

Enhancement Efficiency of Calculation of the Phonon Images for GaP Piezoelectric Crystal

Abeer Bader Ibrahim^{1*}, Mumtaz M.S. Hussien²

^{1*}The General Directorate of Education of Nineveh Governorate

²Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, University of Mosul, Mosul, IRAQ

E-mail: ^{1*}abeer121988@gmail.com, ²momtaz_hussien@uomosul.edu.iq

(Received October 23, 2021; Accepted February 03, 2022; Available online March 01, 2022)

DOI: [10.33899/edusj.2022.131963.1195](https://doi.org/10.33899/edusj.2022.131963.1195), © 2022, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ABSTRACT

In this paper an improved phonon imaging for GaP has been calculated, this crystal is one of III-V group. In the presence of piezoelectric properties, the computation treatment is based on increasing the number of points in the reduced Brillouin zone and increasing the size of the phonon image matrix. The phonon images can be calculated by large number of points in the reduced Brillouin zone which represent the wave vectors and these vectors can be transformed to group velocity vectors using Christoffel equation, these set of group velocity vectors can be projected in a certain direction to form the phonon image. A program was prepared in MATLAB language to calculate these images by determining the number of points in the reduced zone and determining the size of the matrix that represents the phonon images in addition to the direction of the projections. To calculate the phonon images in the presence of the effect of the piezoelectric properties, it is through the presence of the k_{44} factor, which indicated of the influence of the piezoelectric properties on the phonon images. The results showed that the size of the image matrix is more effective factor than the number of points in the reduced Brillouin zone especially when the number of points is greater than 8×10^5 points, and when the number of points less than 10^4 points all the obtained phonon images is not clear.

Key word: phonon images, piezoelectric crystals, phonon images of GaP, cubic crystal, calculation of phonon images

تحسين كفاءة حساب الصور الفونونية لبلورات GaP البيزوكهربائية

عبير بدر ابراهيم^{1*}، ممتاز محمد صالح حسين²

^{1*}المديرية العامة لتربية محافظة نينوى
²قسم الفيزياء – كلية التربية للعلوم الصرفة - جامعة الموصل

الملخص

تم في هذا البحث حساب وتحسين الصور الفونونية لبلورة GaP، وهذه البلورة ضمن المجموعة الثالثة-الخامسة. وبوجود الخصائص البيزوكهربائية اعتمدت المعالجة الحسابية على زيادة عدد النقاط في منطقة برليون المختزلة وزيادة حجم المصفوفة للصور الفونونية. تحتسب

الصور الفونونية بتكوين اعداد كبيرة من متجهات الموجة في المنطقة المختزلة والتي تمثل متجهات الموجة وتحويل هذه المتجهات باستخدام معادلة كريستوفل الى متجهات سرع المجموعة وايجاد مساقط هذه المتجهات باتجاه معين لتشكيل الصور الفونونية. أعد برنامج بلغة ال MATLAB لحساب هذه الصور من خلال تحديد عدد النقاط في المنطقة المختزلة وتحديد حجم المصفوفة التي تمثل الصور الفونونية اضافة الى اتجاه المساقط. ولحساب الصور الفونونية بوجود تأثير الخصائص البيزوكهربائية يكون من خلال وجود العامل k_{44} والذي يعد مؤشر واضح لمدى تأثير الخصائص البيزوكهربائية في الصور الفونونية. بينت النتائج ان العامل المؤثر للحصول على صور واضحة المعالم هو حجم مصفوفة الصورة عندما تكون عدد النقاط اكبر من 8×10^5 نقطة ولا يتم الحصول صور واضحة عندما يقل عدد النقاط عن 10^4 نقطة.

الكلمات الدالة: الصور الفونونية، البلورات البيزوكهربائية، الصور الفونونية [GaP]، البلورات المكعبة، حساب الصور الفونونية.

المقدمة:

تعد تجارب النبضة الحرارية من الوسائل المهمة في دراسة المواد الصلبة، اذ تقل فيها الاهتزازات البلورية بشكل كبير عند درجات الحرارة الواطنة. يتم توليد الموجات المرنة (الفونونات) في البلورة عند تسليط نبضة حرارية ويكون انتشار هذه الموجات في جميع الاتجاهات بشكل فذيفي اي بدون استطارة و تشبه هذه الحالة إلقاء حجر في بركة راكدة اذ تتولد الموجات في جميع الاتجاهات وتنتشر دون اعاقه [1]. تمتلك بعض المواد الخاصية البيزوكهربائية التي تصف العلاقة بين الضغط الميكانيكي والجهد الكهربائي فيها. اذ يتكون مجال كهربائي على البلورة نتيجة لتسليط ضغط عليها وهذا ما يعرف بتأثير البيزوكهربائية ويكون للاقتران، الذي يحدث بين متغيرات المرونة ومعاملات البيزوكهربائية في البلورات البيزوكهربائية، تأثير كبير على طاقة الفونون اذ يؤدي وجود المجال الكهربائي الى توليد اجهاد ويؤثر هذا الارتباط بين المجال الكهربائي وثوابت المرونة ومعاملات البيزوكهربائية على الخصائص الاخرى للبلورة. ونتيجة لتاثر سرعة الموجة المرنة بهذه العوامل فقد تم دراسة هذه الخصائص في العديد من الانظمة البلورية مثل الرباعي القائم والمعين القائم والثلاثي والسداسي [2]. كما درست بعض البلورات المكعبة التي تمتلك الخصائص البيزوكهربائية اذ تم حساب الصور الفونونية لهذه البلورات نظريا [3]. تم حساب الصور الفونونية باستخدام الطريقة التقليدية من خلال تكوين نقاط عشوائية في الفضاء K ومن ثم تحويل هذا الفضاء الى فضاء سرعة المجموعة [4-6]. وتم ايضا استخدام طريقة مونت كارلو لتوليد المتجهات في فضاء متجه الموجة وقد دعمت هذه الدراسات تجارب عملية لهذه البلورات والتي شملت تجارب النبضة الحرارية حيث مكنت هذه الطريقة الباحثين من الكشف عن تفاصيل خواص انتقال الفونونات في المادة الصلبة.

استخدمت تقنية النبضة الحرارية لدراسة الايصالية الحرارية في البلورات وكذلك في دراسة ظاهرة التمرکز الفونوني وبرهناها عدد من الباحثين [5-6]. تستخدم التجارب العملية للتمرکز الفونوني فونونات ذات ترددات عالية اذ درست تجارب النبضة الحرارية للمرة الاولى من قبل Maris [7]، واجريت دراسات واسعة حول الموضوع نفسه من قبل Wolfe و Hauser [8]، تم دراسة تأثير الخصائص البيزوكهربائية في الصور الفونونية بإجراء محاكاة لهذه التأثيرات لبلورات افتراضية ذات خصائص متباينة في فضاء اللاتماثل [3]. بينت الدراسات السابقة ان لمعاملات المرونة اهمية كبيرة في تحديد شكل الصور الفونونية لهذه البلورات وتتاثر هذه الصور بادخال الخصائص البيزوكهربائية في الحسابات اذ يؤدي زيادة ثابت العزل ϵ للبلورة الافتراضية الى الحد من تأثير خصائص البيزوكهربائية في الصور الفونونية للبلورات، يتباين تأثير الخصائص البيزوكهربائية بالنسبة للبلورات المكعبة وحسب موقع هذه البلورات في فضاء اللاتماثل حيث تؤدي معاملات المرونة دوراً كبيراً في التأثير في شكل الصور الفونونية وكذلك في كيفية تأثير الخصائص البيزوكهربائية في هذه الصور [5]. ولقيمة معينة من معاملات المرونة فان معاملات البيزوكهربائية e_{14} وثابت العزل ϵ لهما تأثير واضح في الصور الفونونية للبلورات [3].

في هذا البحث سوف تتشكل الصور الفونونية من خلال تجمع عدد كبير من النقاط في فضاء الموجة. إذ يتطلب حساب تشكيل الصور الفونونية دراسة انتشار الفونونات داخل بلورات المواد الصلبة ودراسة ترددات هذه الاهتزازات [9]. إذ تم دراسة الصور الفونونية من خلال دراسة الترابط البلوري المتولد من تجمع الذرات في حالة المواد الصلبة حيث نجد ان هناك عددا من انواع الارتباط الذي يؤدي الى ظهور مجموعات من المواد ذات الخصائص المتشابهة.

الجزء النظري

تتكون الموجات المرنة في البلورات نتيجة لاهتزازات الذرات حول موضع الاتزان وهذه الاهتزازات مستعرضة وطولية وتختلف معالجة هذه الاهتزازات من نظام بلوري الى اخر وقد تمثل هذه الاهتزازات بموجات تعرف بموجات الشبيكة تظهر في الذرات على هيئة إزاحات تلقائية متكررة.

يمكن معالجة وحساب هذه الموجات من الناحية النظرية باستخدام طريقة الاهتزازات البلورية او نظرية المرونة، تم في هذه الدراسة استخدام طريقة نظرية المرونة والتي تتمثل بمعادلة كريستوفل اذ يمكن الحصول من حل معادلة كريستوفل على سرعة الطور ولانماط الثلاثة الطولية والمستعرضة الاولى والثانية ويمكن ان نحصل على الحل بالصيغة التحليلية في الاتجاهات الخاصة فقط مثل [100]،

[110] و [111] اما الاتجاهات العامة فيمكن ايجادها حسابيا من معادلة كريستوفل [10-13]

$$|(\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik})| = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

اذ ان ρ كثافة البلورة و v سرعة الطور و δ_{ik} دالة ديراك و Γ_{ik} ممتدة كريستوفل وتساوي

$$\Gamma_{ik} = C_{ijkl} n_j n_l \quad \dots\dots\dots(2)$$

اذ ان n_l و n_j هما الوحدة الاتجاهية لمتجه الموجة \vec{k} في الاتجاه j و l على التوالي و C_{ijkl} ممتدة المرونة من المرتبة الرابعة، وتعطى العلاقة بين وحدة المتجه و متجه الموجة بالصيغة الاتية:

$$\hat{n}_l = \frac{\vec{k}_l}{|\vec{k}|} \quad \dots\dots\dots(3)$$

في نظام البلورات المكعبة ونتيجة للتناظر يمكن تمييز ثلاثة ثوابت للمرونة C_{11} و C_{12} و C_{44} [14]، يتم تطبيق معادلة كريستوفل على البلورات المكعبة حيث تحدد عناصر ممتدة المرونة والتي تساوي Γ_{ik} [15].

$$\Gamma_{11} = C_{11} n_1^2 + C_{44} (n_2^2 + n_3^2) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Gamma_{22} = C_{11} n_2^2 + C_{44} (n_1^2 + n_3^2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\Gamma_{33} = C_{11} n_3^2 + C_{44} (n_1^2 + n_2^2) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\Gamma_{12} = (C_{12} + C_{44}) n_1 n_2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\Gamma_{13} = (C_{12} + C_{44}) n_1 n_3 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\Gamma_{23} = (C_{12} + C_{44}) n_2 n_3 \quad \dots\dots\dots(9)$$

حل معادلة كريستوفل يعطي سرعة الطور ولانماط الثلاثة. يمكن الحصول على سرعة المجموعة باستخدام الاشتقاق الضمني لمفكوك

معادلة كريستوفل [16]

$$\vec{v}_g = - \frac{\vec{v}_k \Omega}{\frac{\partial \Omega}{\partial \omega}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

اذ ان $\Omega = |(\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik})|$ و \vec{V}_k هو الانحدار بالنسبة لمتجه الموجة k و ω التردد الزاوي و v_g سرعة المجموعة، يمكن إدخال تأثير الخصائص البيزوكهربائية على معادلة كريستوفل من خلال ممتدة كريستوفل Γ_{ij} والتي يمكن كتابتها بالصورة التالية [15] [17] [3]

$$\Gamma'_{il} = \Gamma_{il} + \frac{\gamma_i \gamma_l}{\epsilon} \dots \dots \dots (11)$$

المعامل γ_i يرتبط بالمعامل الميكانيكي الكهربائي

$$\gamma_i = e_{ijk} n_j n_k \dots \dots \dots (12)$$

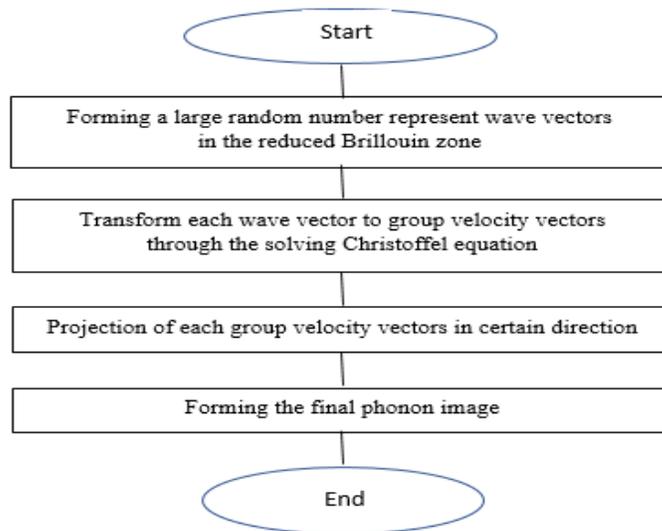
اذ تمثل e_{ijk} عامل البيزوكهربائية و ϵ ثابت العزل ولهذين العاملين تأثير كبير في حساب الصور الفونونية، اي من خلال محاكاة الصور الفونونية، تتأثير الصور الفونونية بتغيير هذه المعاملات من خلال خطوط او منحنيات في فضاء اللاتماثل حيث وجد ان هذا الفضاء يتالف من منطقتين احدهما ذات لاتماثل موجبا واخرى ذات لاتماثل سالبا وبينهما خط التماثل ($d=0$) عند هذا الخط فان خصائص البلورة لا تتأثر بالاتجاه (اي متجانسة في جميع الاتجاهات) [18] [19].

طريقة الحسابات:

لغرض حل معادلة كريستوفل المعادلة 1 حسابيا تستخدم طريقة مونتي كارلو وهي طريقة عددية تستخدم الاعداد العشوائية لغرض محاكاة حركة الموجة المرنة داخل البلورة قيد الدراسة. وفي حالة البلورات المكعبة يتم تحديد منطقة برليون المختزلة من منطقة برليون الاولى لتكوين عدد كبير من النقاط التي تمثل متجهات متجه الموجة k وحساب سرعة الطور والمجموعة وبذلك نحصل على متجهات سرعة المجموعة لكل متجه من المتجهات k ، وباجراء العمليات التناظرية يمكن ايجاد بقية متجهات سرعة المجموعة في منطقة برليون الاولى، من متجهات سرعة المجموعة نستطيع الحصول على الصور الفونونية اذ يتم اسقاط هذه المتجهات باتجاه معين وتكوين الصور الفونونية الحسابية كما هو مبين في الشكل (1) الذي يبين خطوات خوارزمية الحسابات. ويبين الجدول (1) خصائص البلورة GaP التي درست في هذا البحث.

جدول (1) خصائص ومعاملات البلورة GaP المستخدمة في البحث

Crystal	Crystal Class	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{44} (GPa)	Density Kg/m ³	e_{14} C/m ²	ϵ	k_{44}	Ref No.
GaP	3m $\bar{4}$	140.5	62	70.33	4138	-0.1	11.11	0.000128	[20]

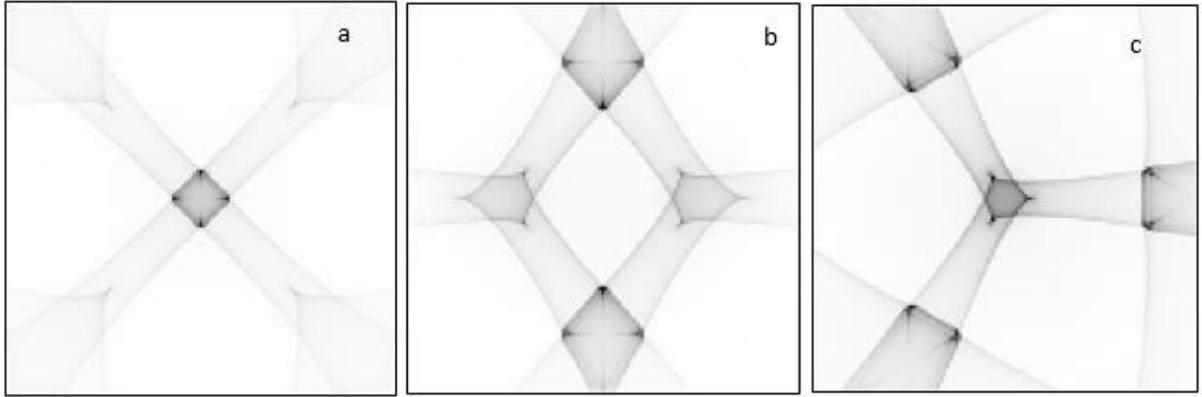


الشكل (1) مخطط خوارزمية الحسابات

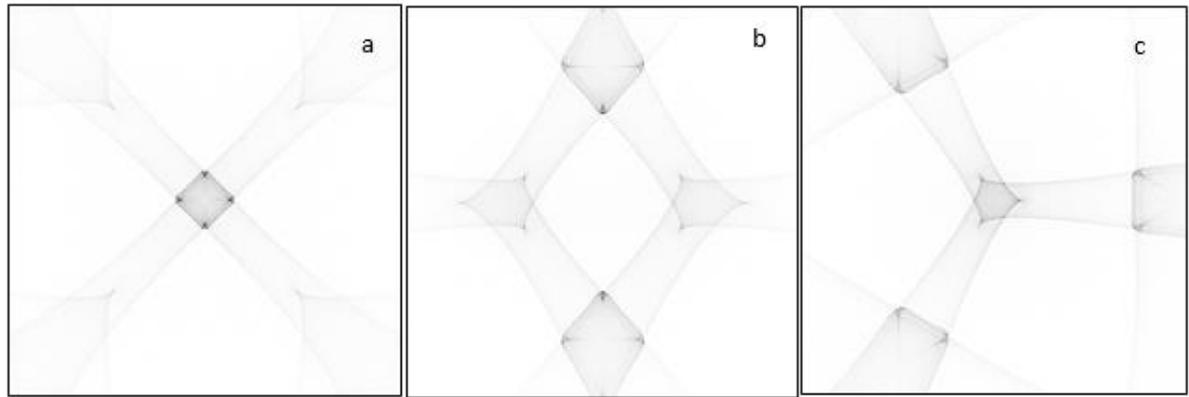
لغرض الحصول على الصور الفونونية للبلورة GaP باتجاه معين من اتجاهات التناظر العالية، [100]، [110] و [111]، يمكن تعيين مساقط متجهات سرعة المجموعة باتجاه معين للحصول على الصورة والتي يمكن حسابها بتكوين مصفوفة بابعاد معينة من النقاط 128×128 او 512×512 حيث يمثل وسمي المصفوفة الابعاد الافقية والشاقولية اما قيم عناصر المصفوفة فانها تمثل الشدة في تلك النقطة، فعند ايجاد المساقط لمتجهات سرعة المجموعة نحدد نافذة محددة لغرض اسقاط متجهات سرعة المجموعة عليها اذ يتم استبعاد كافة المساقط التي تقع خارج النافذة، اما المساقط الواقعة ضمن النافذة المحددة فتحدد بشكل نقطة تقع على احد عناصر المصفوفة الافتراضية لغرض حساب الشدة يضاف عداد لهذا العنصر وبذلك يتم حساب الشدة في كل نقطة من نقاط المصفوفة ولكافة المساقط ثم يتم تحول هذه المصفوفة الى سويات رمادية وهي تدرجات في الشدة، و تمثل الصور المحسوبة توزيع الطاقة للموجة المرنة داخل البلورة نتيجة لعدم التجانس في البلورة، اذ تعتمد خصائص البلورة على الاتجاه، فتشئ مناطق عالية الشدة واخرى ذات شدة واطئة وهذا ما يسمى بالتمركز الفونوني [2]. تعتمد دقة الصور الفونونية المحسوبة على عدة عوامل منها حجم المصفوفة وعدد النقاط في منطقة برليون الاولى والتي تمثل متجهات متجه الموجة، كما هو مبين في الشكل (1) خطوات خوارزمية الحسابات.

النتائج والمناقشة

في الحسابات التي اجريت في هذه الدراسة تم اعتماد اربع مصفوفات ذات احجام مختلفة للصور الفونونية وهي 128×128 ، 256×256 ، 512×512 ، 1024×1024 . تم حساب الصور الفونونية لبلورة GaP من الاتجاهات العالية التناظر [100] و [110] و [111] وللانماط المستعرضة السريعة والبطيئة. من العوامل المهمة التي تؤخذ بنظر الاعتبار في حساب الصور الفونونية هي دقة الصورة المحسوبة وهذه تعتمد على حجم مصفوفة الصور اضافة الى عدد النقاط في منطقة برليون المختزلة التي تؤخذ في اجراء هذه الحسابات. تم في هذه الدراسة الاعتماد على قيم مختلفة من عدد النقاط تتراوح بين 4×10^5 و 1.6×10^6 نقطة تمثل عدد متجهات متجه الموجة في المنطقة المختزلة ليتم حساب قيم سرعة المجموعة لكل نقطة من هذه النقاط في المنطقة المختزلة ثم ايجاد بقية قيم سرعة المجموعة في منطقة برليون الاولى نتيجة تطبيق العمليات التناظرية لاجاد القيم المناظرة الاخرى. يبين الشكل (2) الصور الفونونية لبلورة GaP للنمط المستعرض البطيء من الاتجاهات [100] و [110] و [111] و لصورة من مصفوفة بابعاد 128×128 حيث تقع هذه الاتجاهات في وسط الصورة وبفتحة زاوية مقدارها 55° بالاتجاهين الافقي والشاقولي، المناطق الداكنة تمثل مناطق التمرکز الفونوني في هذه البلورة اذ تتركز حول الاتجاه [100] وتظهر ذروات ذات شدة مرتفعة من الاتجاه [100] الى الاتجاه [111]، اما المنطقة حول الاتجاه [110] فليس هنالك اي تمرکز فونوني وهذا نتيجة عدم التجانس في البلورة. عند تغيير حجم المصفوفة الى 1024×1024 يمكن تحسين الصورة المحسوبة اذ تظهر بدقة اكبر كما هو مبين في الشكل (3). يبين الشكل (3) الصورة الفونونية النمط المستعرض البطيء من الاتجاهات [100] و [110] و [111]، عند مقارنة هذه الصور نجد ان الدقة تزداد مع زيادة حجم المصفوفة كما يلاحظ خفوت الشدة قليلا عند زيادة حجم المصفوفة ولغرض الحصول على شدة اعلى يجب زيادة عدد النقاط في المنطقة المختزلة من فضاء متجه الموجة.



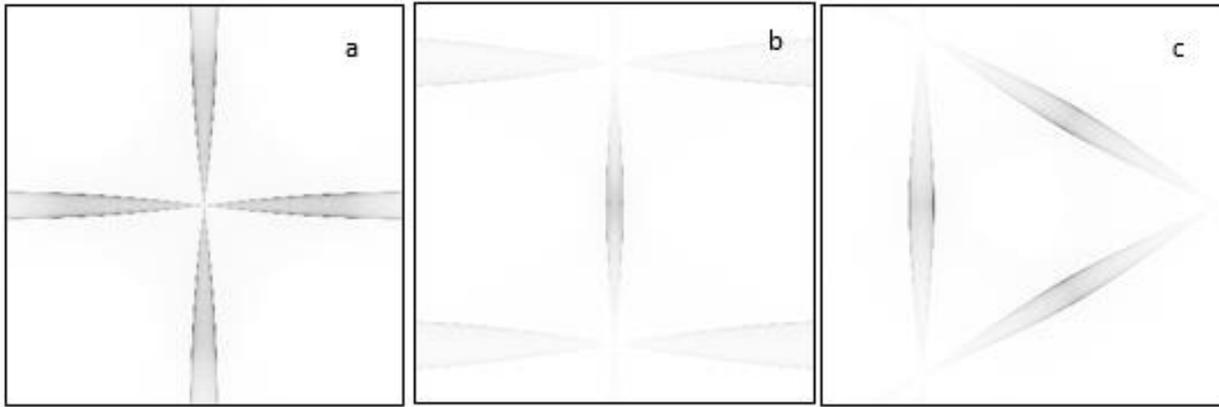
الشكل (2) الصور الفونونية لبلورة GaP النمط المستعرض البطيء من الاتجاهات (a) [100] (b) [110] (c) [111] وحجم مصفوفة الصور المحسوبة 128x128



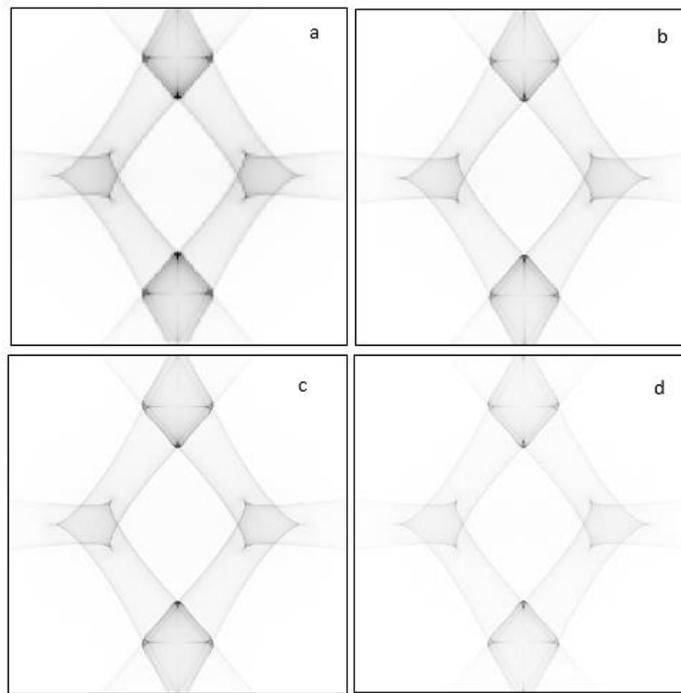
الشكل (3) الصور الفونونية لبلورة GaP النمط المستعرض البطيء من الاتجاهات (a) [100] (b) [110] (c) [111] وحجم مصفوفة الصور المحسوبة 1024x1024

يبين الشكل (4) الصور الفونونية للنمط المستعرض السريع من الاتجاهات [100] و [110] و [111] عندما يكون حجم مصفوفة الصور 1024x1024، ولغرض تحسين الصورة المحسوبة احتسبت الصورة الفونونية من الاتجاه [110] ولاحجام مصفوفات مختلفة هي 128x128 و 256x256 و 512x512 و 1024x1024 كما مبين في الشكل (5) اذ يمكن ملاحظة زيادة في الدقة مع زيادة حجم مصفوفة الصورة مع هبوط قليل في الشدة للصور المحسوبة التي حسبت بعدد ثابت للنقاط وهو 8×10^5 نقطة، في حين يبين الشكل (6) تأثير تغيير حجم المصفوفة للنمط المستعرض البطيء وبنفس العدد من النقاط من الاتجاه [111] حيث نلاحظ زيادة الدقة للصور الفونونية المحسوبة رغم الانخفاض بالشدة نتيجة زيادة حجم المصفوفة.

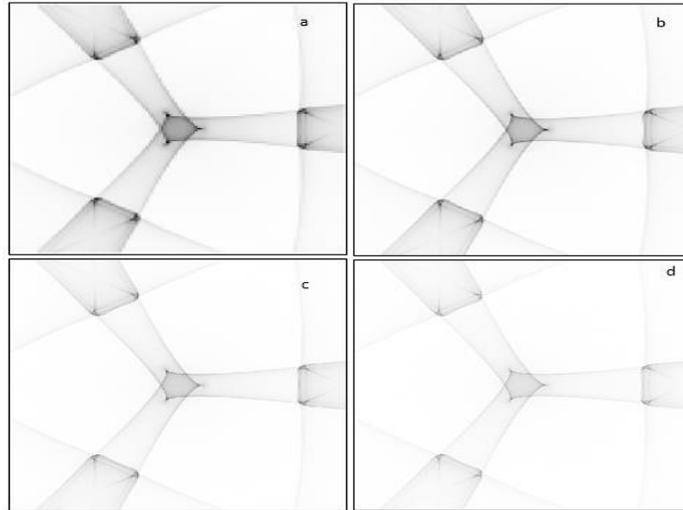
يمكن بيان تأثير زيادة عدد النقاط في المنطقة المختزلة في حساب الصور الفونونية حيث يمكن مقارنة حالتين لحجم المصفوفة هما الـ 128x128 و 1024x1024 ولحالتين مختلفتين بعدد النقاط، اذ تزيد عدد النقاط في الحالة الاولى عن 2×10^5 ، وتقل في الحالة الثانية عن 2×10^5 . يبين الشكل (7) الصور الفونونية باستخدام مصفوفات صور مختلفة وعدد نقاط مختلفة فعندما يكون حجم المصفوفة للصورة قليل 128x128 نلاحظ شدة عالية كما في الشكل (7a) و (7c) حيث مع زيادة عدد النقاط تتوزع هذه النقاط على عناصر المصفوفة بشكل نبضات وعند زيادة حجم المصفوفة الى 1024x1024 فاننا نحصل على شدة اقل لان العدد نفسه من النقاط يتوزع على حجم مصفوفة اكبر وهذا يفسر ضعف الشدة رغم زيادة حجم المصفوفة كما في الشكل (7b) و (7d).



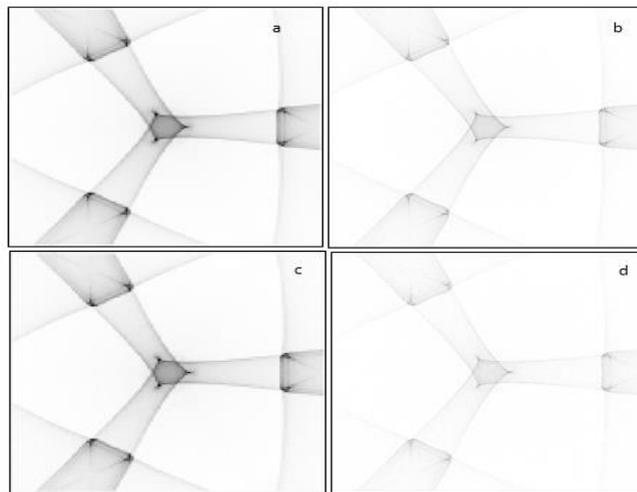
الشكل (4) الصور الفونونية لبلورة GaP النمط المستعرض السريع من الاتجاهات بعدد نقاط $n = 8 \times 10^5$ (a) [100] (b) [110] (c) [111] وحجم مصفوفة الصور المحسوبة 1024x1024



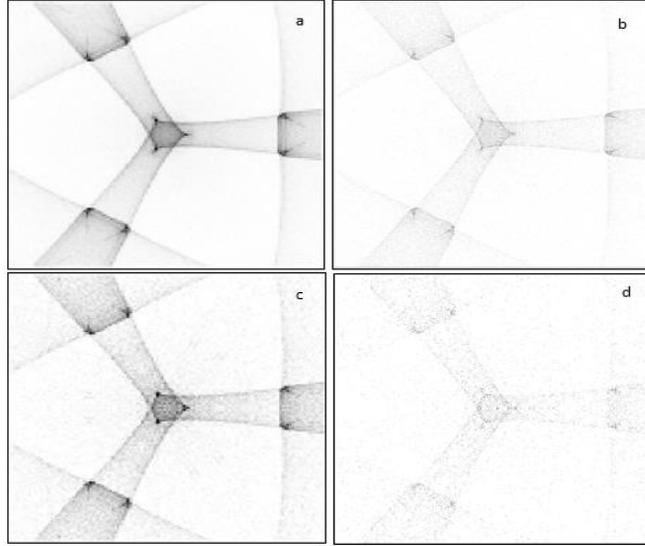
الشكل (5) الصور الفونونية لبلورة GaP من الاتجاه [110] للنمط المستعرض البطيء بعدد نقاط $n = 8 \times 10^5$ (a) 128x128 (b) 256x256 (c) 512x512 (d) 1024x1024



الشكل (6) الصور الفونونية لبلورة GaP من الاتجاه [111] للنمط المستعرض البطيء (a) 128x128 (b) 128x128 (c) 256x256 (d) 512x512
1024x1024



الشكل (7) الصور الفونونية لاتجاه [111] للنمط المستعرض البطيء بتغير حجم المصفوفة (a) 128x128 (b) 1024x1024 لعدد نقاط $n = 2 \times 10^6$ (c) 128x128 (d) 1024x1024 لعدد نقاط $n = 2 \times 10^5$



الشكل (8) الصور الفونونية لاتجاه [111] للنمط المستعرض البطئ بتغير حجم المصفوفة (a) 128×128 (b) 1024×1024 لعدد نقاط $n = 5 \times 10^4$ (c) 128×128 (d) 1024×1024 لعدد نقاط $n = 5 \times 10^3$

اما حالة قلة عدد النقاط عن $n=2 \times 10^5$ فان زيادة حجم المصفوفة لا يجعل من الصور الفونونية المحسوبة واضحة المعالم وهذا ما يوضحه الشكل (8) حيث يتم الحصول على صور واضحة رغم حجم المصفوفة القليل كما في الشكل (8a) و (8c) وبهذا العدد من النقاط فان زيادة حجم المصفوفة لا يؤدي الى الحصول على صور واضحة المعالم كما في الشكل (8b) و (8d).

الاستنتاجات

مما سبق يمكن ان نستنتج ان

- تعتمد دقة الصورة الفونونية المحسوبة على حجم مصفوفة الصورة اضافة الى عدد النقاط المستخدمة في منطقة برليون المختزلة والتي تمثل متجهات متجة الموجة
- هنالك حدود لعدد النقاط المستخدمة في المنطقة المختزلة اضافة الى حجم المصفوفة التي تستخدم لتسجيل الصورة، من حيث المبدأ فان زيادة عدد النقاط يؤدي الى زيادة الزمن المستغرق لاجراء الحسابات وبالتالي الحصول على الصور الواضحة المعالم.
- يحدث خفوت في شدة الصورة المحسوبة مع زيادة حجم مصفوفة الصورة، ولغرض الحصول على شدة مناسبة يجب زيادة عدد النقاط في منطقة برليون المختزلة.
- عندما يقل عدد النقاط عن $n=2 \times 10^5$ ليس هنالك جدوى من زيادة حجم المصفوفة فيمكن في هذه الحالة تقليص حجم المصفوفة الى 128×128 ونحصل على الصور المطلوبة.

شكر و تقدير

يتقدم الباحثان بالشكر والتقدير الى عمادة كلية التربية للعلوم الصرفة وقسم الفيزياء على دعم البحث.

المصادر

- 1- A. G. Every, A. A. Mazney, W. Grill, M. Pluta, J. D. Comins, O. B. wright, O. Matsuda, W. Sachse and J. P. Wolfe, "Bulk and surface acoustic wave Phenomena in Crystals: observation and interpretation", Wave Motion, Vol. 50, Issue. 8, pp. 1197-1217, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2013.02.007>.

- 2- C.G. Winternheimer, A.K. McCurdy, "Phonon focusing and Phonon conduction in orthorhombic and tetragonal crystals in the boundary scattering regime", *Phys. Rev. B*, Vol.18, no.12, pp.6576-6605, 1978, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.18.6576>.
- 3- A. B. Ibrahim & M. M. Hussien, *Rafidain Journal of Science*, "Effect of Piezoelectric Parameters on Phonon Focusing in Cubic Semiconductor Crystals", Vol. 27, Issue 1, pp. 354-363, 2018, doi: [10.33899/rjs.2018.143942](https://doi.org/10.33899/rjs.2018.143942).
- 4- L. Wang, "General analytical scheme for determine the characteristic caustic points in phonon focusing patterns of cubic Crystals", *IEEE international Ultrasonic Symposium proceedings*, pp.257-260, 2008, doi: [10.1109/ULTSYM.2008.0063](https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2008.0063).
- 5- A.G. Every, "General, closed-form expression for acoustic waves in cubic crystals", *Phys. Rev. Lett.* Vol.42, no. 16, pp.1065-1068, 1979, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.1065>.
- 6- J. Philip, K.S. Viswanathan, "Phonon magnification in Cubic crystals". *Phys. Rev. B*, Vol.17, no.12, pp. 4969-4978, 1978, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.17.4969>.
- 7- H. J. Maris, "Enhancement of heat pulses in crystals due to elastic anisotropy.", *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 50, no. 3B, pp. 812-818, 1971, doi: <https://doi.org/10.1121/1.1912705>.
- 8- J. P. Wolfe, M. R. Hauser, "Acoustic wave front imaging.", *Annalen der Physik*, Vol. 507, no. 2, 99-126, 1995, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.19955070203>.
- 9- G.A. Northrop, J.P. Wolfe, "Ballistic phonon imaging in germanium", *Phys. Rev. B* Vol. 22, no. 12, pp. 6196-6212, 1980, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.22.6196>.
- 10- A. G. Every, "Ballistic Phonons and the shape of the ray surface in cubic crystals", *Phys. Rev. B* Vol.24, no.6, pp.3456-3467, 1981, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.24.3456>
- 11- K.Y. Kim," Analytic relations between the elastic constants and group velocity in an arbitrary direction of symmetry planes of media with orthorhombic or higher symmetry", *Phys. Rev. B* 49(6), 3713- 3724, 1993, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.3713>
- 12- J. P. Wolfe, "Imaging Phonons. Acoustic Wave Propagation in Solids." Cambridge University Press, pp. 91-145, 1998.
- 13- K. Lau, A. K. McCurdy, "Elastic anisotropy factor for orthorhombic, tetragonal and hexagonal crystals", *Phys. Rev. B* Vol. 58, no. 14, pp. 8980-8984, 1998, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.8980>.
- 14- A.G. Every and A.K. McCurdy, "Phonon focusing in Piezoelectric crystals", *Phys. Rev. B* Vol. 36, no. 3, pp. 1433-1447, 1987, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.1432>.
- 15- D. Royer, E. Dieulesaint, "Elastic Waves in Solid I". Translated by David P. Morgan, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2000.
- 16- B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids". Stanford University, Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc, pp. 191-264, 1973.
- 17- A. Safari, E. K. Akdogan (eds), "Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications". Springer Science Business Media, LLC, pp. 17-38, 2008.
- 18- D. C. Hurly, J. P. Wolfe, "Phonon focusing in cubic crystals", *Phys. Rev. B* Vol.32, no. 4, 2568-2587, 1985, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.32.2568>.
- 19- Abeer bader Ibrahim, "Study the Effect of Piezoelectric Properties on The Phonon Focusing in Cubic Crystals", MSc. Thesis College of Education for Pure Sciences, University of Mosul, 2014.
- 20- H. Warlimont and W. Martienssen, (Eds.), "Springer handbook of materials data", Springer, pp. 615-660, 2018.