مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (٩) العدد (١) ٢٠٢٥

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (1) 2025

دراسة في الليزرات المتعاقبة باستخدام برنامج الماتلاب

د. إبراهيم كامل بلال*

د. حسن عبدالكريم سليمان**

سالي سعد حمدان***

(تاريخ الإيداع ٦/ ٣/ ٢٠٢٥ – تاريخ النشر ١١/ ٥/ ٢٠٢٥)

□ ملخّص □

قمنا في هذا البحث بنمذجة علاقة تبادل الطاقة بين الالكترون والفوتون في شبيكة فائقة (Superlattice) من GaAs/AlAs برمجياً باستخدام برنامج Matlab للقيام بحساب قيم الطاقة مع رسم تغيرات الطاقة بدلالة المتجه الموجي K_x ومن أجل قيم مختلفة ل n (عدد الحالات المدروسة) وكانت قيم الطاقة تتراوح ضمن المجال (٠.١١–٠.٣٨)eV, هذه القيم للطاقة تؤدي للحصول على أطوال موجية في مجال الاشعة تحت الحمراء البعيدة FIR (Far Infrared).

الكلمات المفتاحية: محاكاة، ليزرات متعاقبة، شبيكة فائقة.

*دكتور–قسم الفيزياء–كلية العلوم–جامعة تشرين–اللاذقية–سوريا.

**دكتور–قسم الفيزياء–كلية العلوم– جامعة طرطوس–طرطوس–سوريا.

***طالبة دراسات عليا(ماجستير)–قسم الفيزياء–كلية العلوم–جامعة تشرين–اللاذقية–سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (٩) العدد (١) ٢٠٢٥

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (1) 2025

A study of sequential lasers using MATLAB

Dr.Ibrahim Kamel Bilal*
Dr.Hasan Abdalkarim Sliman**
Sally Sad Hamdan***

(Received 6/3/2025.Accepted 11/5/2025)

□**ABSTRACT** □

In this research we modeled the energy exchange equation between electrons and photons in a GaAs/AlAs superlattice using matlab to calculate the energy values and plot the energy changes in terms of the wave vector for different values of n (Number of cases studied), The energy values ranged in the range (0.11-0.38)eV, These energy values lead to obtaining wavelengths in the Far Infrared (FIR) range.

Key Words: Simulation, Cascade Lasers, Superlattice.

*Professor, Department of physics, Faculty of Science, Tishreen University, Latakia, Syria.
** Professor, Department of physics, Faculty of Science, Tartous University, Tartous, Syria.
***Master Student, Department of physics, Faculty of Science, Tishreen University, Latakia, Syria.

مقدمة:

دأب الفيزيائيون طوال القرن الماضي تقريباً دخول عالم الطيف الكهرطيسي وانطلاقاً من الضوء المرئي ، فقد قامو بتطوير تقنيات لتوليد وكشف الإشعاع الموجود عند ترددات أعلى وأدنى من الترددات التي تقع عند طرفي هذا الطيف، استخدمت أشعة X مثلا لتصوير الأشياء المخفية، واستخدم الإشعاع تحت الأحمر القريب NIR في اتصالات الضوء عبر الالياف البصرية وفي الأقراص المضغوطة، لكن يوجد جزء من الطيف الكهرطيسي يقع في منطقة الترددات التراهرتزية THz (وهي وحدة لقياس التردد وتساوي 10^{12} Hz) [١].

كان أول من اقترح المفهوم الأساسي لليزرات آبار الكمون المتعددة كل من رودولف كازارينوف و روبرت سوريس عام 1971 ، لكن ادراك الفكرة الأولى كان عام 1994 .كان فيديريكو كاباسو والفريد تشو أول من نجح في انتاج ليزر شلال كمومي في مختبرات Bell، تمثل هذه الليزرات نوعاً جديداً من البنى متعددة الطبقات المكونة من تركيبات مختلفة لمواد InAlGaAs، حيث تتناوب طبقات الآبار الكمومية والحواجز ، وقد قيل في 1970's بعد اتضاح مفهوم الليزر المتعاقب بأنه يمكن ان تعمل هذه المنظومة في مجال THz (الأشعة تحت الحمراء البعيدة من الطيف الكهرطيسي) ، الا أنه لم يتم عرض عمل أول THzQCL الا عام 2002 ، بعدها كان التقدم سريعا فبعد (2-3) سنوات تم توسيع تغطية التردد الى حوالي THz (1-5) وتم رفع درجة حرارة التشغيل الى 250 K والحصول على طاقة خرج قصوى بحدود 1watt [٢].

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث الى الحصول على ليزرات تشع في المجال الترددات التاوية (THz)، تأتي أهمية البحث في أنه لكي يتم توليد ترددات تاوية يجب أن يكون لدينا بلورات فرق الطاقة بين سوياتها أصغر بحوالي 100 مرة من فرق الطاقة للذرات أو الجزيئات التي تعطي الليزرات العادية (أي على الالكترونات أن تهتز بشكل أسرع) بناء على ذلك يتم الحصول على ليزرات كمومية متعاقبة QCL تحوي هذه الليزرات على مناطق فعالة مناطق موصلة ويحدث في المنطقة الفعالة تبادل للطاقة بين الالكترون والفوتون.

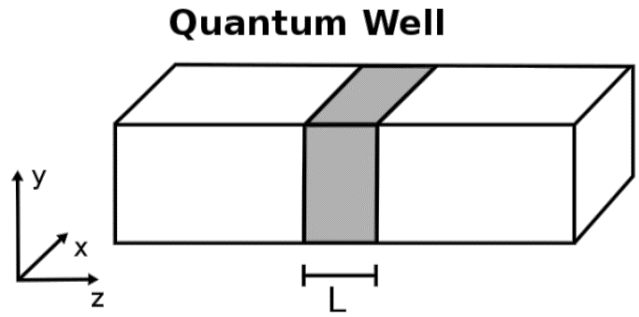
منهجية البحث ومواده:

قمنا في البحث بنمذجة لآلية انتقال الالكترون من سوية لأخرى لتوليد فوتونات الاشعة التاوية ، أي دراسة تبادل الطاقة بين الالكترون والفوتون في الشبيكة الفائقة (Superlattice) والحصول على قيم الطاقة باستخدم برنامج (Matlab) .

الدراسة النظرية والحسابية:

البئر الكمي عبارة عن طبقة رقيقة نانومتريه nm، تحصر جسيمات (الكترونات او ثقوب) في البعد المتعامد مع سطح الطبقة z مع بقاء الحركة في الابعاد الأخرى غير مقيدة x-y ويوضح الشكل (١)

بئر كمومي [٣].



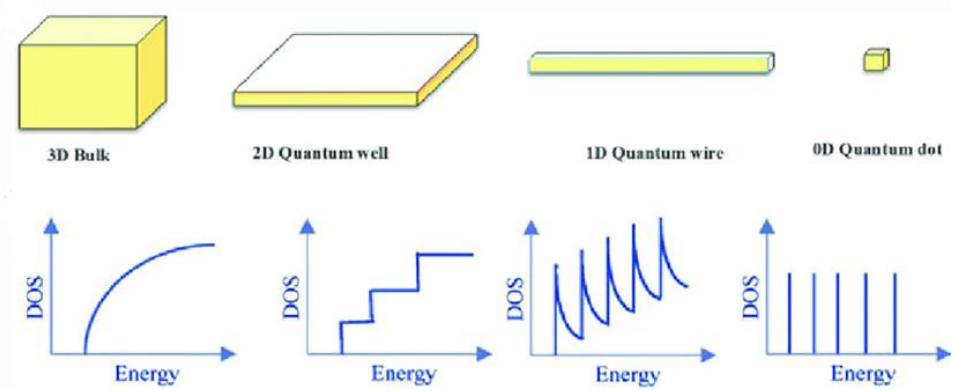
الشكل(١) بئر كمومي

يمكن القول بشكل أوضح ان البئر الكمومية هي بئر محتملة ذات قيم طاقة منفصلة وكان النموذج الكلاسيكي المستخدم لأثبات البئر الكمومي هو حصر (حبس) الجسيمات التي كانت في البداية حرة التحرك في ٣ ابعاد تم حصرها في بعدين او بعد واحد، عن طريق اجبارها على ان تشغل منطقة مستوية تحت تأثير الحبس الكمي .

عندما يصبح سمك البئر الكمي مشابها لطول موجة دي برولي (للإلكترونات والثقوب، أي ان للبئر بنية نانوية) ، فإن ذلك يؤدي الى مستويات طاقة فرعية .تم اقتراح مفهوم البئر الكمومي عام 1963 من قبل هربرت كرومر و زوس الفيروف وكازارينوف [٤]، تم بعدها التطوير الكمي لأنصاف النواقل عام 1970 من قبل العالمان (Tsu و Esaki)، اللذان قاما باكتشاف الشبيكات الفائقة الجودة (Superlattice) [3].

مع العلم أنّ الحبس او الحصر الكمي هو تأثير كمي وله تأثير كبير على كثافة الحالات للجسيمات المحصورة داخل البئر الكمومي، وقد تبين أنّ البنية غير المتجانسة المؤلفة من طبقات رقيقة من أنصاف النواقل، مع فجوات طاقة مختلفة ، تُظهر خصائص مهمة ومفيدة.

ويعود تطوير نبائط (Devices) الابار الكمومية ، بشكل أساسي إلى تطوير تقانات انماء البلورات ، لان هذه النبائط تتطلب هياكل ذات نقاء عال، مع القليل من العيوب (Defects). فالتحكم في انماء الهياكل غير المتجانسة، يسمح بتطوير نبائط انصاف لنواقل ، ذات ابعاد مختلفة كما هو موضح في الشكل (٢). [٥]

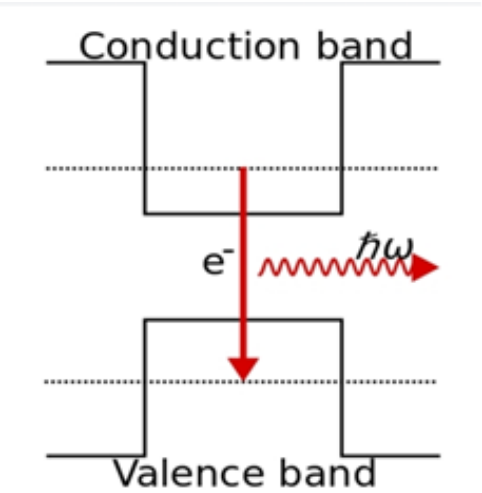


الشكل(٢) تأثير الحبس الكمي على كثافة الحالات [٥]

الانتقالات بين السويات الفرعية و السويات الداخلية:

يتم اصدار فوتون مفرد ، في انصاف النواقل النمطية ، داخل بلورة نصف الناقل حيث يمكن للإلكترونات ان تشغل حالات في احد عصابتي الطاقة كما هو موضح في الشكل (3)، عصابة التكافؤ تكون ممتلئة بالإلكترونات منخفضة الطاقة ، وعصابة الناقلية تحوي كثافة الكترونات اقل وتكون أعلى طاقة.

يفصل بين عصابتي الطاقة فجوة طاقية لا يمكن للإلكترونات ان تتواجد فيها، تولد الثنائيات الليزرية النمطية لأنصاف النواقل ضوء بواسطة فوتون ينتج من اتحاد الكترون عالي الطاقة في عصابة الناقلية مع ثقب في عصابة التكافؤ ، ويتحدد طول موجة اصدار الثنائي الليزري بتحديد طاقة الفوتون من خلال فجوة الطاقة للمادة المستخدمة.

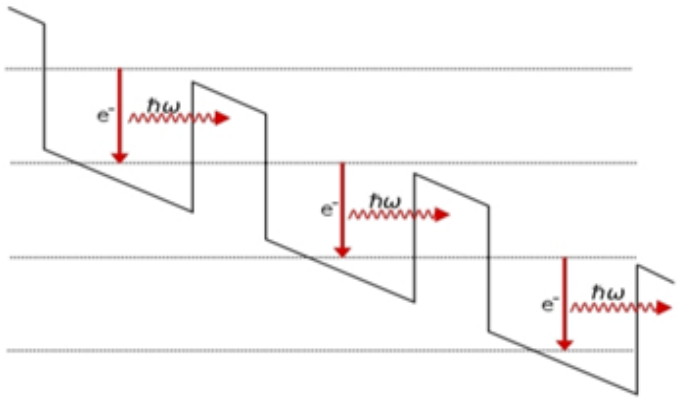


الشكل(٣) الانتقالات بين العصابية[6]

بالرغم من ذلك لا تستخدم ليزرات آبار الكمون المتعددة (Quantum Cascade Laser QCL) انصاف نواقل في منطقتها النشطة ضوئيا ، بل تتكون من سلسلة دورية من الطبقات الرقيقة التي لها تركيب مادي متغير وذلك لتشكيل شبكة فائقة (SL).

يطبق على الشبيكة الفائقة حقل كهربائي ساكن يدل ذلك على ان هناك احتمالية متفاوتة لتشغل الالكترونات مواقع مختلفة يسمى هذا حبس آبار كمي متعدد الابعاد –أحادي البعد مما يؤدي الى تقسيم سويات الطاقة المسموح بها الى عدد من السويات الفرعية الالكترونية المنفصلة، ويمكن التحكم بالانقلاب السكاني بين سويتين فرعيتين حيث يتحدد موضع سويات الطاقة بشكل أساسي من خلال سماكة الطبقة وليس المادة.

بالمقارنة بين الثنائيات الليزرية التي يتم فيها تلاشي (Annihilation) الالكترونات والثقوب بعد تجميعها عبر فجوة الطاقة والتي لا تلعب دور إضافي في توليد فوتون ، فإنّ QCL احادي القطب بمجرد ان ينتقل الكترون من الطبقة العليا ويصدر فوتون في دورية واحدة من الشبيكة الفائقة ، كما هو موضح في الشكل (٤) [6].



الشكل(٤) الانتقالات بين العصابات الالكترونية الجزيئية (السويات الفرعية) في QCL [6]

الشبيكات الفائقة والحزم الصغرية (mini band) نصف الناقلة:

تلعب فوق البلورات مع الحزم الصغرية دورا مهما فيQCL ، وتتألف شبيكة فائقة من GaAs/ AlAs زرنيخيد المنيوم/ زرنيخيد غاليوم (وهي البلورة المدروسة) ، من متتالية دورية من طبقات زرنيخيد غاليوم GaAs وطبقات زرنيخيد المنيوم AlAs. يعاني الالكترون الذي ينتشر على طول محور تلك البلورة من طبقات AlAs كحاجز كمون. يؤدي الكمون الدوري إلى حزم صغرية (mini band) يفصل بينها فجوات صغرية (mini gap) . تتميز علاقة التبدد للإلكترونات في أدنى حزمة صغرية بالعلاقة: [7].

$$\varepsilon = \varepsilon_m \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} cosk_x a\right) \qquad (1)$$

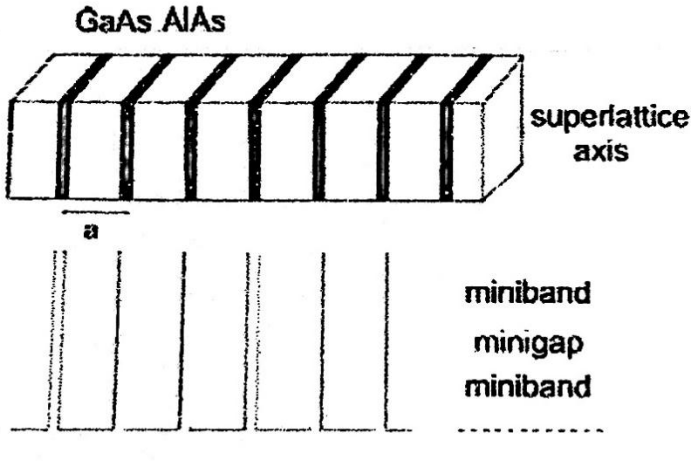
حيث ε الطاقة وε_m عرض الحزمة الصغرية و k_x شعاع الموجة على طول محور الشبيكة الفائقة، ومحور التبدد دوري بالنسبة إلى k_x .

لهذا يمكن ان نقيد k_x إلى منطقة برليون صغيرة ضمن ($-\pi/a< k_x \leq \pi/a$) . ويمكن حساب الحزم الصغرية اعتمادا على نموذج Kronig–Penny، والحركة المعامدة لمحور البلورة، ضمن طبقات GaAs تقابل حركة لإلكترون النقل وطاقة إلكترون حزمة صغرية يعطى بالعلاقة: [7] (29.3) .

$$E = E_c + E_{zp} + \varepsilon_m \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} cosk_x a\right) + \left(\frac{\hbar^2}{2m_e}\right)\left(k_z^2 + k_y^2\right) \qquad (2)$$

حيث E_c طاقة إلكترون عند النهاية الصغرى لحزمة نقل و E_{zp} طاقة النقطة الصفرية لإلكترون حزمة صغرية mini band (هي مناطق محظورة داخل البلورة ناتجة عن التداخل البناء لأمواج دي برولي مع البنية البلورية) [7].

والحد الأخير يقابل طاقة الحركة المعامدة لمحور البلورة الصغرية و m_e الكتلة الفعالة لإلكترون في النهاية الصغرى لحزمة توصيل GaAs، ε_m تمثل عرض الحزمة، a ثابت الشبكة البلورية و k_x و k_y و k_z متجهات موجية وفق المحاور x,y,z حيث ان k_x شعاع الموجة على طول محور الشبيكة الفائقة وفق الاتجاه x وتعبر n عن عدد الحالات المدروسة يوضح الشكل (٣) الشبيكة الفائقة GaAs/AlAs و mini band:



الشكل(٣) شبيكة فائقة من GaAs/AlAs و mini band [7] (Fig:29.3)

حيث ان:

$$K_y = \frac{2\pi}{L_y}n,\ K_z = \frac{2\pi}{L_z}n,\ L_y = 1000\mu m,\ L_z = 50\mu m, n = \mp1, \mp2, \mp3 \ldots\ldots$$

$$a = 0.56569 * 10^{-4}\mu m. - \pi/a < k_x \leq \pi/a$$

النقل (Transport) في بلورة فوقية:

لنناقش النقل الكهربائي في بلورة فوقية (نقل حزمة جزئية) إنّ مجالاً كهربائياً E موجها باتجاه محور البلورة الفوقية ، يسرع الإلكترونات . ويؤدي التخامد إلى نشوء موصلية أومية (غير محددة بشكل شديد بالمجال E) ، و تعطى بالعلاقة :

$$\sigma = N_0 e^2 \tau / m^* \qquad (4)$$

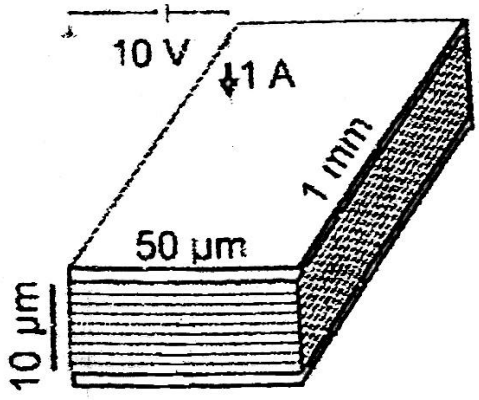
حيث N_0 كثافة الإلكترونات في البلورة الفوقية و τ زمن التخامد بين الحزم الجزئية ($\tau \sim 10^{-13}$ s) للإلكترون في بلورة InGaAs/InGaAlAs عند درجة حرارة الغرفة ، و m^* الكتلة الفعالة لإلكترون في قعر الحزمة الجزئية (عند $k_x \approx 0$) ، وتتوقف قيمتها على دور البلورة الفوقية وعلى عرض حاجز الكمون .

الموصلية الأومية محددة (لكن ليس بشكل شديد) ، بالمجال E ، تستخدم البلورة الفوقية في ليزرات التعاقب الكمومي كحاقن Injector (كمقتلع – كنازع Extractor–ايضا)، حيث تتغير سماكات GaAs وAlAs (أو InGaAsو InGaAlAs) على طول محور تلك البلورة.

بالتالي تتغير طاقة النقطة الصفرية وعرض الفجوات الصغرية، أيضا، ويؤدي تطبيق جهد كهربائي إلى تشكل حقل كهربائي ساكن على طول محور تلك البلورة. وتحد الحدود العليا للحزمة الصغرية من الطاقة العظمى التي يمكن أن يصل إليها الإلكترون، في حقل كهربائي ساكن، وأول حزمة صغرية تمنع الإلكترونات المتهيجة من الهرب من منطقة الربح كما ذكرنا [7].

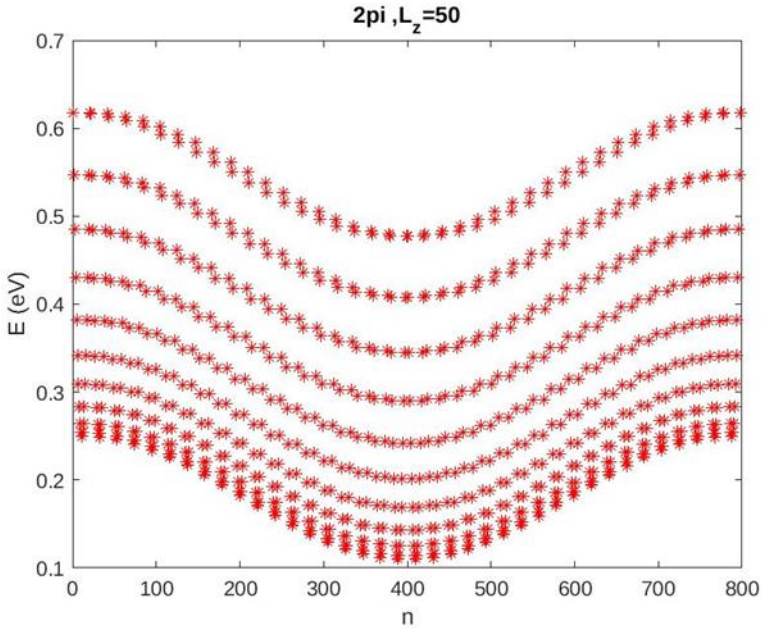
ابعاد الليزر المدروس :

ابعاد الليزر المدروس 1mmx50μm x10μm السماكة والعرض والطول على الترتيب كما موضحة في الشكل (٤) ، والكمون وشدة التيار المطبقين هما10V و1A على التوالي . المسافة بين السويات الجزئية 2 والسويات الجزئية 1 ، تقابل تردد في مجال FIR . والفرق بين سويات الطاقة من مرتبة $k_B.T$ عند درجة حرارة الغرفة . وللوصول إلى فرق عتبة الإسكان، فإن IRQCL، يجب أن يبرد إلى الدرجة 77K للنتروجين السائل [7].



الشكل(٤) ابعاد الليزر المدروس [7] (Fig.29.5)

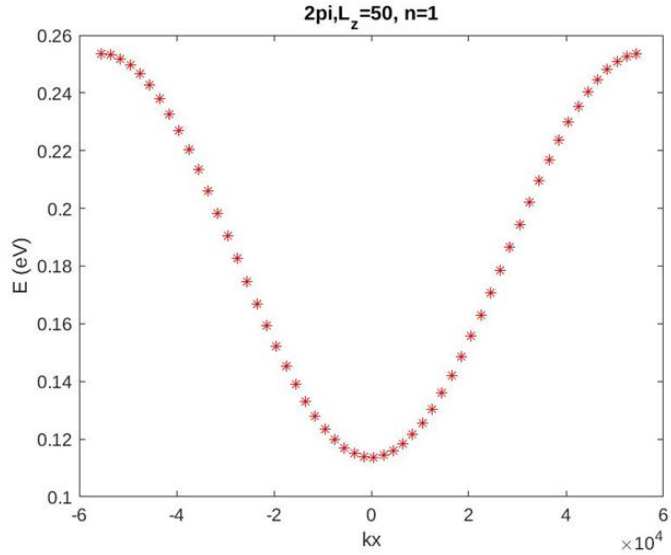
قمنا بنمذجة العلاقة (٢) باستخدام برنامج Matlab والخطوط البيانية الناتجة تمثل تغيرات الطاقة بدلالة المتجه الموجي K_x.



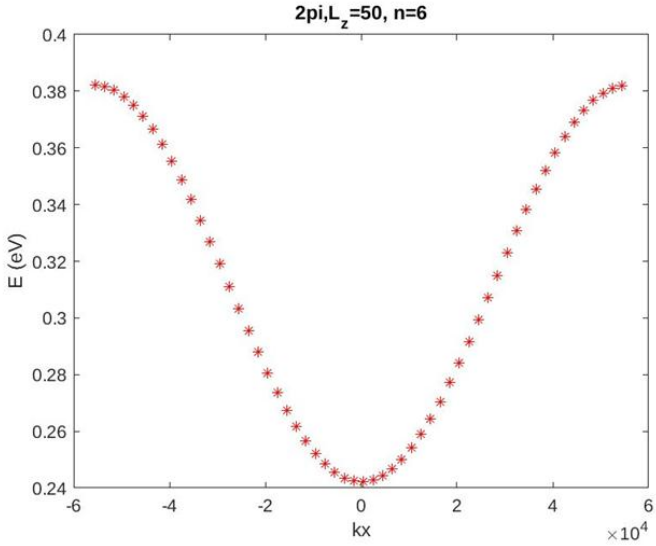
الشكل(٥) يمثل الطاقة بدلالة الحالات المدروسةn

نلاحظ من الشكل(5) ان الطاقة مكممة وليست مستمرة والمنحنيات المنفصلة تشير الى أنّ الطاقة تأخذ قيم محددة، نلاحظ تأثير n حيث ان كل منحى يمثل حالة كمومية مختلفة (نمط موجي مختلف) يحددها قيمة n وتغير هذه القيمة يؤدي الى تغير شكل المنحني ومستويات الطاقة.

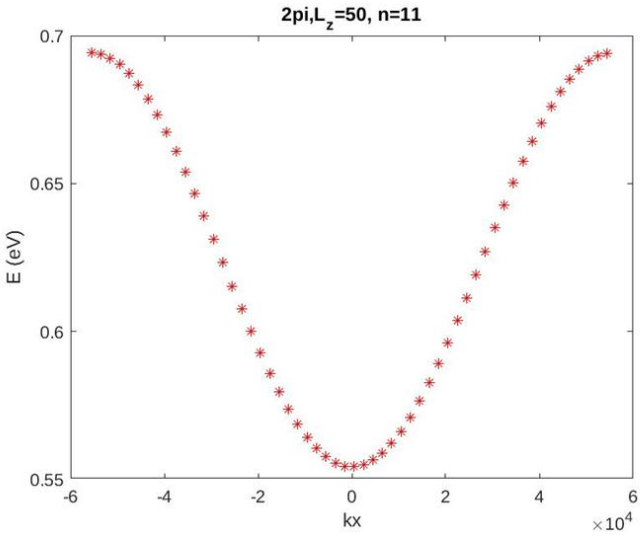
يبين الاشكال تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل قيم مختلفة ل n :



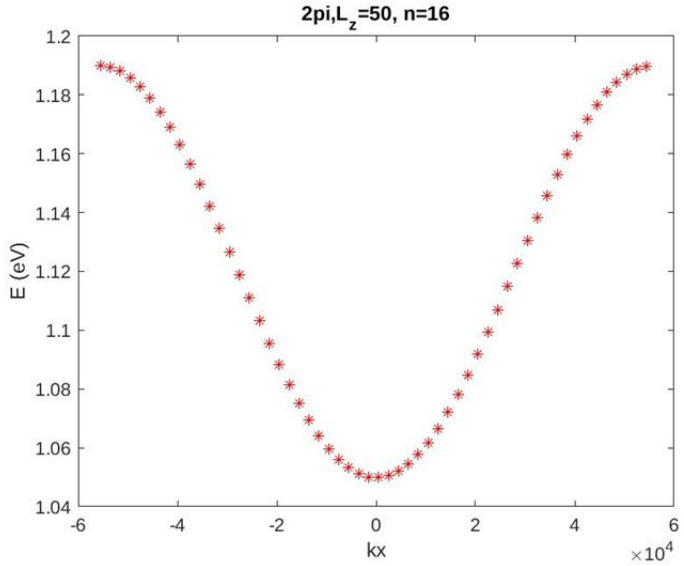
الشكل(6) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=1



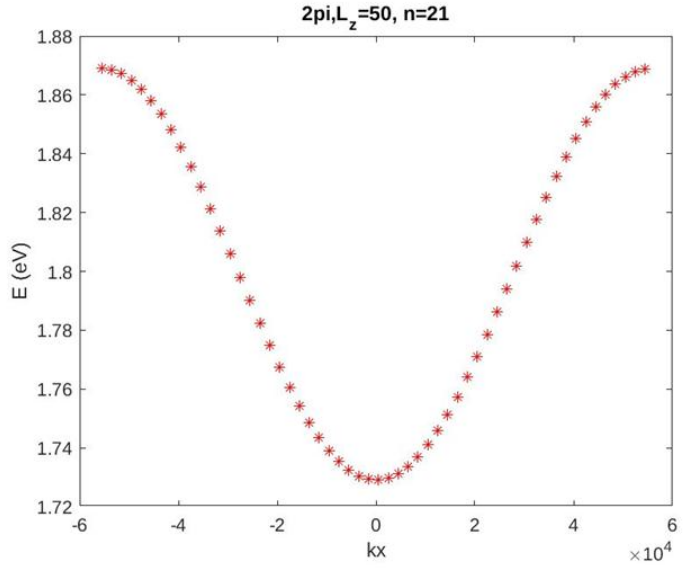
الشكل(7) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=6



الشكل(8) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=11



الشكل(9) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=16

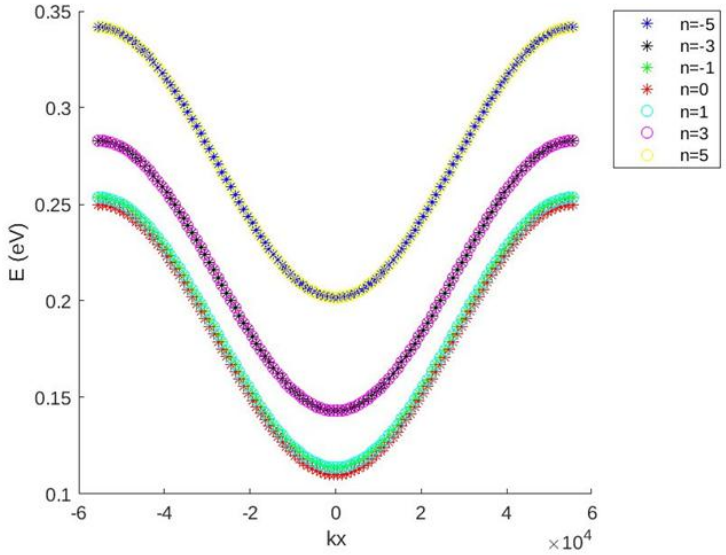


الشكل(10) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=21

تظهر المنحنيات السابقة على شكل قطع مكافئ مقلوب متماثل حول النقطة المركزية (نقطة الأصل) يبدأ عند قيمة عالية للطاقة من اجل قيمة سالبة كبيرة ل K_x ثم ينخفض تدريجيا ليصل الى اقل قيمة له عند $K_x = 0$ ثم يرتفع مرة أخرى بشكل متماثل مع زيادة K_x في الاتجاه الموجب، النقطة الدنيا تمثل اقل طاقة ممكنة للجسيم وهي الطاقة الصفرية ويعكس التماثل حول النقطة الأصل ان الطاقة لا تعتمد على اتجاه الحركة (موجب–سالب) بل على قيمها.

توضح الاشكال العلاقة بين الطاقة و K_x حيث تأخذ الطاقة قيمة عظمى في الحالتين من أجل K_x كبيرة و K_x صغيرة حيث تزداد الطاقة بشكل غير خطي والقيم المحددة للطاقة تتوافق مع مستويات الطاقة المسموح بها للجسيم في هذه الحالة الكمومية.

يوضح الشكل (١١) تأثير n على قيم الطاقة قمنا برسم المنحنيات البيانية لقيم الطاقة من اجل قيم مختلفة ل n:



الشكل(11) تغيرات الطاقة من اجل قيم مختلفة ل n

تُظهر الاشكال السابقة عدة منحنيات تأخذ كل منها حالة كمومية مختلفة للجسيم هذه المنحنيات تشبه القطع المكافئ المتماثل حول نقطة الأصل ولكنها تختلف في موقعها وارتفاعها، كل منحني يمثل مستوى طاقة مختلف للجسيم فالمنحنيات التي تقع اعلى تمثل مستويات طاقة اعلى، أما الفجوات وهي المسافات الرأسية بين المنحنيات تمثل الفجوات بين مستويات الطاقة هذه المسافات تظهر الطبيعية الكمية للطاقة حيث لا يمكن للجسيم ان يمتلك طاقة بين هذه المستويات.

النتائج والمناقشة:

١-نلاحظ من الشكل(٦) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=1 ان الخط البياني جيبي وقيم الطاقة ضمن المجال eV(٠.١-٠.٢٦) .

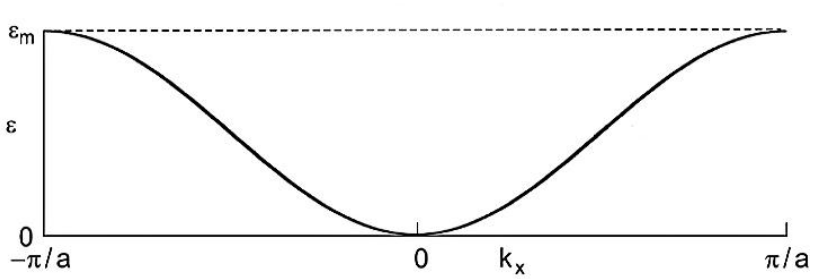
٢-نلاحظ من الشكل (٧) تغيرات الطاقة بدلالة K_x من اجل n=6 ان قيم الطاقة تزداد بازدياد قيمة n وتقع ضمن المجال eV(٠.٢٤-٠.٤).

٣-نلاحظ من الشكل (٨) و (٩) و (١٠) تزايد في قيم الطاقة مع تزايد قيمة n وذلك من اجل n=11 n=16 و n=21 قيمة الطاقة eV(0.55-١.٨٨).

٤-نلاحظ من الشكل (١١) تغيرات الطاقة من اجل قيم مختلفة ل n ونلاحظ انه مهما كانت قيمة n موجبة او سالبة فإن الطاقة تزداد والخط البياني جيبي.

الاستنتاجات:

أظهرت نتائج الدراسة البرمجية انه يمكننا استخدام المعادلتين (١) و (٢) لحساب الطاقة في شبيكة فائقة (Superlattice) وهي العلاقة الممثلة لتبادل الطاقة بين الالكترون والفوتون، حيث تمت المقارنة مع النتائج الموجودة في المرجع [7] ووجدنا ان الاختلاف لا يتجاوز ١٠% وهذا ما يوضحه الشكل (١٢) وهذه النتائج التي حصلنا عليها للطاقة تسمح بالحصول على اطوال موجية في المجال المطلوب وهو مجال THz.



الشكل(١٢) الوارد في المرجع [7]

التوصيات:

القيام بحسابات الطاقة المتبادلة بين الالكترون والفوتون في شبيكة فائقة Superlattice من GaAs/AlAs باستخدام Matelab وذلك بدراسة دور السماكة للطبقة الواحدة في الشبيكة الفائقة ودورها في تغيير قيمة الطاقة والطول الموجي.

المراجع:

١–د.ابراهيم كامل بلال، د.عاطف صالح الجندي. (٢٠٠٧). *فيزياء الليزر وتطبيقاته*. اللاذقية: سوريا. جامعة تشرين.

2–Miriam S. Vitiello, Alessandro Tredicucci. (2021). *Physics and Technology of Terahertz Quantum Cascade Lasers*, CNR Nanoscince Institute and Scuola Normale Superiore, pisa: Italy. Department of Physics.

3- Fox, Mark; Ispasoiu, Radu (2006), "*Quantum Wells, Superlattice, and Band-Gap Engineering",* Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Spring US, pp,1021-1040.

٤-Zh. I. (1963), Alferove and R.F. Kazarinov, *Authors Certificate 28448* (U.S.S.R).

٥-Calvin, R. King. (17 December 2005). *"Density of States 2D, 1D, and 0D*". Georgia Institute of Technology. ECE 6451.

٦–د.سهام طرابيشي، د.بيداء الأشقر، د.مصطفى صائم الدهر. (٢٠١٥). *الفيزياء الطبية*. دمشق: سوريا. جامعة دمشق.

7-Karl F Renek. (2012), *Basics of Laser Phys* . Springer.