

## **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОКА ОДНОФОТОННОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

**В.Р. Расулов,  
Р.Я. Расулов,  
Г.А.Каримова**

### **АННОТАЦИЯ**

*Проанализирована феноменологическая теория поляризационного фотоэлектрического эффекта (ФГЭ) с акцентом на линейное разложение токового выражения для фотогальванического эффекта возбуждающего света. Разложение производится по степеням волнового вектора света с учетом симметризованного и антисимметричного произведений и псевдовектора для круговой поляризации. Обсуждаются вещественные тензоры, в том числе тензор четвертого ранга для увлечения носителей тока, тензор третьего ранга, аналогичный пьезотензору, и псевдотензор второго ранга, аналогичный тензору гирации. Круговой и линейный ФГЭ различаются по поляризации возбуждающего света, при этом круговой ФГЭ связан с диссипацией и описывается собственными энергетическими функциями, а линейный ФГЭ связан с сохранением энергии и описывается  $\phi$ -функциями. Рассмотрено сравнение с эффектом Фарадея, эффектами оптического выпрямления и дополнительными членами в тензорах ФГЭ. Подчеркнута важность учета тонких моментов с использованием диаграммной техники для неравновесных систем при микроскопическом описании ФГЭ в кристаллах без центра симметрии, с использованием в дальнейших расчетах аппроксимации времени релаксации для импульса носителей тока.*

**Ключевые слова:** *феноменологическая теория, поляризационный фотовольтаический эффект, возбуждающий свет, интенсивность, линейная по интенсивности, волновой вектор света, симметризованные произведения, антисимметричные произведения, круговая поляризация, поперечная электромагнитная волна, действительные тензоры, увлечение носителей тока фотонами, пьезотензор, гиротронные полупроводники, фототок.*

### **ABSTRACT**

*The phenomenological theory of the polarization photoelectric effect (PGE) is analyzed with emphasis on the linear expansion of the current expression for the photovoltaic effect of exciting light. The expansion is performed in powers of the wave vector of light, taking into account the symmetrized and antisymmetric products*

and the pseudovector for circular polarization. Real tensors are discussed, including the fourth rank tensor for current carrier drag, the third rank tensor similar to the piezotensor, and the second rank pseudotensor similar to the gyration tensor. Circular and linear PGE differ in the polarization of the exciting light, while the circular PGE is associated with dissipation and is described by energy eigenfunctions, while the linear PGE is associated with energy conservation and is described by  $\chi$ -functions. A comparison with the Faraday effect, optical rectification effects, and additional terms in PGE tensors is considered. The importance of taking into account subtle moments using the diagram technique for nonequilibrium systems in the microscopic description of the PGE in crystals without a center of symmetry is emphasized, with the use in further calculations of the relaxation time approximation for the momentum of current carriers.

**Keywords:** phenomenological theory, polarization photovoltaic effect, exciting light, intensity linear in intensity, wave vector of light, symmetrized products, antisymmetric products, circular polarization, transverse electromagnetic wave, real tensors, drag of current carriers by photons, piezotensor, gyrotropic semiconductors, photocurrent.

## ВВЕДЕНИЕ

Сначала проанализируем некоторые общие вопросы феноменологической теории поляризационного фотогальванического эффекта. Для этого разложим выражение для тока фотогальванического эффекта линейного по интенсивности  $I$  возбуждающего света (т.е. квадратичного по амплитуде световой волны) в ряд по степеням волнового вектора света [1]

$$J_{\phi z}^{\lambda} = I \left\{ \chi_{\lambda\mu\nu} \frac{e_m e_v^* + e_v e_m^*}{2} + \gamma_{\lambda\mu} i(\vec{e}^* \times \vec{e})_{\mu} + T_{\lambda\mu\nu\eta} \frac{e_n e_v^* + e_v e_n^*}{2} q_{\mu} + R_{\lambda\mu\nu} i(\vec{e}^* \times \vec{e})_{\mu} q_{\nu} + \dots \right\}. \quad (1)$$

где учтены, что симметризованные и антисимметризованные произведения

$$[e_m e_v^*] = (e_m e_v^* + e_v e_m^*)/2, \{e_m e_v^*\} = (e_m e_v^* - e_v e_m^*)/2 \quad (2)$$

преобразуются независимо, а также псевдовектор  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  определяет степень циркулярной поляризации излучения  $P_{\text{цирк}}$ . В частности для поперечной электромагнитной волны выполняется соотношение  $i(\vec{e}^* \times \vec{e}) = P_{\text{цирк}} \frac{\vec{q}}{q}$ .

Так как величины  $[e_m e_v^*]$ ,  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  и стационарный ток  $\vec{j}_{PhG}$  вещественны, поэтому  $\chi_{\lambda\mu\nu}$  и  $\gamma_{\lambda\mu}$ ,  $T_{\lambda\mu\nu\eta}$  и  $R_{\lambda\mu\nu}$  являются вещественными тензорами. Тензор четвертого ранга  $T_{\alpha\beta\gamma\delta}$  описывает эффект увлечения носителей тока фотонами и

он имеет отличные от нуля компоненты в полупроводниках произвольной симметрии [4].

$\chi_{\lambda\mu\nu}$  тензор третьего ранга аналогичен пьезотензору и симметричен по двум последним индексам и отличен от нуля лишь в пьезоэлектриках, т.е. в любых кристаллах без центра симметрии.

Псевдотензор второго ранга подобен тензору гирации  $\gamma$  (см. (1)) и отличен от нуля лишь в гиротропных полупроводниках.

Фототок, связанный со вторым слагаемым (1), отличен от нуля лишь для эллиптически поляризованного света и не возникает как при освещении линейно поляризованным, так и при освещении неполяризованным светом. Поэтому фотогальванический эффект, описываемый тензором  $\gamma_{\lambda\mu}$ , получил название циркулярный фотогальванический эффект. Фотогальванический эффект, описываемый тензором  $\chi_{\alpha\beta\gamma}$ , обычно наблюдается при линейно поляризованном возбуждении. Его называют тензором линейного фотогальванического эффекта.

Тензор  $R_{\lambda\mu\nu}$  в отличие от тензоров  $\chi_{\alpha\beta\gamma}$  и  $\gamma_{\lambda\mu}$ , имеет отличные от нуля компоненты в полупроводниках с центром симметрии. ФГЭ, связанный с этим тензором, удобно называть циркулярным ФГЭ. Симметрия тензоров  $\chi_{\alpha\beta\gamma}$ ,  $\gamma_{\lambda\mu}$ ,  $T_{\lambda\mu\nu\eta}$  и  $R_{\lambda\mu\nu}$ , по отношению к операции инверсии времени описывает, связаны ли эффекты, описываемые ими, процессами диссипации. Поэтому уместно отметить, что линейный фотогальванический эффект связан с процессами диссипации, а циркулярный ФГЭ-нет, т.е. Линейный ФГЭ описывается  $\delta$ -функциями, соответствующими закону сохранения энергии, а циркулярный ФГЭ-собственно энергетическими функциями (или полюсами функции Грина). При этом учтено, что при инверсии времени ток  $\mathbf{j}$ , волновой вектор света  $\vec{q}$  и величина  $i(\vec{e}^* \times \vec{e})$  не меняют своего знака.

Судя по феноменологической теории поляризационного фотогальванического эффекта, описываемый тензором  $\gamma_{\lambda\mu}$ , получил название циркулярный фотогальванический эффект, эффект, описываемый тензором  $\chi_{\alpha\beta\gamma}$  линейным фотогальваническим эффектом. Если геометрия опыта допускает линейный по интенсивности света фототок для циркулярного поляризованного света, то этот ток не зависит от знака циркулярной поляризации, совпадает с фототоком при неполяризованном возбуждении.

Представляет интерес сравнение фотогальванического эффекта, описываемый формулой (1), с эффектом Фарадея-появления стационарной

намагниченности  $\vec{M}$  образца при его освещении циркулярно поляризованным светом. Эти эффекты описываются следующими феноменологическими соотношениями:

$$\begin{aligned} P_{\lambda} &= IA_{\lambda i v} [e_{\lambda} e_i] \\ \dot{I}_{\lambda} &= IB_{\lambda \mu} i (\vec{e}^* \times \vec{e})_{\mu} \end{aligned} \quad (3)$$

Свойства тензоров  $A_{\lambda \mu \nu}$  и  $B_{\lambda \mu}$  указаны в таблице 1. В случае, когда интенсивность излучения меняется во времени, за счет эффекта оптического выпрямления в образце возникает нестационарный ток, пропорциональный величине  $\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ , где  $\vec{P}$  - вектор поляризации среды под действием внешнего электрического поля [7].

Если поместить образец в катушку и освещать его периодически изменяющимся по времени циркулярно поляризованным светом, то за счет обратного эффекта Фарадея в катушке будет наводиться нестационарная ЭДС. Эта ЭДС пропорциональна производной  $\frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$ , где  $\vec{M}$  магнитный момент, наводимый внешним магнитным полем. К выражениям для  $P_{\lambda}$  и  $M_{\lambda}$  в (1) можно дописать дополнительные слагаемые

$$P_{\lambda} = Ia_{\lambda \mu} i (\vec{e}^* \times \vec{e})_{\mu}, \quad \dot{I}_{\lambda} = Ib_{\lambda \mu \nu} [e_{\mu} e_{\nu}^*] \quad (4)$$

Тензоры  $a_{\lambda \mu}$  и  $b_{\lambda \mu \nu}$  нечетны относительно инверсии времени и соответствующие явления обусловлены процессами диссипации. Далее рассмотрим ряд общих вопросов микроскопического описания ФГЭ. При исследовании механизмов ФГЭ в кристаллах без центра симметрии имеются ряд тонких моментов, игнорирование которых может привести к ошибочным результатам. Поэтому надо исходить из первых принципов и использовать диаграммную технику для неравновесных систем, развиты Келдышем [11].

В дальнейших расчетах будем считать, что время релаксации по импульсу ( $\Gamma_p$ ) и по энергии ( $\Gamma_e$ ) свободных электронов много меньше чем их время жизни по отношению к рекомбинационным процессам и будем использовать приближение времени релаксации по импульсу носителей тока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Расулов, Р. Я., Расулов, В. Р., & Эшболтаев, И. М. (2017). Линейно-циркулярный дихроизм в полупроводнике со сложной валентной зоной с учетом четырехфотонного поглощения света. Физика твердого тела, 59(3), 453-457.

2. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. K., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband Multiphoton Absorption of Polarized Radiation and Its Linear Circular Dichroism in Semiconductors in the Kane Approximation. *Russian Physics Journal*, 65(10), 1746-1754.
3. Расулов, Р. Я., Расулов, В. Р., & Эшболтаев, И. (2018). К теории поглощения поляризованного излучения в полупроводниковой квантовой яме (001). *Известия высших учебных заведений. Физика*, 61(3), 57-61.
4. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. K., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband Multiphoton Absorption of Polarized Radiation and Its Linear Circular Dichroism in Semiconductors in the Kane Approximation. *Russian Physics Journal*, 65(10), 1746-1754.
5. Расулов, Р. Я., Расулов, В. Р., & Эшболтаев, И. (2017). Линейный фотогальванический эффект в полупроводнике с горбообразной зонной структурой с учетом эффекта когерентного насыщения. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 60(4), 147-151.
6. Rustamovich, R. V., Yavkachovich, R. R., & Mamadaliyeva, N. Z. (2018). A Single-quantum shift photocurrent in piezosemiconductors. *European science review*, (7-8), 286-287.
7. 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.
8. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Sul'tonov, R. R., & Akhmedov, B. B. (2020). Two-and Three-Photon Linear-Circular Dichroism in Cubic-Symmetry Semiconductors. *Semiconductors*, 54, 1381-1387.
9. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Mamadaliyeva, N. Z., & Sultanov, R. R. (2020). ONE-PHOTON ABSORPTION OF POLARIZED RADIATION IN p-Te (ACCOUNTING FOR THE COHERENT SATURATION EFFECT). *Russian Physics Journal*, 63(1), 86-94.
10. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Eshboltaev, I., & Mamadaliyeva, N. Z. (2019). PHOTON-DRAG EFFECT IN p-TYPE TELLURIUM. *Russian Physics Journal*, 62(6), 1082-1090.
11. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Qosimov, F. (2022, December). Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 1. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2388, No. 1, p. 012156). IOP Publishing.



12. Расулов, В. Р., & Ўғли, Х. Д. Қ. (2022). Қўрғошин халькогениди кристалларининг зонавий тузилиши. *Ta'lim fidoylari*, 13(7), 211-215.
13. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., Исомаддинова, У. М., & Касимов, Ф. (2022). КЛАССИФИКАЦИЯ МАТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХФОТОННЫХ МЕЖЗОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛАХ. УЧЕТ ВКЛАДА ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ. EDITORIAL BOARD, 262.
14. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Маматова, М. А., Исомаддинова, У. М., & Кодиров, Н. У. О. (2022, October). ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА И ЕГО ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНОГО ДИХРОИЗМА В КРИСТАЛЛАХ. УЧЕТ ВКЛАДА ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ. In *The 15 th International scientific and practical conference "Innovations and prospects of world science"* (October 12-14, 2022) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2022. 454 p. (p. 126).
15. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Исомаддинова, У. М., & Кодиров, Н. У. О. (2022, December). УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОДНОФОТОННЫХ МЕЖЗОННЫХ ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНЫХ ДИХРОИЗМОВ В КРИСТАЛЛАХ. In *The 12 th International scientific and practical conference "Eurasian scientific discussions"* (December 18-20, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. 542 p. (p. 232).
16. Расулов, Р. Я., Расулов, В. Р., Эшболтаев, И. М., & Мамадалиева, Н. З. (2019). ПОВЕРХНОСТНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ МНОГОДОЛИННОГО ПОЛУБЕСКОНЕЧНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА. «Узбекский физический журнал», 21(1), 1-8.
17. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Ахмедов, Б. Б., & Муминов, И. А. (2022). Межзонный двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в полупроводниках в приближении Кейна. *Физика и техника полупроводников*, 56(1).
18. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Eshboltaev, I. M., & Qo'chqorov, M. X. (2022). Polarization-Spectral Dependences of the Three-Photon Interband Absorption of Light and Linear-Circular Dichroism in Semiconductors with Cubic Symmetry. *Semiconductors*, 1-6.
19. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Муминов, И. А., & Неъматов, Х. М. О. (2021). К ТЕОРИИ МЕЖДУЗОННОГО ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЗКОЗОННОМ КРИСТАЛЛЕ. EDITOR COORDINATOR, 962.

20. 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.