

Таким образом, полученный кремниевый материал содержит достаточно высокую $\sim N \cdot (3 \pm 4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ концентрацию тетраэдрических ячеек типа Si_2OMn в решетке кремния, что представляет очень большой научный и практический интерес. Исследование путей повышения концентрации подобных бинарных комплексов и свойств таких материалов позволят в будущем создать новый класс материалов на основе кремния для разработки оптоэлектронных и фотозлектрических приборов.

Список литературы

1. *M.K. Bakhadirkanov, Kh.M. Iliev, M.O. Tursunov, S.B. Isamov, S.V. Koveshnikov, M.Kh. Majitov.* Electrical Properties of Silicon Doped with Manganese via High-Temperature Diffusion // *Inorganic Materials*. 2021. Vol. 57, No. 7, pp. 655–662.
2. *Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Zikrillayev N.F., Tursunov M.O.* Anomalous Photoelectric Phenomena in Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // *Semiconductors*, 2021, Vol. 55, No. 6, pp. 636–639.
3. *X.M. Iliev, M.O. Tursunov, S.B. Koveshnikov, A.S. Allaёrov.* Энергии связи комплексов марганца с элементами VI группы в решетке кремния // VII Международная научно-практическая конференция «Энергетика и Энергосбережение: теория и практика» г. Кемерово, 7–9 декабря 2022. С. 227, 1–5
4. *Ismailov K.A., Iliev X.M., Tursunov M.O., Ismaylov B.K.* Formation of complexes consisting of impurity Mn atoms and group VI elements in the crystal lattice of silicon. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2021, Vol. 24, No. 3, pp. 255–260.
5. *Бахадирханов М.К., Илев Х.М., Исамов С.Б., Тачилин С.А., Зикриллеев Н.Ф., Ибодуллаев Ш.Н., Турсунов М.О.* Особенности фотозлектрических свойств кремния с нанокластерами атомов марганца в области $\lambda=1,5...2,5 \text{ мкм}$ // *Приборы*. Россия, 2019. Т.231. вып 10. 52–55.

МАТРИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕЖДУЗОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛАХ As_2B_5

Расулов Вохоб Рустамович¹, Расулов Рустам Явкочевич¹, Кодиров Нурилло Убайдулло угли¹, Уринова Камала Комилжановна², Юсупова Махлиё Шавкатжон кизи¹

¹ Ферганский государственный университет, ² Кокандский государственный педагогический институт

Аннотация: Появление мощных квантовых лазерных генераторов стимулировало исследование нелинейного поведения оптических полей, особенно в конденсированных материалах и, особенно, в полупроводниках. Эти исследования обусловлены особыми и сложными свойствами, характеризующими нелинейные эффекты, которые открывают возможности для нового понимания свойств кристаллических полос и широкого спектра практических применений. Эти исследования признают, что нелинейное поведение коэффициента однофотонного поглощения света объясняется эффектом Раби, охватывающим фотоиндуцированное поглощение как в межзонных, так и внутризонных процессах. Этот эффект возникает из-за изменения функций распределения электронов и Дирака под влиянием

релаксации энергии и импульса и дельта-функции Дирака, подчиняющихся закону сохранения энергии.

Ключевые слова: устройства, способные производить интенсивное лазерное излучение посредством квантовых процессов, эффекты, которые проявляются в оптических материалах в условиях интенсивного освещения, с акцентом на полупроводники, квантовое явление, влияющее на поведение частиц, подвергающихся воздействию сильных электромагнитных полей.

Введение

Открытие интенсивных квантовых генераторов лазерного излучения стимулировало развитие нелинейных по интенсивности оптических явлений в конденсированных средах, в частности, в полупроводниках. В этом аспекте представляется необходимым исследование нелинейных оптических свойств как узкозонных, так и широкозонных полупроводников, что связано с необычностью и сложностью свойств данного эффекта, возможностью получения новой информации о зонных свойствах кристаллов и перспективой широкого практического применения.

В вышеперечисленных работах считается, что нелинейность по интенсивности коэффициента однофотонного поглощения света возникает за счет эффекта Раби и она как в межзонном, так и внутризонном поглощении света, обусловлена фотоиндуцированной добавкой в функции распределения электронов и дырок, определяемой временем релаксации по энергии и импульса и дельта функцией Дирака, т.е. законом сохранения энергии.

Если считаем, что происходят оптические переходы из ветви тяжелых дырок в ветви легких дырок, где промежуточные состояния носителей тока находятся в подзонах валентной зоны, тогда матричный элемент двухквантового оптического перехода определяется соотношением

$$|+3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |+1/2\rangle = \frac{M_{+1/2;+3/2}^{(1)} M_{+3/2;+3/2}^{(1)}}{E_{hh} - E_{hh} - \hbar\omega} + \frac{M_{+1/2;+1/2}^{(1)} M_{+1/2;+3/2}^{(1)}}{E_{hh} - E_{hh} - \hbar\omega} + M_{+1/2;+3/2}^{(2)} =$$

$$= \frac{M_{+1/2;+3/2}^{(1)} M_{-3/2;+3/2}^{(1)}}{(-\hbar\omega)} + \frac{M_{+1/2;+1/2}^{(1)} M_{+1/2;+3/2}^{(1)}}{(\hbar\omega)} + M_{+1/2;+3/2}^{(2)} = -5\sqrt{3} \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^2 B e_i e_z, \quad (1)$$

где $M^{(1)}(m \rightarrow m') = M_{mm'}^{(1)}(\vec{k}) [M^{(2)}(m \Rightarrow m') = M_{mm'}^{(2)}(\vec{k})]$ – матричный элемент одно (одновременно поглощающих двух) фотонного оптического перехода, откуда получим выражение для квадрата модуля оптического перехода типа $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |\pm 1/2\rangle$ имеем

$75 \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 B^2 |e_i e_z|^2$, а для оптического перехода типа $|\pm 3/2\rangle \rightarrow |m\rangle \rightarrow |\mp 1/2\rangle$ имеем $\frac{3}{4} \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 B^2 (36e_z^2 |e_i|^2 + |e_z^2|^2)$. Если внутризонные оптические переходы происходят между подзонами легких и тяжелых дырок, тогда промежуточные состояния находятся как в зоне проводимости, так и в зоне спин орбитального расщепления. Тогда матричные элементы этих оптических переходов описываются выражениями:

$$a) | +3/2 \rangle \rightarrow | c, m \rangle \rightarrow | +1/2 \rangle + | +3/2 \rangle \rightarrow | \Delta, m \rangle \rightarrow | +1/2 \rangle =$$

$$= \frac{M_{V, +1/2; c, +1/2}^{(1)} M_{c, +1/2; V, +3/2}^{(1)}}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} + \frac{M_{V, +1/2; c, -1/2}^{(1)} M_{c, -1/2; V, +3/2}^{(1)}}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} + \frac{M_{V, +1/2; SO, +1/2}^{(1)} M_{SO, +1/2; V, +3/2}^{(1)}}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} +$$

$$\frac{M_{V, +1/2; SO, -1/2}^{(1)} M_{SO, -1/2; V, +3/2}^{(1)}}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} = \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 \sqrt{\frac{1}{3}} \left(\frac{p_{cV}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - \frac{3B^2 k^2}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} \right) e_c' e_c'; \quad (2)$$

$$b) | -3/2 \rangle \rightarrow | c, m \rangle \rightarrow | +1/2 \rangle + | -3/2 \rangle \rightarrow | SO, m \rangle \rightarrow | +1/2 \rangle =$$

$$= \frac{M_{V, +1/2; c, +1/2}^{(1)} M_{c, +1/2; V, -3/2}^{(1)}}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} + \frac{M_{V, +1/2; c, -1/2}^{(1)} M_{c, -1/2; V, -3/2}^{(1)}}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} + \frac{M_{V, +1/2; SO, +1/2}^{(1)} M_{SO, +1/2; V, -3/2}^{(1)}}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} +$$

$$+ \frac{M_{V, +1/2; SO, -1/2}^{(1)} M_{SO, -1/2; V, -3/2}^{(1)}}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} = \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{p_{cV}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - 9 \frac{B^2 k^2}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} \right) e_c'^2. \quad (3)$$

Остальные матричные элементы определяются аналогичным образом. Т.о. матричные элементы этих оптических переходов можно представить в виде следующей матрицы

$$\tilde{M}^{(2)} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{3}} \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 \frac{p_{cV}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} \begin{bmatrix} 2e_c' e_c' & e_c'^2 \\ -e_c'^2 & 2e_c' e_c' \end{bmatrix} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} B^2 k^2 \begin{bmatrix} 2e_c' e_c' & 3e_c'^2 \\ -3e_c'^2 & 2e_c' e_c' \end{bmatrix}.$$

Поскольку как коэффициент двухквантового ЛЦД, так и коэффициент двухквантового поглощения света определяются квадратом модулей составных матричных элементов, вид которых для вышеуказанных оптических переходов имеет

$$|\tilde{M}^{(2)}|^2 = \begin{bmatrix} \Re_1 e_c'^2 |e_c'|^2 & \Re_2 |e_c'|^4 \\ -\Re_2 |e_c'|^4 & \Re_1 e_c'^2 |e_c'|^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Re_1 e_c'^2 |e_c'|^2 & \Re_2 |e_c'|^4 \\ -\Re_2 |e_c'|^4 & \Re_1 e_c'^2 |e_c'|^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\Re_1 = \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 \frac{1}{3} \left(\frac{p_{cV}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - \frac{3B^2 k^2}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} \right)^2 e_c'^2 |e_c'|^2, \quad (5)$$

$$\Re_2 = \frac{1}{12} \left(\frac{eA_0}{ch} \right)^4 \left(\frac{p_{cV}^2}{E_c - E_{hh} - \hbar\omega} - 9 \frac{B^2 k^2}{E_{SO} - E_{hh} - \hbar\omega} \right)^2 |e_c'^2|^2. \quad (6)$$

Матричные элементы двухквантовых переходов, протекающих между спин-отщепленной зоны и зоны проводимости, представленные определяются аналогичным образом как в вышеприведенных случаях. Отметим, что при этом виртуальные состояния носителей тока находятся в подзонах валентной зоны, в зоне проводимости и зоне спин-орбитального расщепления. Количественные значения зонных параметров выбраны из работы.

В заключении отметим что в трехзонном приближении Кейна: Классифицированы матричные элементы межзонных двухквантовых оптических переходов в полупроводнике в зависимости от вектора поляризации света.

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. 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.

5. С.Д.Ганнчев, С.А.Емельянов, Е.Л.Ивченко, Е.Ю.Перлин, Я.В.Терентьев, А.В.Федоров, И.Д.Ярошенко // ЖЭТФ. -1986. -729-738.

6. Р. Я.Расулов, Г.Х.Хошимов, Х.Холитдинов// ФТП. 1996. – Vol. 30. – No. 2. – Рр. 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. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., & Каримова, Г. А. (2023). ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОКА ОДНОФОТОННОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 3(4-2), 331-337.

11. Rasulov, R. Y., Karimova, G. A., & Rahmatov, I. (2023). LINEAR-CIRCULAR DICHROISM OF THE PHOTON DRAG EFFECT IN SEMICONDUCTOR SUPERSTRUCTURES. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences, 3(4), 458-463.

12. Расулов, В. Р., Расулов, Р. Я., Исмадинова, У. М., & Кодиров, Н. У. О. (2022, December). УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОДНОФОТОННЫХ МЕЖЗОННЫХ ЛИНЕЙНОЦИРКУЛЯРНЫХ ДИХРОИЗМОВ В КРИСТАЛЛАХ. In The 12 Th International Scientific And Practical Conference "Eurasian Scientific Discussions"(December 18-20, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain.

13. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Y., Mamatova, M. A., & Eshboltaev, I. M. (2022). THEORETICAL INVESTIGATION OF ENERGY STATES IN A MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURE IN THE QUASICLASSICAL APPROXIMATION. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal, 10(12), 96-104.

14. Расулов, Р. Я., Расулов, В. Р., Ахмедов, Б. Б., & Муминов, И. А. (2022). Межзонный двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в узкозонных полупроводниках. «Узбекский физический журнал», 24(1), 19-26.

15. 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.

РАСЧЕТ ЧИСЛА ПЕРЕХОДОВ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА, ФОРМИРУЮЩИХ НГП – НАНОГЕТЕРОПЕРЕХОД

Э.З.Имамов¹, Р.А.Муминов², М.А.Аскарров³, А.Э.Имамов⁴, Х.Н.Каримов¹

¹ Ташкентский университет информационных технологий

² Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

³ Каракалпакский государственный университет им. Бердаха

⁴ Академия МВД РУз

Эффективность солнечной панели в основном определяется её основной компонентой – солнечным элементом (СЭ), а точнее – свойством его р-п перехода, где происходит преобразование энергии солнечного излучения в электричество.

Эффективность СЭ определяется преобразующим свойством его р-п перехода, который зависит от выбора контактирующих материалов: при однородных материалах - это гомо р-п переход, а если контакт из разных материалов - гетеропереход.