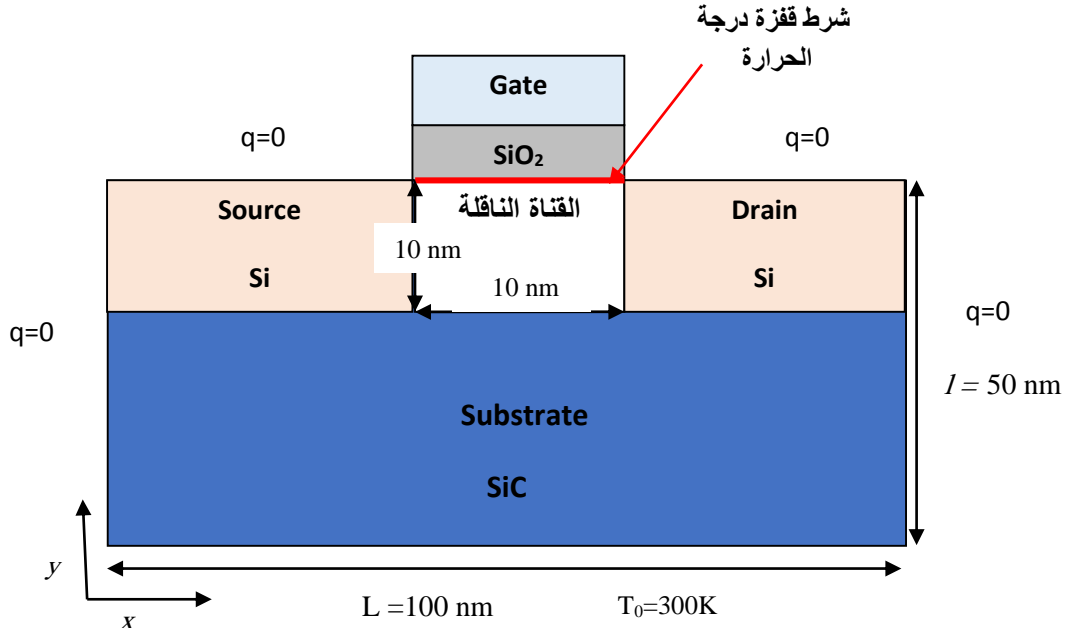
الشكل 1.3: منهجية المعلوماتية المستخدمة (الخوارزمية)

3.3 وصف البنية و الشروط الحدية

يتكون ترانزستور MOS من بوابة وطبقة أكسيد وقناة متصلة كهربائياً بقطب المصدر وقطب الصرف. بالنسبة للدراسة التي اقترحتها طريقة المنظار الوسيط، يتم تصوير تصميمات المحاكاة ببيان هيكل جهاز الترانزستور التقليدي Si-MOS. أحجام الأجهزة التي تم أخذها في الاعتبار في هذا العمل هي $L = 100$ نانومتر و $l = 50$ نانومتر مع منطقة توليد الحرارة هي $10 \times LC$ نانومتر. تم إعطاء هندسة محاكاة SiC-MOSFET في الشكل. يُفترض وجود توليد حراري ثابت في القناة النشطة للترانزستورات النانوية ($qv = 10^{19} \text{ W/m}^3$). بالنسبة للمحاكاة العددية في هذه الدراسة، فإن الخصائص الحرارية المستخدمة للمواد مذكورة في الجدول.



الشكل 2.3: جهاز موسفت المعتمد على مادة كربيد السيليكون (SiC-MOSFET)



الشكل 3.3: جهاز موسفت المعتمد على مادة السيليكون (Si-MOSFET)

الجدول 1.3 : الخصائص الحرارية للمواد (Si, SiC, SiO₂[10, 57, 80])

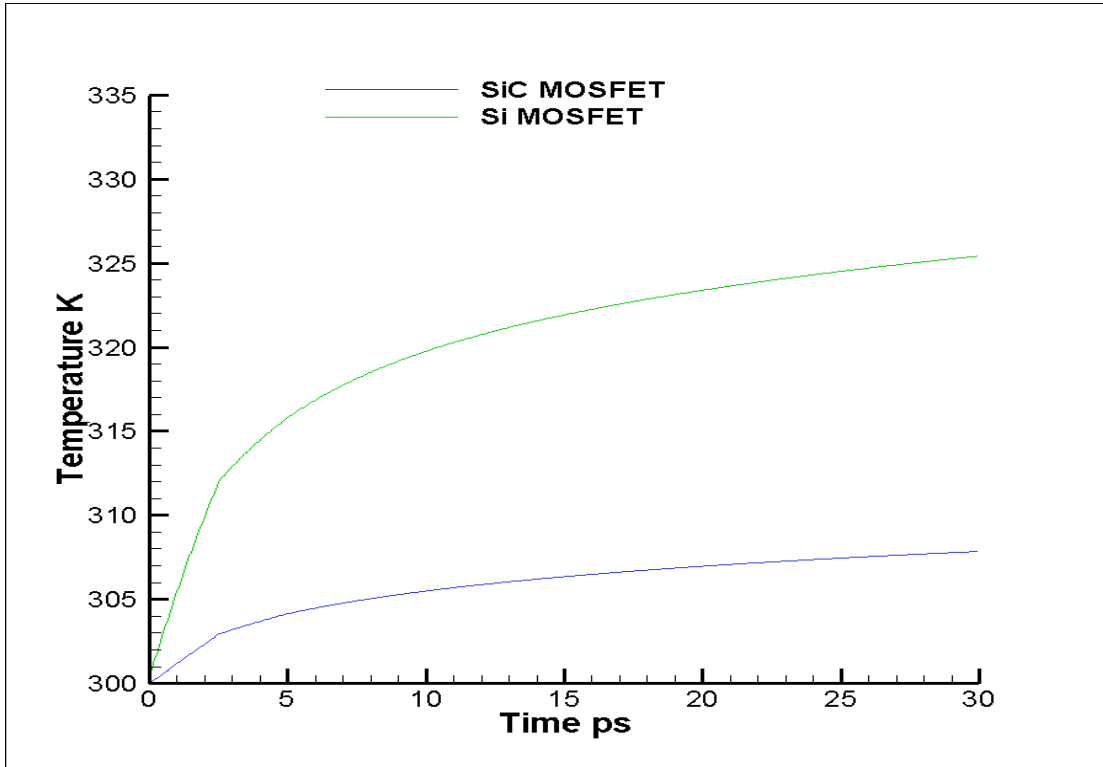
/	ν (m s ⁻¹)	k (W. m ⁻¹ K ⁻¹)	Λ (nm)	C (J. m ⁻³ K ⁻¹)
Si	3000	150	100	1.5×10 ⁶
SiC	13000	490	53	2.11×10 ⁶
SiO ₂	5900	1.4	0.4	1.75×10 ⁶

من المفترض أن تكون الحدود معزولة في الجانب العلوي والأيمن والجانب الأيسر من ترانزستورات MOS. وبالإضافة إلى ذلك، يفترض أن يكون الحد السفلي عند درجة حرارة منتظمة تبلغ 300K. وتعتبر درجة الحرارة الأولية لجميع المواقع النقطية للمواضع النانوية عند 300K. وفي واجهة أشباه الموصلات - أكسيد، تكون حالة القفز متصلة ببوابة الأكسيد، وتفرض شرط قفزة درجة الحرارة الحدي. كما ذكرنا سابقًا، تحدد هذه الحالة الحدودية اصطدامات الجدار والفونون الترانزستور وتوصف على النحو التالي:

$$(4.3) \quad T^* - T_w^* = -a \times Kn \times L_c^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*}$$

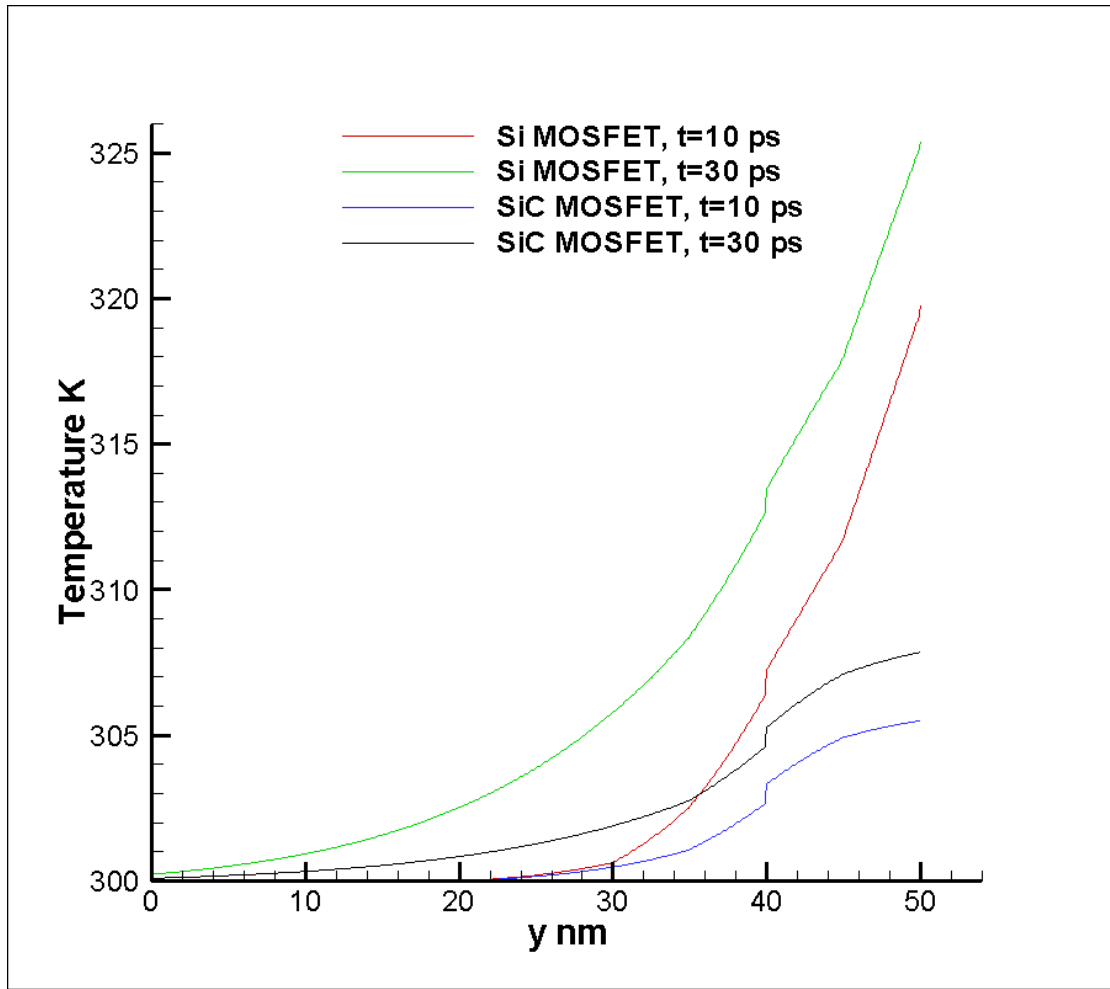
4.3 نتائج المحاكاة و المناقشة:

في الدراسة الحالية قمنا باستعمال طريقة شبكية بولتزمان نموذج D_2Q_8 لدراسة التوصيل الحراري داخل جهاز موسفت المعتمد على المادتين سيليكون وكربيد سيليكون حيث ان طول القناة الناقله يقدر بـ 10 نانومتر ومجال زمني 30 بيكوثانية.



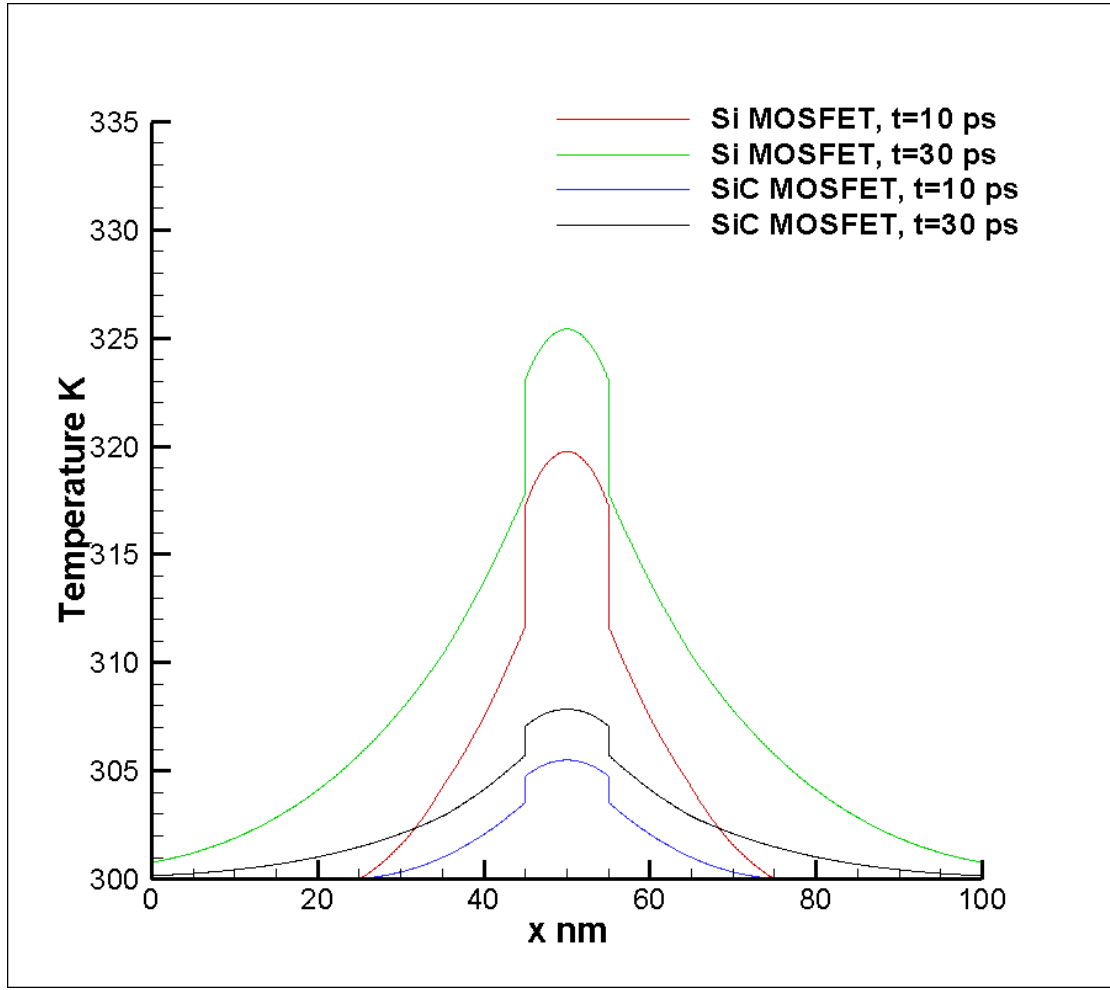
الشكل 4.3: التغير الزمني لدرجة الحرارة في جهاز موسفت المعتمد على مادتي سيليكون وكربيد سيليكون

الشكل 4.3: يعبر عن تغير درجة الحرارة بدلالة الزمن عند $p=0.3$ ، حيث نلاحظ زيادة في درجة الحرارة مع الزمن في كلا الجهازين سيليكون موسفت وكربيد سيليكون موسفت ومن جهة أخرى نجد أن الجهاز المعتمد على مادة كربيد سيليكون أقل درجة حرارة من الجهاز المعتمد على مادة سيليكون وهذا راجع إلى الناقلية الحرارية لمادة كربيد سيليكون. تقدر درجة الحرارة لجهاز سيليكون 325 K بينما في جهاز كربيد سيليكون 305 K.



الشكل 5.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور العمودي y في جهازي موسفت عند الزمن $t=10\text{ps}$ و $t=30\text{ps}$ و $p=0.3$

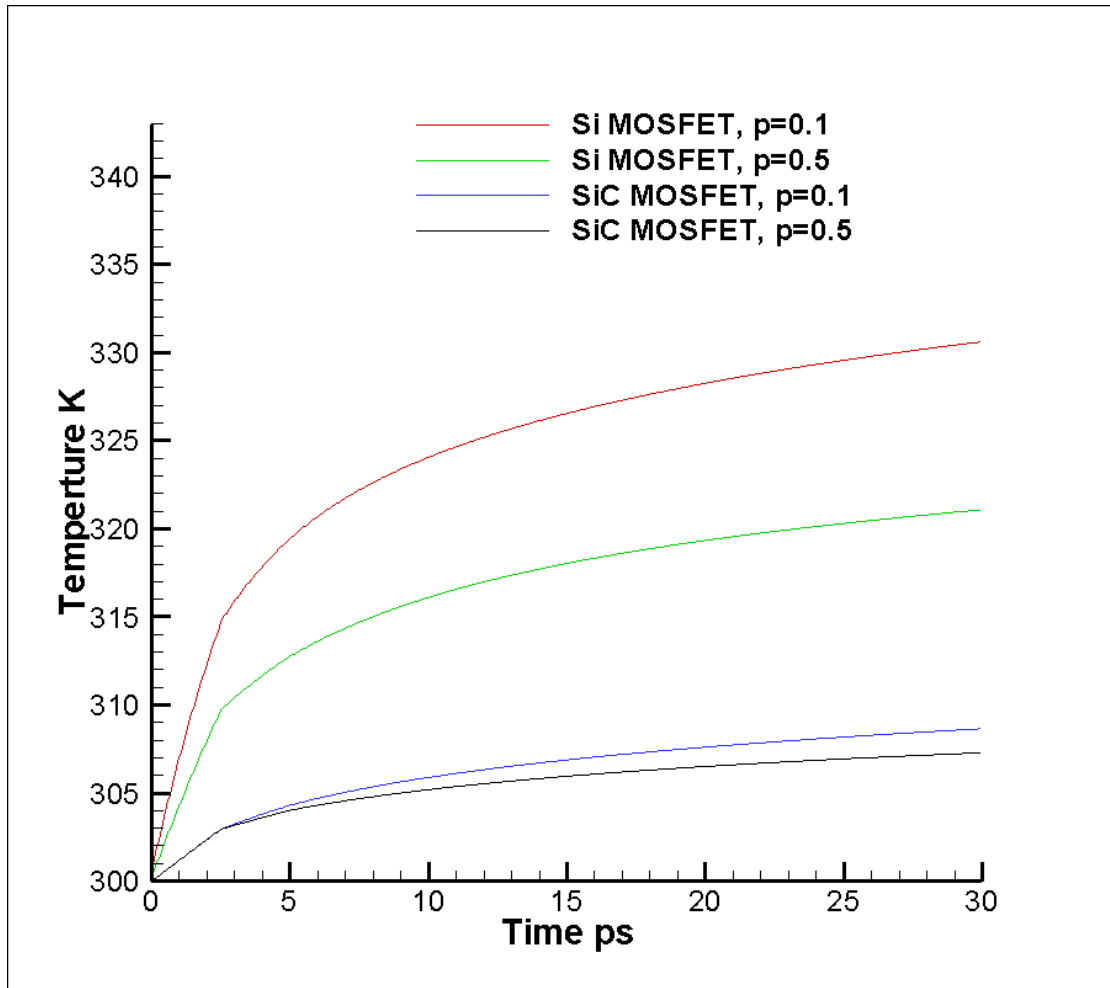
الشكل 5.3: يعبر عن تغير درجة الحرارة بدلالة المسافة y (المحور العمودي) و $(x=L/2)$ عند $p=0.3$ وفي أوقات مختلفة، حيث نلاحظ زيادة في درجة الحرارة مع زيادة المسافة لكلا الجهازين و بقيمة أكبر للجهاز المعتمد على مادة السيليكون من المعتمد على مادة كربيد السيليكون. كما نلاحظ أن لكل جهاز زمنين مختلفين تتفاوت فيهما درجة الحرارة حيث عند $t=30\text{ps}$ أكبر درجة حرارة من لما $t=10\text{ps}$ وهذا راجع إلى معامل تغير المادة الذي يسبب الفرق وأيضاً عامل الناقلية الذي له دور كبير بحيث أنها تتناسب طردياً مع درجة الحرارة.



الشكل 6.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور الافقي x في جهازي موسفت عند الزمن $t=10ps$ و $t=30ps$ و $p=0.3$

الشكل 6.3: يبين تغير درجة الحرارة بدلالة المسافة x عند $y=50nm$ للأجهزة النانوية سيليكون موسفت وكربيد سيليكون موسفت عند $t=10 ps$ و $t=30 ps$ بالنسبة لكلا الجهازين يكون شكل المنحنيات متناظرا عند $x=50$ نانومتر حيث توجد درجات الحرارة القصوى.

من الواضح أن درجة الحرارة الساخنة تقع في منطقة القناة حيث يتم نقل الحرارة

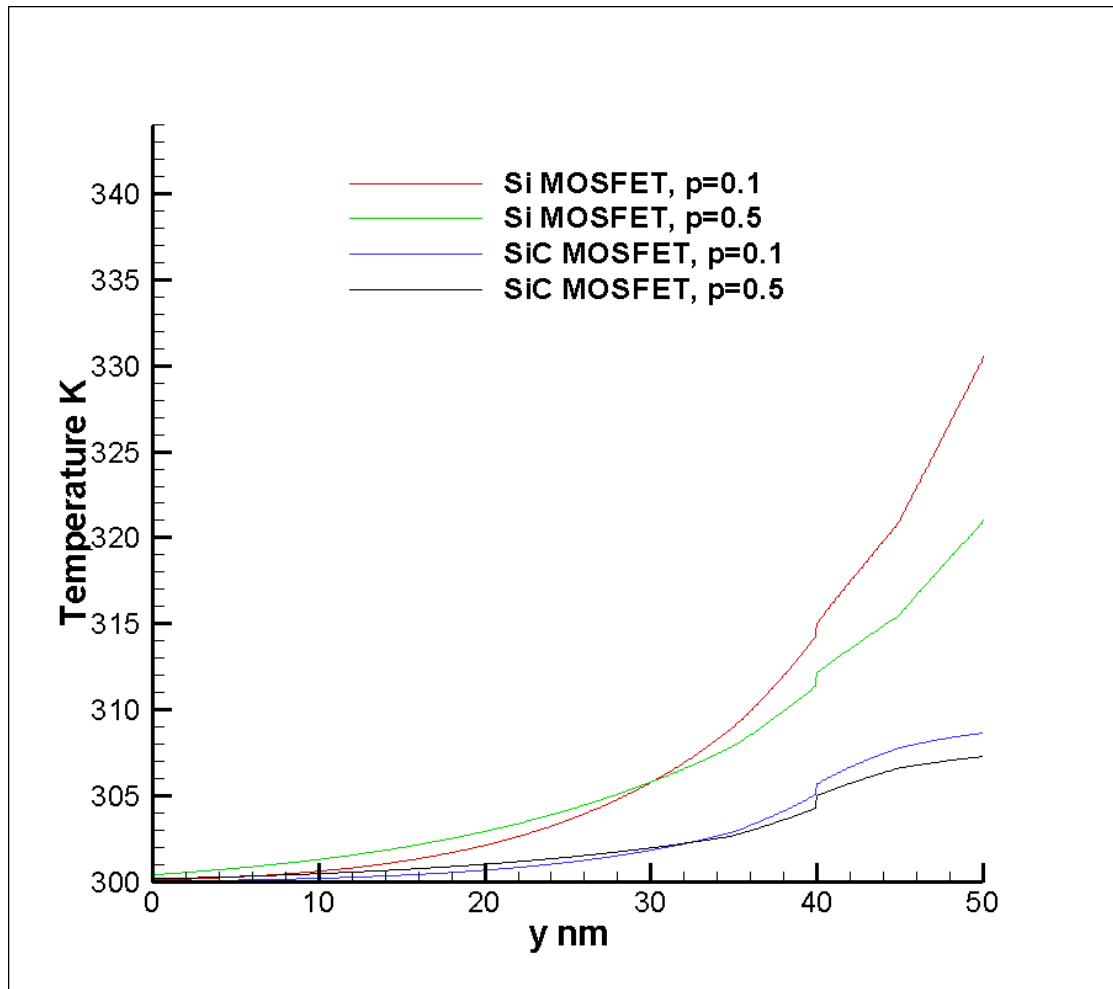


الشكل 7.3: التغير الزمني في درجة الحرارة في جهازي موسفت ($y=50\text{nm}, x=50\text{nm}$) عند $p=0.5$ و $p=0.3$

الشكل 7.3: يعبر عن تغير درجة الحرارة بدلالة الزمن مع تغيير في معامل الانعكاسية حيث تم استعمال القيمتين $p=0.5$ و $p=0.1$ في كلا الجهازين سيليكون موسفت وكربيد سيليكون موسفت حيث تم ملاحظة ان درجة الحرارة تتزايد مع

الزمن في علاقة طردية ومن ناحية اخرى نلاحظ ان هناك تأثير ايجابي في زيادة معامل الانعكاسية في تخفيض درجة الحرارة لكلا الجهازين المدروسين .

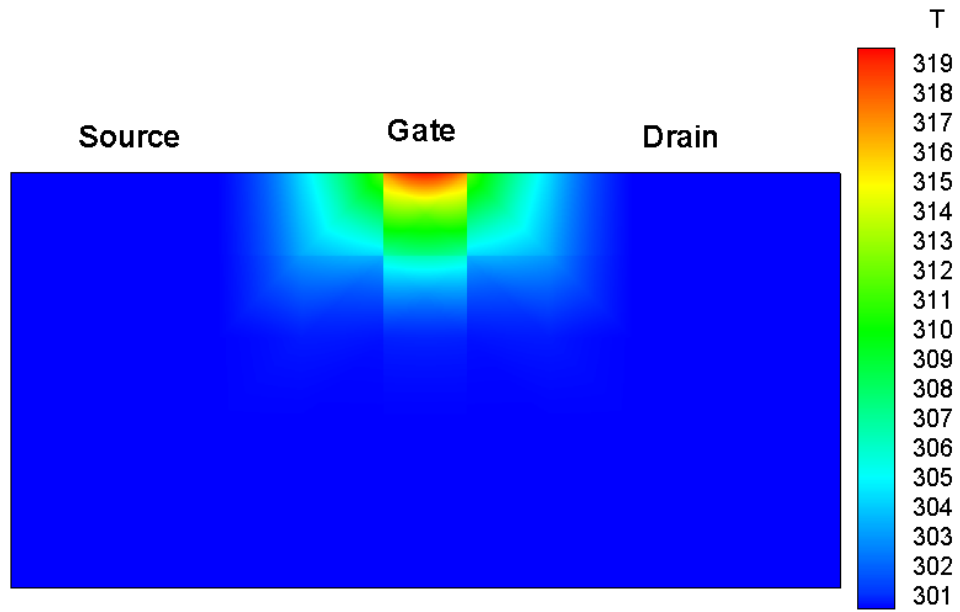
ومن ناحية درجة الحرارة نلاحظ ان الجهاز المعتمد على مادة كربيد السيليكون اقل في قيمة درجة الحرارة وهذا بسبب الناقلية الحرارية التي يملكها مقارنة بالجهاز الآخر.



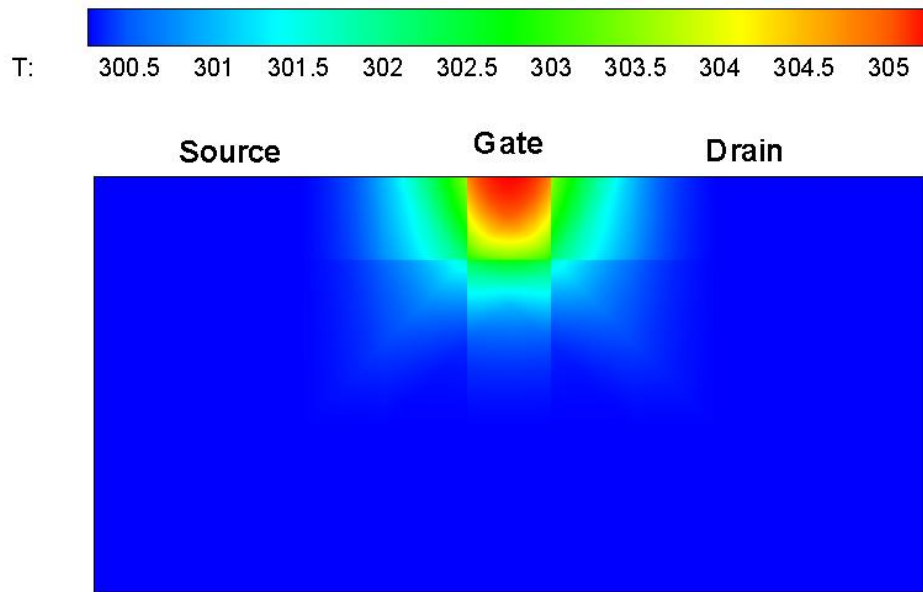
الشكل 8.3: التغير في درجة الحرارة بدلالة المحور العمودي y في جهازي موسفت عند $t=10ps$ و $p=0.5$ و $p=0.1$

الشكل 8.3: يظهر التغير في درجة الحرارة في جهاز سيليكون موسفت وكربيد سيليكون موسفت بدلالة المحور العمودي y عند $x=L/2$ و $t=10$ ps ، من الواضح من المنحنيات الأربعة أن قيمة درجة الحرارة القصوى تقع عند $y=50$ nm وهذا بسبب وجود مصدر حراري والتصادم الفونوني عند الواجهة مع العازل لكلا الجهازين.

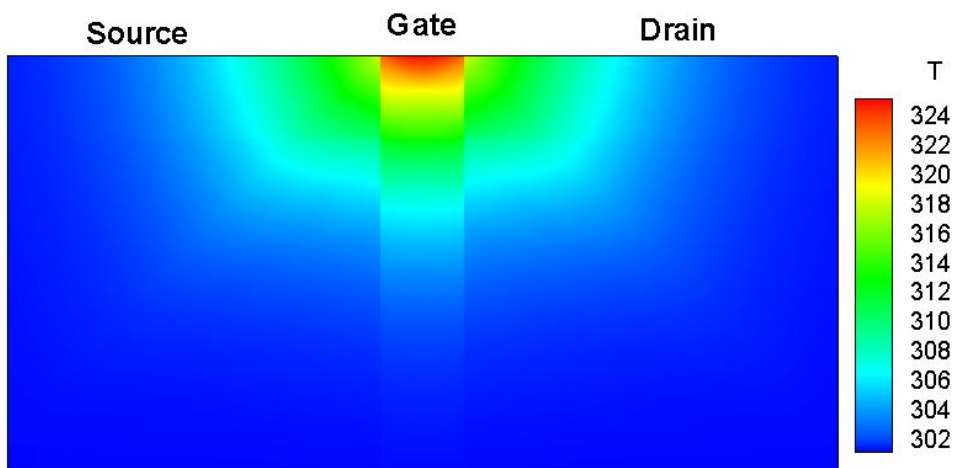
ونلاحظ أيضا ان الزيادة في قيمة معامل الانعكاسية له تأثير ايجابي في تخفيض درجة الحرارة ، وأن درجة الحرارة لجهاز كربيد السيليكون اكثر استقرار حراري من الجهاز المعتمد على مادة السيليكون.



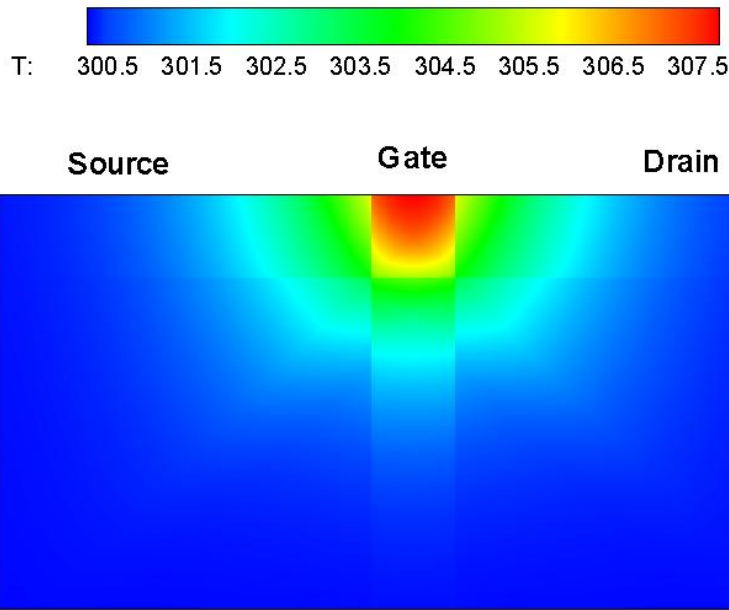
أ - Si-MOSFET عند $t=10$ ps



ب- SiC-MOSFET عند $t=10$ ps



ت- Si-MOSFET عند $t=30$ ps



ث- SiC-MOSFET عند $t=30$ ps

الشكل 9.3: التوزيع الحراري ثنائي الأبعاد (2D) سيليكون موسفت وجهاز كربيد سيليكون موسفت عند $t=10$ ps و $t=30$ ps و $p=0.3$

الشكل 9.3: يمثل التوزيع الحراري ثنائي الأبعاد (2D) لكلا الجهازين المدروسين سيليكون موسفت وكربيد السيليكون موسفت عند القيمة $p=0.3$ والزمن $t=10$ ps و $t=30$ ps ، من الأشكال الأربعة (أ ، ب ، ج ، د) نلاحظ ان هناك انتشارية حرارية على الجانب الايمن والجانب الايسر للقناة الناقلة كما توجد انتشارية في اسفل القناة الناقلة ، ومن الواضح ان درجات الحرارة القصوى موجودة في القناة الناقلة لكلا

الجهازين حيث تقدر درجة الحرارة عند الزمن $t=10\text{ps}$ بـ $T=319\text{ K}$ و $T=305\text{ K}$ للجهازين على التوالي سيليكون موسفت وكربيد السيليكون موسفت وعند الزمن $t=30\text{ps}$ تقدر الحرارة بـ $T=324\text{ K}$ و $T=307.5\text{ K}$ للجهازين على التوالي سيليكون موسفت وكربيد السيليكون موسفت، وهذا بسبب وجود مصدر حراري وتصادم فونوني عند الواجهة في القناة الناقلة.

5.3 الخلاصة

الغرض من العمل الحالي هو التحقيق في تأثير عامل الانعكاسية على التوصيل الحراري في المقياس النانوي Si-MOSFET و SiC-MOSFET عند $L_c = 10$ نانومتر باستخدام طريقة شبكية بولتزمان. تم استخدام النموذج D_2Q_8 مع حالة القفز في درجة الحرارة لفترة التشغيل حتى $t = 30\text{ ps}$. تم إثبات العمل المقترح على العمود الفقري للنتائج المتاحة من الدراسات السابقة. بشكل عام، تظهر نتائج المحاكاة أن قفزة درجة الحرارة التي تحدث في الواجهة بسبب التصادم الفونوني في ترانزستور السيليكون وترانزستور كربيد السيليكون تسبب الحرارة القصوى عند الواجهة وايضا يوجد تأثير ايجابي في زيادة معامل الانعكاسية على تخفيض درجة الحرارة في الاجهزة الالكترونية بحجم النانومتر.

الخاتمة العامة :

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة المساهمة في السلوك الحراري في أجهزة MOSFET النانوية. تم إجراء عدد من دراسات المحاكاة لفهم ظاهرة النقل هذه باستخدام طريقة بولتزمان الشبكية إلى جانب حالة حدود درجة حرارة القفز مع تأثير المعلمات. يمكن تنظيم الدراسة على النحو التالي: يعتبر الفصل الأول مقدمة لتكنولوجيا الترانزستور MOSFET حيث رأى الأشكال المختلفة للجهاز، وكيفية عمله، ومراحل تطوير حجم الجهاز، ومختلف الدراسات السابقة التي أجريت على. في الفصل الثاني، استند اختيار طريقة Lattice Boltzmann إلى عدة نقاط، وهي نمذجة رياضية وفيزيائية واضحة، وبرمجة سهلة، وموازية وكفاءة حسابية عالية. هذه الطريقة لديها القدرة على عدد صحيح من بنية وتنفيذ الشروط الحدودية في هذه الهندسة. عرض النتائج المحاكاة مع نموذج LBM المعتمد في الفصل الثالث.

أظهرت نتائج المحاكاة أن كلا الجهازين سيليكون موسفت وكربيد سيليكون موسفت حيث تم ملاحظة ان درجة الحرارة تتزايد مع الزمن في علاقة طردية ومن ناحية اخرى نلاحظ ان هناك تأثير ايجابي في زيادة معامل الانعكاسية في تخفيض درجة الحرارة لكلا الجهازين المدروسين ومن ناحية اخرى ، نلاحظ ان هناك انتشارية حرارية على الجانب الايمن والجانب الايسر للقناة الناقلة كما توجد انتشارية في اسفل القناة الناقلة ، ومن الواضح ان درجات الحرارة القصوى موجودة في القناة الناقلة لكلا $T=305K$ و $T=319 K$ بـ $t=10ps$ الجهازين حيث تقدر درجة الحرارة عند الزمن

للجهازين على التوالي سيليكون موسفت وكربيد السيليكون موسفت وعند الزمن للجهازين على التوالي $T=307.5\text{ K}$ و $T=324\text{ K}$ تقدر الحرارة بـ $t=30\text{ps}$.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن معامل الانعكاسية (p) له دور مهم في نقل حرارة الفونون وفي تقليل درجة الحرارة القصوى في جهاز موسفت. إن تفضيل جهاز كربيد سيليكون والخصائص الفريدة لمواد كربيد سيليكون يجعل هذه المادة مرشحًا جيدًا لتوليد أنظمة الإلكترونيات النانوية في المستقبل. تجعل مزايا أجهزة ترانزستور كربيد سيليكون ، بالإضافة إلى الخصائص الفريدة للمادة، كربيد سيليكون مرشحًا واعدًا لأنظمة الأجهزة النانوية المستقبلية. بالإضافة إلى ذلك، قد توفر هذه الطريقة في الدراسة الحالية أداة رقمية جيدة للدراسات العميقة لظاهرة النقل الحراري في الهياكل النانوية.

- [1] M. E. Transport, C. Tien, A. Majumdar, and F. Gerner, "Taylor & Francis," *Washington, DC*, 1998.
- [2] C. Tellier and A. Tossier, "Size effects in thin films 1982," ed: New York: Elsevier.
- [3] T. K. Sarkar, R. Mailloux, A. A. Oliner, M. Salazar-Palma, and D. L. Sengupta, *History of wireless*. Hoboken: Wiley 2006.
- [4] L. Łukasiak and A. Jakubowski, "History of semiconductors," *Journal of Telecommunications and information technology*, pp. 3-9, 2010.
- [5] C. Kittel, *Introduction to solid state physics* vol. 8 :Wiley New York, 1976.
- [6] A. Jakubowski and L. Łukasiak, "CMOS evolution. Development limits," *Materials Science Poland*, vol. 26, pp. 5--20, 2008.
- [7] H. Belmabrouk, H. Rezgui, F. Nasri, M. F. B. Aissa, and A. A. Guizani, "Interfacial heat transport across multilayer nanofilms in ballistic–diffusive regime," *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, p. 109, 2020.
- [8] M. Belkhiria, F. Echouchene, N. Jaba, A. Bajahzar, and H. Belmabrouk, "2-D-Nonlinear electrothermal model for investigating the self-heating effect in GAAFET transistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, pp. 954-961, 2021.
- [9] H. Basirat, J. Ghazanfarian, and P. Forooghi, "Implementation of dual-phase-lag model at different Knudsen numbers within slab heat transfer," in *Proc. of Int. Conf. on Modeling and Simulation (MS06)*, 2006, pp. 895-899.
- [10] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "Analysis of heat conduction in a nanoscale metal oxide semiconductor field effect transistor using lattice Boltzmann method," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-15, 2020.
- [11] O. Zobiri, "Contribution study of Meso-Scale Modelling and Simulation of Heat transfer phenomenon in Semiconductor Systems," Universty of Eloued.2022، جامعة الشهيد حمه لخضر،
- [12] O. Pelliccioni, M. Cerrolaza, and M. Herrera, "Lattice Boltzmann dynamic simulation of a mechanical heart valve device," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 75, pp. 1-14, 2007.
- [13] A. Nabovati, D. P. Sellan, and C. H. Amon, "On the lattice Boltzmann method for phonon transport," *Journal of Computational Physics*, vol. 230, pp. 5864-5876, 2011.

- [14] Z. Shomali and R. Asgari, "Effects of low-dimensional material channels on energy consumption of nano-devices," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 94, pp. 77-84, 2018.
- [15] Z. Shomali, A. Abbassi, and J. Ghazanfarian, "Development of non-Fourier thermal attitude for three-dimensional and graphene-based MOS devices," *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, pp. 616-627, 2016.
- [16] H. Rezgoui, F. Nasri, M. F. B. Aissa, A. A. J. T. S. Guizani, and E. Progress, "Investigation of nanoscale heat transport in sub-10 nm carbon nanotube field-effect transistors based on the finite element method," vol. 25, p. 100938, 2021.
- [17] Y. Zhao, L. Hao, X. Zhang, S. Tan, H. Li, J. Zheng, *et al.*, "A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect," *Small Science*, vol. 2, p. 2100077, 2022.
- [18] P. K. Sharma, *Fundamentals Of Electronics*: Academic Guru Publishing House, 2023.
- [19] S. Das, A. Sebastian, E. Pop, C. J. McClellan, A. D. Franklin, T. Grasser, *et al.*, "Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits," *Nature Electronics*, vol. 4, pp. 786-799, 2021.
- [20] P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, *Analysis and design of analog integrated circuits*: John Wiley & Sons, 2024.
- [21] P. Pandey, "Role of nanotechnology in electronics: A review of recent developments and patents," *Recent patents on nanotechnology*, vol. 16, pp. 45-66, 2022.
- [22] S. Ye, K. Yamabe, and T. Endoh, "Ultimate vertical gate-all-around metal-oxide-semiconductor field-effect transistor and its three-dimensional integrated circuits," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 134, p. 106046, 2021.
- [23] V. Kilchytska, F. Andrieu, O. Faynot, and D. Flandre, "High-temperature perspectives of UTB SOI MOSFETs," in *Ulis 2011 Ultimate Integration on Silicon*, 2011, pp. 1-4.
- [24] T.-J. K. Liu, "Introduction to multi-gate MOSFETs," *6th Annual SOI Fundamentals ClassOctober*, vol. 3, 2012.
- [25] Y. Taur, D. A. Buchanan, W. Chen, D. J. Frank, K. E. Ismail, S.-H. Lo, *et al.*, "CMOS scaling into the nanometer regime," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 486-504, 1997.
- [26] D. Flandre, J. Colinge, J. Chen, D. De Ceuster, J. Eggermont, L. Ferreira, *et al.*, "Fully-depleted SOI CMOS technology for low-voltage low-power mixed digital/analog/microwave circuits,"

- Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 21, pp. 213-228, 1999.
- [27] S. Kataria and P. Beniwal, "FinFET Technology: A Review Paper," *International Journal of Technical Research (IJTR)*, vol. 5, p. 35, 2016.
- [28] L. Zhang, M. Chan, and F. He, "The impact of device parameter variation on double gate tunneling FET and double gate MOSFET," in *2010 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, 2010, pp. 1-4.
- [29] A. Ashaf, M. Tyagi, and P. Mani, "To study high performance analysis of surround gate SOI MOSFET," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, pp. 191-194, 2018.
- [30] R. Samian, A. Abbassi, and J. Ghazanfarian, "Thermal investigation of common 2D FETs and new generation of 3D FETs using Boltzmann transport equation in nanoscale," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 24, p. 1350064, 2013.
- [31] A. Jakubowski and L. Łukasiak, "CMOS evolution. Development limits," *Materials Science-Poland*, vol. 26, 2008.
- [32] !!!INVALID CITATION!!!
- [33] P. Solomon, K. Guarini, Y. Zhang, K. Chan, E. Jones, G. Cohen, *et al.*, "Two gates are better than one [double-gate MOSFET process]," *IEEE circuits and devices magazine*, vol. 19, pp. 48-62, 2003.
- [34] F. Xue, "III-V MOSFETs from Planar to 3D," 2013.
- [35] N. Singh, K. D. Buddharaju, S. K. Manhas, A. Agarwal, S. C. Rustagi, G. Lo, *et al.*, "Si, SiGe nanowire devices by top-down technology and their applications," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 55, pp. 3107-3118, 2008.
- [36] C. Xie, J. Wang, D. Wang, N. Pan, and M. Wang, "Lattice Boltzmann modeling of thermal conduction in composites with thermal contact resistance," *Communications in Computational Physics*, vol. 17, pp. 1037-1055, 2015.
- [37] S. H. Musavi, M. J. I. j. o. h. Ashrafizaadeh, and f. flow, "A mesh-free lattice Boltzmann solver for flows in complex geometries," vol. 59, pp. 10-19, 2016.
- [38] D. A. Wolf-Gladrow, *Lattice-gas cellular automata and lattice Boltzmann models: an introduction*: Springer, 2004.
- [39] W. Heywang and K. Zaininger, "Silicon: the semiconductor material," *Silicon: evolution and future of a technology*, pp. 25-42, 2004.
- [40] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization*: John Wiley & Sons, 2015.
- [41] L. I. Berger, *Semiconductor materials*: CRC press, 2020.

- [42] M. Rudan, R. Brunetti, and S. Reggiani, *Springer Handbook of Semiconductor Devices*: Springer, 2023.
- [43] S. M. Sze, Y. Li, and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John Wiley & sons, 2021.
- [44] A. Kumar and M. Aspalli, "SiC: An advanced semiconductor material for power devices," *International Journal of Research In Engineering and Technology*, vol. 3, pp. 248-252, 2014.
- [45] X. Huang, D. Ji, H. Fuchs, W. Hu, and T. Li, "Recent progress in organic phototransistors: Semiconductor materials, device structures and optoelectronic applications," *ChemPhotoChem* ,vol. 4, pp. 9-38, 2020.
- [46] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, *et al.*, "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene," *nature*, vol. 438, pp. 197-200, 2005.
- [47] Y. Zhang, Y.-W. Tan, H .L. Stormer, and P. Kim, "Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene," *nature*, vol. 438, pp. 201-204, 2005.
- [48] P. Avouris, Z. Chen, and V. Perebeinos, "Carbon-based electronics," *Nature nanotechnology*, vol. 2, pp.2007 ,615-605 .
- [49] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D.-e. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, *et al.*, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *science*, vol. 306, pp. 666-669, 2004.
- [50] B. J. Baliga, "The future of power semiconductor device technology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pp. 822-832, 2001.
- [51] C. Ni and J. Y. Murthy, "Parallel computation of the phonon Boltzmann transport equation," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 55, pp. 435-456, 2009.
- [52] I .Moradi and A. J. E. A. w. B. E. D'Orazio, "Lattice Boltzmann Method Pore-scale simulation of fluid flow and heat transfer in porous media: Effect of size and arrangement of obstacles into a channel," vol. 152, pp. 83-103, 2023.
- [53] N. R. Koosukuntla" ,Towards development of a multiphase simulation model using Lattice Boltzmann Method (LBM)," University of Toledo, 2011.
- [54] M. Malladi, "Phonon transport analysis of semiconductor nanocomposites using monte carlo simulations," Clemson University, 2013.
- [55] M. Xu and H. Hu, "A ballistic-diffusive heat conduction model extracted from Boltzmann transport equation," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 467, pp. 1851-1864, 2011.

- [56] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "A critical evaluation based on Lattice Boltzmann method of nanoscale thermal behavior inside MOSFET and SOI-MOSFET," *Microelectronics Journal*, vol. 115, p. 105191, 2021.
- [57] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "Study of robin condition influence on phonon nano-heat conduction using meso-scale method in MOSFET and SOI-MOSFET devices," *Materials Today Communications*, vol. 26, p. 102031, 2021.
- [58] H. Rezgüi, F. Nasri, M. F. B. Aissa, H. Belmabrouk, and A. A. Guizani, "Modeling thermal performance of nano-GNRFET transistors using ballistic-diffusive equation," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, pp. 1611-1616, 2018.
- [59] M. F. B. Aissa, H. Rezgüi, F. Nasri, H. Belmabrouk, and A. Guizani, "Thermal transport in graphene field-effect transistors with ultrashort channel length," *Superlattices and Microstructures*, vol. 128, pp. 265-273, 2019.
- [60] G. Chen, *Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons, and photons*: Oxford University Press.2005
- [61] A. Mohamad, *Lattice Boltzmann Method* vol. 70: Springer, 2011.
- [62] M. Xu and L. Wang, "Dual-phase-lagging heat conduction based on Boltzmann transport equation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 5616-5624, 2005.
- [63] R. A. Escobar, S. S. Ghai, M. S. Jhon, and C. H. Amon, "Multi-length and time scale thermal transport using the lattice Boltzmann method with application to electronics cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 97-107, 2006.
- [64] R. A. Escobar and C. H. Amon, "Thin film phonon heat conduction by the dispersion lattice Boltzmann method," 2008.
- [65] J. Lai and A. Majumdar, "Concurrent thermal and electrical modeling of sub-micrometer silicon devices," *Journal of Applied Physics*, vol. 79, pp. 7353-7361, 1996.
- [66] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, "Solid state physics [by] Neil W," *Ashcroft [and] N. David Mermin*, 1976.
- [67] R. A. Escobar, S. S. Ghai, C. H. Amon, and M. S. Jhon, "Time-dependent simulations of sub-continuum heat generation effects in electronic devices using the lattice Boltzmann method," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2003, pp. 603-612.
- [68] C. Hill, "The Grand Canyon, Monument to an Ancient Earth: Can Noah's Flood Explain the Grand Canyon?," *Perspectives on Science and Christian Faith*, vol. 68, pp. 268-271, 2016.

- [69] A. A. Mohamad, *Lattice Boltzmann method: fundamentals and engineering applications with computer codes*: Springer Science & Business Media, 2011.
- [70] S. Chen, H. Chen, G. D. Doolen, Y. Lee, H. Rose, and H. Brand, "Lattice gas models for nonideal gas fluids," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 47, pp. 97-111, 1991.
- [71] X. Shan and H. Chen, "Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation," *Physical Review E*, vol. 49, p. 2941, 1994.
- [72] H. Rezgui, F. Nasri, M. F. B. Aissa, and A. A. Guizani, "Study of heat dissipation mechanism in nanoscale MOSFETs using BDE model," *Green Electronics*, p. 15, 2018.
- [73] X. Zhang, Y. Zhang, Z. Ye, W. Li, T. Liao, and J. Chen, "Graphene-based thermionic solar cells," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, pp. 383-385, 2018.
- [74] Y. Yue, Y. Chen, S. Wang, N. Zhang, A. Li, and H. Yang, "A simple method for the preparation of patterned graphene electrodes and its application in organic light-emitting diodes array," *Materials Letters*, vol. 251, pp. 152-155, 2019.
- [75] W. Yao, J. Lu, F. Taghizadeh, F. Bai, and A. J. E. Seagar, "Integration of SiC Devices and High-Frequency Transformer for High-Power Renewable Energy Applications," vol. 16, p. 1538, 2023.
- [76] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "A three-dimensional analysis of heat transfer based on mesoscopic method in nanoscale Si-MOSFET and Gr-FET," *Micro and Nanostructures*, vol. 16, 3p. 107123, 2022.
- [77] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "Mesoscale investigation of specularly parameter impact on heat transport in graphene nanoribbon," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 139, p. 115153, 2022.
- [78] J. C. Woo, K. W. Terrill, and P. K. Vasudev, "Two-dimensional analytic modeling of very thin SOI MOSFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, pp. 1999-2006, 1990.
- [79] P. Vernotte, "Les paradoxes de la theorie continue de l'equation de la chaleur," *Compt. Rendu*, vol. 246, pp. 3154-3155, 1958.
- [80] O. Zobiri, A. Atia, and M. Arıcı, "A critical evaluation based on Lattice Boltzmann method of nanoscale thermal behavior inside MOSFET and SOI-MOSFET," *Microelectronics Journal*, p. 105191, 2021.
- [81] F. Nasri and M. Atri, "Channel length effect on heat transfer process in nano MOSFETs," in *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, 2017, pp. 1-4.