

2. Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillaev, N.F. Current - voltage behavior of silicon containing nanoclusters of manganese atoms. *Inorganic Mater.* 2014, 50 (4), p. 325. <https://doi.org/10.1134/S0020168514040025>

ДВУХКВАНТОВОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА И ЛИНЕЙНО-ЦИРКУЛЯРНЫЙ ДИХРОИЗМ В КРИСТАЛЛАХ КУБИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

Расулов Вохоб Рустамович¹, Расулов Рустам Явкачович¹, Кодиров Нурилло Убайдулло угли¹, Уринова Камала Комилжановна², Рахматов Иззатилло Умматилло угли¹.

¹ Ферганский государственный университет, ² Кокандский государственный педагогический институт

Аннотация: Это исследование углубляется в двухфотонные нелинейные оптические явления, особенно в полупроводниках с тетраэдрической симметрией, с использованием трехзонной модели. В исследовании изучаются спектрально-угловые зависимости двухквантового рассеяния света и связанного с ним линейно-кругового дихроизма (ЛКД) в этих материалах, особое внимание уделяется промежуточным переходам и влиянию эффекта Раби. Примечательно, что эффект Раби уменьшает амплитуду колебаний с увеличением интенсивности света, независимо от поляризации, что дает ценную информацию об оптическом поведении этих полупроводников. Сравнительный анализ выявил уникальное поведение различных полупроводниковых материалов, таких как GaAs и InSb, подчеркивая влияние эффекта Раби на характеристики двухфотонного поглощения.

Ключевые слова: оптические явления; оптические эффекты, включающие одновременное поглощение двух фотонов, актуальные в различных приложениях, изменение оптических свойств, касающихся длины волны и направления падающего света, эффект, описывающий дифференциальное поглощение или рассеяние света с различной поляризацией.

Двухфотонные нелинейные оптические явления, обусловленные межзонными переходами в полупроводниках, были выполнены, где расчет двухфотонных матричных элементов проведен по теории возмущений по полю неполяризованного света в двухзонном приближении Кейна. В работах проведено исследование двух- и трехфотонный линейно-циркулярный дихроизм (ЛКД) в кристаллах кубической решетки. В исследовано многофотонное поглощение поляризованного излучения в полупроводниках со сложной зоной, обусловленное вертикальными оптическими переходами между подзонами валентной зоны с легкой и тяжелой массой. В исследовано нелинейное однофотонное поглощение света в полуметаллах Вейля в зависимости от степени поляризации.

В исследован линейно-циркулярный дихроизм (ЛКД) в германии дырочной проводимости в случае, когда в поглощение вносят сопоставимые вклады n -фотонные процессы с $n = 1 \div 5$. В исследован вклад эффекта Раби- эффекта Раби в четырехфотонное поглощения поляризованного света, обусловленное внутризонными оптическими переходами.

В настоящей работе, проведены расчеты спектрально - угловые зависимости межзонного двухфотонного, т.е. двухквантового поглощения света (ДФПС) и его ЛКД в полупроводниках тетраэдрической симметрии в трехзонной модели Кейна. При этом учтены вклады в многоквантовый процесс виртуальных состояний, находящихся в как подзонах

валентной зоны и в зоне спин-орбитального расщепления, так в зоне проводимости, где учтен вклад эффекта Раби.

Теперь проанализируем спектрально-угловую зависимость коэффициента двухквантового поглощения света, которая определяется с помощью функций \mathfrak{R}_1 и \mathfrak{R}_2 :

$$\tilde{\mathfrak{R}}_1 = \left\langle \frac{\xi_1 e_c^2 |e_c|^2}{\sqrt{1 + \xi_1 e_c^2 |e_c|^2}} \right\rangle, \quad \tilde{\mathfrak{R}}_2 = \left\langle \frac{\xi_2 |e_c|^2}{\sqrt{1 + \xi_2 |e_c|^2}} \right\rangle, \quad (1)$$

где параметры Раби

$$\zeta_1 = 4 \frac{\alpha_w}{\hbar^2 \omega^2} \xi_1, \quad \zeta_2 = 4 \frac{\alpha_w}{\hbar^2 \omega^2} \xi_2, \quad (2)$$

$$\xi_1 = \left(\frac{eA_{\tilde{h}}}{\hbar c} \right)^4 \frac{1}{3} \left(\frac{p_{cv}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - \frac{3B^2 k^2}{E_{\Delta} - E_{hh} - \hbar\omega} \right)^2, \quad \xi_2 = \frac{1}{12} \left(\frac{p_{cv}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - g \frac{B^2 k^2}{E_{\Delta} - E_{hh} - \hbar\omega} \right)^2 |e_c^2|^2.$$

Отметим, что учет вклада эффекта Раби приводит к уменьшению амплитуды осцилляции с ростом частоты света независимо от угла между векторов поляризации и волнового вектора носителей тока как для линейно- поляризованного, так и для циркулярно-поляризованного света. Это связано с тем, что спектрально-угловая зависимость для линейно-поляризованного света описывается углом между векторами поляризации и носителей тока, а для циркулярно-поляризованного света - углом между векторами фотона и носителей тока. Количественные расчеты проводились при $\zeta_{1,2} = 0,2$.

Расчеты показывают, что для GaAs с ростом частоты света вклад в суммарный коэффициент двухквантового ЛКД слагаемого, пропорционального величине \mathfrak{R}_1 уменьшается относительно вклада слагаемого, пропорционального величине \mathfrak{R}_2 , вне зависимости от угла между векторами \vec{e} , \vec{k} , \vec{q} : если частота света увеличивается в 1,4 раза, тогда этот вклад уменьшается в 2,5 раза где, \vec{e} - вектор поляризации света, \vec{k} (\vec{q}) - волновой вектор носителей тока (фотона). Это связано с тем, что первый вклад не зависит от частоты света, а второй вклад зависит от частоты как $\propto (\hbar\omega)^{1/2}$. Поэтому второй вклад увеличивается с ростом частоты света.

Для сопоставления теоретических результатов ниже проведены расчеты по спектрально-угловой зависимости коэффициентов \mathfrak{R}_1 и \mathfrak{R}_2 , с помощью которых определяется коэффициент двухквантового поглощения света линейной и циркулярной поляризации в InSb, обусловленного между подзонами легких и тяжелых дырок для двух значений параметров Раби $\zeta_1 = 0,2; 0,5$ и $\zeta_2 = 0,2; 0,5$, где промежуточные состояния находятся в зонах проводимости и спин орбитального расщепления с учетом вклада эффекта Раби. Расчеты показывают, что в спектрально-угловой зависимости суммарного коэффициента $\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2$ как для линейно-, так и циркулярно-поляризованного свет поляризованным светом, с помощью которого определяется коэффициент двухквантового поглощения света линейной и циркулярной поляризации в InSb, обусловленного между подзонами легких и тяжелых дырок, где промежуточные состояния находятся в зонах

проводимости и спин орбитального расщепления с учетом вклада эффекта Раби для двух значений параметра Раби: во первых все спектрально-угловые зависимости имеют осцилляционный характер; во вторых ростом частоты света амплитуда осцилляции увеличивается; в третьих для циркулярно-поляризованного света осцилляция становится аperiodическим; в четвертых с ростом значений параметра Раби уменьшаются амплитудные значения осцилляционных зависимостей.

Отметим здесь, что в отличие от широкозонного кристалла *GaAs* в узкозонном полупроводнике *InSb* коэффициент двухквантового ЛЦД больше единицы. А также при увеличении параметра Раби от $\zeta_{\omega} = 0,2$ до $\zeta_{\omega} = 0,5$ максимальное значение спектрально-угловой зависимости коэффициента двухквантового ЛЦД в *InSb* увеличивается на 23%. Поэтому спектрально-угловая зависимость двухквантового ЛЦД в *InSb* с учетом вклада эффекта Раби почти не зависит от значения параметра Раби и амплитудное значение коэффициента двухквантового ЛЦД не более 6.

Количественные значения зонных параметров выбраны из работы. В заключении отметим что в трехзонном приближении Кейна: Как с учетом, так и без учета эффекта Раби рассчитаны угловые и спектральные зависимости коэффициентов двухквантового ЛЦД и поглощения света, отличающихся друг от друга типом промежуточных состояний.

Литература

1. Е.Л.Ивченко. // ФТТ. -1972.-Т.14. Вып.12. -С. 3489-3485.
2. Е. Л. Ивченко, Е. Ю. Перлин. // ФТТ. -1973. -Т. 15. -Вып. 9. -С. 2781-2783.
3. Е.В.Берегулин, Д.П.Дворников, Е.Л.Ивченко, И.Д.Ярошецкий. // ФТП. -1975. -Т. 9. -Вып. 5.
4. С. Б.Арифжанов, А. М.Данишевский, Е.Л.Ивченко. // ЖЭТФ. -1978. -Т. 74.-С. 172-177.
5. 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.
6. Р.Я.Расулов, Г.Х.Хошимов, Х.Холитдинов// ФТП. 1996. – Vol. 30. – No. 2. – Pp. 274-272.
7. Р.Я.Расулов// ФТП. -1988. – Т.22. – Вып. 11. -С.2077-2073.
8. Р.Я.Расулов// ФТТ. 1993. -Т.35. -Вып.6. -С. 1674-1678.
9. В.Р. Расулов, Р.Я. Расулов, Р.Р. Султонов, Б.Б. Ахмедов //ФТП. 2020. Т.54. В.11. С.1181-1187.
10. V.R. Rasulov, R.Ya. Rasulov, I.Eshboltaev. // Physics of the Solid State. - 2017. – Vol.59. – No.3. – Pp. 463–468.
11. V.R. Rasulov, R.Ya. Rasulov, I.Eshboltaev. // Russian Physics Journal. –2015. – Vol. 58, – No.12. – Pp.1681-1686.
12. 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).
13. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., & Маматова, М. А. (2022, August). МЕЖДУЗОННОЕ ОДНОФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ. In The 12 th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects”(August 21-23, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. 308 p. (p. 112).

14. 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.
15. 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.
16. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., & Adhamovna, M. M. (2022). ELECTRONIC PROPERTIES OF A SEMICONDUCTOR TWO-BARRIER STRUCTURE. EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR), 8(5), 58-62.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАРГАНЦА И КИСЛОРОДА В РЕШЕТКЕ КРЕМНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

М.О. Турсунов¹, Х.М. Идиев², У.М. Хужаназаров¹, Ш.Ш. Шопулатов¹,

¹ Термезский государственной университет, Термез, Узбекистан.

² Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан.

Аннотация. Результаты показывают, что повышение температуры диффузии в диапазоне 1175÷1300°С приводит к уменьшению концентрации электрически активных атомов марганца, так что при $t=1300^{\circ}\text{C}$ их концентрация становится значительно ниже исходной концентрации легирующей примеси бора. Образование электронейтральных комплексов сопровождается образованием в решетке кремния новых тетраэдрических ячеек типа $\text{Si}_2\text{O}^{++}\text{Mn}^{-}$, которые лишь незначительно искажают ее периодичность, но существенно отличаются по свойствам от элементарной ячейки кремния.

Ключевые слова: кремний, диффузия марганца, кислород, электронейтральный комплекс, растворимость.

При образовании электронейтральных комплексов $\text{Mn}^{-}\text{O}^{++}$, формируются новые элементарные ячейки типа $\text{Si}_2\text{O}^{++}\text{Mn}^{-}$ в решетке кремния, существенно отличающиеся по свойствам от элементарной ячейки кремния. Природа химической связи в них - ионно-ковалентная, кроме того, энергия связи электронов в ней другая. При увеличении концентрации таких элементарных ячеек могут образовываться их различные комбинации, вплоть до образования наноконфлюксов новой фазы, которые будут иметь свои фундаментальные параметры [1-2].

В качестве исходного материала были использован монокристаллический кремний р-типа с $\rho=3$ Ом·см, полученный методом Чохральского. В образцах концентрация кислорода составляла $\text{N}_{\text{O}_2}=(5+6)\cdot 10^{17}\text{см}^{-3}$ соответственно. Плотность дислокаций была $S=10^3\text{см}^{-2}$. Механическая и химическая обработка всех образцов проводилась идентично. Диффузия марганца проводилась из газовой фазы в откачанных кварцевых ампулах с остаточным давлением не более $P\sim 10^{-4}$ мм.рт.ст., в каждой ампуле было по двух образцов обоих видов материала [3-4]. Время диффузии составляло $t=0,5\div 1$ час.

На основе полученных результатов, можно считать, что происходит формирование электронейтральных комплексов за счет взаимодействия между атомами марганца и кислорода. В наших условиях диффузии возможно, как узельное, так и внеузельное расположение атомов марганца и кислорода.

В первом случае, атомы марганца и кислорода находятся в соседних узлах решетки кремния. При этом атомы кислорода и марганца образуют устойчивые комплексы с ионно-