

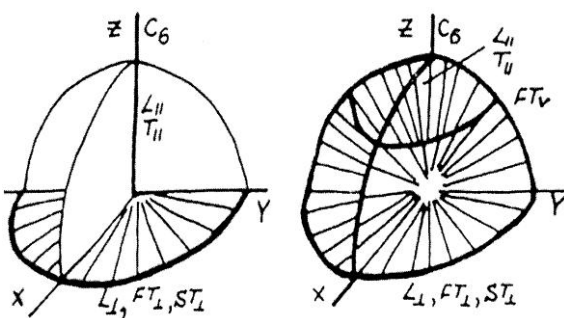
АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ПЬЕЗОСВОЙСТВА ϵ -GaSe

Г. И. АБУТАЛЫБОВ, С.З. ДЖАФАРОВА, Н.А. РАГИМОВА*

*Институт Физики АН Азербайджана
AZ 1143, г. Баку, пр. Г.Джавида, 33
Бакинский Государственный Университет*
AZ 1073, г. Баку, ул. З.Халилова, 23*

В данной работе представлены результаты исследования акустоэлектронного взаимодействия в кристаллах ϵ -GaSe. Обнаружено влияние освещения на скорость распространения и поглощения некоторых типов волн. Показано, что этот эффект обусловлен пьезовзаимодействием волны со свободными носителями заряда. На основании существующих теорий рассмотрено акустоэлектронное взаимодействие за счет пьезоэффекта в кристаллах $\bar{6}m2$. Проведенный анализ позволил по частотным и температурным зависимостям фоточувствительного поглощения определить константы электромеханической связи для разных типов волн и вычислить пьезомодуль e_{11} , характеризующий пьезоэлектрические свойства ϵ -GaSe. Наличие пьезоэффекта свидетельствует о существовании ионной составляющей в силах связи между атомами Ga-Se.

Нами было обнаружено влияние освещения на скорость распространения и поглощения некоторых типов акустических волн в ϵ -GaSe. Так как кристаллы ϵ -GaSe принадлежат к точечной группе симметрии $\bar{6}m2$ (Рис.1, [1]), допускающей существование пьезоэффекта, естественно предположить, что дополнительное поглощение и изменение скорости при освещении обусловлено пьезовзаимодействием акустической волны со свободными носителями заряда, концентрация которых зависит от освещения. Наличие фотороводимости сильно облегчает



наблюдение акустоэлектронного взаимодействия: изменяя светом концентрацию носителей, можно выделить дополнительный вклад в поглощение и скорость звука, как разность этих величин при освещении и без него.

Рис.1.

Направления чистых мод в кристаллах гексагональной симметрии.

Коэффициент поглощения акустических волн в полупроводниках можно представить в виде [2]

$$\alpha = \alpha_{\text{реш}} + \alpha_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{реш}}$ - коэффициент поглощения, обусловленный взаимодействием волны с тепловыми модами кристалла, а член

$$\alpha_{\text{эл}} = 4.34 \frac{\Delta c}{c v} \frac{\omega^2 \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad [\text{Дб/см}] \quad (2)$$

описывает вклад основных носителей в поглощение волны.

Дополнительное затухание $\alpha_{\text{эл}}$ и изменение скорости Δv вследствие пьезовзаимодействия акустической волны со свободными носителями заряда определяются проводимостью кристалла и его пьезоэлектрическими характеристиками – коэффициентом электромеханической связи $k = \frac{e}{\sqrt{\epsilon c}}$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость, e -эффективный пьезомодуль. Если проводимость кристалла в освещенном состоянии отличается от темновой незначительно, то

необходимо учитывать вклад свободных носителей в скорость распространения и поглощение волны и в неосвещенном кристалле. Тогда

$$\Delta\alpha = 4.34k^2 \frac{\omega^2}{v} \left(\frac{\omega c^2}{\omega^2 + \omega_{c2}^2} - \frac{\omega_{c1}}{\omega^2 + \omega_{c1}^2} \right) \quad [\text{Дб/см}], \quad (3)$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{k^2}{2} \left(\frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega_{c2}^2} - \frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega_{c1}^2} \right), \quad (4)$$

где ω_{c2} , ω_{c1} - частота максвелловской релаксации в освещенном кристалле соответственно равная $\omega_{c2} = \frac{\sigma_{cs}}{\varepsilon}$, $\omega_{c1} = \frac{\sigma_T}{\varepsilon}$, σ - проводимость. Диффузионным

членом qR (степень экранирования электростатических полей носителями заряда) в нашем диапазоне частот можно пренебречь из-за низкой подвижности носителей заряда в ε -GaSe [3], где R – дебаевский радиус экранирования.

Пьезоэлектрический тензор ε -GaSe характеризуется одной независимой компонентой (e_{11} или e_{22} - в зависимости от выбора системы координат) [4]. Если выбрать ось z , совпадающей по направлению с осью шестого порядка, ось x - совпадающей с одной из осей второго порядка, то независимой компонентой пьезоэлектрического тензора будет e_{11} [5].

Выражения для коэффициента электромеханической связи находятся из решения уравнения Кристоффеля с учетом пьезоэффекта [6]. Простой анализ показывает, что волны $L_{||}$ и $T_{||}$, распространяющиеся вдоль оси шестого порядка являются непьезоактивными. Для L_{\perp} - волны, распространяющейся в плоскости XU , имеем

$$\rho v^2 = c_{11} \left(1 + \frac{e_{11}^2}{\varepsilon_{11} c_{11}} \cos^2 3\varphi \right) \quad (5)$$

$$k_L^2 = \frac{e_{11}^2}{\varepsilon_{11} c_{11}} \cos^2 3\varphi,$$

где ρ - плотность кристалла, v - фазовая скорость волны.

Для FT_{\perp} - волны (волновой вектор и вектор поляризации лежат в плоскости XU)

$$\rho v^2 = C_{66} \left(1 + \frac{e_{11}^2}{\varepsilon_{11} c_{66}} \sin^2 3\varphi \right) \quad (6)$$

$$k_{FT}^2 = \frac{e_{11}^2}{\varepsilon_{11} c_{66}} \sin^2 3\varphi,$$

где φ - угол между направлением распространения и осью X .

Нетрудно видеть, что из полученных выражений для k_L^2 и $k_{FT_{\perp}}^2$ можно построить инвариантное относительно угла поворота φ выражение

$$\varepsilon_{11} (c_{11} k_L^2 + c_{66} k_{FT_{\perp}}^2) = e_{11}^2. \quad (7)$$

Это позволяет использовать для определения величины пьезомодуля e_{11} произвольное направление распространения в плоскости XU , при этом $|e_{11}|$ находится из (7), а характеризующий это направление угол φ можно определить по формуле

$$\varphi = \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{c_{66} k_{FT_{\perp}}^2}{c_{11} k_L^2}}. \quad (8)$$

Отметим, что в соответствии с рекомендациями по выбору направления осей координат в кристаллах $\bar{6}m2$ мы должны считать, что компонента e_{11} пьезоэлектрического тензора имеет положительный знак [5].

На Рис.2 приведены температурные зависимости темновой проводимости исследованного нами кристалла ϵ -GaSe и его фотопроводимости при различных уровнях освещения. Видно, что зависимость $\sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ имеет два участка с разной величиной наклона, соответствующие различным значениям энергии активации ($\Delta E_1 = 17\text{мэВ}$ и $\Delta E_2 = 41\text{мэВ}$). Эти значения являются типичными для GaSe и, судя по литературным данным, соответствуют примесным уровням [7]. Величина фоточувствительности имеет максимум в области температур 230К, что также соответствует известным данным [8].

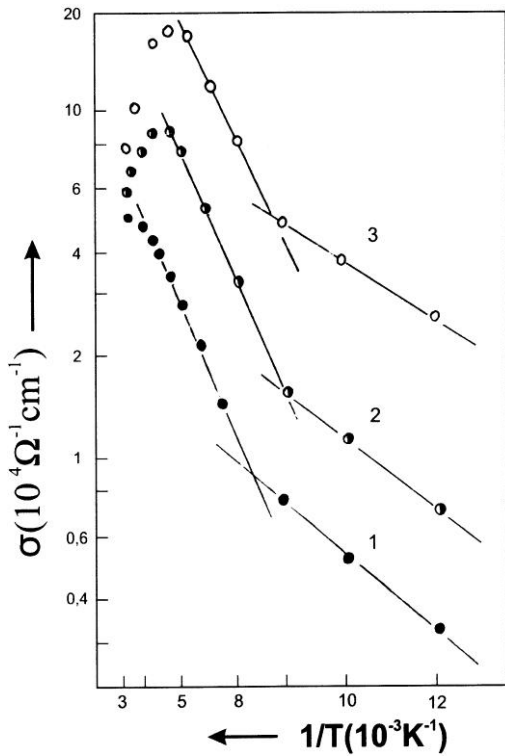


Рис.2.

Температурные зависимости темновой проводимости (1) и фотопроводимости(2,3) в ϵ -GaSe. (2) - 300К; (3) -77К.

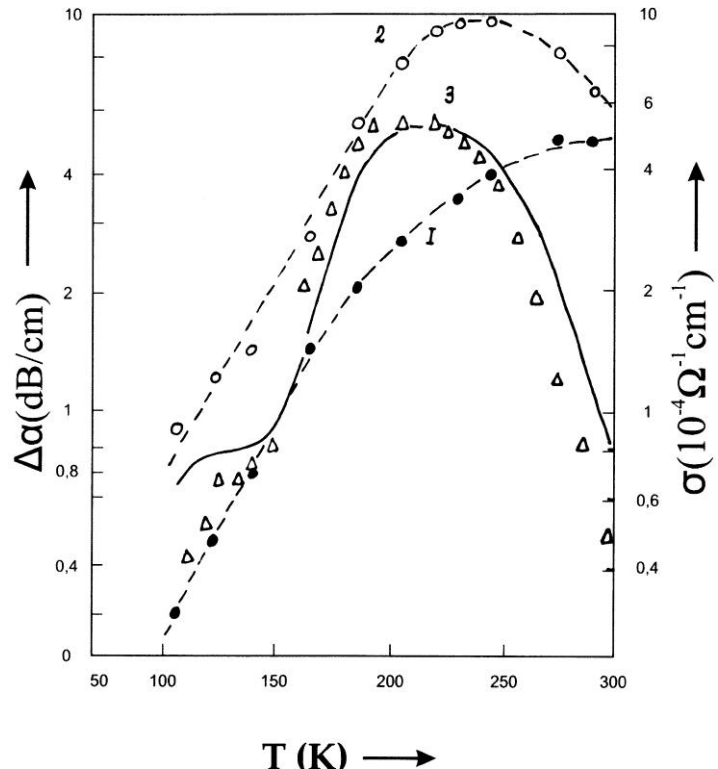


Рис.3.

Температурные зависимости темновой проводимости (1), фотопроводимости (2) и дополнительного поглощения волны L_{\perp} (3) в ϵ -GaSe, $f = 440\text{МГц}$. Сплошная линия – расчет.

В экспериментах были использованы волны $L_{||}$, L_{\perp} и FT_{\perp} . Измерения проводились в интервале температур $78\div 300\text{К}$ и в диапазоне частот $30\div 800\text{МГц}$. На Рис.3 и Рис.4 приведены температурные зависимости дополнительного поглощения продольной акустической волны L_{\perp} с частотой 440МГц и 635МГц при двух различных уровнях освещения. Сплошными линиями на Рис.2 и Рис.3 проведены зависимости $\Delta\alpha$, рассчитанные по (3) с использованием экспериментальных значений σ_T и σ_{CB} . Видно, что при $k_L^2 = 1.05 \cdot 10^{-3}$ наблюдается хорошее согласие рассчитанных и экспериментальных значений.

Аналогичным образом освещение влияло и на поглощение поперечной волны FT_{\perp} , в то время, как и следовало ожидать в случае непьезоактивной волны $L_{||}$ освещение не влияло на ее затухание.

На Рис.5 приведены частотные зависимости дополнительного поглощения волн L_{\perp} и FT_{\perp} в области высоких частот. Сплошными линиями проведены расчетные зависимости $\Delta\alpha$ по (3). Видно, что и для частотных зависимостей наблюдается хорошее согласие при $k_L^2 = 1.05 \cdot 10^{-3}$ для L_{\perp} - волны и $k_{FT_{\perp}}^2 = 0.75 \cdot 10^{-3}$ для FT_{\perp} - волны.

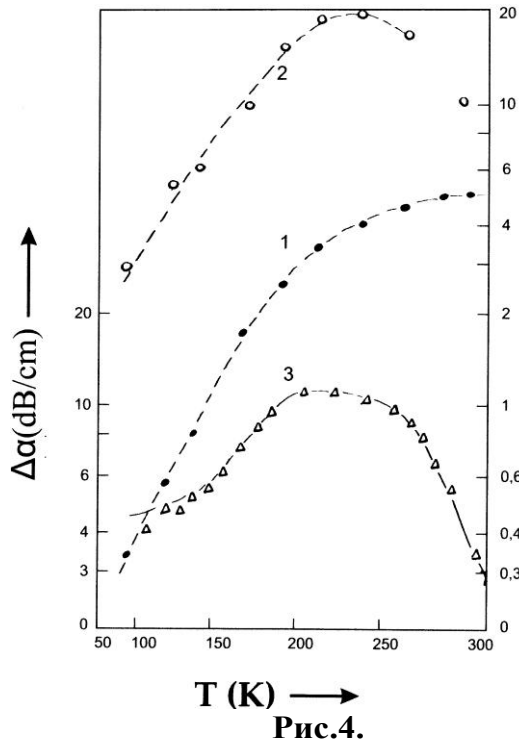


Рис.4.

Температурные зависимости темновой проводимости (1), фотопроводимости (2) и дополнительного поглощения волны L_{\perp} (3) в ε -GaSe, $f = 635$ МГц. Сплошная линия – расчетная.

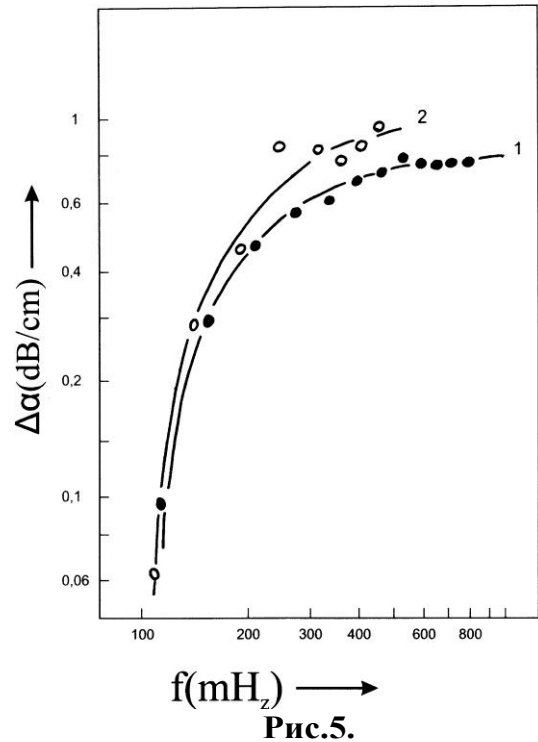


Рис.5.

Частотная зависимость дополнительного поглощения волн L_{\perp} (1) и FT_{\perp} (2) в ε -GaSe при 293К. Сплошная кривая – расчетная

Из (3) следует, что знак изменения α при освещении зависит от частоты: в области низких частот $w < \sqrt{w_{c1} \cdot w_{c2}}$ освещение должно не увеличивать, а уменьшать поглощение звука, что и наблюдается на опыте, (Рис.5), где представлена частотная зависимость $\Delta\alpha$ для обоих типов волн в относительных единицах, за единицу принято значение $\Delta\alpha$ при $w \gg w_{c2}$, то есть

$$(\Delta\alpha)_{\max} = 4.34k^2 \frac{w_{c2} - w_{c1}}{\nu}. \quad (9)$$

Таким образом, частотные и температурные зависимости дополнительного поглощения, вызванного освещением кристалла, могут быть полностью объяснены на основе пьезоэлектрического механизма взаимодействия волны со свободными носителями. Ниже будет показано, что характер изменения скорости распространения волн также подтверждает справедливость выдвинутого предположения о пьезоэлектрическом характере акустоэлектронного взаимодействия в ε -GaSe.

Подставляя экспериментальные значения $c_{11}, c_{66}, k_L, k_{FT_{\perp}}^2$ и $\varepsilon_{11} = 8,8 \cdot 10^{-11}$ Ф/М [8], получаем из (8) $e_{11} = 0,11$ Кл/м² и $\varphi = 9^{\circ}$. Последнее значение хорошо согласуется с $\varphi = 10^{\circ}$, полученным из рентгеновских данных.

Другим возможным способом определения констант электромеханической связи является исследование зависимости скорости пьезоактивных волн от освещения. Для этого измерялся (на частоте 30 МГц) сдвиг периода высоко-частотного заполнения радиоимпульса при освещении образца. Анализ выражения (4) показывает, что максимальное относительное изменение скорости будет при $w_{c1} \ll w \ll w_{c2}$. Это условие (для частоты акустических волн 30 МГц) приближенно выполняется только при низких температурах (< 100 К). И действительно, на опыте изменения скорости при 300 К не наблюдалось (вследствие малости k^2 и незначительного отличия σ_{CB} от σ_T), в то время как при 78 К оно оказалось вполне измеримым и составило $-5,6 \cdot 10^{-4}$ для L_{\perp} -волны и $-3,3 \cdot 10^{-4}$ для FT_{\perp} -волны, что при подстановке (4) дает значения $k_L^2 = 1,05 \cdot 10^{-3}$ и $k_{FT}^2 = 0,9 \cdot 10^{-3}$, согласующиеся с величинами k_L^2 и k_{FT}^2 , определенными из данных по поглощению. Значения k_L^2 из экспериментов по изменению скорости дают значение $e_{11} = 0,135 \text{ Кл/м}^2$, однако, на наш взгляд, значение $e_{11} = 0,11 \text{ Кл/м}^2$ более надежно, так как оно определено из сравнительного большого числа опытов в широком температурном диапазоне.

Существенно отметить, что наличие пьезоэффекта позволяет возбуждать определенные акустические волны в ϵ -GaSe без преобразователей, при помощи поверхностного возбуждения переменным электрическим полем, что также наблюдалось для обоих типов пьезоактивных волн в области низких частот ($f \leq 10 \text{ МГц}$).

Используя экспериментальное значение e_{11} можно вычислить константу электромеханической связи для любой волны, распространяющейся в произвольном направлении. Ориентационные зависимости величины k^2 , были получены численным решением уравнения Кристоффеля. При расчетах полагалось $c_{44} = 0,9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $c_{13} = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ [8], $\epsilon_{44} = 6,4 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}$ (среднее значение по данным [9]). Отметим, что наличие пьезоэффекта снижает поперечную упругую изотропию, характерную для кристаллов гексагональной симметрии, причем изменение модуля упругости c_{66} достаточно велико и должно учитываться при точных измерениях.

Возникновение пространственного заряда в ϵ -GaSe при деформации скорее всего связано с различным смещением подрешеток Ga и Se, следовательно, атомы Ga и Se обладают зарядами разных знаков и в связи Ga-Se существует определенная доля ионной составляющей, что необходимо учитывать при построении модели силовых взаимодействий в решетке ϵ -GaSe.

1. G.I. Abutalybov, S.Z. Dzhafarova, N.A. Ragimova, *3rd International conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, Turkey 29-31 May, (2006)* 823.
2. A.R. Hutson, D.L. White, *J. Appl. Phys.*, **33** (1982) 40.
3. R. Fivas, M. Mooser, *Phys. Rev.*, **163** (1967) 743.
4. Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская, *Основы кристаллофизики, Москва, «Наука»* (1975) 680.
5. Дж. Най, *Физические свойства кристаллов и их описание с помощью тензоров и матриц, Москва, «Мир»*, (1967) 385.
6. Э. Дылесан, Д. Руайе, *Упругие волны в твердых телах, Пер. с франц., Москва, «Наука»*, (1982) 424.
7. A.J. Keynot, *Appl. Phys. Lett.*, **73** (2002) 1702.

8. Y.Fujiwara, A.Koizumi, A.Urakami, T.Yoshikane, K.Inoue, Y.Takeda, *Materials Science and Engineering*, **B105** (2003) 57.
9. P.C.Leung, G.Andermann, W.G.Spitzer, C.A.Mood, *J. Phys. Chem. Sol.*, **27**(1966) 849.

ϵ -GaSe KRİSTALLARINDA AKUSTOELEKTRON QARŞILIQLI TƏSİR VƏ PEZOXASSƏLƏR

H.İ. ABUTALIBOV, S.Z. CƏFƏROVA, N.A. RƏHİMOVA

Təqdim olunan işdə ϵ -GaSe kristallarında akustoelektron qarşılıqlı təsirləri barədə tədqiqatların nəticələri göstərilmişdir. İşığın bəzi tip dalğaların yayılmasına və udulmasına olan təsiri aşkar edilmişdir. Göstərilmişdir ki, bu effekt dalğanın sərbəst yük daşıyıcıları ilə pezo qarşılıqlı təsirindən aslıdır. Nəzəri olaraq $\bar{6}m2$ kristallarında pezoэффект hesabına yaranan akustoelektron qarşılıqlı təsirə baxılmışdır. Aparılmış analiz fətohəssas udulmanın tezlik və temperatur asılılıqlarına görə müxtəlif tip dalğalar üçün elektromexanik əlaqə konstantlarını və ϵ -GaSe üçün piezoelektrik xassələri xarakterizə edən e_{11} piezomodulunu hesablamağa imkan verir. Pezoэффекtin olması Ga-Se atomları arasında əlaqə qüvvələrində ion hissələrin olmasına dəlalət edir.

ACOUSTOELECTRIC INTERACTION AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES IN ϵ -GaSe

H.I.ABUTALIBOV, S.Z.JAFAROVA, N.A.RAHIMOVA

The results of the investigation of the interaction in ϵ -GaSe crystals have been presented. It has been observed the illumination affects on propagation velocity and absorbtion of some various type waves. It has been shown that this effect has been connected with piezoelectric interaction of acoustic waves with free charge carriers. A theoretical calculation of the propagation velocity for piezoactive acoustic waves in $\bar{6}m2$ crystals has been accopmplished. On the basis of investigation of frequency and temperature dependances of the photosensitive absorbtion, piezoelectric characteristics for various type of acoustic waves in ϵ -GaSe have been determined and the piezomodule e_{11} has been calculated. The existing piezoeffect has been explained by definite ionic components in GaSe band.

Редактор: М.Курбанов