SECTION II. PHYSICS

Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Кодиров А., Султонов Р.Р.

К теории многофотонного линейно-циркулярного дихроизма в полупроводниках

Ферганский государственный университет
(Узбекистан, Фергана)

doi 10.18411/gq-31-07-2020-03

idsp sciencerussia-31-07-2020-03

Аннотация

Теоретически исследован линейно-циркулярный дихроизм двух и трех фотонного поглощения света в полупроводниках кубической симметрии дырочной проводимости, где рассчитаны матричные элементы двух и трехфотонных оптических переходов, протекающих между подзонами валентной зоны полупроводника.

Ключевые слова: линейно и циркулярно поляризованный свет, матричный элемент, оптический переход, вероятность перехода, носители тока, валентная зона, полупроводник.

Abstract

The linear-circular dichroism of two and three photon absorption in semiconductors with cubic symmetry of hole conductivity is theoretically investigated, where the matrix elements of two and three-photon optical transitions between the subbands of the semiconductor valence band are calculated.

Keywords: linearly and circularly polarized light, matrix element, optical transition, transition probability, current carriers, valence band, semiconductor.

В настоящее время многофотонный линейно-циркулярный и циркулярно-циркулярный дихроизм исследован в полупроводниках при поглощении света различной частоты и поляризации [1-4], обусловленный междוזонными оптическими переходами, т.е. оптическими переходами между валентной зоной и зоной проводимости полупроводника. В вышеуказанных работах открытыми остались процессы поглощения света, обусловленные двух и трехфотонными оптическими переходами между подзонами одной, например, валентной зоны или зоны проводимости полупроводника, а также не учтены одновременное поглощение двух фотонов [10-12], к чему посвящено данное сообщение. Ниже проведем квантово-механический анализ двух и трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма в полупроводниках кубической симметрии со сложной валентной зоной.

Заметим здесь, что в сферическом приближении в энергетическом спектре носителей тока линейно-циркулярный дихроизм однофотонного поглощения света можно наблюдать при учете когерентного насыщения конечного состояния фотовозбужденных носителей тока [5,10-12].

Ниже рассмотрим двух и трех фотонное поглощение поляризованного излучения в полупроводниках кубической симметрии, обусловленное прямыми оптическими переходами между подзонами легких и тяжелых дырок. Тогда следуя по [10-12] с учетом вклада эффекта когерентного насыщения в коэффициент N фотонного поглощения света $K^{(N)}(\omega, T)$ имеем

$$K^{(N)}(\omega, T) = 2\pi N \frac{\omega}{I} \rho(N\hbar\omega) F(\beta, N, \omega) \sum_{m=\mp 1/2; m'=\mp 3/2;} \left\langle \frac{|M_{m',m}^{(N)}(\vec{k})|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} |M_{m',m}^{(N)}(\vec{k})|^2}} \right\rangle, \quad (1)$$

где $M_{m;m'}^{(N)}(k)$ – составной матричный элемент оптического перехода из состояния $|m'\vec{k}\rangle$ в $|m\vec{k}\rangle$, $F(\beta, N, \omega) = [1 - \exp(-N\hbar\omega/(k_B T))] \exp[(E_F - E_1^{(N)})/k_B T]$, $E_1^* = m_2 \hbar \omega (m_2 - m_1)$, $I = \frac{n_\omega \omega^2 A_0^2}{2\pi c} (A_0)$ – интенсивность (амплитуда вектора потенциала) света, $E_{\vec{k}}$ – энергетический спектр дырок в подзоне l ($l=1(l=2)$ – для тяжелых (легких) дырок), n_ω – коэффициент преломления на частоте ω , $\hbar\omega$ – энергия фотона, $\rho(N\hbar\omega) = \mu_- k_\omega^{(N)} / (\pi^2 \hbar^2)$ – приведенная плотность состояний фотовозбужденных дырок, $k^{(N)} = (2\mu_- N \omega / \hbar)^{1/2}$, $\alpha_\omega = 6\omega^2 T_1^{(1)} T_2^{(1)} \frac{I}{I_0}$, $I_0 = \frac{cn_\omega \hbar^3 \omega^3}{2\pi |B|}$, знак $\langle \dots \rangle$ означает

усреднение по телесному углу волнового вектора дырок $\vec{k}$. Остальные величины общеизвестны. Здесь электронам в подзоне $l=1$ (тяжелые дырки) соответствуют состояния с проекцией $m = \pm 3/2$ углового момента на направление $\vec{k}$, а электронам в подзоне $l=2$ (легкие дырки) – состояния с $m = \pm 1/2$. Например, для p -GaAs и $I_0 = 13420 \frac{kWt}{cm^2}$ при $\hbar\omega = 17 meV$, $m_2 = 0,045 m_0$, $E_1^{(N)} = NE_1^*$.

Из (1) видно, что для определения спектральной или температурной зависимости коэффициента многофотонного поглощения света $K^{(N)}$, надо рассчитать матричные элементы рассматриваемых оптических переходов, которых будем анализировать ниже для конкретных случаев.

Следуя по [12] матричный элемент двух фотонного оптического перехода представим в виде

$$M_{m\vec{k}, m'\vec{k}}^{(2)} = M_{m, m'}^{(2)} = \sum_{m''=\pm 1/2, \pm 3/2} \frac{M_{m, m''}^{(1)} M_{m'', m'}^{(1)}}{(E_{m''\vec{k}} - E_{m'\vec{k}} - \hbar\omega)} - \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right) [H_{\Gamma_6}^{(2)}(\vec{e}')]_{m, m'}, \quad (2)$$

где $H_{\Gamma_6}^{(2)}(\vec{e}') = H_{\Gamma_6}^{(2)}(\vec{k} \rightarrow \vec{e}')$, $H_{\Gamma_6}^{(2)}(\vec{k})$ – эффектив гамильтониан дырок в представлении Латтинжера-Кона [17, 18], $e_{x'}, e_{y'}, e_{z'}$ – компоненты вектора $\vec{e}'$, где $e_{x'}, e_{y'}$ – проекции $\vec{e}$ вектора поляризации света на оси x', y' , перпендикулярные к волновому вектору дырок ($\vec{k}$). Отметим, что первое слагаемое (2) описывает двух квантовый межподзонный оптический переход, протекающий поглощением двух одинарных фотонов, а второе слагаемое (2) характеризует вклад двух фотонных оптических переходов, протекающих через виртуальные состояния, находящихся вдали от валентной зоны, в составной матричный элемент $M_{m\vec{k}, m'\vec{k}}^{(2)}$. Поэтому второе слагаемое (2) описывает одновременное поглощение двух фотонов.

Далее проанализируем матричные элементы для различного типа двух и трехфотонных оптических переходов в зависимости от степени поляризации света. Сначала сгруппируем оптические переходы по их физической природе, т.е. рассмотрим как и последовательное поглощение двух или трех фотонов, так и одновременное поглощение двух фотонов. Расчеты показывают, что матричный элемент двух фотонного оптического перехода типа $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |\pm 1/2\rangle$, описываемого

диаграммой , равен $3\sqrt{3} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 B e'_\pm e_{z'}$, а для $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |\mp 1/2\rangle$ равен

$-\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 B \frac{\sqrt{3}}{2} e_{\mp}^{\prime 2}$; матричный элемент двух фотонного оптического перехода типа

$|\pm 3/2\rangle \Rightarrow |\pm 1/2\rangle$, описываемого диаграммой , равен $-\left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^2 B\sqrt{3}e'_z e'_\mp$, а для

$|\mp 3/2\rangle \Rightarrow |\pm 1/2\rangle$ равен $-\left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^2 B\frac{\sqrt{3}}{2}e'^2_\mp$. В результате получим выражение для

квадрат модуля матричного элемента двух фотонного оптического перехода,

описываемого суммой фейнмановских диаграмм , в виде

$$\left|M_{\pm 3/2, \pm 1/2}^{(N=2)}(\vec{k})\right|^2 = 75 \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^4 B^2 |e'_\pm e'_z|^2, \quad (3)$$

а квадрат модуля матричного элемента двух фотонного оптического перехода типа $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |\mp 1/2\rangle$, $|\mp 3/2\rangle \Rightarrow |\pm 1/2\rangle$ определяется как

$$\left|M_{\pm 3/2, \mp 1/2}^{(N=2)}(\vec{k})\right|^2 = \frac{3}{4} \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^4 B^2 |e'^2_\mp|, \quad (4)$$

и после углового усреднения имеем

$$\left\langle \left|M_{\pm 3/2, \mp 1/2}^{(N=2)}(\vec{k})\right|^2 \right\rangle = \frac{1}{20} \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^4 B^2 \begin{cases} 8 \text{ для линейной поляризации,} \\ 7 \text{ для линейной поляризации,} \end{cases}$$

Тогда коэффициент линейно-циркулярного дихроизма, рассчитанный для вышеуказанных оптических переходов равен 8/7.

Теперь переходим к анализу трехфотонных оптических переходов между подзонами тяжелых и легких дырок. Если рассмотрим оптические переходы, происходящие поглощением трех отдельных фотонов, описываемых диаграммой

тогда поляризационная зависимость матричного элемента оптического перехода типа $|+3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |m'\rangle \rightarrow |+1/2\rangle$ выражается как

$$2\sqrt{3} \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^3 \frac{(Bk)^3}{(\hbar\omega)^2} e'_+ \left(4|e'_z|^2 - \frac{3}{8}|e'_+|^2\right), \text{ где по номерам промежуточных состояний}$$

$|m\rangle, |m'\rangle$ проводится суммирование. Матричный элемент трехфотонного оптического

перехода типа , где сначала поглощается один фотон, а далее одновременно

поглощаются два фотона, $-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^3 \frac{B^2 k}{\hbar\omega} e'_+ \times$

$$\times \left\{ \left[2\left(\frac{A}{B}-1\right) + 2e'^2_z + \frac{1}{2}e'^2_\perp \right] - 4\left(\frac{A}{B}-1\right)e'^2_z \right\}, \text{ а матричный элемент оптического}$$

перехода типа , где сначала одновременно поглощаются два фотона, а далее поглощается один фотон, определяется аналогичным образом. Сумма матричных

элементов последних двух переходов выражается как $-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar}\right)^3 \frac{B^2 k}{\hbar\omega} e'_+ (10e'^2_z - e'^2_\perp)$.

Из последних соотношений видно, что коэффициент трехфотонного линейно-циркулярного дихроизма, когда фотоны поглощаются по отдельности, равен $\eta_{\pm 1/2, \pm 3/2}^{(1-1-1)} = 44/15$.

В заключении отметим, что поляризационная зависимость вероятности двух (трех и четырех) фотонного оптического перехода между валентной зоной и зоны

проводимости полупроводника определяется тензором четвертого (шестого и восьмого) ранга.

Работа частично финансируется грантом ОТ-Ф2-66.

1. E.L.Ivchenko. Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures / E.L. Ivchenko. - Harrow : Alpha Science International Ltd. 2005. XII. 427 p.
2. Е.Л. Ивченко. Новые оптические явления в полупроводниках: Дисс. ... д.ф.-м.н. Ленинград. 1983. 148 с. Е.Л.Ивченко. Двухфотонное поглощение света и оптическая ориентация свободных носителей// ФТТ. 1972. Т.14. В.12. С. 3489.
3. M.I.Dyakonov (Ed.). Spin Physics in Semiconductors. Springer-Verlag, Heydelberg. 2008. -447 p. (ISSN 0171-1873, ISBN 978-3-540-78819-5, e-ISBN 978-3-540-78820-1). Optical orientation. Editors: F.Meier and B.P.Zakharchenya. North-Holland. New York.Tokyo. 1984. 534 p.
4. В.А. Шалыгин. Оптические и фотогальванические эффекты в объемных полупроводниках и двумерных структурах. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук. Ст.-Петербург. 2013. 34 с.
5. Р.Я. Расулов. Поляризационные оптические фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном и нелинейном поглощении света. Дисс. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. ФТИ РАН им. акад. Иоффе С.-П. 1993 г. 168 с.
6. Raluca A. Negres A., Joel M. Hales, Andrey Kobayakov, David J. Hagan, and Eric W. Van Stryland. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. V.38. P. 205-1209.
7. Jun He, Yingli Qu, Heping Li, Jun Mi, and Wei Ji. //Optical Society of America. 2005. V.13. P. 9235-9241.
8. Hurlbut W. C. and Yun-Shik Lee, K. L. Vodopyanov, P. S. Kuo, and M. M. Fejer. //Optics Letters. 2007. V.32. P. 668-673.
9. Shaul Pearl, Nir Rotenberg, and Henry M. van Driel.// Applied Physics Letters. 2008. V.93. P.131102-131109.
10. V.R. Rasulov, R.Ya.Rasulov, I.Eshboltaev// Physics of the Solid State. Springer. 2017. Vol.59, No.3. P. 463–468.
11. V.R. Rasulov, R.Ya.Rasulov, I.Eshboltaev // Russian Physics Journal. – Springer, 2016. – Vol. 58, No.12. – P.1681-1686.
12. Р.Я. Расулов //ФТТ. 1993. Т.35. В.6. С.1107.
13. С.Д.Ганичев, Е.Л.Ивченко, Р.Я.Расулов, И.Д.Ярошецкий, Б.Я.Авербух //ЖЭТФ. 1993. В. 1. С.198.
14. V.R. Rasulov, R.Ya.Rasulov, I.Eshboltaev// Semiconductors. Springer. 2016. Vol.50, No.2. P. 145-153.
15. V.R. Rasulov, R.Ya.Rasulov, I.Eshboltaev// Russian Physics Journal. – Springer, 2016. – Vol. 59, No.1. P.92-98/
16. В.Р.Расулов, Р.Я. Расулов, И.М.Эшболтаев// Изв.ВУЗов. Физика. 2013. Т.59. В.3. С. 114-121.
17. Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука. 1973.
18. Е.Л.Ивченко, Р.Я.Расулов. Симметрия и реальная зонная структура полупроводников. Ташкент. Фан. 1989. 126 С.