

# ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

---

# АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

---

---

PACS 72.20.Fr

DOI 10.18524/1815-7459.2016.4.86647

## PIEZOPHOTOCONDUCTIVITY SPECTRA OF SEMICONDUCTOR LAYERED CRYSTAL

*Y. Stakhira, R. Stakhira*

*Faculty of electronics and computer technology  
Ivan Franko National University of Lviv  
Lviv, Ukraine  
e-mail: stakhira@electronics.lnu.edu.ua*

## PIEZOPHOTOCONDUCTIVITY SPECTRA OF SEMICONDUCTOR LAYERED CRYSTAL

*Y. Stakhira, R. Stakhira*

**Abstract.** The results of investigations of piezophotoconductivity of layered crystals  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , conductivity component which is proportional to the product of the intensity of light and the mechanical stress, are presented. We analyzed the structural changes which are caused by crystal deforming force that has harmonic component of low frequency. It is shown that deforming force leads to a relative shift of the layers and to change a component period grating which is normal to the plane of the layers, which is implemented discretely. We analyzed changes in the structure of the electron states which are caused by the diffraction of Bloch waves created on the Bragg planes, as well as the removal of degenerate energy states of mechanical stress. We clarified the reasons for the time shift between the phases of deforming force and the current of piezophotoconductivity. We estimated aspects of practical application of the effect.

**Keywords:** piezophotoconductivity, layered crystals, layers' shift

## СПЕКТРИ П'ЕЗОФОТОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ ШАРУВАТОЇ СТРУКТУРИ

*Й. М. Стахира, Р. Й. Стахира*

**Анотація.** Приведено результати досліджень спектрів п'єзофотопровідності шаруватих кристалів  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , складової провідності пропорційної добутку інтенсивності світла на механічну напругу. Проаналізовано структурні зміни кристалу які зумовлені деформуючою силою яка має гармонічну складову низької частоти. Показано, що деформуюча сила призводить до відносного зсуву шарів і до зміни складової періоду ґратки нормальної до площини шарів, яка реалізується дискретно. Проаналізовано зміни у структурі електронних станів які зумовлені дифракцією Блохівських хвиль на створених Бреґівських площинах, а також на знятті виродження енергетичних станів механічною напругою. З'ясовано причини часового зсуву між фазами деформуючої сили і струмом п'єзофотопровідності. Оцінені можливості практичного використання ефекту.

**Ключові слова:** п'єзофотопровідність, шаруваті кристали, зміщення шарів

## СПЕКТРЫ ПЬЕЗОФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

*И. М. Стахира, Р. И. Стахира*

**Аннотация.** Приведены результаты исследований спектров пьезофотопроводимости слоистых кристаллов  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , составляющей проводимости пропорциональной произведению интенсивности света на механическое напряжение. Проанализированы структурные изменения кристалла обусловленные деформирующей силой которая имеет гармоничную составляющую низкой частоты. Показано, что деформирующая сила приводит к относительному сдвигу слоев и к изменению составляющей периода решетки нормальной к плоскости слоев, который реализован дискретно. Проанализированы изменения в структуре электронных состояний обусловленные дифракцией Блоховских волн на созданных Бреговских плоскостях, а также на снятии вырождения энергетических состояний механическим напряжением. Выяснены причины временного сдвига между фазами деформирующей силы и током пьезофотопроводимости. Оценены возможности практического использования эффекта.

**Ключевые слова:** пьезофотопроводимость, слоистые кристаллы, смещение слоев

### INTRODUCTION

Piezophotoconductivity of material is part of conductivity that is caused by the combined action of light and deformation and is proportional to the product of the intensity of light and mechanical stress. The spectral dependence of this component is formed by certain changes in the structure of electron states resulting deformation of the crystal irradiated with light [1]. In this paper we analyze

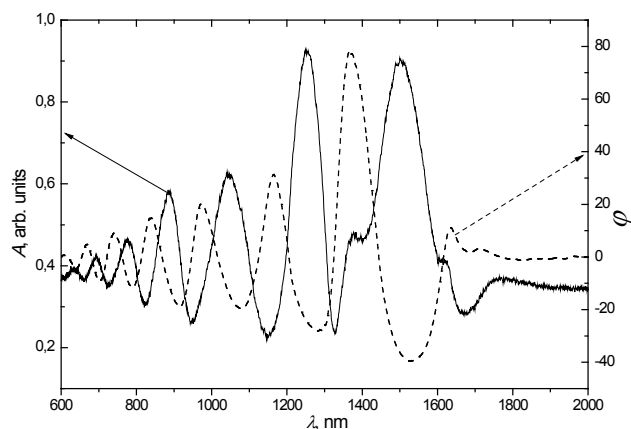
these changes occurring in semiconductor crystals of layered structure under the influence of the force which is the sum of a sustainable and harmonious part, low frequency  $\Omega$ , and light irradiation with light spectrum of interband absorption.

### EXPERIMENTAL

The basis for this review is the results of experimental studies of piezophotoconductivity in

$\text{In}_4\text{Se}_3$  layered crystals.  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals belong to the orthorhombic unit cell, contains 28 atoms, which are located in two neighboring layers. Single layer of crystal has a complex structure, between the atoms of In and Se are not the same type of chemical bonding forces that form structure in a shape the of the string, leading to a sharp anisotropy of the interaction between adjacent layers [2,3].

Figure 1 shows spectral dependencies of piezophotocurrent and photocurrent phase shift of piezophotocurrent relatively to modulating pressure phase. The spectra are measured in a mode of sample radiation by light with constant intensity and modulating low-frequency distortion. In the frequency range of light that corresponds to interband transitions, spectra of conductivity harmonic component, the frequency of which is equal to the modulating frequency, have oscillation nature. This is reflected in the regular placing in the range of absorption narrow spectral intervals of high piezophotocurrent value. In this spectral range spectral dependence of phase shift correlated with piezophotocurrent is realized and the phase shift also has oscillation character.



**Fig. 1. Spectra of piezophotocurrent and photocurrent phase shift relatively to phase of modulating pressure in  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals.**

Piezophotocurrent and phase shift spectra depends on the temperature of the sample, the initial pressure value and direction of layers' offset. Experimental studies have established that the structure of piezophotocurrent spectrum and its phase difference relatively to phase of modulating

pressure have oscillation character, spectral dependence of the phase shift clearly correlated with the energy dependence of piezophotocurrent.

The basic properties of piezophotocurrent spectra of  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals show that their implementation is due to significant changes in the electronic states caused by the combined action of deformation and light. It is assumed that such impact on the electronic system can be realized by small efforts that lead to shear deformation of layers in the layered crystals.

## DISCUSSION

Because of the anisotropy of chemical bond strength separate layer can be considered as an individual structural element whose properties remain unchanged under the influence of external fields. Layered crystal is considered as a system of weakly interacting planar nanostructures in which external deforming force leads to a relative shift between the layers, without significant changes in their structure. This distortion does not change the period of the grid in the plane of the layers ( $x, y$ ), but leads to a change in the period directly perpendicular to the plane of the layers (axis  $z$ ) [4,5].

We will analyze the frequency shift of layered crystal in a direction  $z$ , that is normal to the plane of the layers by force  $F = F_c + F_s \sin \Omega t$  which leads to a shift between adjacent layers at a distance  $L = L_c + L_s \sin \Omega t$ . Because of this deformation we can observe the change in lattice period  $d_z^0$ , which for the non-deformed crystal coincides with the thickness of the layer. In general, the period  $d_z$  of deformed crystal equal to number of displaced layers  $m$  in total length  $\sum_i L_i = d_{xy}$  which is equal to lattice period  $d_{xy}$  in the direction of shift,  $d_z = m d_z^0$ . Integer  $m$ , defining  $d_z$  depends on the shift value  $L$  which changes continuously.

Effective values of the impact of deformation on the electronic states correspond to small value  $m$ . Since  $m = \frac{d_{xy}}{L}$  can be integer can be an integer only for specified values  $L$  small values  $m$  is realized for fixed  $L$  value, for which  $d_{xy}$  is a multiple of the shift value. In the absence of such multiplicity, it can be reached for several periods  $N d_{xy}$ . In general case  $m = \frac{N d_{xy}}{L}$ , where  $N$  is the smallest integer for which  $m$  is an integer for given values  $d_{xy}$  i  $L$ .

Thus, at continuous change of shift value smallest values of grating periods  $d_z$  is implemented only for specified shift values. In between displacement  $L$ , which corresponds to the change of  $m$  in one large  $m$  values and ineffective  $d_z$  periods appear. The smallest  $m$  number corresponds to shift  $L = \frac{1}{2}d_{xy}$ .

Value of  $m$  and period  $d_z$  is discrete functions of time. The value of  $d_z$  period, which is formed with constant deforming force, can be reduced by harmonic component. Increase  $m$  by  $n$  units is realized by reducing the magnitude of  $L$  on

$$\Delta L = \frac{nL}{m+n}, \text{ or decrease } m \text{ by growing } L \text{ on } \Delta L = \frac{nL}{m-n}.$$

The values of these increases occur during the change of the time component of the shift in time  $t_+ = \frac{1}{\Omega} \arcsin \frac{1}{L_s} \frac{nL}{m+n}$  and  $t_- = \frac{1}{\Omega} \arcsin \frac{1}{L_s} \frac{nL}{m-n}$ , correspondingly,  $L_s$  is amplitude of shift harmonic component.

The variable component of the shift creates system of periods  $d_z$  with values that are implemented during the period of deformation force in a given time. Small value of  $m$  is realized for a few moments of shift change due to discrete and frequency nature of shift.

Shear strain between adjacent layers by a force which is the sum of the constant and harmonic components leads to changes in the interaction between the layers and the emergence of space-time deformation perturbation of undeformed crystal. In the case of low frequencies  $\Omega$  of distortion force, which allow consideration of a classic time changes, the impact of such field can be estimated by methods of perturbation theory. The results of this estimation indicate the possibility of a radical change of certain electronic states that are caused by the diffraction of Bloch waves on artificial Bragg planes or removing degenerate energy states by deformation field.

Significant changes in consequence of the removal of degeneracy undergo energy states whose wave vectors  $\mathbf{k}$  has  $k_z$  component, which is equal to a whole number of perturbation wave vectors  $q = n \frac{2\pi}{a_z}$ . The reason for these changes is the emergence of gaps in the functional dependence of energy on  $k_z$  components that manifests itself in a sharp change in the density of electronic states. Disturbing deformation field, which leads to the removal of degeneracy of electronic states leads to energy intervals depending on the en-

ergy of the wave vector, magnitude of which is set by changing the components  $k_z$  within  $\frac{2\pi}{a_z^0} \frac{L_c - L_s}{a_{xy}} < k_z < \frac{2\pi}{a_z^0} \frac{L_c + L_s}{a_{xy}}$ , which is realized in a given time.

## CONCLUSIONS

Deformation of the layer shear is carried by low frequency stress causes space-time disturbance during which potential consistently has in a given time controlled values, which leads to significant changes in the structure of electronic states. The value of the disturbance period is discrete time function that allows estimate times when energy states degenerate. This result coincides with the analysis of Bragg deformation of Bloch waves on planes that are formed by deformation, energy position is set by period  $q$ .

We shall note that the basic properties of the piezophotoconductivity spectra can make conclusions about the practical use of the effect in object recognition systems, on the base of the radiation spectral composition without dispersive elements.

## REFERENCES

- [1]. Stakhira J. M. Piezophotoconductive spectra in monopolar semiconductors / J. M. Stakhira, R. J. Stakhira // Journal of Physical Studies. – 1998. – Vol. 2, No 3. – P. 376–383. (in Ukrainian)
- [2]. Properties of the band structure of  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals / D. M. Bercha, O. B. Mitin, L. Y. Kharkhalis, A. I. Bercha // Physics of the Solid State. – 1995. – Vol. 37. – P. 1778–1781.
- [3]. Low energy unparabolicity and condensation states in  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals / D.M. Bercha, L.Yu. Kharkhalis, A.I. Bercha, M. Shnajder // Fiz. Tehn. Poluprovod. – 1997. – Vol. 31, No 11. – P. 1299–1303. (in Russian)
- [4]. Slipukhina I.V. Influence of shear strains and interstitials on the dispersion laws of  $\text{In}_4\text{Se}_3$  layer crystals / I.V. Slipukhina, L.Yu. Kharkhalis, I.V. Bercha // Uzhgorod University Scientific Herald. Series Physics. – 2006. – Vol. 19. – P. 14-19. (in Ukrainian)
- [5]. Stakhira J. M. Concentration Mechanism of Piezophotoconductivity / J. M. Stakhira, R. J. Stakhira, V. P. Savchyn // Ukrainian Journal of Physics. – 2005. – Vol. 50, No. 6. – P. 588–594.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2016 р.

## PIEZOPHOTOCONDUCTIVITY SPECTRA OF SEMICONDUCTOR LAYERED CRYSTAL

*Y. Stakhira, R. Stakhira*

*Ivan Franko National University of Lviv  
50 Dragomanova Str. Lviv, Ukraine  
e-mail: stakhira@electronics.lnu.edu.ua*

### Summary

The results of investigations of piezophotoconductivity of layered crystals  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , conductivity component which is proportional to the product of the intensity of light and the mechanical stress, are presented. We analyzed the structural changes which are caused by crystal deforming force that has harmonic component of low frequency. It is shown that deforming force leads to a relative shift of the layers and to change a component period grating which is normal to the plane of the layers, which is implemented discretely.

The spectra are measured in a mode of sample radiation by light with constant intensity and modulating low-frequency distortion. In the frequency range of light that corresponds to interband transitions, spectra of conductivity harmonic component, the frequency of which is equal to the modulating frequency, have oscillation nature. This is reflected in the regular placing in the range of absorption narrow spectral intervals of high piezophotoconductivity value.

The basic properties of piezophotoconductivity spectra of  $\text{In}_4\text{Se}_3$  crystals show that their implementation is due to significant changes in the electronic states caused by the combined action of deformation and light. It is assumed that such impact on the electronic system can be realized by small efforts that lead to shear deformation of layers in the layered crystals.

The basic properties of the piezophotoconductivity spectra can make conclusions about the practical use of the effect in object recognition systems, on the base of the radiation spectral composition without dispersive elements.

**Keywords:** piezophotoconductivity, layered crystals, layers' shift

PACS 72.20.Fr

DOI 10.18524/1815-7459.2016.4.86647

## СПЕКТРИ П'ЕЗОФОТОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ ШАРУВАТОЇ СТРУКТУРИ

*Й. М. Стахіра, Р. Й. Стахіра*

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Драгоманова 50, Львів, Україна  
e-mail: stakhira@electronics.lnu.edu.ua*

### Реферат

Приведено результати досліджень спектрів п'єзофотопровідності шаруватих кристалів  $\text{In}_4\text{Se}_3$ , складової провідності пропорційної добутку інтенсивності світла на механічну напругу. Проаналізовано структурні зміни кристалу які зумовлені деформуючою силою яка має гармонічну складову низької частоти. Показано, що деформуюча сила призводить до відносного зсуву шарів і до зміни складової періоду ґратки нормальної до площини шарів, яка реалізується дискретно.

Спектри виміряні в режимі опромінення зразка світлом постійної інтенсивності та модулюючої низькочастотної деформації. У діапазоні частот світла, який відповідає міжзонним переходам, спектри гармонічної складової провідності, частота якої рівна модулюючій частоті, мають осциляційний характер. Це проявляється у регулярному розміщенні, у діапазоні власного поглинання, вузьких спектральних інтервалів підвищеного значення п'єзофотопровідності.

Основні властивості спектрів п'єзофотопровідності кристалів  $\text{In}_4\text{Se}_3$  засвідчують, що їх реалізація обумовлена суттєвими змінами системи електронних станів викликаних спільною дією деформації і світла. Допускається, що такий вплив на електронну систему може здійснитись незначними зусиллями які призводять до деформації зсуву шарів у шаруватих кристалах.

Основні властивості спектрів п'єзофотопровідності дозволяють зробити висновки щодо практичного використання ефекту у системах розпізнавання об'єктів по спектральному складу випромінювання без використання деспергуючих елементів.

**Ключові слова:** п'єзофотопровідність, шаруваті кристали, зміщення шарів