

ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНЫЙ ДИХРОИЗМ ЭФФЕКТА УВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ФОТОНАМИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7848036>

В.Р.Расулов, Г.А.Каримова, И.Рахматов

Ферганский государственный университет.

Фергана, Узбекистан.

Аннотация.

В данной статье анализируется напряженность электрического поля, возникающая в результате передачи импульса от линейно и циркулярно поляризованных фотонов носителям тока в полупроводниковой сверхрешетке. Получены выражения для напряженности электрического поля ЭФУ (эффект фотонного увлечения) в случае линейной и круговой поляризации, обнаруживающие нелинейный и осциллирующий характер. Анализ также свидетельствует о наличии линейно-кругового дихроизма ЭФУ в энергетическом спектре полупроводниковой сверхрешетки. Наконец, энергетический параметр надстройки оценивается на основе величины интенсивности.

ВВЕДЕНИЕ. Известно [1,2], что падающая электромагнитная волна передает носителям тока импульс, в результате чего они участвуют в направленном движении. В зависимости от экспериментальных условий это приводит к появлению постоянного тока (в замкнутом образце) или постоянного напряжения (в разомкнутом образце). Ниже вычислена напряженность постоянного электрического поля, обусловленная передачей импульса линейно и циркулярно поляризованного фотона электромагнитной волны носителям тока. В классическом приближении она объясняется как результат действия силы Лоренца, возникающей при движении носителей в электрическом поле волны в присутствии магнитного поля этой волны. Далее рассмотрим циркулярно поляризованную электромагнитную волну частотой ω , распространяющуюся в полупроводниковой сверхрешетки по оси z

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 \cos(\omega \cdot t - q \cdot z), \varepsilon_y = \varepsilon_0 \sin(\omega \cdot t - q \cdot z), (1)$$

$$H_x = H_0 \cos(\omega \cdot t - q \cdot z), H_y = -H_0 \sin(\omega \cdot t - q \cdot z),$$

где \vec{q} -волновой вектор электромагнитной волны. Считаем, что ось x направлена по оси сверхструктуры, энергетический спектр электронов $E(\vec{p})$ выберем в виде

$$E(\vec{p}) = \frac{(p_x^2 + p_y^2)}{2m^*} - W \cos\left(a p_x / \hbar\right) \quad (2)$$

Здесь m^* -эффективная масса электронов, W -энергетический параметр сверхструктуры (сверхрешетки).

Уравнения движения носителей тока в пренебрежении диффузии и рекомбинации напишем в виде

$$\frac{dV_x}{dt} + \frac{V_x}{\tau} = \frac{e}{m^*} \left(\varepsilon_x - \frac{1}{c} V_z H_y \right), \quad \frac{dV_y}{dt} + \frac{V_y}{\tau} = \frac{e}{m^*} \left(\varepsilon_y + \frac{1}{c} V_z H_x \right), \quad (3)$$

$$\frac{dV_z}{dt} + \frac{V_z}{\tau} = \frac{e}{m^*} \left(\varepsilon_z + \frac{1}{c} (V_x H_y - V_y H_x) \right),$$

где τ - время импульсной релаксации, $\vec{V} = \hbar^{-1} \vec{\nabla}_p E(\vec{p})$ - групповая скорость носителей тока. Напряженность электрического поля эффекта увлечения фотонами ε_z определяется из условия отсутствия потока электронов вдоль оси z , т.е. из условия $V_z = 0$.

После несложных преобразований нетрудно получить полезные, для дальнейших расчетов, выражения

$$V_x = \frac{\mu \varepsilon_0}{1 + \omega^2 \tau^2} (\cos \theta + \omega \tau \sin \theta), \quad (4a)$$

$$V_y = \frac{\mu \varepsilon_0}{1 + \omega^2 \tau^2} (-\omega \tau \cos \theta + \sin \theta), \quad (4b)$$

где $\theta = \omega t - \vec{q} \vec{r}$. Решая третьего уравнения (3) с учетом (4a, 1.5.б) имеем

$$V_y = A_0 + V_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [A_m \sin(\alpha_m \theta + \psi) + B_m \sin(\alpha_{m-1} \theta - \psi) + E_m \cos(\alpha_m \theta + \psi) + F_m \cos(\alpha_{m-1} \theta - \psi)] + D_{mn}^{(v)} \cos(\alpha_{mn}^{(v)} \theta + (-1)^v \psi) + R_{mn}^{(v)} \sin(\alpha_{mn}^{(v)} \theta + (-1)^v \psi), \quad (5)$$

где

$$A_0 = \mu \varepsilon_z + \frac{\mu \varepsilon_0 \mu H_0}{c(1 + \omega^2 \tau^2)} (\cos \psi - \omega \tau \sin \psi), \quad V_0 = \frac{\mu H_0 \omega \tau}{2c \hbar},$$

$$A_m = \frac{(-1)^{m+1} \alpha_m \omega \tau J_0(x_1) J_{2m-1}(x) + J_0(x) J_{2m-1}(x_2)}{1 + \alpha_m^2 \omega^2 \tau^2},$$

$$E_m = - \frac{(\alpha_m \omega d_0(x) I_{2m-1}(x_1) + (-1)^m I_0(x_1) I_{2m-1}(x))}{1 + \alpha_m^2 \omega^2 \tau^2}, \quad (6)$$

$$B_m = A_m(\alpha_m \rightarrow \alpha_{m-1}), \quad F_m = A_m(\alpha_{m+1} \rightarrow \alpha_m),$$

$$D_{mn}^{(2)} = - \frac{((-1)^m \alpha_{mn}^{(2)} \omega \tau J_{2m-1}(x_1) + J_{2n}(x) - J_{2m-1}(x) J_{2n}(x_1))}{1 + \alpha_{mn}^{(2)^2} \omega^2 \tau^2},$$

$$R_{mn}^{(2)} = \frac{(\alpha_{mn}^{(2)} \omega \tau J_{2m-1}(x) + J_{2n}(x_1) - J_{2m-1}(x_1) J_{2n}(x))}{1 + \alpha_{mn}^{(2)^2} \omega^2 \tau^2} (-1)^m, ,$$

$$D_{mn}^{(v)} = D_{mn}^{(2)}(\alpha_{mn}^{(2)} \rightarrow \alpha_{mn}^{(v)}), \quad R_{mn}^{(v)} = R_{mn}^{(2)}(\alpha_{mn}^{(2)} \rightarrow \alpha_{mn}^{(v)}), \quad \alpha_m = 2 \cdot m, \quad \alpha_{mn}^{(1)} = 2 \cdot (m + n - 1),$$

$$\alpha_{mn}^{(2)} = 2 \cdot (m + n), \quad \alpha_{mn}^{(3)} = 2 \cdot (m - n - 1), \quad \alpha_{mn}^{(3)} = 2 \cdot (m - n - 1),$$

$$\alpha_{mn}^{(4)} = -2 \cdot (m - n), \quad x_1 = \omega \tau x, \quad x = \mu \varepsilon_0 a m^* \hbar^{-1} (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1}, \quad J_n(x) - \text{ функции Бесселя первого рода целого порядка } n.$$

В (5) подчеркнуты те выражения, которые при $m = 1$ не зависят от времени и дают вклад в стационарную составляющую V_z . Выделяя стационарную составляющую V_z в (5) и полагая, что $V_z = 0$ получим выражение для напряженности электрического поля при освещении светом циркулярной поляризации:

$$\varepsilon_z^{(c)} = - \frac{\mu \varepsilon_0 H_0}{\hbar(1 + \omega^2 \tau^2)} (\cos \psi - \omega \tau \sin \psi) - \frac{w \alpha H_0}{c \hbar} [J_0(x) J_1(x_1) \sin \psi + J_0(x_1) J_1(x) \cos \psi] \quad (7)$$

Выражение для напряженности электрического поля ЭУФ в случае линейной поляризации $\varepsilon_z^{(l)}$ можно получить из (7), пренебрегая первую слагаемую в ней, т.е.

$$\varepsilon_z^{(c)} - \varepsilon_z^{(l)} = - \frac{\mu \varepsilon_0 H_0}{c(1 + \omega^2 \tau^2)} (\cos \psi - \omega \tau \sin \psi), \quad (8)$$

Как видно из (7) и (8), что зависимость напряженности электрического поля ЭУФ от интенсивности возбуждающего света (1) нелинейная и имеет осцилляционный характер, т.е. $\varepsilon_z^{(c)}$ и $\varepsilon_z^{(l)}$ могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Из (8) видно, что из-за наличия узких разрешенных минизон в энергетическом спектре полупроводниковой сверхрешетки можно обнаружить линейно - циркулярного дихроизма ЭУФ не только при нелинейном, но и при линейном поглощении света.

Наконец отметим, что можно оценить значению W -энергетического параметра сверхструктуры (сверхрешетки), зная величину интенсивности I_0 . В случае $\varepsilon_z^{(c)} = 0$ имеем

$$w = - \frac{\mu\varepsilon_0(I_0)\hbar^2}{\alpha(1+\omega^2\tau^2)} \frac{(\cos\psi - \omega\tau \sin\psi)}{J_0(x_0)J_1(x_{10})(\sin\psi) + J_0(x_{10})J_1(x_0)(\cos\psi)}, \quad (9)$$

где $x_0 = x(I = I_0)$, $x_{10} = x_1(I = I_0)$.

ВЫВОДЫ. Расчеты показывают, что при освещении CO_2 лазером интенсивностью $I \approx 0,1$ МВт/см², длиной волны 10,6 мкм (при которой $\omega\tau \approx 32$) и для полупроводника (с подвижностью $\mu \approx 10^4$ см²/(В с)) со сверхрешеткой с периодом $a = 10^{-6}$ см получим значение $\varepsilon_z^{(\wedge)} \approx 10^4$ В/см, а значение $\varepsilon_z^{(n)} \approx 10^6$ В/см.

Из последнего анализа напряженности электрического поля, даже в квазиклассическом приближении имеет место линейно-циркулярный дихроизм тока эффекта увлечения фотонами в полупроводниковых сверхструктурах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sheng S. Li. Optical Properties and Photoelectric Effects// New York. - 2005. -P.38.
2. Ivchenko, E.L. Superlattices and other heterostructures. Symmetry and optical phenomena / E.L. Ivchenko, G.E. Pikus.-Berlin : Springer, -1995.-370 p.
3. Rasulov, R.Y., Rasulov, V.R., Eshboltaev, I., & Sultonov, R.R. //Two-and Three-Photon Linear Circular Dichroism in Semiconductors of Cubic Symmetry.// Russian Physics Journal, 63, (2021). 2025-2030.
4. Rasulov, V.R., & Rasulov, R.Y. //On the surface photovoltaic effect in a multivalley semiconductor in an external magnetic field// Semiconductors, 50(2), (2016). 162-166.
5. Rasulov, V.R., Rasulov, R.Y., Axmedov, B.B., Muminov, I.A., & Polvonov, B.Z. //Linear-circular dichroism of one-photon absorption of light in narrow-zone semiconductors. contribution of the effect of coherent saturation// European Science Review, (7-8), (2020). 49-53.
6. Rasulov, R.Y., Rasulov, V.R., Kuchkarov, M.K., & Eshboltaev, I.M. //Interband Multiphoton Absorption of Polarized Radiation and Its Linear Circular Dichroism in Semiconductors in the Kane Approximation// Russian Physics Journal, 65(10), (2023). 1746-1754.

7. Rasulov, V.R., Rasulov, R.Y., Mamatova, M.A., & Qosimov, F. //Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors// In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2388, No. 1, p. 012156). Part 1. (2022, December). IOP Publishing.

8. Rasulov, V.R., Rasulov, R.Y., Mamatova, M.A., & Qosimov, F. //Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors// In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2388, No. 1, p. 012158). Part 2. (2022, December). IOP Publishing.

9. Расулов, В.Р., Расулов, Р.Я., Маматова, М.А., & Исомаддинова, У.М. //К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ. КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ// Universum: технические науки, (10-5 (103)), (2022). 24-31.

10. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Adhamovna, M.M., Qizi, K.M.N., & Dovlatboyevich, M.D. //VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF A THREE-LAYER SEMICONDUCTOR DIODE OF DOUBLE INJECTION// European science review, (5-6), (2022). 37-41.

11. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Arabboyevich, M.I., & Mamirzhonovich, E.I. //LINEAR-CIRCULAR DICHROISM OF INTERBAND THREE-PHOTON ABSORPTION IN CRYSTALS// European science review, (5-6), (PART 1). (2021). 42-46.

12. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Mamirzhonovich, E.I., & Adxamovna, M.M. //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, (11-12), (2021). 35-39.

13. Расулов, Р.Я., Муминов, И.А., Ниёзов, Ш., & кизи Юнусова, М.Б. //ВКЛАД ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ В ОДНОФОТОННОЕ МЕЖЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В ПРИБЛИЖЕНИИ КЕЙНА// EDITOR COORDINATOR, (2021). 916.

14. Rustamovich, R V., Yavkachovich, R.R., Mamirjonovich, E.I., Rustamovich, S.R., & Zaylobidinovich, P.B. //ON THE THEORY OF THREE PHOTONIC LINEAR CIRCULAR DICHROISM IN A HOLE-CONDUCTION SEMICONDUCTOR// European science review, (5-6), (2020). 73-76.

15. Расулов, В.Р., Расулов, Р.Я., Кодиров, А., & Султонов, Р.Р. //К ТЕОРИИ МНОГОФОТОННОГО ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНОГО ДИХРОИЗМА

В ПОЛУПРОВОДНИКАХ КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ// АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПЕДАГОГИКИ (2020). (pp. 32-36).

16 Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Bahroovich, A.B., Arabboyevich, M.I., & Zaylobidinovich, P.B. //LINEAR-CIRCULAR DICHROISM OF ONE-PHOTON ABSORPTION OF LIGHT IN NARROW-ZONE SEMICONDUCTORS. CONTRIBUTION OF THE EFFECT OF COHERENT SATURATION// European science review, (7-8), (2020). 49-53.

17. РАСУЛОВ, В., РАСУЛОВ, Р., ЭШБОЛТАЕВ, И., & КУЧКАРОВ, М. (2022). //ПОЛЯРИЗАЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТРЕХФОТОННОГО МЕЖЗОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА И ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНОГО ДИХРОИЗМА В П//

18. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Elmar-Ugli, F. I., & Holmatova, G. M. //DIMENSIONALLY QUANTIZATION OF THE ENERGY SPECTRUM OF HOLES IN A P-TE QUANTUM WELL// Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, (7-8), (2022). 26-30.ОЛУПРОВОДНИКАХ КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ.

19. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Adkhamovna, M.M., Mamirjonovna, I.U., & Ogli, K. N. U. //INTERBAND SINGLE-PHOTON ABSORPTION OF POLARIZED LIGHT IN CRYSTALS WITH ALLOWANCE FOR THE EFFECT OF COHERENT SATURATION// European science review, (7-8), 2-PART. (2022). 41-43.

20. Расулов, В.Р., Расулов, Р.Я., Ахмедов, Б.Б., & Муминов, И.А. //Межзонный двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в полупроводниках в приближении Кейна// Физика и техника полупроводников, 56(1). (2022).

21. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R. R., Adkhamovna, M.M., Mamirjonovna, I.U., & Ogli, K. N. U. //POLARIZATION DEPENDENCES OF SINGLE-PHOTON INTERBAND LINEAR-CIRCULAR DICHROISMS IN TETRAHEDRAL SYMMETRY CRYSTALS// European science review, (7-8), (2022). 33-36.

22. Rustamovich, R.V., Yavkachovich, R.R., Eshboltaev, I.M., & Mamadaliyeva, N.Z. //Surface photoconductivity in a multivalley semiconductor// European science review, (1-2), (2018). 263-266.