

зависимость величины  $K^{(1)}(\xi)$  описывается со сложностью зоны кристалла.

Таким образом, однофотонный линейно-циркулярный дихроизм, обусловленный межзонными оптическими переходами в узкозонном кристалле, возникает при учете эффект когерентного насыщения. Однако при межзонном многофотонном поглощении поляризованного света наблюдается линейно-циркулярный дихроизм независимо от того, учитывается ли эффект когерентного насыщения или нет. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

### Литература

[1] A.Rostami. "Low threshold and tunable all-optical switch using two-photon absorption in array of nonlinear ring resonators coupled to MZI" *Microelectr. J.*, Vol.7, No. 9, Pp. 976-981, 2006.

[2] Pattanaik H. S., Reichert M., Hagan D. J., and Van Stryland E. W. "Three-dimensional IR imaging with uncooled GaN photodiodes using nondegenerate two-photon absorption" *Opt. Express*. Vol. 24, No. 2, Pp. 1196-1205, 2016.

[3] Yu J. H., Kwon S.-H., Petrášek Z., Park O. K., Jun S. W., Shin K., Choi M., Park Y. I., Park K., Na H. B., Lee N., Lee D. W., Kim J. H., Schwille P., and T. Hyeon. "High-resolution three-photon biomedical imaging using doped ZnS nanocrystals" *Nat. Mater.*, Vol. 12, No. 4, Pp.359-366, 2013.

[4] Е.Л. Ивченко. "Двухфотонное поглощение света в оптическая ориентация свободных носителей" *ФТТ*. Т.14, Вып.11, С. 3489-3496, 1972.

[5] Р.Я.Расулов. "Поляризационные оптические в фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном в нелинейном поглощении света". Диссертация на соиск. уч.

степени доктора физ.-мат. наук. Ст.-Петербург. - 1993. – 206 с.

[6] С.Д. Ганичев, Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов, И.Д. Ярошецкий, Б.Я. Авербух. "Линейно-циркулярный дихроизм тока увлечения при нелинейном межподзонном поглощения света в р-Ge", *ФТТ*, Т.35, С. 198-207, 1993

[7] Д.А. Паршин, А.Р. Шабаетв. "Теория нелинейного поглощения инфракрасного излучения в полупроводниках с вырожденными зонами", *ЖЭТФ*, Т.92, Вып. 4, С. 1471-1484, 1987.

[8] Р.Я. Расулов. "Эффект увлечения при трех фотонном поглощении света в полупроводниках типа Ge", *ФТП*, Т.22, Вып. 11, С. 2077-2080, 1988.

[9] R.Ya. Rasulov, G.Kh. Khoshimov, Kh. Kholitdinov. "Linear-circular dichroism of nonlinear light absorption in n-GaP", *Semiconductors*, Vol. 30, No. 2, Pp. 274-272, 1996.

[10] R.Ya. Rasulov. "Linear circular dichroism in multiphoton interband absorption in semiconductors", *Physics of the Solid State*, Т.35, Issue 6, Pp. 1674-1678, 1993.

[11] N. V.Leppenen, E. L.Ivchenko, L. E.Golub. "Nonlinear Absorption and Photocurrent in Weyl Semimetals" *Physica Status Solidi (b)*. No. 129(1), P.139-146. doi:10.1002/pssb.201900305 (<https://doi.org/10.1002/pssb.201900305>),

[12] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Москва: Медиа, 2012, 584 с.

[13] Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов. Симметрия и реальная зонная структура полупроводников. Ташкент: Фан, 1989, 126 с.

[14] I.Vurgaftman, J.R.M.Meyer, J.R.Ram-Mohan. "Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys" *J. Appl. Phys.* Vol.89, Pp. 5815-5821, 2001.

## К ТЕОРИИ ОДНОФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В УЗКОЗОННЫХ КРИСТАЛЛАХ. УЧЕТ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.5.82.1235

*Рустам Явкачович Расулов,*

*Баходир Бахромович Ахмедов, Ислоббек Араббоевич Муминов,  
Икбол Мамиржонович Эшболтаев, Шохрух Ниёзов*

## ON THE THEORY OF ONE-PHOTON ABSORPTION OF POLARIZED LIGHT IN NARROW-GAP CRYSTALS. TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF COHERENT SATURATION

*Rustam Yavkachovich Rasulov,*

*Bakhodir Bakhromovich Akhmedov, Islombek Arabboyevich Mumínov,  
Ikbol Mamirzhonovich Eshboltaev, Shokhrukh Niyozov*

### АННОТАЦИЯ

В статье с микроскопической точки зрения исследуется линейно-циркулярный дихроизм однофотонного между зонного поглощения света в приближении Кейна в узкозонных кристаллах.

Проведен расчет линейно-циркулярного дихроизма однофотонного поглощения поляризованного света с учетом эффекта когерентного насыщения в фотовозбужденных носителей тока.

Вычислены матричные элементы однофотонных межзонных оптических переходов и соответствующий им линейно-циркулярный дихроизм, спектральная зависимость коэффициента поглощения света.

### ABSTRACT

In the article, from a microscopic point of view, the linear-circular dichroism of one-photon between band absorption of light in the Kane approximation in narrow-gap crystals is investigated.

The linear-circular dichroism of one-photon absorption of polarized light is calculated taking into account the effect of coherent saturation in photoexcited charge carriers.

The matrix elements of one-photon interband optical transitions and the corresponding linear-circular dichroism and the spectral dependence of the light absorption coefficient are calculated.

**Ключевые слова:** матричные элементы, однофотонные межзонные оптические переходы, линейно-циркулярный дихроизм.

**Key words:** matrix elements, one-photon interband optical transitions, linear-circular dichroism.

В настоящее время на практике широко используется нелинейные оптические явления, происходящие в кристаллах [1-3]. В этом контексте исследование нелинейного поглощения поляризованного света актуально как с физической точки зрения, так и с точки зрения приложения.

Отметим, что при однофотонном поглощении света оптические переходы не происходят через виртуальные состояния вообще не наблюдаются. Поэтому в однофотонных оптических переходах в кристаллах кубической и тетраэдрической симметрии не наблюдается линейно-циркулярный дихроизм.

Одно- и многофотонные поглощение поляризованного света в кристаллах, обусловленного оптическими переходами между подзонами валентной зоны, исследованы в [4-11], где не учтены вклада в межзонное однофотонное поглощение света эффекта когерентного насыщения [6, 7], обусловленного конечностью времени жизни фотовозбужденных носителей тока в конечном состоянии, к чему посвящена данная работа.

Если учтем вклад в поглощение эффекта когерентного насыщения, тогда коэффициент двухфотонного поглощения света запишется в виде

$$K^{(1)}(\omega, T) = \frac{4\pi}{h} \hbar \omega \frac{1}{l} \sum_{k,s=\pm 1/2, m=\pm 1/2, \pm 3/2} (f_{hh} - f_c) \delta(E_{hh} - E_c + \hbar\omega) \left\langle \frac{|M_{C,s;V,m}^{(1)}|^2}{1 + 4 \frac{\alpha\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{C,s;V,m}^{(1)}|^2} \right\rangle, \quad (1)$$

где  $f_{hh}(f_c)$  и  $E_{hh}(E_c)$  - функции распределения и энергетические спектры дырок (электронов) соответственно, знак  $\langle \dots \rangle$  означает усреднение по телесным углам волновых векторов носителей тока, остальные - общеизвестные величины.

Из (10) видно, что коэффициент межзонного однофотонного поглощения света  $K^{(1)}(\omega, T)$  состоит из парциальных составляющих, отличающихся друг от друга типа оптических переходов. В частности для оптического перехода типа  $|V, \pm 3/2\rangle \rightarrow |C, \pm 1/2\rangle$  выражается как

$$K^{(1)}(\omega, T) = \frac{16e^2}{3c\omega} \mu_{c,L}^{(+)} \cdot k_{c,L}^{(\omega)} \cdot P^2 \cdot F(\beta, 1, \omega) \cdot \mathfrak{Z}(\omega) \cdot [f_{hh}(E_{hh} k_{c,L}^{(\omega)}) - f_c(E_c k_{c,L}^{(\omega)})] \quad (2)$$

$$\text{здесь } F(\beta, 1, \omega) = [1 - \exp(\beta \hbar\omega)] \exp[\beta(\mu - E_{hh}(k_{c,L}^{(\omega)}))], \zeta_\omega = 4 \frac{\alpha\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left(\frac{eA_0}{ch}\right)^2 P_{CV}^2,$$

$$k_{c,L}^2 = \frac{2\mu_{c,L}^{(\omega)}}{\hbar^2} (\hbar\omega - E_g), \frac{1}{\mu_{c,L}^{(+)}} = \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_L}\right), \beta^{-1} = k_B T, \mathfrak{Z}(\omega) = \left\langle \frac{|e'_\pm|^2}{\sqrt{1 + \zeta_\omega |e'_\pm|^2}} \right\rangle.$$

Из (2) видно, что линейно-циркулярный дихроизм однофотонного поглощения света определяется величиной  $\mathfrak{Z}(\omega)$ , которая зависит от частоты и степени поляризации света, зонных параметров образца, которая возникает из-за сложности зонной структуры кристалла.

Отметим, что если не будем учитывать эффекта когерентного насыщения ( $\zeta_\omega = 0$ ), тогда  $K^{(1)}(\omega, T)$  не зависит от упомянутых выше величин, в частности от степени поляризации света, т.е. является постоянным числом:  $\mathfrak{Z}(\zeta_\omega = 0) = \frac{4}{3}$ , т.е. в этом случае не наблюдается однофотонный линейно-циркулярный дихроизм. Однако если учесть эффект когерентного насыщения, тогда  $\zeta_\omega \neq 0$ , что означает при этом возникает однофотонный линейно-циркулярный дихроизм. Это связано, с тем, что

для линейно поляризованного света

$$\mathfrak{Z}_{lin} = \int_{-1}^{+1} d\mu \frac{1 - \mu^2}{\sqrt{1 + \zeta_\omega (1 - \mu^2)}}; \quad (4)$$

для циркулярно поляризованного света

$$\mathfrak{Z}_{circ} = \int_{-1}^{+1} d\mu' \frac{\frac{1}{2}(1 + \mu'^2) \mp P_{circ} \mu'}{\sqrt{1 + \zeta_\omega \left[\frac{1}{2}(1 + \mu'^2) \mp P_{circ} \mu'\right]}}, \quad (5)$$

5. где  $P_{circ}$  - степень круговой поляризации света, знак " $\pm$ " относится к  $\sigma_\pm$  поляризованному свету,  $\phi(\phi')$  - угол между векторами  $\vec{e}$  и  $\vec{q}, \mu' = \cos \phi', \mu = \cos \phi$ ,  $\vec{q}$  - волновой вектор фотона.

Например, в случае  $P_{circ} = 1$  для линейно поляризованного света

$$\mathfrak{S}_{lin} = \zeta_{\omega}^{-5/2} \left\{ \zeta_{\omega}^{3/2} + \zeta_{\omega}^2 \cdot \arcsin \left( \frac{\zeta_{\omega}}{1+\zeta_{\omega}} \right)^{1/2} - \zeta_{\omega} \cdot \arcsin \left( \frac{\zeta_{\omega}}{1+\zeta_{\omega}} \right)^{1/2} \right\}, \quad (6)$$

для циркулярно поляризованного света

$$\mathfrak{S}_{circ} = \frac{2(\zeta_{\omega}^{3/2} \sqrt{\zeta_{\omega}+1} - \zeta_{\omega} \arcsin \sqrt{\zeta_{\omega}})}{\zeta_{\omega}^{5/2}}. \quad (7)$$

6. На рис.1 приведены графики функций  $\mathfrak{S}_{lin}(\zeta_{\omega})$  и  $\mathfrak{S}_{circ}(\zeta_{\omega})$  в зависимости от величины

$\zeta_{\omega} \propto \left( \frac{eA_0}{ch} \right)^2 \propto I$ . Как видно из рис.1, с ростом интенсивности света коэффициент

7. межзонного однофотонного линейно-циркулярного дихроизма  $\eta = \mathfrak{S}_{lin}(\zeta_{\omega})/\mathfrak{S}_{circ}(\zeta_{\omega})$  увеличивается и стремится к насыщению, т.е. при очень больших значениях интенсивности ( $\zeta_{\omega} \gg 1$ ) не зависит от интенсивности и  $\eta \approx 1.1$ . При количественных расчетах использованы данные работ [14].

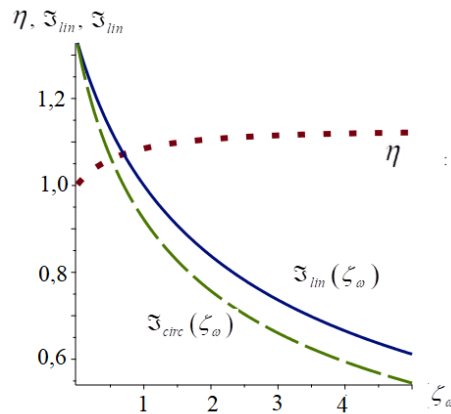


Рис.3. Графики функций  $\mathfrak{S}_{lin}$ ,  $\mathfrak{S}_{circ}$  и  $\eta$  фактора линейно-циркулярного дихроизма в зависимости от  $\zeta_{\omega} \propto I$  (от интенсивности света) в приближении Кейна в узкозонном кристалле.

8. Таким образом, однофотонный линейно-циркулярный дихроизм, обусловленный межзонными оптическими переходами в узкозонном кристалле, возникает при учете эффект когерентного насыщения. Однако при межзонном многофотонном поглощении поляризованного света наблюдается линейно-циркулярный

дихроизм независимо от того, учитывается ли эффект когерентного насыщения или нет. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Согласно [12, 13] эффективный гамильтониан носителей тока для трехзонной модели Кейна выражается следующим образом:

$$\hat{H}^{eff}(k_z) =$$

$$\begin{pmatrix} E_c & -i\sqrt{2/3}Pk_z & -iPk_z/\sqrt{3} \\ i\sqrt{2/3}Pk_z & E_v & 0 \\ iPk_z/\sqrt{3} & 0 & E_v - \Delta \end{pmatrix}, \quad (\text{Пр.1})$$

собственное значение которого определяется уравнением:

$$(E_c - E)(E_v - E)(E_v - \Delta - E) - P^2k^2(E_v - E - 2\Delta/3) = 0, \quad (\text{Пр.2})$$

где  $k_z = k = |\vec{k}|$ . Это уравнение имеет три решения:  $E_{el}(k), E_{lh}(k), E_{so}(k)$ . Из (Пр.2) имеем  $k^2(E) = \frac{1}{P^2} \frac{(E_c - E)(E_v - E)(E_v - E + \Delta)}{(E - E_v + 2\Delta/3)}$  и с помощью последней зависимости построен график  $k^2(E)$  на рис.2. Из рис.2 видно, что все энергетические зоны имеют непараболический вид, а квадратичная зависимость энергии от  $k = |\vec{k}|$  наблюдается в области малых значений волнового вектора.

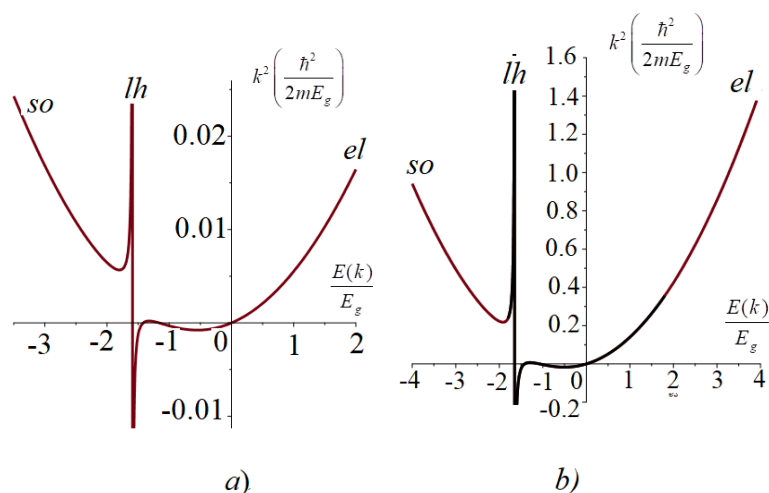


Рис.2. Энергетические спектры носителей тока в GaAs ( $D/E_g = 2,4 E_g = 1,42\text{eV}, m_{el} = 0,067 \cdot m_0$ ) и InSb ( $\Delta/E_g = 3,4 E_g = 0,18\text{eV}, m_{el} = 0,013 \cdot m_0$ ) в трехзонной изотропной модели Кейна, где области отрицательных значений величины  $k^2(E)$  соответствуют ширины запрещенной зоны и зоны спин-орбитального расщепления.

### Литература

[1] A.Rostami. “Low threshold and tunable all-optical switch using two-photon absorption in array of nonlinear ring resonators coupled to MZI” *Microelectr. J.*, Vol.7, No. 9, Pp. 976-981, 2006.

[2] Pattanaik H. S., Reichert M., Hagan D. J., and Van Stryland E. W. “Three-dimensional IR imaging with uncooled GaN photodiodes using nondegenerate two-photon absorption” *Opt. Express*. Vol. 24, No. 2, Pp. 1196-1205, 2016.

[3] Yu J. H., Kwon S.-H., Petrášek Z., Park O. K., Jun S. W., Shin K., Choi M., Park Y. I., Park K., Na H. B., Lee N., Lee D. W., Kim J. H., Schwille P., and T. Hyeon. “High-resolution three-photon biomedical imaging using doped ZnS nanocrystals” *Nat. Mater.* Vol. 12, No. 4, Pp.359-366, 2013.

[4] Е.Л. Ивченко. “Двухфотонное поглощение света в оптическая ориентация свободных носителей” *ФТТ*. Т.14, Вып.11, С. 3489-3496, 1972.

[5] Р.Я.Расулов. “Поляризационные оптические и фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном и нелинейном поглощении света”. Диссертация на соиск. уч. степени доктора физ.-мат. наук. Ст.-Петербург. - 1993. – 206 с.

[6] С.Д. Ганичев, Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов, И.Д. Ярощцкий, Б.Я. Авербух. “Линейно-циркулярный дихроизм тока увлечения при нелинейном межподзонам поглощения света в p-Ge”, *ФТТ*, Т.35, С. 198-207, 1993

[7] Д.А. Паршин, А.Р. Шабаев. “Теория нелинейного поглощения инфракрасного излучения в полупроводниках с вырожденными зонами”, *ЖЭТФ*, Т.92, Вып. 4, С. 1471-1484, 1987.

[8] Р.Я. Расулов. “Эффект увлечения при трех фотонном поглощении света в полупроводниках типа Ge”, *ФТП*, Т.22, Вып. 11, С. 2077-2080, 1988.

[9] R.Ya. Rasulov, G.Kh. Khoshimov, Kh. Kholitdinov. “Linear-circular dichroism of nonlinear light absorption in n-GaP”, *Semiconductors*, Vol. 30, No. 2, Pp. 274-272, 1996.

[10] R.Ya. Rasulov. “Linear circular dichroism in multiphoton interband absorption in semiconductors”, *Physics of the Solid State*, Т.35, Issue 6, Pp. 1674-1678, 1993.

[11] N. V.Leppenen, E. L.Ivchenko, L. E.Golub. “Nonlinear Absorption and Photocurrent in Weyl Semimetals” *Physica Status Solidi (b)*. No. 129(1), P.139-146. doi:10.1002/pssb.201900305 (<https://doi.org/10.1002/pssb.201900305>),

[12] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Москва: Медиа, 2012, 584 с.

[13] Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов. Симметрия и реальная зонная структура полупроводников. Ташкент: Фан, 1989, 126 с.

[14] I.Vurgafman, J.R.M.Meyer, J.R.Ram-Mohan. “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys” *J. Appl. Phys.* Vol.89, Pp. 5815-5821, 2001.