

Влияние магнитного поля на спектры примесного поглощения света полупроводниковых 1D-структур

Е.Н. Калинин, А.В. Калинина

Пензенский государственный университет, Пенза

Аннотация: Рассматривается периодическая полупроводниковая структура, состоящая из туннельно-несвязанных квантовых проволок (КП) на основе InSb, содержащих примесные центры. Однородное магнитное поле направлено вдоль оси КП. Учитывая дисперсию радиуса КП, описываемую функцией Гаусса, получено выражение для коэффициента примесного поглощения электромагнитного излучения. Показано, что на спектральной кривой, построенной в программе Maple, при заданных параметрах КП и полупроводниковой структуры, наблюдается последовательность резонансных максимумов, имеющих дублетную структуру. Циклотронная частота определяет расстояние между максимумами в дублете, а периодичность появления дублетов на спектральной кривой определяется гибридной частотой. При увеличении величины магнитного поля наблюдается динамика края полосы примесного поглощения, что можно использовать при создании детекторов оптического излучения с управляемой чувствительностью, работающих в широком диапазоне длин волн и производить идентификацию 1D полупроводниковых структур. Также из спектральной кривой можно получить ценную информацию о параметрах КП и зонной структуры полупроводника.

Ключевые слова: коэффициент примесного поглощения, квантовая проволока, низкоразмерные полупроводниковые структуры, примесный центр.

Введение

Полупроводниковые структуры пониженной размерности широко применяются в современной наноэлектронике [1]. Весьма перспективными являются исследования в области использования квазиуменьшенных структур в качестве носителей информации [2,3]. Такой успех в первую очередь связан с хорошо разработанной технологией их создания [4]. Весьма обнадеживающе выглядят успехи в области создания и исследования полупроводниковых квантовых проволок (КП), как перспективных наноструктур, обладающих рядом уникальных характеристик [5]. Особый интерес вызывает применение КП при создании быстродействующих оптических фотодетекторов лазерного излучения [6]. В данной работе рассмотрено оптическое поглощение света полупроводниковой структурой, состоящей из линейной цепочки КП на основе InSb, находящихся в

магнитном поле. Получено аналитическое выражение коэффициента примесного поглощения света и проведен его анализ в программе Maple. Полученные результаты представлены в виде спектральной кривой.

Расчет коэффициента поглощения

Конфигурация КП и магнитного поля такие же, как и в [7], где были вычислены матричные элементы оптических переходов электрона из состояния примесного центра, в состоянии КП и принималась во внимание непараболичность закона дисперсии для носителей заряда. Предполагалось, что примесные центры расположены на оси КП в точке $\vec{R}_a = (0,0,0)$. Полупроводниковая структура представляет собой туннельно-несвязанные КП, расположенные в виде линейной цепочки с периодом d . Коэффициент поглощения электромагнитного излучения для поперечной относительно оси КП поляризации $K_B^{(t)}(\omega)$, можно вычислить по формуле:

$$K_B^{(t)}(\omega) = \frac{2\pi N_0}{\hbar I_0} \sum_n \sum_m \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} du d^{-1} P(u) \int_{-\infty}^{+\infty} dk \left| M_{f,OB}^{(t)} \right|^2 \times \\ \times [f_0(E_{0,0,0}) - f_0(E_{n,m,1})] \delta(E_{n,m,k} + E_{0,0,0} - \hbar\omega), \quad (1)$$

где $P(u)$ – функция распределения дисперсии радиуса КП:

$$P(u) = c_u \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-[u-1]^2), \quad c_u = \sqrt{\pi} \left[\int_{0.5}^{1.5} \exp(-[u-1]^2) du \right]^{-1}, \quad (2)$$

где N_0 – поверхностная концентрация КП; I_0 – интенсивность света; $M_{f,OB}^{(t)}$ – матричные элементы оптических переходов; $d = 10a_d + 2uL$ – расстояние между КП в линейной цепочке; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака; $f_0(E_{n,m,k_z})$ определяется выражением [8]:

$$f_0(E_{n,m,k_z}) = 8\sqrt{\pi}n_e a_d^3 \sqrt{\delta_T} \beta w^{-1} \text{sh}(\delta_T \beta^{-1} w) \exp\left(-\delta_T \frac{E_{n,m,k_z}}{E_d}\right), \quad (3)$$

где n_e – концентрация электронов; $\delta_T = E_d/(kT)$; k – постоянная Больцмана; T – температура; $\text{sh}(x)$ – гиперболический синус. Остальные обозначения такие же, как и в [10]. Так как рассматривались низкие температуры, то можно было считать, что все примесные центры на оси КП полностью заполнены, то есть принять в (1) $f_0(E_{0,0,0}) = 1$.

В выражении (1) необходимо было найти корни δ -функции [9]. После подстановки всех энергий получаем уравнение:

$$\sqrt{8\xi a_d^2 k^2 + \left[m a^{*-2} + 4^{\frac{1}{4}} \sqrt{\xi} \beta^{-1} (\beta^2 a^{*-2} + 1)^{\frac{1}{4}} (2n + |m| + 1) \right]^2} + \eta_{2B}^2 - X = 0,$$

где $a^* = a_B / a_d$; $\beta = E_d / \hbar \omega_0$; $\xi = m^* s^2 / (4E_d)$; $\eta_{2B}^2 = |E_{0,0,0}| / E_d$; $m = \pm 1$.

Решая это уравнение, получаем следующие корни:

$$k_{1,2} = \pm \frac{1}{a_d \sqrt{8\xi}} \sqrt{(X - \eta_{2B}^2)^2 - \left[m a^{*-2} + 4^{\frac{1}{4}} \sqrt{\xi} \beta^{-1} (\beta^2 a^{*-2} + 1)^{\frac{1}{4}} (2n + |m| + 1) \right]^2}, \quad (4)$$

где первый корень берётся со знаком «+», второй со знаком «-».

Используя выражение для $M_{f,0B}^{(t)}$ из [7], (3) и (4), для коэффициента примесного поглощения электромагнитного излучения (1) получим:

$$\begin{aligned} K_B^{(t)}(\omega) = & K_0 X^{-1} a_d^{-1} \sum_{n=0}^{N'} \sum_{m=-1}^{+1} \left[\frac{\Gamma(n+1)\Gamma(|m|+1)}{\Gamma(n+|m|+1)} \right]^2 \left[X \delta_{m,1} - \left(\frac{a_d}{a_B} \right)^2 \delta_{m,-1} \right]^2 \times \\ & \times \left[\sum_{m_0=0}^n (-1)^{m_0} \binom{n+1}{n-m_0} (m_0+1) \right]^2 \times \int_{0.5}^{1.5} du \exp(-[u-1]^2) \times [2 - f_0(E_{n,m,k_1}) - f_0(E_{n,m,k_2})] \times \\ & \times \frac{\sqrt{8\xi a_d^2 k_1^2 + \left[m a^{*-2} + 4^{\frac{1}{4}} \sqrt{\xi} \beta^{-1} (\beta^2 a^{*-2} + 1)^{\frac{1}{4}} (2n + |m| + 1) \right]^2}}{(2uL^* + 10)u^2 k_1 \gamma^3 (4a^{*4}u^* \lambda^2 u^{-2} + 1)^{3/2}} \frac{b^2}{[b^2 + (k_1 \alpha a_d)^2]^2} \times \end{aligned}$$

$$\times \Theta \left[X - \eta_{2B}^2 - \sqrt{8\xi a_d^2 k_1^2 + \left[m a^{*-2} + 4^{\frac{1}{4}} \sqrt{\xi \beta^{-1}} (\beta^2 a^{*-2} + 1)^{\frac{1}{4}} (2n + |m| + 1) \right]^2} \right],$$

где $K_0 = 3,84 \pi^{3/2} \alpha N_0 \lambda_0^2 \alpha^* a_d^6 \xi^{-1} \bar{L}^{-4} L_z^{-1}$; $u^* = u_0/E_d$; $\lambda^2 = (a_d/\bar{L})^2$; $\gamma = \hbar\omega_B/(2E_d)$; N' является целой частью выражения $C = (X - \eta_{2B}^2 + a^{*-2}) / (2^{2,25} \sqrt{\xi \beta^{-1}} (\beta^2 a^{*-2} + 1)^{0,25}) - 1$; $\Theta(x)$ – функция Хевисайда.

В программе Maple была получена зависимость $K_B^{(t)}(\omega)$ в относительных единицах (рис. 1) линейной цепочки полупроводниковых КП на основе InSb с примесными центрами, для поперечной относительно оси КП поляризации электромагнитного излучения. Графическая зависимость построена при следующих параметрах: 35.8 нм – средний радиус КП, 0.2 эВ – амплитуда удерживающего потенциала КП, $1,4 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – концентрация электронов.

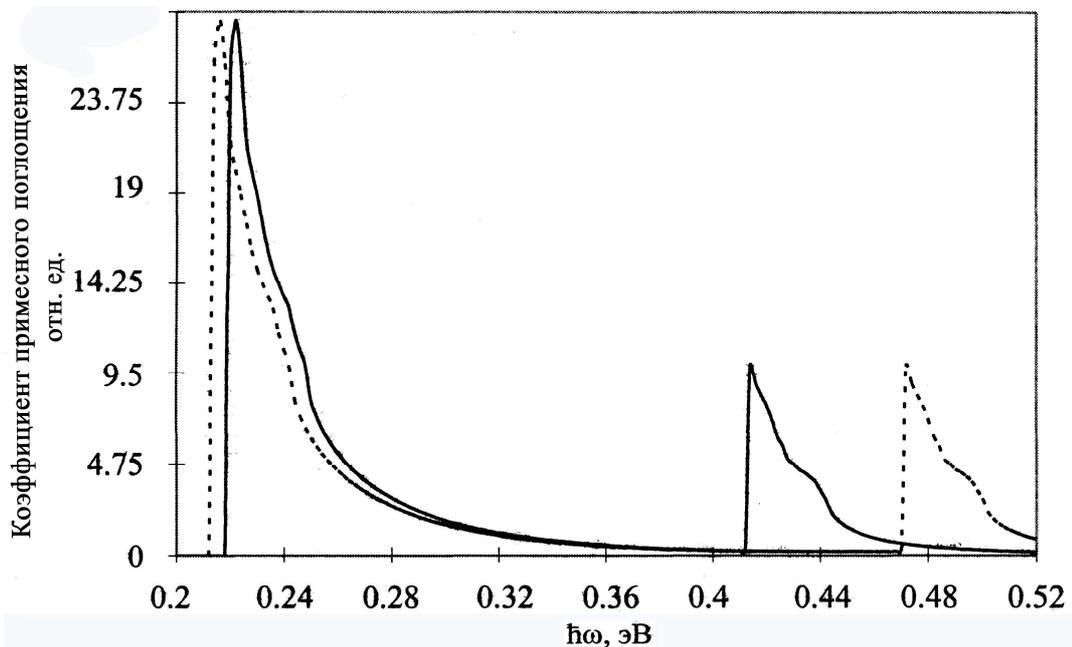


Рис. 1. – Спектральная зависимость коэффициента примесного поглощения электромагнитного излучения $K_B^{(t)}(\omega)$ линейной цепочки из КП на основе InSb (сплошная линия – $B = 15$ Тл, точками – $B = 20$ Тл).

Заключение

Как видно из рис. 1, на спектральной кривой коэффициента примесного поглощения электромагнитного излучения линейной цепочки КП наблюдается последовательность максимумов различной интенсивности. Как показал компьютерный анализ выражения для $K_B^{(t)}(\omega)$ в программе Maple, максимумы имеют дублетную структуру, и располагаются на кривой периодически, причем период T_1 их появления определяется гибридной частотой Ω : $T_1 = s\sqrt{m^*\hbar\Omega}$, а расстояние между пиками в дублете $T_2 = \hbar\omega_B$, где ω_B – циклотронная частота. При росте величины магнитного поля B происходит сдвиг края спектральной кривой в длинноволновую область. Это, как отмечалось в [10], можно использовать при проектировании и разработке оптических приборов с управляемой чувствительностью в весьма широком диапазоне длин волн.

Литература

1. Bayer M. Bridging Two Worlds: Colloidal versus Epitaxial Quantum Dots // Annalen der Physik. 2019. vol. 531. 1900039. pp.1-15.
2. Kiravittaya S., Benyoucef M., Zapf-Gottwick R., Rastelli A., Schmidt O.G. Ordered GaAs quantum dot arrays on GaAs(001): Single photon emission and fine structure splitting // Applied Physics Letters. 2006. vol. 89. 233102. pp. 1-7.
3. Mano T., Notzel R., Zhou D., Hamhuis G.J., Eijkemans T.J., Wolter J.H. Complex quantum dot arrays formed by combination of self-organized anisotropic strain engineering and step engineering on shallow patterned substrates // Journal of Applied Physics. 2005. vol. 97. 014304. pp.1-8.
4. Sautter K.E., Vallejo K.D., Simmonds P.J. Strain-driven quantum dot self-assembly by molecular beam epitaxy // Journal of Applied Physics. 2020. vol. 128. 031101. pp. 1-25.

5. Zimmermann R. Excitonic Spectra in Semiconductor Nanostructures // Japanese Journal of Applied Physics. 1995. vol. 34. pp. 228-231.

6. Рогалин В.Е., Филин С.А., Каплунов И.А. Многодиапазонный фотоприемник на эффекте фотонного увлечения носителей тока в германии для мощных лазеров И.К.-диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 5. С. 92-95.

7. Калинин Е.Н., Калинина А.В. Магнитооптические свойства 1D-структур на основе InSb с примесными центрами и кейновским законом дисперсии // Инженерный вестник Дона, 2022, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7446.

8. Гейлер В.А., Маргулис В.А., Филина Л.И. Проводимость квантовой проволоки в продольном магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1998. Т. 113. вып. 4. С. 1377-1396.

9. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз. 1962. 1100 с.

10. Калинин Е.Н., Калинина А.В. Эффект фотонного увлечения электронов в полупроводниковой квантовой проволоке с водородоподобными примесными центрами и кейновским законом дисперсии // Инженерный вестник Дона, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7262.

References

1. Bayer M. Annalen der Physik. 2019. vol. 531. 1900039. pp.1-15.

2. Kiravittaya S., Benyoucef M., Zapf-Gottwick R., Rastelli A., Schmidt O.G. Applied Physics Letters. 2006. vol. 89. 233102. pp. 1-7.

3. Mano T., Notzel R., Zhou D., Hamhuis G.J., Eijkemans T.J., Wolter J.H. Journal of Applied Physics. 2005. vol. 97. 014304. pp.1-8.

4. Sautter K.E., Vallejo K.D., Simmonds P.J. Journal of Applied Physics. 2020. vol. 128. 031101. pp. 1-25.



5. Zimmermann R. Japanese Journal of Applied Physics. 1995. vol. 34. pp. 228-231.
6. Rogalin V.E., Filin S.A., Kaplunov I.A. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2019. № 5. pp. 92-95.
7. Kalinin E.N., Kalinina A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7446.
8. Gejler V. A., Margulis V.A., Filina L.I. Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki. 1998. T. 113. vyp. 4. pp. 1377-1396.
9. Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij [Tables of integrals, sums, series and products]. M.: Fizmatgiz, 1962. p. 1100.
10. Kalinin E.N., Kalinina A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7262.