

دراسة طاقة ارتباط البولارون في جملة مؤلفة من تماس ثلاث طبقات مختلفة

د.حسن عبد الكريم سليمان*

د. محمد حسن فاهود**

إيمان محمود إيبو***

تاريخ الإيداع 2022 /11 /24 – تاريخ النشر 2022 /2 / 12

□ ملخص □

ن في طبقة فوسفيد الأنديم (InP) على تماس من الجانبين مع وسطين مختلفين (عازل-معدن)، ودراسة تأثير أنزوتروبية العازلية الكهربائية للطبقات على طاقة البولارون في الطبقة الوسطى المدروسة. تبين أن طاقة ارتباط البولارون تنخفض بازدياد سماكة الطبقة ، كما تبين أن لظاهرة عدم التماثل للصفات الكهربائية باختلاف الاتجاهات (معامل أنزوتروبية العازلية الكهربائية) تأثير في طاقة البولارون ، حيث بلغت قيمة الطاقة 0.4eV من أجل معامل أنزوتروبية $\gamma = 0.1$ و 0.15V من أجل $\gamma = 0.3$.

الكلمات المفتاحية: البولارون السبيني ، البيزوبولارون ، الكمون الذاتي ، طاقة الحالة الأساسية.

*أستاذ في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة طرطوس، سوريا.

** أستاذ في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين، اللاذقية، سوريا.

*** طالبة ماجستير في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة طرطوس، سوريا.

Study The Polaron Binding Energy In A System Consisting Of Three Contact Different Layers

Dr.Hasan Abdelkariem Sliman*
Dr.Mohammad Hassan Fahoud**
Iman Mahmoud Eebo ***

(Received 24/11/2022.Accepted 12/2/2023)

□ABSTRACT □

This Scientific Work Contains Finding Energy Of Polaron In Indium Phosphide Layer On Both Sides With Two Different Layers (Insulator-Metal), And Studying The Effect Of Dielectric Anisotropy Of Layer On Polaron Energy In Thin Layer. It Is Found That The Polaron Binding Energy Decreases With Increasing Of Considered Layer Thickness ,It Is Also Found That The Phenomenon Asymmetry Of Electrical Properties In Different Directions (Dielectric Anisotropy) Had An Effect On The Energy Of The Polaron, Where The Value Of The Energy Reached 0.4eV For Dielectric Anisotropy $\gamma = 0.1$ And 0.15eV For $\gamma = 0.3$.

Keywords: Spin Polaron, Piezopolarone, Self- Action Potential, Base State Energy.

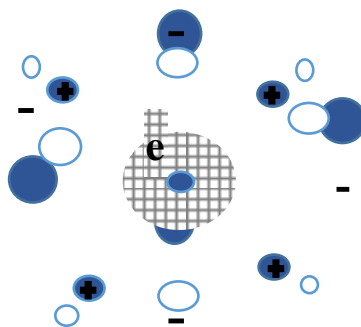
* Prof.at Physics Department - Faculty of Sciences, Tartous University, Syria.

**Prof.at Physics Department - Faculty of Sciences, Tishreen University-Lattakia, Syria.

***Master student at Physics Department - Faculty of Sciences, Tartous University, Syria.

مقدمة:

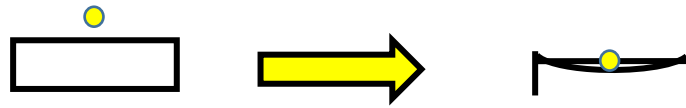
تُعد دراسة خصائص الأفلام الرقيقة من الموضوعات الهامة في فيزياء الحالة الصلبة، ونظراً للتقدم التكنولوجي للمجتمع المعاصر الذي يعتمد على العلوم التطبيقية، كان لابد من وجود تقنية الأفلام الرقيقة في العديد من التطبيقات، وذلك لإمكانية التحكم بخصائصها عن طريق بارامتر السماكة، وبارامترات أخرى. فقد استمر الجهد الهائل في دراسة الأبحاث المتعلقة بها وطورت للسماح بانتشارها في مجالات متعددة، منها الإلكترونية حيث استخدمت في الدارات المتكاملة والأقراص المدمجة، والخلايا الشمسية، وكان لها العديد من التطبيقات في برامج الدفاع والفضاء، حيث حجمها صغير، ووزنها خفيف أدت هذه المواصفات الهامة للأفلام الرقيقة إلى الانتشار الواسع لاستخدامها كنواقل ضوئية بينية للمعلومات، لاسيما طبقات التصوير الكهربائي إلى جانب استخداماتها المعروفة في دارات التحكم بكواشف البلورات السائلة على أساس الترانزستور الحثلي من النوع معدن-عازل-نصف ناقل وفي صناعة الخلايا الشمسية [1]، ودخلت في صناعة المرشحات البصرية، بما فيها تصميم مرآيا عاكسة وغير عاكسة [2]. تعتبر دراسة البولارون وخواصه مسألة هامة لفهم مجموعة كبيرة من المواد الصلبة، فقابلية حركة الإلكترونات في أنصاف النواقل يمكن أن تتناقص بشكل كبير بسبب تشكل البولارونات، وتعتبر أنصاف النواقل العضوية حساسة أيضاً للتأثيرات البولارونية والتي ترتبط بشكل خاص بتصميم الخلايا الشمسية [3]. فما هو البولارون؟ البلورة هي ترتيب دوري منتظم من النقاط في الفراغ مع مجموعة من الذرات المرتبطة بهذه النقاط. تتماسك الذرات مع بعضها البعض من خلال قوى كولون وهذه القوى هي المسؤولة عن الخصائص الميكانيكية للمادة الصلبة، حيث تحافظ على الشكل الخارجي للبلورات دون تغيير ولكن ليس هذا الحال داخل البلورة، فالذرات في درجة حرارة الغرفة ليست مستقرة، إذ تهتز حول مواضع توازنها مما يؤدي إلى اهتزاز الشبكة البلورية ومن ثم تشكل موجات مرنة صوتية (فونونات) [4]. تتفاعل الإلكترونات في البلورات مع اهتزازات الشبكة مما يؤدي إلى العديد من الظواهر المثيرة للاهتمام، كظاهرة تشكل البولارون. تحدث هذه الظاهرة على الشكل التالي: عندما يتحرك الإلكترون في بلورة أيونية، فإنه يستقطب الذرات ويحدث تشوهاً في الشبكة البلورية، تزداد سعة اهتزاز الذرات مما يعني تشكل غمامة من الفونونات ترتبط بالإلكترون. تشكل الحالة الكمومية لجملة الإلكترون مع غمامة الفونونات المستقطبة شبه جسيم جديد يسمى بولارون كما يوضح الشكل (1) [5].



الشكل (1): الكترون الناقلية يغير موضع توازن الأيونات والكاتيونات ويشكل منطقة استقطاب.

لكن أول من أثار مفهوم البولارون لاندوا (Landau) عام 1933 [6]، حيث صاغ مسألة البولارون في البداية كمسألة الكترون متموضع في بلورة أيونية، حيث يستقطب الإلكترون أيونات الشبكة البلورية وينتج عن هذا الاستقطاب نقص في طاقة الإلكترون وذلك بسبب ظهور حفرة كمون في مجال وجود الإلكترون كما يوضح الشكل (2).

في البلورات التساهمية مثل أنصاف نواقل المجموعة III-V أو VI يُفترض أن يتحرك الإلكترون في البلورة وينحرف بعيداً عن مساره نتيجة اصطدامه مع الفونونات، ولكن في حالة عدم وجود فونونات (في درجة الحرارة المنخفضة مثلاً) تهمل كل الإزاحات الأيونية في دراسة نقل الإلكترون وخواصه، ويكون التأثير البولاروني ضعيفاً لأن تفاعل الذرات المحايدة مع الإلكترونات يكون ضعيفاً. أما في البلورات الأيونية أو البلورات عالية القطبية مثل أنصاف النواقل المجموعة II-VI والهاليدات القلوية والأكاسيد وغيرها، يسبب الحقل الكولوني اقتراناً شديداً بين إلكترونات الناقلية و الفونونات، وفي هذه الحالة حتى بغياب فونونات حقيقية، فإن الإلكترون محاط دائماً بغمامة من الفونونات الوهمية (أي تتكون الرابطة القطبية في البلورة الأيونية من خلال التجاذب بين الإلكترونات والفونونات وبالتالي يتشكل بولارون حتى في درجة الحرارة المنخفضة واستقرار الذرات في الشبكة البلورية)[7].



الشكل (2): إلكترون يستقطب أيونات الشبكة البلورية ويشكل حفرة كمون في مكان وجوده يُحصر فيها.

يصنف البولارون تبعاً لحجمه (بولارون كبير، بولارون فروليخ (Frölich) وبولارون صغير، بولارون هولشتين (Holstein))، وتبعاً لتردد الفونونات المتفاعلة مع الإلكترونات إلى بولارونات صوتية (بيزوبولارون) وبولارونات ضوئية[8]. هناك أشباه جسيمات أخرى من النموذج البولاروني مثل البولارون السبيني (الإلكترون متفاعل مع العزوم المغناطيسية) والبولارون المقيد، والأكسيتون البولاروني والبولارون الثنائي وغيرها[5]. إذا كان نصف قطر البولارون أكبر بكثير من ثابت الشبكة البلورية، يسمى البولارون بالبولارون الكبير، أو بولارون فروليخ [6]. ولكن عندما يُحصر إلكترون أو ثقب بواسطة حقل الإزاحة الأيوني المستحث ذاتياً في منطقة بعدها من رتبة ثابت الشبكة، أو عندما يكون نصف قطر البولارون من رتبة ثابت الشبكة البلورية، يسمى البولارون بالبولارون الصغير أو بولارون هولشتين.

أهمية البحث وأهدافه:

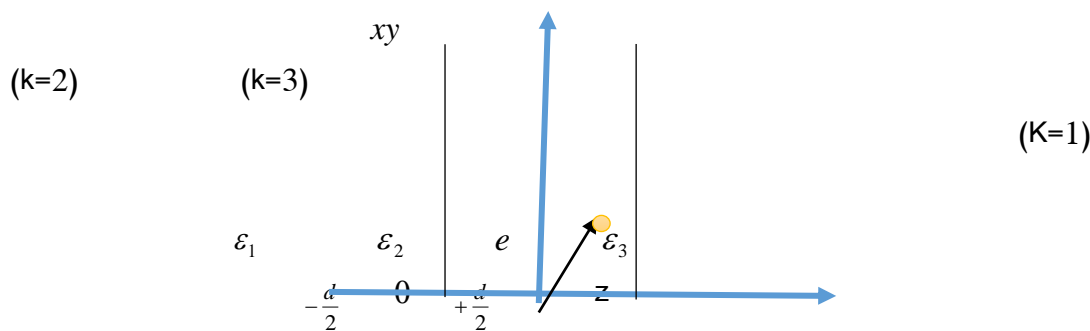
تكمُن أهمية البحث في حساب طيف طاقة البولارون في أفلام أنصاف النواقل الرقيقة، لدراسة بعض خصائصها، لأن الأفلام الرقيقة تُستخدم في صناعة الدارات الإلكترونية على نطاق واسع، ويهدف البحث إلى حساب طاقة البولارون في جملة مكونة من تماس ثلاث طبقات مختلفة، ودراسة تأثير سماكة الطبقة ومعامل أنزوتروبية العازلية الكهربائية لها على طاقة البولارون.

طرائق البحث ومواده:

لحساب طاقة البولارون نقوم بإيجاد علاقة الكمون الكوانتي للبولارون في طبقة رقيقة من خلال حل معادلة بواسون، ثم نطبق طريقة التغيرات (هي طريقة تقريب تُستخدم عندما يكون التابع الموجي غير معيّن بدقة ولكن يمكن تخمينه عن طريق إدخال معامل متغير) لحل معادلة شرودنغر.

الدراسة النظرية والتحليلية:

لندرس الآن جملة مكونة من ثلاث طبقات أنزوتروبية (نرمز لرقم الطبقة بالرمز k): $k=1,2,3$.
الطبقة الثانية مادة نصف ناقلة (فوسفيد الأنديوم InP) وهي الطبقة المدروسة وتشغل الحيز المحدد $-\frac{d}{2} \leq z \leq \frac{d}{2}$ ، ثابت العازلية للطبقة الأولى ($k=1$) هو ϵ_1 وللطبقة الثانية ($k=2$) ϵ_2 وللطبقة الثالثة ($k=3$) ϵ_3 .
نعتبر أن كل طبقة من الطبقات الثلاث تقع في المستوي xy وعمودي على المحور z .
نفرض أن سماكة الطبقة الأولى والثالثة لانهايتين في الصغر، ثم إن مبدأ الجملة الإحداثية يقع في مركز الطبقة الثانية المحصورة بين الطبقتين الأولى والثالثة كما في الشكل (3).



الشكل (3): رسم تخطيطي للجملة المدروسة.

تعطى معادلة شرودنغر للإلكترون في مستوى تماس نصف الناقل مع العازل بالعلاقة التالية [9]:

(1)

$$\frac{\hbar^2}{2m_z^*} \frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + [E - V(z)]\psi(z) = 0$$

حيث m_z^* مركبة الكتلة الفعالة للإلكترون وفق المحور z ، $V(z)$ الطاقة الكمونية للبولارون، $\psi(z)$ التابع الموجي للإلكترون، \hbar ثابت بلانك، E طاقة البولارون.

تتألف الطاقة الكمونية $V(z)$ لبولارون الإلكترون [9] في الجملة المدروسة من الحدود التالية:

$$V_t(z) = V_{sa}(z) + V_{ph}^{s_1}(z) + V_{ph}^{s_2}(z) + V_{ph}^v(z) \quad (2)$$

$V_{sa}(z)$ - كمون التأثير الذاتي، $V_{ph}^v(z)$ كمون التأثير المتبادل بين الإلكترونات والفونونات الحجمية .
 $V_{ph}^{s_1}(z), V_{ph}^{s_2}(z)$ - كمون تأثير تفاعل الإلكترون مع الفونونات الضوئية المتولدة على سطحي الطبقة المدروسة.

تم الحصول على كمون التأثير الذاتي في العمل [7] من حل معادلات مكسويل:

$$V_{sa}(z) = \frac{e^2}{y\epsilon_2 d} \int_0^\infty \frac{dx}{(e^{2x} - \delta_1 \delta_3)} \left\{ \delta_1 \delta_3 + e^x \frac{\epsilon_2^2 - \epsilon_1 \epsilon_3}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} \text{ch} \left(2x \frac{z}{d} \right) + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3)\epsilon_2}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} \text{sh} \left(2x \frac{z}{d} \right) \right\} \quad (3)$$

حيث $x = \gamma \frac{Qd}{2}$ ، Q المتجه الموجي للفونونات السطحية، d سماكة الطبقة الوسطى النصف ناقلة المدروسة.

$$\gamma = \left(\frac{\epsilon^\perp}{\epsilon^\parallel} \right)^{1/2}$$

معامل الأنزوتروبية للطبقات المدروسة في الجملة الثلاثية الطبقة، ثم إن:

$\varepsilon^{\perp} = \varepsilon^{xy} = \varepsilon^{xx}$ المركبة العمودية لثابت العازلية الكهربائية. $\varepsilon^{\parallel} = \varepsilon^{zz}$ المركبة الموازية لثابت العازلية الكهربائية،

$$\delta_3 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}, \quad \delta_1 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}$$

توجد أشكال مختلفة لكمون التأثير المتبادل بين الإلكترون و الفونونات الحجمية $V_{ph}^v(z)$ ، سنستخدم في هذا العمل العلاقة الآتية المستنتجة [10] من أجل حساب طاقة البولارون.

(4)

$$V_{ph}^v = \sum_{\vec{q}} c \left\{ \sum_{g=2,4,6,\dots} \frac{e^{i\vec{q}\cdot\vec{p}} \sin\left(\frac{g\pi}{d}z\right)}{[q^2 + \left(\frac{g\pi}{d}z\right)^2]^{\frac{1}{2}}} [a_{g^+}(\vec{q}) + a_{g^+}(-\vec{q})] + \sum_{g=1,3,5,\dots} \frac{e^{i\vec{q}\cdot\vec{p}} \cos\left(\frac{g\pi}{d}z\right)}{[q^2 + \left(\frac{g\pi}{d}z\right)^2]^{\frac{1}{2}}} [a_{g^-}(\vec{q}) + a_{g^-}(-\vec{q})] \right\}$$

$$\text{حيث: } |c|^2 = \frac{4\pi\alpha(\hbar\omega_{L0})}{vR_v}, \quad g: 1,2,3,4,5,\dots \text{ عدد يأخذ قيم}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} - \frac{1}{\varepsilon_0} \right) \left(\frac{m^*}{2\hbar\omega_{L0}} \right)^{1/2} \quad \alpha \text{ ثابت اقتران (إلكترون - فونون) ويساوي}$$

$$R_v \text{ نصف قطر البولارون الحجمي ويساوي } R_v = \left(\frac{2m^*\omega_v}{\hbar} \right)^{-1/2} \quad \omega_v, \text{ التردد الزاوي للفونونات}$$

الحجمية،

m^* الكتلة الفعالة للبولارون، ω_{L0} التردد الزاوي للفونونات الضوئية .

$\varepsilon_0, \varepsilon_{\infty}$ ثابتا العازلية الكهربائية الموافقة للترددات العالية والساكنة على الترتيب،

$\bar{a}_{g^+}, \bar{a}_{g^-}$ مؤثرات ولادة وفناء فونونات حجمية،

\vec{q} المتجه الموجي للفونون الحجمي،

\vec{p} متجه نصف قطر شعاعي للإلكترون.

تم الحصول على كمون تأثير تفاعل الإلكترون مع الفونونات الضوئية المتولدة على سطحي الطبقة

المدروسة باستخدام التقريب الأديباتي (تعتبر حركة الإلكترونات في اتجاه المحور z بطيئة).

$$V_{ph}^{S1}(z) = -\frac{2e^2}{yd} \int_0^{\infty} dx \left[\frac{1}{(\varepsilon_{\infty} + \varepsilon_2 \text{cthx})} - \frac{1}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_2 \text{cthx})} \right] \frac{ch^2\left(\frac{2z}{d}x\right)}{sh2x\left(1 + \frac{4R_s^2}{d^2}x^2\right)} \quad (5)$$

$$V_{ph}^{S2}(z) = -\frac{2e^2}{yd} \int_0^{\infty} dx \left[\frac{1}{(\varepsilon_{\infty} + \varepsilon_2 \text{thx})} - \frac{1}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_2 \text{thx})} \right] \frac{sh^2\left(\frac{2z}{d}x\right)}{sh2x\left(1 + \frac{4R_s^2}{d^2}x^2\right)}$$

(6)

$$R_s = \left(\frac{\hbar}{2m^*\omega_s} \right)^{1/2} \quad R_s \text{ نصف قطر البولارون السطحي ويساوي}$$

نحصل بتعويض العلاقات (3-6) في العلاقة (2) على الطاقة الكمونية الكلية للبولارون.

وبمعرفة شكل التابع الموجي يمكننا حساب طاقة البولارون من أجل الكمون الكلي كما يلي:

$$E = \langle \psi(z) | V_t(z) | \psi(z) \rangle$$

(7)

غير أن حل معادلة شرودنغر من أجل الكمون $V_{sa}(z)$ غير ممكن تحليلياً بسبب تعقيد الكمون، لذلك يجب استخدام طرق تقريب كطريقة التغيرات للحصول على طاقة الحالة الأساسية للبولارون. بعد اختيار التابع الموجي أساس طريقة التقريب هذه، ويُعطى في طبقة رقيقة بالشكل التالي:

$$\psi(z) = \sqrt{\frac{2}{d}} \cos\left(\frac{\pi z}{d} n\right)$$

$$n = 1, 2, 3 \quad (8)$$

بتعويض الكمون الكلي في العلاقة (7) نجد:

$$\begin{aligned} E &= \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \psi^*(z) V_t(z) \psi(z) dz = \\ &= \frac{2e^2}{y\epsilon_2 d^2} \int_0^\infty \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{dx dz}{(e^{2x} - \delta_1 \delta_3)} \left\{ \delta_1 \delta_3 \cos^2\left(\pi \frac{z}{d}\right) \right. \\ &\quad \left. + \cos^2\left(\pi \frac{z}{d}\right) e^x \left[\frac{\epsilon_2^2 - \epsilon_1 \epsilon_3}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} \operatorname{ch}\left(2x \frac{z}{d}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3)\epsilon_2}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} \operatorname{sh}\left(2x \frac{z}{d}\right) \right] \right\} \\ &- \frac{4e^2}{2yd^2} \int_0^\infty \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dx dz \left[\frac{1}{(\epsilon_\infty + \epsilon_2 \operatorname{cthx})} - \frac{1}{(\epsilon_0 + \epsilon_2 \operatorname{cthx})} \right] \frac{\cos^2\left(\pi \frac{z}{d}\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{2z}{d} x\right)}{\operatorname{sh} 2x \left(1 + \frac{4R_s^2}{d^2} x^2\right)} \\ &+ \int_0^\infty \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dx dz \left[\frac{1}{(\epsilon_\infty + \epsilon_2 \operatorname{thx})} - \frac{1}{(\epsilon_0 + \epsilon_2 \operatorname{thx})} \right] \frac{\cos^2\left(\pi \frac{z}{d}\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{2z}{d} x\right)}{\operatorname{sh} 2x \left(1 + \frac{4R_s^2}{d^2} x^2\right)} \\ &- \frac{e^2}{\gamma d^2} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty - \epsilon_0} \right) \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dz \cos^2\left(\pi \frac{z}{d}\right) \left[\sum_{g=1,3,5,\dots} \cos^2\left(\frac{g\pi}{d} z\right) \right] \int_0^\infty \frac{du}{\left[\gamma^2 u + \left(\frac{g\pi}{d}\right)^2\right] \left[1 + R_v^2 \left(\gamma^2 u + \left(\frac{g\pi}{d}\right)^2\right)\right]} \\ &+ \sum_{g=2,4,6,\dots} \sin^2\left(\frac{g\pi}{d} z\right) \int_0^\infty \frac{du}{\left[\gamma^2 u + \left(\frac{g\pi}{d}\right)^2\right] \left[1 + R_v^2 \left(\gamma^2 u + \left(\frac{g\pi}{d}\right)^2\right)\right]} \end{aligned} \quad (9)$$

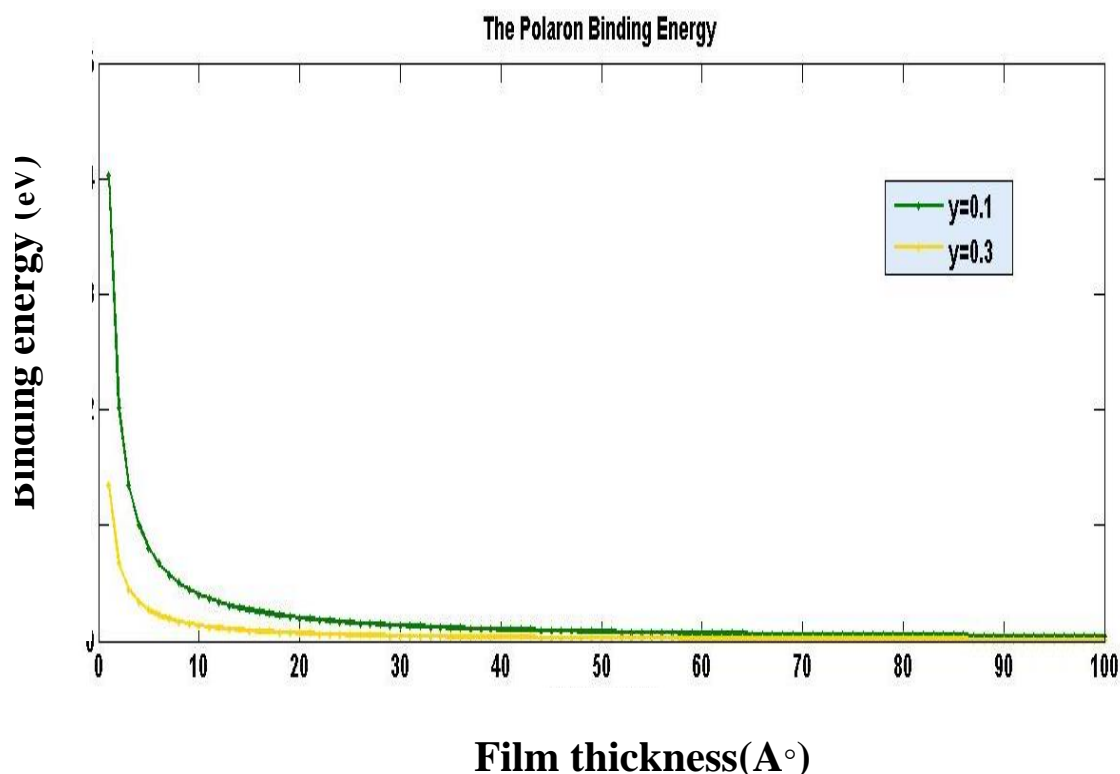
حيث $u = q^2$

بإجراء الحساب في العلاقة السابقة نحصل على طاقة البولارون في طبقة رقيقة:

$$\begin{aligned}
E = & \frac{e^2}{4\gamma\epsilon_0 d} \int_0^\infty \frac{dx}{(e^{2x} - \delta_1 \delta_3)} \{ \delta_1 \delta_3 + e^x [\frac{\epsilon_2^2 - \epsilon_1 \epsilon_3}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} (\frac{\pi^2 - x^2}{x^3 + \pi^2 x}) sh(x) + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3)\epsilon_2}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 + \epsilon_3)} (\frac{-\pi^2 - x^2}{x^3 + \pi^2 x}) ch \} \\
& - \frac{e^2}{4\gamma d} \{ \int_0^\infty dx [\frac{1}{\epsilon_\infty + \epsilon_2 cthx} - \frac{1}{\epsilon_0 + \epsilon_2 cthx}] \frac{(1 + \frac{\pi^2 - 4x^2}{4x^3 + x\pi^2}) sh(2x)}{(1 + \frac{4R_s^2}{d^2} x^2) sh(2x)} \\
& + \int_0^\infty dx [\frac{1}{\epsilon_\infty + \epsilon_2 thx} - \frac{1}{\epsilon_\infty + \epsilon_0 thx}] \frac{-1 + \frac{\pi^2 - 4x^2}{4x^3 + x\pi^2} sh(2x)}{(1 + \frac{4R_s^2}{d^2} x^2) sh(2x)} \} \\
& - \frac{e^2 dm^* \omega_v}{\hbar} (\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0}) \{ \frac{8}{\pi^2} \sum_{g=1,2,3,\dots} \{ \frac{1}{4(g-1)g + \frac{d^2}{\pi^2 R_v^2}} \} \\
& \quad [\frac{1}{4g^2 - 1} - \frac{1}{4(1-g)^2 - 1}]^2 \ln [\frac{(2g-1)^2}{d^2}] \\
& \quad [\frac{1}{4(g+1)^2 - 1} - \frac{1}{4(g-1)^2 - 1}]^2 \ln [\frac{4g^2}{3 + \frac{d^2}{\pi^2 R_v^2}}] \\
& + \frac{1}{[4(g^2 - 1) + 1 - \frac{d^2}{\pi^2 R_v^2}] } \} \} \tag{10}
\end{aligned}$$

النتائج والمناقشة:

تم في هذا العمل دراسة البولارون في طبقة بلورية رقيقة في جملة مؤلفة من تماس ثلاث طبقات مختلفة (معدن، نصف ناقل، عازل) ، وقد تم استخدام الطريقة الأديباتية أي عندما تكون حركة الإلكترون بطيئة في اتجاه المحور Z العمودي على مستوى الطبقة المدروسة (InP). ثم قمنا بوضع برنامج حاسوبي (Matlap) لتغير طاقة البولارون بدلالة سماكة الطبقة، ومن أجل قيم متغيرة لمعامل الأنزوتروبية العازلية، وتبين أن طاقة البولارون تنخفض مع ازدياد السماكة، يفسر ذلك بأنه كلما زادت سماكة الطبقة زاد عدد الشحنات وبالتالي زيادة ظاهرة الحجب حول الجسيم المدروس، كما تبين أن لظاهرة عدم التماثل للصفات الكهربائية باختلاف الاتجاهات (معامل أنزوتروبية العازلية الكهربائية) تأثير في طاقة البولارون، حيث بلغت أعلى قيمة للطاقة عند أقل قيمة ممكنة للسماكة 0.4eV من أجل معامل أنزوتروبية 0.1 γ وأعلى قيمة للطاقة 0.14eV من أجل $\gamma = 0.3$. يوضح الشكل (4) طاقة ارتباط البولارون في طبقة فوسفيد الأنديوم (InP) على ركيزة معدن.

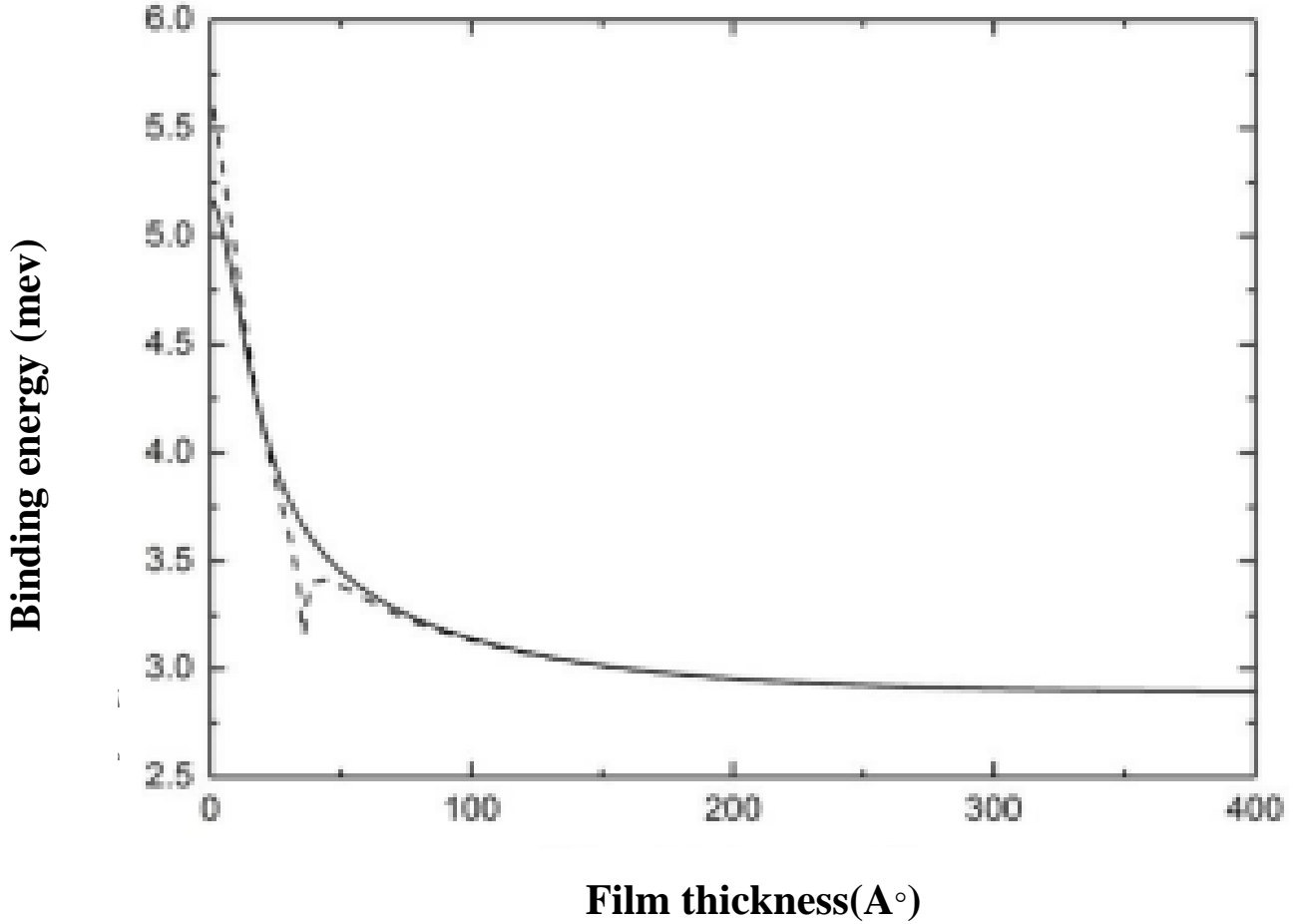


الشكل(4): طاقة ارتباط البولارون في طبقة InP على ركيزة معدن (k_1 خلاء، k_2 طبقة InP، k_3 طبقة معدن) من أجل قيم متغيرة لمعامل الأنزوتروبية γ .

$$\text{حيث: } \epsilon_3 = \infty \quad ; \quad \epsilon_2 = 12.6 \quad ; \quad \epsilon_1 = 1$$

إنّ الشكل (4) ينتهي إلى الصفر عند سماكة أكثر من 100\AA ، لذلك أخذ المحور فقط لسماكة 100\AA ، رُسم باستخدام برنامج الماتلاب وعبر عن العلاقة (10)، وهو نتيجة هذا العمل.

وبمقارنة نتائج هذه الدراسة مع دراسة سابقة قام بها كل من Zhenhua ، Lei Chen And Qiang Tian من أجل طبقة زرنيخ الغاليوم (GaAs) المتوسطة على ركيزة $Al_xGa_{1-x}As$ باستخدام طريقة تقريب الأبعاد الكسرية وباستخدام طول تصحيحي للحبس تبيّن أن طاقة ارتباط البولارون وانزياح الكتلة يتناقصان بشكل رتيب مع زيادة سماكة الفلم [11]. تبدأ طاقة ربط البولارون من القيمة 5.17meV وتتخفض مع زيادة سماكة الطبقة فمن أجل سماكة أقل من 20\AA تقل الطاقة بسرعة ومع زيادة سماكة الطبقة تتخفض بشكل أبطأ ، بمقارنة النتائج الحالية باستخدام طول تصحيحي للحبس (الخط المستمر) بالحسابات الكسرية ذات الأبعاد الأصلية (الخط المتقطع) نرى طاقة البولارون تقفز عند سماكة الطبقة 36\AA . يعرض الشكل(5) طاقة ارتباط البولارون بتابعية سماكة الفلم (GaAs) المترسبة على ركيزة $Al_xGa_{1-x}As$.



الشكل (5): طاقة ارتباط البولارون بتابعة سماكة الفلم (GaAs) المترسبة على ركيزة $Al_xGa_{1-x}As$ ،

المنحنيات الصلبة تتوافق مع النتائج الحالية باستخدام طول تصحيحي للحبس والخط المتقطع للحسابات الكسرية ذات الأبعاد الأصلية [11].

من خلال الدراسة السابقة تم الحصول على النتائج التالية:

• تعيين طاقة ارتباط البولارون في طبقة فوسفيد الأنديوم InP على تماس من الجانبين مع وسطين مختلفين وذلك بحل معادلة شرودنغر باستخدام طريقة التغير في مجال طاقي يتراوح بين $[0.01\text{eV}-0.4\text{eV}]$.

• إجراء مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث من أجل طبقة فوسفيد الأنديوم وتلك النتائج التي تم الحصول عليها من خلال دراسة سابقة من أجل طبقة زرنيخ الغاليوم (GaAs).

الاستنتاجات والتوصيات:

- يعتبر هذا العمل خطوة هامة جداً في دراسة الأفلام الرقيقة وخاصة لدراسة طيف طاقة البولارون ويتميز بإظهار دور معامل انزوتروبية العازلية الكهربائية للطبقات، حيث بزيادة معامل أنزوتروبية العازلية الكهربائية γ من 0.1 إلى 0.3 تناقصت طاقة البولارون بمقدار 0.25eV .

- تبين العلاقة (10) أن طاقة البولارون تتعلق بكل من سماكة الطبقة ومعامل انزوتروبية العازلية الكهربائية، حيث نلاحظ أن طاقة ارتباط البولارون تنخفض بشكل رتيب بازدياد سماكة الطبقة المدروسة، فعند

سماكة أقل من $8A^\circ$ تتناقص الطاقة بسرعة، أما عند سماكة أكثر من ذلك تتناقص الطاقة بشكل أبطأ بسبب زيادة ظاهرة الحجب للجسيم المدروس.

- لوحظ في الشكل (5) أنّ طاقة ربط البولارون تبدأ من القيمة 5.17meV وتتخفض مع زيادة سماكة الطبقة فمن أجل سماكة أقل من $20A^\circ$ نقل الطاقة بسرعة ومع زيادة سماكة الطبقة تنخفض بشكل أبطأ، بمقارنة النتائج الحالية (الخط المستمر) بالحسابات الكسرية ذات الأبعاد الأصلية (الخط المتقطع) نرى طاقة البولارون تقفز عند سماكة الطبقة $36A^\circ$. تختلف طاقة ربط البولارون باستخدام الطول المحدد الجديد للحبس تماماً عن حسابات الأبعاد الكسرية الأصلية وذلك بسبب بنية الفلم GaAs الموضّع على ركيزة $Al_xGa_{1-x}As$.

- يمكن وضع برنامج حاسوبي من أجل رسم الكمون السطحي والكمون الحجمي بدلالة سماكة الطبقة، ومن ثم توضيح دور كل من طاقة الارتباط السطحية والحجمية على حدة.

References:

- [1] حسن سليمان، دراسة الخصائص الكهروضوئية للسيلكون المهذرج غير المتبلور وإمكانية استخدامه في طبقات التصوير الكهربائي، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، المجلد (30)، العدد (3)، 2008.
- [2] حسن سليمان، محمد فاهود، هيفاء يونس، "دراسة تأثير طاقة الكمون الذاتي لحاملة الشحنة على عرض القطاع المحظور في طبقة تيلوريد الكاديوم (CdTe)"، مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية، المجلد (5)، العدد (5)، (2021).
- [3] C. Kittel, (*Introduction to Solid State Physics-7th ed*), John Wiley & Sons, New York, (1996).
- [4] Landau L.D. and Lifshitz E.M., *Quantum Mechanics, Oxford :pergoma*, (1965).
- [5] D. Emin, POLARONS, *United States of America by Cambridge University Press*, New York, (2013).
- [6] J.T. Devreese, "Polarons", *In Digital Encyclopedia Of Applied Physics*, Edited (Wiley, Online, 2008). Article Also Available At Cond-Mat/0004497v2. By G. L. Trigg
- [7] Fahoud. M., *Coulomb Potential Of Electron And Holes (Exciton) In Thin Films And The Effect Of Anisotropic Coefficient Of Dielectric Constant*. Tishreen University Journal, (2011).
- [8] Saqqa B., *The Optical Polaron In Quantum-Well-Type Systems*, The Islamic University Of Gaza, (2007).
- [9] فاهود. محمد، ظاهرة الاستقطاب في تراكيب معدن-عازل- نصف ناقل، مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، المجلد (36) العدد (1)، (2014).
- [10] Licary J. And Evrard R. *Electron-Phonon Interaction In A Dielectric Slab: Effect Of The Electronic Polarizability*. Phs. Rev. B, (1977), V.15, N 4, P.2254 – 2264.
- [11] Zhenhua Wa, Lei Chen And Qiang Tian, *Polaron Effect Influenced By Thicknesses Of Gaas Film And $Al_xGa_{1-x}As$ Substrate*, Journal Of Physics, (2018)