

**АКУСТОФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ $InGaTe_2$ И $InGaSe_2$** **Введение**

В последние годы значительное количество работ посвящено изучению полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{VI}$ в связи с интересом к их особым физическим свойствам, природа химической связи в этих соединениях обуславливает специфические особенности, такие как слоистая и цепочечная структура, которые важны с фундаментальной и технологической точки зрения. В частности, слоистые кристаллы вызывают растущий интерес своим возможным оптоэлектронным применением [1]. Их особые оптические и фотоэлектрические свойства привлекают исследователей, пытающихся лучше разобраться в физических процессах, происходящих в этих соединениях. Халькогениды типа $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ являются представителями соединений типа $A^{III}B^{VI}$. Хотя в последние годы тройные соединения данного типа интенсивно изучаются, лишь незначительное число этих работ посвящено исследованию соединений $InGaSe_2(Te_2)$ [2, 3]. Эти соединения могут иметь широкую область применения, простирающуюся от использования в солнечных элементах до нелинейных оптических технологий. К тому же эти кристаллы могут быть легко интерполированы инородными ионами, атомами, молекулами, тем самым, предполагая реальные предпосылки для создания на их основе управляемых суперрешеток.

Эти соединения $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$ являются структурными аналогами, кристаллизуются в одной и той же тетрагональной сингонии, с параметрами решетки: $a=8.0511 \text{ \AA}$, $c=6.3174 \text{ \AA}$ и $a=8.3945 \text{ \AA}$, $c=6.8352 \text{ \AA}$ соответственно пространственная группа $I4/mcm$.

Цель работы – исследование фотоэлектрических свойств соединений $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$.

Методика эксперимента

При исследовании фотоэлектрических свойств соединений $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$ был обнаружен новый физический эффект, заключающийся в возникновении электродвижущей силы на концах ориентированного однородного пьезоэлектрического кристалла полупроводника под совместным воздействием на него равномерного электромагнитного излучения и звуковых волн, величина, полярность и область спектральной чувствительности которой управлялась частотой звуковой волны.

Исследования проводились на монокристаллических образцах толщиной 0,4 мм и шириной 1,3 мм двумя симметричными электродами, отстоящими друг от друга на $d=0,6 \text{ мм}$. Данный эффект выявлен и в твердых растворах на основе тройных соединений типа $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$

[4 – 6]. Излучатель звуковых волн устанавливался через короткий жесткий акустический контакт рис. 1. При отсутствии электромагнитного излучения и при воздействии или отсутствии звуковых волн отсутствовала заметная электродвижущая сила на электродах. Однако при одновременном воздействии света и звуковых волн появляется существенная ЭДС или постоянный ток при замыкании электродов. Выявлено, что величина возникающей акустофотовольтаической (АФВ) ЭДС зависит от интенсивности и спектрального состава света, а также от частоты и амплитуды звука, и может быть сведена к нулю абсолютным затемнением кристалла или же снятием воздействия акустических волн (рис. 1, а).

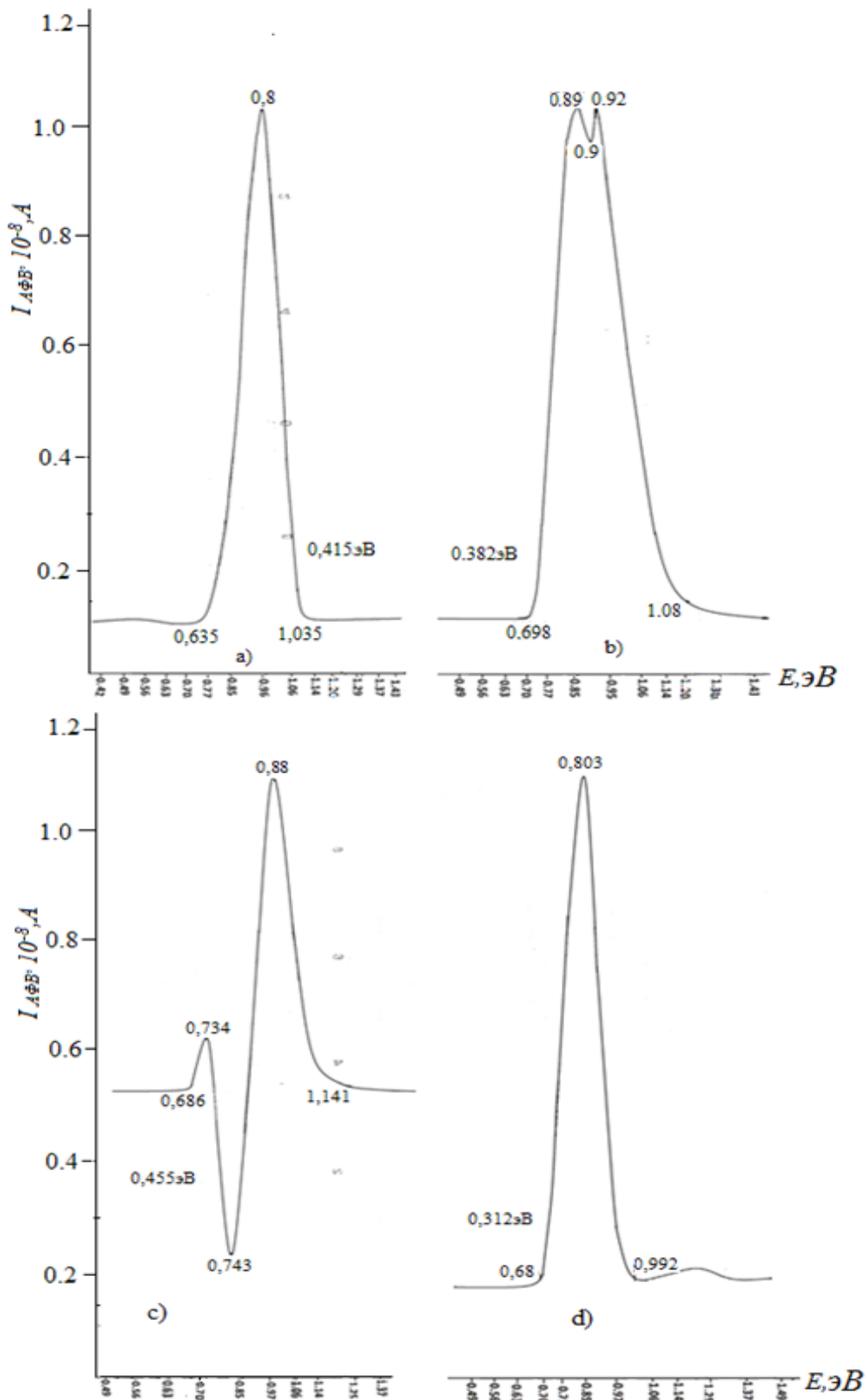


Рис. 1. Спектральное распределение тока короткого замыкания АФВ-эффекта при различных частотах: *a* – при частоте 0,35; *b* – 0,37 мГц; *c* – 0,4 мГц; *d* – 0,46 мГц

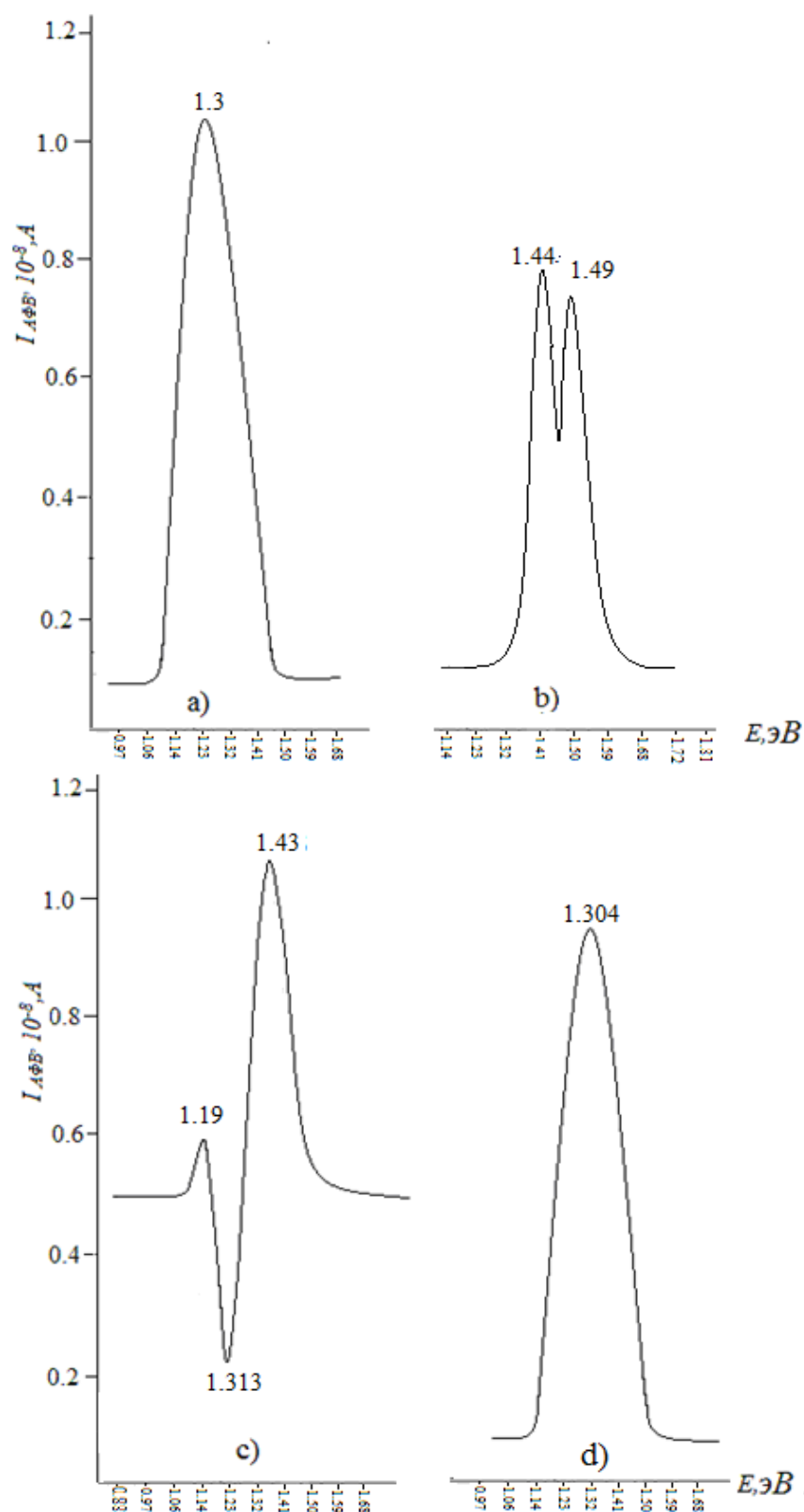


Рис. 2. Спектральное распределение тока короткого замыкания АФВ-эффекта при различных частотах: *a* – при частоте 0,42 МГц; *b* – 0,46 МГц; *c* – 0,52; *d* – 0,58 МГц

Исследования акустофотовольтаического эффекта $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$ проводились в интервале частот 0,3 – 0,6 МГц. Результаты приведены на рис. 1 и 2. Как следует из рис. 1, на спектре АФВ эффекта $InGaTe_2$ при значении частоты 0,35 МГц наблюдается один яркий максимум при энергии 0,8 эВ, область спектральной чувствительности – 0,635 – 1,035 эВ.

С увеличением частоты звука до 0,37 МГц наблюдаются удвоенные ярко выраженные максимумы при энергиях 0,89 и 0,92 эВ и минимум при 0,9 эВ. Область спектральной чувствительности 0,698 – 1,08 эВ. С дальнейшим увеличением частоты звуковой волны до 0,40 МГц на спектре обнаруживаются яркие максимумы при энергиях 0,734 и 0,88 эВ и минимум при энергии 0,743 эВ. Инверсия знака тока короткого замыкания происходила при энергии 0,739 эВ, область спектральной чувствительности 0,635 – 1,035 эВ. При частоте звуковой волны 0,46 МГц выявлен яркий максимум при энергии 0,803 эВ, область спектральной чувствительности 0,68 – 0,992 эВ.

Результаты исследования АФВ в $InGaSe_2$ эффекта приводится на рис. 2. Как следует из рис. 2, а при частоте 0,42 МГц на спектре тока короткого замыкания наблюдается один ярко выраженный максимум при энергии 1,3 эВ, область спектральной чувствительности 1,04 – 1,5 эВ. При частоте 0,46 МГц (рис. 2, б) максимум удваивается. При энергиях 1,44 и 1,49 эВ наблюдались два максимума, при 1,48 эВ – яркий минимум, область спектральной чувствительности 1,32 – 1,59 эВ. При частоте 0,52 МГц интенсивность первого максимума уменьшается на 8 %, а второго максимума, наоборот, увеличивается на 14 %, минимум наблюдался при энергии 1,20 эВ (рис. 2, в). В дальнейшем, с увеличением частоты до 0,58 МГц (рис. 2, г) выявлен единственный максимум при энергии 1,304 эВ, область спектральной чувствительности 1,14 – 1,50 эВ.

В отличие от известных фотовольтаических эффектов [7] форма и характер спектральной зависимости тока короткого замыкания управляется мощностью и частотой акустических волн: с изменением взаимной ориентации кристаллографических осей материала полупроводника и действующих на него внешних волн, а также величиной межэлектродного расстояния, вариацией указанных выше факторов можно управлять спектральной характеристикой.

Наблюдаемый акустофотовольтаический (АФВ) эффект в определенном приближении можно частично рассмотреть как изменение известного акустоэлектрического эффекта под действием света, физическая суть самого АФВ эффекта сводится к возникновению в полупроводнике – вследствие увлечения носителей тока упругой волной [8, 9]. В области низких частот звуковой волны, т.е. при $ql = \frac{\omega_3}{v_z} l \leq 1$ (где ω_3 и v_z – частота и скорость звуковой волны, $l = v_T \cdot \tau \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ см – длина свободного пробега носителей тока), вследствие вступающего в силу квантово-механического соотношения неопределенностей теряет смысл взаимодействие индивидуальных электронов и приближение бесстолкновительной плазмы. Процессы при этом приобретают коллективный характер, со звуковой волной как с упругой волной в сплошной среде взаимодействуют с объемными зарядами.

Выражения для акусто-электрической ЭДС можно получить из соотношения между интенсивностью волны, т.е. плотностью потока энергии W_3 и переносимой ею механическим импульсом \vec{P} :

$$\vec{P} = \frac{W_z}{v_3} \vec{q}_0 \quad (1)$$

где \vec{q}_0 – единичный вектор в направлении звуковой волны. В результате поглощения упругой волны ее импульс передается электронам (дыркам) проводимости, что приводит к появлению некоторой средней силы, действующей на электроны и увлекающей их в направлении распространения волны. Поглощаемая энергия кристалла в тонком слое d_k на единицу площади, перпендикулярной q_0 , за единицу времени при этом составит $\gamma W_z dx$ где

γ – коэффициент поглощения, что согласно (1) соответствует получаемому импульсу $\frac{\gamma W_3 dx}{v_3} q_0$. Если приравнять этот импульс силе, действующей на $n_0 dx$ электронов внутри слоя, то получим:

$$-e \vec{E}_n^* n_0 dx = \frac{\gamma W_3 dx}{v_3} q_0,$$

где напряженность поля сторонних сил

$$\vec{E}_n^* = -\frac{\gamma W_3}{en_0 v_3} q_0 \quad (2)$$

Возникающая полная ЭДС в концах электронной полупроводниковой пластинки с длиной d

$$V_{aэ}^E(n_0) = -\int_0^d \vec{E}_n^* dx = -\frac{\gamma W_3}{en_0 v_3} d = -\frac{\gamma \mu_n W_3}{\sigma_n^T v_3} \quad (3)$$

В случае чисто дырочной проводимости аналогично электронам положительные дырки, при тех же условиях увлекаясь в направлении распространения звуковой волны, создают ЭДС противоположного знака:

$$V_{aэ}^T(p_0) = -\frac{\mu_p \gamma W_3}{\sigma_{op}^T v_3} d \quad (4)$$

А для случая полупроводника со смешанной проводимостью суммарная ЭДС

$$V_{aэ}^T(n_0; p_0) = -\frac{\gamma W_3}{v_3} \left(\frac{\mu_p}{\sigma_p^T} - \frac{\mu_n}{\sigma_n^T} \right) d \quad (5)$$

Таким образом, в зависимости от превалирующего типа проводимости, управляемого, в частности, интенсивностью и спектральным составом действующего на кристалл света, наблюдаемая при этом суммарная ЭДС и соответствующий ток короткого замыкания могут иметь как положительный, так и отрицательный знак. Имеющая место инверсия знака на спектральной зависимости тока короткого замыкания акустофотовольтаического эффекта отчасти может быть вызвана и этой причиной. Поскольку исследуемые кристаллы $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$ обладали дырочной проводимостью, вначале ограничимся рассмотрением случая с данным типом проводимости. Акустофотовольтаический эффект, обусловленный изменением акустоэлектрического эффекта при воздействии света, может быть представлен так:

$$V_{aфв}(p) = V_{aэ}^R(p) - V_{aэ}^T(p) = -\frac{\mu_p \gamma W_0 d}{v_3} \cdot \frac{\sigma_p^c - \sigma_p^T}{\sigma_p^c \cdot \sigma_p^T}.$$

Индексы «с» и «Т» соответствуют свету и темноте, учитывая, что

$$V_{aэ}^T(p_0) = -\frac{\mu_p \gamma W_a}{\sigma_p^T v_3} d \quad (6)$$

$$\Delta \sigma_{см}(\hbar \omega_c) = \sigma_p^c - \sigma_p^T,$$

получим

$$V_{aфк}(p) = -V_{aз}^T(p) \cdot \frac{\Delta\sigma_{см}(\Delta p)}{\sigma_p^c(p)} \quad (7)$$

Следовательно, акуstofотовольтаическая ЭДС при таком рассмотрении по знаку противоположна к акустоэлектрической ЭДС в темноте $V_{aз}^T$ и не превысит его абсолютной величины, так как на практике всегда

$$\frac{\Delta\sigma_{см}(\Delta p)}{\sigma_p^c(p)} \leq 1.$$

По знаку они совпадают в исключительно редких случаях, при наличии отрицательной фотопроводимости, т.е.

$$\Delta\sigma_{см}(\hbar\omega_0) < 0$$

Следует подчеркнуть, что при одновременном воздействии света и звука на концах кристалла должно происходить сложение двух противоположных ЭДС, определяемых уравнениями (4) и (5) кристалла, т.е.

$$V_{aз}^c(p) = V_{aз}^T(p_0) + V_{aфк}^T(p) = V_{aз}^T(p_0) \left[1 - \frac{\Delta\sigma_{см}(\Delta p)}{\sigma_p^c(p)} \right] \quad (8)$$

Таким образом, допущение о наличии только положительных дырок при этом не может объяснить наблюдаемую на эксперименте инверсию знака в спектре акуstofотовольтаического эффекта, так как

$$V_{aз}^c(p) = -\frac{\gamma W_3 d}{\nu_3} \cdot \frac{\mu_p}{\sigma_p^c(p)} = \frac{\gamma W_3 d}{e\nu_3} \cdot \frac{1}{p_0 + \Delta p} = V_{aз}^T(p_0) \cdot \frac{p_0}{p_0 + \Delta p}, \quad (9)$$

где $\Delta p = \Delta p(\hbar\omega_0) > 0$ во всем изученном спектральном диапазоне. В рассматриваемом спектральном диапазоне для исследуемых кристаллов $InGaTe_2(Se_2)$ превалирует собственная фотопроводимость. Поэтому, следует учесть при этом электродвижущую силу с противоположной полярностью, обусловленной присутствием в кристалле электронов:

$$V_{aз}^c(p) = -\frac{\gamma W_3 d}{\nu_3} \cdot \frac{\mu_p}{\sigma_n^c(n)} = \frac{\gamma W_3 d}{e\nu_3} \cdot \frac{1}{n_0 + \Delta n} = V_{aз}^T(n_0) \cdot \frac{\Delta n}{n_0 + \Delta n} \quad (10)$$

Суммарная ЭДС, состоящая из двух зависящих от энергии фотонов в (5) компонент противоположного знака, определяющих характер спектральной зависимости тока короткого замыкания, может быть представлена так:

$$V_{aз}^{\bar{n}}(n, p) = -V_{aз}^{\bar{n}}(n) + V_{aз}^{\bar{n}}(p) = \frac{\gamma W_3 \alpha}{e\nu_3} \left(\frac{1}{p_0 + \Delta p} - \frac{1}{n_0 + \Delta n} \right)$$

или

$$V_{aз}^c(n, p) = \frac{\gamma W_3 d}{e\nu_3} \cdot \frac{1}{p_0 + \Delta p} \left(1 - \frac{p_0 + \Delta p}{n_0 + \Delta n} \right) \quad (11)$$

где p_0 и n_0 – концентрация темновых дырок и электронов, Δp и Δn – доля возбужденных светом дырок и электронов, успевающих $\tau_{n,p} \gg \frac{1}{\omega}$ взаимодействовать с упругой волной звука заданной частоты (ω_3).

Измеряемый на эксперименте ток короткого замыкания, созданный электродвижущей силой $V_{ac}^c(n, p)$ согласно (11):

$$I_{\lambda\delta\alpha} = -\frac{V_{\lambda\delta\alpha}^c(n, p)}{d} \sigma(n, p) = -\frac{\gamma W_3}{v_3} \cdot \mu_n \left(1 + \frac{p_0 + \Delta p}{n_0 + \Delta n} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) \cdot \left(\frac{n_0 + \Delta n}{p_0 + \Delta p} - 1 \right) \quad (12)$$

Спектральная зависимость $I_{\lambda\delta\alpha}(\hbar\omega_c)$ определяется изменением неравновесных носителей с энергией фотонов, т.е. зависимостями $\Delta n(\hbar\omega_c)$ и $\Delta p(\hbar\omega_c)$. В соответствии с (12) суммарный ток короткого замыкания оказывается составленным из двух компонентов с противоположной полярностью. В зависимости от спектральной области падающего света, соотношение абсолютных значений указанных компонент может изменяться, что и повлечет за собой инверсию знака в спектре тока короткого замыкания (рис. 2). Согласно (11), в участках спектра, где $n_0 + \Delta n(\hbar\omega^c) > p_0 + \Delta p(\hbar\omega^c)$ ток короткого замыкания акустофотовольтаического эффекта должен иметь отрицательный знак, а в участках, где $n_0 + \Delta n(\hbar\omega^c) < p_0 + \Delta p(\hbar\omega^c)$ – положительный знак. В области спектра, где $n_0 + \Delta n(\hbar\omega^c) \approx p_0 + \Delta p(\hbar\omega^c)$, противоположные компоненты компенсируют друг друга и суммарный ток стремится к нулю. Последняя ситуация реализуется в области собственной проводимости.

Выводы

Выявлено, что при одновременном воздействии звуковых и электромагнитных волн на монокристаллы $InGaTe_2$ и $InGaSe_2$ возникает АФВ эффект. Обнаруженный АФВ эффект может найти широкое техническое применение в различных областях, в частности в гидролокации, подводных линиях связи, оптических переключателях, частотных дискриминаторах оптического диапазона (с управляемой частотой), а также в качестве принципиально новых типов управляемых селективных приемников излучения.

Список литературы: 1. *The growth and properties of single crystals of InGaTe₂, a ternary chalcogenide semiconductor* / M. Mobarakh, G. Bergger, F. Lorusso, Y. Capozzi, G. Pernamo, M. Ibrahim, G. Margaritondo // J.P. hys. D : Appl. Phys. – 1998. – № 31. – P.1433 – 1437. 2. *The Growth of Single Crystals of InGaSe₂ Compounds, Their X-Ray-Phase Analysis, Electronic Structure and Optical Functions* / E.M. Gojaev, Z. Jahangirli, P. Alieva, K. Khalilova, T. Musaev // Open Journal of Inorganic Non-metallic Materials. – 2013. – №3. – P.1 – 5. 3. *Gojaev, E.M. Optical functions, Band structure and effective masses of electrons and holes in InGaTe₂* // E.M. Gojaev, U.S. Abdurahmanova, Z.A. Dzhakhangirli, Sh.M. Mehdieva // Open Journal of Inorganic Non-Metallic Materials. – April 2014. – № 4. – P.13 – 20. 4. *Синтез, выращивание монокристаллов и исследование акустовольтаического эффекта в $TlIn_{1-x}Pr_xSe_2$ и $TlIn_{1-x}Pr_xTe_2$* / Э.М. Годжаев, Э.А. Аллахьяров, В.Д. Рустамов [и др.] // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40. – №9. – С.1021 – 1026. 5. *Годжаев, Э.М. Акустовольтаический эффект в монокристаллах $TlIn_{1-x}Ce_xSe_2$ ($0 \leq x \leq 0,04$)* / Э.М. Годжаев, Р.С. Рагимов, В.Д. Рустамов // Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. по фото-электронике и приборам ночного видения. Москва, 25-28 мая 2004. 6. *Акустофотовольтаический эффект в монокристаллах $TlIn_{0,98}Cd_{0,02}Se_2$* / А.М. Пашаев, Э.М. Годжаев, А.А. Мовсумов, Х.С. Халилова, С.Х. Агаева // Неорганические материалы. – 2010. – Т. 46. – №1. – С.20 – 23. 7. *Чабан, А.А. Акустовольтаический эффект в полупроводниках* // Письма в «Журнал экспериментальной и теоретической физики». – Т. 31. – Вып. 5. – 5 марта 1980. – С.292 – 295. 8. *Афонин, В.В. Акустоэлектрический эффект и термо-ЭДС увлечения электронов фононами в режиме слабой локализации* / В.В. Афонин, Ю.М. Гальперин // Физика и техника полупроводников. – 1993. – Т. 27. – Вып. 1. – С.115 – 123. 9. *Гринберг, В.А. Акустофотоэлектрический эффект в полупроводниках с монополярной проводимостью* / В.А. Гринберг, Н.И. Крамер // ФТП. – 1973. – Т. 7. – № 12. – С.2346

– 2348. 10. *The growth and characterization of GaInSe₂ single crystals* / M. Mobarakh, G. Bergerg, F. Lorusso, Y. Capozzi, G. Pernamo, M. Ibrahim G. Margaritondo // J.P. Phys. D : Appl. Phys. – 1997. – № 30. – P.2509 – 2516.

*Азербайджанский технический
университет, Баку*

Поступила в редколлегию 02.09.2014