

## تأثير معاملات البيزوكهربائية على الصور الفونونية لبورات أشباه الموصلات المكعبة

ممتاز محمد صالح حسين

عبير بدر ابراهيم

قسم الفيزياء / كلية التربية للعلوم الصرفة/ جامعة الموصل

(أستلم 3/ 3/ 2014 ؛ قُبل 5/ 5/ 2014)

### الملخص

في هذا البحث أجريت دراسة تأثير معاملات البيزوكهربائية على الصور الفونونية لبعض بلورات أشباه الموصلات المكعبة. بينت الدراسة ان لهذه المعاملات تأثير واضح على النمطين المستعرضين للصور الفونونية لهذه البلورات ويزداد هذا التأثير بزيادة المعامل  $k_{44}$  لهذه البلورات. حسابيا تم تطبيق طريقتان لحساب الصور الفونونية الأولى تعتمد على الحساب التفصيلي لسرعة المجموعة. أما الطريقة الثانية (الخوارزمية المقترحة) فتعتمد على حساب اتجاه سرعة المجموعة من سطح التوهين. تم اختبار اداء الخوارزمية المقترحة بوجود وعدم وجود المعاملات البيزوكهربائية.

**الكلمات الدالة:** الصور الفونونية، البلورات البيزوكهربائية المكعبة، حساب الصور الفونونية للبلورات البيزوكهربائية.

---

## Effect of Piezoelectric Parameters on Phonon Focusing in Cubic Semiconductor Crystals

Abeer B. Ibrahim

Mumtaz M. Hussien

Department of Physics/ College of Education for Pure Science/ University of Mosul

### ABSTRACT

In this paper, the effect of piezoelectric parameters on the phonon focusing of some semiconductor cubic crystals has been studied. These properties has an evident effect on the transverse modes of the phonon focusing images for these crystals these effect is increased as the factor  $k_{44}$  of these crystals is increased. Numerically two methods for computing the phonon focusing images has been applied in this work, the first depends upon the detailed calculations of group velocity while the second method (suggested algorithm) depends upon the calculation of direction of group velocity from the slowness surface only, the suggested algorithm has been tested with piezoelectric and when the piezoelectric properties is ignored.

**Keywords:** phonon focusing, piezoelectric cubic crystals, calculation of phonon focusing for piezoelectric crystals.

---

### المقدمة

تعد الاهتزازات البلورية من المواضيع المهمة جدا في دراسة العديد من خصائص المواد الصلبة، فهي ترتبط بالخصائص الحرارية للمواد الصلبة مثل السعة الحرارية والتمدد الحراري. وتتأثر بعض الخصائص الكهربائية أيضا بالاهتزازات البلورية، ويمكن الحصول على معلومات مهمة عن المواد الصلبة من خلال دراسة الاهتزازات البلورية. وتعد تجارب النبضة الحرارية من الوسائل المهمة في دراسة المواد الصلبة، حيث نقل الاهتزازات البلورية بشكل كبير، عند درجات الحرارة الواطئة، وعند تسليط النبضة

الحرارية تتولد الموجات المرنة (الفونونات) في البلورة وتنتشر في جميع الاتجاهات بشكل قذفي أي بدون استقطار حيث تتولد الموجات في جميع الاتجاهات وتنتشر دون إعاقة (Wolfe, 1998). عرفت تجارب النبضة الحرارية منذ عقود (Von Gutfeld and Nethercot, 1964) حيث يتم توليد هذه النبضات بشكل تيار كهربائي مؤقت يمر بدائرة كهربائية في احد جوانب البلورة (Northrop and Wolfe, 1979) أو بشكل نبضة ليزر على نقطة في البلورة التي تكون عادة في درجات حرارة واطئة وذلك للحصول على انتشار للفونونات بدون استقطار في البلورة. والفونونات المنتشرة في البلورة تتأثر كثيرا بتباين الخواص لهذه البلورة فتمركز في اتجاه دون اتجاه آخر وتختلف سرعة الطور للفونون عن سرعة المجموعة اذ ترتبط سرعة المجموعة بتوزيع وانتقال الطاقة للموجة المنكونة (Northrop and Wolfe, 1980). ان التمركز الذي يحصل للفونونات يدعى بالتمركز الفونوني (Taylor *et al.*, 1971)، لقد درست ظاهرة التمركز الفونوني عمليا ونظريا من قبل العديد من الباحثين (Northrop and Wolfe, 1980; Hurley and Wolfe, 1985 ; Every, 1979; Every 1980) وفي العديد من الأنظمة البلورية المختلفة (Lau and McCurdy, 1998) يحتاج تمثيل صور التمركز الفونوني نظريا إلى حساب سطح التوهين و سطح سرعة المجموعة اللذين لهما علاقة بتوزيع تدفق الطاقة في الفضاء الحقيقي. كذلك يمكن حساب التمركز الفونوني نظريا عن طريق إجراء المحاكاة من خلال تكوين نقاط في منطقة برليون المختزلة وباستخدام طريقة مونت كارلو إذ تعد هذه الطريقة من الطرائق العددية المهمة التي تأخذ تطبيقات واسعة في العديد من مجالات الفيزياء وتستخدم في إجراء المحاكاة للعديد من الظواهر (Every *et al.*, 2013; Wolfe, 1998; Gańcza and Paszkiewicz, 1995).

بعض البلورات تمتلك خاصية البيزوكهربائية وهذه الخاصية هي ظهور مجال كهربائي محتث نتيجة تسليط إجهاد على البلورة وقد اكتشفت الظاهرة العكسية أي ظهور الإجهاد على البلورة نتيجة تسليط مجال كهربائي خارجي على البلورة. في البلورات البيزوكهربائية هناك اقتران بين متغيرات المرونة ومعاملات البيزوكهربائية وهذا الاقتران يكون له تأثير كبير على طاقة الفونون حيث هناك مجال كهربائي يؤدي إلى تولد إجهاد وتؤثر هذه الخصائص المرتبطة بين المجال الكهربائي وثوابت المرونة ومعاملات البيزوكهربائية على الخصائص الأخرى للبلورة. إذ تتأثر سرعة الموجة المرنة بهذه العوامل. فقد تم دراسة هذه الخصائص في العديد من الأنظمة البلورية مثل الرباعي القائم والمعين القائم والثلاثي والسداسي (Winternheimer and McCurdy, 1978; Zubritski, 1997; Lau and McCurdy, 1998)، كما درست بعض البلورات المكعبة التي تمتلك خصائص بيزوكهربائية (George *et al.*, 1997). حيث تم حساب الصور الفونونية لهذه البلورات عمليا ونظريا. أما البلورات المكعبة فقد درست بشكل موسع وحسبت الصور الفونونية لها من قبل (Every *et al.*, 2013; Wang, 2008; Every, 1979; Jacob and Viswanathan 1978) وذلك بتطبيق الطريقة التقليدية لحساب الصور الفونونية من خلال تكوين نقاط عشوائية نظامية في الفضاء  $k$  ومن ثم تحويل هذا الفضاء الى فضاء سرعة المجموعة. وتم أيضا استخدام طريقة مونت كارلو لتوليد المتجهات في فضاء منجه 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. حسابيا فقد افترضت طريقة مختصرة لحساب الصور الفونونية من قبل (Hussien and Khalil, 2012) لبلورات المعين القائم و (Khaleel and Hussien, 2010) لبلورات المعين القائم والمكعبة. تعتمد هذه الطريقة على حساب الصور الفونونية من خلال حساب سطح التوهين دون الحساب التفصيلي لسرعة المجموعة. إن الهدف الأساسي في هذه الدراسة التعرف على تأثير معاملات البيزوكهربائية على الصور الفونونية لبلورات أشباه الموصلات المكعبة وذلك باستخدام طريقتين حسابيتين الأولى تعتمد على حساب سرعة المجموعة أما الثانية فتعتمد على حساب اتجاه سرعة المجموعة.

### الجزء النظري

يمكن نظريا إيجاد سرعة الطور للموجة المرنة داخل البلورة من خلال حل معادلة كريستوفل وهي علاقة تربط بين سرعة الطور وثوابت المرونة للبلورة ويمكن وضع معادلة كريستوفل بالصيغة الآتية (Wolfe, 1998):

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

حيث ان  $\Gamma_{ik}$  ممتدة المرونة وتساوي  $\Gamma_{ik} = c_{ijkl} n_j n_l$  وثابت للبلورة و  $n_j$  و  $n_l$  هما الوحدة الاتجاهية لمتجه الموجة في الاتجاه  $j$  و  $l$  على التوالي ،  $v$  سرعة الطور في البلورة و  $\rho$  كثافة البلورة و  $\delta_{ik}$  دالة ديراك. حل المعادلة هذه يعطي متجه سرعة الطور ولأنماط الثلاثة الطولية والمستعرضة السريعة والمستعرضة البطيئة وتعتمد قيمة سرعة الطور  $v$  في البلورة على متجه الموجة  $(k_x, k_y, k_z)$  اذ اهم ما يميز البلورات ان خصائصها تعتمد على الاتجاه اي هي دالة لمتجه الموجة. يمكن كتابة معادلة كريستوفل في البلورات كما يلي:

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

ويمكن الربط بين متجه الموجة  $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  و الوحدة الاتجاهية  $\vec{n}$  حيث  $\vec{k} = k\vec{n}$  لذا فان المركبة  $j$  للوحة الاتجاهية  $n_j$

$$n_j = \frac{k_j}{|\vec{k}|} \quad (3)$$

في نظام المكعب ونتيجة للتناظر يمكن تمييز ثلاثة ثوابت مستقلة للمرونة هي  $c_{11}, c_{12}, c_{44}$  ، يمكن تطبيق معادلة كريستوفل على البلورات المكعبة حيث يتم تحديد عناصر ممتدة المرونة  $\Gamma_{ik}$  والتي تساوي (Royer and Dieulesaint, 2000):

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

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

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

$$\Gamma_{12} = (c_{12} + c_{44})n_1n_2 \quad (7)$$

$$\Gamma_{13} = (c_{12} + c_{44})n_1n_3 \quad (8)$$

$$\Gamma_{23} = (c_{12} + c_{44})n_2n_3 \quad (9)$$

بفتح محدد معادلة كريستوفل يمكن الحصول على معادلة متائية لـ  $\rho v^2$ :

$$\begin{aligned} \Omega(\omega, k) = & -(\rho v^2)^3 + (\rho v^2)^2[\Gamma_{11} + \Gamma_{22} + \Gamma_{33}] \\ & - \rho v^2[\Gamma_{11}\Gamma_{22} + \Gamma_{22}\Gamma_{33} + \Gamma_{11}\Gamma_{33} - \Gamma_{12}^2 - \Gamma_{13}^2 - \Gamma_{23}^2] \\ & + [\Gamma_{11}\Gamma_{22}\Gamma_{33} + 2\Gamma_{12}\Gamma_{13}\Gamma_{23} - \Gamma_{11}\Gamma_{23}^2 - \Gamma_{22}\Gamma_{13}^2 \\ & - \Gamma_{33}\Gamma_{12}^2] \end{aligned} \quad (10)$$

بحل هذه المعادلة يمكن إيجاد سرعة الطور ولأنماط الثلاثة. اما الحصول على سرعة المجموعة فإننا نستخدم الاشتقاق الضمني لمفكوك معادلة كريستوفل للحصول على صيغة سرعة المجموعة (Auld, 1973):

$$v_{gj} = \frac{\partial \omega}{\partial k_j} = - \frac{\nabla_{kj} \Omega}{\partial \Omega / \partial \omega} \quad (11)$$

والتي تعطي المركبة  $j$  لسرعة المجموعة  $v_g$  ، هنا  $j = 1, 2, 3$  تمثل المركبات الثلاثة x, y, z.

في البلورات المكعبة يمكن إدخال تأثير الخصائص البيزوكهربائية على معادلة كرسنوفل من خلال تعديل ممتدة كرسنوفل  $\Gamma_{ij}$  والتي يمكن وضعها بالصورة التالية (Royer and Dieulesaint 2000; Safari and Akdoğan, 2008):

$$\Gamma'_{ij} = \Gamma_{ij} + \frac{\gamma_i \gamma_j}{\epsilon} \quad (12)$$

هنا  $\Gamma'_{ij}$  هي ممتدة كرسنوفل المعدلة التي تشمل اضافة الخصائص البيزوكهربائية و  $\Gamma_{ij}$  هي ممتدة كرسنوفل بدون تأثير البيزوكهربائية و  $\epsilon$  ثابت العزل للبلورة والذي يساوي

$$\epsilon = \epsilon_{ij}^s n_i n_j \quad (13)$$

في حالة البلورات المكعبة تأخذ صيغة ثابت العزل الصيغة التالية

$$\epsilon = \epsilon_{11}^s (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) \quad (14)$$

اما الممتدة  $\gamma_i$  فإنها تساوي

$$\gamma_i = e_{ikj} n_i n_j \quad (15)$$

والصيغة الصريحة لممتدة كرسنوفل بوجود خصائص البيزوكهربائية للبلورة المكعبة هي :

$$\Gamma'_{11} = \Gamma_{11} + \frac{\gamma_1^2}{\epsilon} \quad (16)$$

$$\Gamma'_{22} = \Gamma_{22} + \frac{\gamma_2^2}{\epsilon} \quad (17)$$

$$\Gamma'_{33} = \Gamma_{33} + \frac{\gamma_3^2}{\epsilon} \quad (18)$$

$$\Gamma'_{12} = \Gamma_{12} + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\epsilon} \quad (19)$$

$$\Gamma'_{13} = \Gamma_{13} + \frac{\gamma_1 \gamma_3}{\epsilon} \quad (20)$$

$$\Gamma'_{23} = \Gamma_{23} + \frac{\gamma_2 \gamma_3}{\epsilon} \quad (21)$$

### طريقة الحساب (الخوارزمية المقترحة)

في هذا البحث تم تطبيق طريقة حسابية مختصرة للحصول على الصور الفونونية في البلورات المكعبة، حيث تم تطبيق هذه الخوارزمية على بلورات من النظام المعيني القائم (Hussien and Khalil, 2012) وعلى بلورات النظام السداسي والرباعي القائم (Hussien, 2014; Khalil, 2014). ولغرض تعميم هذه الطريقة لابد من تطبيق هذه الخوارزمية على البلورات المكعبة بوجود وعدم وجود الخصائص البيزوكهربائية. تعتمد الخوارزمية المطبقة في هذا البحث على تكوين مجموعة كبيرة من النقاط في فضاء متجه الموجة  $\{\vec{k}\}$  في داخل منطقة برليون المختزلة وهذه المنطقة تشكل  $\frac{1}{48}$  من فضاء متجه الموجة الكلي. وقد تم هذا الاختيار للاستفادة من اعتبارات التناظر في هذه البلورات وهذه الميزة تقلل وقت تنفيذ البرنامج الذي يعتمد هذه الخوارزمية بنسبة  $\frac{1}{48}$  ايضا من زمن تنفيذ البرنامج على كافة نقاط الفضاء الكلي. مع تكوين هذه النقاط في المنطقة المختزلة  $\{\vec{k}\}$  تكون مجموعتين أخرى من النقاط  $\{\vec{k}_1\}$  و  $\{\vec{k}_2\}$  بحيث نحصل لكل نقطة في فضاء متجه الموجة على نقطتين مجاورة لها تبعد مسافة زاوية معينة مقدارها  $\delta\phi$  في اتجاهين مختلفين، الغرض من ذلك حساب سرعة الطور و سطح التوهين لهذه النقاط الثلاثة لغرض الاستفادة منها في تحديد متجه سرعة المجموعة المقابلة لكل نقطة من  $\{\vec{k}\}$  والذي يكون عمودي على سطح التوهين. وتفاصيل الطريقة تم التطرق لها في بحث سابق لبلورات المعيني القائم (Hussien and Khalil, 2012).

### النتائج و المناقشة

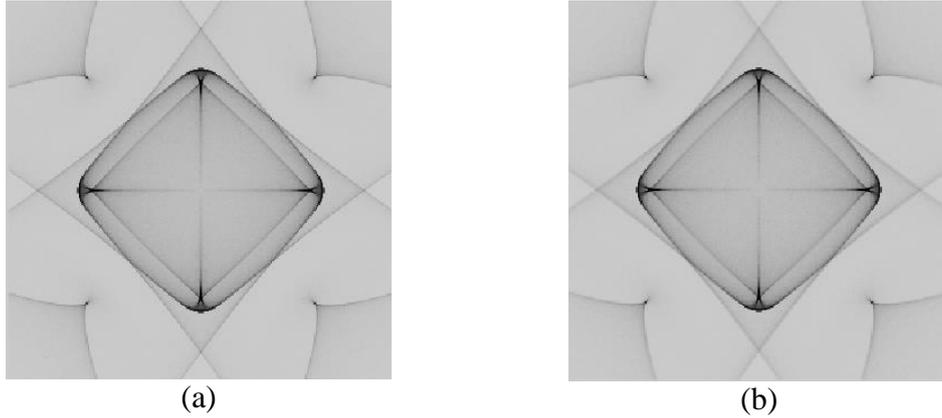
للحصول على الصور الفونونية في البلورات المكعبة حسابيا نكون أعداد كبيرة جدا من النقاط في فضاء متجه الموجة في منطقة برليون المختزلة ونحول جميع هذه النقاط إلى فضاء متجهات سرعة المجموعة ومن ثم يتم إسقاط متجهات سرعة المجموعة باتجاه معين، ولكي نحصل على صورة حسابية واضحة المعالم يتم ذلك باختيار حجم معين للصورة  $256 \times 256$  ومن ثم إسقاط هذه المتجهات وتمثل ذلك بمصفوفة  $256 \times 256$  يمثل الوسم موقع النبضة يتم إسقاط جميع المتجهات على الصورة فعند وصول أكثر من نبضة على المكان نفسه يضاف إلى قيمة ذلك الوسم بمقدار واحد لذا نحصل سطح ثلاثي الأبعاد بعدين للمسافة والبعد الثالث الذي يمثل الشدة. تحول الشدة إلى سويات رمادية وبذلك يمكن الحصول على الصورة الناتجة، ويمكن أن تعرض الصورة بحيث تمثل الشدة العالية باللون الأسود والشدة الواطئة باللون الأبيض (ويمكن أن يكون العكس أي الشدة العالية تمثل باللون الأبيض أما الشدة الواطئة تمثل باللون الأسود).

لغرض بيان كفاءة الخوارزمية المطبقة في هذا البحث تم إجراء مقارنة بين هذه الطريقة والطريقة التقليدية التي تقوم على حساب سرعة المجموعة  $v_g$  معادلة (11) وهذه الطريقة تتطلب حسابات رياضية مطولة للحصول على الصيغة النهائية لسرعة المجموعة  $v_g$ . يبين الشكل (1) الصور الفونونية لبلورة CuCl من الاتجاه 100 وتم اختيار هذه البلورة كونها تمتلك معاملات بيروكهربائية ومن هذه المقارنة بينت النتائج تطابق كبير بين نتائج الطريقتين، ولتوضيح تأثير البيزوكهربائية لبلورة CuCl فقد تم حساب هذا التأثير على الصور الفونونية فقد حسبت هذه الصور باستخدام الطريقة المقترحة وبيين الشكل (2) الصور الفونونية المحسوبة في هذه الدراسة للنمطين المستعرضين بإهمال معاملات البيزوكهربائية (a) و (c) وللنمطين  $T_1$  و  $T_2$  على التوالي ومن الاتجاه 100 وبوجود البيزوكهربائية (b) و (d) وللنمطين  $T_1$  و  $T_2$  على التوالي من نفس الاتجاه 100. ومقارنة نتائج البحث مع نتائج (Every and McCurdy 1987) لنفس البلورة CuCl حيث يبين الشكل (2-e) النمطين المستعرضين بإسقاط قطبي من الاتجاه 100 بإهمال تأثير البيزوكهربائية. أما الشكل (2-f) بوجود معاملات البيزوكهربائية. ويتبين من الشكل (2) مدى التطابق بين الطريقة المستخدمة في الدراسة مع نتائج (Every and McCurdy 1987). ويمكن ملاحظة تأثير

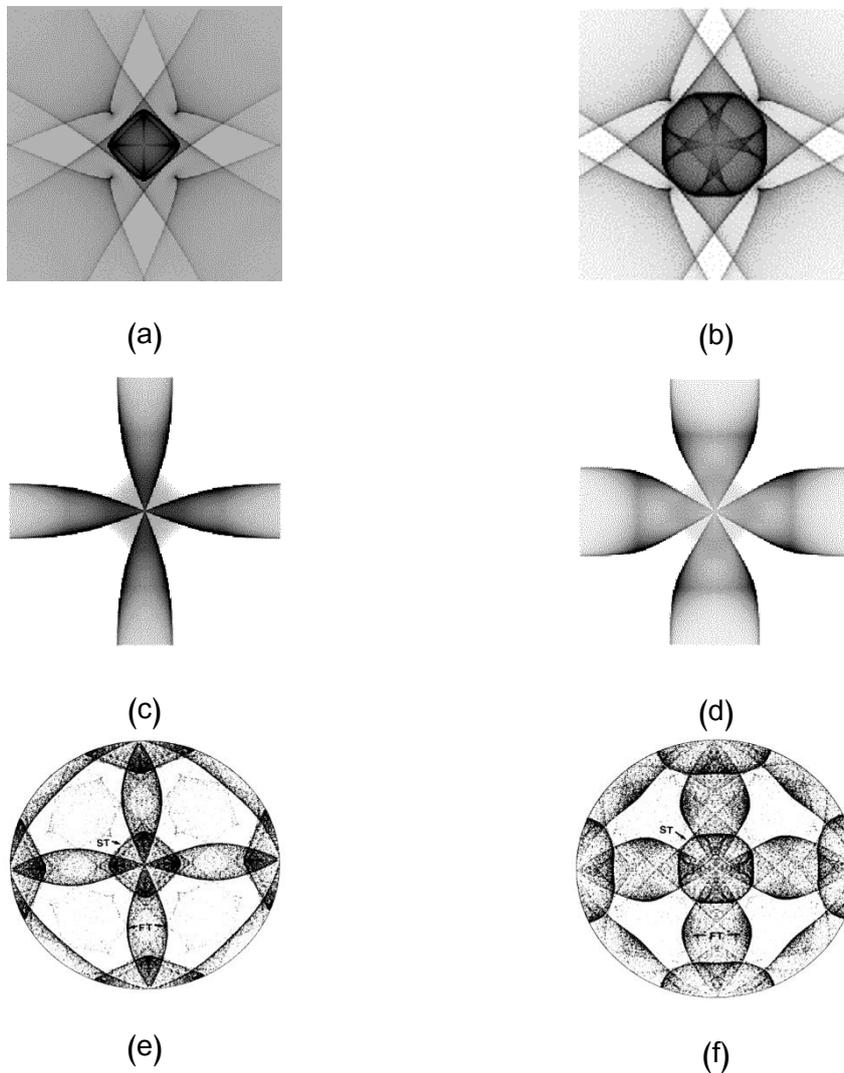
البيزوكهربائية على بلورة CuCl وذلك باتساع المنطقة ذات الشدة العالية من الاتجاه 100 ولكلا النمطين  $T_1$  و  $T_2$  ويعزى سبب هذا الاتساع إلى القيمة العالية للمعامل  $k_{44}$  لهذه البلورة حيث  $k_{44} = \sqrt{\frac{e_{14}^2}{\epsilon_{11}^2 \epsilon_{44}}}$  وهذا المعامل يبين مدى تأثير معاملات البيزوكهربائية على البلورة.

### تأثير معاملات البيزوكهربائية على بلورات اشباه الموصلات

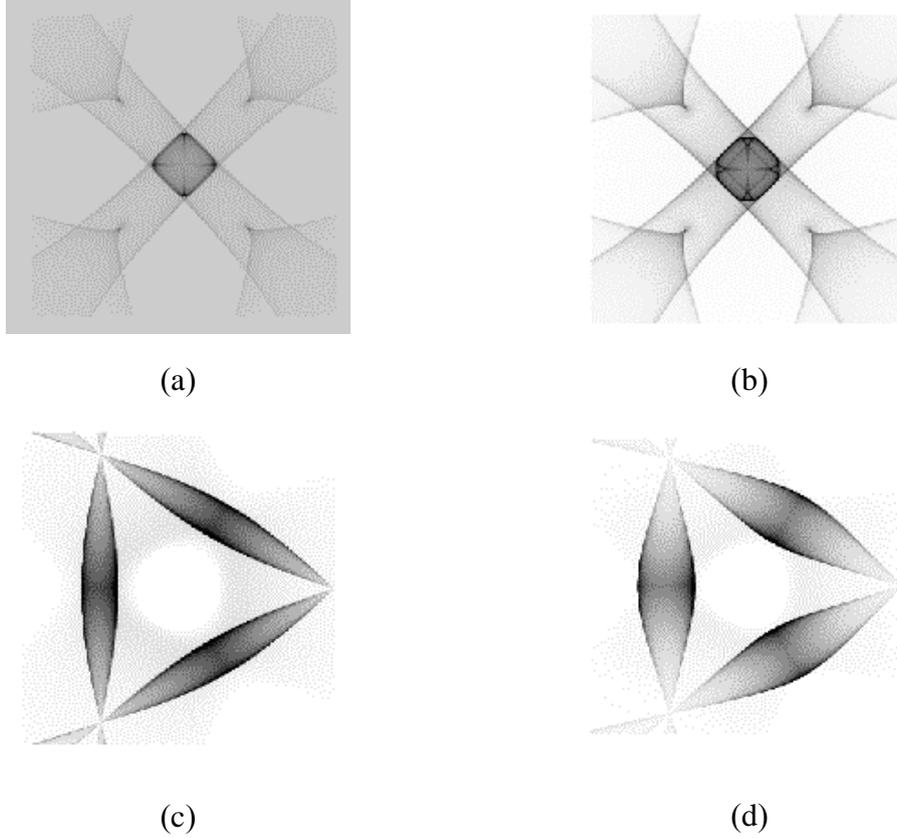
استخدمنا الطريقة المقترحة في هذه الدراسة لبيان تأثير معاملات البيزوكهربائية على بلورات أشباه الموصلات InAs، ZnS، InSb و يبين الشكل (3) الصور الفونونية لبلورة InAs (a) للنمط المستعرض  $T_1$  من الاتجاه 100 بإهمال معاملات البيزوكهربائية، (b) لنفس النمط ومن الاتجاه 100 وبوجود تأثير البيزوكهربائية، أما النمط المستعرض الثاني  $T_2$  فقد اخذنا المسقط من الاتجاه 111 اذ يبين الشكل (3-c) هذا النمط بإهمال تأثير البيزوكهربائية و (d) بوجود تأثير الخصائص البيزوكهربائية. في حين بين الشكل ان (4) الصور الفونونية المحسوبة لبلورة InSb (a) للنمط  $T_1$  بإهمال معاملات البيزوكهربائية و (b) بوجود تأثير البيزوكهربائية في حين ان النمط الثاني  $T_2$  (c) بإهمال تأثير البيزوكهربائية و (d) بوجود تأثير البيزوكهربائية. أما الصور الفونونية للبلورة ZnS فهي موضحة في الشكل (5) (a) و (b) للنمط المستعرض  $T_1$  و (c) و (d) للنمط المستعرض  $T_2$  بإهمال وجود معاملات البيزوكهربائية على التوالي.



الشكل 1: الصور الفونونية لبلورة CuCl من الاتجاه 100 (a) الطريقة التقليدية (b) الخوارزمية المقترحة.

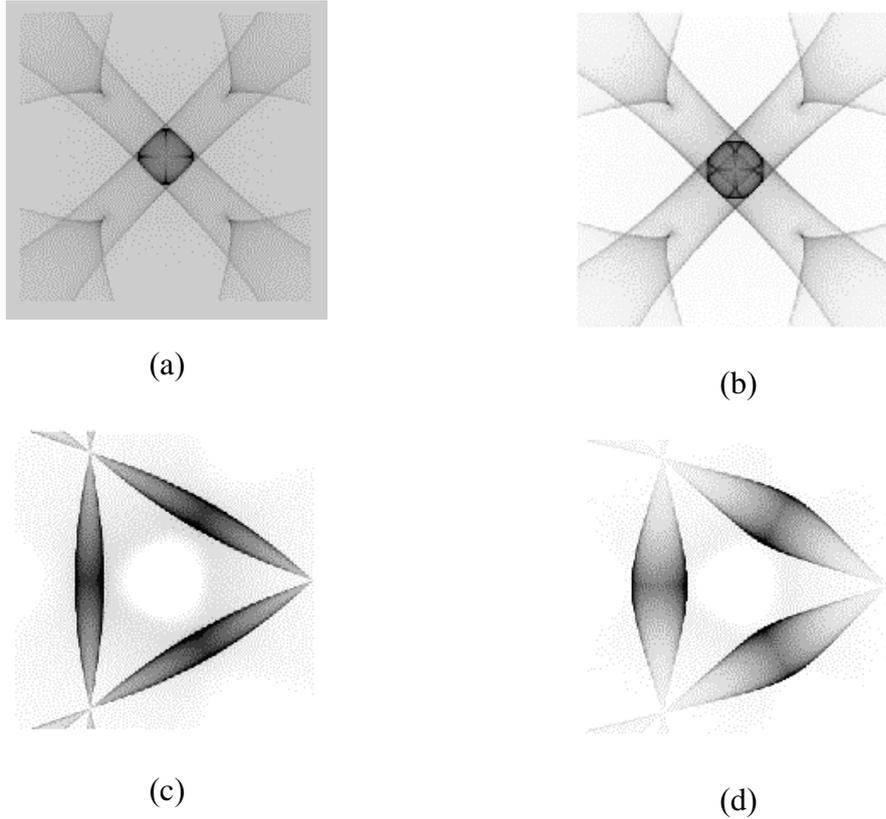


الشكل 2: مقارنة الصور الفونونية لبلورة CuCl نتائج الدراسة الحالية: بإهمال معاملات البيزوكهربائية (a,c) للنمطين المستعرضين  $T_1$  و  $T_2$ ، و بوجود معاملات البيزوكهربائية. (b,d) للنمطين المستعرضين  $T_1$  و  $T_2$ . نتائج Every and McCurdy وللنمطين المستعرضين  $T_1$  و  $T_2$ . (e) بإهمال معاملات البيزوكهربائية. (f) بوجود معاملات البيزوكهربائية.



الشكل 3: الصور الفونونية لبلورة InAs من الاتجاه  $\langle 100 \rangle$  للنمط المستعرض  $T_1$  ومن الاتجاه  $\langle 111 \rangle$  للنمط المستعرض  $T_2$ ، (a) بإهمال البيزوكهربائية، (b) بوجود البيزوكهربائية، (c) بإهمال البيزوكهربائية، (d) بوجود البيزوكهربائية.

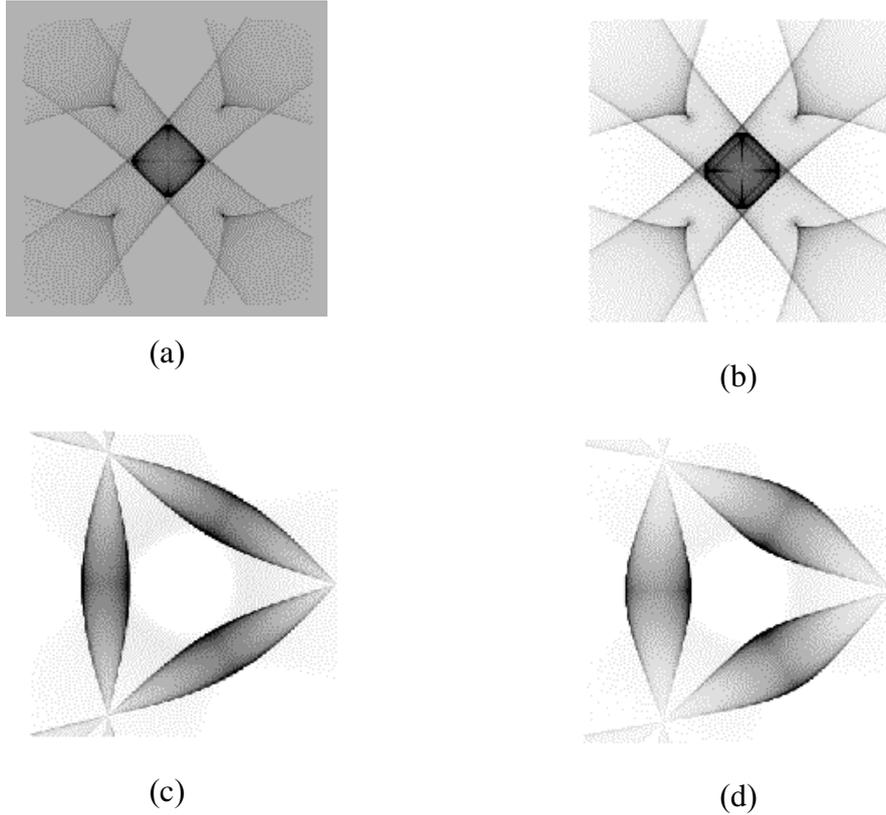
يلاحظ من هذه الأشكال (3)، (4) و (5) إن النمط  $T_1$  يكون اذرع بشدة عالية حول الاتجاه 100 مع وجود نمط توزيع بشكل معيني حول هذا الاتجاه وتمتد الأذرع من الاتجاه 100 الى الاتجاه 111 وكذلك إلى الاتجاهات المناظرة الأخرى. وهذا النمط يبدأ بالاتساع اي اتساع هذه الأذرع بوجود تأثير البيزوكهربائية، أما وسط الصور فيغير الشكل حيث تستدير زوايا هذا الشكل ويتحول إلى ما يشبه الدائرة وهذا الأمر يتفاوت بين البلورات الثلاث فيكون واضحا تماما في البلورة InSb واقل منه في InAs حين يكون ضعيف في ZnS ويعزى ذلك الى قيم  $k_{44}$  لهذه البلورات وموقع البلورة في فضاء اللاتماثل. أما النمط المستعرض  $T_2$  ففي البلورات الثلاث فان الشدة العالية لهذه البلورات تكون متباينة في حين تتسع هذه الشدات بوجود تأثير البيزوكهربائية وتكون اكبر حسب نوع البلورة فهي كبيرة لبلورة ZnS وبدرجة اقل للبلورات InAs و InSb.



الشكل 4: الصور الفونونية لبلورة InSb من الاتجاه  $\langle 100 \rangle$  للنمط المستعرض  $T_1$  ومن الاتجاه  $\langle 111 \rangle$  للنمط المستعرض  $T_2$ ، (a) بإهمال البيزوكهربائية، (b) بوجود البيزوكهربائية، (c) بإهمال البيزوكهربائية، (d) بوجود البيزوكهربائية.

#### الاستنتاجات

اظهرت النتائج التي حصلنا عليها في هذا البحث امكانية تطبيق الخوارزمية الجديدة المقترحة على البلورات المكعبة وكذلك تطبيقها على البلورات المكعبة التي تمتلك خصائص بيروكهربائية. حيث بينت النتائج تطابق الطريقة المقترحة مع حساب الصور الفونونية باستخدام خوارزمية تعتمد على الطريقة التقليدية، وايضا باستخدام الطريقة المقترحة حصلنا على نتائج متطابقة مع البحوث السابقة في حال وجود وإهمال تأثير البيزوكهربائية. الطريقة الحسابية المقترحة يمكنها ان تختزل الكثير من الحسابات في حساب سرعة المجموعة للبلورات المكعبة وتوفير الوقت في حساب الصور الفونونية من خلال اختزال الحساب التقليدي لسرعة المجموعة ومن خلال الاستفادة من العمليات التناظرية التي تقلل من الحساب الى  $\frac{1}{48}$  من الزمن الكلي. حيث اظهرت النتائج اتساع في مناطق الشدة العالية نتيجة تأثير خصائص البيزوكهربائية عن تلك المحسوبة بإهمال هذه الخصائص خاصة في النمط المستعرض  $T_2$  اكثر من النمط المستعرض  $T_1$ . وبينت النتائج ان المعامل  $k_{44} = \sqrt{\frac{e_{14}^2}{\epsilon_{11}^s C_{44}}}$  يعتبر مؤشر واضح لمدى تأثير خصائص البيزوكهربائية على الصور الفونونية.



الشكل 5: الصور الفونونية لبلورة ZnS من الاتجاه  $\langle 100 \rangle$  للنمط المستعرض T1 ومن الاتجاه  $\langle 111 \rangle$  للنمط المستعرض T2، (a) بإهمال البيزوكهربائية، (b) بوجود البيزوكهربائية، (c) بإهمال البيزوكهربائية، (d) بوجود البيزوكهربائية

#### المصادر

- Auld, B.A. (1973). "Acoustic Fields and Waves in Solids". Stanford University, Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc.
- Every, A.G. (1979). General, closed-form expression for acoustic waves in cubic crystals. *Phys. Rev. Lett.* **42**(16), 1065.
- Every, A.G. (1980). General closed-form expression for acoustic waves in elastically anisotropic solids, *Phy. Rev. B* **22**(4), 1746.
- Every, A.G.; Mazney, A.A.; Grill, W.; Pluta, M.; Comins, J.D.; Wright, O.B.; Matsuda, O.; Sachse, W.; Wolfe, J.P. (2013). Bulk and surface acoustic wave Phenomena in Crystals: observation and interpretation. *Wave Motion*, **50**(8), 1197-1217.
- Every, A.G.; McCurdy, A.K. (1987). Phonon focusing in Piezoelectric crystals. *Phys. Rev. B* **36**(3), 1433.
- Gańcza, W.M.; Paszkiewicz, T. (1995). Phonon focusing patterns: Monte Carlo simulation of the motion of ballistic phonon beams in cubic crystals. *Computer Physics Communications*, **85**(3), 423-436.
- George, E.P.; Gotthardt, R.; Otsuka, K.; Trolier-McKinstry, S.; Wun-Fogle, M. eds. (1997). "Materials Research Society Proceedings: Materials for Smart System II, Materials Research Society", **459**, Pittsburgh, PA.
- Hurley, D.C.; Wolfe, J.P. (1985). Phonon focusing in cubic crystals. *Phys. Rev. B* **32**(4), 2568.

- Hussien, M.M.S. (2014). An Algorithm for calculating the phonon imaging for tetragonal crystals. to be published in *Raf. J. Sci.*
- Hussien, M.M.S.; Khalil, M.A. (2012). A New Algorithm for calculating the phonon imaging for orthorhombic crystals. *Raf. J. Sci.*, **23**(4), 158-171.
- Jacob, P.; Viswanathan K.S. (1978). Phonon magnification in Cubic crystals. *Phys. Rev. B*, **17**(12), 4969.
- Khaleel, A.Z.; Hussien, M.M.S. (2010). Using Monte Carlo Method for calculating phonon images. *Raf. J. Sci.*, **21**(1), 73-89.
- Khalil, M.A. (2014). An Algorithm for calculating the phonon imaging for hexagonal crystals. to be published in *Raf. J. Sci.*
- Lau, K.; McCurdy, A.K. (1998). Elastic anisotropy factors for orthorhombic, tetragonal, and hexagonal crystals. *Phy. Rev. B*, **58**(14), 8980.
- Northrop, G.A.; Wolfe, J.P. (1979). Ballistic phonon imaging in solids-a new look at phonon focusing. *Phys. Rev. Lett.* **43**(19), 1424.
- Northrop, G.A.; Wolfe, J.P. (1980). Ballistic Phonon imaging in germanium. *Phys. Rev. B* **22**(12), 6196
- Royer, D.; Dieulesaint, E. (2000). "Elastic Waves in Solid I". Translated by David P. Morgan., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Safari, A.; Akdoğan, E.K. (eds). (2008). "Piezoelectricity and Crystal Symmetry for Transducer Applications". Springer Science Business Media, LLC.
- Taylor, B.; Maris, H.; Elbaum, C. (1971). Focusing of Phonons in crystalline solids due to elastic anisotropy. *Phys. Rev. B* **3**(4), 1462-1472.
- Von Gutfeld, R.J.; Nethercot, Jr. A.H. (1964). Heat pulses in quartz and sapphire at low temperature. *Phys. Rev. Lett.* **12**(23), 641-644.
- Wang, L. (2008). General analytical scheme for determine the characteristic caustic points in phonon focusing patterns of cubic Crystals. *IEEE international Ultrasonics Symposium proceedings.*
- Winternheimer, C.G.; McCurdy, A.K. (1978). Phonon focusing and Phonon conduction in orthorhombic and tetragonal crystals in the boundary scattering regime. *Phy. Rev. B* **18**(12), 6576.
- Wolfe, J.P. (1998). "Imaging Phonons, Acoustic Wave Propagation In Solids". University of Illinois at Urbana-champaign.
- Zubritski, V.V. (1997). Phonon focusing in CdSe, ZnS, and ZnO crystals. *Tech. Phys.* **42**(6), 639.