



УДК 539.23; 539.216.1
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-24



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Фотодиэлектрический эффект в квантовых точках с примесными комплексами $A(+)+e$ при наличии диссипативного туннелирования во внешнем магнитном поле

Ирина Михайловна Мойко

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
physics@pnzgu.ru

Владимир Дмитриевич Кревчик

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
physics@pnzgu.ru

Алексей Викторович Разумов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
physics@pnzgu.ru

Михаил Борисович Семенов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
physics@pnzgu.ru

Аннотация. В работе рассмотрено влияние туннельной прозрачности потенциального барьера и внешнего магнитного поля на управляемость фотодиэлектрическим эффектом, связанного с фотовозбуждением примесных комплексов в полупроводниковой квазиуменьшенной структуре.

Ключевые слова: фотодиэлектрический эффект, магнитное поле, квантовая точка, квазиуменьшенная структура, примесный комплекс, относительное изменение диэлектрической проницаемости, адиабатическое приближение, электронный адиабатический потенциал, диссипативное туннелирование

Для цитирования: Мойко И. М., Кревчик В. Д., Разумов А. В., Семенов М. Б. Фотодиэлектрический эффект в квантовых точках с примесными комплексами $A(+)+e$ при наличии диссипативного туннелирования во внешнем магнитном поле // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-24

Photodielectric effect in quantum dots with impurity complexes $A(+)+e$ in the presence of dissipative tunneling in an external magnetic field

Irina M. Moiko

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
physics@pnzgu.ru

Vladimir D. Krevchik

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
physics@pnzgu.ru

Alexey V. Razumov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
physics@pnzgu.ru

Mikhail B. Semenov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
physics@pnzgu.ru

Abstract. The paper considers the influence of the potential barrier tunneling transparency and the external magnetic field on the controllability of the photodielectric effect associated with the photoexcitation of impurity complexes in a semiconductor quasi-one-dimensional structure.



Keywords: photodielectric effect, magnetic field, quantum dot, quasi-one-dimensional structure, impurity complex, relative change in dielectric constant, adiabatic approximation, electronic adiabatic potential, dissipative tunneling

For citation: Moiko I.M., Krevchik V.D., Razumov A.V., Semenov M.B. Photodielectric effect in quantum dots with impurity complexes $A^+ + e$ in the presence of dissipative tunneling in an external magnetic field = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-23

Введение

Как известно [1–3], одним из механизмов возникновения фотодиэлектрического эффекта (ФДЭ), при котором заметно изменяется статическая диэлектрическая проницаемость полупроводниковых квазиульмерных структур, является увеличение поляризуемости электронно-дырочных состояний при оптическом возбуждении примесных комплексов $A^+ + e$. В этом случае наложенное внешнее магнитное поле и туннельная прозрачность потенциального барьера могут существенно влиять на поляризационные механизмы, лежащие в основе ФДЭ, что важно для разработки фоточувствительных материалов на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) туннельно-связанных с окружающей матрицей.

Цель работы – теоретическое исследование влияния параметров диссипативного туннелирования на магнитное вымораживание ФДЭ, связанного с фотовозбуждением примесных комплексов $A^+ + e$ в полупроводниковых квазиульмерных структурах.

Магнитное вымораживание фотодиэлектрического эффекта в полупроводниковых квазиульмерных структурах в условиях 1D-диссипативного туннелирования

В данной работе теоретически исследован ФДЭ возникающий в процессе фотовозбуждения комплексов $A^+ + e$ в *InSb* КТ образованных в прозрачной диэлектрической матрице в магнитном поле и в условиях 1D-диссипативного туннелирования. Механизм возникновения ФДЭ связан с оптическими переходами электрона из основного состояния КТ в возбужденные состояния размерно – квантованной зоны во внешнем магнитном поле, что приводит к трансформации электронного адиабатического потенциала и, как следствие, к изменению энергии связи дырки, локализованной на A^0 – центре. В свою очередь, величина энергии связи определяется как внешним магнитным полем, так и параметрами 1D-диссипативного туннелирования, такими как температура $\varepsilon_T^* = kT/E_h$, частота фононной моды $\varepsilon_L^* = \hbar\omega_L/E_h$ и «вязкость» контактной среды $\varepsilon_C^* = \hbar\sqrt{C}/E_h$ (здесь C – константа взаимодействия с окружающей средой). В дипольном приближении получено выражение для относительного изменения диэлектрической проницаемости (ОИДП):

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \sum_{n=1} \left[\frac{\left(\frac{k(X_{n,1}^2 - \pi^2)}{(R_0^*)^2} - (\eta_{\lambda h1}^2 - \eta_{\lambda h0}^2) + R_0^{*2} \sum_{n'l'm'} \frac{|V_{n,l,m;n',l',m'}|^2 - |V_{1,0,0;n',l',m'}|^2}{(\pi^2 - \tilde{X}_{n',l'}^2)E_h} \right)^{-2}}{X^2 \left[\left(\frac{k(X_{n,1}^2 - \pi^2)}{(R_0^*)^2} - (\eta_{\lambda h1}^2 - \eta_{\lambda h0}^2) + R_0^{*2} \sum_{n'l'm'} \frac{|V_{n,l,m;n',l',m'}|^2 - |V_{1,0,0;n',l',m'}|^2}{(\pi^2 - \tilde{X}_{n',l'}^2)E_h} \right)^2 + \Gamma_0^{*2} \right]} |P_{n,l,m}|^2 \Gamma_0^* \right] \quad (1)$$

где $\eta_{\lambda h0}^2 = E_{\lambda h0}/E_h$; $\eta_{\lambda h1}^2 = E_{\lambda h1}/E_h$; $E_{\lambda h0}, E_{\lambda h1}$ – энергия связи дырки, соответственно для основного и возбужденного состояний электрона; E_h – эффективная боровская энергия дырки; $R_0^* = R_0/a_h$; R_0 – радиус КТ; $X = \hbar\omega/E_h$; ω – частота фотона; $\Gamma_0^* = \hbar\Gamma_0/E_h$; Γ_0 – вероятность диссипативного туннелирования; n, l, m – главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Как показал численный анализ формулы (1), внешнее магнитное поле подавляет ФДЭ. При этом существует некоторое максимальное значение $B_{\max}$ индукции магнитного поля, при котором ОИДП квазиульмерной структуры с *InSb* КТ обращается в нуль ($\Delta\varepsilon/\varepsilon = 0$) и для полей с индукцией $B \geq B_{\max}$ ФДЭ отсутствует. Таким образом, во внешнем магнитном поле имеет место «магнитное вымораживание» ФДЭ. На рис. 1 а, б, в можно проследить влияние параметров диссипативного туннелирования



ε_L^* , ε_T^* и ε_C^* на максимальную величину внешнего магнитного поля $B_{\max}$ численно полученную из формулы (1) для случая разной поляризации света $\vec{e}_\lambda \uparrow \vec{B}$ и $\vec{e}_\lambda \perp \vec{B}$. Из рис. 1 а, б видно, что рост частоты фононной моды и температуры приводят к увеличению области магнитных полей $0 < B < B_{\max}$ при которых возможно существование ФДЭ из-за увеличения вероятности диссипативного туннелирования. Рост константы взаимодействия с окружающей средой, как следует из рис. 1 в, приводит к уменьшению величины $B_{\max}$, и условия существования ФДЭ становятся более жесткими.

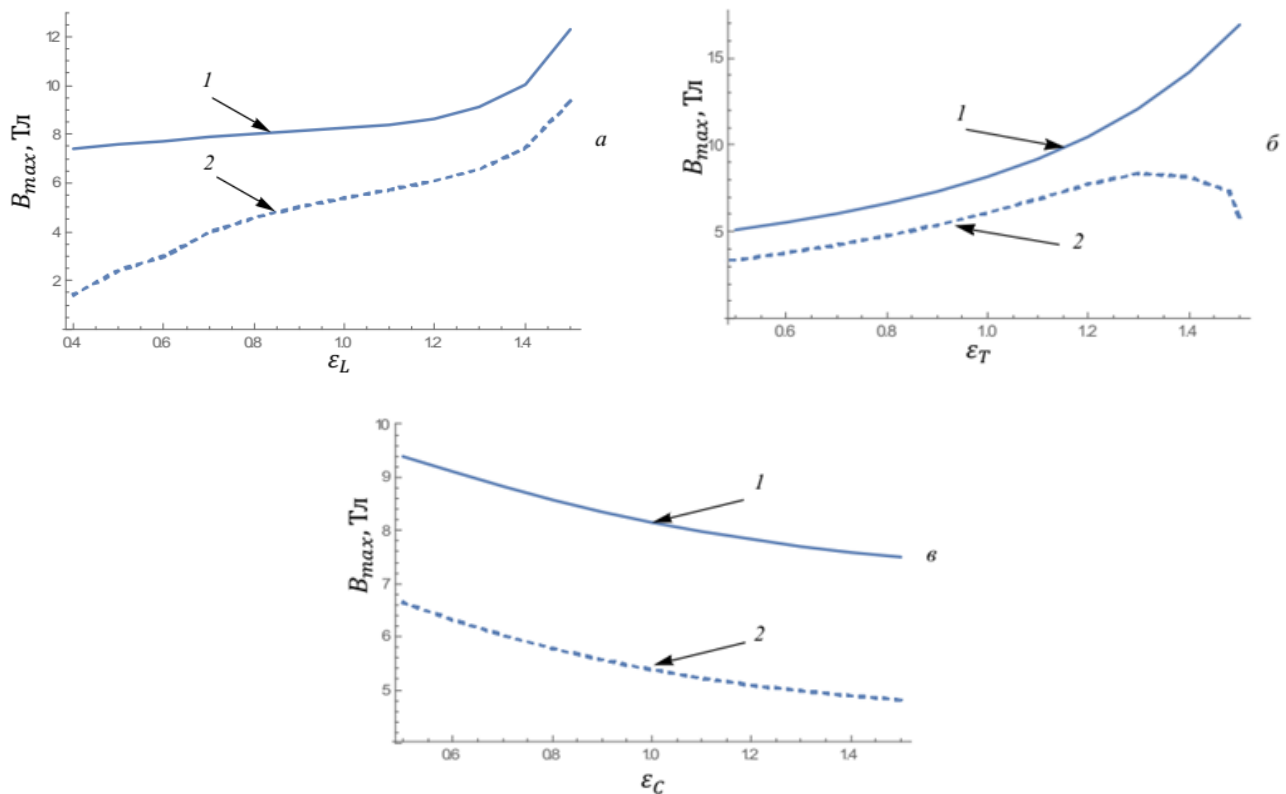


Рис. 1. Зависимость максимальной индукции внешнего магнитного поля $B_{\max}$ при ФДЭ в полупроводниковой КТ от параметров диссипативного туннелирования, при $E_i = 3$ мэВ; $\bar{R}_0 = 75$ нм; $\hbar\omega = 1$ мэВ: а – от частоты фононной моды ε_L^* , при $\varepsilon_T^* = 1, \varepsilon_C^* = 1$; б – от температуры ε_T^* при $\varepsilon_L^* = 1, \varepsilon_C^* = 1$; в – от константы связи с окружающей средой ε_C^* , при $\varepsilon_T^* = 1, \varepsilon_L^* = 1$.

Кривые на построены для разных направлений поляризации света: 1 – для продольной поляризации света $\vec{e}_\lambda \uparrow \vec{B}$; 2 – поперечной поляризации света $\vec{e}_\lambda \perp \vec{B}$

Заключение

В рамках модели потенциала нулевого радиуса в адиабатическом приближении теоретически исследовано влияние внешнего магнитного поля и параметров диссипативного туннелирования на ФДЭ, связанный с оптическим возбуждением примесных комплексов $A^+ + e$ в квазиульмерной структуре. Показано, что в полупроводниковых квазиульмерных структурах с примесными комплексами $A^+ + e$ во внешнем магнитном поле может иметь место эффект «магнитного вымораживания», сопровождающийся подавлением ФДЭ. Найдено, что при некоторой максимальной величине индукции магнитного поля $B_{\max}$ ФДЭ полностью подавляется. При этом, такие параметры диссипативного туннелирования, как частота фононной моды, температура и константа взаимодействия с контактной средой существенно влияют на величину максимальной индукции $B_{\max}$ из-за высокой чувствительности вероятности диссипативного туннелирования к данным параметрам.



Список литературы

1. Кревчик В. Д., Левашов А. В. Фотодиэлектрический эффект связанный с возбуждением комплекса в квазиуль-мерных структурах // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2007. № 3. С.77–92.
2. Krevchik V. D., Razumov A. V., Semenov M. B. Photoinduced Modulation of the Dielectric Permittivity in a System of Interacting Quantum Dots in an External Electric Field // Technical Physics. 2023. Vol. 68, No. 4. P. 81–92.
3. Кревчик В. Д., Разумов А. В., Семенов М. Б. Фотоиндуцированная модуляция диэлектрической проницаемости в системе взаимодействующих квантовых точек во внешнем электрическом поле // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2023. № 2(66). С. 122–143.

References

1. Krevchik V.D., Levashov A.V. Photodielectric effect associated with excitation of a complex in quasi-one-dimensional structures. *Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskiye nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2007;(3):77–92.
2. Krevchik V.D., Razumov A.V., Semenov M.B. Photoinduced Modulation of the Dielectric Permittivity in a System of Interacting Quantum Dots in an External Electric Field. *Technical Physics.* 2023;68(4):81–92.
3. Krevchik V.D., Razumov A.V., Semenov M.B. Photo-induced modulation of the dielectric constant in a system of interacting quantum dots in an external electric field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskiye nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2023;(2):122–143.

Поступила в редакцию / 07.07.2025

Принята к публикации / 28.07.2025