

هاملتون التأثير المتبادل إلكترون - فونون في طبقة بلورية قطبية على تماس من الجانبين مع وسطين غير قطبيين

الدكتور محي الدين نظام*

(تاريخ الإيداع 12 / 2 / 2018. قِيلَ للنشر في 20 / 3 / 2018)

□ ملخص □

يتضمن هذا البحث دراسة نظرية لظواهر اهتزاز الإلكترون في الجمل متعددة الطبقات المستخدمة بشكلٍ واسع في الصناعات الالكترونية وفي صناعة الخلايا الشمسية، ويدرس بشكلٍ أساسي حالة الاهتزاز الاستقطابي للبلازما الالكترونية للشبكة، وكذلك الاهتزاز الاستقطابي السطحي والحجمي للشحنات. ومن ثم استنتاج هاملتون تأثير إلكترون-فونون، ويمكن بعد ذلك التطرق إلى مناقشة تفصيلية لحالة البولارون عند حدود طبقات بلورية رقيقة لأنصاف نواقل مستقطبة، ثم دراسة حالة الاكستونات مع الأخذ بعين الاعتبار التأثيرات الكوانتية في الجمل متعددة الطبقات بوجود الحفر الكمونية، كما يشمل البحث دراسة عمليات تشتت الضوء في هذه الجمل وفي أنصاف النواقل.

الكلمات المفتاحية الاستقطاب الأيوني، بولارون، بولارون سطحي، بولارون حجمي، إثارات سطحية.

* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Hamilton mutual influence electron-phonon in a polar crystalline layer in contact with two layers non polar

Dr. Mohey-Aldin NIZAM*

(Received 12 / 2 / 2018. Accepted 20 / 3 /2018)

□ ABSTRACT □

This Article includes theoretical phenomena to oscillation of electron in malty layers systems used in deferent electronic industry and various solar cells. Also it looks in particular to situation of polar oscillation of lattice electron plasma, and charge oscillation of volume and surface. Then detect Hamilton operator of electron-phonon effect. After that we may discuss in detail the situation of Polaron at the edge of thin crystal layer of polarized semiconductors, as well as study of Excitons and its quantum effects in malty systems in case of potential wells. It also include the light scattering in this systems and semiconductor.

Key Words: Ionic Polarization, Polaron, Surface Polaron, Volume Polaron, Surface Exciting.

* Associate prof. in the Department of physics-faculty science in Tishreen university-Lattakia-Syria

مقدمة

لمعرفة قيمة إزاحة قعر منطقة الناقلية (سقف منطقة التكافؤ)، وعلاقة ذلك بكلٍ من سماكة الطبقة وثابت العازلية الكهربائية لطبقة رقيقة، لابد من دراسة الطيف الاكستوني، وكذلك وضع سوية الطاقة للحالة الأساسية للبولارونات في طبقة قطبية رقيقة وذلك من إزاحة قعر منطقة الناقلية (نتيجة ظاهرة التأثير الذاتي)، هذا وقد تم التوصل في [1] إلى حساب قيمة طاقة الإزاحة ΔE_{SA}^{ph} . ويكون تغير عرض المنطقة المحظورة نتيجة طاقة الكمون الذاتي اللاعطالي ($\Delta E_{SA}^{p\ell}$) والاعطالي (ΔE_{SA}^{ph}) مساوياً إلى:

$$E_g - E_{g_0} = (\Delta E_{SA}^{p\ell} + \Delta E_{SA}^{ph}) + \Delta E \quad (1)$$

حيث: E_g فجوة الطاقة لنصف الناقل عند درجة الحرارة T . E_{g_0} طاقة عرض القطاع المحظور في طبقة سميكة.

حيث (ΔE_{SA}^{ph}) و ($\Delta E_{SA}^{p\ell}$) هما على الترتيب قيمة الإزاحة الناتجة عن الاهتزاز العطالي واللاعطالي. وجد حسب العلاقة (1) أنه عندما: $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_{1,3}$ و $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2 \ll \varepsilon_3$ ، فإن عرض المنطقة المحظورة ينقص.

وعندما تكون $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_{1,3}$ فإن الإلكترون ينحصر على إحدى الطبقتين السطحيتين للطبقة الوسطى. وعندما تكون $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2 \ll \varepsilon_3$ فإن الإلكترون ينحصر عند الحد الفاصل بين الطبقة المدروسة (الوسطى) والوسط اللاستقطابي الذي له ثابت عازلية كهربائية ε_3 ، وعندما $\varepsilon_2 > \varepsilon_{1,3}$ فإن الإلكترون ينحصر في مركز الطبقة (بسبب تأثير التدافع من القوى الحدودية، الأمر الذي يؤدي إلى أن سطحي الطبقة مع الطبقتين تصبح فقيرة بالشحنات). عندما تكون d سماكة الطبقة من رتبة نصف قطر البولارون $R_{p\ell}$ حيث $R_{p\ell}^{e,h} = \left(\frac{\hbar}{2m^* \omega_{p\ell}}\right)^{\frac{1}{2}}$ نصف قطر البولارون، فإن التفاعل بين الإلكترون مع الفونونات السطحية يكون قوي.

بما أن ترددات الاهتزاز البلازمي $\omega_{p\ell}$ أكبر بكثير من ω_0 (تردد الفونونات الضوئية)، فإن طاقة ارتباط البولارون المحسوبة من إزاحة قعر منطقة الناقلية أقل بكثير من هذه الإزاحة ($\Delta E_{SA}^{ph} \ll \Delta E_{SA}^{p\ell}$). لذلك فإنه يمكن حل مسألة تأثير إلكترون-فونون على مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى استنتاج كمون إلكترون-بلازمون (كمون التأثير الذاتي)، الذي يدخل في هاملتون تأثير حاملة شحنة مع الاهتزاز الضوئي للجملة (المرحلة الثانية لحل المسألة). وتُعتبر دراسة تفاعل إلكترون-فونون هامة ليس فقط تبعثر الفونونات وإنما لمساهمة ذلك في تشكيل أزواج كوبر (Cooper pairs)، حيث يُعتبر هذا التفاعل سبب الناقلية الفائقة [2].

تولد الإلكترونات في البلورات القطبية حول نفسها استقطاب متوضع لأيون الشبكة، فإذا كانت أبعاد هذا الاستقطاب كبيرة كفايةً، فإنه طبقاً لبيكار يمكن دراسة البلورة كوسط مستمر [3,2]. هذا وقد تم الحصول على مؤثر هاملتون للبولارون في صيغة التكميم الثاني بالشكل [2].

$$H = -\frac{\hbar \nabla^2}{2m} + \sum_k \hbar \omega_k^0 a_k^+ a_k + \sum_k v_k (a_k e^{i\vec{k}\vec{r}} + a_k^+ e^{-i\vec{k}\vec{r}}) \quad (2)$$

حيث a_k ، a_k^+ مؤثرات حقل الفونون (البناء والهدم)، m الكتلة الفعالة للإلكترون، ω_k^0 تردد الفونونات البصرية الطولية، ويُعطى التابع v_k بالصيغة:

$$v_k = \frac{\hbar \omega_k^0}{k} \alpha \left(\frac{4\pi}{uL^3}\right)^{1/2}, \quad u = \sqrt{\frac{2m\omega_k^0}{\hbar}} \quad (3)$$

حيث α ثابت ترابط إلكترون-فونون، ويُعطى بالصيغة:

$$\alpha^2 = \frac{e^2}{2\hbar\omega_k} u \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{\epsilon} \right) \quad (4)$$

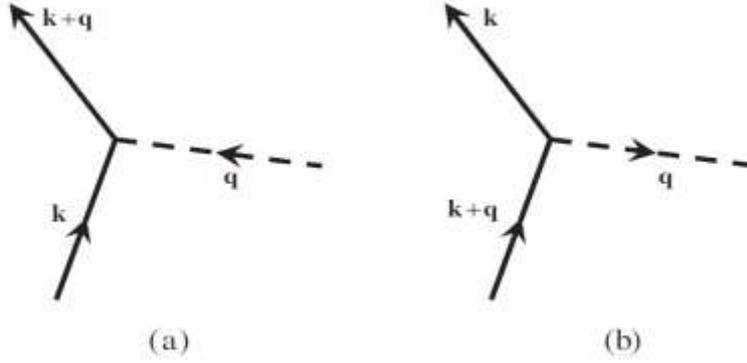
حيث ϵ ثابت العازلية الكهربائية الساكنة، n قرينة انكسار الضوء. وقد استُعملت طريقة التغاير لتعيين طاقة البولارون (تفاعل إلكترون مع اهتزاز شبكة قطبية) من جميع قيم ثابت الترابط α [4]. وقد اقترح فروليخ (Froehlich) هاملتون تفاعل مناسب في مسائل الناقلية والناقلية الفائقة [5,6]. وقد تم التوصل إلى أن الهاملتون الكمي والحالات الكمية للهزاز التوافقي (البولارون) يمكن التعبير عنها بدلالة مؤثرات التكميم الثاني بالصيغة التالية:

$$H = \frac{1}{2} \hbar\omega (a^+ a + a a^+) = \hbar\omega \left(a^+ a + \frac{1}{2} \right) \equiv \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

بالعودة إلى حالة الأنماط الطبيعية (العمودية) لاهتزاز الشبكة، حيث أن كل نمط طبيعي يوافق هزاز توافقي يوصف بواسطة (\vec{q}, ω_q) ، مع العلم أنه يمكن التعبير عن الإزاحة u_q بالصيغة:

$$u_q = \left(\frac{\hbar}{2\omega_q} \right)^{\frac{1}{2}} (a_q - a_q^+) \quad (6)$$

وقد تم توضيح عملية التفاعل بواسطة مخططات فاينمان [7,8] كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1) تمثيل مخططات فاينمان (a) حالة امتصاص فونون (b) انبعاث فونون

بواسطة تبادل فونون، فإنه يمكن لزوج من الإلكترونات أن تتجاذب عند شروط معينة، وقد تم معالجة هذه الظاهرة باستخدام طريقة اضطراب مجموعة من الجسيمات [9,10].

أهمية البحث وأهدافه

تُعتبر دراسة آلية تفاعل إلكترون- فونون (اهتزاز الشبكة) هامةً ليس فقط في توليد تبعثر الفونون، وإنما في تشكيل أزواج كوبر أيضاً، كما أن هذا التفاعل يسبب في الواقع الناقلية الفائقة، كما أن تبادل فونون يمكن أن يولد تجاذب بين زوج من الإلكترونات.

طرائق البحث ومواده

تستخدم الطريقة المطورة من قبل ليكاري وإفارد (Licary and Evrard) [11]. لاستنتاج هاملتون تأثير إلكترون-فونون اعتمدت هذه الطريقة بتقريب على تجزئة الاهتزاز إلى اهتزازات سطحية واهتزازات حجمية، وقد حل بريكسين وفيرسوف (Breksen and Fercov) هذه المسألة بشكلٍ دقيق من أجل طبقة على تماس من الجانبين

خلاء. هذا وتوجد صيغ مختلفة لهاملتون التأثير المتبادل للإلكترون مع الفونونات الحجمية H_{int}^v ، غير أن نتيجة حساب طاقة الارتباط على هذه الصيغ المختلفة لهاملتونيان لا تختلف كثيراً. سنستخدم في هذا العمل صيغة H_{int}^v المستنتجة في العمل [11].

$$H_{\text{int}}^v = \sum_{\vec{q}_n} C \left\{ \sum_{m=2,4,6,\dots} \frac{e^{i \vec{q}_n \vec{\rho}} \sin\left(\frac{m\pi}{d} z\right)}{\left[q_n^2 + \left(\frac{m\pi}{d} z\right)^2\right]^{1/2}} \left[a_{m^+}(\vec{q}_n) + a_{m^+}(-\vec{q}_n) \right] + \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{e^{i \vec{q}_n \vec{\rho}} \cos\left(\frac{m\pi}{d} z\right)}{\left[q_n^2 + \left(\frac{m\pi}{d} z\right)^2\right]^{1/2}} \left[a_{m^-}(\vec{q}_n) + a_{m^-}(-\vec{q}_n) \right] \right\} \quad (7)$$

حيث:

$$|C|^2 = \frac{4\pi\alpha(\hbar\omega_0)^2}{V\beta_0} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \left(\frac{m^*}{2\hbar\omega_0} \right)^{1/2}, \quad \beta_0 = \left(\frac{2m^*\omega_0}{\hbar} \right)^{1/2} \quad (9)$$

أحجمي، $\vec{\rho}$ متجه نصف قطر يُعين الإلكترون في المستوي xy . تم الحصول على الهاملتونيان (7) من أجل طبقة بلورية قطبية سماكتها d .

هاملتون التأثير المتبادل بين الإلكترون مع الاهتزازات السطحية

ننطلق من معادلات مكسويل في الكهراء الساكنة لاستنتاج هاملتون التأثير المتبادل بين الإلكترون مع

الاهتزازات السطحية:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= 0 \\ \text{div } \vec{D} &= 0 \\ \vec{D} &= \epsilon(\omega) \vec{E} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} \\ \vec{E} &= -\text{grad } \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

حيث \vec{E} , \vec{D} , \vec{P} متجهات: الحقل الكهربائي، التحريض الكهربائي، والاستقطاب الكهربائي على الترتيب.

و $\epsilon(\omega)$ تابع العازلية الكهربائية [12].

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{T_0}^2}} \quad (11)$$

حيث ε_0 ثابت العازلية الكهربائية الساكنة ($\omega \rightarrow \infty$)، ε_∞ ثابت العازلية الكهربائية (ثابت العازلية الكهربائية اللاعطالية للطبقة البلورية المستقطبة)، ω_{T_0} التردد العرضي للاهتزازات الضوئية. سنعتبر في دراستنا اللاحقة أن ثابتة العازلية الكهربائية للأوساط غير المستقطبة لها نفس القيمة ($\varepsilon_1 = \varepsilon_3 \equiv \varepsilon$).

تتعين الشروط الحدودية بالمعادلات الآتية:

$$z = -\frac{d}{2} \quad \text{عندما} \quad D_{n_1} = D_{n_2}, \quad \varphi_{n_1} = \varphi_{n_2} \quad (12)$$

$$z = \frac{d}{2} \quad \text{عندما} \quad D_{n_2} = D_{n_3}, \quad \varphi_{n_2} = \varphi_{n_3} \quad (13)$$

يمكن كتابة المعادلة الثانية في (10) بدلالة الكون بالصيغة التالية:

$$\varepsilon_k(\omega) \Delta \varphi_k = 0, \quad k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

سنبحث عن حل للمعادلة (14) من الشكل:

$$\varphi_k(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{q}_{//}} \varphi_{\vec{q}_{//}, k}(z) e^{i \vec{q}_{//} \cdot \vec{p}} \cdot e^{i \omega t} \quad (15)$$

للحصول على الكون نعوض (15) في (14)، نحصل على المعادلة التالية:

$$\varepsilon_k(\omega) \left[\frac{d^2 \varphi_{\vec{q}_{//}, k}(z)}{dz^2} - q_{//}^2 \varphi_{\vec{q}_{//}, k}(z) \right] = 0 \quad (16)$$

يوجد احتمالان لحل المعادلة (16) من أجل الطبقة الثانية ($k=2$):

أولاً: من أجل $\varepsilon_2(\omega) = 0$ ، فإن الحل العام للمعادلة (16) يُعطى بالصيغة:

$$\varphi_{2, \vec{q}_{//}}^s(z) = A_2 \sin(q_2 z) + B_2 \cos(q_2 z) \quad (17)$$

يمكن أن نحصل من (11) على التردد

$$\omega_0 = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_\infty} \right)^{1/2} \omega_{T_0} \quad (18)$$

ثانياً: عندما $\varepsilon_2(\omega) \neq 0$ عندئذٍ فإن:

$$\frac{d^2 \varphi_{\vec{q}_{//}, k}(z)}{dz^2} - q_{//}^2 \varphi_{\vec{q}_{//}, k}(z) = 0 \quad (18)$$

يُعبّر عن حل المعادلة (18) بالصيغة:

$$\varphi_{\vec{q}_{//}, 1}^s(z) = a_1 e^{q_{//}(z + d/2)}, \quad z \leq -d/2 \quad (19)$$

$$\varphi_{\vec{q}_{//}, 2}^s(z) = a_2 e^{q_{//}z} + b_2 e^{-q_{//}z}, \quad -d/2 < z \leq d/2 \quad (20)$$

$$\varphi_{\vec{q}_{//}, 3}^s(z) = a_3 e^{-q_{//}(z - d/2)}, \quad z \geq d/2 \quad (21)$$

تُصبح الشروط الحدودية من أجل هذه الحلول بالصورة التالي:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= a_2 e^{-\frac{q_j d}{2}} + b_2 e^{\frac{q_j d}{2}} \\
 a_3 &= a_2 e^{-\frac{q_j d}{2}} + b_2 e^{\frac{q_j d}{2}} \\
 \varepsilon a_1 &= \varepsilon_2 (a_2 e^{-\frac{q_j d}{2}} - b_2 e^{\frac{q_j d}{2}}) \\
 \varepsilon a_3 &= \varepsilon_2 (a_2 e^{\frac{q_j d}{2}} - b_2 e^{-\frac{q_j d}{2}})
 \end{aligned} \tag{22}$$

نعوض قيمة الثوابت من (21) في (20) - (18) وفي (15) والانتقال إلى التكامل الثاني، نحصل على هاملتون التأثير المتبادل إلكترون مع الاهتزاز الضوئي السطحي لطبقة بلورية استقطابية بالصيغة:

$$\begin{aligned}
 H_{int}^s &= \sum_{\vec{Q}_1} C_{\vec{Q}_1} ch(Q_1 z) e^{i \vec{Q}_1 \cdot \vec{\rho}} (a_{\vec{Q}_1} + a_{-\vec{Q}_1}^+) + \\
 &+ \sum_{\vec{Q}_2} C_{\vec{Q}_2} ch(Q_2 z) e^{i \vec{Q}_2 \cdot \vec{\rho}} (a_{\vec{Q}_2} + a_{-\vec{Q}_2}^+)
 \end{aligned} \tag{23}$$

وقد ذكرنا أن هاملتون التأثير المتبادل بين الإلكترون والفونونات الحجمية يُعطى بالصيغة (7). يُعطى مربع القيمة المطلقة لثابت التأثير المتبادل بين الإلكترون والاهتزاز السطحي بالصيغة التالية:

$$|C_{Q_j}|^2 = \frac{1}{d^2} \frac{2\pi \tilde{\alpha}_{sj}(\varepsilon_\infty, \varepsilon_0, \varepsilon)}{\beta_{sj} Q_j ch^2\left(\frac{Q_j d}{2}\right)} \tag{24}$$

$$\text{حيث } \beta_{sj} = \left(\frac{2m^* \omega_{sj}}{\hbar}\right)^{1/2} \text{ ، وأن:}$$

$$\tilde{\alpha}_{s1} = \frac{e^2}{\hbar} \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty + \varepsilon ch\left(\frac{Qd}{2}\right)} - \frac{1}{\varepsilon_0 + \varepsilon ch\left(\frac{Qd}{2}\right)} \right) \left(\frac{m^*}{2\hbar \omega_{s1}} \right)^{1/2} \frac{1}{ch^2\left(\frac{Qd}{2}\right)} \tag{25}$$

$$\tilde{\alpha}_{s2} = \frac{e^2}{\hbar} \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty + \varepsilon ch\left(\frac{Qd}{2}\right)} - \frac{1}{\varepsilon_0 + \varepsilon ch\left(\frac{Qd}{2}\right)} \right) \left(\frac{m^*}{2\hbar \omega_{s2}} \right)^{1/2} \frac{1}{ch^2\left(\frac{Qd}{2}\right)} \tag{26}$$

وتُعطى معادلة تعيين تردد الاهتزازات السطحية بالعلاقة التالية:

$$\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon} = \frac{ch(Qd) \pm 1}{sh(Qd)} \tag{27}$$

بالتعويض في (24) من (11) نحصل على ترددات الفونونات الضوئية السطحية في حالة التناظر $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$

$$\omega_{s1}^2 = \left(\frac{\varepsilon th \frac{Qd}{2} + \varepsilon_0}{\varepsilon th \frac{Qd}{2} + \varepsilon_\infty} \right) \omega_{T0}^2 \tag{28}$$

$$\omega_{s2}^2 = \left(\frac{\varepsilon th \frac{Qd}{2} + \varepsilon_0}{\varepsilon th \frac{Qd}{2} + \varepsilon_\infty} \right) \omega_{T0}^2 \quad (29)$$

يمكن أخيراً كتابة الصيغة النهائية للهاملتونيان الكلي للجملة (الإلكترون من منطقة التكافؤ للطبقة $k=2$ مع الاهتزازات الضوئية السطحية و الحجمية) بالشكل التالي:

$$\hat{H} = \hat{H}_e + \hat{H}_{ph}^s + \hat{H}_{ph}^v + \hat{H}_{int}^s + \hat{H}_{int}^v + V_{SA}(z) \quad (30)$$

يُعبّر هنا \hat{H}_e عن الطاقة الحركية للإلكترون، ويساوي إلى:

$$\hat{H}_e = \frac{\hat{p}_{//}^2}{2m^*} + \frac{\hat{p}_z^2}{2m^*} \quad (31)$$

حيث يُعبّر الحد الأول من العلاقة أعلاه عن الطاقة الحركية في xy مستوي الطبقة $k=2$ ، ويُعبّر الحد الثاني عن الطاقة الحركية باتجاه المحور z العمودي على مستوي الطبقة.

\hat{H}_{ph}^s ، \hat{H}_{ph}^v طاقة الفونونات السطحية والحجمية على الترتيب، وتُعطى بالصيغتين التاليتين:

$$\hat{H}_{ph}^s = \sum_{\vec{Q}_j} \hbar \omega_{sj} a_{\vec{Q}_j}^+ a_{\vec{Q}_j} \quad , j=1, 2 \quad (32)$$

$$\hat{H}_{ph}^v = \sum_{\vec{q}} \hbar \omega_0 a_{\vec{q}}^+ a_{\vec{q}} \quad (33)$$

\hat{H}_{ph}^s ، \hat{H}_{ph}^v يصفان كمون التأثير المتبادل بين الإلكترون والفونونات الضوئية السطحية والحجمية على الترتيب، ويُعبّر عنهما بالعلاقين (22) و(7) على الترتيب. $V_{SA}(z)$ كمون التأثير الذاتي للإلكترون في الجملة المدروسة، ويُعطى من أجل الجملة المدروسة بالصيغة التالية:

$$V_{SA}(z) = \frac{e^2 \delta}{\varepsilon_2} \left\{ \frac{1}{2\gamma_2 \delta d} \ln \frac{1}{1-\delta^2} + \int_0^\infty \frac{e^{\gamma_2 \eta d} \operatorname{ch}(2\gamma_2 \eta z)}{e^{2\gamma_2 \eta d} - \delta^2} \right\} \quad (34)$$

حيث: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ و $\delta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 + \varepsilon}$ و ε_2 ثابتة العازلية الكهربائية اللاعطالية للطبقة المدروسة، و $\gamma_2 = \left(\frac{\varepsilon_2^\perp}{\varepsilon_2^\parallel} \right)^{1/2}$

معامل عدم التماثل للعازلية الكهربائية للطبقة المدروسة (معامل الانزوتروبية).

النتائج والمناقشة

تم في هذا العمل دراسة حالة البولارون في طبقة بلورية أيونية منتهية السماكة، على تماس من الجانبين مع وسطين غير قطبيين، وللتبسيط الرياضي افترضنا أثناء استخراج الهاملتونيان السطحي لاهتزاز الشبكة أن: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ ، وقد تم استخدام الطريقة الأدبياتية في حل مسألة البولارون، أي عندما تكون الحركة بطيئة في اتجاه المحور z العمودي على مستوى الطبقة المدروسة. الأمر الذي ساعد في تجزئة الهاملتونيان إلى جزأين، جزء يتعلق بدراسة الحركة في المستوي xy ، وجزء يهتم بدراسة الحركة باتجاه المحور z كما ذكر أعلاه، وهذه الخاصة ممكنة فقط في الأفلام الرقيقة.

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

1. إن مساهمة الكمون الحجمي عند حدود الطبقة (بالقرب من السطح $z \rightarrow \pm \frac{d}{2}$) يساوي الصفر، هذا يدعم ضعف التأثير التبادل بين الإلكترون والاهتزاز السطحي.
2. يزداد الكمون السطحي عند سطح الطبقة، وتعدم قيمته عند مركز الطبقة.
3. تبين علاقة الهاملتونيان أن طاقة البولارون السطحي تتعلق بشكل قوي بالمعاملات: $d, \epsilon_3, \epsilon_2, \epsilon_1, \alpha$ التي هي على الترتيب سماكة الطبقة معامل العازلية الكهربائية للطبقات الثلاث و α معامل الترابط.

التوصيات

يُعتبر هذا العمل خطوة هامة لكنه غير مكتمل، ولكي يبدو أكثر وضوحاً يلزم أولاً دراسة جملة محددة المعاملات، كدراسة طاقة ارتباط البولارون في طبقة بلورية قطبية مثل طبقة *GaAs* مثلاً ووضع برنامج حاسوبي لتغير الطاقة بدلالة السماكة، ومن أجل معاملات ثابت عازل مختلف للطبقات المجاورة من الجانبين (طبقات لاقطبية معروفة المعاملات). ويمكن كذلك من خلال الرسم البياني لكل من الكمون السطحي والكمون الحجمي بدلالة سماكة الطبقة، توضيح دور كل من طاقة الارتباط السطحية والحجمية على حدة. من كل ما سبق يتبين أن هذا العمل يُعتبر اللبنة الأولى على طريق طويل.

المراجع:

- 1- فاهود، نظام، وريده؛ تأثير طاقة الكمون الذاتي لحاملة الشحنة في طبقة رقيقة متماثلة الاستقطاب 2017م. تاريخ 06/01/ ص 855 على عرض القطاع المحظور في طبقة يوديد الرصاص، قبل للنشر برقم /
- [2] S. Fujita et al. Quantum Theory of conducting Matter, DOI 10. 1007 /978- U-387-88211- 6-2, Springer Science, Business Media ,LLC 2009.
- [3] S.I. Pekar, Study of the Electron theory of Crystals, Gostekhizdat, 1991.
- [4] R.P. Feynman . Physics. Review V 97, N⁰ 3, 1955.
- [5] H. Frohlich, Physics. Review V 79, 845, 1950.
- [6] H. Frohlich, Proc. Soc. London A215, 291, 1950.
- [7] R. P. Feynman, Statistical Mechanics (Addison – Wesley, Reeding. MA, 1972).
- [8] R. P. Feynman, Quantum Electrodynamics (Addison – Wesley, Reeding. MA, 1961).
- [9] S. Fujita and S. Godoy. Quantum Statistical Theory of Superconductivity, (Plenum, New York, 1996), PP.150-153.
- [10] S. Fujita and S. Godoy. Theory of High Temperature. Superconductivity, (Kluwer , Dordrecht, 2001), PP.54-58.
- [11] 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.
- [12] Born M. Con H. Dynamechecia Theory crystelechecia recheotic. 1985.