



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
المركز الجامعي بالوادي  
معهد العلوم والتكنولوجيا



رقم الترتيب:  
رقم التسلسل:

مذكرة تخرج لنيل شهادة

## ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: تطبيقات إشعاع و طاقة

من إعداد: يوسف مفتاح

الموضوع

تصميم و محاكاة

كاشف الأشعة تحت الحمراء ذو آبار كمية

نوقشت يوم: / / 2011

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيس  
مناقش  
مؤطر

أستاذ محاضر  
أستاذ مساعد  
أستاذ مساعد

د:قده الحبيب  
سفيان بن حميدة  
بسر الزوبير

الموسم الجامعي 2010/2011

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## شكر وعرفان

إن الحمد لله وحده لا شريك له هو الذي هدانا لهذا الذي كنا في الضلالة طريق إلى النور .  
يكون الحمد و الشكر التامين .

و الشكر و الامتنان إلى نبي الهدى حق لنا في الظلمة طريق إلى النور .

ثم أما بعد :

فإنني انتمير فرصة هذا العمل المتواضع لأوجه شكري الجزيل إلى كل من أمدني بيد العون حتى أصل إلى ما أنا عليه الآن. وإن كانت كلمة الشكر ليست بالكافية للتعبير عن امتناني لهم .

مستحلاً بتوجيه أسمي و أعمق عبارات الشكر و العرفان لجميع أساتذتي الكرام الذين اهرفوا على

تكويني طيلة المشوار الجامعي و اخص بالذكر الأستاذ: "الزويبير بس" .

كما اخص بالشكر جميع الأصدقاء الذين شجعوني و وقفوا بجانبني خاصة

الصديق الحميم : الهاشمي منصور كذلك لا أنسى أن اذكر الصديقين

صهبة إبراهيم و محمد الحكيم بن عيشة . كما لا يفوتني أن أتوجه بخالص الامتنان و التقدير

لطلاب قسم السنة الثانية ماستر فيزياء .

أخيراً اشكر جميع من ساعدوني و وقفوا بجانبني و إن فاتني ذكرهم فجزاهم الله عندي خير جزاء و

أسأل الله كما جمعنا في الدنيا على طاعته انه يجمعنا في الآخرة في جنته و برفقة نبيه .

و الله أعلم من قبل ومن بعد

## المخلص:

شهدت السنوات العشرين الماضية انفجارا في مجال تكنولوجيا الكشف بالأشعة تحت الحمراء تغذيها التحسينات في تكنولوجيا أشباه النواقل III - V والطرق الحديثة في إنشاء أشباه النواقل. واحدة من أسرع مجالات البحث تطورا في هذا الميدان ينطوي على استخدام هندسة طاقات العصابات الممنوعة لاستحداث آبار كمية اصطناعية لاستخدامها في كواشف الأشعة تحت الحمراء (QWIPs). تتميز الكواشف QWIPs عن بقية كواشف الأشعة تحت الحمراء الأخرى مثل الزنبق والكاديوم و تيلورايد  $Hg_xCd_{1-x}Te$  (MCT) بكبر الفاصل الطاقى الممنوع وبالتالي فهي أقوى وأرخص للتصنيع. في هذه المذكرة أدخلنا أسلوبا واحدا من أساليب الكشف "متعددة الألوان" من خلال استخدام بنية آبار كمية غير متناظرة تتاح فيها جميع الانتقالات الإلكترونية. بنية الكاشف QWIP في هذه المذكرة صممت للكشف أنيا عن طول موجة ليزر قدره  $1,06\mu m$  وطول موجة في المجال  $8-10\mu m$ . يتألف التصميم النهائي من بئر كمي عرضه  $25 \text{ \AA}$  عمقه  $0,2999$  فولت، مع درجة كمية عرضها  $44 \text{ \AA}$  وارتفاعها  $0,1812$  فولت. يبلغ منحنى امتصاص الكاشف للأشعة تحت الحمراء  $14000 \text{ cm}^{-1}$  عند الطول  $8,745$  ميكرون من اجل الانتقالات بين العصابات التحتية.

## Résumé:

Les vingt dernières années ont connu une explosion dans le domaine de la technologie de détection infrarouge alimentée par des améliorations dans la technologie des semi-conducteurs III-V et par les nouvelles méthodes de croissance des hétéro-structures semi-conductrices. La bien maitrise de l'ingénierie de bande interdite a rendu possible la création des puits quantiques artificielle pour une utilisation dans des photodétecteurs infrarouges à puits quantiques (QWIPs). QWIPs ont un avantage sur les autres détecteurs infrarouges tels que le cadmium mercure Telluride  $Hg_xCd_{1-x}Te$  (MCT), parce qu'ils ont de plus grandes bandes interdites et sont donc plus forts et moins cher à fabriquer. Dans cette mémoire, nous avons introduit une méthode multi-couleurs de détection à l'aide d'une structure de puits quantique asymétrique dans lequel toutes les transitions d'énergie sont possibles. La structure QWIP dans cette mémoire a été conçu pour détecter une longueur d'onde laser de  $1,06\mu m$  et une longueur d'onde dans la fenêtre atmosphérique de  $8 \text{ à } 10 \mu m$  simultanément. Le design final comprenait un puits quantique de  $25 \text{ \AA}$  de large et de  $0,2999 \text{ eV}$  d'profondeur avec un step quantique de  $44 \text{ \AA}$  de large et de  $0,1812 \text{ eV}$  d'hauteur. Le pic de coefficient d'absorption de l'IR est de  $14000 \text{ cm}^{-1}$  à  $8,745 \mu m$  pour les transitions intersousbandes.

## Abstract

The past twenty years have seen an explosion in the realm of infrared detection technology fuelled by improvements in III-V semiconductor technology and by new semiconductor growth methods. One of the fastest growing areas of this research involves the use of bandgap engineering in order to create artificial quantum wells for use in quantum well Infrared photodetectors (QWIPs). QWIPs have an advantage over other infrared detectors such as Mercury Cadmium Telluride  $Hg_xCd_{1-x}Te$  (MCT) because they have larger bandgaps and are therefore stronger and cheaper to manufacture. In this thesis we have introduced one method of "multi-color" detection through the use of an asymmetric quantum well structure in which all energy transitions are possible. The QWIP structure in this thesis was designed to detect a laser wavelength of  $1.06 \mu m$  and a wavelength in the  $8-10 \mu m$  atmospheric window simultaneously. The final design consisted of quantum well of  $25 \text{ \AA}$  wide and  $0.2999 \text{ eV}$  high, with a quantum step;  $44 \text{ \AA}$  wide and  $0.1812 \text{ eV}$  high. The peak IR absorption coefficient was  $14000 \text{ cm}^{-1}$  at  $8.745 \mu m$  for intersubband transitions.

## الفهرس

01	المقدمة العامة.....
	1(كواشف الأشعة تحت الحمراء ذات الأبار الكمية
03	1-1) الأشعة تحت الحمراء.....
03	1-1-1) تعريف.....
04	1-1-2) قوانين الجسم الأسود.....
06	1-1-3) تطبيقات الأشعة تحت الحمراء.....
07	2-1) الكواشف تحت الحمراء.....
07	1-2-1) الكواشف الحرارية.....
07	1-2-2) الكواشف الضوئية.....
08	3-1) الكواشف الضوئية ذات الأبار الكمية.....
09	1-3-1) البئر الكمي.....
11	1-3-2) المواد المستعملة في صناعة الأبار الكمية.....
12	3-3-1) الكواشف الضوئية ذات الأبار الكمية.....
13	1-3-4) أنواع الكواشف الضوئية.....
13	1-4-3-1) كاشف ضوئي حالة مقيدة – حالة مقيدة.....
13	1-4-3-2) كاشف ضوئي حالة مقيدة – حالة حرة.....
14	1-4-3-3) كاشف ضوئي حالة مقيدة – حالة شبه مقيدة.....
14	1-5-3-1) طريقة عمل الكاشف:.....
14	1-5-3-1) التيار الضوئي.....
14	1-5-3-2) تيار الظلام.....
15	1-5-3-3) معامل الامتصاص.....
	2)النماذج الرياضية و العددية
17	مقدمة.....
17	1-2) معادلة بواسون.....
18	2-2) معادلة شرودينغر.....
19	3-2) تقريب دالة الغلاف.....
19	4-2) كثافة الحالات.....

20	كثافة الحالات في 3D (1-4- 2)
20	كثافة الحالات في 2D : (2-4- 2)
21	كثافة التيار (3-4-2)
23	قواعد الانتقاء للانتقالات الضوئية (5- 2)
25	معامل الامتصاص (6- 2)
26	مقادير رياضية (7-2)
26	النماذج العددية (8-2)
27	طريقة الحجم المنتهية (1-8- 2)
27	طريقة الحجم المنتهية في بعد واحد (2-8- 2)
27	صياغة معادلة بواسون في بعد واحد بطريقة الحجم المنتهية (1-2-8- 2)
29	صياغة معادلة شرودينغر في بعد واحد بطريقة الحجم المنتهية (2-2-8- 2)
29	طرق الحل (3-8- 2)
29	طرق حل معادلة بواسون (1-3-8- 2)
30	طريقة حل معادلة شرودينغر (2-3-8- 2)
31	طريقة مصفوفة الانتقال (9- 2)
	تطبيقات (3)
36	عرض البرنامج (1-3)
37	التطبيق الأول: التحقق من البرنامج (2-3)
38	بنية سمير شاه (1-2-3)
39	بنية سيرتوري Sirtori (2-2-3)
41	تصميم كاشف أشعة تحت حمراء ذو أبار كمية (3-3)
42	بنية بئر كمي درجي لكشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون (1-3-3)
43	وسائط تصميم كاشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون (2-3-3)
44	التصميم النهائي لكاشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون (3-3-3)
52	الخاتمة العامة
53	المراجع
55	الملحق

## قائمة المنحنيات

3	الطيف الكهرومغناطيسي وتفصيل مجالات الأشعة تحت الحمراء: القصير، المتوسطة، الطويلة	-1-1a
4	طيف النفاذية للأشعة تحت الحمراء و الجزيئات الممتصة لها في الغلاف الجوي	b-1-1
5	تغيرات طول موجة قمة الإشعاع بدلالة درجة الحرارة(قانون فيان).	2-1
6	تغيرات كثافة إشعاع الجسم الأسود بدلالة طول الموجة عند درجات حرارة مختلفة.	3-1
8	( مباشرة a)إنشاء زوج إلكترون- فجوة نتيجة امتصاص فوتون بطريقة: ( غير مباشرة b)	4-1
9	الانتقالات بين العصابات التحتية، الانتقالات بين العصابات	5-1
9	(منطقة مكبرة من البئر b طاقة الكمون بين البئر و الحاجز)	6-1
11	تقطع الطاقة داخل بئر كوانتي متناظر	7-1
12	عرض العصابة الممنوعة لأهم أشباه النواقل بدلالة ثابت الشبكة البلورية	8-1
13	سلسلة من الآبار الكمية	9-1
14	حالة مقيدة- , حالة مقيدة - حالة حرة, الانتقالات حالة مقيدة - حالة مقيدة حالة شبه مقيدة	10-1
22	لغاز الالكترونات في حالة $g(E)$ و كثافة الحالات $E(K)$ علاقة التشتت 1D,2D,3D	1-2
25	الانتقالات المسموحة في بئر متناظر	2-2
27	تقسيم الحجم المنته في حالة بعد واحد	3-2
32	بنية متعددة الآبار الكمية	4-2
33	بنية بئر كمي متناظر	5-2
34	$a=150A^0$ للبنية (عرض البئر E بدلالة $m_{22}(E)$ رسم	6-2
37	Qwips واجهة المستخدم الرسومية لبرنامج المحاكاة	1-3
38	عصابة النقل و الطاقات المتاحة باستخدام برنامج سمير شاه	32-
38	عصابة النقل و الطاقات المتاحة في بنية سمير شاه باستخدام برنامجنا	3-3
39	دوال الموجة الثلاثة الأولى باستخدام برنامج سمير شاه	4-3
39	دوال الموجة الثلاثة الأولى باستخدام برنامجنا	5-3
40	<u>Sirtori</u> دوال كثافة الاحتمال الأربعة الأولى في بنية	6-3
40	باستخدام برنامجنا <u>Sirtori</u> دوال كثافة الاحتمال الأربعة الأولى في بنية	7-3
41	Qwip. انتقال الالكترونات في الكاشف الكمي	8-3
43	بنية البئر الكمي غير المتناظر المراد تصميمه	9-3

44	عرض العصابة الممنوعة لأهم أشباه النواقل بدلالة ثابت الشبكة البلورية	10-3
46	عصابة النقل ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل الخارجي	11-3
46	حافة عصابة التكافؤ ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل الخارجي	12-3
47	سويات الطاقة المتاحة في عصابة النقل وعصابة التكافؤ في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل	13-3
48	حافة عصابة النقل ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية $1.5V / \mu m$ التصميم النهائي تحت تأثير حقل خارجي شدته	14-3
48	بنية الطاقة في التصميم النهائي و سويات الطاقة المتاحة فيها تحت تأثير $1.5V / \mu m$ حقل خارجي شده	15-3
49	معامل الامتصاص في حالة الانتقال من تحت عصابة إلى تحت عصابة في غياب الحقل الخارجي	16-3
49	معامل الامتصاص للانتقالات حالة مقيدة - حالة حرة في حالة غياب الحقل الخارجي	17-3
50	مقارنة بين معامل الامتصاص في حالة غياب الحقل الخارجي وفي حضوره	18-3

# مقدمة عامة



## المقدمة العامة

شهدت السنوات الأخيرة من القرن الماضي و تحديدا ابتداء من سنة 1980م تقدما ملحوظا في مجال الكشف بالأشعة تحت الحمراء، و في شتى الميادين و الفروع السلمية منها و الحربية، و ذلك راجع للتطور العلمي الهائل الحاصل في صناعة الكواشف الضوئية ذات الأبار الكمية معتمدة على تقدم فيزياء أشباه النواقل خاصة أشباه النواقل III-V و التحسينات الطارئة عليها، وهذا من خلال ظهور تقنيات و أساليب جديدة تسمح بالتحكم في البنى النانومترية، و ترسيبها على بعضها البعض، و صناعة مواد مختلفة متجانسة من الناحية البلورية. يؤدي ذلك إلى بروز ظواهر كمية قادرة على تحقيق أجهزة و أنظمة فيزيائية جديدة تسمح لنا بالكشف عن الأشعة تحت الحمراء، و التي كانت في السابق مجرد حسابات نظرية. هذا الجيل الجديد من الأجهزة يعتمد البئر الكمي الذي يقوم بحجز الإلكترونات داخل نظام ثنائي البعد مما ينجر عنه ظهور خصائص كهربائية و ضوئية و طاقةية جديدة للمادة المركبة، يمكن الكشف عنها من خلال تجميع الإلكترونات المثارة بواسطة أطوال الأمواج الواردة بحقل كهربائي خارجي.

نهدف من هذه المذكرة إلى المعالجة الرياضية و العددية لكل ما سبق و إعطاء أمثلة و تطبيقات عليها، حيث في الفصل الأول سنتطرق إلى الأشعة تحت الحمراء و نعرف كل ما هو متعلق بها و بأنواع كواشفها، خاصة الكواشف الضوئية ذات الأبار الكمية من خلال سرد و تبيان أهم المعطيات و النقاط اللازمة لشرح ذلك، من مبدأها إلى غاية طريقة عملها و عرض النماذج المتوصل لها حاليا في بيانات و رسومات توضح ذلك. ثم في الفصل الثاني نقوم بالمعالجة الرياضية لأهم المعادلات التفاضلية التي تتحكم في الظواهر الكهرومغناطيسية و الكمية داخل هذا النوع من الكواشف، و تقديم الحلول العددية الموافقة لها من خلال طريقة الحجوم المنتهية و ذلك لاستحالة الحصول على الحل التحليلي، مع تبيان كل الخطوات اللازمة. و في الفصل الأخير نتطرق إلى بعض الأمثلة و التطبيقات لهذا النوع من الكواشف تأكيداً لكلامنا باستعمال برنامج المحاكاة لعرض أهم البيانات للخصائص الضوئية و الكهربائية لها.

الفصل الأول

كواشف الأشعة تحت الحمراء ذات  
الآبار الكمية

## ( كواشف الأشعة تحت الحمراء ذات الأبار الكمية

إن قصور العين البشرية عن الكشف عند غياب مصدر للإضاءة أو عند أطوال الأمواج غير مرئية أدى إلى ظهور اهتمام كبير لتطوير كواشف حساسة خارج هذا المجال وخاصة مجال الأشعة تحت الحمراء الذي له تطبيقات واسعة في ميدان الاتصال والدفاع العسكري و الفضاء الخارجي، وتعتبر تجربة الألماني فيديريك ويليام هيرشل علم 1800م أول تجربة للكشف عن أطوال أمواج داخل هذا المجال حيث لاحظ ازدياد درجة الحرارة عند الانتقال من اللون البنفسجي إلى اللون الأحمر. ومن هذا المنطلق سنذكر في هذا الفصل التكنولوجيا المتحكمة في هذا النوع من الكواشف.

### **(1-1) الأشعة تحت الحمراء:**

#### **(1-1-1) تعريف:**

الأشعة تحت الحمراء هي مجال طيفي من الإشعاع الكهرومغناطيسي يقع بين المجال المرئي ومجال أشعة الراديو (شكل 1-a)، يمتد من نهاية اللون الأحمر المرئي  $0.750\mu\text{m}$  إلى غاية  $1\text{mm}$ ، ويقسم هذا المجال إلى ثلاثة مناطق على النحو التالي:

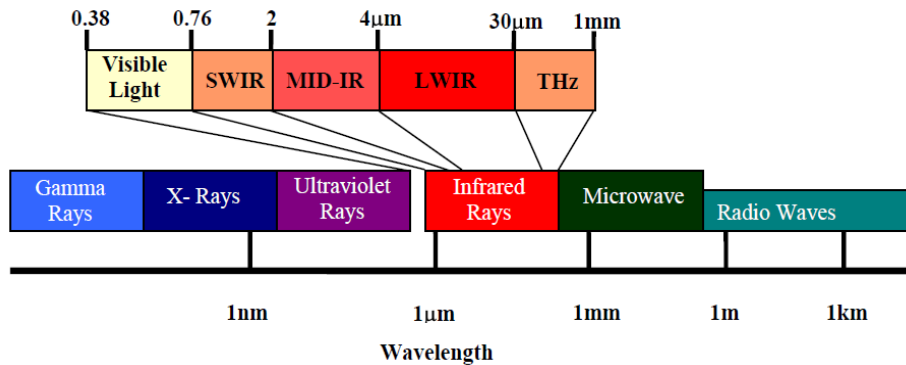
- الأشعة تحت الحمراء قريبة (قصيرة): من  $0.8\mu\text{m}$  إلى  $3\mu\text{m}$  (SWIR).

- الأشعة تحت الحمراء المتوسطة: من  $3\mu\text{m}$  إلى  $6\mu\text{m}$  (MID-IR).

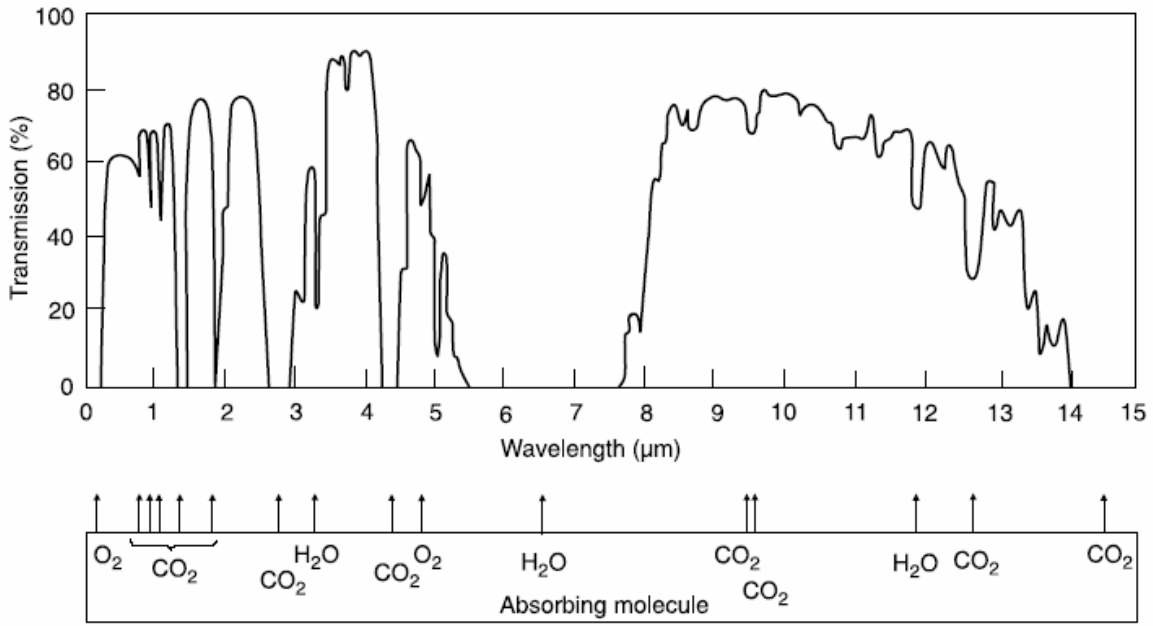
- الأشعة تحت الحمراء البعيدة (الطويلة): من  $6\mu\text{m}$  إلى  $15\mu\text{m}$  (LWIR).

وهي أشعة حرارية لها كل خواص الضوء الأساسية التي تتمثل بظواهر الانتشار والانعكاس والانكسار والتداخل والانعراج والاستقطاب، تنبعث من كافة الأجسام و الأشياء من حولنا التي لها درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق (0 K).

و يأتي الاهتمام الخاص بهذا المجال من الطيف الكهرومغناطيسي من حقيقة أن كل الكائنات في الأرض تنبعث منها و بشكل عفوي موجات تخضع لقوانين الجسم الأسود، و من هذا الإطار يمكن الكشف عن الأجسام في حالة عدم وجود أي مصدر للإضاءة، و الشكل (b-1) يبين طيف النفاذية للأشعة تحت الحمراء بدلالة طول الموجة، و نلاحظ من خلاله المجالات الثلاثة لهذا النوع من الإشعاع (القريب، المتوسط و البعيد) و الجزيئات المسؤولة عن الامتصاص في الغلاف الجوي للأرض.



الشكل (1-a): الطيف الكهرومغناطيسي وتفصيل مجالات الأشعة تحت الحمراء: القصير، المتوسطة، الطويلة [1].



الشكل (b-1): طيف النفاذية للأشعة تحت الحمراء و الجزيئات الممتصة لها في الغلاف الجوي [2].

و أدى وجود مجالين بنفاذية واضحة في طيف النفاذية (شكل (b-1)) إلى تركيز الاهتمام بكشف الأشعة تحت الحمراء الواقعة في المجال  $3-5\mu\text{m}$  و المجال  $8-12\mu\text{m}$ ، وذلك اعتمادا على حقيقتين، أولهما أن غالبية الطاقة المنبعثة من الأجسام عند درجة حرارة الغرفة تقع في المجال  $3-14\mu\text{m}$  [3]. وثانيهما أن نفاذية الغلاف الجوي عالية في هذه المجالات.

### 2-1-1) قوانين الجسم الأسود:

عندما نبحث على وجه التحديد عن أطوال أمواج تقع في مجال الأشعة تحت الحمراء فان الجسم الأسود يعتبر أفضل مصدر لذلك، لأنه يصف كافة الانبعاثات الكهرومغناطيسية التي ينتجها جسم ساخن، لهذا السبب تشكل هذه الأمواج ما يعرف بالإشعاع الحراري. نموذج الجسم الأسود ينطبق على طائفة واسعة جدا من الأجسام التي لها درجة حرارة اكبر من الصفر المطلق وعلى سبيل المثال: الإشعاع الشمسي، مصباح كهربائي، الفرن، الاحتكاك... الخ، وهو جسم فيزيائي مثالي يتفاعل مع الإشعاع الصادر بحيث يمتص كل الطاقة (الأمواج) الواردة ونتيجة لذلك ترتفع درجة حرارته، ثم يقوم بإعادة إصدار كل ما استقبل على شكل إشعاع حراري (يعتمد على درجة الحرارة) في كافة أطوال الأمواج (الأشعة الحمراء من بينها). أول تفسير صحيح لهذه الظاهرة قدمه فيان و رايلي-جيمس بطريقة شبه كلاسيكية و اتبع بإعمال العالم بلانك عام 1900م عن طريق تكميم الطاقة.

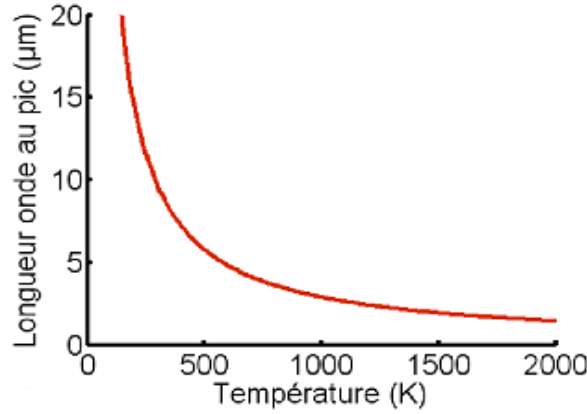
### قانون فيان:

إن أي جسم لديه درجة حرارة غير معدومة تنبعث منه إشعاع كهرومغناطيسي له طول موجة معين و مع ارتفاع درجة الحرارة ينزاح هذا الطول نحو الأمواج الأقصر (يتغير لون الجسم)، و هذا يعني أن لون الجسم الساخن يعتمد على درجة حرارته (يحوي طيف الإشعاعات الصادرة عن الجسم الساخن على كافة أطوال الأمواج الممكنة إلا أن اكبر طاقة منبعثة في وحدة الزمن تحدد لون الجسم الساخن)، وهذه الحالات

يعبر عنها بقانون فيان: "يتناسب الطول الموجي عند الطاقة العظمى المنبعثة عن جسم ساخن عكسيا مع درجة حرارة الجسم" [7].

$$\lambda_{\max} = \frac{h^2}{4.965 KT} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{T} \quad (1-1)$$

و الشكل التالي يوضح تغيرات طول الموجة ( $\mu m$ ) بدلالة درجة الحرارة ( $K$ ) و نلاحظ أن البيان يرسم دالة على شكل  $f(x) = 1/x$ .



الشكل (1-2): تغيرات طول موجة قمة الإشعاع بدلالة درجة الحرارة (قانون فيان).

قانون ستيفان بولتزمان:

إن الطاقة الكلية المنبعثة من جسم ساخن درجة حرارته  $T$  في وحدة الزمن لوحدة المساحة تعطى بالعلاقة [7]:

$$U = \delta T^4 \quad (1-2)$$

قانون بلانك:

باقتراح نموذج فيزيائي يعتمد على فرضية تكميم الطاقة تحصل بلانك على قوانين فيزيائية تطابق الملاحظات التجريبية. لتوضيح فكرة بلانك نعتبر إشعاع كهرومغناطيسي في حالة توازن ترموديناميكي مع محيطه عند درجة حرارة  $T$ ، نعتبر كذلك أن الإشعاع على شكل دفق من الفوتونات المتشابهة يعطي توزيع بلانك للعدد المتوسط من الفوتونات في كل حالة  $s$  بالشكل:

$$n_s = \frac{1}{e^{\beta \epsilon_s} - 1} \quad (1-3)$$

$\epsilon_s$ : طاقة الفوتون في الحالة  $s$  و  $\beta = 1/k_B T$  الحالة لكل فوتون تحدد بالسعة و اتجاه الاندفاع:

$$p = \hbar k \quad k = \frac{\omega}{c} \quad \epsilon = \hbar \omega \quad (1-4)$$

و من جهة أخرى نعلم انه من اجل كل قيمة لشعاع الموجة  $k$  هناك حالتان مسموحتان و منه نجد عدد الحالات المسموحة للفوتونات في حجم  $V$  يساوي:

$$2 \frac{V}{(2\pi)^3} d^3k \quad (1-5)$$

و العدد المتوسط للفوتونات في وحدة الحجم المحصورة في المجال  $k$  و  $k+dk$  هو:

$$f(k)d^3k = \frac{1}{e^{\beta\varepsilon} - 1} \cdot \frac{2}{(2\pi)^3} d^3k \quad (1-6)$$

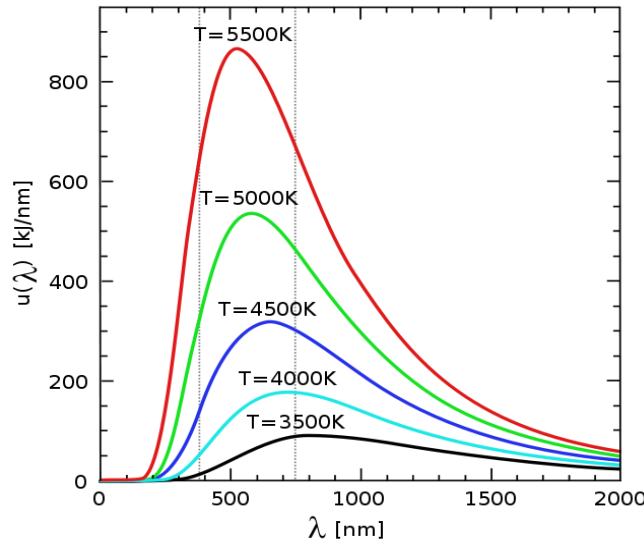
$$d^3k = 4\pi k^2 dk \quad \text{et} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-7)$$

ومنه إذا كان كل فوتون يحمل طاقة متوسطة  $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$  فان كثافة الطاقة المتوسطة للفوتونات لوحدة الحجم

لوحدة مجال  $\lambda$  تعطى بالشكل:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5 \exp\left(\frac{\beta \cdot h \cdot c}{\lambda}\right) - 1} \quad (1-8)$$

يمكن تمثيل القانون السابق من اجل عدة قيم ل  $T$  على الشكل:



الشكل (3-1): تغيرات كثافة إشعاع الجسم الأسود بدلالة طول الموجة عند درجات حرارة مختلفة.

### (3-1-1) تطبيقات الأشعة تحت الحمراء:

تدخل تطبيقات الأشعة تحت الحمراء تحت الحمراء مجالات الحياة كافة وتزداد هذه التطبيقات يوماً بعد يوم سواء في المجال السلمي أو في المجال العسكري.

ففي المجال السلمي تستخدم الأشعة تحت الحمراء في الصناعة للتسخين المنزلي والصناعي وفي لحم المعادن وقطعها بمختلف أنواعها في ذلك ليزر أشعة تحت الحمراء ، ولصناعة مصابيح الأشعة تحت الحمراء ذات الاستطاعات الواقعة بين 250 و 1000 واط، وفي الطب لتحليل الأدوية و المواد الصيدلانية وذلك بواسطة تحديد البنية الجزيئية لمادة ما، سواء كانت جزيئاتها بسيطة أو معقدة، وسواء كانت

صلبة أو سائلة أو غازية، من دون اللجوء إلى طرائق الاختبارات التخريبية و في الاتصالات بين الأقمار الصناعية التي على مدار ثابت أو بين الأقمار الصناعية والأرض[6].

أم في المجال العسكري فتطبيقات الأشعة تحت الحمراء وفيرة جدا خاصة في أنظمة الأسلحة المحمولة جوا عن طريق الطائرات (مثل الطائرة الأمريكية F18 تستعمل أشعة تحت حمراء طول موجتها  $1.06\mu\text{m}$ )، والتي غالبا ما تستعمل في تعقب الأهداف و استهدافها، وإضافة لذلك فهي توفر صورة بصرية يمكن استعمالها للرؤية الليلية و ذلك في كل الظروف المناخية (ضباب ،دخان ،مطر...)و في كل الأماكن كما يمكن استعمالها في إنارة الأهداف في الظلام و تحديد المسافات والأبعاد[6].

## 1-2 الكواشف تحت الحمراء:

تقسم كواشف الأشعة تحت الحمراء إلى قسمين الكواشف الحرارية و الكواشف الضوئية[6].

### 1-2-1 الكواشف الحرارية:

يقوم مبدأ عمل الكواشف الحرارية على تحويل الطاقة الضوئية للأشعة الواردة إلى طاقة حرارية متناسبة مع طاقة الأشعة الواردة، وتمتاز هذه الكواشف بأنها غير اصطفائية و بأنها ذات زمن استجابة كبير جداً (في حدود 10 - 3 ثانية)، وذلك بسبب انه يجب سقوط الأشعة عليها لتغير درجة الحرارة، من أشهر هذه الكواشف مقاييس الطاقة الإشعاعية الحرارية bolometers ، (وهي شرائط معدنية رقيقة)[6] ومن أحدثها مقاييس الطاقة الإشعاعية الحرارية الفائقة الناقلية superconductor ، وذلك لاحتوائها على أحد المركبات الفائقة الناقلية ككثرات النيوبيوم ذي درجة حرارة الانتشار 14.3 كلفن أو ما يعادل - 258.7 درجة مئوية، وهذا يعني أنه عند درجة حرارة 14.3 كلفن وما فوق تتغير الطبيعة التوصيلية لهذا المركب، وينتقل فجأة من حالة مركب ذي ناقلة فائقة للتيار الكهربائي إلى حالة الناقلة الطبيعية، ومن هنا ينحصر عمل هذه الكواشف في درجة حرارة منخفضة جداً، أي أقل من درجة حرارة الانتقال، ويستخدم لتبريدها غازات مميعة كالهليوم. وتمتاز هذه الكواشف بأنها ذات زمن استجابة صغير جداً عند سقوط الأشعة عليها، ومن الكواشف الحرارية كذلك الأبيال الحرارية Thermocouples /thermopiles، ويستند مبدأ عمل هذه الكواشف إلى الظاهرة الكهربائية الحرارية thermo- electric وذلك باستخدام اتصالات بين معدنين مختلفين كالبرزموت Bi والقصدير Sn والبرزموت والأنتيموان Sb .

### 1-2-2 الكواشف الضوئية:

يمكن تقسيمها إلى ثلاثة أصناف رئيسية :

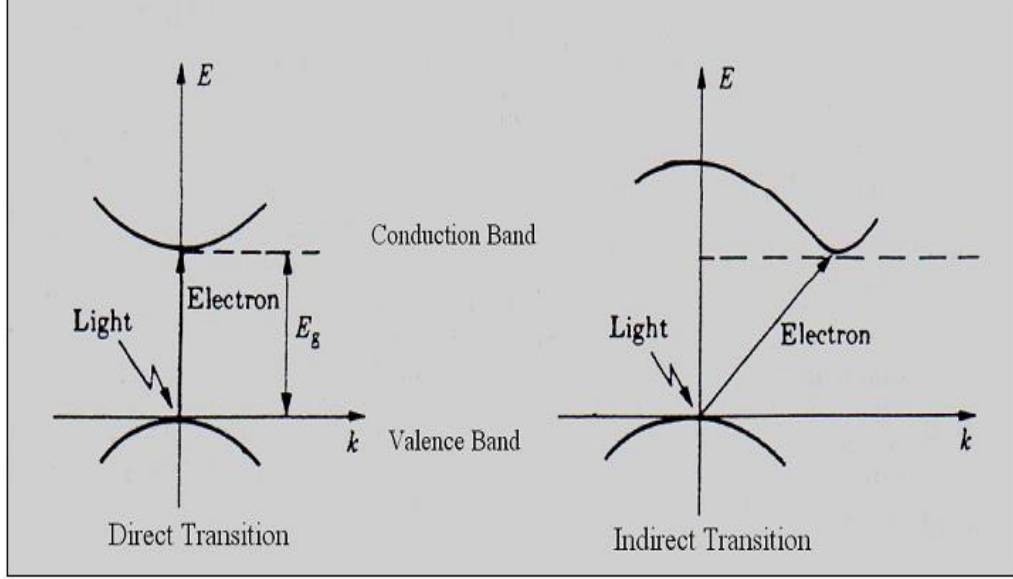
Photovoltaic Detectors  
photoconductors  
photoemissive detectors

وهي كواشف تتكون من أجهزة أشباه نواقل أو المواد التي تحمل تغيرات نتيجة لتفاعلها مع فوتونات الضوء، هذا التفاعل الذي يحدث على المستوى الذري يؤدي إلى تغيرات في المقاومة و أو فرق الجهد أو التيار يمكن الكشف عنه بواسطة دارات كهربائية خارجية.

\*في حالة Photovoltaic Detectors: يتم تسجيل التغيرات في فرق الجهد عند ورود إشعاع ضوئي على صمام مكون من وصلة شبه ناقل p-n .

\*أما في حالة photoemissive detectors: يستخدم الانبعاث الكهروضوئي للكشف عن الضوء عن طريق انبعاث الإلكترونات الحرة إلى الانود عبر تطبيق حل كهربائي.

\* وفي حالة photoconductors: (و هو ما سنهتم به في هذه المذكرة) يتم تسجيل التغيرات في التيار عند ورود إشعاع ضوئي على شبه ناقل موصل بأقطاب اومية. ففي حالة امتصاص فوتونات طاقة الواحد منها  $E=hv$  من قبل شبه الناقل فان الكترونات تثار فتنتقل من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل (إنشاء زوج إلكترون-فجوة) بطريقة مباشرة أو غير مباشرة.



الشكل (1-4): إنشاء زوج إلكترون- فجوة نتيجة امتصاص فوتون بطريقة: (a) مباشرة (b) غير مباشرة.

في الشكل المقابل نلاحظ أن  $E_g$  هي الطاقة اللازمة للانتقال بين العصابات ( $E_g$  طاقة العصابة الممنوعة). ففي حالة تناظر عصابات الطاقة (مثل عصابات GaAs و AlGaAs) يكون الانتقال مباشر (تغير في الطاقة و لا يوجد تغير في الشعاع الموجي  $K$ )، أما في حالة عدم تناظر العصابات (مثل عصابات Ge و Si) يكون الانتقال غير مباشر (تغير في الطاقة و تغير في الشعاع الموجي  $K$ ). خلافا على الكواشف الحرارية تعتبر الكواشف الضوئية من أحسن الكواشف نظرا لكونها اصطفائية و ذات زمن استجابة صغير جدا [6].

### 1-3 الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية:

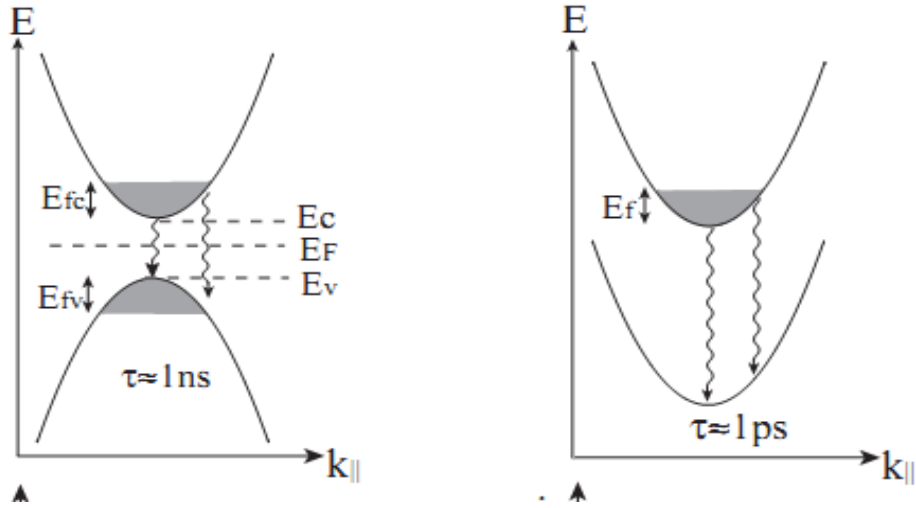
شهدت السنوات الأخيرة من القرن الماضي و تحديدا ابتداء من سنة 1980م تقدما ملحوظا في مجال الكشف بالأشعة تحت الحمراء، و ذلك راجع للتطور الكبير في صناعة الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية معتمدة على تقدم فيزياء أشباه النواقل خاصة أنصاف النواقل III-V و التحسينات الطارئة عليها، هذا من جهة و من جهة أخرى ظهور تقنيات و أساليب تسمح بالتحكم في البنى النانومترية وتعتمد هذه الكواشف على نوعين من الانتقالات الالكترونية:

- الانتقالات بين العصابات: و هي الانتقالات التي تحدث بين عصابة التكافؤ و عصابة النقل.

- الانتقالات بين العصابات التحتية: و هي الانتقالات التي تحدث داخل العصابة الواحدة (عصابة التكافؤ أو النقل).

و بهذه الطريقة يمكن الكشف على عدة أطوال موجية في وقت واحد مادام أن الالكترونات المثارة بسببها تحقق قواعد الانتقال [12].



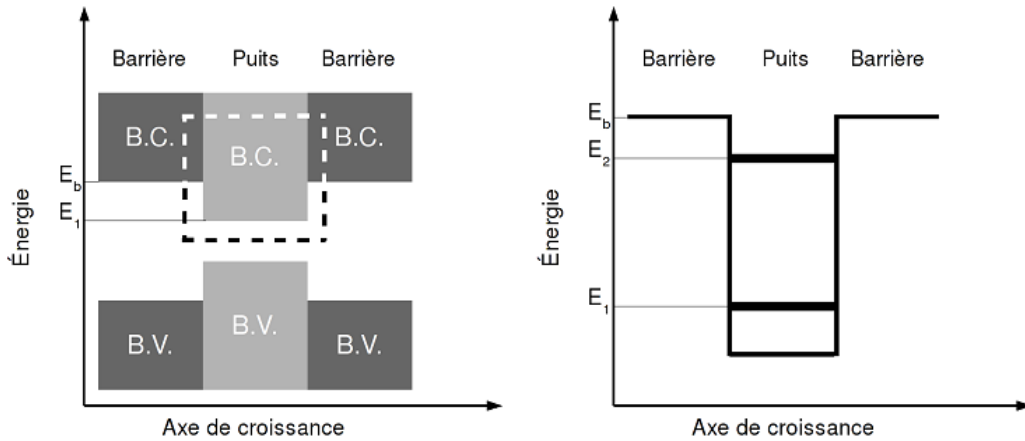


الشكل (5-1): (على اليمين) الانتقالات بين العصابات التحتية، (على اليسار) الانتقالات بين العصابات.

### 1-3-1 البئر الكمي:

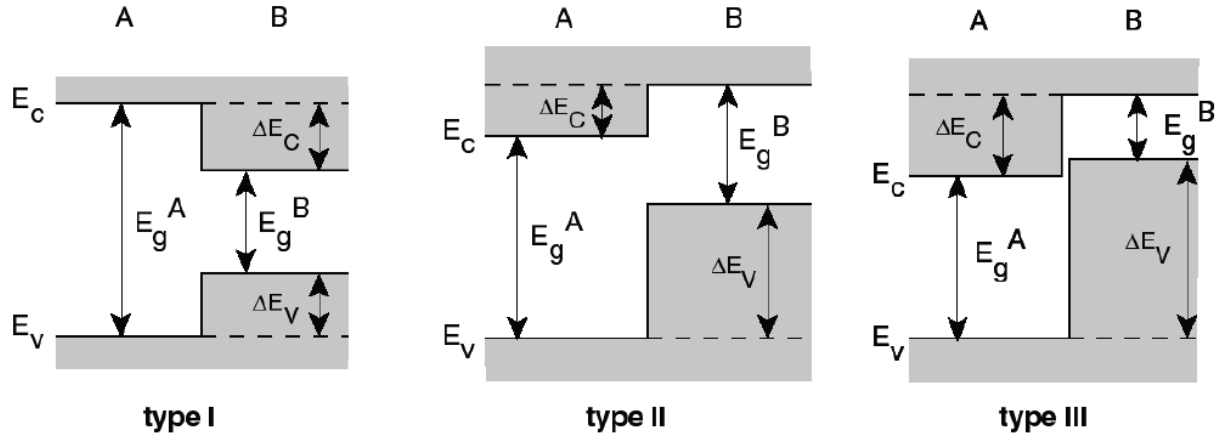
يمكن الحصول على بئر كمي من خلال ترسيب طبقة من شبه ناقل GaAs مثلا بين طبقتين من شبه ناقل آخر  $Al_xGa_{1-x}As$  ، هذا الأخير يتميز بفواصل طاقي (عصابة ممنوعة)  $E_g$  اكبر من الأول يمكن التحكم فيه بالكسر المولي للألمنيوم، التداخل بين عصابات الطاقة (عصابة التكافؤ و عصابة النقل) لشبه الناقلين ينجر عنه نشوء حاجز كموني يقوم بحصر حوامل الشحنة (الالكترونات او الثقوب) داخل البئر الكمي.

حسب طبيعة التداخل بين العصابات (الفرق في العصابات الممنوعة للمواد المختلفة ومواضعها بالنسبة لبعضها البعض) وسمك الشرائح يتحدد شكل البئر وعمقه و عرضه وبالتالي يتحدد عدد حالات الطاقة المسموحة داخله [12].



الشكل (a-6-1): (على اليمين) طاقة الكمون بين البئر و الحاجز (b) منطقة مكبرة من البئر.

يعرض الشكل (b-6-1) مختلف البنى النانومترية التي يمكن الحصول عليها بترسيب شرائح مواد شبه ناقلة بأبعاد نانومترية مختلفة، عموما تسمى البنى الحاصلة بالبنى غير المتجانسة. حسب مواضع الفواصل الطاقية الممنوعة ومقاديرها توجد ثلاثة أنواع من الآبار يرمز لها بالرمز I و II و III كما يبين الشكل (b-6-1) .



الشكل (b-6-1): مختلف البنى غير المتجانسة بين مادتين شبه ناقلتين A و B يتميزان بـ  $E_g^A$  و  $E_g^B$  على الترتيب، ترمز  $E_C$  و  $E_V$  و  $\Delta E_C$  و  $\Delta E_V$  إلى حافة عصابة النقل وحافة عصابة التكافؤ والتقطع في حافة عصابة والتقطع في عصابة التكافؤ.

بالنسبة للانتقالات بين العصابات تتعلق عتبة الامتصاص بالطول الموجي لشبه الناقل المستعمل بالعلاقة:

$$E_g (eV) = \frac{1.24}{\lambda (\mu m)} \quad (1-9)$$

بهذه الطريقة تمكن التحكم بعرض العصابة الممنوعة لانتقاء أطوال موجية مختارة و معينة. فعلى سبيل المثال في البئر الكمي من نوع GaAs له عصابة ممنوعة طاقتها 1.4eV و الحاجز من نوع AlGaAs له عصابة ممنوعة طاقتها تساوي 2.4eV، و منه فان احتمال امتصاص الفوتون من قبل الكثرونات البئر اكبر منه بالنسبة إلى الكثرونات الحاجز و ذلك راجع للاختلاف في طاقات العصابة الممنوعة. و تعطى طاقات البئر الكمي بالعلاقة [1]:

$$E_{Qw} = E_{g_w} + \frac{h^2 \pi^2}{2m_r^* L_w^2} \quad (1-10)$$

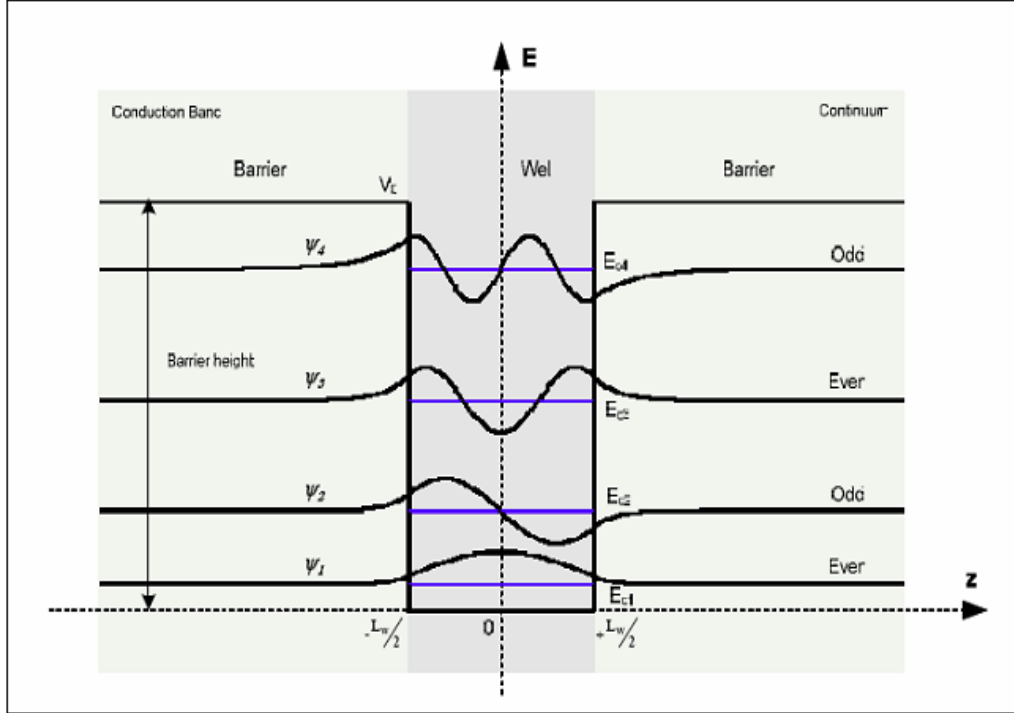
أما بالنسبة للانتقالات بين العصابات التحتية فالالكثرونات و الثقوب تحتل المستويات الطاقية المكممة داخل عصابات النقل و التكافؤ بالترتيب للبنى المختلفة المكونة من نوعين من المواد الشبه ناقلية (حالة GaAs و AlGaAs) يسمح بإنشاء بئر كوانتي. مما يؤدي إلى تقطع دالة الطاقة و هذه الحالة شبيهة بحالة كمون لانهائي حيث تعطي معادلة شرودينغر بالشكل [1]:

$$-\frac{h^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \psi_n = E_n \psi_n \quad (1-11)$$

و تعطى الدوال الخاصة و الطاقات الخاصة على الشكل [1]:

$$\psi_n(Z) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{\pi n Z}{L}\right) \quad (1-12)$$

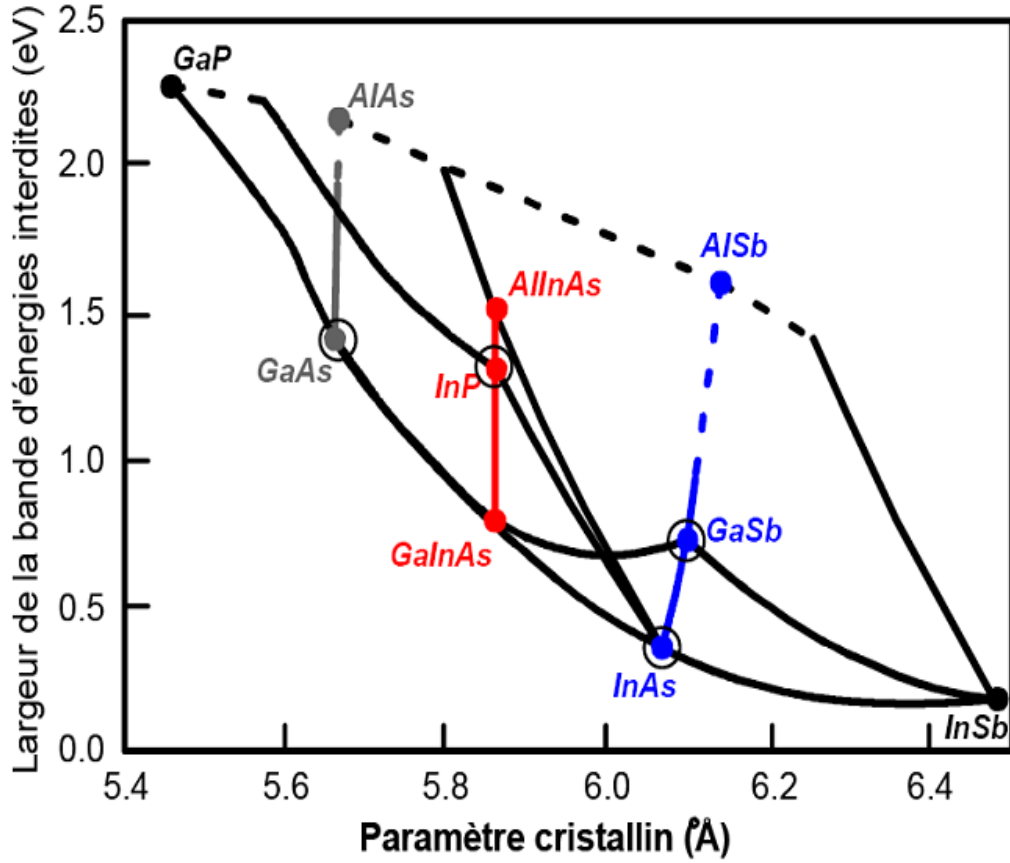
$$E_n = \left( \frac{h^2 \pi^2}{2m_e L^2} \right) n^2 \quad (1-13)$$



الشكل (1-7): تقطع الطاقة داخل بئر كوانتي متناظر.

### 2-3-1 المواد المستعملة في صناعة الآبار الكمية:

كما رأينا سابقا فإنه من أجل تحقيق و تركيب بئر كمي يجب إحضار مادتين شبه ناقلتين (أحدهما يكون البئر و الآخر يكون الحاجز) لهما طاقات عصابة ممنوعة مختلفة. اختيار المادتين يكون على أساس الفرق في الطاقات بين عصابتي النقل و ذلك لامتناس أطوال الأمواج المطلوبة. و جهة ثانية يجب على المادتين الشبه ناقلتين أن تحققا الحد الأدنى من التشوه عند ترسيبهما على بعضهم البعض، ولهذا يجب أن تكون للمادتين نفس الخصائص التركيبية للشبكة البلورية أو أن تكون مقاربة بما فيه الكفاية. و لهذا فإنه في حالة الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية يكون المواد الأصلح و الأمثل هي GaAs و AlGaAs و ذلك لتشابه الخواص التركيبية لكلا المادتين [2].

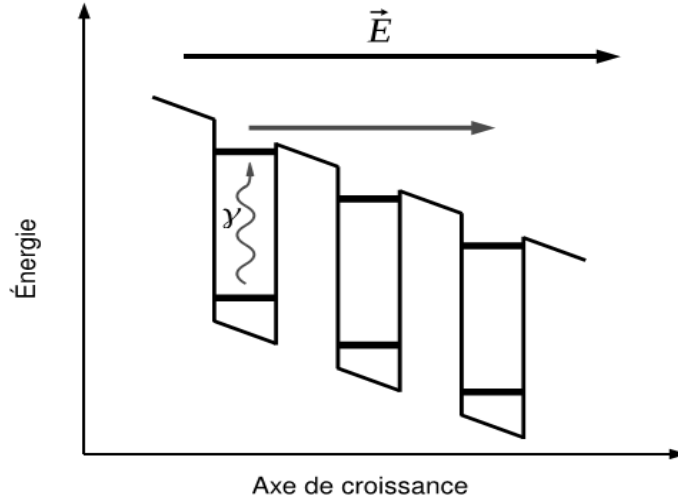
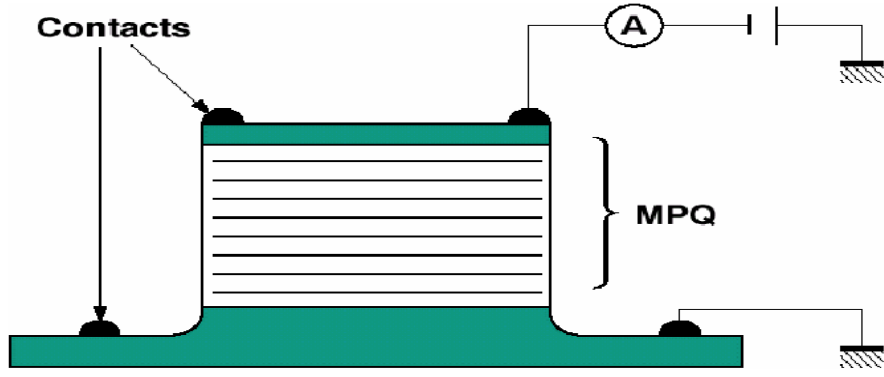


الشكل (8-1): عرض العصابة الممنوعة لأهم أشباه النواقل بدلالة ثابت الشبكة البلورية

### 1-3-3 الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية:

تتكون من سلسلة من الآبار الكمية المتماثلة و ذلك من اجل زيادة ومضاعفة فرص امتصاص الفوتونات، في حالة التوازن الحراري يكون إسكان الإلكترونات على مختلف المستويات الطاقية بإحصاء فيرمي-ديراك، و في درجات الحرارة المنخفضة تكون كل الإلكترونات تحتل المستوى الأساسي و ليكن  $E_1$  يمكن للإلكترون أن يثار و ينتقل إلى المستوى الطاقى  $E_2$  (نفترض وجود مستويين فقط) عن طريق امتصاص فوتون طاقته  $E = E_2 - E_1$ . و إذا كان المستوى  $E_2$  قريب بما فيه الكفاية لأعلى البئر الكمي يمكن للإلكترون الانتقال إلى مجال الطاقات المستمرة (عن طريق الفعل النفقي) و التحرك في كل الاتجاهات 3D (مع العلم أن الإلكترون داخل البئر الكمي يتحرك على المستوى العمودي على اتجاه النمو (2D) و في حالة وجود عدة إلكترونات مثارة بنفس الطريقة يكون لدينا سيلان من الإلكترونات نحو الطاقات المستمرة بتوزيع منتظم. و من هذا المنطلق يجب تطبيق حقل كهربائي  $E$  يعمل على جرف كل الإلكترونات نحو اتجاه معين (اتجاه نمو الآبار الكمية) ليتشكل لنا تيار يمكن مراقبة تغيراته [6].

\* يمكن إعادة الإلكترونات إلى المستوى الأساسي و ذلك خلال سقوطها في احد الآبار الموالية و ذلك يؤثر على شدة التيار المتحصل [6].



الشكل (9-1): سلسلة من الآبار الكمية.

### 1-3-4 أنواع الكواشف الضوئية:

عموما هناك ثلاثة أنواع من الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية يمكن صناعتها و ذلك حسب مستويات الانتقال للإلكترونات و سنذكرها حسب التسلسل الزمني لاكتشافها [1][12].

#### 1-3-4-1 كاشف ضوئي حالة مقيدة – حالة مقيدة:

في هذا النوع تكون الحالة الأساسية للإلكترون و الحالة المثارة داخل البئر الكمي. امتصاص الفوتون (الذي له طاقة تقع في مجال الأشعة تحت الحمراء)، يؤدي إلى انتقال الإلكترون على شكل انتقال بين العصابات التحتية من الحالة الأساسية إلى الحالة المثارة. عند تطبيق حقل كهربائي ينتقل هذا الإلكترون إلى الحالات الحرة تحت تأثير الفعل النفقي (متجاوزا بذلك طاقة الحاجز الكموني) منتجا بذلك تيار ضوئي. هذا النوع من الامتصاص يكون له طيف امتصاص ضيق وذلك راجع لقلة عدد الإلكترونات التي تسلك هذا النوع من الانتقالات.

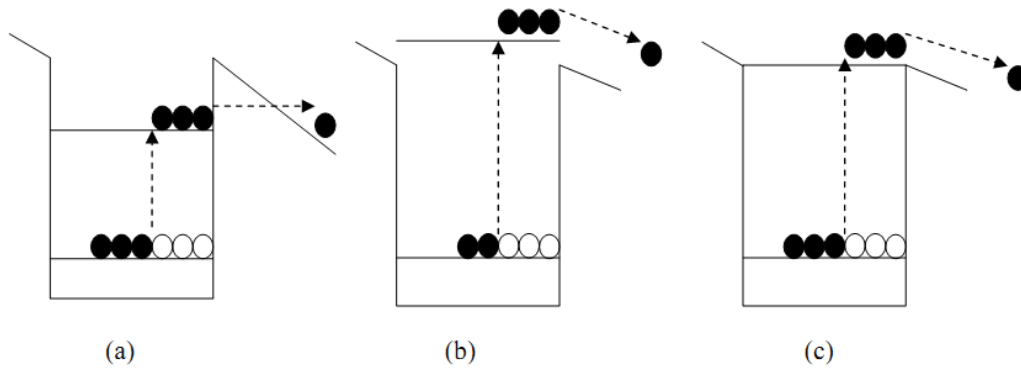
#### 1-3-4-2 كاشف ضوئي حالة مقيدة – حالة حرة:

في هذا النوع تكون الحالة الأساسية للإلكترون داخل البئر الكمي و الحالة المثارة تكون خارجه يأتي ذلك من اجل تعزيز التيار الضوئي و الحد من تيار الظلام (سنعرف كلا المصطلحين لاحقا) و ذلك من خلال تغيير عرض البئر الكمي للانتقال مباشرة إلى الحالات الحرة دون اللجوء للفعل النفقي. و مع ذلك يؤدي هذا

الشيء إلى ظهور مشكلة تتمثل في أن الفرق في الطاقة بين مستوى الحالة الحرة و مستوى الحاجز الكموني يترجم على شكل حرارة فيؤدي ذلك إلى زيادة درجة الحرارة الكاشف مما يؤثر على فعاليته.

### 1-3-4-3) كاشف ضوئي حالة مقيدة- حالة شبه مقيدة:

في هذا النوع تكون الحالة الأساسية للإلكترون داخل البئر الكمي و الحالة المثارة يكون لها نفس المستوى مع الحاجز الكموني . و هذا النوع وسطي بين النوعين السابقين و هو الأفضل حالياً.



الشكل(10-1): الانتقالات حالة مقيدة - حالة مقيدة, حالة حرة, حالة مقيدة- حالة شبه مقيدة.

### 1-3-5) طريقة عمل الكاشف:

الكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية يجب أن تكون مستقطبة وظيفياً، لهذا فان الإشارة الملتقطة تكون على شكل تيار له مركبتان الأول يسمى التيار الضوئي و الثاني يسمى تيار الظلام [7].

### 1-3-5-1) التيار الضوئي:

إذا كانت لدينا بنية لبئر كمي له تطعيم  $n$  فهذا يعني وجود الكترونات في عصابة النقل و على هذا النحو يكون مستوى فيرمي أعلى بقليل من مستوى الحالة الأساسية لهذه الالكترونات ومنه يمكن لها امتصاص فوتونات ذات طاقة مناسبة للانتقال من الحالة الأساسية إلى الحالة المثارة الأولى(حالة مقيدة أو شبه مقيدة أو حرة). و بانتقال الالكترونات من الحالة المثارة إلى مجال الطاقات المستمرة، تنجرف تحت تأثير الحقل الخارجي لتشكل التيار الضوئي (هذه الرؤية مثالية لأنه يمكن إعادة اصطياد الالكترونات من طرف الآبار التالية) .

### 1-3-5-2) تيار الظلام:

وهو وجود تيار في حالة غياب أي مصدر للإضاءة نتيجة الإثارة الحرارية الطبيعية حيث يقوم الكاشف استقبال الفونونات الواردة من محيطه فتعمل على إثارة الإلكترون لينتقل إلى مستويات مثارة. و شدة هذا التيار متناسبة بمدة التعرض للحرارة و درجتها، و يتم إنشائه عن طريق ثلاثة آليات: الأولى من خلال مرور الالكترونات من بئر كمي إلى آخر عن طريق الفعل النفقي و ذلك في حالة تساوي طاقة المستويين في كلا البئرين و هو تيار مستقل عن درجة الحرارة و يكون هو المهيمن في درجات الحرارة المنخفضة، أما الآلية الثانية و الثالثة فينتج التيار عن طريق الإثارة الحرارية الطبيعية فتنتقل الالكترونات من الحالة الأساسية المقيدة إلى الحالة المثارة شبه المقيدة في حالة درجات الحرارة المتوسطة، و من الحالة الأساسية المقيدة إلى الحالة المثارة الحرة في حالة درجات الحرارة العالية على التوالي، الآلية الثالثة تكون هي

المهيمنة على تيار الظلام في درجة حرارة الغرفة [7]. و نشير إلى أنه تيار غير مرغوب فيه لأنه يؤثر على حساسية الكاشف.

\* النسبة بين التيار الضوئي و دفق الفوتونات الواردة يسمى معامل استجابة الكاشف (A/Watt). في حالة أبار كمية قليلة، يكون هذا المعامل مستقل عن عدد الآبار الكمية. أما إذا كان عددها معتبر فإنه يتغير بمعامل  $1/N$  (N عدد الآبار الكمية).

### 1-3-5-3 معامل الامتصاص:

الامتصاص عامل مهم في عملية تصميم كاشف ضوئي متعدد أطوال الأمواج لأنه الكمية الفيزيائية الوحيدة التي يمكن قياسها من العينة. و معامل الامتصاص يتناسب مع كمية الضوء أو الإشعاع الوارد الذي يتم امتصاصه. و بالتالي يجب أن يكون ذا قيمة عالية من أجل تحقيق كفاءة جيدة في الكشف [6][7].

$$\alpha(h\nu) = \frac{\text{nombre de transition par unite de volume et de temp}}{\text{flux de photon incident}} \frac{(W/AL)}{I}$$

في هذا الفصل قمنا و لو بشكل مختصر بتعريف الكواشف الضوئية للأشعة الحمراء ذات الآبار الكمية و كيفية صنعها و الحصول عليها و ذكرنا أهم الخصائص فيها. نقطة البداية في تحديد هذه الخصائص تستدعي المعرفة المسبقة بطيف طاقة الالكترونات في الآبار الكمية وهو أمر ليس من اليسير تحديده خاصة إذا كانت بنية البئر معقدة. لهذا يجب الاستعانة بمجموعة من النماذج الرياضية والعديدية لإتمام هذه المهمة. وهذا ما سنتطرق إليه في الفصل الموالي.

# الفصل الثاني

## النماذج الرياضية و العددية



## 2) النماذج الرياضية و العددية

بما أن أبعاد المنطقة الفعالة في المركبات المدروسة تكون من رتبة النانومتر، والحصر الكمي لحوامل الشحنة نتيجة تخفيض أبعاد الحركة لها ينجر عنه إعادة توزيع للعصابات و كثافة الحالات. سنعرض في هذا الجزء مختلف النماذج الرياضية التي تحكم الظواهر الفيزيائية في هذا النوع من البنى: الظواهر الكهرومغناطيسية و الظواهر الكمية، ومن اجل هذه المذكرة سنقتصر على ذكر معادلة بواسون و معادلة شرودينغر مع افتراض بعض التقريبات.

### (1-2) معادلة بواسون:

تكتب معادلة بواسون في شكلها العام لوصف الظواهر الكهرومغناطيسية مع الأخذ بعين الاعتبار تغيرات السماحية الكهربائية حتى تتلائم مع البنى غير المتجانسة بالشكل التالي:

$$\text{div}(\epsilon \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) = -\rho \quad (2-1)$$

حيث  $\epsilon$  تمثل السماحية الكهربائية و  $\Phi$  الكمون الكهربائي و  $\rho$  مجموع كثافة الشحنات في شبه الناقل، وهذه المعادلة تعبر عن تغيرات الكمون الكهربائي في الميدان المدروس، و يرتبط عادة الكمون الكهربائي بالحقل الكهربائي الناتج بالعلاقة التالية:

$$\overrightarrow{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \Phi \quad (2-2)$$

تعطى معادلة بواسون في بعد واحد مع تفصيل مركبات كثافة الشحنة بالشكل:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon(z) \frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right) = -\rho = -e \left[ N_D^+(z) - N_A^-(z) + p(z) - n(z) \right] \quad (2-3)$$

حيث:

e: شحنة الإلكترون (قيمة مطلقة)

n: كثافة الإلكترونات

p: كثافة الفجوات

$N_D^+$ : كثافة المانحات المؤينة و تعطى بالعلاقة التالية:

$$N_D^+ = \frac{N_D(z)}{1 + \exp\left(\frac{E_F - [U(z) - E_d]}{k_B T}\right)} \quad (2-4)$$

$N_A^-$ : كثافة الأخذات المؤينة و تعطى بالعلاقة التالية:

$$N_A^-(z) = \frac{N_A(z)}{1 + 2 \exp\left(\frac{[U(z) - E_g(z) + E_d] - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2-5)$$

في المعادلتين السابقتين نعرف:

$N_A$  و  $N_D$ : كثافة التطعيم من الذرات المانحة و الأخذة على التوالي.

$E_a$  و  $E_d$ : طاقة التأين لذرات المانحة و الأخذة على التوالي.

$E_F$ : طاقة مستوى فيرمي.

$T$ : درجة الحرارة بالكالفن.

$k_B$ : ثابت بولتزمان.

لحل معادلة بواسون يلزم معرفة الشروط الحدودية و يوجد نوعان من هذه الشروط:

**شروط دريكلي:** تعطى قيم تحقق الحل عند نهاية أو حدود مجال الدراسة مثل:

$$\begin{aligned}\Phi(0) &= \Phi_1 \\ \Phi(L) &= \Phi_2\end{aligned}\quad (2-6)$$

**شروط نيومان:** تحدد قيم مشتقات الحل عند نهاية أو حدود مجال المكاملة وهي في الحالة العامة عبارة عن سطوح ويعبر عنها مثلاً بالشكل:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right| = 0 \quad (2-7)$$

حيث يمثل  $\bar{n}$  شعاع الوحدة الناظم على هذه الحدود.

## 2-2 معادلة شرودينغر:

في إطار محاكاة الظواهر الكمية في مركبات أشباه النواقل، سنقوم بدراسة البنية الطاقوية لغاز من الالكترونات أو الثقوب محصور داخل هذه البنية و يمكن وصف هذه الأخيرة عن طريق معادلة شرودينغر المستقلة عن الزمن بالشكل:

$$[T + U(r)]\psi^\alpha(r) = E^\alpha\psi^\alpha(r) \quad (2-8)$$

حيث يمثل:

$T$ : مؤثر الطاقة الحركية.

$U$ : مؤثر الطاقة الكامنة.

$\psi^\alpha$ : دالة الموجة الخاصة للحالة للإلكترون في الحالة  $\alpha$ .

$E^\alpha$ : الطاقة الموافقة للحالة الخاصة  $\alpha$ .

في ظل تقريب الكتلة الفعالة الذي يرفق لكل إلكترون  $n$  كتلة فعالة تتضمن تأثير كمون الشبكة البلورية في عصابة الطاقة الموافقة لها، باعتبارها متماثلة المناحي و لها شكل قطع مكافئ، يعطى مؤثر الطاق الحركية بالعبرة التالية:

$$T(r) = -\frac{\hbar^2}{2} \operatorname{div} \left( \frac{1}{m^*} \operatorname{grad} \right) \quad (2-9)$$

حيث  $m^*$  تمثل الكتلة الفعالة، و يعطى مؤثر الطاق الكامنة بالشكل:

$$U(r) = -e\phi(r) + \Delta E_c \quad (2-10)$$

حيث  $\Delta E_c$  يمثل الكمون الناتج من التقطع في عصابة النقل للبنى غير المتجانسة و  $\Phi(r)$  كمون ينتج عن أي تشويه قد يطرأ على الدورية المثالية للكمون البلوري مثل ذرات التطعيم المتؤينة أو الحقل الخارجي.

## 2-3 تقريب دالة الغلاف:

توصف دوال موجة إلكترون في البنى غير المتجانسة بتقريب دالة الغلاف. نعتبر بنية بئر كمي عرضه  $L$  مشكل بتريسيب مادة  $A$  بين حاجزين من مادة  $B$ . ونعتبر كتقريب أولي أن ثوابت الشبكة متقاربة للمادتين، يعطى تقريب دالة الغلاف في كل طبقة بالشكل:

$$\Psi(r) = \sum_n f_n^{(A)}(r) u_{n,k_0}^{(A)}(r) \quad (2-11)$$

$$\Psi(r) = \sum_n f_n^{(B)}(r) u_{n,k_0}^{(B)}(r) \quad (2-12)$$

حيث  $f_n$  دالة الغلاف (لها تغير بطيء) و الدالة  $u_n$  تمثل الجزء الدوري من دالة بلوخ (لها تغير سريع) و هو جزء متماثل في كلا الطبقتين (تقريب) و منه نكتب:

$$\Psi(r) = \sum_n f_n^{(A,B)}(r) u_{n,k_0}(r) \quad (2-13)$$

و من هذه العلاقة نستنتج علاقة استمرارية دالة الموجة عند السطح البيني بين المادتين. لكون التقطع يكون على مستوى الاتجاه  $z$  مثلا فان الخصائص البنيوية في السطح العمودي لا تتغير عند الانتقال فيه و منه نكتب :

$$f_n^{(A)}(r_{\perp}, z_0) = f_n^{(B)}(r_{\perp}, z_0) \quad (2-14)$$

يتيح صمود البنية إزاء الانسحاب في المستوي العمودي على اتجاه النمو ( $z$  مثلا) كتابة دالة الغلاف في شكل جداء موجة مستوية بدالة بطيئة التغير في الاتجاه  $z$ :

$$f_n^{(A,B)}(r_{\perp}, z) = \frac{1}{\sqrt{S}} e^{ik_{\perp}r_{\perp}} \chi_n^{(A,B)}(z) \quad (2-15)$$

و منه تكتب معادلة شرودينغر بالشكل:

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2} \nabla_r \frac{1}{m^*(z)} \nabla_r + V(z) \right] f(r) = E f(r) \quad (2-16)$$

و بتعويض قيمة  $f(r)$  في المعادلة نجد:

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2} \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{1}{m^*(z)} \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) + V(z) + \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*(z)} \right] \chi(z) = E \chi(z) \quad (2-17)$$

## 4-2 كثافة الحالات و التيار:

في حالة غياب الحصر أي أن الالكترونات تتحرك بحرية داخل الشبكة البلورية في الاتجاهات الثلاثة  $x, y, z$  هذا يعني أن الدوال الخاصة لهذه الالكترونات هي دوال خاصة للكمون البلوري (دوال بلوخ)، و تعطى الطاقات الخاصة الموافقة لها بالشكل:

$$E(k) = E_c + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m^*} \quad (2-19)$$

انطلاقا من هذه العلاقة يمكن حساب كثافة الحالات من اجل 2D, 3D.

## 1-4-2 كثافة الحالات في 3D :

و هي تمثل عدد الحالات الالكترونية في وحدة مجال الطاقة، و لحسابها نأخذ من المجال  $\vec{k}$  قشرة كروية نصف قطرها  $k$  وسمكها  $dk$  تحتوي إلى عدد من القيم  $g(k)$  يساوي:

$$g(k)dk = \frac{4\pi k^2 dk}{8\pi^3/V} = \frac{V}{2\pi^2} k^2 dk \quad (2-20)$$

حيث  $8\pi^3/V$  تمثل الحجم المخصص لقيمة واحدة من  $k$ ، و بما أن كل حالة من الشعاع الموجي تحوي حالتين لهما نفس الطاقة (مختلفتين في السبين)  $g(E)dE = 2g(k)dk$  فإنه يمكن البرهنة على أن كثافة الحالات الالكترونية في 3D في بجوار حافة عصابة النقل تعطي بالعلاقة:

$$g(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_c} \quad (2-21)$$

يحسب تركيز الالكترونات في عصابة النقل وفقا للمعادلة (2-13) حيث نقوم بمكاملة كثافة الحالات مضروبة في احتمال انشغال مستوى طاقي  $E$  من حافة عصابة النقل إلى  $+\infty$  :

$$n_{3D} = \int_{E_c}^{+\infty} g(E)f(E)dE \quad (2-22)$$

$f(E)$  تمثل دالة التوزيع لفيرمي - ديراك و تعطى بالعلاقة التالية:

$$f(E) = \frac{1}{\left( 1 + \exp\left( \frac{E - E_F}{k_B T} \right) \right)} \quad (2-23)$$

حيث يمثل  $E_F$  طاقة مستوى فيرمي و  $k_B$  ثابت ستيفان بولتزمان، وبعد التعويض في التكامل السابق يفضي الحساب إلى الحصول على عبارة تركيز الالكترونات في ثلاثة أبعاد بالشكل التالي:

$$n_{3D}(z) = 2 \left( \frac{2\pi m_c^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} F_{1/2} \left( \frac{E_F - E_c}{k_B T} \right) \quad (2-24)$$

$F_{1/2}$  تمثل تكامل فيرمي من الدرجة  $\frac{1}{2}$  و  $h$  يمثل ثابت بلانك.

## 2-4-2 كثافة الحالات في 2D :

الآن نقوم بتقليص بعد إلى غاية قيمة تقارب طول موجة دي - بروي للإلكترون، و هذا يعمل على إضافة حد كمون الحصر في معادلة شرودينغر. الطاقة في اتجاه الحصر (و ليكن  $z$ ) تكون مكممة و في هذه الحالة تكون طاقة الالكترونات تساوي طاقة عصابة النقل بالإضافة إلى طاقة حركتها عند وجود الحصر، و دوال الموجة تكتب على شكل جداء من موجة بلوخ و الطاقة الكامنة لا تتغير مع الاتجاه  $z$  (الإلكترون يتحرك في المستوى oxy فقط) و منه تكتب دالة الموجة للإلكترون بالشكل:

$$\psi^\alpha(r) = \chi^\alpha(z) e^{iK_x x + iK_y y} u(r) \quad (2-25)$$

حيث  $u(r)$  تمثل دالة بلوخ و  $\chi^\alpha(z)$  تمثل حل معادلة شرودينغر في تقريب الكتلة الفعالة، و تعطى هذه المعادلة في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$(2-26) \quad -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{m^*} \left( \frac{\partial \chi^\alpha(z)}{\partial z} \right) \right) + (E_\alpha - U(z)) \chi^\alpha(z) = 0$$

$$(2-27) \quad E(k) = E_\alpha + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m^*}$$

حيث  $\alpha$  رمز العصابة التحتية ثنائية البعد، و بنفس الطريقة السابقة نجد كثافة الحالات الالكترونية في 2D بالشكل:

$$(2-28) \quad g_\alpha(E) = \frac{dN(E)}{dE} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} = g_0$$

و تعطى التركيز الالكتروني بالشكل:

$$n_\alpha = \int_{E_\alpha}^{\infty} g_\alpha(E) f(E) dE \quad (2-29)$$

حيث  $f(E)$  دالة التوزيع لفيرمي - ديراك:

$$f(E) = \frac{1}{\left( 1 + \exp\left( \frac{E - E_F}{k_B T} \right) \right)} \quad (2-30)$$

و بالتكامل نجد:

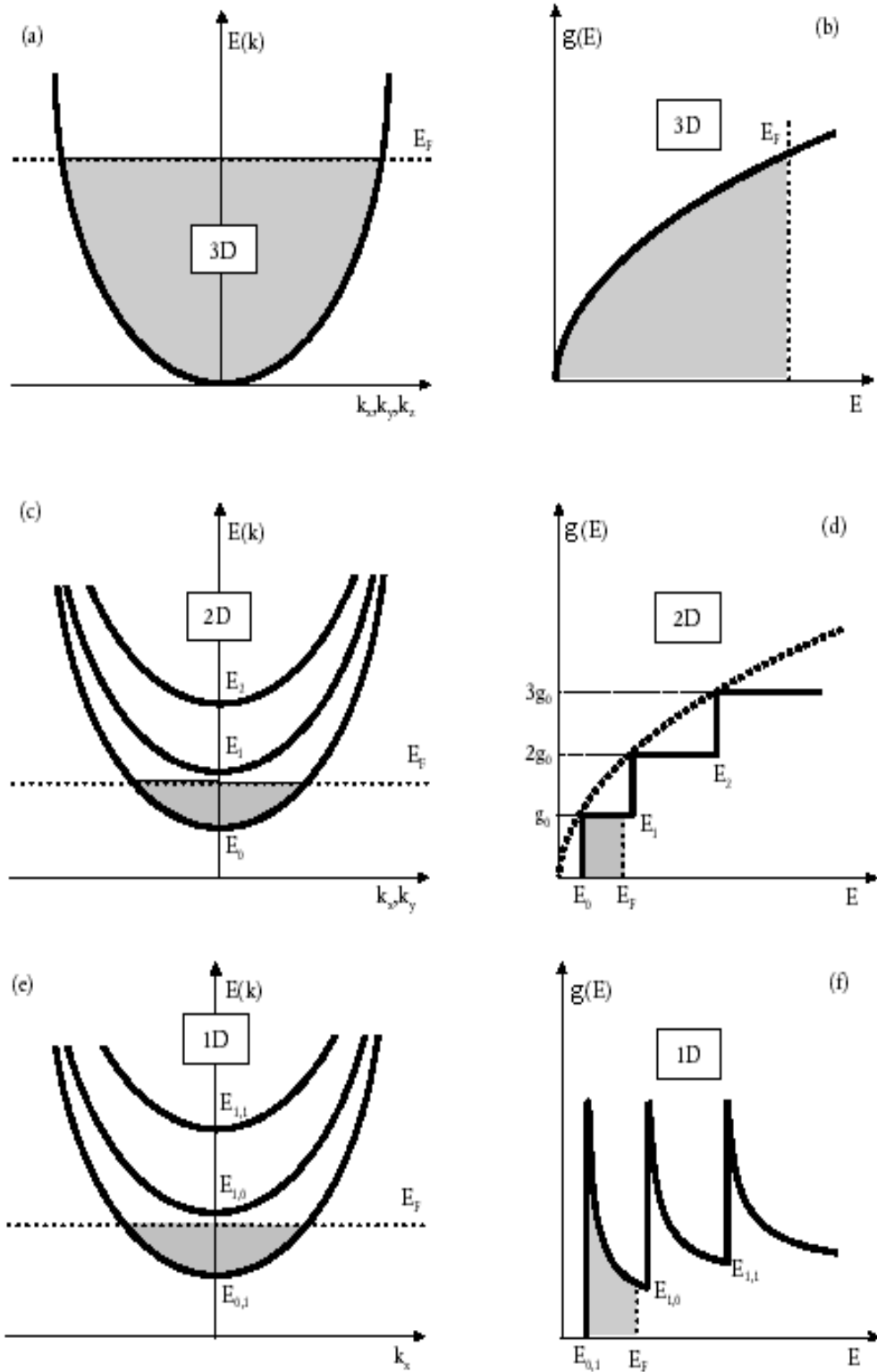
$$(2-31) \quad n_\alpha = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} k_B T \ln \left( 1 + \exp\left( \frac{E_F - E_\alpha}{k_B T} \right) \right)$$

### 3-4-2 كثافة التيار:

باعتبار أن التيار النفقي مهمل و أن كثافة الالكترونات منتظمة داخل البئر الكمي و ان كثافة التطعيم ثابتة ايضا تعطى كثافة تيار الظلام بالشكل التالي:

$$(2-32) \quad j_{dark} = e v n_{3D}$$

حيث  $e$  تمثل شحنة الإلكترون و  $v$  سرعة جر الالكترونات و  $n_{3D}$  الكثافة الالكترونية في ثلاثة أبعاد.



الشكل (1-2): علاقة التشتت  $E(K)$  و كثافة الحالات  $g(E)$  لغاز الالكترونات في حالة 1D, 2D, 3D

5-2 قواعد الانتقال للانتقالات الضوئية:

إن تفاعل الإلكترون مع الحقلين الكهربائي و المغناطيسي لإشعاع كهرومغناطيسي وارد عليه يعمل على تشتته و الهاميلتون الذي يصف هذا التفاعل يعطى بالعلاقة:

$$H = H_0 + H' = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(r) \right] + \frac{e}{2m^*c} \left( \vec{p} \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \vec{p} \right) \quad (2-33)$$

حيث  $\vec{p}$  هو مؤثر كمية الحركة و  $\vec{A}$  شعاع الكمون و يعطى بالعلاقة :

$$\vec{A} = -\frac{\epsilon c F}{2i\omega} \left[ e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \right] \quad (2-34)$$

الحد الثاني في معدلة هاميلتون التفاعل يعبر عن اضطراب من اجل شدة ضعيفة، و منه يكون  $[\vec{p} \cdot \vec{A}] = 0$

في بئر كمي مصنوع من أشباه النواقل تكتب دوال الموجة على شكل دوال بلوخ تتراكم فوق بعضها البعض مشكلة غلاف، الانتقال بين هذه الدوال يوافق الانتقال بين العصابات التحتية، والانتقال بين الأغلفة يوافق الانتقال بين العصابات، و معدل هذه الانتقالات من الحالة الابتدائية  $i$  إلى الحالة النهائية  $f$  يعطى بقاعدة فيرمي الذهبية:

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | H' | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega) \quad (2-35)$$

$$\langle f | H' | i \rangle = \frac{ieF}{2m^*\omega} \langle f | \hat{\epsilon} \cdot \vec{p} | i \rangle \quad (2-36)$$

حيث  $E_f$  و  $E_i$  طاقة الحالة الابتدائية و النهائية على الترتيب و  $\hbar\omega$  طاقة الفوتون الوارد و دوال الموجة للحالة الابتدائية و النهائية  $i$  و  $f$  تعطى بالعلاقة :

$$\begin{aligned} \Psi_i &= u_i(r) f_i \\ \Psi_f &= u_f(r) f_f \end{aligned} \quad (2-37)$$

حيث تمثل  $u_i, u_f$  دوال بلوخ الابتدائية و النهائية و  $r$ : موضع الشعاع في المستوي oxy. ويمكن كتابة عنصر مصفوفة لمعدل الانتقال في إطار تقريب دالة الغلاف على شكل حدين يظهران من خلال نشر دالة الحالة كما يلي:

$$\langle \Psi_f | \hat{\epsilon} \cdot \vec{p} | \Psi_i \rangle = \langle u_f | \hat{\epsilon} \cdot \vec{p} | u_i \rangle \langle f_f | f_i \rangle + \langle u_f | u_i \rangle \langle f_f | \hat{\epsilon} \cdot \vec{p} | f_i \rangle \quad (2-38)$$

دوال بلوخ تشكل أساس متعامد إذن نحصل على  $\langle u_f | u_i \rangle = \delta_{m,n}$  و منه يمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة على شكل مجموع لتكاملين على النحو التالي:

$$\hat{\epsilon} \cdot \vec{p} = \hat{\epsilon} \cdot \langle u_f | \hat{p} | u_i \rangle \int_{\Omega} f_f^* f_i d^3r + \hat{\epsilon} \cdot \delta_{m,n} \int_{\Omega} f_f^* \hat{p} f_i d^3r \quad (2-38)$$

حدا التكامل في المعادلة السابقة يسمحان بظهور نوعان من الانتقال داخل البنى غير المتجانسة، ففي حالة الانتقال بين العصابات (من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ) يكون الحد الثاني من العبارة السابقة معدوم و ذلك بسبب التعامد لدوال بلوخ في عصابات النقل و التكافؤ  $\delta_{m,n} = 0$  ، و من ناحية أخرى في حال الانتقالات بين العصابات التحتية يكون الحد الأول معدوم لان الهاميلتون المستعمل قرين لذاته (هرميتي).

و منه عنصر مصفوفة الانتقال لكل نوع من أنواع الانتقالات تكون كما يلي:

$$M_{v \rightarrow c} = \langle u_c | \bar{\varepsilon} \cdot \bar{p} | u_v \rangle \langle f_c | f_v \rangle \quad (2-39)$$

$$M_{1 \rightarrow 2} = \langle u_2 | u_1 \rangle \langle f_2 | \bar{\varepsilon} \cdot \bar{p} | f_1 \rangle$$

باستخدام تقريب ثنائي القطب الكهربائي يتم اختزال الحد  $e^{ikr}$  و ذلك لانحفاظ الاستقطاب على المستوي Oxy ، وللحصول على عنصر مصفوفة للانتقال غير معدوم يجب أن يكون:

$$\bar{\varepsilon} \cdot \langle \chi_1(z) | \bar{p} | \chi_2(z) \rangle \neq 0 \quad \langle \chi_c(z) | \chi_v(z) \rangle \neq 0$$

و هذا يعني أن الانتقالات تكون إما فردي – فردي أو زوجي – زوجي في حالة الانتقالات بين العصابات و تكون إما فردي – زوجي أو زوجي – فردي في حالة الانتقالات بين العصابات التحتية. \* نشير إلى انه في حالة عدم تناظر البئر الكمي تكون بعض الانتقالات الممنوعة مسموحة و ذلك راجع لكون عنصر المصفوفة يكون غير معدوم.

ليكون لدينا  $N = N_d LA$  إلكترون يحتل الحالة الأساسية يتحركون بحرية على المستوى Oxy حيث  $N$  يمثل عدد الإلكترونات و  $N_d$  التركيز و  $L$  طول البئر و  $A$  مساحته، وبسبب أن لجميع الإلكترونات على طول مقطع النمو نفس الطاقة ونفس معدل الانتقال المعطى بالعلاقة (10-1)، ووجود حالة ابتدائية واحدة وحالة نهائية واحدة يكون المعامل مضروب في  $N$  و منه يمكن تقريب دالة دلتا في المعادلة (2-35) بسبب العمر المحدود لحالة الإثارة و كتابتها على شكل دالة لورنتز:

$$g(\hbar\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{(\Gamma/2)}{(E_f - E_i - \hbar\omega)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (2-40)$$

$\Gamma$ : قيمة طاقة الإلكترون في الحالة النهائية، يعطى مؤثر كمية الحركة  $p$  بالعلاقة:

$$p = -i\hbar \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2-41)$$

نجد أن معدل الانتقال في حالة الانتقالات حالة مقيدة – حالة مقيدة بالشكل:

$$w_{B-B} = \frac{C_{B-B}}{\hbar\omega} (IAL) \left| \langle \chi_f | \frac{d}{dz} | \chi_i \rangle \right|^2 g(\hbar\omega) \quad (2-42)$$

$$C_{B-B} = \frac{N_d e^2 \hbar^3}{(m^*)^2 \varepsilon_0 n_r c} \quad (2-43)$$

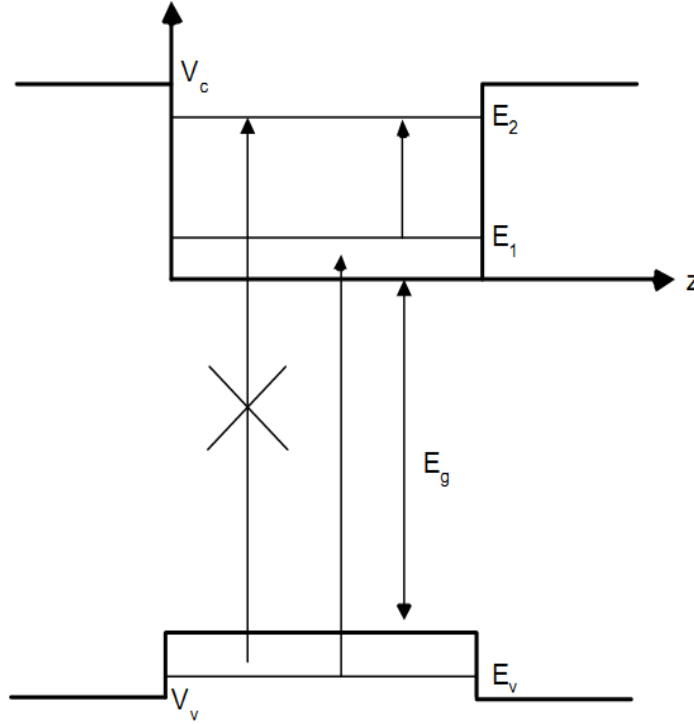
و معدل الانتقال في حالة الانتقالات حالة مقيدة – حالة حرة بالشكل:



$$W_{B-C} = C_{B-C} (IAL) \sqrt{\frac{2m_b^*}{(\hbar\omega)^2 (E_f - V_p)}} \left| \langle \chi_f \left| \frac{d}{dz} \right| \chi_i \rangle \right|^2 \quad (2-44)$$

حيث:

$$C_{B-C} = \frac{1}{2} \frac{N_d e^2 \hbar^2}{(m^*)^2 \epsilon_0 n_r c} \quad (2-45)$$



الشكل (2-2): الانتقالات المسموحة في بئر متناظر.

## 6-2 معامل الامتصاص:

يعطى معامل الامتصاص للانتقالات من حالة مقيدة إلى حالة مقيدة بالشكل:

$$\alpha_{B-B} = \frac{C_{B-B}}{\hbar\omega} \left| \langle \chi_f \left| \frac{d}{dz} \right| \chi_i \rangle \right|^2 g(\hbar\omega) \quad (2-46)$$

و يكون معامل الامتصاص للانتقالات من حالة مقيدة الى حالة حرة بالشكل:

$$\alpha_{B-C} = C_{B-C} \sqrt{\frac{2m_b^*}{(\hbar\omega)^2 (E_f - V_p)}} \left| \langle \chi_f \left| \frac{d}{dz} \right| \chi_i \rangle \right|^2 \quad (2-47)$$

## 7-2 مقادير رياضية:

للعمل على أداء أحسن لهذه الكواشف و وضعت هذه المقادير الرياضية:

### 1-7-2 احتمال الانبعاث:

هو عدد الالكترونات المنبعثة على عدد الالكترونات المثارة ضوئيا.

$$p_e = \frac{\text{nombre d'electron emis}}{\text{nombre d'electron photoexites}} \quad (2-48)$$

### 2-7-2) الفعالية الكمية الخارجية:

هي عدد الالكترونات المثارة ضوئيا الناشئة من فوتون واحد وارد.

$$\eta_{ext} = \frac{\text{nombre d'electron arrives aux contacts}}{\text{nombre de photon incident}} \quad (2-49)$$

### 2-7-3) الاستجابة الطيفية:

التيار الناتج من الكاشف من اجل 1w من الفوتونات.

$$R = \frac{q \lambda}{h c} \eta_{ext} \quad (2-50)$$

### 2-7-4) الضجيج:

هو عدد الالكترونات التي استعيدت من طرف الأبار الموالية في البئر الواحد.

$$B = \sqrt{4 q g I} \quad (2-51)$$

I: المنطقة النشطة و هي متعلقة بالمساحة

g: الكسب أو الربح.

### 2-8) النماذج العددية:

النماذج الرياضية للعلوم والتكنولوجيا هي في معظم الأحيان تشكل نظم لمعادلات تفاضلية تربط بين دوال غير معروفة و مشتقاتها الجزئية، وعادة ما يطلب حل هذا النوع من المعادلات توفير شروط حدودية و ابتدائية لإكمال هذا النموذج.

و تعرف عادة النماذج العددية بالنسبة للنظم الالكترونية بأنها العملية التي تقوم على إيجاد نموذج رياضي للنظام على شكل معادلات جبرية لها سمة الخطية يمكن بواسطتها للحاسوب إجراء التحليل و تحديد الخصائص المميزة للنظام الالكتروني.

الفصل الأخير يحتوي على معادلات من هذا النوع من المشاكل التي يمكن في بعض الأحيان حلها من الناحية التحليلية، ومع ذلك، في معظم الحالات لن يكن هذا ممكناً، بسبب صعوبة الحصول على الحل التحليلي و منه فإن الطريقة الوحيدة لحساب ذلك هو استخدام الطرق العددية. والفكرة الأساسية هي البحث عن قيم الدوال غير معروفة في عدد كبير من النقاط ومنه بدل حل المشكلة التفاضلية بشكل مستمرة، نقوم بحل نظام جبري كبير بشكل منفصلة.

إن سنقوم بمعالجة المعادلات المدروسة سابقاً (معادلة بواسون و معادلة شرودينغر) بالطريقة العددية مستخدمين في ذلك طريقة الحجوم المنتهية و ذلك لسهولة تعاملها مع تغيرات في الخصائص الفيزيائية مثل السماحية الكهربائية و الكتلة الفعالة .

### 2-8-1) طريقة الحجوم المنتهية:

طريقة الحجوم المنتهية هي إصدار خاص من نظرية البواقي و تعتمد على تقسيم المجال المدروس على حجوم عنصرية، حيث يعرف كل حجم عنصري باحتوائه على عقدة رئيسية و واجهتان (e,w) في

حالة تقسيم في بعد واحد و بأربعة واجهات (e,w,s,n) في حالة تقسيم في بعدين و بستة واجهات (e,w,s,n,t,b) في حالة تقسيم في ثلاثة أبعاد.

نكامل المعادلة التفاضلية على كل الحجوم العنصرية باستعمال تقريب معتبرين فيه أن الدوال الغير معرفة تكون على شكل (دوال خطية. دوال قطع مكافئ. دوال أسية....) بين عقدتين متتاليتين. و بهذا يكون التكامل له شكل متقطع على طول المجال المدروس. و نتيجة لهذا التقطع نحصل على معادلة جبرية يتم تشكيلها حسب قيم العقدية.

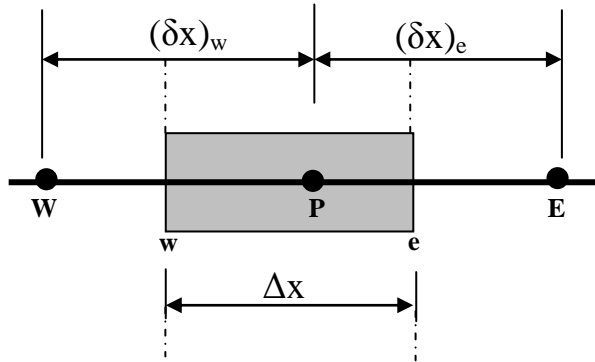
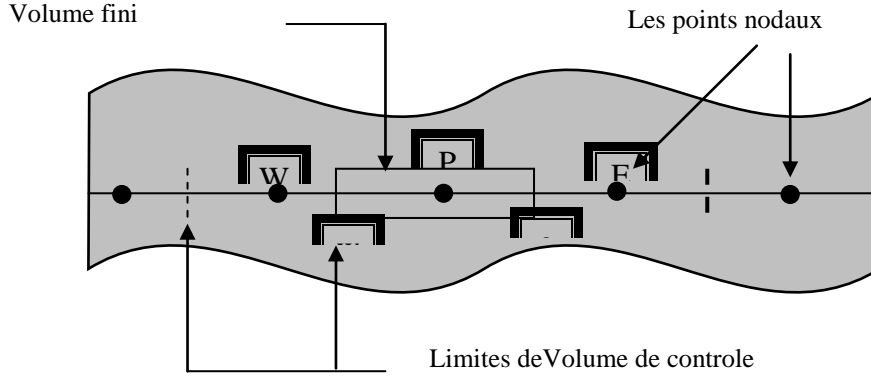
## 2-8-2) طريقة الحجوم المنتهية في بعد واحد:

### 1-2-8-2) صياغة معادلة بواسون في بعد واحد بطريقة الحجوم المنتهية:

تكتب معادلة بواسون في بعد واحد بالشكل:

$$\frac{d}{dx} \left( \varepsilon \frac{d\Phi}{dx} \right) + \rho = 0 \quad (2-52)$$

نقسم المجال المدروس إلى عدد منته من الحجوم المنتهية كل حجم يحتوي على عقدة رئيسية و على عقدة مجاورة من جهة اليمين (e) و على عقدة مجاورة من جهة الشمال (w) كما هو مبين في الشكل.



الشكل (2-3): تقسيم الحجم المنته في حالة بعد واحد

نكامل المعادلة التفاضلية على الحجم العنصري المحدد بالوجه (e,w):

$$\int_e^w \frac{d}{dx} \left( \varepsilon \frac{d\Phi}{dx} \right) dx + \int_w^e \rho dx = 0 \quad (2-53)$$

بعد التكامل نجد:

$$\left(\varepsilon \frac{d\Phi}{dx}\right)_e - \left(\varepsilon \frac{d\Phi}{dx}\right)_w + \int_w^e \rho dx = 0 \quad (2-54)$$

المسار الخطي المختار يعبر عن تغيرات الكمون  $\Phi$  بين العقد المتجاورة

$$\left(\varepsilon_e \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{(\delta x)_e}\right) - \varepsilon_w \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{(\delta x)_w}\right)\right) + \rho_P \Delta x = 0 \quad (2-55)$$

حيث:

$\Phi_P$ : الكمون الكهربائي عند العقدة P .

$\Phi_E$ : الكمون الكهربائي عند العقدة E.

$\Phi_W$ : الكمون الكهربائي عند العقدة W.

$(\delta x)_E$ : المسافة بين العقدتين P و E.

$(\delta x)_W$ : المسافة بين العقدتين P و W.

$\Delta x$ : طول الحجم المنته.

ومنه نحصل على معادلة جبرية من الشكل:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + S \quad (2-56)$$

حيث:

$$a_E = \frac{\varepsilon_e}{(\delta x)_e} \quad a_W = \frac{\varepsilon_w}{(\delta x)_w}$$

$$a_P = a_E + a_W$$

$$S = \rho_P \Delta x$$

S : يمثل حد المنبع الشحنات، في حالة كان التقسيم متساوي أي أن:

$$\Delta x = (\delta x)_e = (\delta x)_w \quad (2-57)$$

و منه تكون :

$$a_E = \frac{\varepsilon_e}{\Delta x}$$

$$a_W = \frac{\varepsilon_w}{\Delta x}$$

$$a_P = a_E + a_W$$

و إذا كان  $\varepsilon_e = \varepsilon_w = \varepsilon_0$  فإن  $a_E = a_W = a$  و منه معادلة بواسون تكتب على الشكل:

$$2\Phi_P = \Phi_E + \Phi_W + \frac{S}{a} \quad (2-58)$$

$$2\Phi_P = \Phi_E + \Phi_W + \frac{\rho_P \Delta x^2}{\varepsilon_0} \quad (2-59)$$

وهكذا، نحصل على معادلة جبرية تربط بين كل عقدة رئيسية P مع العقد المجاورة E و W. و إذا كان مجال التقسيم يحتوي على N عقدة مثلاً ، يقودنا هذا الشيء إلى حل نظام من المعادلات ذو N مجهول و N معادلة. يتم حل هذا النظام الناتج بالطرق العددية المعتادة.

## 2-2-8-2) صياغة معادلة شرودينغر في بعد واحد بطريقة الحجم المنتهية:

تكتب معادلة شرودينغر في بعد واحد بالشكل:

$$(2-60) \quad -\frac{\hbar^2}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{m^*} \frac{\partial \chi^\alpha}{\partial x} \right) \right] + U \chi^\alpha = E^\alpha \chi^\alpha$$

نكامل هذه المعادلة على الحجم العنصري المحدد بالوجه (e,w):

$$(2-61) \quad -\frac{\hbar^2}{2} \left[ \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{m^*} \frac{\partial \chi^\alpha}{\partial x} \right) dx \right] + \int_w^e U \chi^\alpha dx = \int_w^e E^\alpha \chi^\alpha dx$$

بنفس الطريقة السابقة نختار المسار الخفي و منه تكون نتيجة التكامل على الشكل:

$$(2-62) \quad -\frac{\hbar^2}{2} \left[ \frac{1}{m_e^*} \left( \frac{\chi_E^\alpha - \chi_P^\alpha}{\Delta x} \right) - \frac{1}{m_w^*} \left( \frac{\chi_P^\alpha - \chi_X^\alpha}{\Delta x} \right) \right] + U_P \chi_P^\alpha \Delta x = E^\alpha \chi_P^\alpha \Delta x$$

و منه نحصل على المعادلة الجبرية التالية:

$$(2-63) \quad -\frac{\hbar^2}{2\Delta x} \frac{1}{m_e^*} \chi_E^\alpha - \frac{\hbar^2}{2\Delta x} \frac{1}{m_w^*} \chi_W^\alpha + \frac{\hbar^2}{2\Delta x} \left[ \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_w^*} \right] \chi_P^\alpha + U_P \chi_P^\alpha \Delta x = E^\alpha \chi_P^\alpha \Delta x$$

في الشكل الأخير نحصل على:

$$(2-64) \quad \beta \frac{1}{m_e^*} \chi_E^\alpha + \beta \frac{1}{m_w^*} \chi_W^\alpha = - \left[ -\beta \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_w^*} \right) + (U_P - E^\alpha) \Delta x \right] \chi_P^\alpha$$

حيث:

$$\beta = -\frac{\hbar^2}{2\Delta x}$$

و نتيجة لذلك نحصل على معادلة جبرية تربط بين مجاهيل العقدة الرئيسية P و مجاهيل العقد المجاورة E و W. و نلاحظ أن هذه المعادلة لا تحتوي على حد المنبع  $S_p$ .

## 2-3-8-2) طرق الحل:

### 2-3-8-2) طرق حل معادلة بواسون:

المعادلة الجبرية لمعادلة بواسون الناتجة من التقطيع عن طريق الحجم المنتهية تكتب على الشكل:

$$(2-65) \quad [A][\Phi] = [S] \quad \text{أو} \quad [A][X] = [B]$$

و التي يمكن حلها بالطرق المباشرة (طريقة غوص) أو التكرارية (طريقة غوص – سيدار. طريقة جاكوبي....) مع استعمال الشروط الحدودية (شروط دريكلي و شروط نيومان).

و في هذه المذكرة سنعتمد على الطريقة المباشرة (طريقة غوص) حيث أن المعادلة المكتوبة بالشكل:

$$(2-66) \quad 2\Phi_P = \Phi_E + \Phi_W + \frac{\rho_P \Delta X^2}{\epsilon_0}$$

يمكن كتابتها بالشكل:

$$2\Phi_i = \Phi_{i+1} + \Phi_{i-1} + \Delta X^2 f_i \quad (2-67)$$

حيث  $f_i = \rho_p / \epsilon_0$  و  $i=1,2,3,\dots,N$  و  $\Phi$  الكمون الكهربائي و هي تمثل نظام خطي على الشكل التالي من اجل  $i=2,3,4$

$$\begin{aligned} i=2 & \quad \Phi_1 - 2\Phi_2 + \Phi_3 = -\Delta X^2 f_2 \\ i=3 & \quad \Phi_2 - 2\Phi_3 + \Phi_4 = -\Delta X^2 f_3 \\ i=4 & \quad \Phi_3 - 2\Phi_4 + \Phi_5 = -\Delta X^2 f_4 \end{aligned} \quad (2-68)$$

و تكتب على الشكل المصفوفي :

$$\begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} = -\Delta X^2 \begin{pmatrix} f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ 0 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} \quad (2-69)$$

فمن خلال معرفة الحدين  $\Phi_1, \Phi_5$  من الشروط الحدودية يمكن حل هذا النظام المكتوب على الشكل

$\Phi = A/S$  و ذلك بمايلي:

- إنشاء مصفوفة تحتوي على  $(N*N)$  عنصر حيث أن القطر الأساسي يحوي العدد (2) و القطرين ذو الترتيب 1 و -1 يحويان العدد (1) أما باقي العناصر فهي معدومة.
- إدخال قيم  $f_i$  و الشروط الحدودية داخل شعاع.
- قلب المصفوفة و ضربها في الشعاع.
- و منه يمكن الحصول على  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_{N-2}, \Phi_{N-1}$ .

### 2-3-8-2) طريقة حل معادلة شرودينغر:

المعادلة الجبرية لمعادلة شرودينغر الناتجة من التقطيع عن طريق الحجوم المنتهية تكتب على الشكل:

$$[A][\chi] = [0] \quad (2-70)$$

$$\beta \frac{1}{m_e^*} \chi_E + \beta \frac{1}{m_w^*} \chi_W + \left[ -\beta \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_w^*} \right) + (U_P - E^\alpha) \Delta x \right] \chi_P = 0 \quad (2-71)$$

أي أنها لا تحتوي عن حد المنبع:

و يمكن كتابتها على الشكل:

$$\beta \frac{1}{m_{i-1}^*} \chi_{i-1} + \beta \frac{1}{m_{i+1}^*} \chi_{i+1} + \left[ -\beta \left( \frac{1}{m_{i-1}^*} + \frac{1}{m_{i+1}^*} \right) + (U_i - E^\alpha) \Delta x \right] \chi_i = 0 \quad (2-72)$$

نضع:

$$a = \beta \frac{1}{m_{i-1}^*}$$

$$b = \beta \frac{1}{m_{i+1}^*}$$

$$c_i = -\beta \left( \frac{1}{m_{i-1}^*} + \frac{1}{m_{i+1}^*} \right) + (U_i + E^\alpha) \Delta x$$

و منه تصبح المعادلة على الشكل:

$$a\chi_{i-1} + b\chi_{i+1} + c_i\chi_i = 0 \quad (2-73)$$

نقوم بنشر هذه المعادلة الجبرية من اجل  $i=2,3,4$  فنحصل على

$$\begin{aligned} i=2 & \quad a\chi_1 + b\chi_3 + c_2\chi_2 = 0 \\ i=3 & \quad a\chi_2 + b\chi_4 + c_3\chi_3 = 0 \\ i=4 & \quad a\chi_3 + b\chi_5 + c_4\chi_4 = 0 \end{aligned} \quad (2-74)$$

و تكتب على الشكل المصفوفي :

$$\begin{pmatrix} c_2 & b & 0 \\ a & c_3 & b \\ 0 & a & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_2 \\ \chi_3 \\ \chi_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_1 \\ 0 \\ \chi_5 \end{pmatrix} \quad (2-75)$$

و هذا النوع من المسائل يسمى مسائل القيم الخاصة و الأشعة الخاصة حيث انه يتم تقطير المصفوفة  $[A]$  التي عادة ما تكون غير متناظرة (كما هو الحال في معادلة بواسون) ببرامج خاصة بذلك و باستعمال الشروط الحدودية يمكن الحصول على القيم و الأشعة الخاصة لمعادلة شرودينغر. ومن بين هذه البرامج توجد طريقة مصفوفة الانتقال.

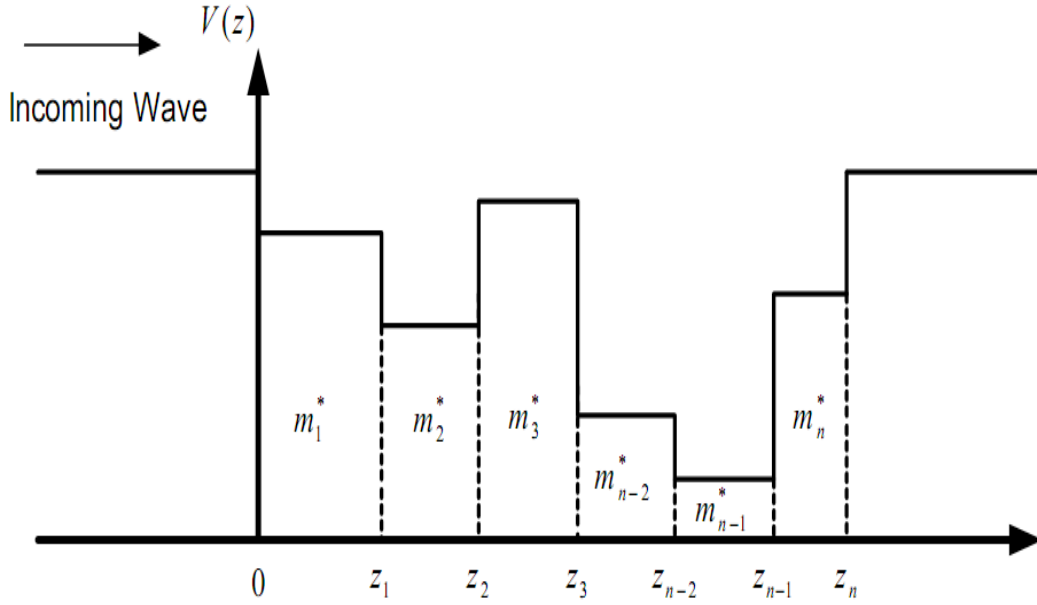
## 9-2) طريقة مصفوفة الانتقال [18]:

هناك عدة طرق و نماذج متاحة لحساب الطاقات و الأشعة الخاصة لبنية بئر كمي نهائي، و لكل طريقة مزايا و عيوب لا يمكن التخلص منها، و منه فان العامل الأساسي في اختيار الطريقة أو المنهج الصحيح يعتمد على أساس نوعية البنية المستخدمة لهيكل الآبار الكمية و المناطق الفعالة فيها.

إن حل معادلة شرودينغر لبئر كمي نهائي يمكن بإعطاء شروط ابتدائية و حدية و مع ذلك تصبح هذه العملية متعبة و صعبة جدا (بالرغم من مساعدة جهاز الكمبيوتر) إذا كانت البنية متعددة الآبار الكمية .

طريقة مصفوفة الانتقال هي نهج متعدد الأغراض تستعمل للحصول على الطاقات الخاصة و دوال الموجة الموافقة لها. في البنى غير المتجانسة المكونة من طبقات من مواد ذات عصابة طاقية ممنوعة مختلفة مثل بئر كمي مكون من طبقة من GaAs محصورة بين طبقتين  $Al_xGa_{1-x}As$  اخشن من الأولى و لهما عصابة طاقية ممنوعة اكبر يملئن التحكم في عرض البئر الكمي من خلال تعديل طبقة GaAs بينما يمكن التحكم في عمق البئر الكمي من خلال تعديل الكسر المولي  $x$  لطبقة المكونة للحاجز الكموني.

في طريقة مصفوفة الانتقال نفترض أن دالة الموجة الواردة تكون دالة مستوية (لاحظ الشكل) و في كل طبقة تكون دالة الموجة مكونة من تركيب خطي لموجتين أولى واردة  $A_n e^{ikz}$  و الثانية منعكسة  $B_n e^{-ikz}$ .



الشكل (4-2): بنية متعددة الآبار الكمية.

و منه فانه من اجل البئر الكمي الموضح في الشكل السابق تكتب دالة الموجة من اجل الطبقة ذات الرتبة  $n$  بالشكل:

$$\psi_n(z) = A_n e^{ik_n z} + B_n e^{-ik_n z} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-76)$$

$A_n$  و  $B_n$  ثوابت و  $k_n$  يعطي بالشكل:

$$k_n = \sqrt{\frac{2m_n^*}{\hbar^2} (E - V_n)} \quad (2-77)$$

حيث  $m_n^*$  تمثل الكتلة الفعالة في الطبقة  $n$  وسمكها يعطى بالشكل  $d_n = z_{n+1} - z_n$  و  $E$  طاقة الإلكترون و  $V_n$  طاقة الحاجز الكموني عند الطبقة  $n$

تعطى الشروط الحدودية عند النهايات المشتركة للطبقات المتجاورة بالشكل:

$$\psi_n(z_n) = \psi_{n+1}(z_n) \quad (2-78)$$

$$\frac{1}{m_n^*} \frac{d\psi_n(z_n)}{dz_n} = \frac{1}{m_{n+1}^*} \frac{d\psi_{n+1}(z_n)}{dz_n} \quad (2-79)$$

و منه يكمن الحصول على مصفوفة يربط بين معاملات الطبقة  $n$  و الطبقة  $(n+1)$  بالشكل:

$$\begin{bmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{bmatrix} = M_n \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-80)$$

حيث:

$$M_n = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + \gamma_n) e^{i(k_n - k_{n+1})z_n} & (1 - \gamma_n) e^{-i(k_n - k_{n+1})z_n} \\ (1 - \gamma_n) e^{i(k_n - k_{n+1})z_n} & (1 + \gamma_n) e^{-i(k_n - k_{n+1})z_n} \end{bmatrix} \quad (2-81)$$



$$\gamma_n = \frac{k_n m_{n+1}^*}{k_n + 1 m_n^*} \quad (2-82)$$

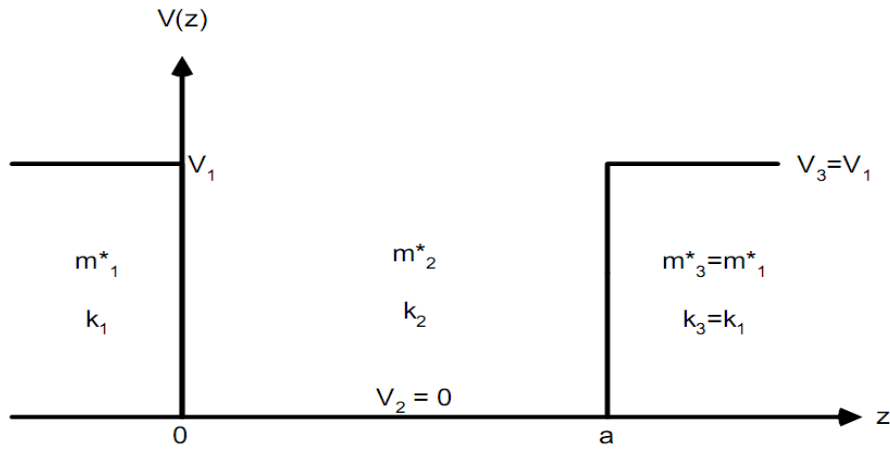
حيث  $M_n$  هي مصفوفة الانتقال للطبقات المشتركة عند  $z_n$ .  
في المعادلة الأخيرة  $z_n$  هي الرابط للإحداثيات بين الطبقتين ذو الرتبة  $n$  و  $n+1$ .  
و يمكن تعميم هذا النموذج من اجل عدة طبقات لبئر كمي بالشكل:

$$\begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} = M_n M_{n-1} \dots M_2 M_1 \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2-83)$$

إذا كان لطبقتي الحاجز طاقة أعلى من طبقات البئر ( $E < V$ ) يجب أن تكون دوال الموجة عند هذه الحدود معدومة ( $z \rightarrow \pm\infty$ ) وهذا يعني أن  $A_1=0$  و  $B_n=0$  وباستخدام هذا الشرط نجد:

$$\begin{bmatrix} A_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2-84)$$

و ينجر عن هذا الشرط أن الحد  $m_{22}(E)=0$ .  
و منه فالمعادلة  $m_{22}(E)=0$  هي بمثابة شرط للقيم الذاتية على الطاقات المسموح بها و منه نقوم بكتابة برنامج يعمل على رسم الدالة  $m_{22}$  بدلالة  $E$  و نسجل مواضع الطاقات الخاصة التي من اجلها تنعدم الدالة. كمثل على ذلك نعتبر البئر الكمي ذو الشكل التالي:



الشكل (5-2): بنية بئر كمي متناظر.

مركبات المصفوفة  $M$  تكون على النحو التالي:

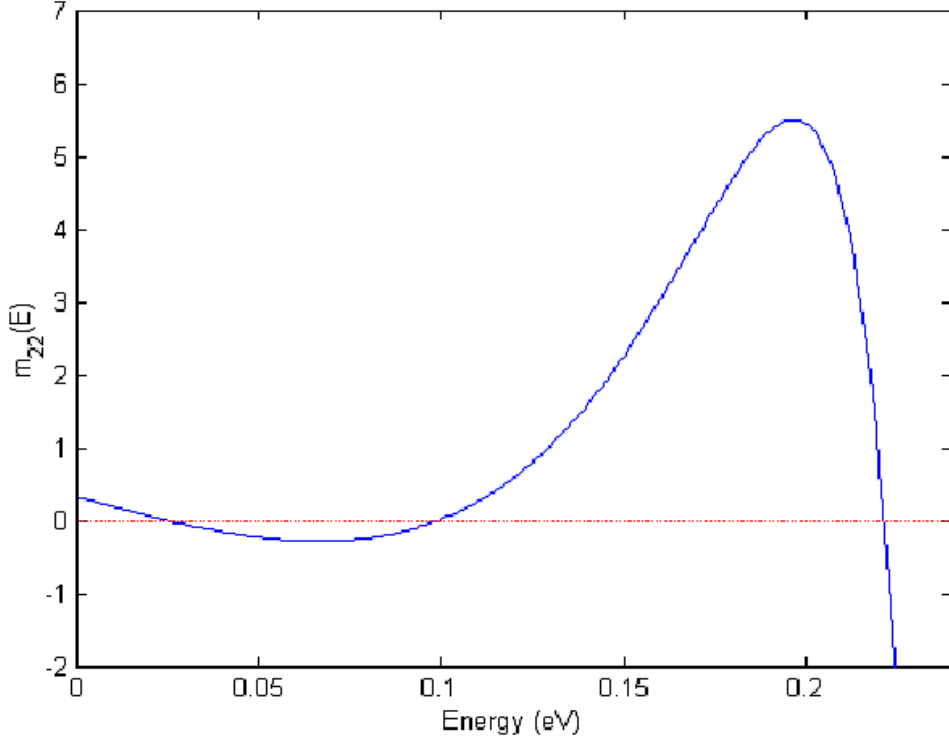
$$M_n = M_2 M_1 = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (1+\gamma_2)e^{i(k_2-k_3)a} & (1-\gamma_2)e^{-i(k_2-k_3)a} \\ (1-\gamma_2)e^{i(k_2-k_3)a} & (1+\gamma_2)e^{-i(k_2-k_3)a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\gamma_1 & 1-\gamma_1 \\ 1-\gamma_1 & 1+\gamma_1 \end{bmatrix} \quad (2-85)$$

حيث:

$$k_1 = k_3 = ik = i\sqrt{\frac{2m_1^*}{h^2}(V_1 - E)} \quad k_2 = \sqrt{\frac{2m_2^*}{h^2} E} \quad (2-86)$$

$$m_{22} = \frac{1}{4} \left[ (1-\gamma_2)(1-\gamma_1)e^{i(k_2+k_3)a} + (1+\gamma_2)(1+\gamma_1)e^{-i(k_2-k_3)a} \right] \quad (2-87)$$

نرسم الدالة  $m_{22}(E)=0$  و نسجل مواضع انعدامها



الشكل (2-6): رسم  $m_{22}(E)$  بدلالة  $E$  للبنية (عرض البئر  $a=150\text{\AA}$ )

أما بالنسبة لعصابة التكافؤ فإننا نتبع نفس الأسلوب و الخطوات للحصول على القيم الذاتية للطاقة و يمكن حلها في نفس البرنامج لكن مع الأخذ بعين الاعتبار كل التغيرات اللازمة للكتلة الفعالة و طاقة الحاجز الكموني.

# الفصل الثالث

## تطبيقات

### (3) تطبيقات

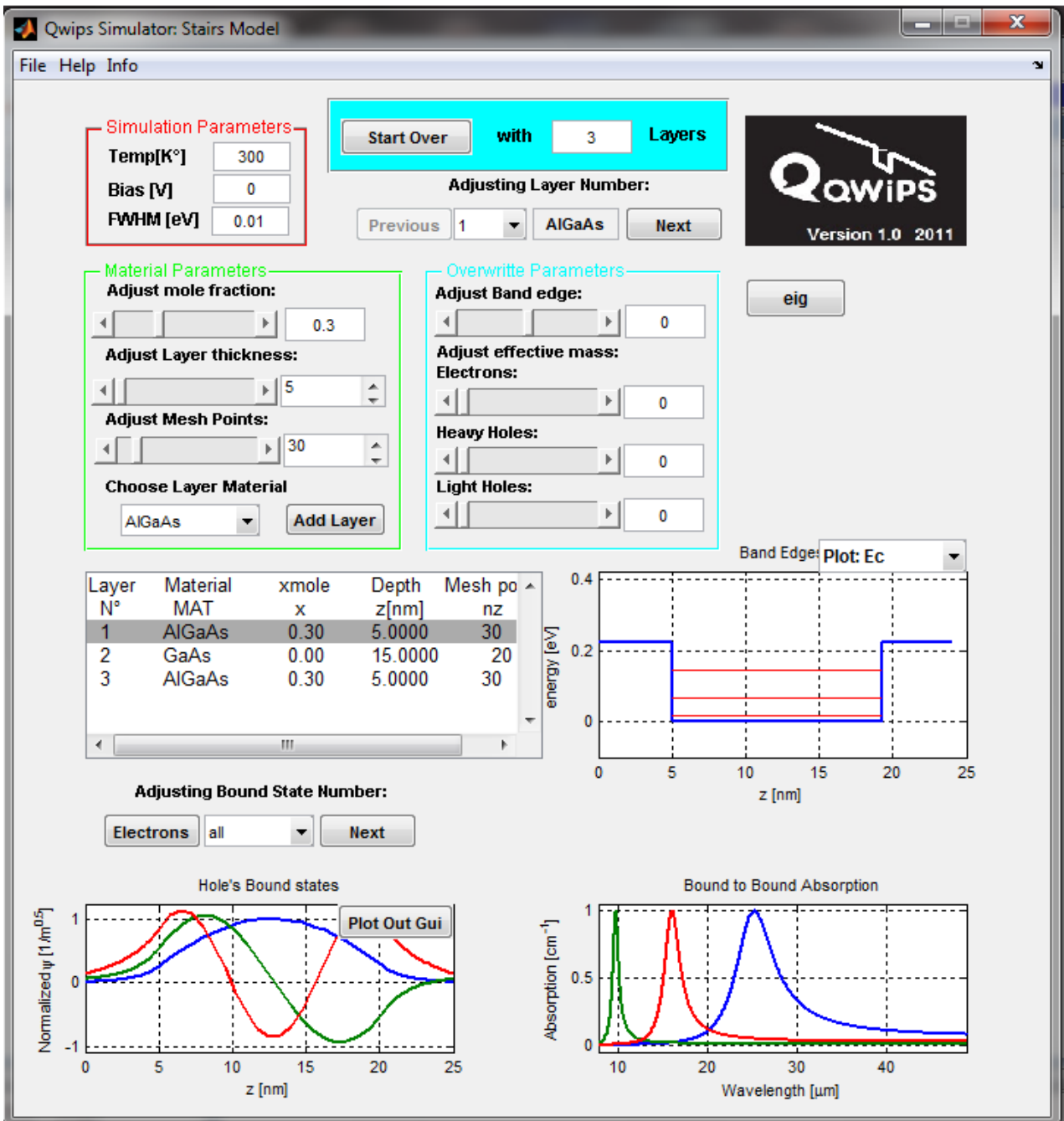
منح الفصلين السابقين نظرة ولو موجزة عن كيفية التعامل مع القوانين الرياضية و العددية التي تحكم الأبار الكمية و طرق الكشف بها، و سنتطرق الآن لتطبيق هذه الأفكار لتصميم بنية كاشف ضوئي لأشعة تحت الحمراء ذو أبار كمية QWIP باستخدام برنامج طورناه في بيئة MATLAB يحاكي الانتقالات بين السويات المتاحة في الأبار الكمية و عددها بتعديل سمك و عرض الأبار و عددها للحصول على قمم امتصاص موافقة لأطوال موجية معينة في مجال الأشعة تحت الحمراء.

#### **(1-3) عرض البرنامج:**

يعرض الشكل (1-3) صورة لواجهة المستخدم الرسومية (Graphical User Interface) الرئيسية للبرنامج وهو في نسخته الأولى. وقد تم إضافتها لتسهيل عملية التصميم والمحاكاة وجعلها تتم في زمن شبه حقيقي (in real time) قدر الإمكان، وهذا لطبيعة الظواهر المدروسة التي تتطلب الكثير من الحسابات الرقمية المعقدة وتستغرق زمن تنفيذ طويل نسبيا. يتمتع البرنامج بالعديد من المميزات منها قاعدة بيانات لمجموعة من مواد أشباه النواقل الثلاثية والثنائية يستخدمها البرنامج بشكل آلي دون تكلف عناء إدخالها. بسبب الطبيعة التجريبية لهذه البيانات والتي تختلف باختلاف المراجع والشروط التجريبية، يمكن باستعمال البرنامج تغيير هذه البيانات حسب حاجة المستخدم. يتميز كذلك البرنامج بقدرته على محاكاة بعض الظواهر الفيزيائية في بعض المركبات مثل معامل النفاذ في الديود النفقي RTD و تشكل عصابات الطاقة في بنى الشبكات الفوقية Superlattices ولهذه الأخيرة تطبيقات كبيرة في المركبات الكهروضوئية النانومترية الحديثة. تم باستخدام النسخة الأخيرة لـ MATLAB إنتاج نسخة قابلة للتنفيذ ( standalone application) خارج بيئة MATLAB ليسهل استخدامه لمن لا يجيدون الحساب الرقمي والتعامل مع لغات البرمجة.

أثناء عملية التصميم وبعد إدخال البيانات الملائمة للمسألة يقوم البرنامج برسم حافتي عصابة النقل وعصابة التكافؤ للبنية ذات الأبار الكمية، ثم يقوم بحل معادلة شرودينغر للحصول طاقات الحالات المقيدة ثم يرسم دوال الموجة الموافقة لكل حالة في البنية لتتضح بذلك درجة تقيد الحالة الكمية وامتدادها في البنية المدروسة. من بين البيانات المدخلة عدد الشرائح شبه الناقلة المشكلة لبنية الأبار الكمية والكسر المولي في المركبات الثلاثية أو الرباعية لكل شريحة وكذلك عرضها بوحدات النانومتر. انطلاقا من نتائج حل معادلة شرودينغر يقوم البرنامج بحساب معامل الامتصاص بين الحالات المقيدة وعرضه في شكل مستقل ليتسنى التحقق من مواقع قمم الامتصاص المرغوب فيها. يمكن كذلك ملاحظة تأثير بعض الوسائط مثل الحقل الكهربائي الخارجي الطبقة على المركب على شكل العصابات وبشكل خاص تأثيره على انزياح قمم الامتصاص.

في نسخة قادمة لهذا البرنامج ستضاف لواجهة المستخدم الرسومية نافذة لعرض التيارات السارية في الكاشف وبعض المميزات الأخرى. كما سيتم لها إضافة قائمة منسدلة لاختيار طريقة من مجموعة من الطرق لحل معادلة شرودينغر وهو أمر بالغ الأهمية لكون الطاقات المقيدة في البنى النانومترية حساسة للطرق العديدة والشروط الحدية.



الشكل (1-3): واجهة المستخدم الرسومية لبرنامج المحاكاة Qwips.

### 2-3) التطبيق الأول: التحقق من البرنامج:

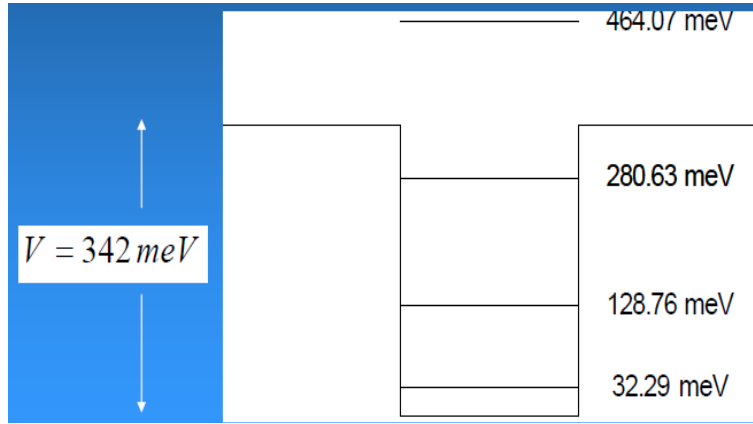
سنعمل كأول تطبيق على التأكد من مصداقية البرنامج العددي المطور و ذلك من خلال مقارنة نتائجه مع نتائج بحوث وبرامج نشرت سابقا. وعليه و في هذا الإطار سنحاول إعادة استخراج نتائج عمل سمير شاه [14] التي تحصل عليها باستخدام برنامج Mathematica و برنامج ISE TCAD و بعد هذا الأخير برنامجا تجاريا قوي جدا وليس معروضا للبيع. في نفس الإطار سنحاول كذلك استخراج نتائج بحث سرتوري Sirtori et all [15].

### 1-2-3) بنية سمير شاه:

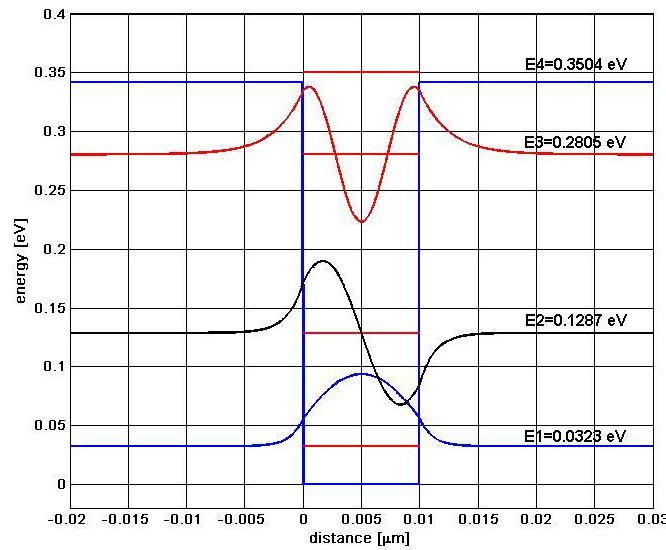
بنية سمير شاه عبارة عن بئر كمي مشكل من شريحة GaAs سمكها  $L_w=100\text{nm}$  محصورة بين شريحتين (حاجزين)  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$  سمك الواحدة منها  $L_b=200\text{nm}$ . يحسب ارتفاع حافة عصابة النقل في هذه البنية وفقا للعلاقة  $E_c=0.76x$ ، حيث  $x$  يمثل الكسر المولي في كل شريحة. الكتل الفعالة وبقية البيانات توافق نفس القيم الموجودة في قاعدة بيانات البرنامج. يعرض الشكل (2-3) و الشكل (3-3) هيئة البئر الكمي وسويات الطاقة المتاحة فيه المتحصل عليها على الترتيب ببرنامج سمير شاه وبرنامجنا و من الواضح جدا التقارب بين النتائج كما يؤكد ذلك الجدول التالي

ISE TCAD	برنامجنا	برنامجنا	Mathematica	برنامجنا	Mathematica	الطاقة [eV]
373.26	373.26	360	360	342	342	$E_c$
31.001	32.7239	32.5401	32.69	32.3	32.29	$E_1$
124.3	130.8483	129.9807	130.42	128.8	128.76	$E_2$
275.38	287.9740	285.0027	285.47	280.6	280.63	$E_3$

جدول(1): مقارنة بين نتائج عمل سمير شاه ونتائج برنامجنا على نفس البنية.

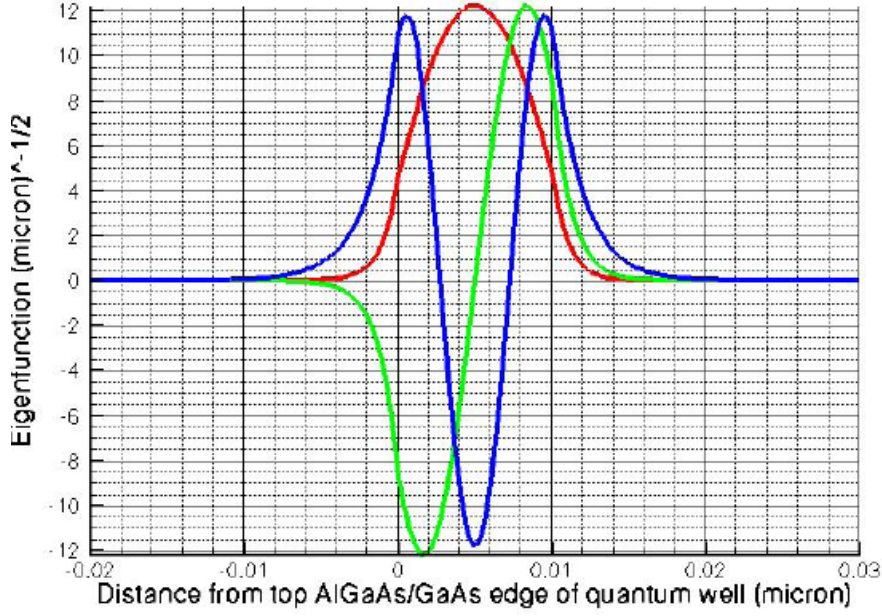


الشكل(2-3): عصابة النقل و الطاقات المتاحة باستخدام برنامج سمير شاه.

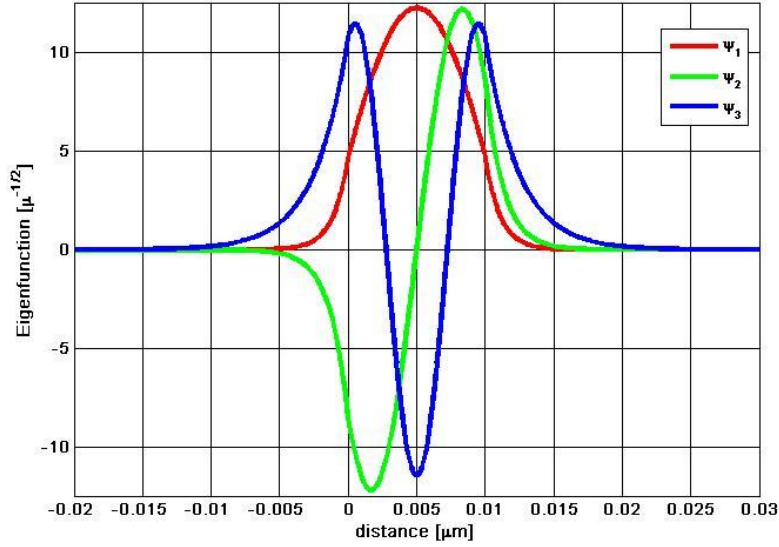


الشكل(3-3): عصابة النقل و الطاقات المتاحة في بنية سمير شاه باستخدام برنامجنا.

البيانات (3-4) و (3-5) يعرضان مقارنة بين دوال الموجة الثلاثة الأولى المتحصل عليها من طرف سمير شاه ببرنامج ISE TCAD و من طرف برنامجنا على التوالي و نلاحظ مدى تطابق النتائج.



الشكل(4-3): دوال الموجة الثلاثة الأولى باستخدام برنامج سمير شاه.

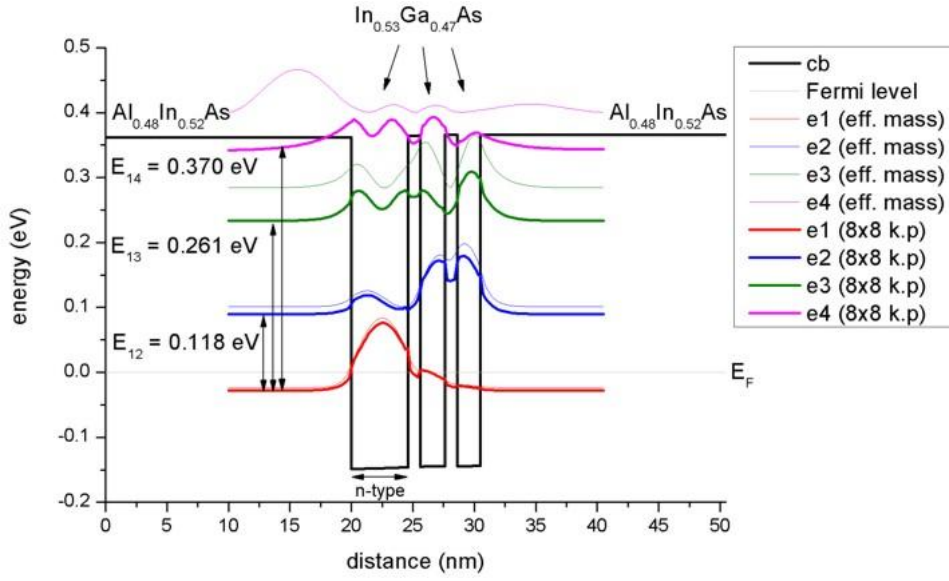


الشكل(5-3): دوال الموجة الثلاثة الأولى باستخدام برنامج جنا.

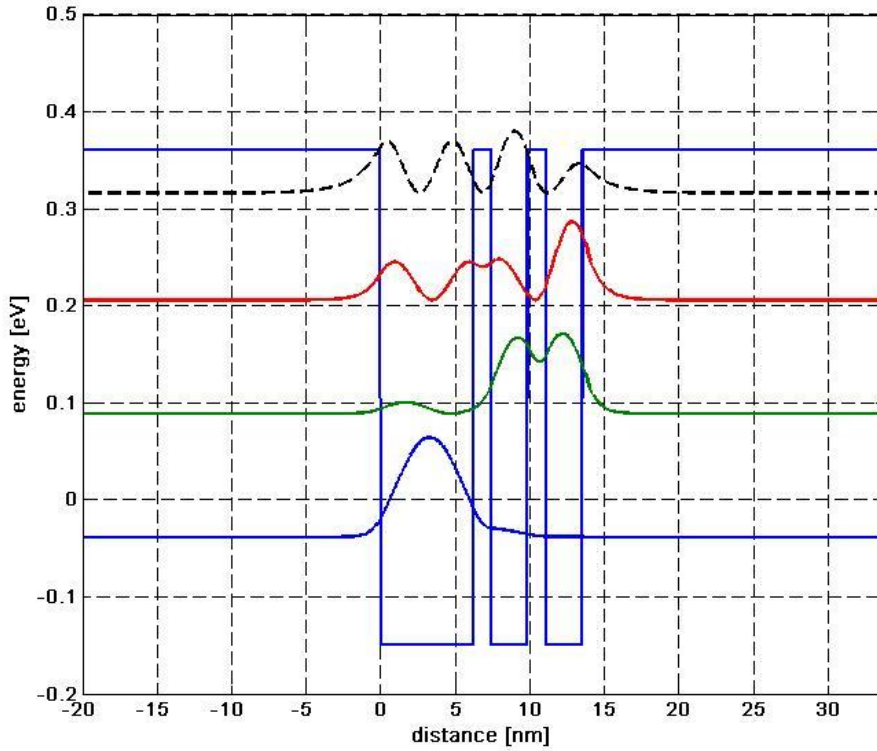
### 2-2-3) بنية سيرتوري Sirtori

تعد هذه البنية معقدة بالنسبة للبنية السابقة إذ تتكون من ثلاثة آبار كمية متفاعلة ( three coupled quantum wells) تلعب فيها المادة  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  ذات الكتلة الفعالة  $0.043m_0$  دور البئر والمادة  $\text{Al}_{48}\text{In}_{52}\text{As}$  ذات الكتلة الفعالة  $0.072m_0$  دور الحاجز الكمي. يقدر مقدار التقطع في حافة عصابة النقل عند السطح البيني  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  بـ  $0.510\text{ eV}$ . يعرض الشكل ( 6-3) سويات الطاقة الأربعة الأولى لهذه البنية محسوبة في تقريب الكتلة الفعالة لفرع واحد من فروع عصابات النقل (single-band effective mass approximation) وهو نفس التقريب المعتمد في برنامجنا وبطريقة (nonparabolic 8x8 k.p model)، هذه الطريقة الأخيرة جد معقدة وتتعدى إطار هذه المذكرة. نلاحظ كذلك هذه المرة تقارب النتائج المتحصل عليها خاصة بالنسبة للسويات الدنيا كما يبين الشكل ( 7-3).

على من تقارب النتائج يوجد فرق يعزى في هذه البنية إلى عدة أسباب منها كمون ذرات التطعيم الذي لم يأخذ بعين الاعتبار كذلك الشكل غير التكافؤ لعصابات الطاقة (band nonparabolicity).



الشكل (3-6): دوال كثافة الاحتمال الأربعة الأولى في بنية Sirtori [14].



الشكل (3-7): دوال كثافة الاحتمال الأربعة الأولى في بنية Sirtori باستخدام برنامجنا.

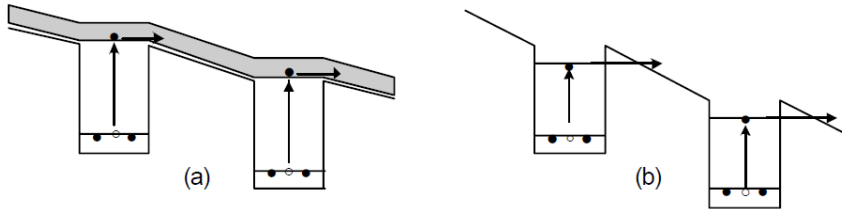
بعد هذه المقارنة يبدو إن البرنامج واعد وقابل للتطوير ويمكن الاعتماد عليه في محاكاة مثل هذه البنى الالكترونية.

### 3-3) تصميم كاشف أشعة تحت حمراء ذو أبار كمية:



نهدف فيما يلي من الفقرات إلى تصميم و تقدير بعض خصائص كاشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون ببنية آبار كمية غير متناظرة ( two-color asymmetric well quantum infrared photodetector ) وهذا باستغلال الانتقالات الالكترونية بين العصابات والعصابات التحتية. تقع الأطوال الموجية لهذه الأشعة المراد الكشف عنها في المجال  $8-10\mu\text{m}$  و بجوار الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$ . وتكمن الأهمية التكنولوجية لهذه الأطوال الموجية في استخدامها لتوجيه الأسلحة بأشعة الليزر. على سبيل المثال تستخدم الطائرات الحربية من طراز F18 ليزر طول موجته  $1.06\mu\text{m}$  لتوجيه قذائفها وتعقب الأهداف [13].

كما رأينا في الفصل الأول يمكن تشكيل بئر كمي لحصر حوامل الشحنة بترسيب شريحة شبه ناقلة ذات فاصل طاقي ضعيف وسمك صغير ( من رتبة طول موجة حوامل الشحنة) بين شريحتين من مادة شبه ناقلة عالية الفاصل الطاقي. فيظهر اثر ذلك مثلا تقطع في طيف طاقة الالكترونيات باتجاه الترسيب في عصابة النقل في الشريحة الوسطى، ويصبح للالكترونيات بنية طاقة شبه مستمرة مشكلة من عصابات تحتية. ويعد اختيار المواد الملائمة عنصرا أساسيا في عملية تصميم مثل هذه البنية لكونها تؤثر على الأطوال الموجية الموافقة للانتقالات بين العصابات التحتية من خلال عرض الفاصل الطاقي وثابت الشبكة لكل شريحة وبالتالي يتأثر الطول الموجي المراد الكشف عنه. في البحوث المبكرة لكواشف الأشعة تحت الحمراء ذات الآبار الكمية تركزت الدراسات على البنى الكمية المستغلة للانتقالات بين العصابات التحتية [14]. في مثل هذه البنى تثار الالكترونيات من الحالات الأساسية بالفوتونات الواردة إلى الحالات المثارة ثم تنفذ عبر الحاجز الكموني تحت تأثير الحقل الخارجي لتشكل بهذا التيار الضوئي كما يبين الشكل (2-b).



الشكل (3-8): انتقال الالكترونيات في الكاشف الكمي QWIP (a: حالة مقيدة-حالة مستمرة (b) حالة مقيدة-حالة مستمرة).

لمنع نفاذ الالكترونيات من الحالة الأساسية عبر الحاجز مباشرة بالفعل النفقي صمم هذا الأخير بعرض كبير (حوالي 50nm)، لكن هذا التصميم يخفض من الاستجابة الضوئية بسبب نقصان احتمال نفاذ الالكترونيات الضوئية. تكمن كذلك احد مشاكل هذه التصميمات المبكرة في أن عرض طيف الاستجابة الضوئية ضيق نسبيا بسبب أن الانتقال يتم فقط عبر حالتين مقيدتين وعمليا لا تلائم التصوير بالأشعة تحت الحمراء. أدت هذه المشاكل إلى ظهور الجيل الثاني من كواشف الأشعة تحت الحمراء ذات الآبار الكمية الذي يستغل الانتقال من الحالة المقيدة إلى الحالة المستمرة [15]. في هذه البنى تثار الالكترونيات من الحالات الأساسية إلى الحالة المستمرة لتساهم في التيار الضوئي بدون أن تنفذ من الحاجز بالفعل النفقي الشكل (2-a)، وبالتالي يقل تأثير عرض الحاجز على التيار الضوئي. بسبب وفرة الحالات المستمرة والانتقالات المتعددة يكون طيف الاستجابة الضوئية اعرض منه في حالة بنى الجيل الأول، إلا أن معامل الامتصاص يقل بشكل كبير بسبب ضعف كثافة الحالات فوق البئر. من الواضح أن هناك مقارنة يمكن أن نحصل بها

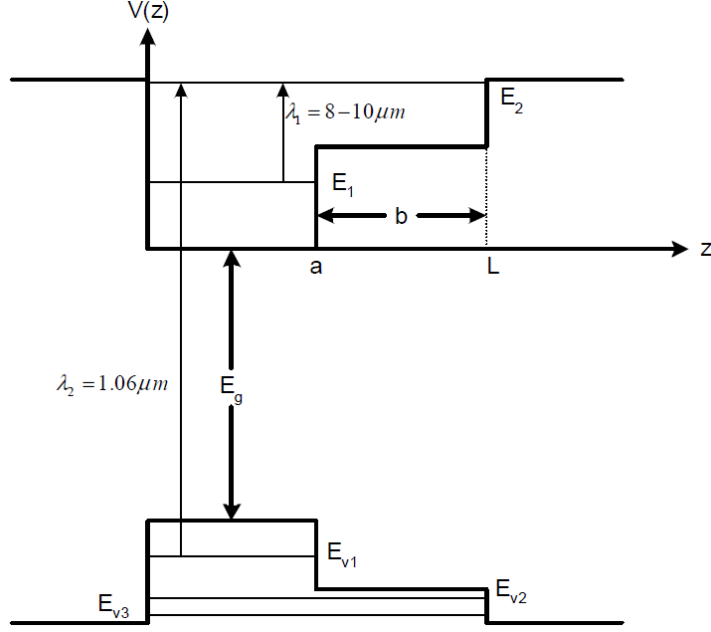
على تيار ضوئي جيد وامتصاص عالي وهما عاملين مطلوب تحقيقهما عند تصميم الكواشف الكمية Qwips. سنستخدم هذه العوامل أثناء تصميم كاشف كمي Qwip ثنائي اللون.

### 3-3-1) بنية بئر كمي درجي لكشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون:

أجريت في الماضي العديد من المحاولات لكشف ألوان أو أطوال موجية تحت حمراء مختلفة باستعمال بنية كاشف بأبار كمية مربعة [13,15,16]. إلا انه كما رأينا في الفصل الثاني تحظر قواعد الاصطفاء الانتقال من الحالة الأساسية الأولى في عصابة التكافؤ إلى الحالة المثارة الثانية في عصابة النقل وبالتالي لا يمكن الكشف عن الطول الموجي الموافق للفرق الطاقي بينهما. يعني هذا انه يمكن الكشف فقط عن طول موجي واحد باستعمال بنية بئر كمي مربع. احد السبل التي اتبعت للكشف عن أكثر من طول موجي واحد اعتمدت تكديس مجموعة من الآبار الكمية المربعة فوق بعضها البعض وكل واحد منها مخصص للكشف عن طول موجي معين [13,15,16]. من الصعب صناعة هذه البنية على الرغم من سهولة تصميمها وذلك لكثرة التلامسات المعدنية الواجب تحقيقها لربط الآبار الكمية. تم في بداية السنوات العشرة الأخيرة استكشاف الباحثين لاستخدام الآبار الكمية غير المتناظرة أو الدرجية ( asymmetric, or step, quantum wells) في الكشف عن أطوال موجية متعددة [17].

في الآبار الكمية غير المتناظرة (الآبار الكمية ذات الخطوات) ينكسر تناظر دوال الموجة، و منه يمكن للانتقالات التي كانت ممنوعة في حالة الآبار الكمية المتناظرة أن تحدث في حالة الآبار الكمية غير المتناظرة (و ذلك لعدم انعدام عنصر مصفوفة الانتقال) بهذا يمكن استغلال هذا الانكسار لتصميم بنية آبار كمية درجية تحوي ثلاثة مستويات للطاقة اثنين منهم ينتميان لعصابة النقل يوافق الانتقال بينهما طولاً موجياً يقع في المجال  $8-10\mu\text{m}$  و السوي الآخر يقع في عصابة التكافؤ يوافق الانتقال بينه و بين المستوى الثاني من عصابة النقل الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$ . لهذا المنطلق فان التصميم الأمثل للآبار الكمية غير المتناظرة التي يمكن لها الكشف عن طول الموجة  $8-10\mu\text{m}$  و الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  هو أن تكون في عصابة النقل مستويين فقط للطاقة حيث يكون الانتقال بينهما موافق للطول الموجي للأشعة تحت الحمراء المتوسطة  $8-10\mu\text{m}$  و يكون هناك مستوى طاقي واحد في عصابة التكافؤ يكون الانتقال بينه و بين المستوى الثاني من عصابة النقل موافق للطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  شكل (3-9). يصمم مستوى الطاقة الثاني لعصابة النقل على ان يكون اقرب ما يمكن للحافة العلوية للبئر (الانتقال يكون من حالة مقيدة إلى حالة شبه مقيدة) و ذلك لضمان تيار ضوئي جيد بأقل جهد خارجي مطبق.

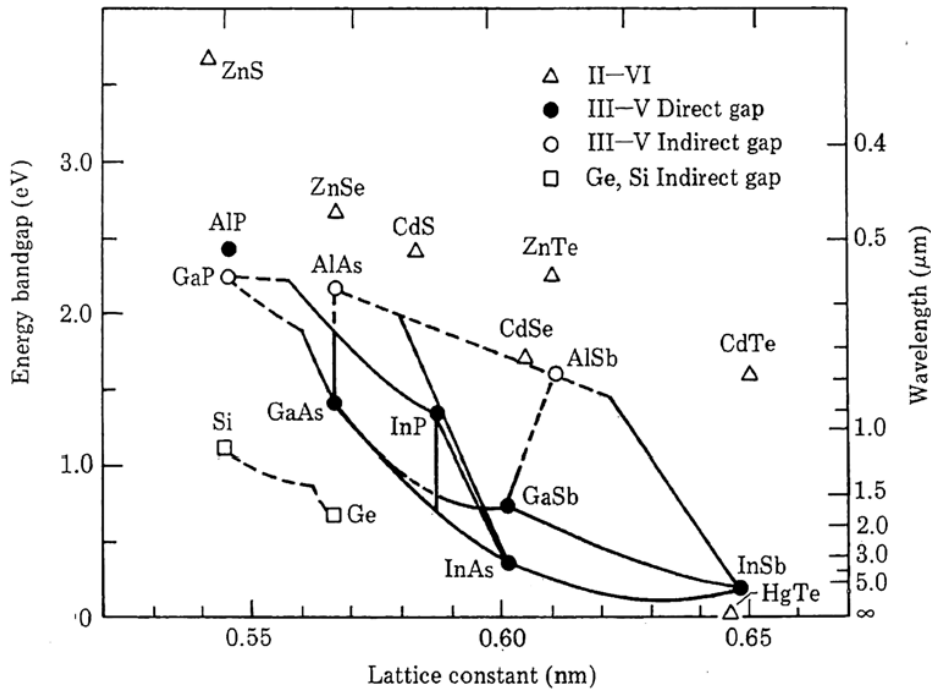
نتوقع يؤدي تطبيق الجهد الخارجي إلى انحراف اوتشوه في شكل البئر وينسحب سوي الطاقة الثاني لعصابة النقل إلى المجال المستمر مما يسمح بانسياق الإلكترونات الضوئية دون أن تنفذ من الحاجز الكمي بالفعل النفقي. تتأثر سويات الطاقة في البئر الكمي بفعل الجهد الخارجي وبالتالي تنزاح أطوال موجة قمم الامتصاص. يعرف هذا الانزياح بانزياح ستارك الخطي ويمكن تقدير بـ  $eFb/2$  حيث  $F$  يمثل طولية الحقل الكهربائي مقدرًا بالفولط على المتر و  $e$  شحنة الإلكترون و  $b$  طول الدرجة الكمية في البئر غير المتناظر مقدرًا بالمتر. يعد التقدير الدقيق لهذا الانزياح مهما في عملية التصميم ذلك لأنه يجب تطبيق جهد خارجي لاستخراج التيار الضوئي، نظرا لضرورة استخدام الجهد الخارجي بهذا يصبح من المهم أن نفهم كيفية تغير أطوال موجة قمم الامتصاص لتصميم البنية الأمثل للكاشف Qwip ولاسيما للطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$ .



الشكل(3-9): بنية البئر الكمي غير المتناظر المراد تصميمه.

### 2-3-3) وسائط تصميم كاشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون:

يوجد العديد من أنظمة المواد المختلفة التي تستخدم في صناعة و تصميم أبار كمية غير متناظرة. من أشهرها النظام  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  وذلك لوفرة المعلومات و البيانات التجريبية لهاتين المادتين و لكون لهما بنية بلورية متقاربة(ترسيبهما على بعضهما البعض جيد و لا يترك عيوب بلورية كثيرة)، و التي من شأنها أن تسهل عملية إنماء طبقات بعضها على بعض. يمكن للبنية بئر كمي درجي مصمم من هذه المواد أن يكشف عن أطوال الأمواج المتوسطة للأشعة تحت الحمراء (MIRW)، لكن ليس بمقدورها الكشف عن الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  و ذلك بسبب كبر طاقة العصابة الممنوعة لهذا المركب و منه علينا إيجاد نظام مواد ذات طاقة عصابة ممنوعة صغيرة مناسبة للكشف عن هذا الطول و الطول السابق و في نفس الوقت. يمكن تحديد مواد هذا النظام باستخدام الشكل (4) [10]. يشرح الشكل(4) بنية المواد  $\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ، لهذا المطلب بسبب قدرتها على كشف الأشعة تحت الحمراء MIRW و الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  ولكن ليس في نفس الوقت. ويعود السبب في ذلك انه إذا أردنا الكشف عن الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  يجب تعريض عرض الحزم الممنوعة في المركب عن طريق الكسر المولي لكن هذا يجعل سويي الطاقة في عصابة النقل قريبين من بعضهما، فتنقل الأشعة تحت الحمراء المراد الكشف عنها خارج المجال  $8-10\mu\text{m}$ . احد مشاكل التصميم الاخرى المتعلقة بنظام المواد هذا في انه من اجل قيم عالية للكسر المولي للاندسيوم تختلف الثوابت الشبكية بشكل كبير مما ينتج عنه ظهور الانخلاعات في البنية.



الشكل (10-3): عرض العصابة الممنوعة لأهم أشباه النواقل بدلالة ثابت الشبكة البلورية.

يمكن كذلك ترشيح البنية  $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  لكنها تنقسم نفس مشاكل البنية السابقة باستثناء أن ثوابت الشبكة البلورية متقاربة وبالتالي تتميز بسهولة الإنماء فقط. بإتباع الشكل (10-3)، المواد التي لها كل الخصائص المطلوبة من تقارب في ثابت الشبكة البلورية و ذو طاقة عصابة ممنوعة صغيرة تتوفر في المركب الرباعي  $\text{InGaAsP}$  و المركب الثلاثي  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  وهي المواد الوحيدة الذي تحقق شروط التصميم النهائي و بمقدوره الكشف عن طولي الموجتين معا و في نفس الوقت.

هذه المواد و كما نرى في الشكل السابق تتميز بثوابت شبكة بلورية متقاربة (lattice-matched) و بإمكانية تغيير نسبة  $\text{InP}$  في المركب الرباعي لتخفيض عرض الحزمة الممنوعة إلى حد يمكن معه الكشف عن المجالين وفي نفس الوقت.

### 3-3-3 التصميم النهائي لكاشف أشعة تحت حمراء ثنائية اللون:

سنعرض في مايلي من الفقرات نتائج محاكاة التصميم النهائي لبنية كاشف أشعة تحت حمراء ثنائي اللون ببنية آبار كمية درجية باستعمال مركب رباعي. احد مشاكل هذا المركب في تصميم الكواشف الكمية تكمن في قلة البيانات التجريبية. سنعمد البيانات التجريبية للمرجع [11] في التصميم النهائي للكاشف بالبنية الشرائحية التالية:

$$(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})_{0.15}(\text{InP})_{0.85}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})_{0.55}(\text{InP})_{0.45}$$

حيث يكون عرض البئر  $a=25\text{Å}$  و عرض الدرجة الكمية  $b=44\text{Å}$ . بقية البيانات مدرجة في الجدول (1).

بصفة عامة تحسب طاقة العصابة الممنوعة و الكتلة الفعالة لمزيج بين مادتين A و B بقانون Vegard :

$$E_g^{A_xB_{1-x}} = xE_g^A + (1-x)E_g^B + x(1+x)C_{AB} \quad (1-3)$$

$$\frac{1}{m_{A_x B_{1-x}}} = \left( \frac{x}{m_A^*} + \frac{1-x}{m_B^*} \right) \quad (2-3)$$

في هذه المعادلات يمثل  $x$  الكسر المولي للمادة A في المزيج، و  $C_{AB}$  ثابت تصحيح تجريبي.

$E_g$ [eV]	$m_{hh}^*$ [Kg]	$m_e^*$ [Kg]	الشريحة شبه الناقلة
1.3159	$0.4905m_0$	$0.0676m_0$	$(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})_{0.15}(\text{InP})_{0.85}$
0.8161	$0.3403m_0$	$0.0365m_0$	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$
1.1181	$0.4242m_0$	$0.0519m_0$	$(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})_{0.55}(\text{InP})_{0.45}$

**جدول(2):** بيانات التصميم النهائي للكاشف الكمي Qwip.  $m_0$  كتلة السكون للإلكترون و  $m_e^*$  و  $m_{hh}^*$  الكتلة الفعالة للإلكترونات والثقوب الثقيلة على الترتيب.

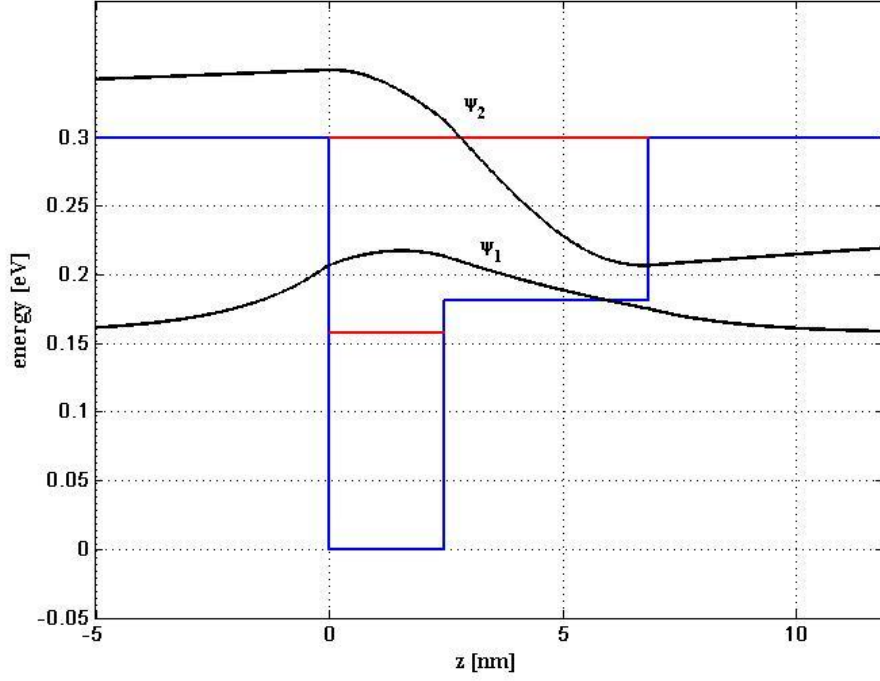
التقطع  $\Delta E_C$  في حافة عصابة النقل و  $\Delta E_V$  في حافة عصابة التكافؤ يتعلق بالفرق في طاقة العصابة الممنوعة  $\Delta E_g$  بين الشريحتين المرسبتين على بعضهما البعض. يتوزع هذا الفرق بين  $\Delta E_C$  و  $\Delta E_V$  وبشكل أكبر ناحية  $\Delta E_C$ . من الصعب تحديد الفرق  $\Delta E_g$  نظريا ويحدد تجريبيا لكل مادة. عموما تُعتمد القيم التالية عند معالجة الآبار الكمية [12]:

$$\Delta E_C = 0.6(E_g^{A_x B_{1-x}} - E_g^{A_y B_{1-y}}) \quad (3-3)$$

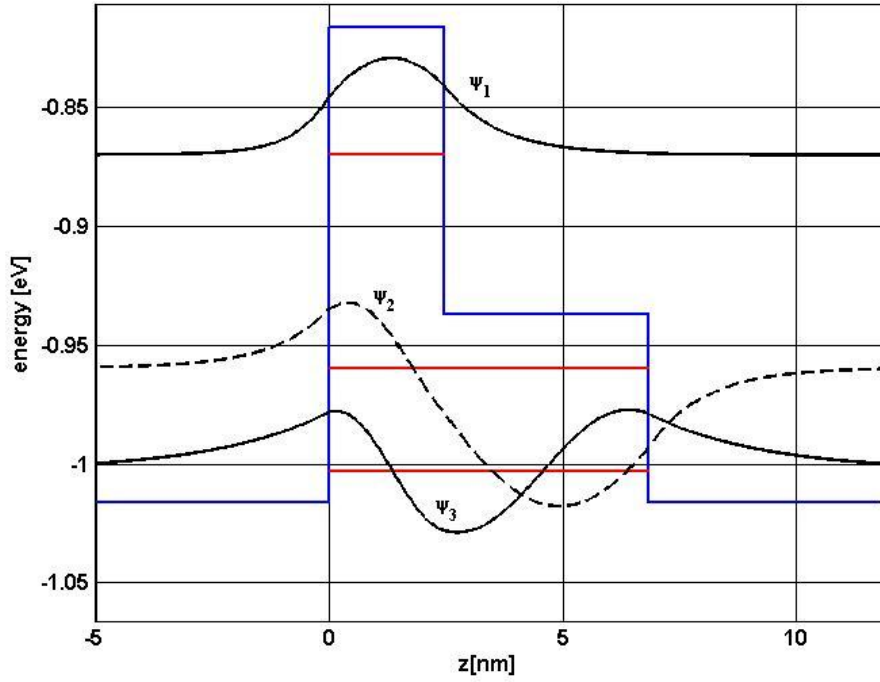
$$\Delta E_V = 0.4(E_g^{A_x B_{1-x}} - E_g^{A_y B_{1-y}}) \quad (4-3)$$

في هذه المذكرة والتي نهمل فيها مساهمة كمون ذرات التطعيم المتؤينة في حافة عصابة النقل و حافة عصابة التكافؤ نجد  $E_C = \Delta E_C + eFz$ ، وهذا يعني أننا لن نقوم بحل معادلة بواسون ونكتفي بحل معادلة شرودينغر فقط.

يعرض الشكل(3-11) حافة عصابة النقل لبنية البئر الكمي للتصميم النهائي ودوال الموجة (دوال الغلاف) ممثلة عند سويات الطاقة الموافقة لها في حالة غياب الحقل الخارجي. نلاحظ في هذا الشكل ان سوي الطاقة الثاني قريب جدا من الحافة العليا للبئر وواضح أن الحالة الموافقة له هي حالة شبه مقيدة بسبب امتداد دالة الموجة خارج البئر بشكل غير مهمل. يمثل الشكل (3-12) حافة عصابة التكافؤ بدلالة الموضع في بنية التصميم النهائي ودوال موجة الثقوب المقيدة المنحصرة فيها في حالة غياب الحقل الخارجي. ونلاحظ هنا ان التقطع في حافة عصابة التكافؤ ينتج عنه تقيد ثلاث حالات في حين أن التقطع في عصابة النقل ينتج عنه تقيد حالتين فقط وهذا نتيجة منطقية لميكانيكا الكم لان البئر الذي تتحرك فيه الثقوب اقل عمقا، كذلك يساهم في هذا الاختلاف الفرق في الكتل الفعالة للإلكترونات والثقوب.



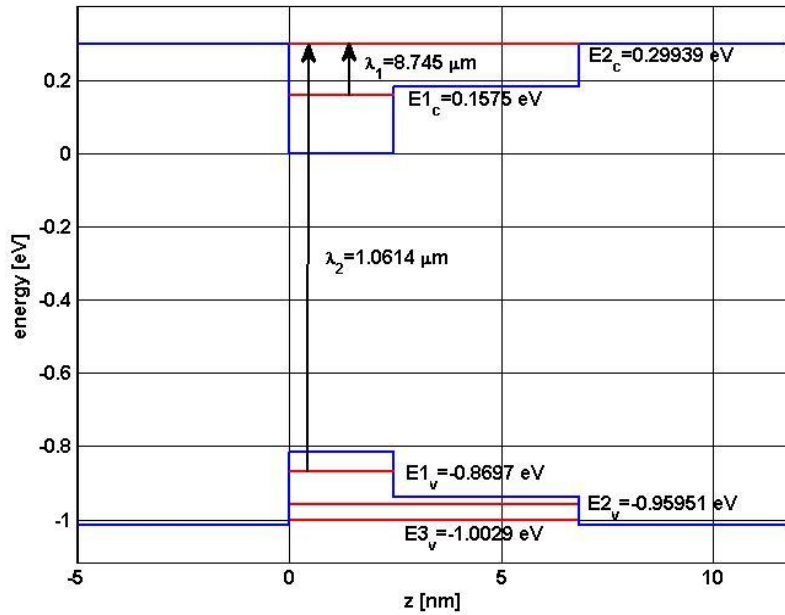
الشكل (11-3): عصابة النقل ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل الخارجي.



الشكل (12-3): حافة عصابة التكافؤ ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل الخارجي.

من المهم الإشارة إلى أن القيم المدرجة في الجدول السابق مقاسه من أجل درجة حرارة  $T = 0K^{\circ}$  و السبب في تفضيل هذه القيم على القيم عند درجة حرارة الغرفة  $T = 298K^{\circ}$  هو أنه للحد من تيار الظلام في الكاشف تحت ظروف التشغيل يجب أن يبرد تحت درجة حرارة  $T \leq 77K^{\circ}$ . وبالتالي يمكن اعتبار أن

هذا التصميم مرشح ليعمل بجوار  $T = 0K^{\circ}$  على أساس أن طاقة العصابة الممنوعة ومنه مستويات الطاقة لا تتغير في المجال  $T = 0 \square 77K^{\circ}$ . يبين الشكل (3-11) نتائج حساب الأطوال الموجية المراد الكشف عنها بالتصميم النهائي والطاقات المقيدة المتاحة فيه في عصابة النقل وعصابة التكافؤ.



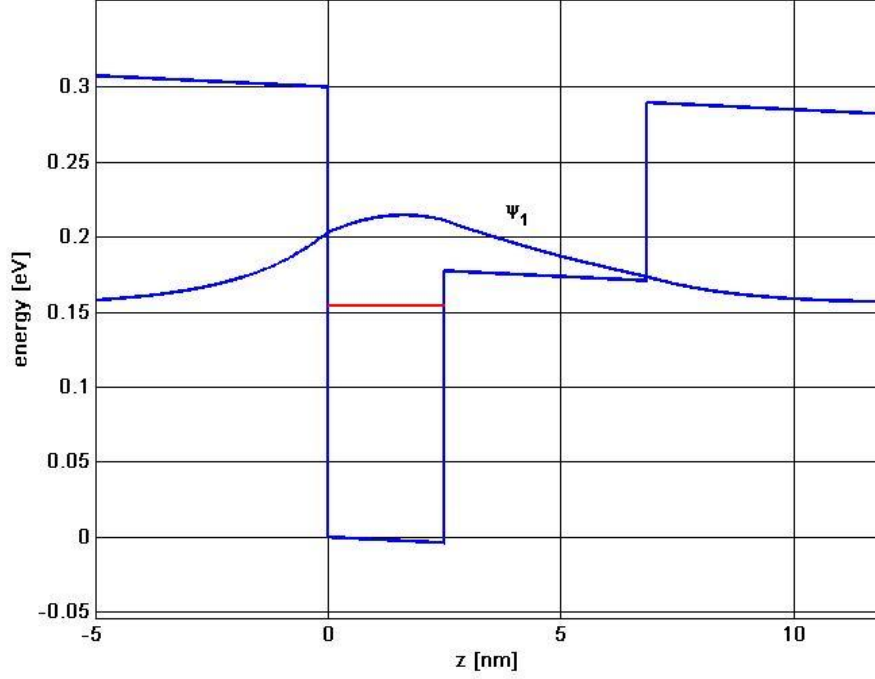
الشكل (3-13): مستويات الطاقة المتاحة في عصابة النقل وعصابة التكافؤ في بنية التصميم النهائي في غياب الحقل.

نعرض الآن تأثير الحقل الخارجي على شكل البئر الكمي و مستويات الطاقة. تمثل

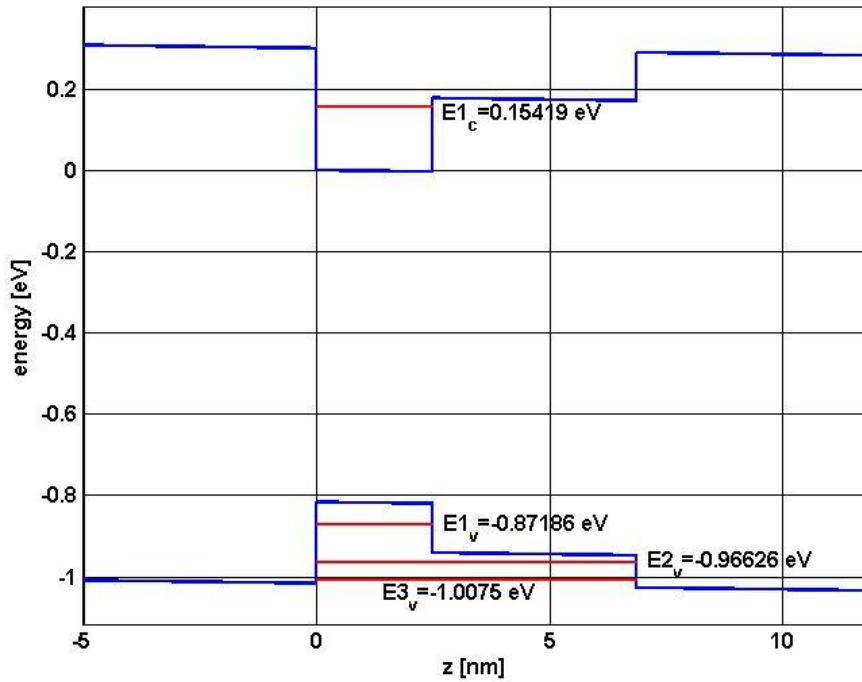
الإشكال (14، 15) تأثير حقل خارجي قدره  $1.5V / \mu m$  على حافة عصابة النقل وحافة عصابة التكافؤ وسويات الطاقة ودوال الموجة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي. نلاحظ في هذه الأشكال انه فعلا تحت تأثير الحقل الخارجي يرتفع سوي الطاقة الثاني  $E2_c$  في عصابة النقل إلى المجال المستمر لسويات الطاقة فينشأ بسهولة التيار الضوئي. في الجدول (3) مقارنة بين مواضع سويات الطاقة للحالات المقيدة في ضل تطبيق الحقل الخارجي وعدمه.

السوي الطاقى [eV]	$0.0[V / \mu m]$	$1.5[V / \mu m]$
$E1_c$	0.1575	0.15419
$E2_c$	0.29939	--
$E1_v$	-0.8697	-0.87186
$E2_v$	-0.95951	-0.96626
$E3_v$	-1.0029	-1.0075

جدول (3): مستويات الطاقة في التصميم النهائي بدلالة الحقل الخارجي.



الشكل (3-14): حافة عصابة النقل ودوال الموجة وسويات الطاقة الموافقة لها في بنية التصميم النهائي تحت تأثير حقل خارجي شدته  $1.5V / \mu m$ .

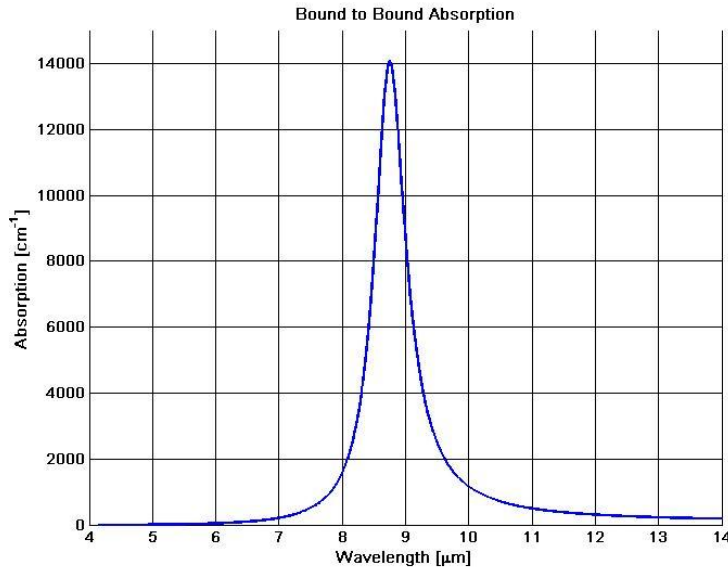


الشكل (3-15): بنية الطاقة في التصميم النهائي و سويات الطاقة المتاحة فيها تحت تأثير حقل خارجي شدته  $1.5V / \mu m$ .

يعرض الشكل ( 3-16) معامل الامتصاص بدلالة طول موجة الفوتونات الواردة من اجل الانتقالات حالة مقيدة- حالة مقيدة ونلاحظ فيه أن معامل الامتصاص يبلغ قيمته العظمى عندما توافق طاقة

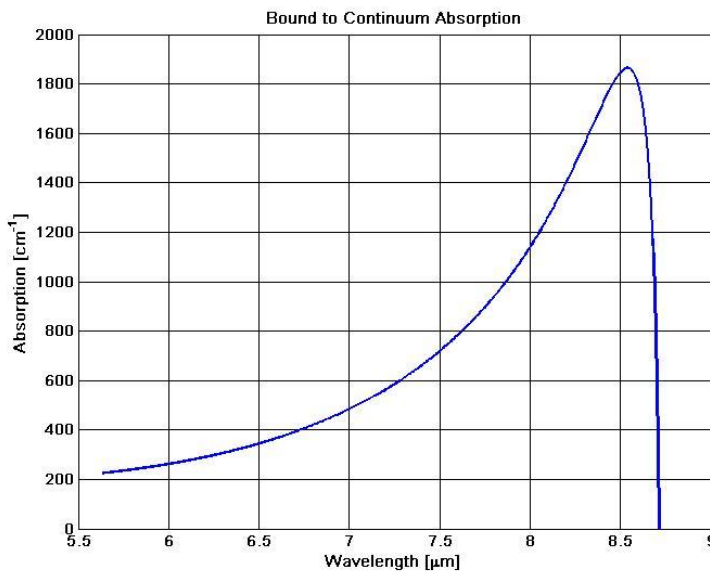


الفوتونات الواردة الفرق بين طاقة المستويين في بنية البئر الكمي. يتعلق عرض المنحنى الذي له شكل دالة لوراننز بزمن حياة الالكترونات في الحالة المثارة.



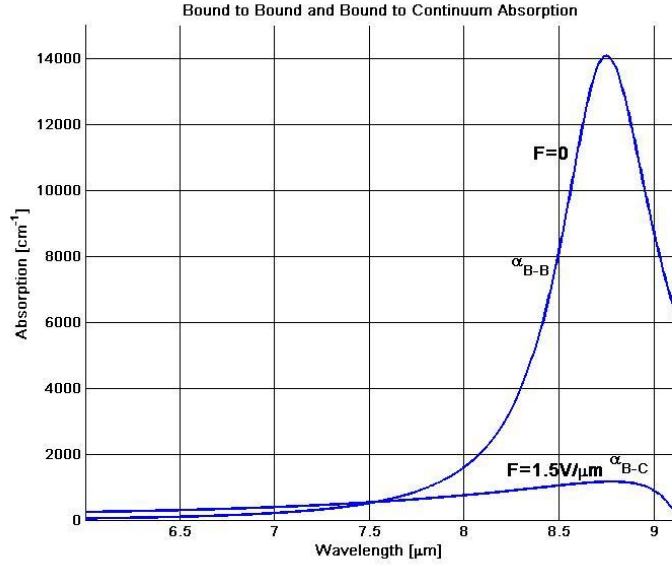
**الشكل(3-16):** معامل الامتصاص في حالة الانتقال من تحت عصابة إلى تحت عصابة في غياب الحقل الخارجي.

كذلك يعرض الشكل ( 3-17) قيمة معامل الامتصاص بدلالة طول موجة الفوتونات الواردة للانتقالات من حالة مقيدة إلى حالة حرة ، و نلاحظ أن الامتصاص يبلغ قمته في الطيف عندما توافق تقريبا طاقة الفوتونات الفرق في الطاقة بين المستوي المقيد و طاقة قمة البئر الكمي الذي منه تبدأ المستويات الحرة ، وحتى لو كانت طاقة الفوتونات أعلى فان الامتصاص يحدث من اجل قيمة مساوية تقريبا لقمة البئر فقط.



**الشكل(3-17):** معامل الامتصاص للانتقالات حالة مقيدة - حالة حرة في غياب الحقل الخارجي.

العامل الرئيسي الذي يجب اعتباره في تقييم هذا التصميم هو النظر في كيفية تأثير الحقل الخارجي على قدرة بنية البئر المصممة في الكشف عن الأطوال الموجية  $1.06\mu\text{m}$  و  $8-10\mu\text{m}$ . يعرض الشكل مقارنة بين معامل الامتصاص في غياب الحقل الخارجي حيث تهيمن الانتقالات حالة مقيدة - حالة مقيدة و معامل الامتصاص تحت تأثير الحقل الخارجي  $F=1.5\text{V}/\mu\text{m}$  أين تسود الانتقالات حالة مقيدة - حالة حرة.



الشكل (18-3): مقارنة بين معامل الامتصاص في حالة غياب الحقل الخارجي وفي حضوره.

نلاحظ في هذا الشكل أن طيف الامتصاص للانتقالات بين الحالات المقيدة أضيق وأشد منه للانتقالات من الحالات المقيدة إلى الحالات الحرة. اتساع طيف الامتصاص يضمن أن بنية الآبار الكمية لهذا التصميم تبقى قادرة على كشف الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (MIRW) مادام الحقل ليس شديداً. من الجدير بالذكر أنه في هذه المذكرة لم نقم بحساب بحساب معامل الامتصاص عصابة- عصابة بسبب صعوبة تحديد دوال بلوخ في البنية غير المتجانسة للبئر الكمي والتي يتطلب تحديدها استعمال طريقة k.p. مع ذلك يمكن الجزم أن معامل الامتصاص عصابة- عصابة له نفس هيئة معامل الامتصاص تحت عصابة-تحت عصابة، ومنه يمكن لهذا التصميم أن يكشف عن الطول الموجي  $1.06\mu\text{m}$  بشكل عادي.

# الخاتمة

## الخاتمة العامة

أدى تطور صناعة البنى النانومترية الغير متجانسة لأشبه النواقل إلى إعطاء صورة واضحة في مفهوم الظواهر الكمية، خاصة البئر الكمي من خلال تكميم مستويات الطاقة و حصر حوامل الشحنة داخله في مجال ثنائي البعد. وهذا النوع من البنى يمكن التحكم بظواهره من خلال مجموعة من المعادلات الرياضية القادرة على وصف حالته. هذه المعادلات هي عبارة عن معادلات تفاضلية من الدرجة الثانية يمكن إيجاد الحل التحليلي لها إلا في حالات خاصة جدا و باستعمال طرق تقريبية و شروط حدية. و من اجل ذلك نعمل على نمذجة هذه المعادلات من خلال تحويل المعادلات التفاضلية بواسطة طريقة الحجوم المنتهية إلى معادلات جبرية، يمكن حلها بالطرق التحليلية المباشرة أو التكرارية.

وقد تطرقنا لصناعة كاشف أشعة تحت الحمراء، معتمدين في ذلك على الآبار الكمية غير المتناظرة القادرة على كشف أطوال موجية متعددة وفي نفس الوقت، و ذلك باستخدام هندسة العصابة الممنوعة بالشكل المناسب و الخصائص المتعلقة بها من كتلة فعالة و موضع سوات الطاقة داخل البئر الكمي لعصابة النقل و عصابة التكافؤ، هذه القدرة لكشف معظم مجال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة تكون مفيدة في ميدان التصوير الليلي، و تستخدم في إرسال أو تعقب شعاع ليزري لجهاز عسكري بشكل دقيق.

و إن الفضل في كل ذلك استخدام الانتقالات ما بين مستويات الطاقة للبئر الكمي (الانتقال من حالة مقيدة إلى حالة مقيدة أو الانتقال بين حالة مقيدة إلى حالة حرة)، الناتجة من استخدام أسلوب مصفوفة الانتقال في حل معادلة شرودينغر و استعمال تقريب الكتلة الفعالة، و كذلك من منطلق الاختيار الأمثل للمواد الداخلة في تركيب البئر الكمي التي لها نفس ثابت الشبكة البلورية و عيوب اقل أثناء القيام بترسيبها على بعضها البعض.

و عملت هذه المذكرة على تبيان جل المفاهيم المتعلقة بالكواشف الضوئية ذات الآبار الكمية من تعاريف و سرد لأهم المعادلات و القوانين الرياضية التي تحكم هذا النوع من الكواشف مع إرفاقها بالبيانات التجريبية للقيم و الخصائص و إعطاء الطرق العددية لمحاكاتها و وضع تطبيقات تؤكد و يؤيد كل ما ورد فيها.

## المراجع

- [1] R. D. Hudson, Infrared System Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- [2] H. A. Gebbie, W. R. Harding, C. Hilsum, A. W. Pryce, and V. Roberts, "Atmospheric Transmission in the 1 to 14  $\mu$  region," presented at proc. of the royal society, London, 1951.
- [3] J. M. Lloyd, Thermal Imaging Systems. New York: Plenum Press, 1975.
- [4] Michael P. Touse, Demonstration of a near and mid-infrared detector using multiple step quantum well, Naval post graduation school, Monterey, California 2003, NSN 7540-01-280-5500.
- [5] Yeo Hwee Tiong, High responsivity tunable step quantum well infrared photodetector , Naval post graduation school, Monterey, California 2004, NSN 7540-01-280-5500.
- [6] Thomas Antoni, Structures de couplage optique originales pour les détecteurs (infrarouge à puits quantiques, Université paris Diderot Paris 7)2009.
- [7] Emmanuel LHUILLIER,Transport électroniques dans le super réseaux:applications aux détecteurs infrarouges à grandes longueur d'onde ,cornell university2010.
- [8] H.Schnrider ,H.C.liu, Quantum Well Infrared Photodetectors Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [9] B.R.Nag , Physics of Quantum Well Devices , Kluwer Academic Publishers,2002,New York.
- [10] H.Mathieu, Physique des semi-conducteurs et Composants Electroniques, masson,paris.1998.
- [11] Claude Pasquier, transport quantique balistique et mono-electronique dans des nanostructures d'Arseninure de Gallim, thèse de doctorat 1994, université de Paris Sud.

[12] ZOUBIR BECER, Investigation de la concentration de gaz d'électrons à deux dimensions 2DEG dans les Hétérostructures n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As/GaAs dopé sélectivement, Université MOHAMMED KHIDER de BISKRA,algerie 2006.

[13] Hewish, Mark and Joris Janssen Lok, "Advance of the pods: enhancing precision attacks night and day", International Defense Review, 01 March 2002.

[14] Sameer Shah, "Detection Wavelength Tuning and Dark Current Modelling GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetectors using MATLAB and Synopsys ISE TCAD", Central Research Laboratory, Bharat Electronics Limited, Bangalore-560013, India.

[15] Sirtori S, Capasso F, Faist J, Nonparabolicity and a sum rule associated with bound-to-bound and bound-to-continuum intersubband transitions in quantum wells. Physical Review B vol. **50** (12), 8663 (1994).

[16] Levine ,B.F.K.K.Choi, CG.Bethea, J.Walker and R.J ,detector using intersubband Malik, "New 10 μm infrared 'absorption in resonant tunneling GaAlAs Superlattices Appl. Phys. Lett., 50, pp. 1092-1094, 1987

[17] Hasnain, G., B.F. Levine. Levine, D.L. Sivco and A.Y. Cho, "Mid-infrared detector in the 3-5 μm band using bound to continuum state absorption in InGaAs/InAlAs multiquantum well structures", *Appl. Phys. Lett.*, **56**, pp. 770-772, 1989.

[18] Köck, A., E. Gornik, G. Abstreiter, G. Böhm, M. Walther and G. Weimann, Double wavelength selective GaAs/AlGaAs infrared detector device" *Appl. Phys Lett.*, 60, pp 1992,2013-2011.

[19] Christian Jiruschek, Accuracy of Transfer Matrix Approaches for Solving the Effective Mass Schrödinger Equation, IEEE Journal of quantum electronics, VOL. 45, NO. 9, september 2009.

S. Adachi, "GaAs, AlAs, and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Material parameters for use in research and device applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, pp. R1-R29, 1985.

J. Davies, *The Physics of Low-dimensional Semiconductors*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

J. Singh, *Physics of semiconductors and their heterostructures*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.

H. Kroemer, "Heterostructure device physics: band discontinuities as device design parameters," in *VLSI electronics. Microstructure science. Vol.10. Surface and interface effects in VLSI*: Academic Press, 1985, pp. 121-66.

[17] R. D. Hudson, *Infrared System Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1969.

[18] J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems*. New York: Plenum Press, 1975.

[19] H. A. Gebbie, W. R. Harding, C. Hilsum, A. W. Pryce, and V. Roberts, "Atmospheric Transmission in the 1 to 14  $\mu$  region," presented at proc. of the royal society, London, 1951.

E. S. Barr, "historical Survey of the early development of the infrared spectral region," *Am. J. Phys.*, vol. 28, pp. 42-54, 1960.

[26] E. S. Barr, "The Infrared pioneers-II.Macedonio Melloni," *Infrared Physics & Technology*, vol. 2, pp. 67-73, 1962.

[27] P. R. Norton, "Infrared Detectors in the next Millennium," presented at Proc. SPIE 3698, 1999.

[28] A. Rogalski, "Infrared detectors: an overview," *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 187-210, 2002.