

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم الدقيقة

علوم المادة



مذكرة ماستر

قسم علوم المادة

فيزياء

فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

رقم: أدخل رقم تسلسل المذكرة

إعداد الطالبة:

ناصي هناء

يوم: 03/05/2025

تأثير درجة الحرارة على الصمامات الثنائية الباعثة للضوء ذات الآبار الكمومية

لجنة المناقشة:

رئيس	جامعة محمد خيضر-بسكرة-	أ. مح أ	بوزيب وهيبة
مؤطر	جامعة محمد خيضر-بسكرة-	أ.	نبر مسين توفيق
مناقش	جامعة محمد خيضر-بسكرة-	أ. مس أ	ترير حمزة

شكر وعرفان:

أول شكر لله سبحانه وتعالى والتقدير إلى الله عز وجل، الذي بفضله وتوفيقه تم إنجاز هذا العمل.

كما أتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى مؤطري [السيد ترمسين توفيق]، على توجيهاته القيمة ونصائحه السديدة التي أثرت على هذا البحث وأضاءت لي الطريق خلال مراحل إنجازه. لا يسعني إلا أن أعرب عن تقديري العميق لأعضاء لجنة المناقشة الكرام، لتفضلهم بقبول مناقشة هذا العمل وإثرائه بملاحظاتهم القيمة.

كما أود أن أشكر قسم علوم مادة بجامعة بسكرة.

أخيرًا، أتقدم بالشكر لكل من ساهم، ولو بكلمة طيبة أو دعم معنوي، في إخراج هذا العمل إلى النور.

الاهداء:

"وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ"

الحمد لله عند البدء وعند الختام

من قال انا لها نالها

لقد كانت طريقا طويلة مليئة بالإخفاقات والنجاحات فخورين بكفاحنا

لتحقيق احلامنا

لحظة لطالما انتظرتها وحلمت بها في حكاية اكتملت فصولها

إلى من علمني العطاء بدون انتظار إلى من أحمل اسمه بكل افتخار إلى من كلله الله بالهيبة والوقار
والذي العزيز

إلى حبيبتي قرة عيني إلى القلب النابض إلى من كانت دعواتها الصادقة سر نجاحي

أمي الغالية

إلى حبيب قلبي ابن أختي

إلى أختي وإخوتي سندي في الحياة ها أدامكم الله ضلعا ثابتا لي

إلى كل أفراد عائلتي وإلى أصدقائي بدون استثناء

إلى كل الأساتذة الأفاضل الذين قدموا لنا يد المساعدة

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل وفقني الله وإياكم إلى الخير

ملخص:

في هذه المذكرة، تم دراسة تأثير درجة الحرارة على خصائص صمام ثنائي باعث للضوء MQW-LED يحتوي على خمس آبار كمومية مصنوعة من مادة InGaN/GaN، مع التركيز على الخصائص الكهربائية والبصرية مثل منحنى التيار-الجهد (I-V)، منحنى الشدة الضوئية-التيار (I-P)، والكثافة الطيفية المنبعثة. باستخدام برنامج SILVACO-ATLAS للمحاكاة، أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة من 200K إلى 400K يؤدي إلى زيادة في التيار عند نفس الجهد نتيجة لزيادة عدد الحاملات، كما أن كل درجة حرارة تتميز بجهد عتبة معين V_{th} ، حيث يقل عرض عصابة الطاقة كلما زادت درجة الحرارة. تزداد شدة الضوء المنبعث مع التيار في البداية، لكنها تنخفض لاحقاً عند درجات حرارة مختلفة عن 300K. وذلك راجع لتزايد معدلات الالتحام غير الإشعاعي، كذلك، لوحظ أن الكثافة الطيفية المنبعثة تتوسع مع ارتفاع درجة الحرارة ويحدث انزياح نحو الأطوال الموجية الأطول نتيجة لانخفاض عرض عصابة الطاقة. وتوصلت الدراسة إلى أن أداء LED يتأثر سلباً بتغير درجة الحرارة، مما يستدعي تحسين التصميم الحراري وبنية الآبار الكمومية لتقليل هذه التأثيرات وضمان أداء مستقر وعالي الكفاءة في حالة ارتفاع أو انخفاض في درجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الصمامات الثنائية الباعثة للضوء، أباركمية، InGaN/GaN، درجة الحرارة، محاكاة، SILVACO

ABSTRACT

In this study, the effect of temperature on the characteristics of a multiple quantum well light-emitting diode (MQW-LED) consisting of five InGaN/GaN quantum wells was studied, with a focus on electrical and optical properties such as the current-voltage (I-V), the light intensity-current (I-P), and the emitted spectral density. Using the SILVACO-ATLAS simulation software, the results showed that increasing the temperature from 200K to 400K leads to an increase in current at the same voltage due to a rise in the number of carriers. Each temperature is associated with a specific threshold voltage (V_{th}), The bandgap width decreases as the temperature increases.

The emitted light intensity initially increases with current, but later decreases at temperatures different from 300K. This is attributed to increased non-radiative recombination rates. Furthermore, it was observed that the emitted spectral density broadens with increasing temperature and shifts toward longer wavelengths due to the reduction in bandgap energy.

The study concluded that the LED performance is negatively affected by temperature variations, highlighting the need for improved thermal design and quantum well structure to mitigate these effects and ensure stable and high-efficiency performance under varying temperature conditions.

Keywords :LED , Quantum Wells, InGaN/GaN, Temperature, Simulation, SILVACO.

الفهرس:

I.....	شكر وعرفان:
II.....	الاهداء:
III.....	ملخص:
V.....	الفهرس:
IX.....	قائمة الجداول:
X.....	قائمة الاشكال:
1.....	مقدمة عامة

الفصل الأول: عموميات حول انصاف النواقل

2.....	1.I. المقدمة
2.....	2.I. تصنيف المواد الصلبة
2.....	1.2.I. النواقل
3.....	2.2.I. العوازل
3.....	3.2.I. أنصاف النواقل
3.....	3.I. تطعيم انصاف النواقل
4.....	1.3.I. نصف ناقل من نوع P
4.....	2.3.I. نصف ناقل من نوع N
5.....	4.I. انصاف النواقل III-V
5.....	5.I. خصائص انصاف النواقل III.V
6.....	1.5.I. انصاف النواقل III.V الثنائية والثلاثية والرابعة
6.....	1.1.5.I. السبائك الثنائية
7.....	2.1.5.I. السبائك الثلاثية والرابعة
8.....	6.I. أليات إعادة التركيب

8.....	1.6.I إعادة التركيب الاشعاعي (Radiative Recombination)
8.....	2.6.I إعادة تركيب أوجيه (Auger Recombination)
9.....	3.6.I إعادة التركيب شوتكي-راد-هول (SRH)
10.....	4.6.I اليات إعادة تركيب السطح
11.....	7.I البنية البلورية
11.....	8.I تطبيقات GaN ومركباته
12.....	8.I نتريد الغاليوم الانديوم InGaN
12.....	9.I طبقة AlGaN
13.....	10.I البئر الكمي
13.....	10.I البئر كمي من InGaN/GaN

الفصل الثاني: عموميات حول الصمام الثنائي الباعث للضوء

16.....	1.II المقدمة
16.....	2.II الصمام الثنائي الباعث للضوء LED
16.....	1.2.II تعريف
17.....	2.2.II مراحل تطور تقنية LED
17.....	3.2.II مبدأ عمل الصمام الثنائي الباعث لضوء LED
18.....	3.II أنواع مختلفة من ثنائيات الباعثة للضوء LED
18.....	1.3.II ثنائيات الباعثة للضوء LED ذات الوصلة المتجانسة
19.....	2.3.II الصمامات الثنائيات الباعثة للضوء LED ذات الوصلة غير المتجانسة
20.....	3.3.II الصمامات الثنائيات الباعثة للضوء LED ذات الآبار الكمومية
21.....	4.II تصنيفات الثنائيات الباعثة للضوء LED
21.....	1.4.II ثنائيات الباعثة للضوء LED منخفضة الطاقة
22.....	2.4.II ثنائيات الباعثة للضوء LED عالية الطاقة
24.....	5.II الخصائص الثنائي الباعث للضوء LED

24	1.5.II الخصائص الكهربائية
25	2.5.II الخصائص البصرية
25	1.2.5.II كفاءة الكمية
26	2.2.5.II الشدة البصرية
26	3.2.5.II طيف الضوء المنبعث
28	7.II مزايا و عيوب ثنائيات الباعثة للضوء LED
28	1.7.II المزايا
28	2.7.II العيوب
29	8.II مجالات استخدام الثنائي الباعث للضوء LEDs

الفصل الثالث: المحاكاة، النتائج والمناقشة .

31	1.III المقدمة
31	2.III عرض برنامج المحاكاة SILVACO
33	Deckbuild.1.2.III
33	ATLAS.2.2.III
34	TonyPlot.3.2.III
35	3.III هيكل ملف الإدخال ATLAS
35	1.3.III تحديد الهيكل المدروس Structure Specification
39	2.3.III تحديد النماذج الفيزيائية Material Models Specification
40	3.3.III اختيار الطريقة العددية Numerical Method Selection
40	4.3.III تحديد الحلول Solution Specification
41	5.3.III تحليل النتائج Results Analysis
41	4.III المعادلات والنماذج الأساسية لأنصاف النواقل في برنامج ATLAS.SILVACO
41	1.4.III معادلات بواسون
41	2.4.III معادلات الاستمرارية

42	معادلات النقل	3.4.III
43	نتائج المحاكاة	5.III
43	بنية الصمام الثنائي الباعث للضوء LED المحاكى	1.5.III
44	معاملات المحاكاة للصمام الثنائي الباعث للضوء (LED)	2.5.III
46	خاصية التيار-الجهد (I-V)	3.5.III
48	خاصية الشدة الضوئية -التيار (P-I)	4.6.III
51	خاصية الطيف الضوئي المنبعث	5.5.III
56	الخاتمة العامة	
58	المراجع	

قائمة الجداول

الفصل الأول: عموميات حول انصاف النواقل

- الجدول (1.I): جزء من عناصر جدول الدوري [10] 5
- الجدول (2.I): بعض الخصائص لمواد مختلفة من نفس العائلة (III.V) [1] 7

الفصل الثاني: عموميات حول الصمام الثنائي الباعث للضوء LED.

- الجدول (1.II): خصائص العائلتين من الثنائيات الباعثة للضوء [32] 23
- الجدول (2.II): انصاف النواقل حسب لون الضوء المطلوب [36] 27

الفصل الثالث: المحاكاة، النتائج والمناقشة

- الجدول (1.III): خصائص المواد المستخدمة في عمليات المحاكاة [50] 45
- الجدول (2.III): النماذج المستخدمة في المحاكاة [50] 45
- الجدول (3.III): عتبة الجهد لصمام الثنائي للضوء في درجات حرارة مختلفة 47
- الجدول (4.III): شدة الضوئية لكل درجة وجهد معين 50
- الجدول (5.III): طيف الضوئي المنبعث لكل درجة حرارة 53

قائمة الاشكال

الفصل الأول: عموميات حول الانصاف النواقل.

- الشكل (1.I): مخطط عصابات الطاقة للمواد الناقلة وأنصاف النواقل النواقل والعوازل [4]. 2.....
- الشكل (2.I): أنصاف النواقل نوع P ونوع n [9]. 4.....
- الشكل (3.I): جدول الدوري للعناصر الكيميائية مع تمثيل الاعمدة III.V [11]. 6.....
- الشكل (4.I): عملية إعادة تركيب الإشعاعي (a) مباشرة، (b) غير مباشرة [16]. 8.....
- الشكل (5.I): عملية تركيب أوجيه (a) مباشرة، (b) غير مباشرة [16]. 9.....
- الشكل (6.I): عملية تركيب (SRH) [16]. 9.....
- الشكل (7.I): عملية إعادة التركيب السطح [16]. 10.....
- الشكل (8.I): وحدة الخلية Wurtzite من GaN [19]. 11.....
- الشكل (9.I): عصابة الطاقة والطيف المرئي مقابل ثابت الشبكة لمختلف أنصاف النواقل [20]. 12.....
- الشكل (10.I): رسم تخطيطي مبسط لنطاق لوصلة غير متجانسة مزدوجة، مع تكوين بئر كمومي [22]. 13.....
- الشكل (11.I): البئر من InGaN/GaN [23]. 14.....

الفصل الثاني: عموميات حول الصمام الثنائي الباعث للضوء.

- الشكل (1.II): الوصلة PN [24]. 17.....
- الشكل (2.II): مبدأ تشغيل ثنائي الباعث للضوء LED [26]. 18.....
- الشكل (3.II): مخطط توضيحي يبين مبدأ عمل الصمام الثنائي الباعث للضوء LED ذو الوصلة المتجانسة [29]. 19.....
- الشكل (4.II): مخطط توضيحي يبين مبدأ عمل الثنائي الباعث للضوء LED ذو الوصلة PN غير متجانسة [30]. 20.....
- الشكل (5.II): الثنائيات الباعثة للضوء LED ذو الآبار الكمية [31]. 21.....
- الشكل (6.II): رسم تخطيطي لل LED منخفض الطاقة [32]. 21.....
- الشكل (7.II): رسم توضيحي لمكونات ال LED عالي الطاقة [14]. 22.....
- الشكل (8.II): خاصية التيار - الجهد للثنائي الباعث للضوء LED [35]. 24.....

الفصل الثالث: المحاكاة، النتائج والمناقشة .

- الشكل (1.III): مخطط هيكل LED [41]. 32.....
- الشكل (2.III): نافذة Deckbuild. 33.....
- الشكل (3.III): مدخلات ومخرجات ATLAS [43]. 34.....
- الشكل (4.III): نافذة Tonypot. 35.....

الشكل(5.III):التصميم الهيكلي العام لبرنامج محاكاة الأجهزة البصرية والإلكترونية ضمن بيئة [29]	35
ATLAS.....	35
الشكل(6.III):شبكة ثنائية الابعاد.....	36
الشكل(7.III):تعريف المناطق.....	37
الشكل 8.III:تعريف الأقطاب الكهربائية.....	38
الشكل(9.III):تعريف التطعيم.....	38
الشكل(10.III) : مخطط لصمام ثنائي الباعث للضوء LED يعتمد على أنصاف النواقل من نوع	
III.N [50].....	43
الشكل(11.III) :بنية ثنائي الباعث للضوء LED يعتمد على أنصاف النواقل ببرنامج SILVACO	44
الشكل (12.III):خاصية التيار- الجهد (I-V) للصمام الثنائي الباعث للضوء الأزرق InGaN/GaN	
عند درجة الحرارة العادية 300K.....	46
الشكل(13.III) :خاصية التيار- الجهد(I-V) عند درجات حرارة مختلفة.....	47
الشكل (14.III):تغيرات الجهد التشغيل بدلالة درجة الحرارة.....	48
الشكل(15.III):العلاقة بين الشدة الضوئية عند درجة الحرارة 300K.....	49
الشكل(16.III):العلاقة بين الشدة الضوئية والتيار (P-I) لدرجات حرارة مختلفة.....	50
الشكل(17.III):تغيرات الشدة الضوئية بدلالة درجة الحرارة.....	51
الشكل(18.III):كثافة الشدة الطيفية المنبعثة عند درجة الحرارة 300K.....	52
الشكل(19.III):كثافة الشدة الطيفية بدلالة الطول الموجي عند درجة حرارة مختلفة.....	53
الشكل(20.III):منحنى تغيرات طيف الضوئي المنبعث بدلالة درجة الحرارة.....	54

المقدمة العامة

مقدمة عامة

تُعد تكنولوجيا الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs) من أكثر تقنيات الإضاءة الواعدة في عصرنا الحديث، وذلك لما تتميز به من كفاءة عالية في استهلاك الطاقة، وعمر تشغيلي طويل، وحجم صغير، وتصميم متين يجعلها مقاومة للظروف البيئية المختلفة.

لقد شهدت تكنولوجيا الـ LEDs تطوراً ملحوظاً بفضل التقدم في مجال أنصاف النواقل، وخاصة المجموعة III-V، والتي تميزت بقدرتها على إنتاج الضوء بكفاءة عالية ضمن أطيايف مختلفة [1]. ومن بين أكثر هذه المصادر تطوراً، نجد الصمام الثنائي الباعث للضوء، وذلك بفضل استخدام هياكل كمومية متعددة الآبار (MQWs) من مواد مثل InGaN/GaN.

خلال العقدين الماضيين، كانت هناك تطورات ملحوظة في تطوير الثنائيات الباعثة للضوء LED القائمة على InGaN/GaN والمخصصة للاستخدام في تطبيقات الإضاءة والعرض نظراً لكفاءتها العالية. على الرغم من تحقيق كفاءات عالية عند كثافات تيار منخفضة نسبياً، إلا أن الصمامات الثنائية الباعثة للضوء LED القائمة على GaN تعاني من انخفاض كبير في الكفاءة مع اختلاف درجة الحرارة [1].

تلعب الآبار الكمومية دوراً محورياً في تحسين كفاءة الإشعاع والتحكم في خصائص الانبعاث الضوئي. وفي هذا العمل، ندرس تأثير درجة الحرارة في وجود خمس آبار كمومية في بنية InGaN/GaN على الخصائص الكهربائية والبصرية.

تهدف هذه المذكرة إلى تحليل أداء الصمام الثنائي الباعث للضوء LED من خلال المحاكاة العددية باستخدام برنامج SILVACO، الذي يُعد من أقوى أدوات النمذجة في تصميم وتحليل أجهزة أنصاف النواقل.

يتضمن هذا العمل ثلاث فصول رئيسية:

الفصل الأول: نتناول فيه دراسة أنصاف النواقل من العمودين الثالث والخامس (III-V)، مع التركيز على المواد المستخدمة في تصنيع LEDs مثل GaN و InGaN، وخصائصها الفيزيائية والكهربائية التي تجعلها ملائمة لتطبيقات الإضاءة مع شرح مبدأ عمل الآبار الكمومية.

الفصل الثاني: نُعرّف فيه الصمام الثنائي الباعث للضوء LED، مبدأ عمله، أنواعه، مميزاته، إضافة إلى بنية الـ LED المعتمدة على الآبار الكمومية، مع شرح أهمية ودور كل طبقة في البنية المقترحة.

الفصل الثالث: نُقدم فيه برنامج SILVACO، ونتعرف على أدواته المختلفة مثل ATHENA وATLAS لمحاكاة البنية التكنولوجية والكهربائية للـ LED. ثم نقوم بمحاكاة بنية الصمام الثنائي الباعث للضوء LED InGaN/GaN ذات خمس آبار كمومية، وتحليل نتائج المحاكاة واستخلاص تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية والبصرية..

الفصل الأول:
عموميات حول انصاف النواقل.

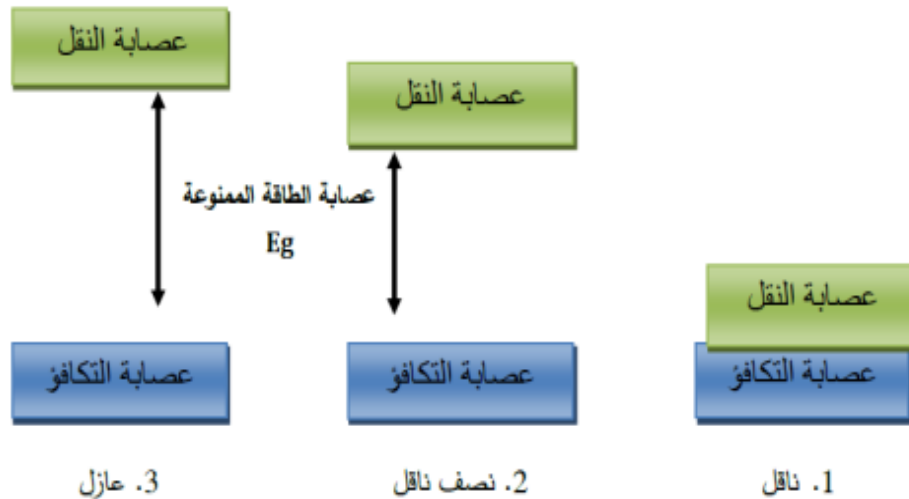
1.I. المقدمة

تُعتبر سبائك أنصاف انواقل موادًا توفر إمكانية تعديل عرض عصابة الطاقة وغيرها من الخصائص الفيزيائية للمادة، وذلك بهدف تحسين وتوسيع نطاق تطبيقاتها في مجال الإلكترونيات الدقيقة و الإلكترونيات الضوئية. يولي قطاع التكنولوجيا اهتمامًا كبيرًا بهذه المجموعة من المواد، مما جعل من نظرية السبائك موضوعًا هامًا للبحث العلمي.

وفي سياق التطورات الحديثة، برزت فئة جديدة من سبائك III-V القائمة على النتريد، سواء كانت ثنائية أو ثلاثية أو رباعية، كمرشح واعد لتطبيقات الإلكترونيات الضوئية المتقدمة. تتميز هذه السبائك بخصائص هيكلية وإلكترونية فريدة، مما يمكنها من تحقيق أداء استثنائي في الأجهزة الإلكترونية الضوئية، حتى في وجود كثافة عالية من العيوب. هذا التقدم يفتح الطريق لتطوير أجهزة أكثر كفاءة وموثوقة، مما يعزز الابتكار في مختلف المجالات التكنولوجية [1].

2.I. تصنيف المواد الصلبة

تصنف المواد الصلبة حسب ناقليتها إلى ثلاثة أصناف وهي مواد ناقلة، مواد عازلة و مواد نصف ناقلة، ويعتمد هذا التصنيف بشكل أساسي على تركيب عصابات الطاقة للمادة، وخاصةً حجم فجوة الطاقة التي تفصل بين نطاق التكافؤ و نطاق التوصيل [2-3].



الشكل (1.I): مخطط عصابات الطاقة للمواد الناقلة وأنصاف النواقل والعوازل [4].

1.2.I. النواقل

في المواد الناقلة، تكون عصابة التكافؤ متداخلة مع عصابة التوصيل، مما يؤدي إلى غياب عصابة الممنوعة بينهما. ويعني هذا التداخل أن إلكترون في عصابة التكافؤ يمكنه الانتقال بحرية إلى عصابة التوصيل، مما يجعل الإلكترونات حرة الحركة داخل البلورة. ومع ذلك، عند درجة الصفر المطلق، تكون جميع

الإلكترونات مرتبطة بقوة في مواقعها ضمن البلورة، وبالتالي تبقى عصابة التوصيل فارغة، لعدم توفر طاقة كافية لتحفيز الإلكترونات للانتقال إليها. ومع ارتفاع درجة الحرارة عن الصفر المطلق، تكتسب الإلكترونات طاقة حرارية تسمح بالانتقال إلى عصابة التوصيل، مما يتيح لها التحرك داخل البلورة [5]. وتتراوح الناقلية الكهربائية للمواد الناقلة بين $(\Omega \cdot cm)^{-1} (10^3 - 10^8)$ [6].

I.2.2. العوازل

تتميز المواد العازلة بامتلاكها عصابة طاقة واسعة E_g تراوح قيمتها بين (5-10 eV)، مما يجعل ناقليتها الكهربائية ضعيفة جداً، إذ تقع ضمن المجال $(\Omega \cdot cm)^{-1} (10^{-18} - 10^{-8})$ [6] عند درجة حرارة الصفر المطلق يكون نطاق التوصيل فارغ تماماً من الإلكترونات، في حين يكون نطاق التكافؤ ممتلئ بالكامل. وتبقى هذه الحالة قائمة حتى عند ارتفاع درجة الحرارة، حيث أن الطاقة الحرارية $K_B T$ غير كافية لتحفيز الإلكترونات للانتقال من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. وهذا يفسر غياب الشحنات الحرة في المواد العازلة، حيث تبقى الإلكترونات مقيدة في مواقعها بفعل قوى الترابط الذرية [7].

I.3.2. أنصاف النواقل

تُعد أنصاف النواقل مواد تقع بين النواقل والعوازل من حيث الناقلية الكهربائية، وتتميز بوجود ثلاث نطاقات طاقة: نطاق التكافؤ، نطاق التوصيل، وبينهما نطاق الممنوع. من أبرز أمثلة هذه المواد السيليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) [8]. لا يختلف المخطط الطاقوي لأنصاف النواقل كثيراً عن نظيره في المواد العازلة، سوى أن نطاق الممنوع فيها أصغر. عند درجة الصفر المطلق، تعمل هذه المواد كعوازل، حيث يكون نطاق التكافؤ ممتلئاً بالإلكترونات بينما يكون نطاق التوصيل فارغ. ومع ارتفاع درجة الحرارة، تكتسب الإلكترونات طاقة حرارية كافية للانتقال إلى نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في الناقلية الكهربائية، التي تتراوح في هذه الحالة بين $(\Omega \cdot cm)^{-1} (10^3 - 10^8)$ [6].

I.3. تطعيم أنصاف النواقل

لتحسين ناقلية أنصاف النواقل، يُعدّ التطعيم خطوة أساسية. ويُعرّف التطعيم على أنه عملية استبدال بعض الذرات في البنية البلورية لمادة نصف ناقلة بذرات أخرى تمتلك عدداً مختلفاً من إلكترونات التكافؤ، سواء أكثر أو أقل. وينقسم التطعيم إلى نوعين رئيسيين [9]:

- **التطعيم من النوع P:** يتم فيه إدخال ذرات تحتوي على عدد أكبر من إلكترونات التكافؤ، مما يزيد من عدد الإلكترونات الحرة في المادة ويُحسن من ناقليتها.
- **التطعيم من النوع N:** يتم فيه إدخال ذرات تحتوي على عدد أقل من إلكترونات التكافؤ، مما يؤدي إلى تكون ثغوب تُساهم في توصيل التيار الكهربائي.

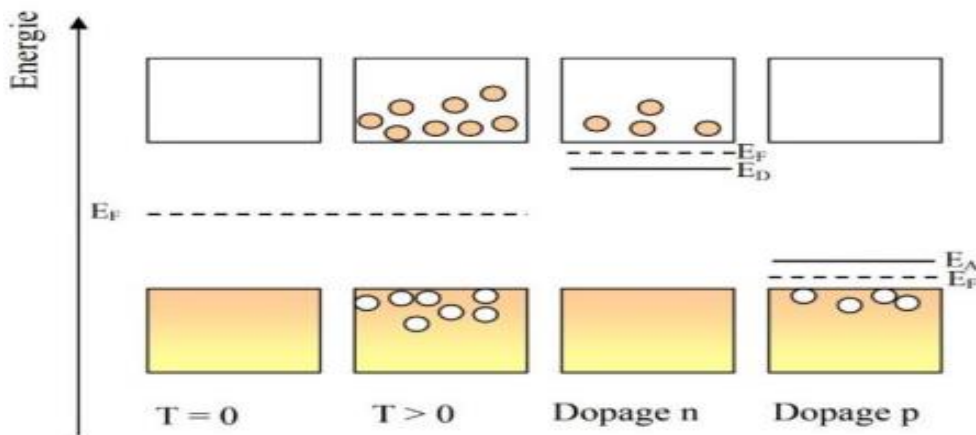
1.3.I. نصف ناقل من نوع P

عند إدخال ذرة مطعمة ثلاثية التكافؤ مثل (البورون (B) أو الألومنيوم (Al) أو الغاليوم (Ga))، لا تستطيع هذه الذرة، عند وضعها في الشبكة، إشباع سوى ثلاثة روابط من أصل أربعة وبالتالي، هناك رابطة واحدة مفقودة لكل ذرة مطعمة، والتي تتوافق مع مستوى طاقة يقع مباشرة فوق نطاق التكافؤ. يُسمى هذا المستوى مستوى مستقبل. عند درجة حرارة الصفر المطلق، تكون المستويات المستقبلية فارغة عند زيادة درجة الحرارة الشكل (2.I)، يمكن شغلها بواسطة إلكترونات قادمة من نطاق التكافؤ. تخلق المستويات الحرة في حزمة التكافؤ ثقبًا وتصبح ناقلية من النوع P عند زيادة التطعيم [9].

2.3.I. نصف ناقل من نوع N

يتبلور السيليكون (Si) أو الجرمانيوم (Ge) في بنية بلورية ترتبط فيها كل ذرة بأربع ذرات مجاورة عبر روابط تساهمية، تحتوي كل منها على إلكترونين.

عند إدخال ذرة تحتوي على خمس إلكترونات تكافؤ (مثل الفوسفور (P) أو الزرنيخ (As))، فإن هذه الذرة تحل محل ذرة من البلورة. تشارك أربعة من إلكترونات مطعمة في الروابط الأربعة مع الذرات المجاورة في البلورة، بينما يبقى الإلكترون الخامس وحيدًا. يُنسب إلى هذه الذرة المطعمة مستوى طاقة يعرف بـ "مستوى المانح"، ويقع هذا المستوى أسفل نطاق التوصيل مباشرةً. الشكل (2.I) نظرًا لأن النطاق بين هذا المستوى ونطاق التوصيل صغير، يسمح لإلكترون من مستوى مانح أن ينتقل بسهولة إلى نطاق التوصيل تحت تأثير الإثارة الحرارية ويزيد من نقل الكهربائي. في درجة حرارة الغرفة، تتأين جميع الشوائب تقريبًا وتصبح ناقلية من النوع N عند زيادة التطعيم [9].



الشكل (2.I): أنصاف النواقل نوع P ونوع N [9].

4.I. أنصاف النواقل III-V

تُعتبر أنصاف النواقل III-V موادًا تتكون من عناصر من العمود الثالث والعمود الخامس في الجدول الدوري لمندليف. من بين جميع المركبات الممكنة، تُظهر المركبات الأخف وزنًا مثل البورون (B) والألمنيوم (Al) والنيتروجين (N) بنية نطاقات ذات عصابة طاقة واسعة. على الطرف الآخر، تُعطي العناصر الثقيلة مثل الثاليوم أو البزموت مركبات ذات طابع معدني [1]. يُجمع الجدول (I-1) مقتطفًا من هذا التصنيف (الأرقام في الأعلى والأسفل تُمثل على التوالي العدد الذري والكتلة الذرية).

الجدول (1.I): جزء من عناصر جدول الدوري [10].

III	V
$^{10.81}_{5}B$	$^{14.01}_{7}N$
$^{26.98}_{13}Al$	$^{30.97}_{15}P$
$^{69.73}_{31}Ga$	$^{74.92}_{33}As$
$^{114.82}_{49}In$	$^{121.75}_{51}Sb$

5.I. خصائص أنصاف النواقل III.V

تضم عائلة نيتريدات عناصر المجموعة الثالثة، المسماة مواد III.V، بالإضافة إلى مركباتها GaN و InN و AlN. تقع العناصر الكيميائية المكونة لمواد III.V في العمودين الثالث والخامس من الجدول الدوري لمندليف (الشكل I.3)، وبالتالي فهي تنتمي إلى أنصاف النواقل من النوع III.V [11]. هذه المواد تشكل الأساس لتطوير الأجهزة الإلكترونية والبصرية الإلكترونية الحديثة.

الشكل (3.I): جدول الدوري للعناصر الكيميائية مع تمثيل الاعمدة III.V [11] .

1.5.I. أنصاف النواقل III.V الثنائية والثلاثية والرابعة

السبائك هي مزيج أو مركب من عنصرين أو أكثر. تسمى السبائك المكونة من عنصرين بالسبائك الثنائية؛ والمكونة من ثلاثة عناصر بالسبائك الثلاثية، وتتميز الأخيرة بوجود المعامل التكافئي x ؛ أما السبائك المكونة من أربعة عناصر فتسمى السبائك الرباعية، وهذا النوع من أنصاف النواقل يتضمن أربعة مركبات ثنائية، وتتميز بوجود معاملين تكافئيين x و y . عادة ما تمتلك مادة السبائك الناتجة خصائص مختلفة بشكل ملحوظ عن خصائص مكوناتها [12].

1.1.5.I. السبائك الثنائية

من بين المركبات الثنائية الممكنة، لا تمتلك جميعها نفس الأهمية المحتملة. تُظهر دراسة خصائصها، وخاصةً بنية النطاقات، أن العناصر الأخف تعطي مركبات يكون فيها عصابة طاقة واسعة وغير مباشرة، وتكون فيها الكتلة الفعالة للإلكترونات عالية. تدخل المركبات التي تحتوي على البورون (B) أو الألومنيوم (Al) أو النيتروجين (N) في هذه الفئة؛ وعادةً ما تكون ذات أهمية قليلة للإلكترونات السريعة [13]، التي تتطلب أنصاف نواقل ذات حركية عالية للحاملات، أو للإلكترونات الضوئية حيث تكون بنية النطاق المباشرة ضرورية لكي تكون الانتقالات الضوئية فعالة [14].

في الطرف الآخر، تعطي العناصر الثقيلة مثل الثاليوم (Tl) أو البزموت (Bi) مركبات تعتمد على الغاليوم (GaSb، GaAs) أو الإنديوم (InSb، InAs، InP) التي تكون خصائصها هي الأكثر إثارة للاهتمام. يلخص الجدول (I.2) بعض الخصائص لمواد مختلفة من عائلة III-V.

حيث: E_g : عصابة الطاقة الممنوعة.

m^* : كتلة الفعالة للإلكترونات.

μ : حركية الإلكترونات.

a : المسافة بين الذرات.

الجدول (2.I): بعض الخصائص لمواد مختلفة من نفس العائلة (III.V) [1].

الثنائيات من نوع III.V	$E_g (eV)$	m^*/m_0	$\mu (cm^2/Vs)$	$a(A^0)$
BN	7.5			3.6150
AIP	2.45			5.4510
AlAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
BP	2.0			4.5380
GaN	3.36	0.19	380	3.189
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

2.1.5.I. السبائك الثلاثية والرابعة

لتحسين الأداء العملي لأنصاف النواقل III-V، يتم اللجوء إلى تكوين سبائك من خلال الاستبدال الجزئي لذراتها بعناصر أخرى من نفس المجموعة. ويتحقق إنتاج السبائك الثلاثية والرابعة عبر الخطوات التالية:

الثلاثية: إذا تم استبدال ذرتين في إحدى الشبكات الفرعية، أي $A_x A_{1-x} B$.

مثال: $Ga_x In_{1-x} P$ عندما لا يكون التركيب الدقيق ذا أهمية كبيرة، نكتب ببساطة GaInP.

الرابعة: 3+1: إذا تم استبدال ثلاث ذرات في الشبكات الفرعية، أي $A_x A_y A_{1-x-y} B$

مثال: $Ga_x In_y Al_{1-x-y} As$

الرابعة: 2+2: إذا تم استبدال ذرتين في كل من الشبكتين الفرعيتين، أي $A_x A_{1-x} B_y B_{1-y}$

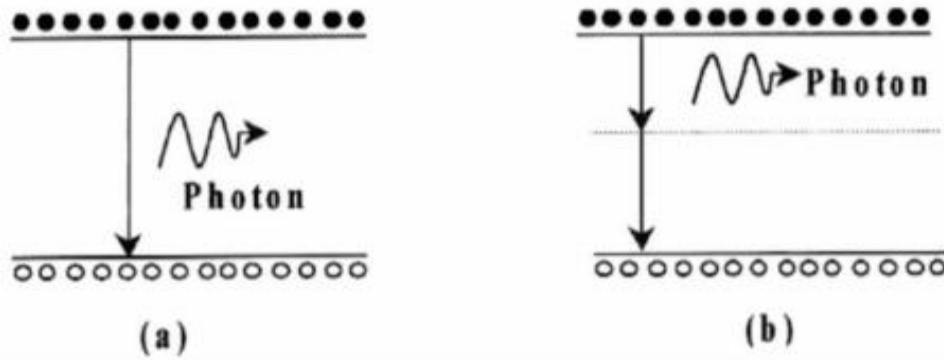
مثال: $Ga_x In_{1-x} P_y As_{1-y}$ [15].

6.I. آليات إعادة التركيب

في هذا القسم، سنستعرض أكثر آليات إعادة التركيب شيوعاً للنواقل الزائدة [16]:

1.6.I. إعادة التركيب الإشعاعي (Radiative Recombination)

إنها انتقال إلكترون من نطاق التوصيل إلى نطاق التكافؤ مصحوباً بإصدار فوتون الشكل (a.5.I). يمكن أن تحدث إعادة التركيب الإشعاعي أيضاً عبر مستويات عميقة الشكل (b.5.I) [16].



الشكل (4.I): عملية إعادة تركيب الإشعاعي (a) مباشرة، (b) غير مباشرة [16].

معدل إعادة التركيب يتناسب طردياً مع كل من عدد الإلكترونات وعدد الفجوات.

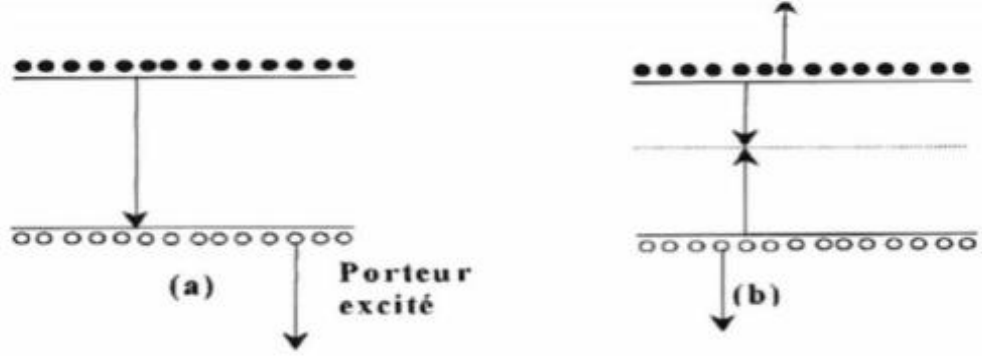
$$R_d = B(pn - n_i^2) \quad (1.I)$$

حيث:

B: هو معامل إعادة التركيب الإشعاعي، وقيمته تساوي $9.5 \times 10^{-5} \frac{cm^{-3}}{s}$.

2.6.I. إعادة تركيب أوجيه (Auger Recombination)

في هذه الآلية، يتحد إلكترون مع ثقب في نطاق التكافؤ، وتُكتسب الطاقة بواسطة حامل شحنة ثالث يمكن أن تكون إعادة تركيب أوجيه مباشرة الشكل (a.6.I) أو غير مباشرة الشكل (b.6.I). يمكن أن تحدث إعادة تركيب أوجيه غير المباشرة عندما يكون نصف ناقل مطعم بشدة [16].



الشكل (5.I): عملية تركيب أوجيه (a) مباشرة، (b) غير مباشرة [16].

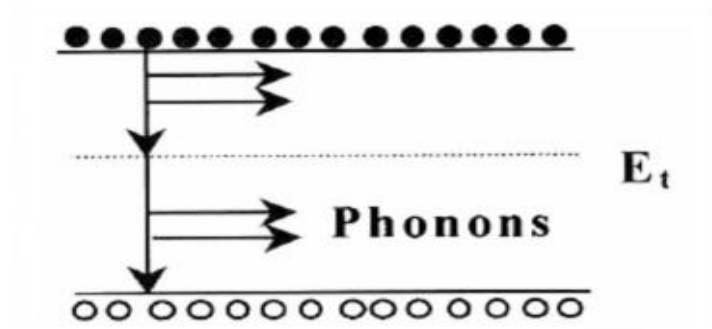
يتم تحديد معدل إعادة التركيب من خلال العلاقة التالية:

$$R = A_{Aug.n}(pn^2 - nn_i^2) + C_{Aug.p}(np^2 - pn_i^2) \quad (2.I)$$

حيث $A_{Aug.n}$ ، $C_{Aug.p}$: هي معاملات اوجيه للإلكترونات والثقوب .

3.6.I إعادة التركيب شوتكي-راد-هول (SRH)

تحدث عملية إعادة التركيب هذه بشكل غير مباشر الشكل (7.I). في الواقع، تحدث هذه العملية عبر مستويات عميقة للطاقة (E_t) تقع ضمن عصابة الطاقة، ويصاحبها اهتزازات في الشبكة (انبعاث فونونات) [16].



الشكل (6.I): عملية تركيب (SRH) [16].

يتم تحديد معدل إعادة التركيب شوتكي-راد-هول (SRH) بواسطة:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n \left(p + n_{ie} e^{-\frac{E_t}{kT}} \right) + \tau_p \left(n + n_{ie} e^{\frac{E_t}{kT}} \right)} \quad (3.I)$$

حيث:

E_t : يمثل طاقة مستوى المصيدة (level energy Trap) بالقرب من منتصف عصابة الممنوعة.
 E_i : هو مستوى فيرمي (Fermi level) في نصف ناقل النقي .

τ_n و τ_p : هما عمر الثقوب ولاكترونات ، ويتم تحديدهم من العلاقة التالية:

$$\tau_p = \frac{1}{C_p N_T} , \quad \tau_n = \frac{1}{C_n N_T}$$

n_{ie} : التركيز الجوهرى الفعال المعطى بالعلاقة التالية:

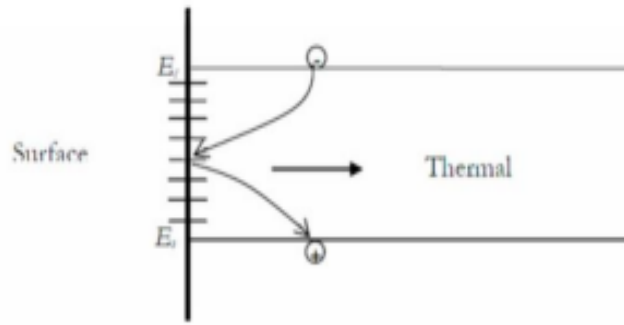
$$n_{ie}^2 = p \cdot n \cdot \exp \left(\frac{\Delta E_{gn} + \Delta E_{gp}}{KT} \right) \quad (4.I)$$

يحدث ذلك بسبب انكماش عصابة الممنوعة في نصف ناقل المطعم بشدة

ΔE_{gp} و ΔE_{gn} : يمثلان انكماش عصابة الممنوعة .

4.6.I. آليات إعادة تركيب السطح

تُعدّ عمليات إعادة التركيب التي تحدث داخل حجم المادة، كما وُصِفَت في الآليات السابقة، جزءاً من الظواهر المؤثرة. ومع ذلك، يجب أيضاً النظر في عمليات إعادة التركيب التي تحدث على سطح المادة، والتي يتم توضيح آليتها في الشكل (7.I). في هذه الحالة، يمكن تعديل نموذج آلية إعادة التركيب شوكلي-ريد-هول (SRH) بحيث يُعبر عن عمليات إعادة التركيب بوحدة المساحة السطحية بدلاً من وحدة الحجم [16].



الشكل (7.I): عملية إعادة التركيب السطح [16].

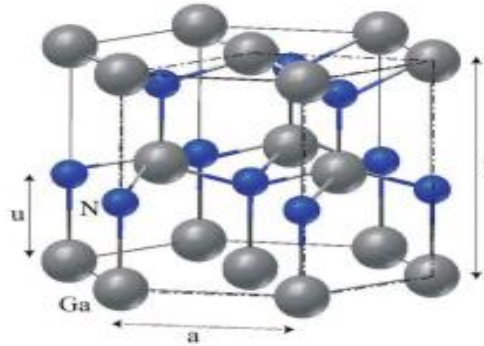
يتم تحديدها بالعلاقة التالية:

$$R_{surf} = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\tau_p \left(n_s + n_{ie} e^{\frac{E_t}{KT}} \right) + \tau_n \left(p_s + n_{ie} e^{-\frac{E_t}{KT}} \right)} \quad (1.I)$$

حيث: p_s و n_s : هما تركيز الناقلات على السطح.

7.I. البنية البلورية

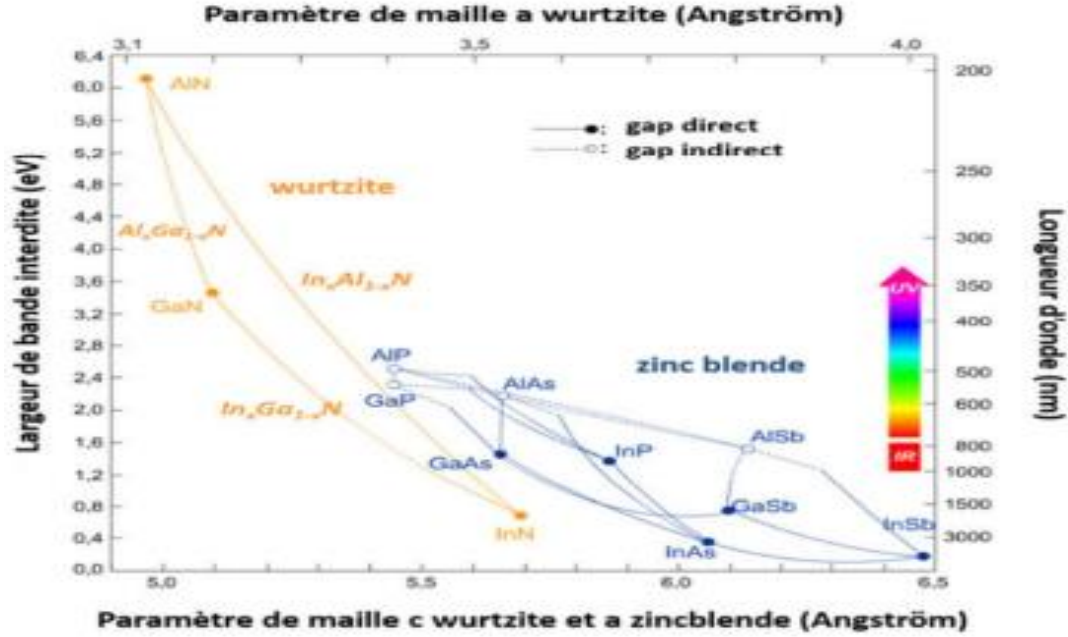
تتشكل نيتريدات عناصر المجموعة الثالثة من خلال اتحاد عنصر واحد أو أكثر من عناصر العمود الثالث في الجدول الدوري الألومنيوم (Al) والغالسيوم (Ga) والإنديوم (In) مع عنصر النيتروجين (N) من العمود الخامس. تتبلور أنصاف النواقل بشكل أساسي في شكل بنية من نوع wurtzite (WZ أو الطور α)، المستقرة عند درجة حرارة الغرفة. الأشكال الأخرى ممكنة أيضاً، مثل بنية zinc-Spalerite (zinc-Blend أو طور β) الأقل شيوعاً أو طور Halite (كلوريد الصوديوم أو الطور β) الموجود عند ضغوط عالية جداً [17].



الشكل (8.I): وحدة الخلية Wurtzite من GaN [19].

8.I. تطبيقات GaN ومركباته

عند 300K تبلغ قيمة عصابة الطاقة الممنوعة لنتريد الغاليوم (GaN) هي 3.4 إلكترون فولت (eV)، وهو ما يتوافق مع طول موجي في منطقة الأشعة فوق البنفسجية القريبة (UV) من الطيف البصري. إضافة الإنديوم (In) أو الألومنيوم (Al) تسمح بتحقيق سبائك ثلاثية من نتريد غاليوم إنديوم (InGaN) أو نتريد غاليوم ألومنيوم (AlGaN). بالاعتماد على تركيز الألومنيوم (Al) أو الإنديوم (In)، يمكن تغيير طاقة نطاق الممنوع من حوالي 0.7 إلكترون فولت (eV) لنتريد الإنديوم (InN) وإلى حوالي 6.3 إلكترون فولت (eV) لنتريد الألومنيوم (AlN). هذا يسمح بتغطية كامل النطاق الطيفي تقريباً من الأحمر إلى الأشعة فوق البنفسجية العميقة. الشكل (10.I) يوضح التغير الممكن في عرض عصابة الطاقة الممنوعة لنتريد الغاليوم (GaN) عن طريق تحقيق سبائك ثلاثية من نتريد غاليوم إنديوم (InGaN) ونتريد غاليوم ألومنيوم (AlGaN) [20].



الشكل (9.I): عصابة الطاقة والطيف المرئي مقابل ثابت الشبكة لمختلف أنصاف النواقل [20].

في التسعينيات، ظهرت أولى مصابيح LED الزرقاء المصنوعة من طبقات نتريد الغاليوم المترسبة بتقنية الإبيتاكسي على ركائز من الياقوت أو كريد السيليكون (SiC). وبإضافة مادة فسفورية، يمكن توسيع الطيف الأزرق والحصول على انبعاث بأطوال موجية متعددة، مما يؤدي إلى إنتاج الضوء الأبيض.

8.I. نتريد الغاليوم الانديوم InGaN

يعتبر نتريد الغاليوم الانديوم (InGaN) حاليًا كمادة واعدة للغاية لتطبيقات الخلايا الكهروضوئية. يتم دراسته بنشاط لأنه يمثل فئة جديدة من المواد ذات الخصائص الفريدة:

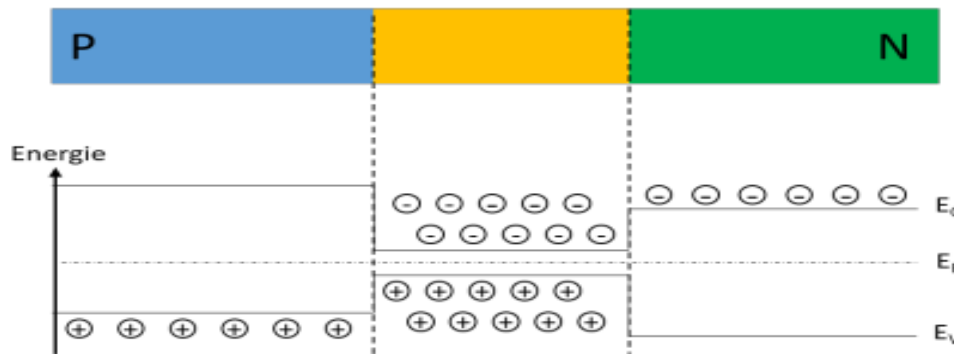
نطاق طاقة مباشرة وواسعة تسمح له بتغطية طيفية واسعة، وروابط قوية بين الذرات، بالإضافة إلى توصيل حراري قوي. يمكن تعديل عصابة طاقة الخاصة به عن طريق تغيير نسبة استبدال الانديوم في المركب. قبل دراسة المركب الثلاثي AlGaIn من الضروري دراسة الخصائص الأساسية لمركباته الثنائية، وهي نتريد الانديوم (InN) ونتريد الغاليوم (GaN) [21].

9.I. طبقة AlGaIn

في حالة الصمام الثنائي الباعث للضوء LED النيتريدية ذات الآبار الكمومية، تبرز مشكلة رئيسية وهي التركيز المنخفض للثقوب من النوع p مقارنة بتركيز الإلكترونات من النوع n. ونتيجة لذلك، تميل الإلكترونات إلى الخروج من الآبار الكمومية والذهاب لإعادة التركيب في GaN من النوع p. للحد من هذه المشكلة، كان من الضروري تطعيم الطبقة p بشكل مشترك لزيادة معدل إعادة التركيب داخل البئر الكمومي. بالإضافة إلى ذلك، يتم إدخال حاجز إلكتروني من AlGaIn بين الآبار الكمومية و GaN من النوع p.

10.I. البئر الكمي

تُستخدم الوصلات المتجانسة على نطاق واسع في صناعة أنصاف النواقل، ومع ذلك، فإنها ليست بالضرورة الأنسب لإنتاج المكونات البصرية. يسمح وضع مادتين نصف ناقلتين مختلفتين في الطبيعة معًا بالحصول على بنية تسمى الوصلة غير المتجانسة. المواد المستخدمة لهذا الغرض عادة ما يكون لها عصابة طاقة مختلفة تمامًا. يؤدي وضع هذه المواد معًا إلى تشوهات مختلفة في نطاقات التكافؤ والتوصيل، مما يسمح بالحصول على هياكل نطاقات أكثر تعقيدًا. من بين الهياكل الممكنة، نلاحظ بشكل خاص إمكانية الحصول على بئر كمي. يتم عرض هذه الوصلة في الشكل (10.I). يتم إدخال مادة ذات عصابة طاقة منخفضة عند الوصلة بين مادتين ذات عصابة طاقة أكبر. يظهر بعد ذلك وصليتين غير متجانستين. نظرًا لعصابة الطاقة المنخفضة للمادة الوسيطة، يظهر مخطط النطاق للمجموعة نقطة منخفضة في نطاق التوصيل ونقطة عالية في نطاق التكافؤ. تشكل هذه المنطقة بئرًا كميًا يميل إلى حصر كل من الثقوب والإلكترونات الحرة. كما سنرى لاحقًا، يتم استخدام البئر الكمي لتشكيل ثنائي الباعث للضوء LED [22].



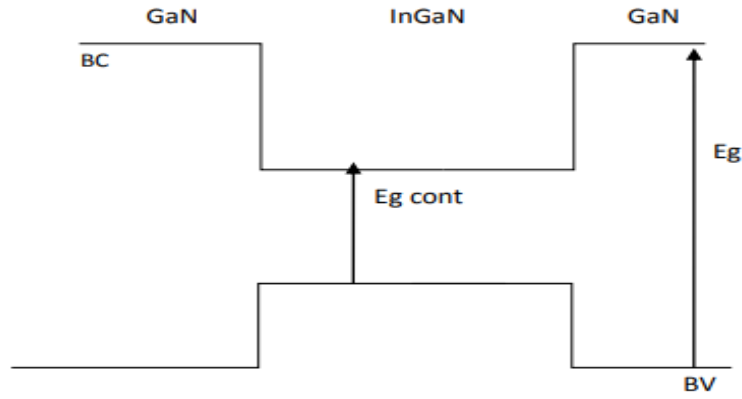
الشكل (10.I): رسم تخطيطي مبسط لنطاق لوصلة غير متجانسة مزدوجة، مع تكوين بئر كمي [22].

10.I. البئر كمي من InGaN/GaN

تحتل الآبار الكمومية InGaN/GaN مكانة محورية في أبحاث الإضاءة ذات الحالة الصلبة. سنستعرض أولاً بإيجاز النقاط الرئيسية لعمل مصباح LED ذي بئر كمي نيتريدي:

يتم إدخال الآبار الكمومية عند وصلة التقاء GaN من النوع n و GaN من النوع p، كما يوضح الشكل

(11.I) في الحالة المثالية، تنتشر الإلكترونات القادمة من النوع n نحو حزمة التوصيل للآبار الكمومية. وبالمثل، تنتشر الثقوب القادمة من النوع p نحو حزمة التكافؤ للآبار الكمومية. تستقر حاملات الشحنة بعد ذلك داخل الآبار. نظرًا لأن كثافة حاملات الشحنة n و p تكون مرتفعة داخل الآبار، يصبح إعادة التركيب الإشعاعي أسرع من إعادة التركيب غير الإشعاعي، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الجهاز. بالإضافة إلى ذلك، تكون قوة التذبذب عالية داخل الآبار الكمومية، مما يؤدي أيضًا إلى زيادة مردود مصباح LED مقارنة بالوصلة المتجانسة [23].



الشكل (11.I): البئر من InGaN/GaN [23].

الفصل الثاني:

عموميات حول الصمامات الثنائية
الباعثة للضوء

1.1.1. المقدمة

تُعد الثنائيات الباعثة للضوء (LEDs) من أبرز الابتكارات التي شهدتها مجال الإلكترونيات والبصريات في العقود الأخيرة، نظرًا لفعاليتها العالية، وعمرها الطويل، واستهلاكها المنخفض للطاقة مقارنة بمصادر الإضاءة التقليدية. تعتمد هذه الثنائيات في عملها على خواص أنصاف الوافل ، حيث يتم انبعاث الضوء نتيجة لعملية إعادة اتحاد الإلكترونات مع الثقوب في مادة نصف ناقلة ، وهي ظاهرة تعرف باسم التحليل الإشعاعي (Electroluminescence).

تطورت تقنيات تصنيع الثنائيات الباعثة للضوء تطورًا كبيرًا منذ اكتشافها الأول في الستينات، لتصبح اليوم جزءًا لا يتجزأ من العديد من التطبيقات التكنولوجية، مثل شاشات العرض، والإضاءة الذكية، والإشارات الضوئية، وحتى في المجالات الطبية والصناعية. وتُظهر هذه الأجهزة قدرة كبيرة على التحويل من الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضوئية، مع إمكانية التحكم في لون وشدة الإضاءة.

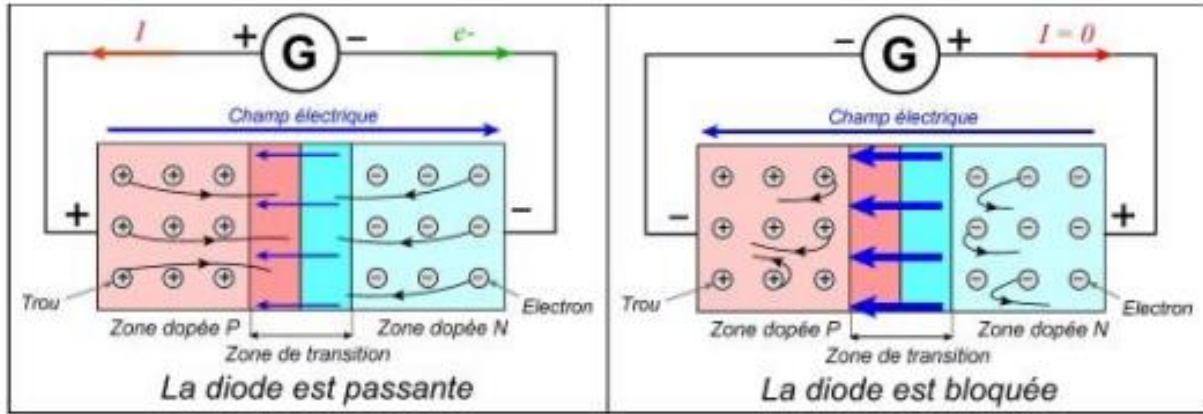
2.1.1. الصمام الثنائي الباعث للضوء LED

1.2.1. تعريف

يُمكن تعريف الصمام الثنائي الباعث للضوء، والذي يُعرف اختصارًا بـ LED، بأنه مكون إلكتروني ضوئي يُصدر الضوء عند مرور التيار الكهربائي من خلاله. ما يميز الصمام الثنائي الباعث للضوء LED هو قدرته على إصدار الضوء باستخدام مواد نصف ناقلة صلبة.

تتشابه الصمام الثنائي الباعث للضوء LED إلى حد كبير مع الثنائيات الإلكترونية التقليدية، حيث تعتمد على نفس تقنيات التصميم والمواد نصف ناقلة . يُفسر سلوكها، الذي يتراوح بين العزل والتوصيل الكهربائي، بنظرية نطاقات الطاقة. ويتأثر هذا السلوك بعوامل متعددة، مثل تصميم الجهاز، ودرجة تطعيم المواد نصف الناقلة، وأبعادها الهندسية[24].

ببساطة، يمكن تعريف مصباح LED على أنه جهاز إلكتروني يتكون من طبقتين متجاورتين من مواد نصف ناقلة، تشكلان معًا ما يُعرف بوصلة PN، وهي أساس عمل الثنائيات. لتحقيق ذلك، يتم تطعيم إحدى الطبقتين بذرات مانحة للإلكترونات (المنطقة N)، بينما تطعيم الطبقة الأخرى بذرات مستقبلة للإلكترونات (المنطقة P). هذا يخلق فرقًا في الشحنات الكهربائية بينهما، وعند تطبيق جهد كهربائي مناسب، تندمج الإلكترونات والثقوب في منطقة الوصلة، مطلقةً طاقة على شكل ضوء مرئي، كما هو موضح في الشكلين.



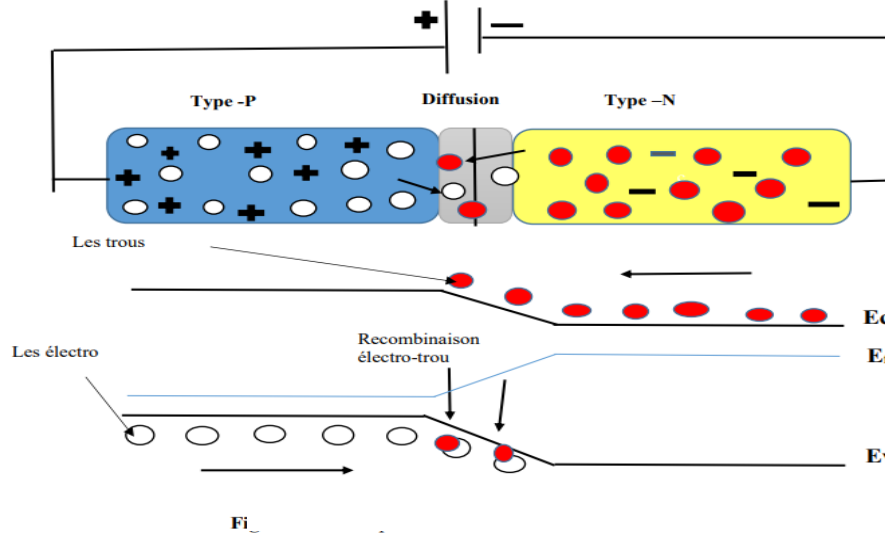
الشكل (1.II): الوصلة PN [24].

II.2.2. مراحل تطور تقنية LED

بدأت رحلة تطوير تقنية LED باكتشافات مبكرة في أوائل القرن العشرين، حيث لاحظ لويسيف التآلق الكهربائي في بلورة الكاربوراندوم في عشرينيات القرن الماضي وربطه بنظرية أينشتاين، بينما اكتشف ديسترياو التآلق الكهربائي في كبريتيد الزنك عام 1935. في الخمسينيات، قام براونشتاين بأبحاث حول انبعاث الضوء من أنصاف النواقل وحصل على براءة اختراع لـ LED خضراء عام 1958، لكن دون تطبيقات تجارية فورية. شهدت أواخر الخمسينيات والستينيات عمل بيارد وبيتمان في اكتشاف انبعاث الأشعة تحت الحمراء من الثنائيات، مما أدى إلى إنتاج أول LED تجارية تعمل بالأشعة تحت الحمراء عام 1966. ومع ذلك، كان عام 1962 هو نقطة التحول مع تطوير نيك هولونياك لأول LED تجارية في الطيف المرئي (حمراء)، مما فتح المجال لدراسة انبعاث الضوء بشكل مستقل وأدى إلى تطبيقات تجارية أولية في مجالات مثل شاشات العرض (خاصة في الآلات الحاسبة). تبع ذلك تطوير ألوان أخرى مثل الأصفر بواسطة كرافورد عام 1972 وتحسين كفاءة السطوع، بالإضافة إلى تطوير مصابيح LED عالية الكفاءة للاتصالات عبر الألياف الضوئية بواسطة بيرسال عام 1976، مما يمثل تقدمًا هامًا نحو تطبيقات أكثر تخصصًا [25].

II.3.2. مبدأ عمل الصمام الثنائي الباعث للضوء LED

عند تطبيق الإستقطاب المباشر على وصلة نصف ناقلة من نوع P-N، يتم حقن الإلكترونات، وهي حاملة الشحنة الرئيسية في المنطقة N، إلى المنطقة P حيث تتحد مع الثقوب. وبالمثل، يتم حقن الثقوب إلى المنطقة N. البنية الأساسية للثنائي الباعث للضوء (LED) تتكون من وصلة P-N مصنوعة من مواد نصف ناقلة يتم فيها تحويل الطاقة الزائدة لحوامل الشحنة بشكل أساسي إلى إشعاع ضوئي. يوضح الشكل (1.II) البنية النموذجية للثنائي الباعث للضوء ومبدأ عمله [26].



الشكل (2.II): مبدأ تشغيل ثنائي الباعث للضوء LED [26].

تحدث عملية إعادة تركيب حوامل الشحنة الزائدة في ثلاثة مناطق رئيسية ضمن وصلة N-P، وهي: منطقة شحنة الفضاء، والمنطقة المحايدة من النوع N، والمنطقة المحايدة من النوع P.

في المناطق المحايدة، يقتصر مدى الانبعاث الضوئي على مسافة انتشار حوامل الشحنة الأقلية، حيث تُعاد تركيب الإلكترونات والفجوات ضمن هذه المسافة. أما في منطقة شحنة الفضاء، فإن مساهمتها في الانبعاث الضوئي تكون ضئيلة، وذلك لأنها تتقلص بشكل كبير عند تطبيق الإستقطاب المباشر قوي على الوصلة، مما يقلل من احتمالية حدوث إعادة تركيب في هذه المنطقة.

يحدث انبعاث الفوتونات عندما يتحد إلكترون من حزمة التوصيل مع ثقب في حزمة التكافؤ داخل مادة نصف الناقلة. يمكن لهذا الانتقال الإلكتروني أن يحدث مع الحفاظ على متجه موجة الفوتون. في عملية الانبعاث، يتم تحديد طاقة الفوتون المنبعث من خلال الفرق في مستويات الطاقة بين الحالة الأولية (E_i) والحالة النهائية (E_f) للإلكترون، وفقاً للمعادلة التالية [27]:

$$h\nu = E_i - E_f \text{ (eV)} \quad (1. II)$$

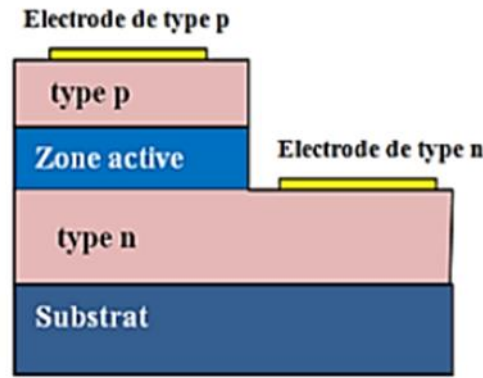
الوجه الباعث لمصباح LED هو المنطقة P لأنها الأكثر إشعاعاً لاحتوائها على منطقة إعادة التركيب

3.II. أنواع مختلفة من ثنائيات الباعثة للضوء LED

1.3.II. ثنائيات الباعثة للضوء LED ذات الوصلة المتجانسة

تتكون الوصلات المتجانسة الشكل (3.II) من نفس المادة ولكن مع اختلاف في نوع التطعيم لتشكيل وصلة P-N. يمكننا أن نتذكر أن انصاف النواقل من النوع (p) تُصنع عن طريق تطعيم نصف ناقل ذاتي التطعيم من النوع المستقبل؛ بينما يُصنع النوع (n) عن طريق التطعيم بشوائب من النوع المانح.

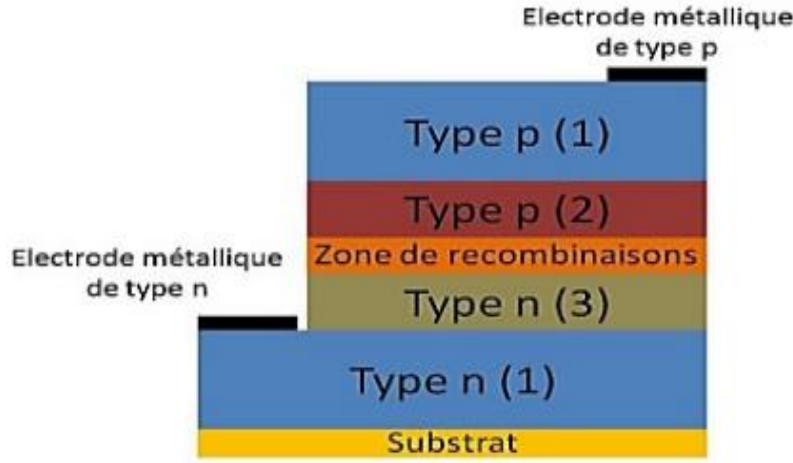
يكون اتحاد حاملات الشحنة سائداً في المنطقة p: حيث أن حركة الثقوب أقل بكثير من حركة الإلكترونات، ويؤدي ذلك إلى وجود عدد أكبر من الإلكترونات (حاملات الأقلية) في المنطقة p مقارنة بعدد الثقوب نظراً لأن الانبعاث الضوئي ينتج أساساً عن إعادة اتحاد حاملات الأقلية في المنطقة n، فإن الإشعاع الضوئي يكون أكثر فعالية من جانب المنطقة p. ولهذا السبب تُصمم الثنائيات الباعثة للضوء LED بحيث تكون طبقة المنطقة p قريبة من السطح الباعث للضوء [28].



الشكل (3.II): مخطط توضيحي يبين مبدأ عمل الصمام الثنائي الباعث للضوء LED ذو الوصلة المتجانسة [28].

II.3.2. الصمامات الثنائية الباعثة للضوء LED ذات الوصلة غير المتجانسة

تتشكل هذه الوصلة عند تلامس مادتين من أنصاف النواقل لهما قيم عصابة طاقة مختلفة، كما هو موضح في الشكل (4.II). في هذه الحالة، يعتمد حاجز الطاقة على فرق عصابة الطاقة، بالإضافة إلى تركيز الشوائب في مادتي أنصاف النواقل [29].

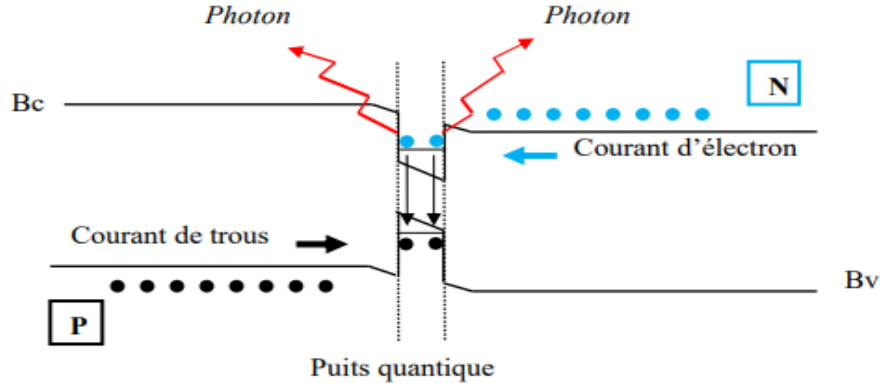


الشكل (4.II): مخطط توضيحي يبين مبدأ عمل الثنائي الباعث للضوء LED ذو الوصلة PN غير متجانسة [29].

II.3.3. الصمامات الثنائية الباعثة للضوء LED ذات الآبار الكمومية

في بنية الثنائي الباعث للضوء ذي البئر الكمومي (Quantum Well LED)، يتم تصميم طبقة رقيقة جداً (عادةً ما تتراوح أبعادها في نطاق بضعة عشرات من النانومترات) من مادة نصف ناقلة ذات عرض عصابة أصغر (المادة A)، محصورة بين طبقتين من مادة نصف ناقلة أخرى ذات عرض عصابة طاقة أكبر (المادة B). تعمل هاتان الطبقتان الأخيرتان كحاجزين للطاقة، مما يؤدي إلى تكوين بئر كمومي ذي جهد منخفض داخل المادة A. هذا البئر الكمومي يعمل على حصر كل من الإلكترونات القادمة من منطقة النوع n والثقوب القادمة من منطقة النوع p داخل هذه الطبقة الرقيقة.

إن تركيز حاملات الشحنة (الإلكترونات والثقوب) في هذا الحجم النانوي الصغير يزيد بشكل كبير من احتمالية حدوث إعادة تركيب إشعاعي بينهما، وهي العملية التي ينتج عنها انبعاث الفوتونات (الضوء). ونتيجة لذلك، يتم تحسين الكفاءة الإشعاعية للجهاز بشكل ملحوظ مقارنة بالبنى التقليدية ذات الوصلات المتجانسة. من الجدير بالذكر أن البئر الكمومي الواحد يمكن أن يصل إلى حالة الإشباع بحاملات الشحنة عند تيارات حقن عالية، حيث يصبح معدل إعادة التركيب ثابتاً، وبالتالي يحد من زيادة شدة الضوء المنبعث مع زيادة التيار [30].

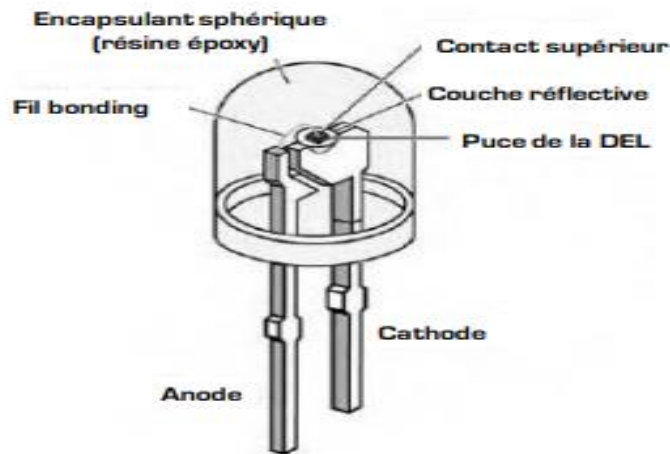


الشكل (5.II): الثنائيات الباعثة للضوء LED ذو الآبار الكمية [30].

4.II. تصنيفات الثنائيات الباعثة للضوء LED

1.4.II. ثنائيات الباعثة للضوء LED منخفضة الطاقة

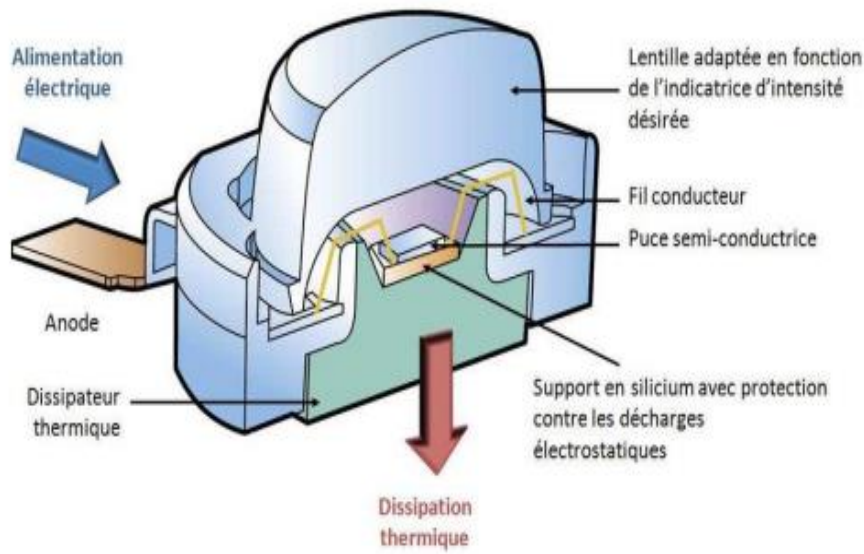
هذه ثنائي الباعث للضوء هي الأكثر شيوعاً وانتشاراً بين الناس، حيث نراها في حياتنا اليومية كمؤشرات ضوئية في الأجهزة المنزلية. وهي مصممة خصيصاً لهذا الغرض ولا تلبي متطلبات التدفق الضوئي والقوة العالية اللازمة لتطبيقات الإضاءة الرئيسية، كما أن عمرها الافتراضي محدود للغاية، كما هو موضح في الشكل (6.II) [30].



الشكل (6.II): رسم تخطيطي لل LED منخفض الطاقة [32].

2.4.II. ثنائيات الباعثة للضوء LED عالية الطاقة

الثنائيات الباعثة للضوء LED عالية الطاقة غالبًا ما تكون غير معروفة لعامة الناس، إلا أنها تشهد نموًا سريعًا وتطبيقاتها غالبًا ما يتم تجاهلها: فلاش الهواتف المحمولة، إضاءة المنازل، إلخ... يظل المبدأ الأساسي مماثلًا للهيكل السابق ولكنه يمتلك بالإضافة إلى ذلك قطعة تسمى (Heat Sink) وظيفتها تبديد الحرارة المتولدة على مستوى الشريحة. بالنسبة للإضاءة، يتم استخدام مصابيح تتكون من عدة مصابيح LED عالية الطاقة (HB: سطوع عالي، UHB: سطوع فائق العلو) متجاورة [30].



الشكل (7.II) : رسم توضيحي لمكونات ال LED عالي الطاقة [14].

الجدول التالي يبين خصائص العائلتين من الثنائيات الباعثة للضوء منخفضة الطاقة و العالية الطاقة.

الجدول (1.II): خصائص العائلتين من الثنائيات الباعثة للضوء [32].

مصابيح LED	خصائص
مصابيح LED التقليدية (منخفضة الطاقة)	سطح الوصلة: $350 \times 350 \mu m^2$ التغذية: $30 mA, 3.5V$ الطاقة $200 mw >$ التدفق الضوئي: 1-3 lumens الكفاءة الضوئية (للصمامات البيضاء): $20 lm/w$ التغليف: على شكل قبة
HB-LED عالية السطوح (طاقة عالية)	سطح الوصلة: $1 \times 1 mm^2$ التغذية: $350 mA, 3.5 V$ الطاقة $1w$ التدفق الضوئي: 5-30 lumens الكفاءة الضوئية (للصمامات البيضاء) $30 lm/w <$ التغليف: تغليف خاص (سيلكون)
UHB-LED فائقة السطوح	سطح الوصلة: $2 \times 2 mm^2$ كثافة التيار السطحية $50A/cm^2 <$ الطاقة القصوى $5w$ التدفق الضوئي: $100 lumens <$ الكفاءة الضوئية (للصمامات البيضاء) $50lm/w$ التغليف: تغليف خاص (سيلكون)
مجالات التطبيق المفضل: تطبيقات المحمول والإشارات	
مجالات التطبيق المفضل: الإضاءة الخلفية، السيارات، الإضاءة	
مجالات التطبيق المفضل: الإضاءة العامة	

5.II. الخصائص الثنائي الباعث للضوء LED

1.5.II. الخصائص الكهربائية

الصمام الثنائي الباعث للضوء هو في الأساس وصلة ثنائية من النوع p-n. يُعطى تعبير التيار بدلالة الجهد المطبق في ثنائي بعرض A بالعلاقة التالية [33]:

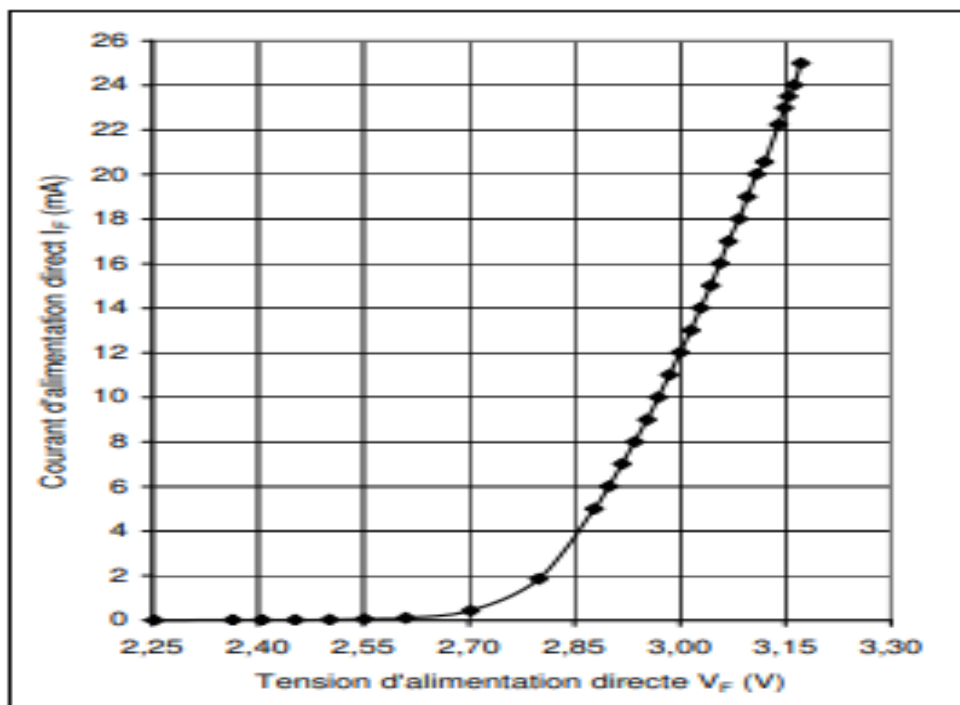
$$I = eA \left[\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right] e^{\frac{e(V-V_D)}{K_B T}} \quad (2.II)$$

حيث

$D_{n,p}$: هي ثوابت انتشار الإلكترونات والثقوب.

$\tau_{n,p}$: هي أعمار حاملات الأقلية.

N_A و N_D هما تركيزي المانحات والمستقبلات على التوالي. يُظهر الحد الأسّي زيادة حادة في التيار عند الوصول إلى الجهد V_D ، والذي يُسمى جهد العتبة. تعتمد قيمة V_D بشكل أساسي على عرض عصابة الطاقة للمادة نصف ناقلة التي تشكل الثنائي. في التشغيل الطبيعي، يُستخدم LED في وضع الإستقطاب المباشر، أي عندما يتدفق التيار من الأنود إلى الكاثود.



الشكل (8.II): خاصية التيار - الجهد للثنائي الباعث للضوء LED [34].

2.5.II. الخصائص البصرية

1.2.5.II. كفاءة الكمية

في ثنائي باعث للضوء مثالي، ينبعث فوتون واحد لكل إلكترون يتم حقنه في المنطقة النشطة. يتم إنشاء جسيم كمي ضوئي واحد (فوتون) لكل جسيم كمي للشحنة (إلكترون). ونتيجة لذلك، تتمتع المنطقة النشطة المثالية للثنائي الباعث للضوء بكفاءة كمية تساوي واحدًا. يُعرّف الكفاءة الكمية الداخلية على النحو التالي:

$$\eta_{int} = \frac{\text{number of photons emitted from active region per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}}$$

$$= \frac{P_{int}/(h\nu)}{I/e} \quad (3.II)$$

حيث:

P_{int} : الشحنة الضوئية المنبعثة من المنطقة النشطة.

I : تيار الحقن.

h : ثابت بلانك.

ν : تردد الفوتون.

e : شحنة الإلكترون الأولية.

يجب أن يسمح الثنائي الباعث للضوء للفوتونات المنبعثة من المنطقة النشطة بالخروج. في ثنائي باعث للضوء مثالي، تبعث المنطقة النشطة جميع فوتوناتها إلى الفضاء الفارغ. يتمتع هذا النوع من الثنائيات بكفاءة استخراج تساوي الوحدة. ومع ذلك، لا يتم إرسال كل الطاقة المنبعثة من المنطقة النشطة لثنائي باعث للضوء حقيقي إلى الفضاء. وينتج هذا عن عدد من عمليات الفقد. على سبيل المثال، إذا كانت مادة الركيزة للثنائي الباعث للضوء ماصة عند طول موجة الانبعاث، فقد لا يكون الضوء المنبعث من المنطقة النشطة موجودًا هناك. يُعرّف كفاءة الاستخراج الكمية على النحو التالي:

$$\eta_{extraction} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number photons emitted from activ region per second}} \quad (4.II)$$

حيث:

P : الشدة الضوئية المنبعثة إلى الفضاء الحر.

تُعرّف الكفاءة الخارجية على النحو التالي:

$$\eta_{power} = \frac{P}{P_{elec}} \quad (5.II)$$

حيث:

P_{elec} : الشدة الكهربائية المزودة للثنائي الباعث للضوء وتساوي I-V.

II.2.2.5. الشدة البصرية

يتم التعبير عن إجمالي الشدة الضوئية المشعة بواسطة الثنائي الباعث للضوء بوحدة واط لكل سنتيمتر مربع (W/cm^2) ويمكن حسابه باستخدام الصيغة التالية:

$$P = \int_A \int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda dA \quad (6.II)$$

حيث:

$I(\lambda)$: شدة الضوء الطيفية (تقاس بالواط لكل نانومتر لكل سنتيمتر مربع).

A: مساحة سطح الكرة.

تؤثر المسافة من الثنائي الباعث للضوء على الشدة، ويتم التكامل على كامل مساحة السطح [35].

II.3.2.5. طيف الضوء المنبعث

كان أول ثنائي باعث للضوء LED تم تسويقه هو الأحمر. اليوم، يمكن للثنائيات الباعثة للضوء LED أن تنتج جميع الألوان تقريبًا. حتى أن بعضها ينبعث في الأشعة تحت الحمراء أو فوق البنفسجية. ومع ذلك، فإن أي ثنائي باعث للضوء هو بطبيعته أحادي اللون، وتعتمد كفاءة تحويله على الطول الموجي للانبعاش.

يوضح الجدول التالي جهد العتبة والطول الموجي للضوء المنبعث اعتمادًا على المادة نصف ناقلة المستخدمة. كلما زادت عرض عصابة الطاقة زاد جهد العتبة، قل الطول الموجي للضوء المنبعث من المادة نصف ناقلة.

الجدول (2.II): انصاف النواقل حسب لون الضوء المطلوب [36].

منطقة الطيف الكهرومغناطيسي	طول الموجي $\lambda(nm)$	الجهد المباشر $V_F(V)$	انصاف النواقل المستخدمة
تحت الأحمر (اشعة تحت الحمراء)	$\lambda > 780$	$V_F < 2.5$	أرسنيد الألمنيوم الغاليوم (AlGaAs) أرسنيد الغاليوم (GaAs) فوسفيد أرسنيد غاليوم الانديوم (InGaAs)
احمر	$610 < \lambda < 780$	$1.5 < V_F < 3$	فوسفيد ألمنيوم غاليوم الانديوم (AlGaInP) أرسنيد غاليوم ألمنيوم (AlGaAs) أرسنيد فوسفيد الغاليوم (GaAsP) فوسفيد الغاليوم (GaP)
برتقالي	$590 < \lambda < 610$	$2 < V_F < 2.5$	فوسفيد ألمنيوم غاليوم الانديوم (AlGaInP) أرسنيد فوسفيد الغاليوم (GaAsP) فوسفيد الغاليوم (GaP)
اصفر	$570 < \lambda < 590$	$1.5 < V_F < 3$	فوسفيد ألمنيوم غاليوم إنديوم (AlGaInP) أرسنيد فوسفيد الغاليوم (GaAsP) فوسفيد الغاليوم (GaP)
اخضر	$500 < \lambda < 570$	$1.5 < V_F < 3$	نتريد غاليوم الانديوم (InGaN) فوسفيد الغاليوم (GaP) فوسفيد ألمنيوم غاليوم الانديوم (AlGaInP)
ازرق	$450 < \lambda < 500$	$2.5 < V_F < 4$	نتريد غاليوم إنديوم (InGaN) سيلينيد الزنك (ZnSe) كربيد السلكون (SiC)
بنفسجي	$380 < \lambda < 450$	$3 < V_F < 5$	نتريد غاليوم إنديوم (InGaN) نتريد الغاليوم (GaN)
فوق بنفسجي	$\lambda < 380$	$3 < V_F < 5$	نتريد غاليوم إنديوم (InGaN) نتريد غاليوم ألمنيوم (AlGaN) نتريد غاليوم (GaN) نتريد ألمنيوم غاليوم إنديوم (AlGaInN) نتريد ألمنيوم (AlN)
ابيض		$3 < V_F < 5$	نفس مواد الأزرق أو فوق البنفسجي مع فوسفور

7.II. مزايا وعيوب ثنائيات الباعثة للضوء LED

1.7.II. المزايا

- مقاومة ميكانيكية ممتازة (للصدمات ، والاهتزازات...) مما يجعلها قابلة للنقل.
- كفاءة في استهلاك الطاقة: تستهلك طاقة قليلة جداً (بضع عشرات من الميلي واط) بفضل كفاءتها العالية.
- عمر افتراضي أطول بكثير من من الثنائيات الباعثة للضوء التقليدي. ومع ذلك، فإن الثنائيات الزرقاء لها عمر افتراضي أقل بثلاث مرات من الألوان الأخرى للثنائيات الحمراء والخضراء والصفراء.
- حجم صغير: أصغر بكثير من الثنائيات الباعثة للضوء التقليدية، مما يتيح تصميم إضاءة بأشكال مبتكرة عند تجميعها.
- تشغيل بجهد منخفض جداً (TBT): يوفر الأمان وسهولة النقل، ويستخدم في تطبيقات مثل مصابيح الطوارئ التي تعمل بالدينامو اليدوي.
- سرعة استجابة عالية: يمكنها الإضاءة والانطفاء بسرعة كبيرة، مما يجعلها مناسبة تماماً لتطبيقات نقل الإشارات مثل الألياف البصرية.
- وصول فوري للسطوع الكامل: تصل إلى أقصى شدة إضاءة فور تشغيلها.
- نظراً لقدرتها، فإن الثنائيات الباعثة للضوء الكلاسيكية 5 mm لا تسخن تقريباً ولا تحرق الأصابع. بالنسبة للتركيبات ذات القدرة التي تزيد عن 1 واط ، يجب توفير تبديد للحرارة وإلا ستتضرر الثنائيات بشدة أو حتى تتلف بسبب التسخين. في الواقع، تحول الثنائيات الباعثة للضوء حوالي 20٪ من الطاقة الكهربائية إلى ضوء، بينما ينطلق الباقي على شكل حرارة.
- غياب الآثار الجانبية (في الاستخدام العادي): لا توجد آثار جانبية على العين [37].

2.7.II. العيوب

- كفاءة إضاءة أقل (للمصابيح عالية القدرة): مقارنة بأنواع إضاءة أخرى.
- طيف أزرق ضار: تحتوي مصابيح LED الزرقاء والبيضاء على طيف أزرق مكثف يمكن أن يكون خطراً على شبكية العين عند التعرض له بشكل مباشر أو حتى غير مباشر.
- تأثير درجة الحرارة: تتأثر كفاءة و سطوع مصابيح LED بارتفاع درجة الحرارة، مما يقلل من عمرها الافتراضي ويؤثر على موثوقيتها، خاصة للمصابيح عالية القدرة.

- في وضع العلاج الضوئي الديناميكي، يتسبب التفاعل الكيميائي في إحساس حارق شديد غالبًا ما يكون غير محتمل خاصة بالنسبة للمناطق الكبيرة المعالجة [37].

8. II. مجالات استخدام الثنائي الباعث للضوء LEDs

استخدامات الـ LEDs (الصمامات الثنائية الباعثة للضوء):

- عرض المعلومات:

تُستخدم في لوحات الإشارات، والشاشات الكبيرة الخاصة بوسائل الاتصال وغيرها.

- نقل المعلومات:

تُستخدم الـ LEDs منخفضة القدرة في أجهزة التحكم عن بُعد لمختلف الأجهزة المنزلية (مثل أجهزة التلفاز، أنظمة الصوت، مشغلات DVD...). كما تُستخدم أيضًا مع الألياف البصرية في تطوير شبكات الإنترنت ذات السرعة العالية.

- الإضاءة:

في المركبات: تُستخدم في الإضاءة الداخلية للسيارة، والإضاءة الخلفية للعدادات، كما تُستخدم في المصابيح الأمامية كأضواء نهائية، وكذلك في الأضواء الخلفية وأضواء الفرامل.

في أجهزة التلفاز والهواتف المحمولة: تُستخدم في شاشات أجهزة التلفاز، وتساهم أيضًا في تقليل سُمك الشاشات بفضل الحجم الصغير جدًا لوحدة الـ LED المركبة على السطح (CMS).

الديكور: تُستخدم LEDs منخفضة القدرة داخل السيارة، وتُستخدم LEDs عالية القدرة في مقاعد الركاب.

في المجال البيولوجي: تُستخدم LEDs في مجال البحث العلمي لدراسة نمو النباتات، حيث تُحاكي الإضاءة الطبيعية لإجراء دراسات طويلة الأمد.

الفصل الثالث: **المحاكاة، النتائج والمناقشة.**

1.III. المقدمة

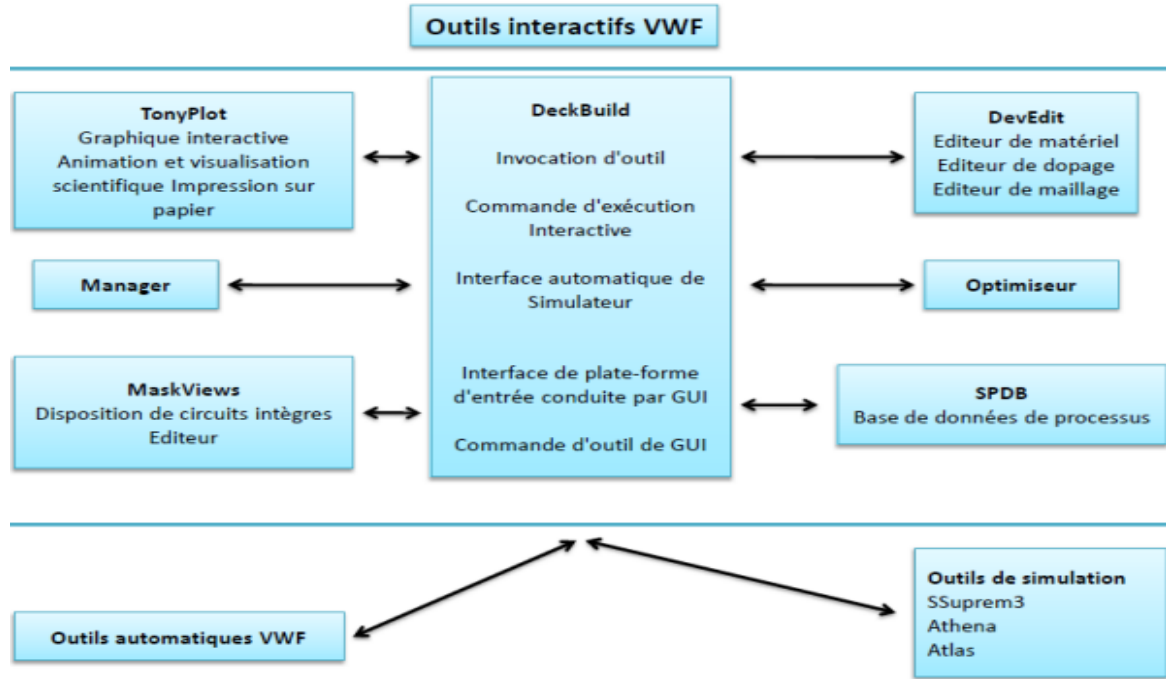
تم تصميم SILVACO باستخدام أداة المحاكاة ATLAS خصيصًا للنمذجة ثنائية وثلاثية الأبعاد للمكونات القائمة على فيزياء أنصاف النواقل ، بما في ذلك الخصائص الكهربائية والبصرية والحرارية. وهو قادر على تقدير الخصائص الكهربائية والبصرية لمعظم مكونات أنصاف النواقل .

كما في هذا الفصل، سنقدم برنامج المحاكاة TCAD-SILVACO الذي استخدمناه في عملنا لمحاكاة الثنائي الباعث للضوء LED ، مع توضيح طريقة عمل البرنامج وأوامره المختلفة (تعليماته البرمجية) الضرورية لعملية البرمجة في ATLAS. كما سيتم في هذا الجزء عرض النتائج التي توصلنا إليها من خلال محاكاة تأثير درجة الحرارة على ثنائي باعث للضوء InGaN/GaN.

2.III. عرض برنامج المحاكاة SILVACO

يُعد برنامج SILVACO (اختصارًا لـ Silicon Valley Corporation) برنامجًا يُستخدم لتصميم، ونمذجة، ومحاكاة أداء الأجهزة نصف ناقلة قبل البدء في تصنيع النماذج الأولية التجريبية. يُعتبر هذا البرنامج مفيدًا جدًا في مشاريع البحث والتطوير، حيث يُساهم في تقليص مدة التجارب، مما يؤدي إلى خفض تكاليف التصميم والتصنيع للأجهزة الإلكترونية [39].

حيث يحتوي برنامج SILVACO على مجموعة من أدوات المحاكاة والأدوات التفاعلية التي تسمح بتصميم وتحليل معظم الأجهزة نصف ناقلة تُعرف هذه المجموعة باسم VWF (Virtual Wafer Fab)، وقد تم توضيح المكونات الأساسية لهذا النظام في الشكل (1.III) [40].



الشكل (1.III): مخطط هيكل LED [41].

يتضمن TCAD-SILVACO نماذج فيزيائية جديدة تعتمد على أساليب وخوارزميات عديدة فعالة، وتقنيات حديثة لإنشاء شبكات المحاكاة (maillage)، إضافةً إلى حلول تحسين خطية وغيرها. كل هذه العناصر تُمكن البرنامج من إنتاج نتائج محاكاة تكون قريبة جدًا من النتائج العملية الواقعية.

الميزة الأهم لهذا النوع من المحاكات هي أنه يسمح بمشاهدة وتحليل الظواهر الفيزيائية داخل الجهاز في الفضاء، وهي ظواهر يصعب ملاحظتها أو الوصول إليها عمليًا، مما يجعله أداة تعليمية ممتازة لفهم عمليات التصنيع التكنولوجي.

تُستخدم وحدات TCAD-SILVACO لأغراض متعددة، من بينها:

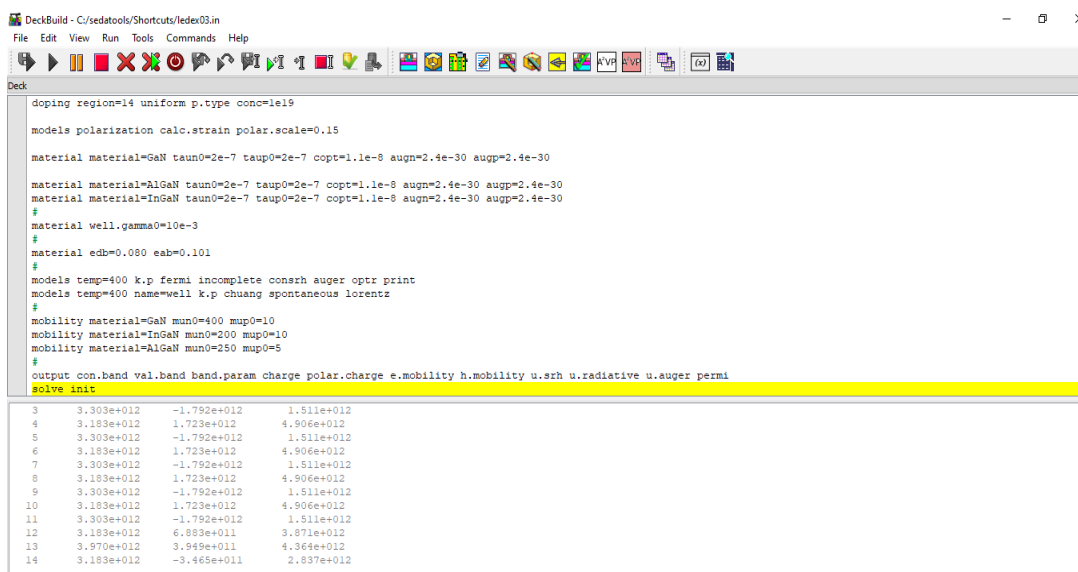
- محاكاة مراحل التصنيع التكنولوجي، مثل الأدوات: ATHENA، SSuprem3، وغيرها.
- محاكاة الخصائص الكهربائية للأجهزة الإلكترونية مثل: الديودات، ترانزستورات MOSFET، الترانزستورات ثنائية القطب، وذلك باستخدام أداة ATLAS.
- استخدام VWF (Virtual Wafer Fab) لمحاكاة تصنيع الرقائق الإلكترونية [39].

أما في هذا العمل، فقد تم اعتماد وحدة ATLAS لتنفيذ المحاكاة وتحليل الأداء الكهربائي للأجهزة المدروسة.

سيتم عرض الوحدات المستخدمة فقط في هذا العمل:

Deckbuild.1.2.III

هو إطار تشغيل قوي يسمح للمستخدم بالانتقال بسلسلة من محاكاة العمليات إلى محاكاة الأجهزة واستخراج نماذج SPICE. من السهل استخدام إطار التشغيل لتشغيل المحاكيات الأساسية مثل ATLAS. يساهم Deckbuild في إنشاء ملفات الإدخال لـ ATLAS. توفر العديد من النوافذ واجهات إدخال قائمة نصية أو قائمة أساسية للمعلومات المدخلة. كما يتضمن عددًا كبيرًا من الأمثلة لجميع أنواع التقنيات. يمكن أيضًا استدعاء أدوات محاكاة أخرى، مثل TONYPLOT و DEVEDIT و MASKVIEW، من Deckbuild. تساهم مُحسِّنات Deckbuild في تحسين الأهداف مثل الأبعاد الهيكلية وخصائص الأجهزة بعد الاختبارات الكهربائية المعقدة والمخرجات الوسيطة [42].



```

DeckBuild - C:/sedatools/Shortcuts/ledex03.in
File Edit View Run Tools Commands Help

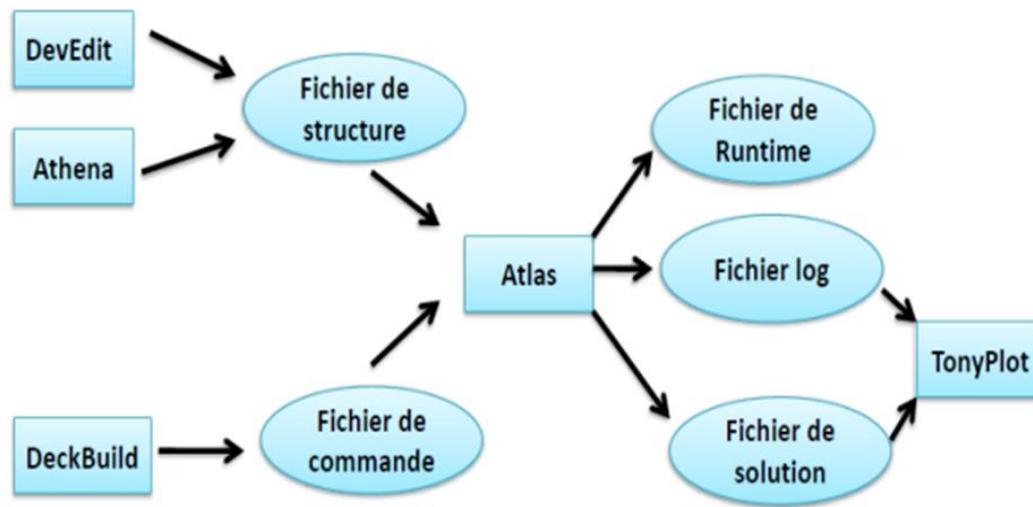
Deck
doping region=14 uniform p.type conc=1e19
models polarization calc.strain polar.scale=0.15
material material=GaN taun0=2e-7 tau0=2e-7 copt=1.1e-8 augn=2.4e-30 augp=2.4e-30
material material=AlGaN taun0=2e-7 tau0=2e-7 copt=1.1e-8 augn=2.4e-30 augp=2.4e-30
material material=InGaN taun0=2e-7 tau0=2e-7 copt=1.1e-8 augn=2.4e-30 augp=2.4e-30
#
material well.gamma0=10e-3
#
material edb=0.080 eab=0.101
#
models temp=400 k.p fermi incomplete consrh auger opti print
models temp=400 name=well k.p chuang spontaneous lorentz
#
mobility material=GaN mun0=400 mup0=10
mobility material=InGaN mun0=200 mup0=10
mobility material=AlGaN mun0=250 mup0=5
#
output con.band val.band band.param charge polar.charge e.mobility h.mobility u.srh u.radiative u.auger permi
solve init
3 3.303e+012 -1.792e+012 1.511e+012
4 3.183e+012 1.723e+012 4.906e+012
5 3.303e+012 -1.792e+012 1.511e+012
6 3.183e+012 1.723e+012 4.906e+012
7 3.303e+012 -1.792e+012 1.511e+012
8 3.183e+012 1.723e+012 4.906e+012
9 3.303e+012 -1.792e+012 1.511e+012
10 3.183e+012 1.723e+012 4.906e+012
11 3.303e+012 -1.792e+012 1.511e+012
12 3.183e+012 6.893e+011 3.871e+012
13 3.970e+012 3.949e+011 4.364e+012
14 3.183e+012 -3.465e+011 2.837e+012
    
```

الشكل (2.III): نافذة Deckbuild.

ATLAS.2.2.III

ATLAS هو برنامج محاكاة ثنائي وثلاثي الأبعاد مخصص لدراسة الأجهزة الإلكترونية القائمة على فيزياء أنصاف النواقل. يتيح هذا البرنامج التنبؤ بدقة بالسلوك الكهربائي لتلك الأجهزة، مع تقديم معلومات معمقة حول الظواهر الفيزيائية الداخلية التي تساهم في عملها. تعتمد معظم المحاكاة في ATLAS على ملفين رئيسيين الشكل (3.III): ملف أوامر نصي (Script) يحتوي على التعليمات اللازمة لتنفيذ المحاكاة، وملف هيكلي يحدد البنية الفيزيائية للجهاز قيد الدراسة. أما المخرجات، فتشمل ثلاثة أنواع من الملفات: مخرج وقت التشغيل (Runtime) الذي يعرض تقدم المحاكاة والأخطاء المحتملة، وملف السجل (Log) الذي يسجل قيم الجهد والتيار المستخلصة من تحليل أداء الجهاز، وملف الحل (Solution File) الذي يحتوي على بيانات ثنائية أو ثلاثية الأبعاد تمثل توزيع المتغيرات الفيزيائية

داخل الجهاز في حالة معينة. يتم لاحقاً عرض هذه البيانات وتحليلها بواسطة أداة التصور الرسومي TonyPlot [45].

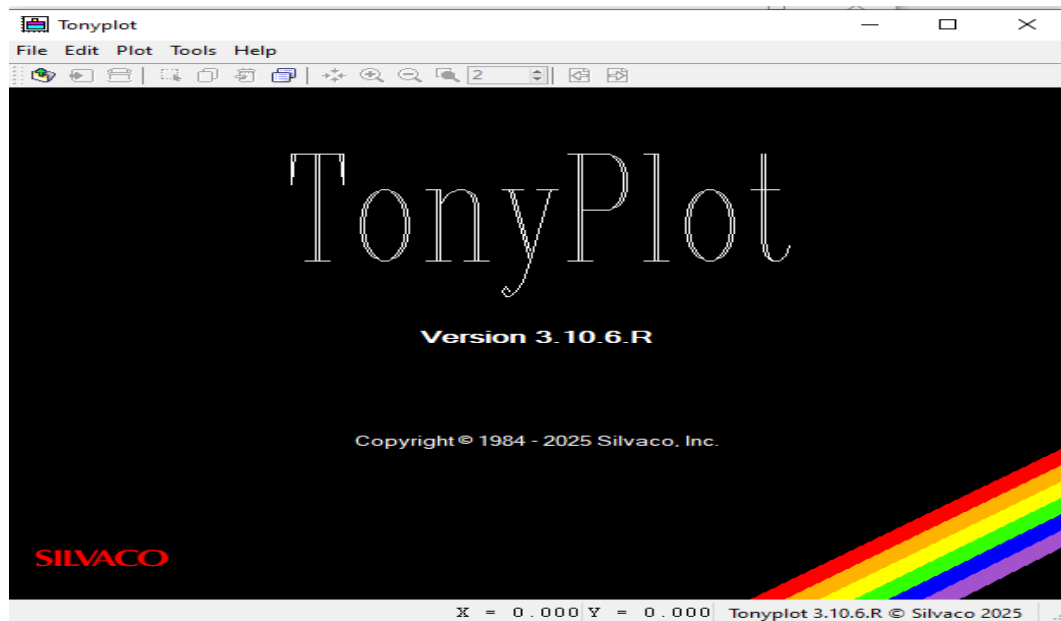


الشكل (3.III): مدخلات ومخرجات ATLAS [43].

يتميز ATLAS بقدرته على حساب التوزيعات الداخلية للجهد الكهروستاتيكي، وتراكيز حوامل الشحنة، والتيارات، كما يمكنه نمذجة العلاقات الكهربائية مثل منحنيات التيار-الجهد (I-V)، والسعة-الجهد (C-V)، وتحليل الاستجابات في الأنظمة المترددة أو الانتقالية. بعد تصميم بنية الجهاز، يتم تقسيمه إلى شبكة من العناصر المحدودة (Maillage)، وتُحسب القيم الفيزيائية في كل نقطة من هذه الشبكة باستخدام حل معادلة بواسون ومعادلات الاستمرارية، مما يوفر تصوراً دقيقاً لسلوك الجهاز في مختلف أوضاع التشغيل.

TonyPlot.3.2.III

هو أداة التصور المشتركة لمنتجات SILVACO-TCAD. يوفر وظائف شاملة لتصوير وتحليل مخرجات المحاكاة. يمكن رسم البيانات وفقاً لاختيار المستخدم، إما كبيانات 1D x-y، أو مخططات ثنائية الأبعاد 2D، أو مخططات (Smith Charts). يمكن أيضاً استيراد البيانات المقاسة ورسمها في الأنواع المذكورة أعلاه. تساعد وظيفة التراكب في مقارنة عمليات المحاكاة المتعددة. يقوم بتعليق الرسم البياني (plot) لإنشاء أشكال للتقارير والعروض التقديمية. يسمح بتقطيع رسوم الهياكل 2D إلى عدة شرائح مستقلة 1D. يتضمن Tonyplot وظائف الرسوم المتحركة التي تتيح عرض تسلسل من الرسوم البيانية بطريقة تعرض الحلول كدالة لبعض الخصائص. يمكن تغيير الخاصية بواسطة المؤشر، أو بواسطة إطارات يمكن تكرارها باستمرار، وهي ميزة مفيدة جداً في تطوير الجوانب الفيزيائية. يسمح بتراكب بيانات خاصية I-V (التيار-الجهد) أو المنحنيات 1D لفحص كيفية تأثير ظروف العملية على النتائج الكهربائية. يدعم رسم متغيرات المعادلات التي يحددها المستخدم سواء كانت بيانات كهربائية أو فيزيائية [42].



الشكل (4.III): نافذة Tonyplot .

3.III. هيكل ملف الإدخال ATLAS

يُعدّ ترتيب ظهور التعليمات في ملف الإدخال الخاص ببرنامج Atlas أمرًا بالغ الأهمية. يتوجب وجود خمس مجموعات من الأوامر تظهر بتسلسل دقيق؛ وأي مخالفة لهذا الترتيب ستؤدي إلى ظهور رسالة خطأ، مما قد ينتج عنه تنفيذ غير سليم للبرنامج أو توقفه عن العمل [29].

Group	Statements
1. Structure Specification	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	METHOD
4. Solution Specification	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	EXTRACT TONYLOT

الشكل (5.III): التصميم الهيكلي العام لبرنامج محاكاة الأجهزة البصرية والإلكترونية ضمن بيئة [29] ATLAS.

1.3.III. تحديد الهيكل المدروس Structure Specification

يتم تحديد الهيكل من خلال تعريف الشبكة والمناطق والأقطاب الكهربائية ومستوى التطعيم. يستقبل ATLAS ملفات الإدخال التي تحتوي على برامج المحاكاة من DeckBuild.

يتم استدعاء ATLAS لتنفيذ هذه الملفات باستخدام الأمر التالي: go atlas

يكون تنسيق أوامر ATLAS كالتالي [44]:

<STATEMENT> <PARAMETER> = <VALUE>

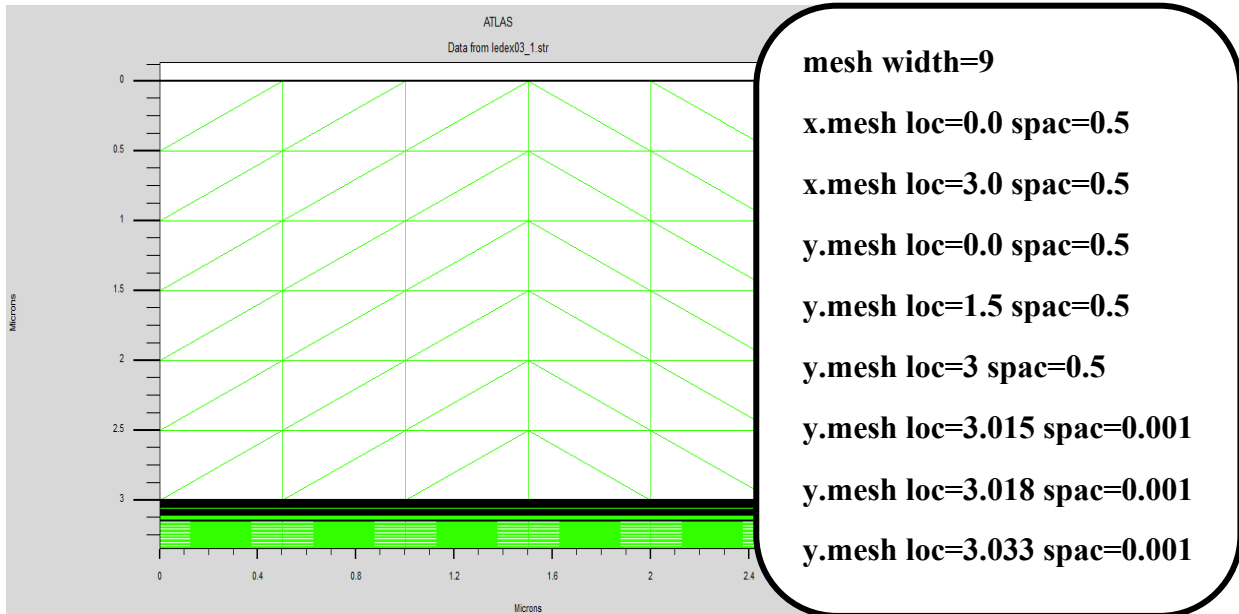
• Mesh:

هو سلسلة من الخطوط الأفقية والعمودية. في دراستنا، يكون mesh المستخدم ثنائي الأبعاد. بالتالي، يتم تحديد المعاملين x و y فقط.

الصيغة العامة لتعريف mesh هي:

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

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



الشكل (6.III): شبكة ثنائية الأبعاد.

يلعب mesh دورًا هامًا في الحصول على نتائج محاكاة جيدة. يجب أن يتم اختيار الـ region بطريقة تحقق موازنة بين سرعة التنفيذ ودقة النتائج، حيث ينتج mesh ذو خطوة كبيرة محاكاة سريعة، لكن النتائج تكون أقل دقة، بينما ينتج mesh ذو خطوة صغيرة تباطؤًا في المحاكاة، لكنه يعطي نتائج أكثر دقة. لذلك، يُعتبر الـ mesh الدقيق أكثر أهمية من وجهة نظر الحصول على نتائج محاكاة جيدة [45].

• REGION:

عد تعريف ال mesh، من الضروري تعريف region. صيغة تعريف المناطق هي كالتالي:

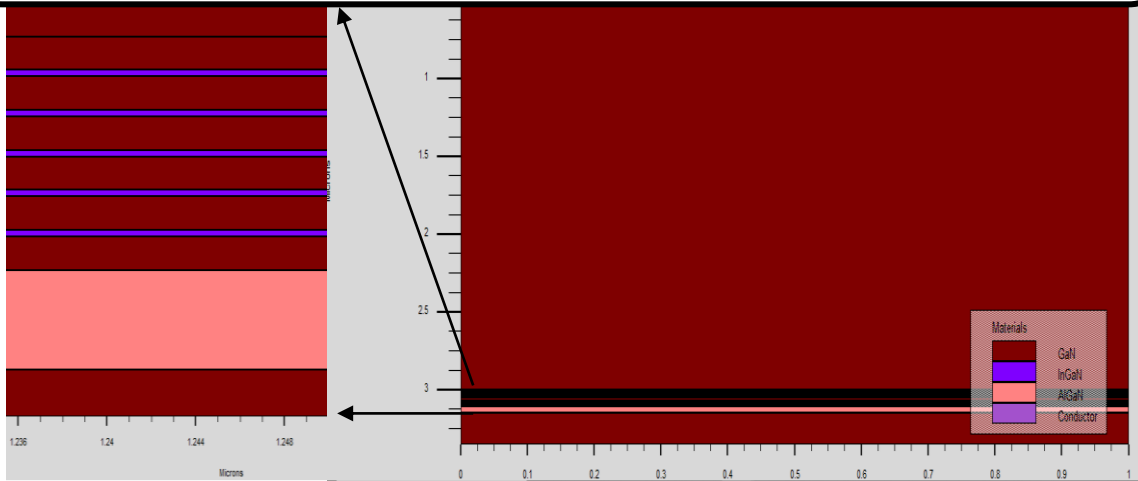
REGION number=<integer><material_type> / <position parameters>

يوضح الشكل الأوامر المستخدمة لتحديد المناطق، ويتم تحديد حدود كل منطقة بشكل صريح في المحورين x و y. يبقى تعيين مادة لكل منطقة.

region number=1 X.min=0 X.max=3 y.min=0 y.max=3 material=GaN

region number=2 X.min=0 X.max=3 y.min=3 y.max=3.015 material=GaN

region number=3 X.min=0 X.max=3 y.min=3.015 y.max=3.018 material=InGaN
x.comp=0.16 name=well led qwell



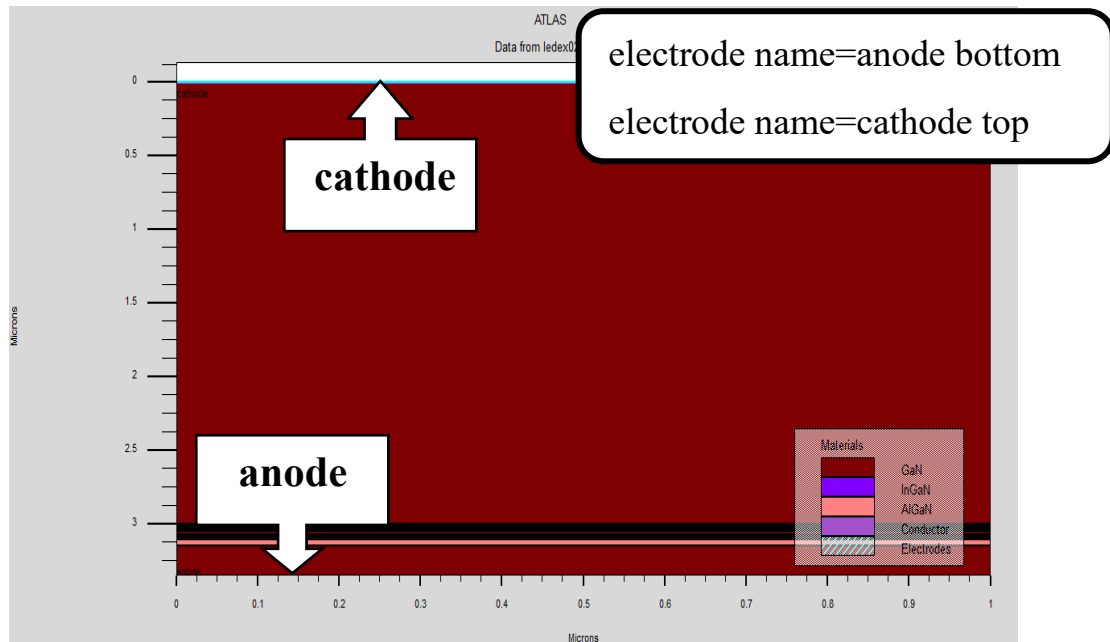
الشكل (7.III): تعريف المناطق.

• ELECTRODE:

يسمح بتعريف الأقطاب الكهربائية الخاصة بالشبكة الأنود والكاثود.

صيغة تعريف الأقطاب الكهربائية هي كالتالي:

ELECTRODE NAME=<electrode name><position parameters>



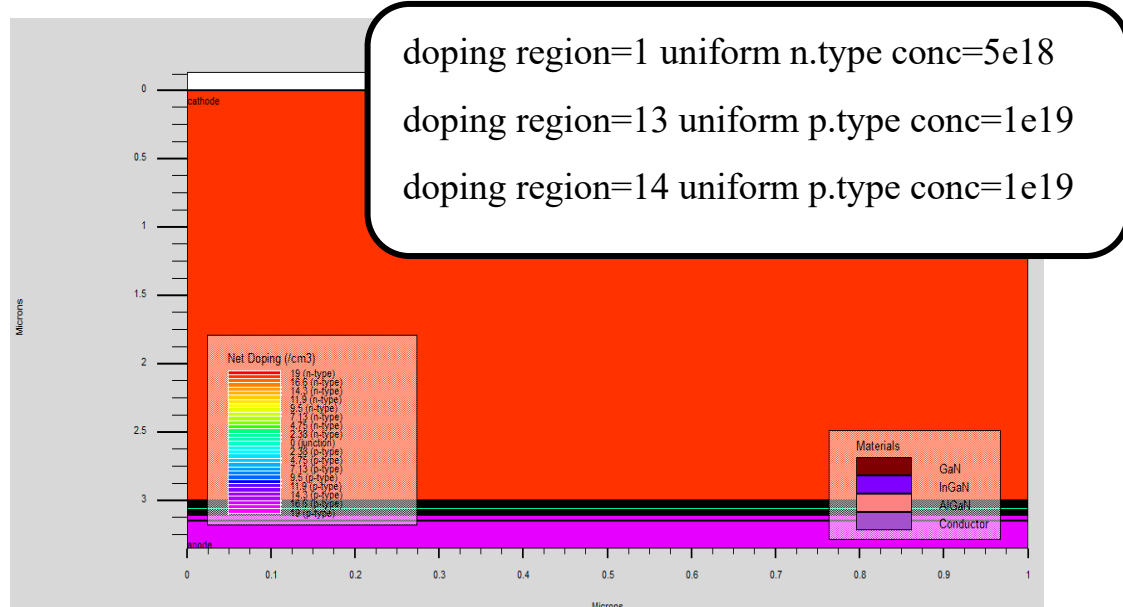
الشكل 8.III: تعريف الأقطاب الكهربائية.

• DOPING:

الجانب الأخير في بناء الهيكل هو التطعيم. يمكن أن يكون التطعيم من النوع n أو p ، كما يمكن أن يكون التوزيع منتظمًا .

صيغة تعريف التطعيم في برنامج "Atlas" هي كالتالي:

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



الشكل (9.III): تعريف التطعيم.

III.2.3. تحديد النماذج الفيزيائية Material Models Specification

بعد بناء الهيكل، من الضروري تحديد النماذج الفيزيائية وتحديد المواد. يتضمن تحديد النماذج والمواد أربع خطوات [45]:

• MATERIAL:

يربط معاملات فيزيائية بالمواد الموجودة في الشبكة. يحتوي البرنامج على معاملات مواد معرفة افتراضياً لأنصاف النواقل القياسية.

صيغة تعريف المادة هي كالتالي:

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

• MODELS:

تحدد هذه التعليمات تضمين آليات فيزيائية مختلفة (مثل إعادة التركيب والتنقل...)، ويعتمد اختيار النموذج على المواد المستخدمة في المحاكاة.

صيغة تعريف النموذج هي كالتالي:

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

• CONTACT:

تحدد الخصائص الفيزيائية لقطب كهربائي (المقاومة النوعية، دالة الشغل، ...).

صيغة تعريف جهة الاتصال هي كالتالي:

Contact nombre = < n > | NOM = <name> | ALL

• INTERFACE:

تحدد معاملات الواجهة على حدود أنصاف النواقل أو العوازل. تنطبق جميع المعاملات فقط على عقد الحدود باستثناء الحالات التي تم تحديدها فيها بالفعل.

صيغة تعريف الواجهة هي كالتالي:

INTERFACE [<parameters>]

III.3.3. اختيار الطريقة العددية Numerical Method Selection

• METHOD:

في برنامج ATLAS، توجد بشكل أساسي طريقتان عدديتان لحل المعادلات: طريقة Newton e وطريقة Gummel. تتوافق طريقة Newton مع الحل التكراري لنظام يجمع المعادلات التفاضلية الثلاث التي تحكم عمل الهيكل. أما طريقة Gummel فتعتمد على فصل النظام الكلي الموصوف سابقاً إلى ثلاثة أنظمة فرعية: يتم حل المعادلات الثلاث بشكل تكراري الواحدة تلو الأخرى حتى يتم الوصول إلى التقارب الكلي للحلول. تكمن الميزة المحتملة لهذه الخوارزمية مقارنة بخوارزمية Newton في تقليل أبعاد الأنظمة المصفوفية المطلوب حلها، مما يسمح مبدئياً بتقليل وقت الحساب.

III.4.3. تحديد الحلول Solution Specification

بعد اختيار الطريقة العددية، من الضروري تحديد الحلول. يتم تحديد الحلول بواسطة الإعلانات التالية: LOG و SOLVE و LOAD و SAVE [46].

• LOG:

يسمح بحفظ جميع الخصائص النهائية للمحاكاة في ملف (يفتح ملفاً من نوع log). تجدر الإشارة إلى أن كلمة log بحروف صغيرة تعني نوع الملف، بينما LOG بحروف كبيرة تعني الأمر في البرنامج. المعلومات المحفوظة هي من النوع الكهربائي. كما يتم تخزين أي خاصية محددة بواسطة الأمر PROBE في ملف من نوع log. إذا كان هناك عدة أوامر LOG في البرنامج، ففي كل مرة يتم إغلاق ملف السجل الذي تم فتحه سابقاً ويتم فتح ملف سجل جديد.

• SOLVE:

يأتي إعلان SOLVE بعد إعلان LOG. يقوم SOLVE بإجراء حل لنقطة تحيز واحدة أو عدة نقاط تحيز.

• LOAD:

تحميل الحلول السابقة من الملفات كتقديرات أولية لنقاط تحيز أخرى.

• :SAVE

حفظ جميع معلومات نقطة (عقدة) في الشبكة في ملف إخراج (ملفات الإخراج من نوع structure). تتوافق المعلومات المحفوظة مع حالة كهربائية محددة تمامًا.

III.5.3. تحليل النتائج Results Analysis

بمجرد العثور على حل لمشكلة جهاز أنصاف النواقل، يمكن عرض المعلومات بشكل رسومات.

• :EXTRACT

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

• :TONY PLOT

يبدأ تشغيل برنامج "TonyPlot" الذي يسمح بالتمثيل الرسومات للبيانات.

III.4. المعادلات والنماذج الأساسية لأنصاف النواقل في برنامج ATLAS.SILVACO

III.4.1. معادلات بواسون

لمعادلة التفاضلية الجزئية المعروفة باسم معادلة بواسون معرفة كالاتي [47]:

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = \rho \quad (1.III)$$

حيث:

ψ : هو الجهد الكهروستاتيكي.

ϵ : هي سماحية الوسط المحلية.

ρ : هي كثافة الشحنة الحجمية.

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.III)$$

III.2.4. معادلات الاستمرارية

تصف معادلات الاستمرارية معدل تغير تركيز حاملات الشحنة مع الزمن. تُعطى معادلات الاستمرارية للإلكترونات والثقوب بالصيغتين التاليتين [48-50]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \end{array} \right. \quad (3.III)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \end{array} \right. \quad (4.III)$$

حيث أن:

G_n و G_p هما تركيز الإلكترونات والثقوب على التوالي.

R_n و R_p هما معدلا إعادة التركيب (الداخلي) للإلكترونات والثقوب على التوالي.

J_p و J_n هما كثافتا التيار للإلكترونات والثقوب على التوالي.

3.4.III معادلات النقل

في أنصاف النواقل، يُعد الانجراف (حركة الشحنة بفعل المجالات الكهربائية، وهو الحد الأول في المعادلات) والانتشار (تدفق الشحنة الناتج عن تدرجات الكثافة، وهو الحد الثاني في المعادلات) نمطي النقل الأساسيين [49].

المعادلات:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \frac{dn}{dx} \end{array} \right. \quad (5.III)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \end{array} \right. \quad (6.III)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}\psi} \end{array} \right. \quad (7.III)$$

حيث:

μ_p و μ_n هما قابلية حركة الإلكترونات والثقوب.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} D_n = \left(\frac{KT}{q}\right) \mu_n \end{array} \right. \quad (8.III)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_p = \left(\frac{KT}{q}\right) \mu_p \end{array} \right. \quad (9.III)$$

III.5. نتائج المحاكاة

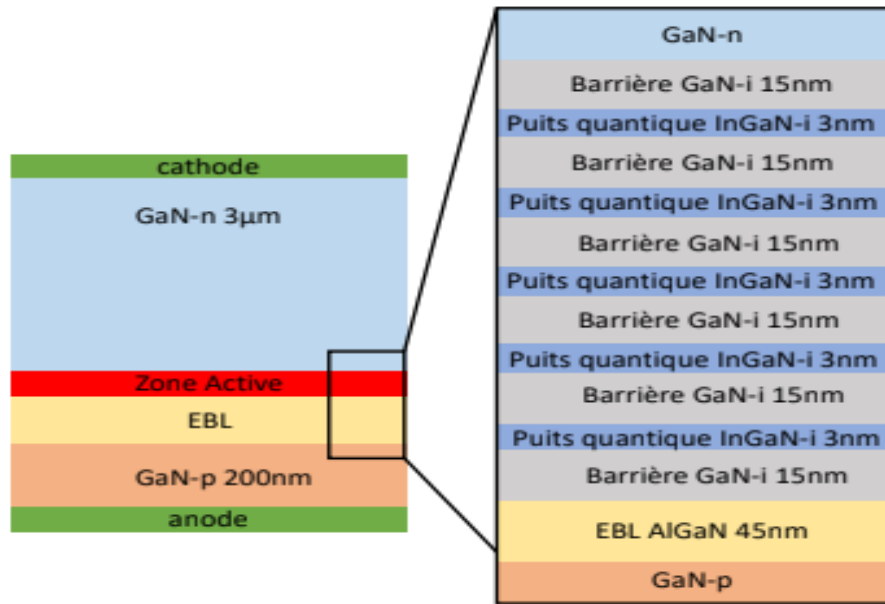
III.5.1. بنية الصمام الثنائي الباعث للضوء LED المحاكى

يهدف هذا الفصل إلى محاكاة عمل صمام ضوئي باعث للضوء MQW-LED قياسي ينبعث منه الضوء، حيث تم توضيح بنيته في الشكل (III.10). وهو عبارة عن LED ذو شكل مستطيل بمقطع عرضي يبلغ 3 ميكرومتر $\times$ 3 ميكرومتر.

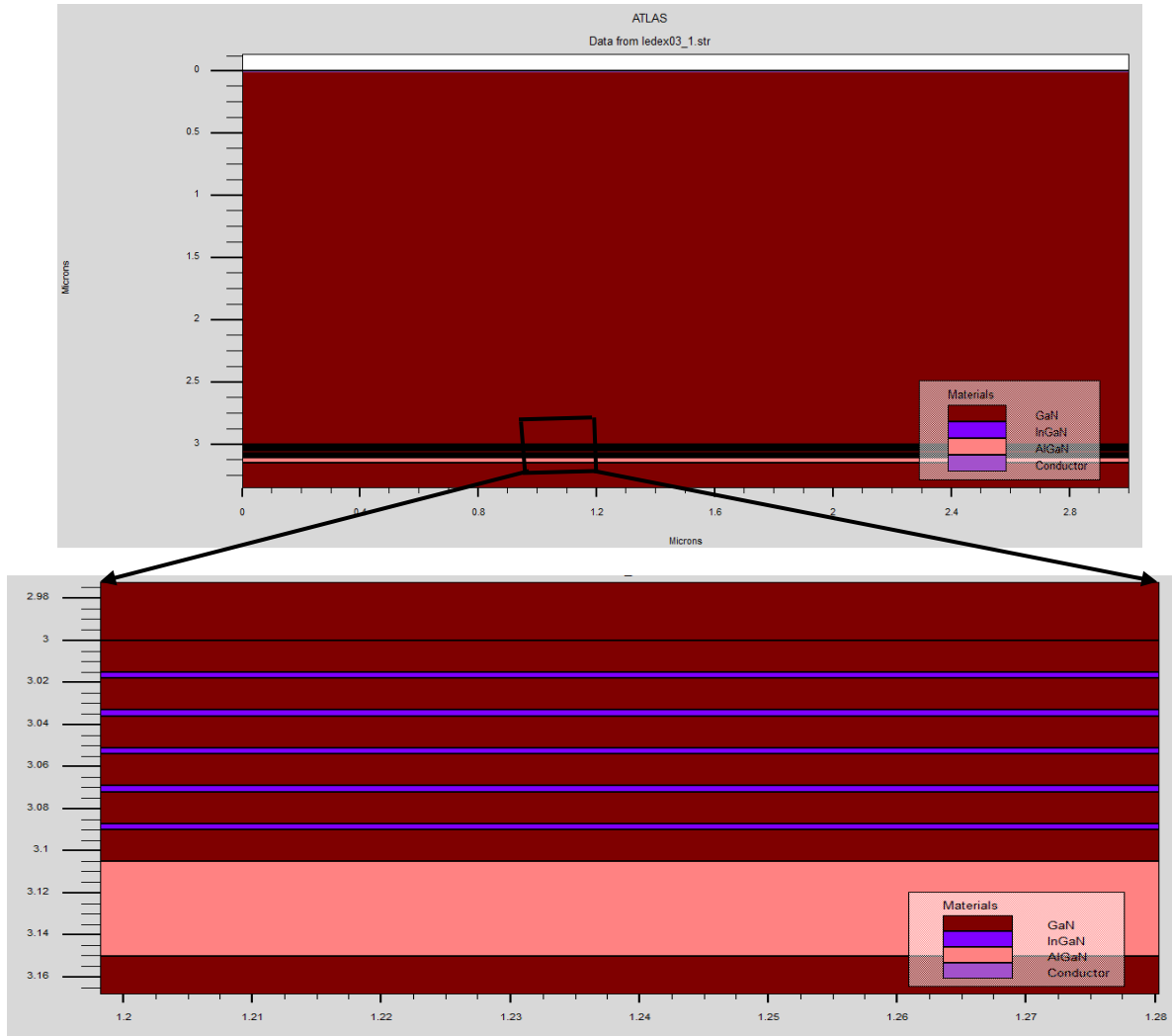
تتكون بنية هذا الـ LED من الأعلى إلى الأسفل في الشكل (III.10) من [50]:

جزء من GaN المطعم بالنوع n (ويشار إليه بـ "GaN-n") بسُمك 3 ميكرومتر.

منطقة نشطة تتكون من 5 آبار كمومية من InGaN بنسبة 16% من الإنديوم وسُمك 3 نانومتر مفصولة بحواجز من GaN بسُمك 15 نانومتر غير مطعمة عمداً. جزء من GaN المطعم بالنوع p (ويشار إليه بـ "GaN-p") بسُمك 200 نانومتر.



الشكل (III.10) : مخطط لصمام ثنائي الباعث للضوء LED يعتمد على أنصاف النواقل من نوع III.N [50].



الشكل (11.III): بنية ثنائي الباعث للضوء LED يعتمد على أنصاف النواقل ببرنامج SILVACO .

2.5.III. معاملات المحاكاة للصمام الثنائي الباعث للضوء (LED)

من أجل محاكاة الجهاز، من الضروري تحديد معاملات المواد المستخدمة في تصميم الجهاز تم تلخيص خصائص المواد لكل جزء من هذا الـ LED في الجدول (III.1).

ولأخذ الآليات الفيزيائية التي تحدث داخل الـ LED بعين الاعتبار، تم تفعيل النماذج المذكورة في الجدول (2.III) أثناء عمليات المحاكاة [50].

الجدول(1.III):خصائص المواد المستخدمة في عمليات المحاكاة [50].

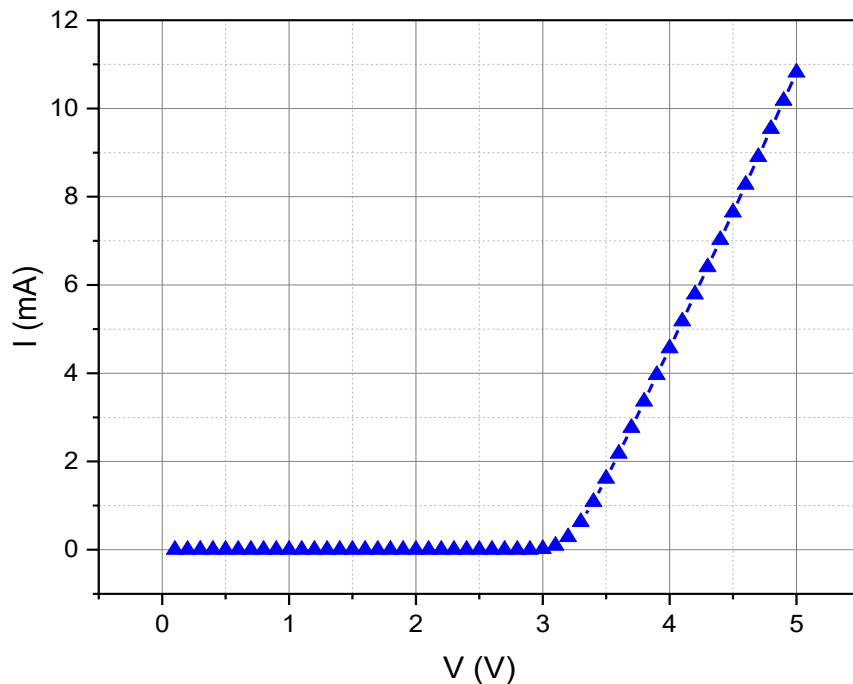
المعاملات	القيم		
	GaN	InGaN	AlGaIn
تركيز المانحات ($N_d (cm^{-3})$)	5×10^{18}	-	-
تركيز المستقبلات ($N_a (cm^{-3})$)	1×10^{19}	-	1×10^{19}
تركيز الحاملات الذاتية N_i	2×10^{16}	2×10^{16}	-
حركية الإلكترونات ($\mu_n (cm^{-3} \cdot V^{-1} \cdot S^{-1})$)	400	200	250
حركية الثقوب ($\mu_p (cm^{-3} \cdot V^{-1} \cdot S^{-1})$)	10	10	10
خصائص الإلكترونية (eV)	4.4	4.98	4.26
عصابة عرض الطاقة E_g (eV) عند 300K	3.42	2.6	3.62
عمر الإلكترونات ($\tau_n (s)$)	2×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-7}
عمر الثقوب ($\tau_p (s)$)	2×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-7}
معاملات إعادة التركيب	$2 \cdot 4 \times 10^{-30}$	$2 \cdot 4 \times 10^{-30}$	$2 \cdot 4 \times 10^{-30}$
C_n و $C_p (cm^{-6} S^{-1})$			

الجدول(2.III): النماذج المستخدمة في المحاكاة [50].

النموذج	المعاملات
نموذج p.k	نطاقات الطاقة
نموذج SRH	إعادة التركيب من نوع شوكل-ريد-هول
نموذج Auger	إعادة التركيب من نوع Auger
نموذج wz.kp (مصمم للبنية ورتزيت) ونموذج الانبعاث الاشعاعي	إعادة التركيب الاشعاعي
حركية الثابتة	حركية الإلكترونات والفجوة
نماذج calc.strain و Polarisation و polar.scale	مجال الاستقطاب عند الواجهات
نموذج incomplete	تأين الحوامل

III.3.5. خاصية التيار-الجهد (I-V)

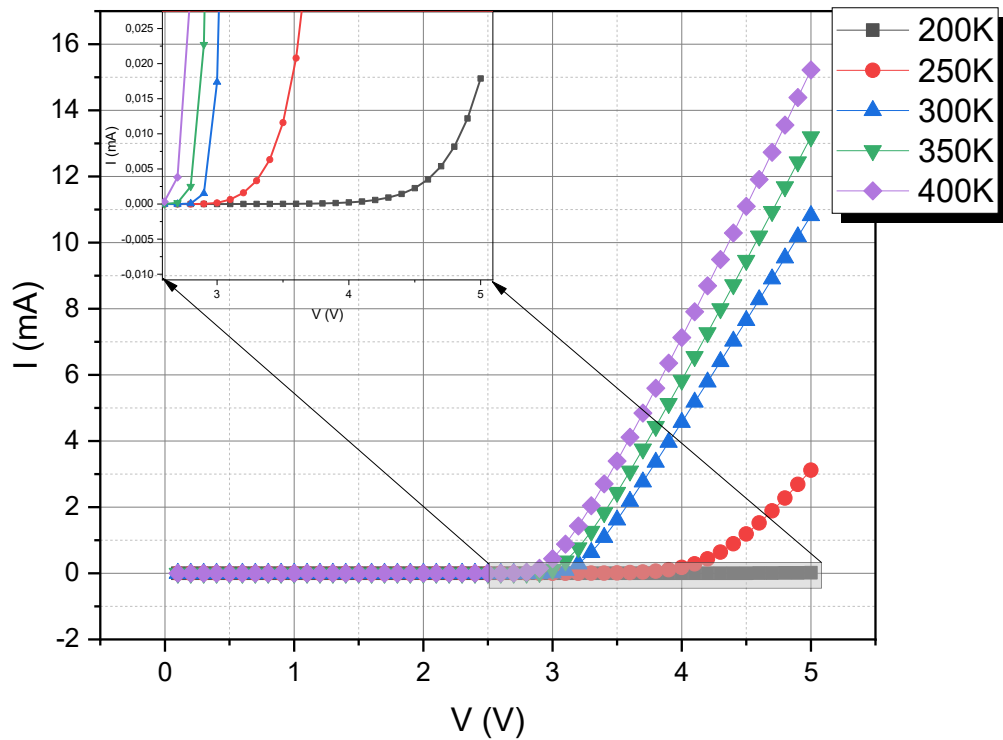
لمعرفة خصائص التيار-الجهد (I-V) للصمام الثنائي الباعث للضوء InGaN/GaN لعدة درجات حرارة، نقوم أولاً بمعرفة خصائص في درجة الحرارة العادية (300K) :



الشكل (12.III): خاصية التيار- الجهد (I-V) للصمام الثنائي الباعث للضوء InGaN/GaN عند درجة الحرارة العادية 300K .

في التشغيل الاعتيادي الذي يظهر في الشكل (12.III)، يتم توصيل الصمام الثنائي الباعث للضوء (LED) بالإستقطاب المباشر، مما يسمح بمرور التيار من قطبه الموجب (anode) إلى قطبه السالب (cathode). تُظهر العلاقة بين التيار والجهد المطبق أن هناك حدًا أدنى من الجهد ضروري لتشغيل الصمام وبدء انبعاث الضوء، ويُعرف هذا الجهد بجهد العتبة (V_{th}). عند الوصول إلى هذا الجهد، يحدث ارتفاع حاد في قيمة التيار المار عبر الصمام، وتعتمد قيمة جهد العتبة بشكل أساسي على مقدار عرض عصابة الممنوعة للمادة نصف ناقلة InGaN/GaN. في هذه الحالة المحددة، تبلغ قيمة هذه الطاقة 3.5V.

الشكل (13.III) يوضح رسم بياني العلاقة بين التيار (I) المار في الصمام الثنائي الباعث للضوء InGaN/GaN والجهد (V) المطبق عليه عند درجات حرارة مختلفة 350 K، 300 K، 250 K، 200K، 400 K.

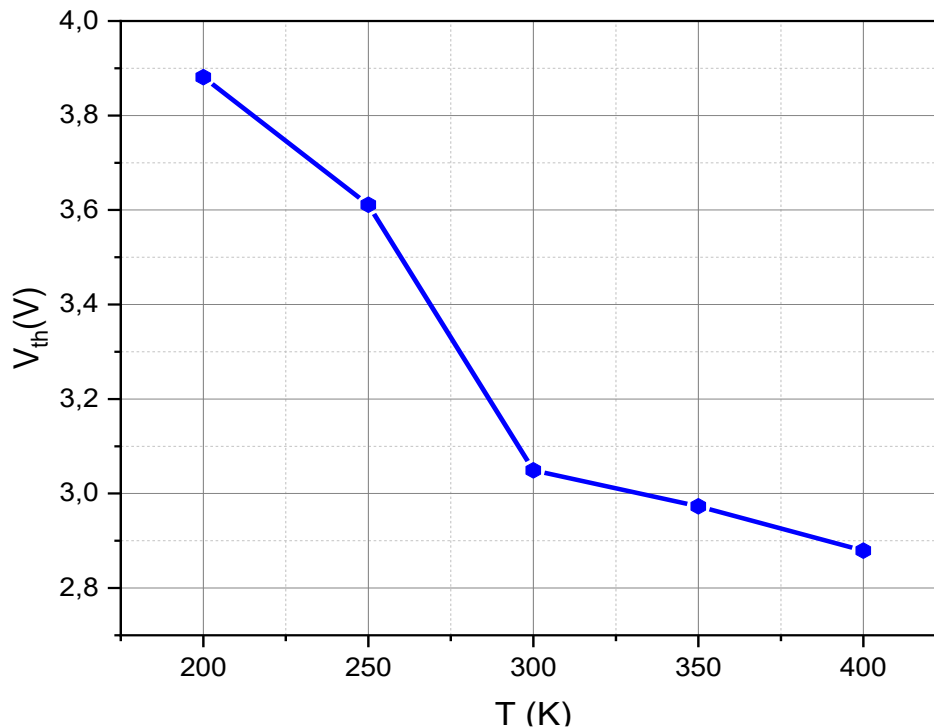


الشكل (13.III): خاصية التيار- الجهد (I-V) عند درجات حرارة مختلفة.

يظهر الشكل (13.III) رسم بياني خاصية التيار- الجهد (I-V) لصمام ثنائي باعث للضوء بخمس أبار كمية سلوك ال MQW-LED عند درجات حرارة مختلفة تتراوح بين 200K و 400K. نلاحظ من خلال المنحنيات البيانية التيار يبدأ في الزيادة بشكل حاد حول جهد معين عند جميع درجات الحرارة، ويمثل هذا الجهد جهد العتبة (V_{th}).

الجدول (3.III): عتبة الجهد لصمام الثنائي للضوء في درجات حرارة مختلفة.

درجة الحرارة (K)	200	250	300	350	400
جهد العتبة V_{th} (V)	3,881	3,611	3,049	2,973	2,879



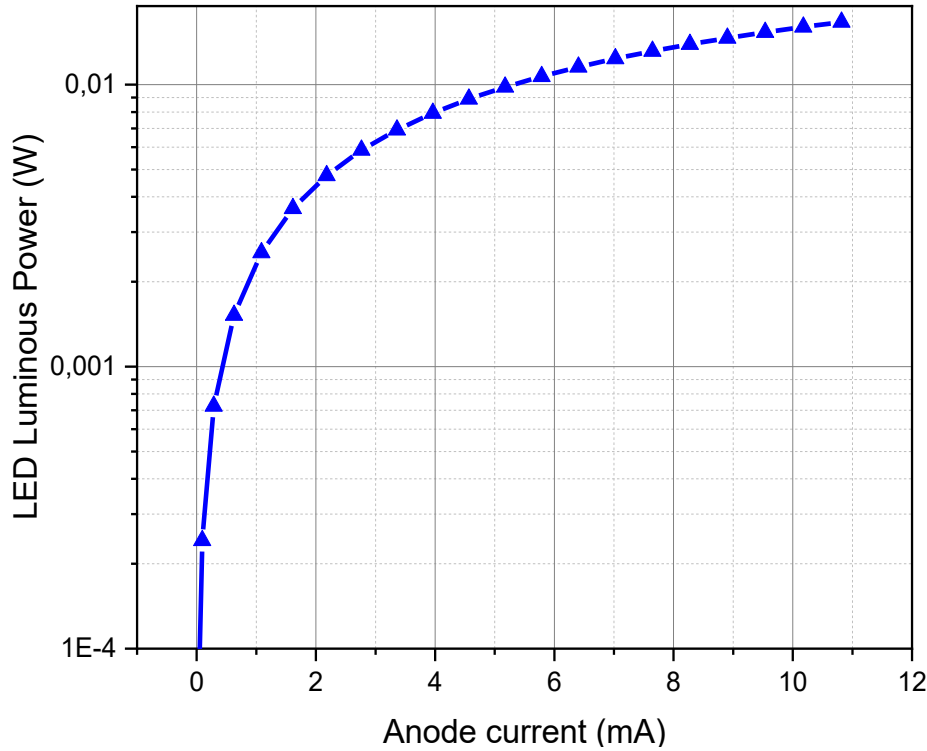
الشكل (14.III): تغيرات الجهد التشغيل بدلالة درجة الحرارة.

وكما تم الإشارة إليها في الشكل (14.III)، يقل جهد العتبة مع ارتفاع درجة الحرارة، حيث يُظهر الرسم البياني عند 200K جهد تشغيل أعلى مقارنة بالمنحنى عند 400K، وهو سلوك الشائع في أنصاف النواقل نتيجة لانخفاض عرض عصابة الطاقة مع زيادة درجة الحرارة. بمجرد تجاوز جهد العتبة، يزداد التيار عبر الصمام الثنائي بسرعة وبشكل شبه خطي لكل درجة حرارة، كما يزداد التيار بشكل ملحوظ عند جهد معين أعلى من V_{th} مع ارتفاع درجة الحرارة بسبب زيادة الطاقة الحرارية للإلكترونات. يلعب وجود الآبار الكمية الخمس في المنطقة النشطة دورًا هامًا في خصائص I-V وكفاءة انبعاث الضوء، حيث تعمل هذه الآبار على حصر الإلكترونات والثقوب، مما يعزز عملية إعادة التركيب الإشعاعي المسؤولة عن انبعاث الضوء عند جهد العتبة المحدد المرتبط بعرض عصابة الطاقة لمادة InGaN/GaN ومستويات الطاقة داخل الآبار. أخيرًا، الرسم البياني المصغر في الزاوية يوضح خاصية التيار-الجهد (I-V) عند درجة الحرارة 200K.

4.6.III. خاصية الشدة الضوئية-التيار (P-I)

لدراسة خاصية الشدة الضوئية والتيار الكهربائي لصمام ثنائي باعث للضوء InGaN/GaN ذو خمس آبار كمية MQW-LED عند درجات حرارة مختلفة، نبدأ بتحليل خصائصه عند درجة الحرارة العادية (300K).

الشكل (15.III) يمثل منحنى علاقة بين تيار وشدة الإضاءة المنبعثة، والذي تم استخدام محور لوغاريتميًا.

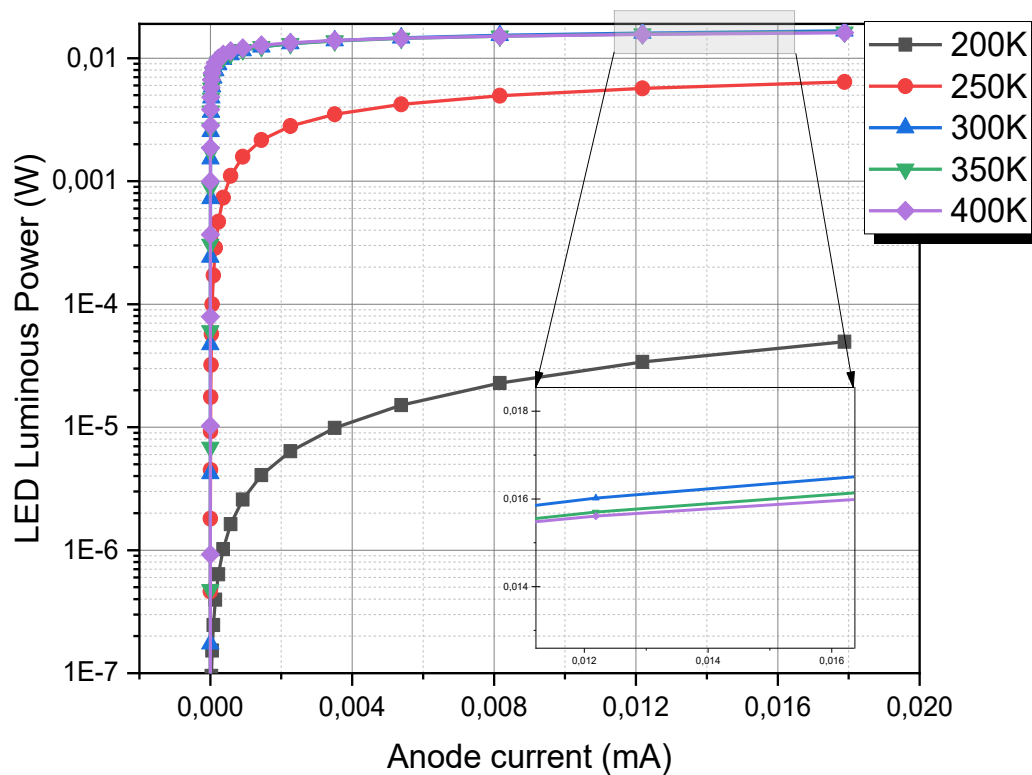


الشكل (15.III): العلاقة بين الشدة الضوئية عند درجة الحرارة 300K .

نلاحظ الرسم البياني لشكل (15.III) زيادة في شدة الإضاءة المنبعثة من الصمام الثنائي الباعث للضوء بشكل كبير مع زيادة التيار الكهربائي. عند التيارات المنخفضة جداً (قريبة من الصفر)، تكون شدة الإضاءة صغيرة للغاية. ومع بداية زيادة تيار، يحدث ارتفاع في شدة الإضاءة. يشير هذا الارتفاع إلى أنه بمجرد تجاوز الاستقطاب المباشر جهد العتبة، تبدأ عملية إعادة التركيب الإشعاعي الفعالة في المنطقة النشطة، والتي تتكون في هذه الحالة من خمس آبار كمية. تعمل الآبار الكمية المتعددة MQW-LED على تعزيز كفاءة إعادة التركيب الإشعاعي من خلال حصر حاملات الشحنة في طبقات رقيقة، وهو ما يفسر الزيادة السريعة في قدرة الإضاءة عند التيارات المنخفضة.

بعد مستوى معين من التيار، يبدأ معدل زيادة شدة الإضاءة مع التيار في الاستقرار. يشير هذا إلى أن كفاءة الصمام الثنائي الباعث للضوء في تحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء قد تنخفض عند كثافات التيار العالية بسبب عوامل عمليات إعادة التركيب غير الإشعاعي، أو التأثيرات الحرارية. على الرغم من هذا الاستقرار، تستمر شدة الإضاءة في الارتفاع مع زيادة التيار، ولكن بمعدل أبطأ، لتصل إلى أعلى قيمة $10^{-2} W$ عند تيار حوالي 11 mA. مما يستدعي مقارنة هذا السلوك في درجات حرارة مختلفة.

الشكل (16.III) يوضح العلاقة بين تيار وشدة الإضاءة المنبعثة من الثنائي الباعث للضوء InGaN/GaN عند درجات حرارة مختلفة: 400 K، 350 K، 300 K، 250 K، 200 K.



الشكل (16.III): العلاقة بين الشدة الضوئية والتيار (P-I) لدرجات حرارة مختلفة.

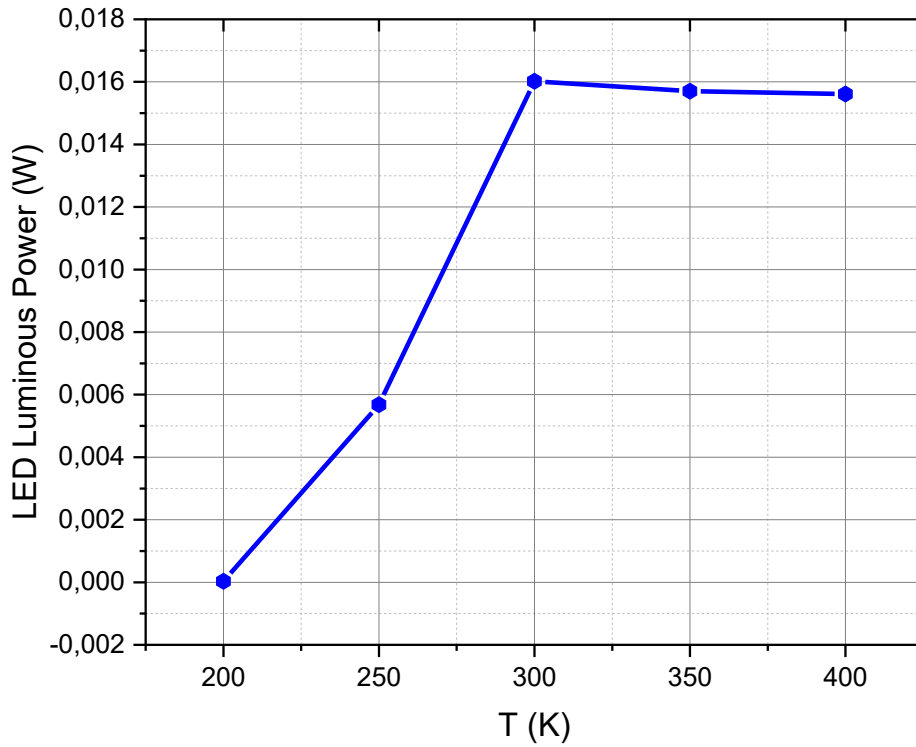
يوضح الرسم البياني تأثير درجة الحرارة على خاصية شدة الإضاءة المنبعثة من صمام ثنائي باعث للضوء (LED) والتيار الكهربائي. يحتوي MQW LED على خمس آبار كمية.

يُحقق الصمام الثنائي أعلى شدة إضاءة عند درجة حرارة 300K، تليها 350K، ثم 400K، 250K في حين تُسجل أقل شدة ضوئية عند 200K. كما يُلاحظ أن نقطة التشبع أي النقطة التي تبدأ فيها شدة الإضاءة بالثبات أو التباطؤ في الزيادة تنتقل إلى قيم أعلى للتيار كلما ارتفعت درجة الحرارة.

جدول تغيرات شدة الإضاءة بدلالة درجات حرارة مختلفة عند $I=12\text{mA}$:

الجدول (4.III): شدة الضوئية لدرجات حرارة مختلفة عند $I=12\text{mA}$.

درجة الحرارة (K)	200	250	300	350	400
الشدة الضوئية (W)	E-53,39164	0,00568	0,01602	0,0157	0,01561



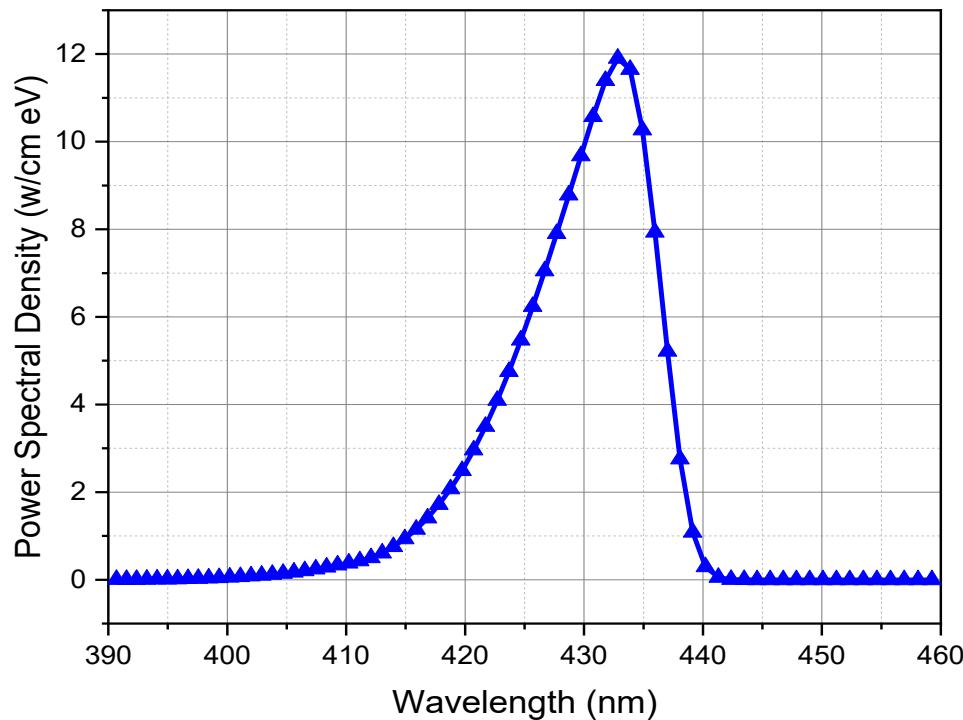
الشكل (17.III): تغيرات الشدة الضوئية بدلالة درجة الحرارة.

يوضح الشكل (17.III) منحنى بياني تأثير درجة الحرارة على الجهد عند نفس نقطة التيار 0,012A وشدة الإضاءة المنبعثة لصمام ثنائي باعث للضوء MQW-LED ذو الخمس آبار يتأثر بشكل كبير بدرجة حرارة. الزيادة الأولية في شدة الإضاءة مع ارتفاع درجة الحرارة مرتبطة بتحسين كفاءة انبعاث الفوتونات داخل المادة نصف ناقلة. ومع ذلك، بعد الوصول إلى درجة حرارة معينة (حوالي 300-350 K)، تبدأ العوامل الأخرى في التأثير سلباً على الأداء، مما يؤدي إلى استقرار أو انخفاض شدة الإضاءة. تتمثل هذه العوامل بزيادة في الاهتزازات الحرارية للذرات في الشبكة البلورية، مما يزيد من احتمالية حدوث عمليات إعادة تركيب غير إشعاعية للإلكترونات والثقوب، وبالتالي تقليل كفاءة إنتاج الضوء.

بناءً على هذا الرسم البياني، يمكن الاستنتاج أن نطاق درجة الحرارة الأمثل لتشغيل هذا النوع المحدد من الصمام الثنائي الباعث للضوء ذو الخمس آبار، للحصول على أقصى قدرة إضاءة، يقع تقريباً بين 300K و 300K تحت الظروف الكهربائية المحددة. تجاوز هذه الدرجة قد يؤدي إلى انخفاض في كفاءة الإضاءة.

5.5.III. خاصية الطيف الضوئي المنبعث

لدراسة خاصية الطيف الضوئي المنبعث لصمام ثنائي باعث للضوء InGaN/GaN تحت جهد مطبق قدره 3.5V، عند درجات حرارة مختلفة، نبدأ أولاً بتحليل خصائصه عند درجة الحرارة العادية (300K). الشكل (17.III) يُظهر الطيف المنبعث من الصمام الثنائي بدلالة الطول الموجي.



الشكل (18.III): الطيف الضوئي المنبعث عند درجة الحرارة 300K .

الطيف المنبعث من الصمام الثنائي الباعث للضوء MQW-LED ليس أحادي اللون تمامًا، بل يمتلك توزيعًا طيفيًا يتمركز حول الطول الموجي الأكثر احتمالًا، والذي يحدده عرض عصابة الطاقة (E_g) الخاصة بالعصابة الممنوعة للمادة نصف ناقلة، ويتم تحديد E_g بدلالة درجة الحرارة وفق معادلة فارشني

التالية [51] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (10.III)$$

$E_g(T)$: عرض العصابة الممنوعة عند درجة الحرارة T .

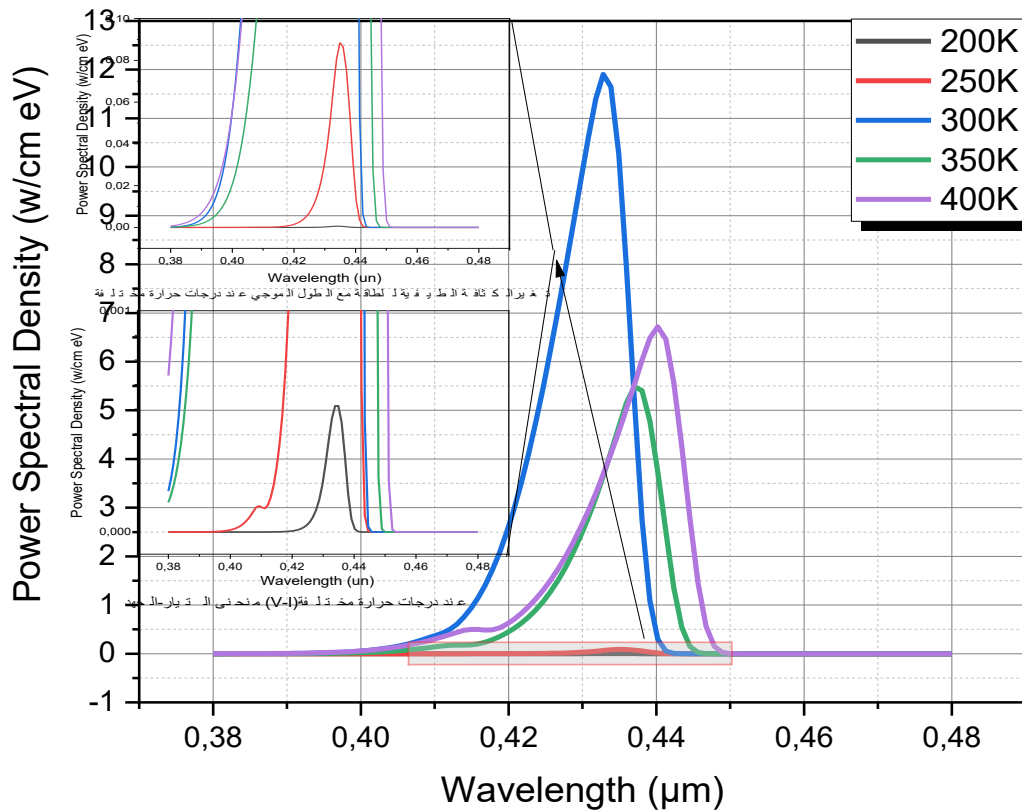
$E_g(0)$: عرض العصابة الممنوعة عند درجة الحرارة 0K.

α : معامل فارشني، يتعلق بمعدل تغير عرض العصابة الممنوعة مع درجة الحرارة عند درجات حرارة عالية.

β : معامل فارشني آخر، يتعلق بسلوك عرض العصابة الممنوعة عند درجات حرارة منخفضة.

في الطيف الموضح في الشكل (18.III)، نلاحظ أن ذروة الضوء المنبعث تكون عند الطول الموجي 433nm. يتم الحصول على هذا الإشعاع من سبيكة InGaN التي تحتوي على نسبة إنديوم تبلغ 16%، وسماكة قدرها 3nm.

تتناول هذه الدراسة تحليل الخصائص الضوئية لصمام ثنائي باعث للضوء InGaN/GaN عند درجات حرارة تتراوح بين 200K و 400K. يوضح الشكل (III.19) كيف تتغير كثافة الشدة الطيفية كدالة للطول الموجي عند كل درجة حرارة، مع التركيز على موقع ذروة الطيف الذي يشير إلى الطول الموجي ذي أعلى شدة إشعاع.



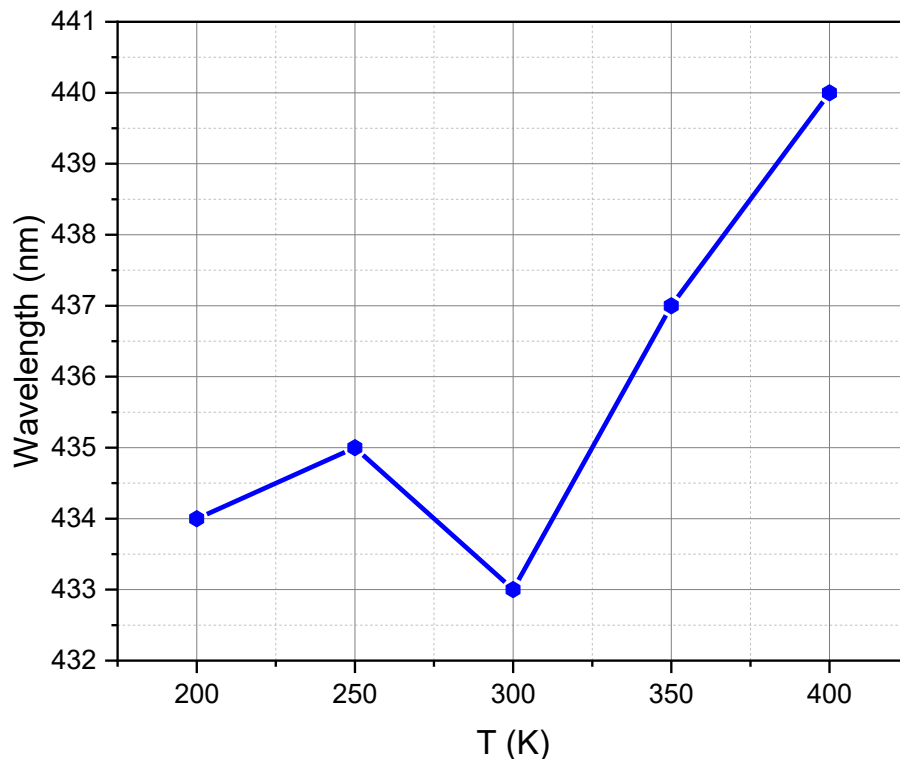
الشكل (19.III): الطيف الضوئي المنبعث عند درجات حرارة مختلفة .

تهدف مقارنة الأطياف عند درجات الحرارة المختلفة إلى فهم تأثير درجة الحرارة على خصائص انبعاث الضوء من هذا النوع من الصمامات الثنائية. تحليل الشدة الطيفية عند درجات الحرارة المختلفة:

الجدول (5.III): طيف الضوئي المنبعث لكل درجة حرارة.

درجة الحرارة (k)	200	250	300	350	400
طول الموجي (nm)	434	435	433	437	440

تمكنا من خلال الجدول رسم المنحنى الشكل (20.III):



الشكل (20.III): منحنى تغيرات طيف الضوئي المنبعث بدلالة درجة الحرارة.

يوضح الشكل (20.III) المنحنى البياني تأثير درجة الحرارة على الطول الموجي للضوء المنبعث من صمام ثنائي باعث للضوء InGaN/GaN. حيث يرتبط كل تغير في درجة الحرارة بطول موجي مختلف للضوء المنبعث، مما يدل على أن درجة حرارة تتحكم في لون الضوء الناتج. وهو ما يمكن وصفه جزئياً من خلال سلوك عرض عصابة الطاقة الممنوعة مع درجة الحرارة وفقاً لمعادلة فارشني. بالإضافة الى ذلك، يبدو أن مدى الأطوال الموجية المنبعثة يتسع مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يشير إلى انبعاث ضوء ذي طيف أوسع. يعكس هذا السلوك التغيرات التي تطرأ على خصائص مادة InGaN نصف ناقلة وتأثير درجة الحرارة على عرض نطاق الطاقة وعمليات إعادة التركيب الإشعاعي، وهو ما يؤثر بدوره على طاقة الفوتونات المنبعثة وبالتالي على الطول الموجي وشدة الضوء.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

في ختام هذا العمل، وبعد دراسة شملت المفاهيم الأساسية لأنصاف النواقل، وبنية الصمام الثنائي الباعث للضوء (LED)، اعتمدنا على برنامج SILVACO ATLAS، الذي سمح لنا بمحاكاة تأثيرات درجة الحرارة على الأداء الكهروضوئي لبنية LED متعددة الآبار الكمومية (MQW-LED). ذو خمس آبار كمومية من InGaN بنسبة 16% من الإنديوم وسمك 3 نانومتر مفصولة بحواجز من GaN بسمك 15 نانومتر. هذه الدراسة سمحت لنا بمحاكاة الخصائص الكهربائية والبصرية تحت تأثير درجة الحرارة في المجال 200K و 400K، وركزنا على منحنى التيار-الجهد (I-V)، منحنى الشدة الضوئية-التيار (I-P)، والكثافة الطيفية المنبعثة.

تُبرز نتائج المحاكاة أن خاصية التيار-الجهد (I-V) في صمام LED من نوع InGaN/GaN متعدد الآبار الكمومية تتأثر بشكل كبير بتغير درجة الحرارة. فمع ارتفاع درجة الحرارة من 200K إلى 400K، لوحظ انخفاض تدريجي في جهد العتبة (V_{th}) من 3.88 V إلى 2.87 V، ويرجع هذا الانخفاض إلى تناقص في عرض عصابة الطاقة تحت تأثير الحرارة. بعد تجاوز جهد العتبة، يزداد التيار بشكل أسرع عند الدرجات الأعلى نتيجة زيادة عدد الحاملات وطاقتها الحركية. ويظهر وجود الآبار الكمومية الخمس في البنية النشطة دوراً فاعلاً في تحسين سلوك التيار عبر تعزيز حصر الإلكترونات والثقوب وزيادة احتمال إعادة التركيب الإشعاعي. أما في ما يخص الخصائص البصرية، تبيّن من خلال المحاكاة أن الشدة الضوئية للصمام الثنائي الباعث للضوء InGaN/GaN تتأثر بوضوح بتغير درجة الحرارة. حيث تُسجّل أعلى شدة ضوئية عند 300K، وتنخفض الشدة عند درجات حرارة أعلى أو أقل بسبب زيادة معدلات إعادة التركيب غير الإشعاعي. ويُعد النطاق بين 300K و 350K هو الأنسب لتشغيل هذا النوع من LEDs بشدة ضوئية مثلى، مما يستدعي اتخاذ إجراءات حرارية مناسبة لضمان الأداء المستقر.

أظهرت المحاكاة أيضاً أن الطيف الضوئي المنبعث من صمام LED من نوع InGaN/GaN يتأثر بدوره بتغير درجة الحرارة. حيث تنتقل ذروة الطول الموجي من 433 نانومتر عند 300K إلى 440 نانومتر عند 400K، نتيجة لانخفاض عرض عصابة الطاقة مع درجة الحرارة. كما لوحظ تراجع تدريجي في الشدة الطيفية عند درجات الحرارة العالية، مما يُعزى إلى ازدياد عمليات إعادة التركيب غير الإشعاعي.

تؤكد النتائج أن التحكم بدرجة الحرارة ضروري لضمان استقرار الطول الموجي وكفاءة الإضاءة في تطبيقات LEDs الدقيقة.

رغم تركيز هذه الدراسة على تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية والبصرية MQW-LED متعدد الآبار الكمومية، إلا أن هناك عدة جوانب كنت أتمنى التوسع فيها ضمن هذا البحث، ومنها دراسة تأثير عدد أكبر من درجات الحرارة لتغطية نطاق أوسع من الظروف التشغيلية، وكذلك دراسة تأثير درجة الحرارة على خصائص ضوئية أخرى للصمام الثنائي.

المراجع

- [1] Berber. M. «Etude des nanostructures lasers à base de nitrures d'antimoniures GaNSb/AlGaInNSb », thèse doctorat, Université Djillali Liabes de sidi bel Abass, (2014).
- [2] مقدمة في فيزياء الجسم الصلب (الجزء الثاني) ، الدكتور عزيز داخل، ديوان المطبوعات الجامعية (1988).
- [3] B.G. Streetman and S. banerjee. Solid state electronic devices (7th Ed). 2000.
- [4] Zitouni, and Ikram. Etude des propriétés physiques des clusters de Germanium dopés pour les composants optoélectroniques. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie.
- [5] S.S. Alrawi, S.J. Shakir, and Y.N. husan. Solid state physics. (1990).
- [6] R. Hong, H. Wen, C. Liu, J. Chen, and J. Liao, Dopant concentration dependence of structure, optical, and magnetic properties of ZnO: Fe thin films. J. Crys. Grow. 314 N° 1, 30 (2011).
- [7] H.T. Grahn. « Introduction to semiconductor physics». Page (1-10) 2001.
- [8] مقال. فاروق كامل. "مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات". ديوان المطبوعات الجامعية، بن عكنون، الجزائر. (1992).
- [9] Terkhi .S. « Modelisation de L'influence de la composition chimique «x» des matériaux arsenic Sur les propriétés de transport électronique», Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem (2013) .
- [10] Mansour. S. «Etude et simulation des caractéristiques électriques de diode électroluminescente(LED)», mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra ,(2016).

- [11] Gruart M. Elaboration et propriétés de nanofils à base d'InGaN pour la réalisation de micro et nanoLEDs (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes(2020).
- [12] SIDIBE. K, and Adiaratou .N. Etude des propriétés d'un alliage ternaire à base de phosphore (A, B) P. Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, (2019).
- [13] R. Castagné et All. Circuits Intégrés en arséniure de Gallium. Physique, technologie et règles de conception. Masson et CINET ENST Paris (1989) .
- [14] S. Laval . Physique des semi-conducteurs III-V, Ecole d'été d'optoélectronique (2002).
- [15] Zegudar. K. Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphore d'indium InP. Diss. Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [16] Hamdi.N, Hamida. Z. « Simulation des diodes électroluminescentes: Effet de la température».Université Mohamed Khider ,(2020) .
- [17] Vurgaftman.I and J. R. Meyer Journal of Applied Physics, vol. 94, no. 6, pp. 3675–3696,(2003).
- [18] A. Punya and W. R. Lambrecht Physical Review B, vol. 85, no. 19, p. 195147, (2012).
- [19] C. Kittel, Physique de l'état solide. Dunod Sciences Sup, 8e édition ed., (2007).
- [20] P. Altuntas, Fabrication et caractérisation de dispositifs de type HEMT de la filière GaN pour des applications de puissance hyperfréquence, Thèse de Doctorat (2015), Université de Lille, France.
- [21] Marouf. Y, «Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V», thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra,(2019).

[22] Seauve. Y. Exploration, conception et mise en œuvre de circuit de pilotage pour micro-écrans à LED GaN. Diss. Université Grenoble Alpes,(2020).

[23] هياق إسماعيل. "تأثير سمك الآبار الكمومية على الخصائص الكهربائية والضوئية للثنائيات الباعثة للضوء.",(2024).

[24] Catalano, Christophe. Couplage entre les lasers solides émettant dans le bleu et les luminophores jaunes pour l'obtention de la lumière blanche pour l'éclairage. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, (2020).

[25] Canale, Laurent. «la LED, chemins croisés entre éclairage et radio télécommunications. » La Revue de l'électricité et de l'électronique, (2020).

[26] A.kemikem ,F.doudar « Caractérisation des diodes électroluminescentes pour application dans le retro-éclairage de téléviseurs »Université saad dahlab deblida,algere,(2021).

[27] Barroso A. Optimisation des systèmes d'éclairage des bâtiments de l'université Paul Sabatier basé sur un réseau novateur de type bus continu/basse tension [thèse de doctorat]. UT3 Paul Sabatier;(2017).

[28] Bassi.O. «Étude et simulation des propriétés optoélectroniques d'une diode électroluminescente (LED) de structure p-GaN/AlGaIn/InGaIn/n-GaN à puits quantiques. », (2023).

[29] Nicolas. P, « caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles source: les diodes électroluminescentes», these docteur, Paris (2009).

[30] Bouaraba, F. Etude d'une LED à base d'InGaIn pour l'émission de la lumière blanche. Diss. Université Mouloud Mammeri,(2012).

[31] Baillot.R, thèse de doctorat : « Méthodologie d'analyse de défaillance pour l'évaluation de la fiabilité de diodes électroluminescentes GaN », Université de Bordeaux,(2011).

- [32] Zissis.G : « Diode électroluminescente pour éclairage », Cahiers Innovation IN-1[18].8 Technique de l'Ingénieur, pp.1-13, (2011).
- [33] Fred Schubert, livre: « Light emitting diodes » second edition Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, pp.59-84,222-236, (2006).
- [34] N.Pousset, B. Rougié, S. Aubert, A. Razet, manuscrit : « Colorimétrie des LED incertitude et influence du courant électrique », Revue française de métrologie n° 20, Vol 4 2009.
- [35] Boumaraf.R. «Simulation of the temperature and the deep traps effect on the electrical characteristics of GaAs diodes», Thèse de doctorat, Université de Biskra, (2015).
- [36] Pousset, N. Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes (LED). Diss. Conservatoire national des arts et métiers, (2009).
- [37] H. Cartier, A. Le Pillouer-Prost, C. Grognard, « Diodes électroluminescentes (DEL) », Annales de dermatologie, 136 (2009).
- [38] J. Hsu: «LED Market Opportunities and Challenges», IMS Research, (2010).
- [39] Dahmane. K, «Étude et simulation d'un transistor AlGaIn/GaN HEMT », mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra,(2014).
- [40] B. Lamia et B. Ounissa, « Simulation d'une diode électroluminescente organique sous ATLAS-SILVACO », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, (2018).
- [41] SERDOUK, M. R,«Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H) », Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra, (2015).

- [42] Mancier. M. Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs). Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, (2012).
- [43] TAILLEPIERRE.P, « Diodes Electroluminescentes organiques : Etudes des Efficacités Lumineuses et du Traitement Ionique des Electrodes pour l'Amélioration du Vieillissement », thèse doctorat, Université de Limoges, (2006).
- [44] Fadhila K. « Etude et simulation d'un transistor fin FET », Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri ,(2015).
- [45] Elbar. M. Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, (2018).
- [46] Md.R.SERDOUK,« Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) », thèse magister ,Université Mohamed Khider – Biskra, (2015).
- [47] Green, M.A., Solar cells: operating principles, technology, and system applications.Englewood Cliffs, (1982).
- [48] Manual, A.U.s, Device Simulation Software, Version 5.20. 2. R, SILVACO International, Santa Clara, CA, (2015).
- [49] Sze, S.M. and M.-K. Lee, Semiconductor Devices: Physics and Technology: Physics and Technology2012: Wiley Global Education.
- [50] Rolles M. « Étude théorique de la faisabilité des LED à base de ZnGeN₂»,Doctoral dissertation, Université de Lorraine,(2018).
- [51] Pope. I.A. Characerisation of Ingan gan quantum well light emitting diodes. Cardiff University (United Kingdom),(2004).



Département des Sciences de la matière

قسم : علوم المادة

Filière: Physique

شعبة : الفيزياء

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث

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



أنا الممضي أسفله،

السيد(ة): بناسمي هناء

تخصص: فيزياء طاقة نووية فان الهندسة الصفة : طالب سنة

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 2025.73.166 الصادرة بتاريخ: 2023/09/17

المسجل بكلية: العلوم الدقيقة قسم: علوم المادة

والمكلف بإنجاز أعمال بحث : مذكرة

عنوانها: تأثير درجة الحرارة على الخصائص الناشئة

..... الباحثة للصوة ذات الأبعاد الكمية

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 2021/12/27 المحدد للقواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.

التاريخ: 2025/05/25

إمضاء المعني بالأمر

N. H