

кремния, легированного теллуром, от изотопа ^{30}Si образуется стабильный изотоп P^{31} и нестабильные изотопы от четных стабильных изотопов теллура (^{120}Te , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{126}Te). А взаимодействие нечетного изотопа ^{123}Te с высокоэнергетическими нейтронами приводит к образованию стабильного изотопа сурьмы Sb . После нейтронного облучения радиоактивные изотопы теллура, из-за короткого времени полураспада (4 дня), образцы $\text{Si}\langle\text{Te}\rangle$ становится нерадиоактивным и могут быть использованы как высокоомные образцы для получения терморезисторов или фоторезисторов с высокой чувствительности [5,6].

Таким образом, показано влияние диффундированной примеси Te на изменения основных электрофизических параметров легированного кремния и определено, при воздействии нейтронов основное значение имеет ядерная трансмутация изотопа ^{123}Te в изотоп Sb .

Литература.

- [1] А.Н. Марченко. Управляемые полупроводниковые резисторы. М. Энергия, 1978 г., 216 с.
- [2] Sh.A. Makhkamov, M.Yu. Tashmetov, Sh.A. Makhmudov, A.K. Rafikov, A.A. Sulaymonov. Диффузия атомов примеси родия в кремнии для датчиков // FRANCE international conference: "Scientific approach to the modern education system" Part 10, 5th December, у 2022- Pp. -95-98.
- [3] Gui C., Yang De-R., Ma X. Y., Fu L.M., Fan R.X., Que D.L. / Oxygen Precipitation within Denuded Zone Founded by Rapid Thermal Processing in Czochralski Silicon Wafers // Chin. Phys. Lett. Vol. 22. № 9. 2005, pp. 2407-2410.
- [4] M. Yu. Tashmetov, Sh. A. Makhmudov, A. A. Sulaymonov, A. K. Rafikov, B. Zh. Abdurayimov. Photosensors Based on Neutron Doped Silicon // ISSN 0003-701X, Applied Solar Energy, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 71–73.
- [5] Sh Makhmudov, A Sulaymonov, A Rafikov, G Xudayberganova. Study of after diffusion regions in highly doped silicon // International scientific journal Science and Innovation, ISSN: 2181-3337, V-1, №6, October 9, 2022, - Pp. -402-404.
- [6] V.Bondarenko, T.von Egidy, J.Honzátko, I.Tomandl, D.Bucurescu, N.Mărginean J.Ott, W.Schauer, H.-F.Wirth, C.Doll. Nuclear structure studies of ^{123}Te with (n,γ) and (d,p) reactions. //Nuclear Physics A, Vol. 673, Issues 1–4, 19 June 2000, P. 85-121.

ТОК УВЛЕЧЕНИЯ ФОТОНАМИ В ТЕЛЛУРЕ ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Расулов Рустам Явкачович¹, Эшболтаев Иқболжон Мамиржонович², Муминов Исломбек Араббоевич¹, Уринова Камала Комилжановна², Фарманов Ислом Элмар угли¹

¹ Ферганский государственный университет, ² Кокандский государственный педагогический институт

Аннотация: В этом исследовании изучаются эффекты усиленных фотонов в теллуре с упором на контролируемую передачу импульсных фотонов в электронную подсистему. Экспериментальные данные, как сообщается в, теоретически интерпретируются в. Теоретические интерпретации учитывают как квадратичные, так и линейные вклады в эффективный гамильтониан в приближении сферически-симметричной зоны, как обсуждалось в.

Ключевые слова: теллур, фотонно-электронная подсистема, сферически симметричная зона, эффективный гамильтониан, оптический переход, вектор поляризации, волновой вектор, нелинейные кристаллы, диаграммы Келдыша, G-фактор.

Эффект увлечения фотонами (ЭУФ) в теллуре, обусловленный передачей импульса фотона к электронной подсистеме, экспериментально был обнаружен в. Теоретическая интерпретация экспериментальных результатов проводится в. В сферически симметричном зонном приближении и в с учетом как квадратичного, так и линейного по волновому вектору (\vec{k}) вклады в эффективном гамильтониане дырок. Как указывалось в учет зависимости квадрата матричного элемента оптического перехода от \vec{q} приводит к дополнительному вкладу в ток ЭУФ.

Разлагая в ряд плотности тока ЭУФ (\vec{j}), пропорционального к интенсивности света, по вектору поляризации и по волновому вектору фотона (\vec{q}) имеем следующее соотношение.

$$\vec{j}_\alpha = I \sigma_{\alpha\beta\gamma\delta} \vec{e}_\beta \vec{e}_\gamma^* q_\delta, \quad (1)$$

где I - интенсивность, \vec{e} - вектор поляризации света, $\sigma_{\alpha\beta\gamma\delta}$ - тензор ЭУФ. ($\alpha, \beta, \gamma, \delta = x, y, z$) . В дальнейшем рассмотрим теорию линейного ЭУФ, возникающего в однородных кристаллах при их освещении линейно поляризованным светом. Тогда $\sigma_{\alpha\beta\gamma\delta}$ вещественен и имеет ненулевые компоненты в кристаллах произвольной симметрии. Поэтому ЭУФ возникает в средах, как с центром симметрии, так и без центра инверсии. Например, в теллуре при распространении линейно поляризованного света вдоль главной оси ($C_3 \parallel z$) генерируется ток ЭУФ как вдоль главной оси кристалла, так и в поперечном к C_3 направлении

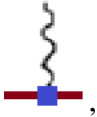
$$j_z = I \sigma_{zzxx} q_z, \quad j_x = I \sigma_{xzyy} q_z \sin 2\theta', \quad j_y = I \sigma_{xzyy} q_z \cos 2\theta' \quad (2)$$

Здесь θ' - угол между плоскостью поляризации света и осью вращения второго порядка, направленный по оси x .

В микроскопической теории выражение для тока ЭУФ в приближении времени релаксации имеет вид

$$\vec{j} = -e \sum_{n\vec{k}} \vec{v}_{n\vec{k}} f_{n\vec{k}}^{(as)} \quad (3)$$

где \vec{v} - оператор скорости, e - элементарный заряд, $f_{n\vec{k}}^{(as)}$ - асимметричная (неравновесная) часть функции распределения дырок в зоне n . В дальнейшем расчет производим в

приближении времени релаксации $\tau_{n\vec{k}}$ и учитываем следующие диаграммы Келдыша , где волнистая линия - фотон, сплошная - дырка.

Наряду с учетом зависимости вероятности оптического перехода от импульса фотона (как в законе сохранения энергии, так в законе сохранения импульса), учитываем и следующий вклад в ток ЭУФ, связанный с зависимостью вектора напряженности магнитного поля (\vec{H}) электромагнитной волны от \vec{q}

$$\vec{H} = iA(\vec{q} \times \vec{e}) \quad (4)$$

Секция «Физика конденсированных сред»

Здесь $\vec{A} = \vec{e} A e^{i\vec{q}\vec{r}}$ - вектор-потенциал световой волны. Тогда имеем следующую дополнительную слагаемую в эффективном гамильтониане дырок H

$$H' = \frac{eA}{c\hbar} \cdot \frac{\hbar^2}{2m_0} ig \left(\hat{\sigma} (\vec{q} \times \vec{e}) \right) = i\mu_0 g \left(\vec{H} \hat{\sigma} \right) \quad (5)$$

где $g - g$ - фактор дырок, $\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_0c}$ - магнетон Бора, $\hat{\sigma}_\alpha$ - матрицы Паули. Далее имеем

следующие, полезные для дальнейших расчетов, соотношения

$$\langle l | H' | l' \rangle = H'_{ll'} = i \frac{eA}{c\hbar} gq \left[e_{y'} \left(\eta \cos \theta - \sqrt{1-\eta^2} \sin \theta \right) + (-1)^{l'} \left(e_{x'} \cos \theta + e_{z'} \sin \theta \right) \right] \quad (6)$$

$$H'_{ll} = (-1)^l i \frac{eA}{c\hbar} g \frac{\hbar^2}{2m_0} q e_{y'} \left(\sqrt{1-\eta^2} \cos \theta + \eta \sin \theta \right) \quad (7)$$

where где $\eta = \beta_V k_z \left(\Delta_2^2 + \beta_V^2 k_z^2 \right)^{-1/2}$, $\vec{e} = \{ \cos \theta \cos \varphi, -\sin \varphi, \sin \theta \sin \varphi \}$, $\vec{q} = q \{ -\sin \theta, 0, \cos \theta \}$, β_V - зонный параметр теллура, $2\Delta_2$ - энергетический зазор в точке M зоны Бриллюэна. Тогда квадрат матричного элемента межзонного оптического перехода, зависящего (линейного) от \vec{q} запишем как

$$\left| M_{2, \vec{k} + \vec{q}; 1, \vec{k}} \right|^2 = \left(\frac{eA}{c\hbar} \right)^2 \left\{ 2\eta \beta_V q \left[e_{z'} Q_{z'} \times \left(\beta_V \sqrt{1-\eta^2} - 2A k_{z'} \right) \right] + \frac{\hbar^2}{2m_0} \left[\cos \theta e_{x'} e_{z'} + e_{z'}^2 \sin \theta + i (\vec{e} \times \vec{e}')_x \left(\eta \cos \theta - \sqrt{1-\eta^2} \sin \theta \right) \right] \right\} \quad (8)$$

где $\eta = \eta(k_z \rightarrow k_{z'})$, $Q_{z'} = \frac{(1-\eta^2)^{-1/2}}{2} \frac{\partial \eta}{\partial k_{z'}}$, $A = \frac{A_1 + A_2}{2}$ ($l \neq l' = 1, 2$), $A_{1,2} = \frac{\hbar^2}{2m_{1,2}}$, $m_{1,2}$ -

эффективная масса дырок. Из (7) видно, что после углового интегрирования величина, пропорциональная $k_{z'} \left| M_{2, \vec{k} + \vec{q}; 1, \vec{k}} \right|^2$ обращается в ноль, т.е. в Te не возникает этот дополнительный вклад в линейный ЭУФ, обусловленный невертикальными оптическими переходами, а может возникать только циркулярный ЭУФ и этот вклад в Te исчезает в случае $\beta_V k_z \ll \Delta_2$. Тогда в сферическом приближении в энергетическом спектре дырок: $E_{l\vec{k}} = (-1)^l \Delta_2 + A_l k^2$ продольный ток ЭУФ в Te (без учета g -фактора дырок) определяется как

$$j_z = \sum_{l=1,2} (-1)^l I \frac{2e}{5} \frac{K_{\parallel}}{\hbar \omega} \frac{\hbar q}{m_l^*} \frac{A_l}{A_2 - A_1} \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \ln \tau_l(E_l)}{\partial \ln E_l} - \frac{A_l}{A_2 - A_1} \frac{\hbar \omega - 2\Delta_2}{k_B T} \right) \right], \quad (9)$$

где

$$K_{\parallel} = K(\vec{e} \parallel C_3) = \eta_0 \frac{e^2 k_{\omega}^2 \beta_V^2 f_{1k_{\omega}} \left(1 - \exp \left(-\frac{\hbar \omega}{k_B T} \right) \right)}{3cn_{\omega} \hbar^2 \omega (A_2 - A_1)} \quad (10)$$

- коэффициент поглощения света в *Te* при оптическом переходе дырок между подзонами m_1 и m_2 ,

$$E_l^\circ = E_l(k = k_\omega), k_\omega^2 = (\hbar\omega - \Delta_2/2) \times (A_2 - A_1)^{-1}, \eta_0^2 = \frac{4\beta_V^2 k_\omega^2}{\hbar^2 \omega^2}, f_{1k_\omega} = e^{\frac{\mu}{k_B T}} e^{\frac{\Delta_2 - A_1 k_\omega^2}{k_B T}},$$

$$\tilde{k}_\omega^2 = \frac{\sqrt{(A_2 - A_1)^2 k_\omega^4 + 4k_\omega^2 (A_2 - A_1) \Delta_2}}{4\beta_V^2}.$$

Для полноты задачи ниже приведем выражение для коэффициента межподзонного поглощения света при учете "горба" подзоны m валентной зоны в теллуре, т.е.

$$E_{\vec{k}} = A_{\parallel} k_z^2 + A_{\perp} (k_x^2 + k_y^2) + (-1)^l \sqrt{\Delta_2^2 + \beta_V^2 k_z^2} \quad (11)$$

и при $\vec{e} \parallel C_3$ в виде

$$K = \frac{e^2}{2\pi n_\omega c \hbar} \frac{k_B T}{\hbar \omega} \frac{\beta_V^2 k_0}{A_{\perp}} \exp \left\{ \frac{\mu + \frac{\hbar\omega}{2} - A_{\parallel} k_0^2 + \Delta_2}{k_B T} \right\} \quad (12)$$

where $A_{\parallel,\perp} = \frac{\hbar^2}{2m_{\parallel,\perp}}$, $k_0 = \frac{\sqrt{(\hbar\omega)^2 - 4\Delta_2^2}}{2\beta_V}$, m_{\parallel} и m_{\perp} - продольная и поперечная эффективные массы дырок.

В приближении (10) вклад в ЭУФ за счет учета (6) описывается тензором (при $\vec{e} \parallel C_3$)

$$\sigma_{yyzx}^{(l)} = (-1)^l \frac{16\pi e I}{\hbar \omega} K \frac{\delta k_B T \Delta_2 \hbar \omega g \tau_{lk_0} \hbar}{m_0 \beta_V^2 [(\hbar\omega)^2 - 4\Delta_2^2]}.$$

где δ - зонный параметр теллура.

Из последнего видно, что вклад в ЭУФ в *Te*, возникающий за счет учета g -фактора, увеличивается с ростом температуры, количественное значение которого зависит от значения δ и g -фактора.

Расчеты показывают, что экстремальное значение теоретической спектральной зависимости тока ЭУФ, в 1,2 раза меньше чем экспериментального. Это, по-видимому, связано, с пренебрежением анизотропией в энергетическом спектре электронов. Естественно, в этом случае, спектральная и температурная зависимости тока ЭУФ надо рассчитать численно. Этот случай требует отдельного рассмотрения.

Литература

1. E.Z. Imamov. // ФТП, т.6, В.5, с.1012, А.А.Гринберг, Е.Д.Беларусец, Е.З. Imamov // ФТП, 1971, v.5, В.12, с.2010 ..
2. G.Ribakovs, A.A. Gundjian // J.of Phys.C, 1977, v.48, No. 11, p 4601-4608.
3. Р.Я.Расулов Угловые оптические фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном и нелинейном поглощении света: дис. ... докт. физ.-мат. наук. – СПб.: ФТИ РАН им. акад. А.Ф. Иоффе, 1993. -168 с.

4. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Gofurov, S. Z. U. (2022). GENERALIZED MODEL FOR THE ENERGY SPECTRUM OF ELECTRONS IN TUNNEL-COUPLED SEMICONDUCTOR QUANTUM WELLS. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(12), 1-5.
5. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 2. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2388, No. 1, p. 012158). IOP Publishing.
6. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., & Исомаддинова, У. М. (2022). К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. Universum: технические науки, (10-5 (103)), 24-31.
7. Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., кизи Нисолмухамметова, Н. И., Кучкаров, М., & Кодиров, Н. (2021). КЛАССИФИКАЦИЯ МЕЖДУЗОННЫХ ТРЕХ ФОТОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В InSb. EDITORIAL BOARD, 608.
8. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Adhamovna, M. M., Qizi, K. M. N., & Dovlatboyevich, M. D. (2022). VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF A THREE-LAYER SEMICONDUCTOR DIODE OF DOUBLE INJECTION. European science review, (5-6), 37-41.
9. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., & Нетьматов, Х. М. О. (2021). К ТЕОРИИ МЕЖДУЗОННОГО ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЗКОЗОННОМ КРИСТАЛЛЕ. EDITOR COORDINATOR, 962.
10. Rasulov, R. Y., Akhmedov, B. B., Muminov, I. A., & Umarov, B. B. (2021). Crystals with tetrahedral and hexagonal lattices. Fergana. Classic.-2021, 10.
11. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., Mamirzhonovich, E. I., Xurshidboyevich, Q. C. M., & Adxamovna, M. M. (2021). MATRIX ELEMENTS OF THREE PHOTONIC OPTICAL TRANSITIONS IN CRYSTALS OF CUBIC SYMMETRY. OPTICAL TRANSITIONS FROM THE SPIN-ORBITAL SPLITTING BAND TO THE CONDUCTION BAND. European Science Review.
12. Расулов, Р. Я., Эшболтаев, И. М., Кучкаров, М. Х., & Махситалиев, Б. (2021, November). ДЫРОЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ГИРОТРОПНОГО КРИСТАЛЛА. In The 6th International scientific and practical conference "Modern directions of scientific research development"(November 24-26, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2021. 1153 p. (p. 304).

**ТРАНСПОРТНОЕ СВОЙСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР,
СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЯМ И БАРЬЕРОВ**

**Расулов Вохоб Рустамович¹, Маматова Махлиё Адхамовна¹, Насиров Мардон
Халдарбекович², Уринова Камала Комилжановна³.**

**¹ Ферганский государственный университет,
Ферганский политехнический институт,**

³ Кокандский государственный педагогический институт

Аннотация: В этом исследовании изучаются передовые возможности современных технологий по созданию полупроводниковых слоев с настраиваемыми профилями состава, включая квантовые структуры, для повышения производительности электронных устройств. Такие инженерные слои часто сводят сложность электрических компонентов к поведению в прямоугольных потенциальных ямах между соседними слоями с потенциальными барьерами. Эти инженерные структуры находят применение в туннельных диодах, гетеролазерах и т. д.