

На правах рукописи

МАРКО Антон Александрович

**МАГНИТООПТИКА
КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОК И СУЖЕНИЙ
С D^- - И D_2^- -ЦЕНТРАМИ**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

УЛЬЯНОВСК 2005

Работа выполнена на кафедре физики Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор **Кревчик Владимир Дмитриевич**.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Маргулис Виктор Александрович**;
доктор физико-математических наук,
профессор **Моливер Сергей Соломонович**.

Ведущая организация – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

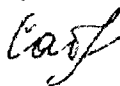
Защита диссертации состоится 13 июня 2005 г., в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.278.01 в Ульяновском государственном университете по адресу: 432970, г. Ульяновск, Набережная реки Свияги, ауд. 701.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета

Автореферат разослан «___» _____ мая _____ 2005 г.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42, Ульяновский государственный университет, научная часть.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент



Сабитов О. Ю.

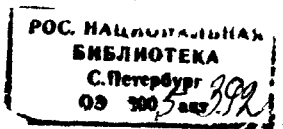
2006-4

6327

2145166

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние годы резко возрос интерес к изучению магнитооптических свойств наноструктур, содержащих примеси. Это обусловлено не только возможным многообразием прикладных аспектов [1], но и вследствие новой физической ситуации, связанной с эффектом гибридизации размерного и магнитного квантования [2–5]. Действительно, эффект гибридизации спектра примесного поглощения света несет ценную информацию о зависимости энергии связи локализованного носителя от магнитного поля, параметров наноструктуры и типа дефекта, что, в принципе, позволяет производить идентификацию примесей. Эксперименты показывают [6, 7], что энергия связи примесных состояний существенно зависит от величины внешнего магнитного поля. Так, в случае D^- -центров в селективно легированных многоямных квантовых структурах GaAs/AlGaAs наблюдается значительный рост энергии связи D^- -состояний в условиях гибридного квантования [6]. Особый интерес представляют примесные молекулы типа D_2^- , которые могут образовываться в процессе двойного селективного легирования наноструктур. Возможность управлять термами молекулярного иона D_2^- путем варьирования величины внешнего магнитного поля открывает перспективу для развития молекулярной электроники и, соответственно, создания одномолекулярных устройств с управляемыми характеристиками. В настоящее время тенденции развития прецизионного наноструктурирования материалов таковы, что возникает необходимость учитывать влияние особенностей геометрической формы наноструктур на электронный энергетический спектр, включая примесные состояния. В случае микросужений такие особенности проявляются, прежде всего, в кардинальной модификации электронного спектра при переходе «квантовая проволока \rightarrow микросужение» и, как следствие, в существенной зависимости кондактанса от эффективной длины сужения [8–10]. Высокая чувствительность энергии связи носителя на примеси к энергетическому спектру наноструктуры позволяет, в принципе, проследить за эволюцией энергии связи с изменением геометрической формы наноструктуры. Это актуально, поскольку, как показывают эксперименты [11], наличие даже одиночной примеси в микросужении существенно меняет транспортный режим и условия квантования кондактанса. Таким образом, изучение влияния магнитного поля и особенностей геометрической формы наноструктур на примесные состояния, оптические и транспорт-



ные свойства с их участием является одним из актуальных направлений полупроводниковой наноэлектроники.

Цель диссертационной работы заключается в теоретическом изучении примесного магнитооптического поглощения в полупроводниковых наноструктурах двух различных типов: квантовых проволоках и сужениях, содержащих как D^- -, так и D_2^- -центры, а также электронного транспорта, связанного с эффектом фотонного увлечения электронов при фотоионизации D_2^- -центров в квантовых проволоках при наличии продольного магнитного поля.

Задачи диссертационной работы:

1. В рамках модели потенциала «мягкой стенки» методом потенциала нулевого радиуса исследовать зависимость энергии связанного на D^0 -центре электрона от величины магнитного поля \vec{B} , параметров потенциального конфайнмента микросужения и координат примесного центра, расположенного в центре сечения узкого горла сужения.
2. Теоретически исследовать примесное магнитопоглощение, связанное с оптическими переходами электрона из D^- -состояния в гибридно-квантованные состояния микросужения для случая поперечной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света.
3. В рамках модели потенциала нулевого радиуса получить аналитическое решение задачи о связанных состояниях электрона в поле двух D^0 -центров (двухцентровая задача) в полупроводниковой квантовой проволоке и сужении при наличии продольного магнитного поля.
4. Исследовать эволюцию g - и u -термов с изменением величины продольного магнитного поля и параметров квантовой проволоки и сужения.
5. Теоретически исследовать примесное магнитопоглощение, связанное с оптическими переходами электрона из состояния g -терма в гибридно-квантованные состояния квантовой проволоки для случая продольной и поперечной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света.
6. В рамках модели потенциала нулевого радиуса в приближении эффективной массы получить аналитическое выражение для плотности тока увлечения и исследовать ее спектральную зависимость для разных

значений величины \bar{B} и параметров квантовой проволоки при рассеянии электронов на системе короткодействующих примесей.

Научная новизна полученных результатов:

1. В рамках модели потенциала нулевого радиуса аналитически получено дисперсионное уравнение локализованного на D^0 -центре электрона с учетом влияния магнитного поля на D^- -состояния в микросужении.

2. Исследована зависимость энергии локального состояния от координат D^- -центра в сечении узкого горла, эффективной длины микросужения и величины магнитного поля. Показано, что наличие гибридного квантования приводит к стабилизации D^- -состояний в микросужении. Найдено, что уменьшение эффективной длины микросужения вызывает углубление основного состояния D^- -центра, причем область, где возможно существование связанных состояний, увеличивается. Исследована эволюция энергии связи D^- -состояния с ростом эффективной длины микросужения.

3. В дипольном приближении рассчитано сечение фотоионизации D^- -центров в микросужении для случая поперечной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света. Показано, что для спектральной зависимости сечения фотоионизации характерен квантово-размерный эффект Зеемана. Найдено, что край полосы примесного магнитооптического поглощения зависит от эффективной длины сужения.

4. В рамках модели потенциала нулевого радиуса аналитически получены дисперсионные уравнения локализованного на D_2^0 -центре электрона, определяющие симметричное (g -терм) и антисимметричное (u -терм) состояния электрона, соответственно, в квантовой проволоке и сужении при наличии продольного магнитного поля. Показано, что магнитное поле приводит к значительному изменению положения термов и стабилизации D_2^- -состояний в квантовой проволоке и сужении. Установлено, что эффективная длина микросужения существенно влияет как на величину расщепления между термами, так и на размер области, где возможно существование D_2^- -состояний.

5. В дипольном приближении рассчитаны сечения фотоионизации D_2^- -центров в квантовой проволоке для случая поперечной и продольной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света. Показано, что спектр магнитопоглощения света продольной поляризации содержит резонансные пики с ярко выраженными осцилляциями интерференционной природы. Установлено, что период осцилляций линейно растет с уменьшением расстояния между D^0 -центрами и слабо зависит от величины магнитного поля. Резонансные пики обнаруживают периодичность, определяемую гибридной частотой.

6. Найдено, что для спектральной зависимости сечения фотоионизации в случае поперечной поляризации света характерен квантово-размерный эффект Зеемана. Промежутки между пиками в дублете Зеемана заполнены осцилляциями интерференционной природы, период которых экспоненциально возрастает с уменьшением расстояния между D^0 -центрами и незначительно меняется с ростом магнитного поля. Показано, что расстояние между резонансными пиками, составляющими дублет, определяется циклотронной частотой, а дублеты расположены на кривой поглощения с периодом, определяемым гибридной частотой.

7. В рамках модели потенциала нулевого радиуса в приближении эффективной массы получено аналитическое выражение для плотности тока увлечения при фотоионизации D_2^- -центров в квантовой проволоке с параболическим потенциалом конфинмента, и исследована эволюция спектральной зависимости тока увлечения с изменением величины магнитного поля при рассеянии электронов на системе короткодействующих примесей.

Практическая ценность работы:

1. Теоретически обоснованная возможность эффективного управления энергией ионизации D^- -центров в магнитном поле позволит использовать легированные микросужения в качестве электронных резервуаров в полупроводниковых приборах с квантовыми контактами.

2. Анализ эффекта гибридизации спектра примесного магнитопоглощения позволяет получить информацию о параметрах конфинмента и зонной структуры микросужения, а также идентифицировать оптические переходы, связанные с фотоионизацией D^- -центров в квантовой проволоке и микросужении.

3. Развита теория магнитооптического поглощения при фотоионизации D_2^- -центров в структурах с квантовыми проволоками может быть использована для разработки фотоприемников с управляемой полосой примесного поглощения света, а также позволяет идентифицировать оптические переходы, связанные с фотоионизацией D^- - и D_2^- -центров в квантовой проволоке.

4. Развита теория эффекта фотонного увлечения при фотоионизации D_2^- -центров в структурах с квантовыми проволоками в продольном магнитном поле может составить основу для разработки детекторов лазерного излучения с управляемой фоточувствительностью.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Особенность геометрической формы микросужения проявляется в существенной зависимости энергии связи D^- -состояния и края полосы примесного магнитооптического поглощения от эффективной длины сужения.

2. Магнитное поле приводит к значительному изменению положения g - и u -термов и стабилизации D_2^- -состояний в квантовой проволоке и сужении. Эффективная длина микросужения существенно влияет на величину расщепления между термами и на размер области, где возможно существование D_2^- -состояний.

3. Наличие D_2^- -центров в квантовой проволоке проявляется в спектрах примесного магнитооптического поглощения в виде ярко выраженных осцилляций интерференционной природы, период которых существенно зависит от расстояния между D^0 -центрами.

4. Развита теория эффекта фотонного увлечения при фотоионизации D_2^- -центров в квантовой проволоке при наличии продольного магнитного поля. Для спектральной зависимости плотности тока фотонного увлечения характерен дублет Зеемана, связанный с оптическими переходами электронов из состояния g -терма в гибридно-квантованные состояния квантовой проволоки с магнитным квантовым числом $m = \pm 1$.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Международной конференции «Оптика, оптоэлектроника и технологии» (Ульяновск, 2003 г.), II межрегиональной научной школе для студентов

и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2003 г.), X Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Москва, 2004 г.), V Международной конференции «Ломоносов – 2004» (Москва, 2004 г.), III Межрегиональной научной школе для студентов и аспирантов «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2004 г.), VI Всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2004 г.).

Личный вклад. Основные теоретические положения диссертации разработаны совместно с профессором В. Д. Кривчиком. Разработка моделей, проведение конкретных расчетов, численное моделирование, анализ результатов и выводы из них сделаны автором самостоятельно.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 4 статьи и 3 тезиса докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 106 наименований. Основная часть работы изложена на 117 страницах машинописного текста. Работа содержит 31 рисунок.

Краткое содержание работы

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена вычислению спектра D^+ -центра, расположенного в сечении узкого горла микросужения (МС), в рамках метода потенциала нулевого радиуса [2, 3] и исследованию его магнито-оптических свойств. Удобной моделью потенциала конфинмента МС, которая позволяет учесть как роль формы МС, так и влияние квантующего магнитного поля, является потенциал «мягкой стенки» [9]:

$$V(x, y, z) = m^* \left(\omega_0^2 x^2 + \omega_0^2 y^2 - \omega_z^2 z^2 \right) / 2$$
, где m^* – эффективная масса

электрона; z – координата вдоль оси МС; частота ω_z определяется длиной МС L_z : $\omega_z = \sqrt{\hbar / (m^* L_z^2)}$; ω_0 – характерная частота двумерного гармонического осциллятора, потенциалом которого моделируется потенциал МС в плоскости, перпендикулярной оси МС. Векторный потен-

циал однородного магнитного поля \vec{A} , направленного вдоль оси МС, выбирался в симметричной калибровке $\vec{A} = (-yB/2, xB/2, 0)$. Потенциал примеси описывался моделью потенциала нулевого радиуса $V_{\delta}(\rho, \varphi, z; \rho_a, \varphi_a, z_a)$ мощностью $\gamma = 2\pi\hbar^2 / (\alpha m^*)$, который в цилиндрической системе координат имеет вид

$$V_{\delta}(\rho, \varphi, z; \rho_a, \varphi_a, z_a) = \gamma \frac{\delta(\rho - \rho_a)}{\rho} \delta(\varphi - \varphi_a) \delta(z - z_a) \times \left[1 + (\rho - \rho_a) \frac{\partial}{\partial \rho} + (z - z_a) \frac{\partial}{\partial z} \right], \quad (1)$$

где α определяется энергией E_i связанного состояния на этом же D^- -центре в массивном полупроводнике; ρ_a, φ_a, z_a — координаты D^- -центра в МС. Задача определения волновой функции и энергии связанного состояния E_{λ} D^- -центра, локализованного в сечении узкого горла МС ($z_a = 0$), состоит в построении одноэлектронной функции Грина для уравнения Шредингера с гамильтонианом $H^0 = (\vec{p} - e \vec{A}/c)^2 / (2 m^*) + m^* (\omega_0^2 \rho^2 - \omega_z^2 z^2) / 2 + V_{\delta}(\rho, \varphi, z; \rho_a, \varphi_a, z_a)$ с последующим использованием формулы Хилле-Харди для билинейной производящей функции [3]. В данной главе аналитически получено дисперсионное уравнение локализованного на D^0 -центре электрона с учетом влияния магнитного поля на D^- -состояния в МС (в боровских единицах)

$$\begin{aligned} \sqrt{\eta^2 + a_1^{*-2}} = \eta_i - \sqrt{\frac{1}{\pi}} a_1^* \int_0^{\infty} dt \exp\left(-(\eta^2 + a_1^{*-2})t\right) \times \\ \times \left\{ \frac{1}{t\sqrt{t}} - \sqrt{2\pi} a_1^* \left[1 - \exp(-2a_1^{*-2}t) \right]^{-1} \exp\left(-\frac{\rho_a^{*2}}{2a_1^{*2}} \operatorname{cth}(a_1^{*-2}t)\right) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(\frac{\rho_a^{*2}}{2a_1^{*2}} \frac{\operatorname{ch}(a_1^{*-2}t)}{\operatorname{sh}(a_1^{*-2}t)}\right) \right\} \times J(0, 0, L_z, t), \quad (2) \end{aligned}$$

где $J(0, 0, L_z, t) = 2 \ln \left\{ \left[\Gamma(s) / \Gamma(s + 3/4) \right] / \left[\Gamma(s + 1/4) / \Gamma(s + 1/2) \right] \right\}$;
 $s = t / (2\pi L_z^{*2})$; $L_z^* = L_z / a_d$; $\eta^2 = |E_\lambda| / E_d$; E_d – эффективная боров-
 ская энергия; $a^* = a / a_d$; $a = \sqrt{\hbar / (m^* \omega_0)}$; a_d – эффективный боров-
 ский радиус; $a_B^* = a_B / a_d$; $a_B = \sqrt{\hbar / (m^* \omega_B)}$ – магнитная длина; ω_B –
 циклотронная частота; $a_1^* = a_1 / a_d$; $a_1^2 = d^2 / \left(2 \sqrt{1 + d^4 / (4a_n^4)} \right)$ – гибридная
 длина.

В данной главе показано, что уравнение (2) допускает предельный переход от МС к квантовой проволоке (КП), который наблюдается по динамике дисперсионных кривых с ростом эффективной длины МС L_z . На рис. 1 представлены результаты численного анализа уравнения (2) в случае D^- -состояния в МС на основе InSb (отсчет энергии связи $E_\lambda^{(c)}$ ведется от уровня энергии основного состояния МС ϵ_0 : $E_\lambda^{(c)} = |E_\lambda| + \epsilon_0$). Как видно из рис. 1, энергия связи D^- -центра $|E_\lambda^{(c)}|$ в МС является убывающей функцией его радиальной координаты ρ_a^* , что обусловлено размерным квантованием. С уменьшением эффективной длины МС L_z энергия связи D^- -центра заметно возрастает (ср. кривые 2 и 1). Действительно, с уменьшением L_z D^- -орбиталь вытягивается вдоль оси МС и, соответственно, сжимается в плоскости сечения узкого горла МС. Это приводит к углублению основного состояния D^- -центра. С ростом L_z динамика кривой $|E_\lambda^{(c)}(\rho_a^*)|$ такова, что она приближается к соответствующей кривой 5, построенной для случая КП [3] при тех же значениях параметров, входящих в (2) (ср. кривые 1–4 и 5). Таким образом, влияние параметра L_z^{-1} на D^- -состояния в МС аналогично влиянию магнитного поля на D^- -состояния в КП [3].

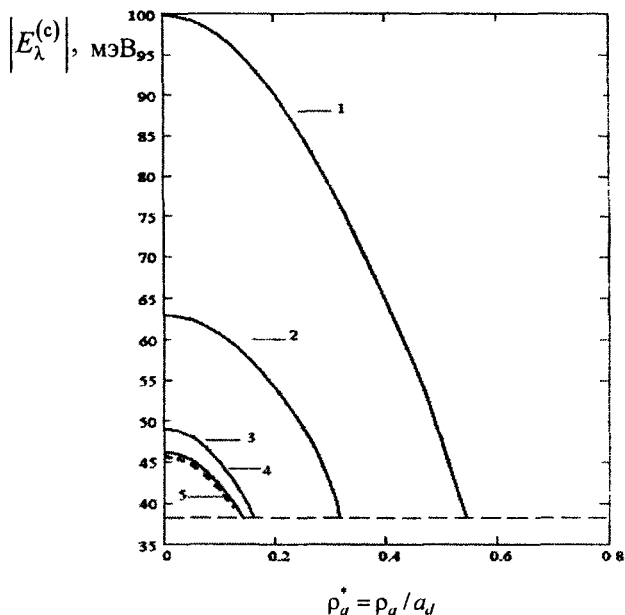


Рис. 1. Зависимость энергии связанного состояния электрона $|E_{\lambda}^{(c)}|$, локализованного на D^0 -центре в МС (кривые 1,2,3,4) и в КП (кривая 5), на основе InSb от полярного радиуса примеси ($\rho_a^* = \rho_a / a_d$) при $l = 65$ нм.
 $U_0 = 0,2$ эВ, $B = 0$ Тл; $E_i = 0,001$ эВ.

$$1 - L_z^* = 5, 2 - L_z^* = 10; 3 - L_z^* = 15; 4 - L_z^* = 25, 5 - L_z^* \rightarrow \infty$$

На рис. 2 представлена зависимость энергии связи D^- -центра, расположенного в сечении узкого горла МС ($\rho_a = z_a = 0$) и на оси КП, от величины магнитного поля \bar{B} . Можно видеть, что с ростом магнитного поля энергия связи D^- -центра значительно возрастает, что наиболее существенно для небольших значений $L_z^* \leq 10$ (см. кривые 2 и 1). С ростом параметра L_z^* наблюдается переход «МС \rightarrow КП» (ср. кривые 1–4 и 5). Для $L_z^* = 25$ соответствующие кривые практически совпадают (см. кривые 4 и 5). В данной главе в дипольном приближении рассмотрено фотовозбуждение электрона с локализованного

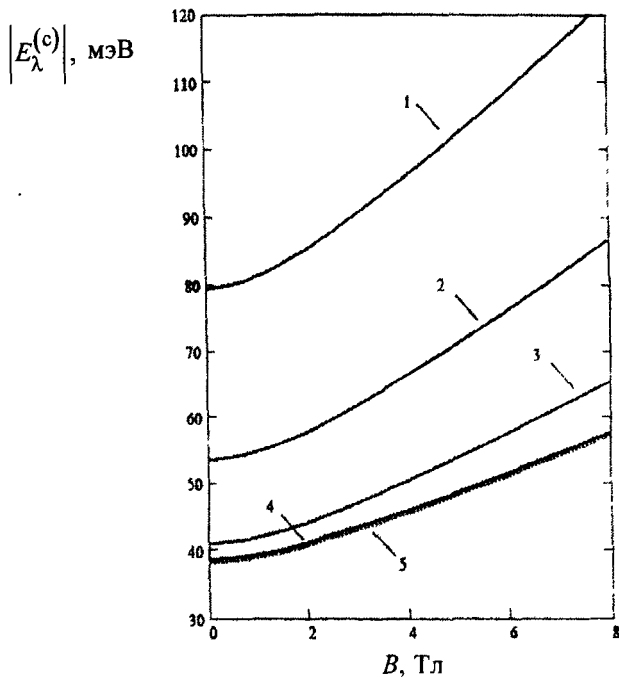


Рис. 2 Зависимость энергии связанного состояния электрона $|E_\lambda^{(c)}|$, локализованного на D^0 -центре, расположенного на оси КП (кривая 5) и в МС ($\rho_a = z_a = 0$) (кривые 1, 2, 3 и 4), от величины магнитной индукции B при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,2$ эВ; $E_i = 0,001$ эВ

$$1 - L_z^* = 5; 2 - L_z^* = 10; 3 - L_z^* = 15; 4 - L_z^* = 25; 5 - L_z^* \rightarrow \infty$$

уровня в гибридно-квантованные состояния МС для случая поперечной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света. Выражение для сечения фотоионизации $\sigma_B(\omega)$ D^- -центра получено в аналитическом виде в однозонном приближении. Процесс вычисления выявил следующее правило отбора: оптические переходы с примесного уровня возможны только в гибридно-квантованные состояния со значением магнитного квантового числа $m = \pm 1$. На рис. 3 кривыми 1 и 2 представлены спектральные зависимости $\sigma_B(\omega)$ для МС и КП на основе InSb, соответственно. Видно, что спектр примесного магнитопоглощения

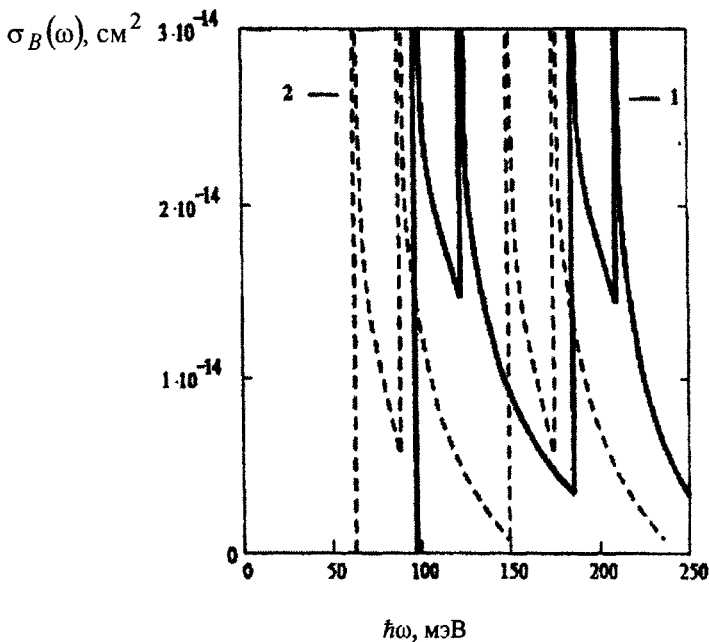


Рис. 3 Спектральная зависимость сечения фотоионизации $\sigma_B(\omega)$ D^- -центра, расположенного в точке $(0,0,0)$ сечения узкого горла МС $L_z^* = 5$ (кривая 1) и на оси КП (кривая 2) при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,2$ эВ; $B = 5$ Тл; $E_i = 0,001$ эВ

света поперечной поляризации представляет собой серию резонансных пиков, имеющих дублетную структуру. Эффект гибридизации спектра примесного поглощения проявляется в том, что расстояние между резонансными пиками, составляющими дублет Зеемана, определяется циклотронной частотой, а период появления дублета – гибридной частотой. При больших $L_z^* > 10$ имеет место переход «МС \rightarrow КП», т. е. кривые 1 и 2 совпадают. Особенность электронного спектра в МС проявляется в зависимости края полосы примесного поглощения $(\hbar\omega)_{\text{п}}$ от эффективной длины сужения L_z (кривые 1 и 2 на рис. 4), а также в более сильной зависимости $(\hbar\omega)_{\text{п}}$ от величины магнитного поля по сравнению со случаем КП (ср. кривые 1 и 4 на рис. 4).

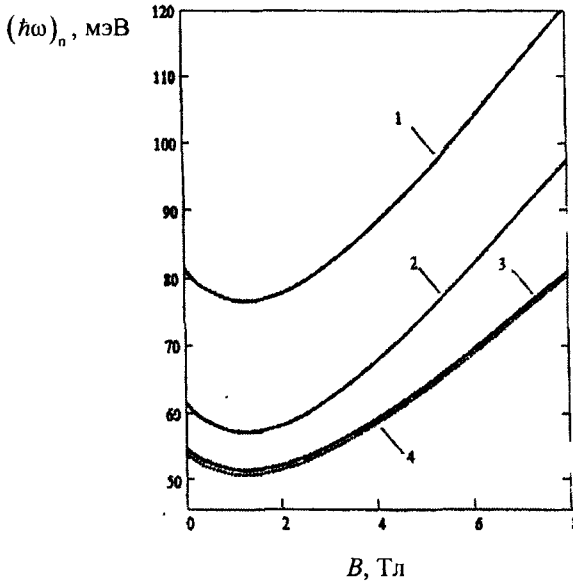


Рис 4 Зависимость края полосы примесного поглощения $(\hbar\omega)_0$ в МС (кривые 1, 2 и 3) и в КП (кривая 4) от величины магнитной индукции B при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,2$ эВ; $E_i = 0,001$ эВ.

$$1 - L'_z = 5; 2 - L'_z = 10; 3 - L'_z = 25, 4 - L'_z \rightarrow \infty$$

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию энергетического спектра молекулярного иона D_2^- в полупроводниковой КП и МС. Двухцентрвый потенциал моделировался суммой потенциалов нулевого радиуса мощностью $\gamma_i = 2\pi\hbar^2 / (\alpha_i m^*)$, $i = 1, 2$.

$$V_8(\vec{r}, \vec{R}_1, \vec{R}_2) = \sum_{i=1}^2 \gamma_i \delta(\vec{r} - \vec{R}_i) \left[1 + (\vec{r} - \vec{R}_i) \nabla_r \right], \quad (3)$$

где $\vec{R}_i = (\rho_i, \varphi_i, z_i)$ – координаты D^0 -центров; α_i определяется энергией E_i электронного локализованного состояния на этих же D^0 -центрах в массивном полупроводнике. Волновая функция электрона $\Psi_\lambda(\vec{r}, \vec{R}_1, \vec{R}_2)$, локализованного на D_2^0 -центре, удовлетворяющая урав-

нению Липпмана-Швингера для связанного состояния, имеет вид линейной комбинации

$$\Psi_{\lambda}(\vec{r}, \vec{R}_1, \vec{R}_2) = \sum_{i=1}^2 c_i \gamma_i G(\vec{r}, \vec{r}_i; E_{\lambda_2}), \quad (4)$$

где $G(\vec{r}, \vec{r}_i; E_{\lambda_2})$ – одноэлектронная функция Грина, соответствующая источнику в точке \vec{r}_i и энергии E_{λ_2} (E_{λ_2} – энергия связанного состояния электрона в поле D^0 -центров, отсчитываемая от уровня энергии основного состояния двумерной осцилляторной ямы). С математической точки зрения, двухцентровая задача сводится к рассмотрению нетривиальных решений однородной системы алгебраических уравнений для коэффициентов c_i , что приводит к трансцендентному уравнению для E_{λ_2} . Последнее в том случае, когда $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$, распадается на два уравнения, определяющих симметричное (g -терм) и антисимметричное (u -терм) состояния электрона. В данной главе аналитически получены дисперсионные уравнения электрона, локализованного на D_2^0 -центре, описывающие g - и u -термы соответственно в КП и МС при наличии продольного магнитного поля. Компьютерный анализ данных уравнений позволил проследить за эволюцией термов с изменением величины магнитного поля \vec{B} . На рис. 5 показана зависимость энергии связи электрона $|E_{\lambda_2}|$ от расстояния R_{12} между D^0 -центрами, расположенными на оси КП. Видно, что в случае g -терма (кривая 1) $|E_{\lambda_2}| \rightarrow \infty$ при $R_{12}^* \rightarrow 0$, т. е. наблюдается своеобразное «падение на центр». Напротив, у состояния с меньшей энергией связи (u -терм) (кривая 2) $|E_{\lambda_2}|$ уменьшается при $R_{12}^* \rightarrow 0$. Таким образом, с уменьшением R_{12}^* возникает расщепление между вырожденными при $R_{12}^* \geq 1$ g - и u -термами. На рис. 5 видна также эволюция g - и u -термов с изменением величины магнитного поля (ср. кривые 1, 2 и 5, 6): с ростом величины магнитного поля энергия связи D_2^- -центра возрастает, причем условия существования g -состояния становятся более жесткими (ср. кривые 1 и 5).

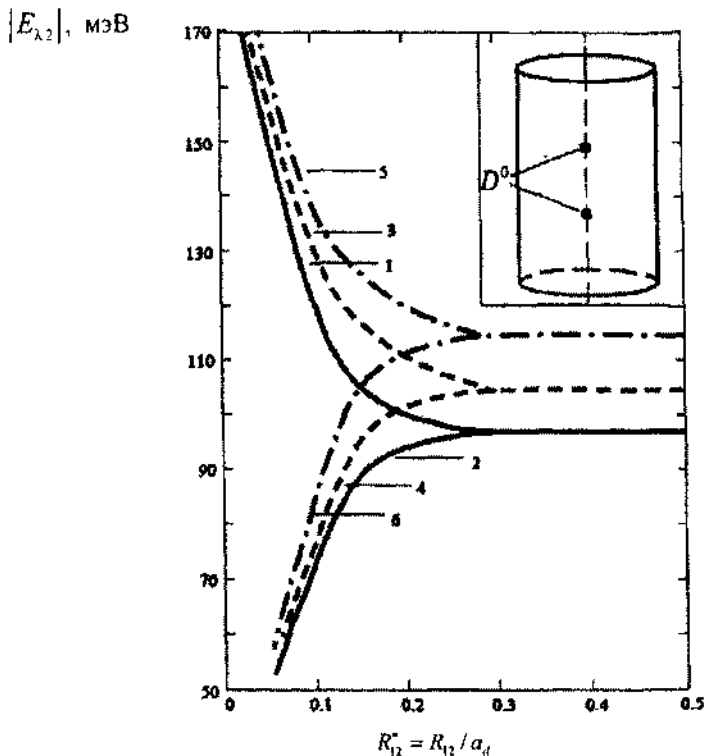


Рис. 5 Зависимость энергии связи электрона от расстояния между D^0 -центрами (кривые 1, 3 и 5 – g -терм), (кривые 2, 4 и 6 – u -терм) при $L = 65$ нм, $U_0 = 0,1$ эВ, $E_c = 0,01$ эВ. На вставке расположение D^0 -центров в КП на основе InSb
1, 2 – $B = 0$ Тл; 3, 4 – $B = 5$ Тл; 5, 6 – $B = 10$ Тл

На рис. 6 представлена зависимость величины $|E_{\lambda 2}(R_{12}^*)|$ для случая, когда D^0 -центры расположены в плоскости перпендикулярной оси КП (см. вставку на рис. 6). Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что энергия связи D_2^- -центра и величина расщепления между термами чувствительны к пространственной конфигурации молекулярного иона D_2^- в КП.

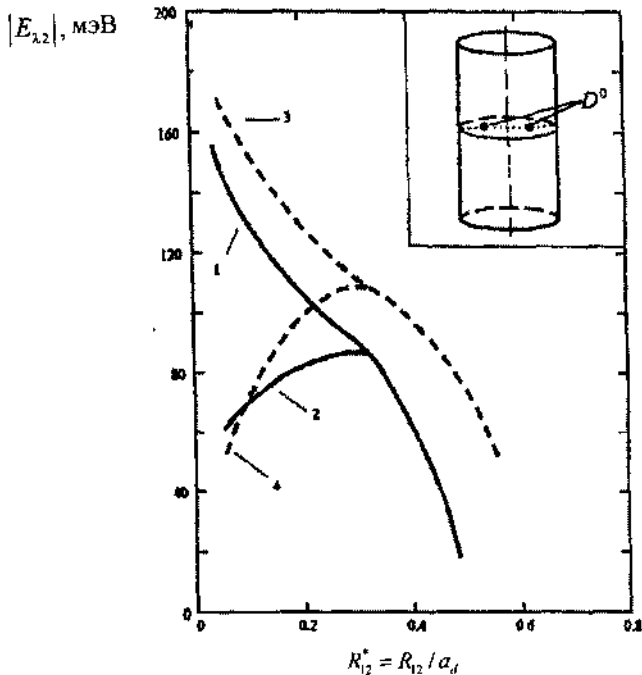


Рис. 6. Зависимость энергии связи электрона $|E_{\lambda 2}|$ от расстояния между D^0 -центрами (кривые 1, 3 – g -терм), (кривые 2, 4 – u -терм) при $L = 65$ нм, $U_0 = 0,1$ эВ; $E_c = 0,01$ эВ; 1, 2 – $B = 5$ Тл; 3, 4 – $B = 10$ Тл

На рис. 7 приведена зависимость энергии связи D_2^- -центра $|E_{\lambda 2}^{(c)}|$ от эффективной длины L_z и координат D^0 -центров в узком горле МС. На вставке рис. 7 указано расположение D^0 -центров в МС на основе InSb. Фактор геометрической формы проявляется в наличии существенной зависимости расщепления между термами от параметра L_z . Близость границ структуры для такой конфигурации D_2^- -центра приводит к излому энергетических уровней, соответствующих вырожденным g - и u -состояниям.

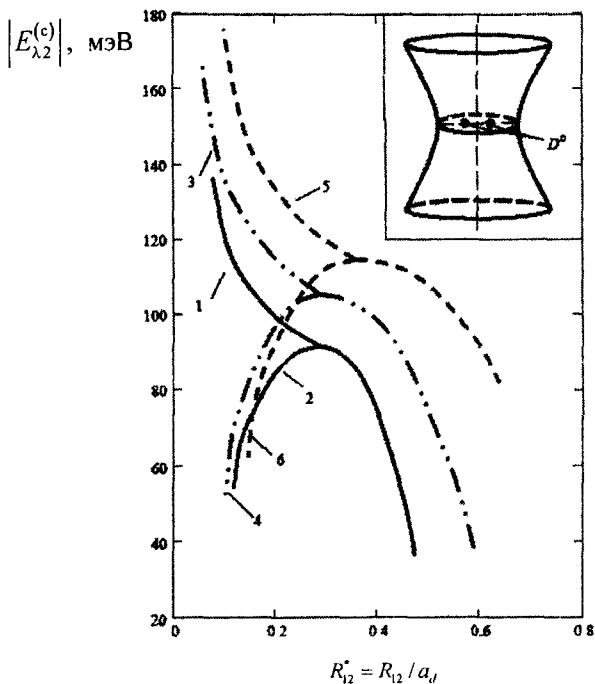


Рис 7 Зависимость энергии связи электрона $|E_{\lambda,2}^{(c)}|$ в МС от расстояния между D^0 -центрами (кривые 1, 3 и 5 – g -терм; кривые 2, 4 и 6 – u -терм) при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,2$ эВ; $E_i = 0,01$ эВ
 1, 2 – $L_z^* = 10$, $B = 0$ Тл; 3, 4 – $L_z^* = 5$; $B = 0$ Тл; 5, 6 – $L_z^* = 10$, $B = 5$ Тл

Третья глава диссертации посвящена теоретическому исследованию магнитооптических свойств молекулярного иона D_2^- в КП, а также электронного транспорта, связанного с эффектом фотонного увлечения электронов при фотоионизации D_2^- -центров в продольном магнитном поле. Процесс фотоионизации D_2^- -центра, связанный с оптическим переходом электрона из g -состояния в гибридно-квантованные состояния КП, рассматривался для случая продольной и поперечной по отношению к направлению магнитного поля поляризации света. Выражения для

соответствующих сечений фотоионизации D_2^- -центров $\sigma_g^{(s)}$ и $\sigma_g^{(i)}$ получены в аналитическом виде в однозонном приближении. Процесс вычисления выявил следующие правила отбора: в случае продольной поляризации света оптические переходы из g -состояния возможны только в гибридно-квантованные состояния КП со значением магнитного квантового числа $m = 0$, а в случае поперечной поляризации — $m = \pm 1$. На рис. 8 представлена спектральная зависимость $\sigma_g^{(s)}$ для КП на основе InSb.

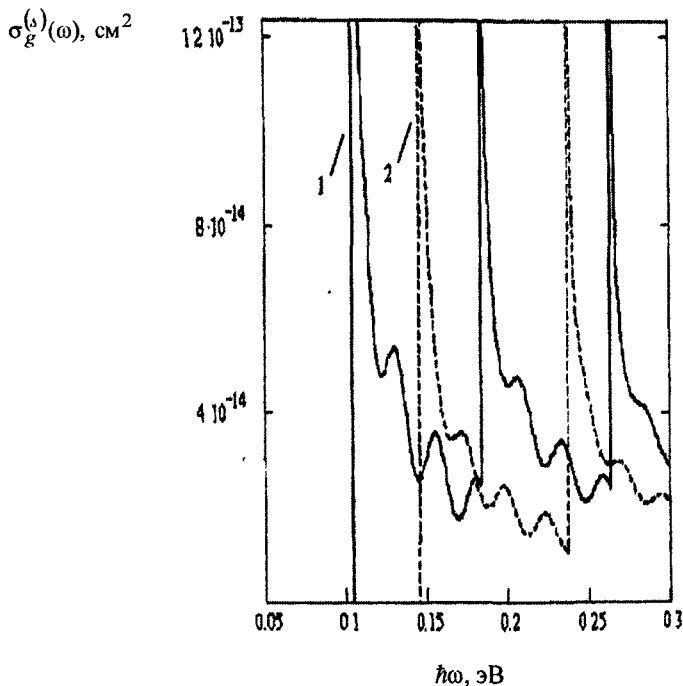


Рис 8 Спектральная зависимость сечения фотоионизации $\sigma_g^{(s)}(\omega)$

D_2^- -центра для случая продольной поляризации света
при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,1$ эВ, $E_i = 0,01$ эВ, $R_{12} = 16$ нм
1 — $B = 0$ Тл, 2 — $B = 10$ Тл

Видно, что спектр магнитопоглощения света продольной поляризации содержит резонансные пики с ярко выраженными осцилляциями, которые являются следствием интерференции электронных состояний. Как показал численный анализ, период осцилляций линейно растет с уменьшением расстояния между D^0 -центрами и слабо зависит от величины магнитного поля. Резонансные пики появляются с периодом, определяемым гибридной частотой $\Omega = \sqrt{4\omega_0^2 + \omega_B^2}$, и соответствуют оптическим переходам электрона из g -состояния D_2^- -центра в состояния квазидискретного спектра КП с магнитным квантовым числом $m = 0$. Спектральная зависимость сечения фотоионизации D_2^- -центра $\sigma_x^{(i)}$ для случая поперечной поляризации света приведена на рис. 9.

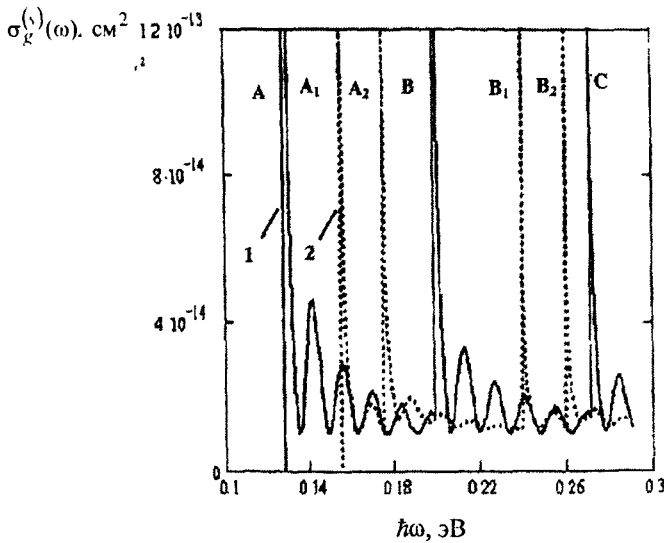


Рис 9. Спектральная зависимость сечения фотоионизации $\sigma_x^{(i)}(\omega)$ D_2^- -центра в КП на основе InSb для случая поперечной поляризации света при $L = 65$ нм; $U_0 = 0,1$ эВ; $E_z = 0,01$ эВ; $R_{12} = 16$ нм

1 – $B = 0$ Тл; 2 – $B = 10$ Тл

Можно видеть, что в магнитном поле резонансные пики A и B (кривая 1) расщепляются в дублеты A_1 и A_2 , B_1 и B_2 (кривая 2) соответственно. Промежутки между пиками в дублете Зеемана заполнены осцилляциями интерференционной природы. Период осцилляций в дублете и между дублетами, как показал численный анализ, экспоненциально возрастает с уменьшением расстояния между D^0 -центрами и незначительно меняется с ростом магнитного поля. В данной главе диссертации развита теория примесного эффекта фотонного увлечения (ЭФУ) для случая планарной структуры полупроводниковых КП в присутствии продольного магнитного поля \vec{B} , направленного вдоль оси КП. ЭФУ обусловлен импульсом фотонов, передаваемым в процессе поглощения электронной подсистеме. Учет импульса света приводит к асимметрии в распределении носителей заряда в пространстве квазиимпульса, т. е. к образованию тока увлечения (ТУ). Решение задачи о примесном ЭФУ в КП основано на одномерном кинетическом уравнении Больцмана, записанном в приближении времени релаксации. Генерационный член этого уравнения определяется квантовыми фотопереходами носителей из g -состояния D_2^- -центра в гибридно-квантованные состояния КП, которые рассчитываются в линейном по продольному импульсу фотона приближении. В режиме короткого замыкания в приближении сильного магнитного квантования, когда $\omega_0 \ll \Omega$, получено аналитическое выражение для плотности ТУ при рассеянии электронов на системах короткодействующих примесей. На рис. 10 приведена спектральная зависимость плотности ТУ одномерных электронов в относительных единицах $j^{(m)}/j_0$ при фотоионизации D_2^- -центров в продольном магнитном поле. Как видно из рис. 10, для спектральной зависимости плотности ТУ характерен дублет Зеемана с ярко выраженным пиком, связанным с оптическими переходами электронов из состояния g -терма в состояния с магнитным квантовым числом $m = +1$.

Релаксация кинетических электронов на системе короткодействующих примесей приводит к размытию «низкоэнергетического» пика ($m = -1$) в полосу с осцилляциями интерференционной природы.

В заключении перечислены полученные в диссертационной работе наиболее важные результаты и выводы.

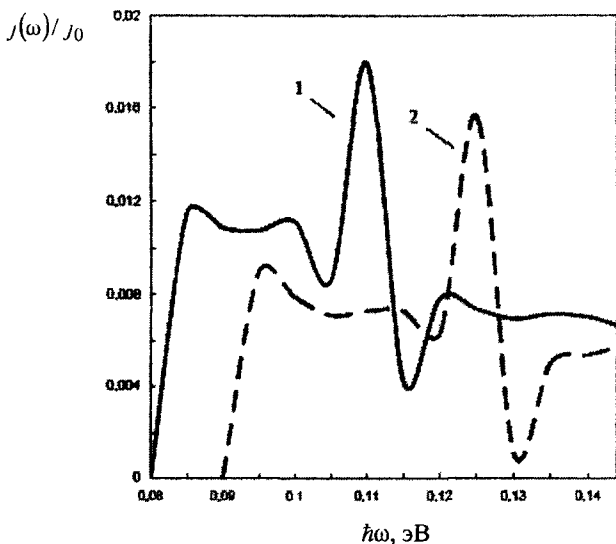


Рис.10 Спектральная зависимость плотности тока увлечения $J(\omega)/J_0$ (в относительных единицах) при $E_i = 0,01$ эВ; $U_0 = 0,1$ эВ; $L = 65$ нм; $T = 7$ К.
1 – $B = 5$ Тл; 2 – $B = 10$ Тл

Основные результаты и выводы:

1. Проведено теоретическое исследование состояний электрона, локализованного на доноре в МС с параболическим потенциалом confinement при наличии продольного по отношению к оси сужения магнитного поля. В рамках модели потенциала нулевого радиуса аналитически получено дисперсионное уравнение электрона с учетом влияния магнитного поля на D^- -состояния в сечении узкого горла МС. Найдено, что особенность электронного спектра в МС проявляется в зависимости энергии связи D^- -состояния и края полосы примесного поглощения от эффективной длины сужения. Исследована эволюция энергии связи и сечения фотоионизации D^- -центра с ростом эффективной длины сужения L_z . Установлено, что влияние параметра L_z^{-1} на D^- -состояния в МС аналогично влиянию магнитного поля на D^- -состояния в КП.

2. В рамках модели потенциала нулевого радиуса рассмотрена задача о связанных состояниях электрона в поле двух D^0 -центров (двухцен-

тровая задача) в КП и МС соответственно с параболическим потенциалом конфайнмента при наличии продольного магнитного поля. Аналитически получены уравнения, описывающие g - и u -термы, соответствующие симметричным и антисимметричным состояниям электрона, локализованного на D_2^- -центре. Показано, что магнитное поле приводит к значительному изменению положения термов и стабилизации D_2^- -состояний в КП и МС. Найдено, что энергия g - и u -состояний, а также величина расщепления между термами зависит от пространственной конфигурации молекулярного иона D_2^- в КП и МС. Установлено, что эффективная длина МС существенно влияет на величину расщепления между термами и на размер области, где возможно существование D_2^- -состояний.

3. Теоретически исследована структура в магнитооптическом спектре КП, связанная с оптическими переходами электрона из состояния g -терма в гибридно-квантованные состояния КП. Получены аналитические формулы для сечений фотоионизации D_2^- -центра в случае продольной и поперечной по отношению к оси КП поляризации света. Найдено, что спектр магнитопоглощения света как продольной, так и поперечной поляризации содержит резонансные пики с ярко выраженными осцилляциями интерференционной природы. Показано, что следствием магнитного квантования является эффект гибридизации спектра примесного магнитопоглощения в КП с D_2^- -центрами. Найдено, что в случае поперечной поляризации света для спектральной зависимости сечения фотоионизации D_2^- -центра характерен квантово-размерный эффект Зеемана. Показано, что период осцилляций в дублете и между дублетами Зеемана экспоненциально возрастает с уменьшением расстояния между D^0 -центрами и незначительно меняется с ростом магнитного поля.

4. Развита теория эффекта фотонного увлечения при фотоионизации D_2^- -центров в планарной структуре из КП при наличии продольного магнитного поля. В режиме короткого замыкания в приближении сильного магнитного квантования получено аналитическое выражение для плотности тока увлечения при рассеянии электронов на системе короткодействующих примесей. Найдено, что спектральная зависимость тока увлечения имеет дублетную структуру с ярко выраженным пиком, связан-

ным с оптическими переходами электронов из g -состояния D_2^- -центра в гибридно-квантованные состояния с магнитным квантовым числом $m = +1$. Показано, что релаксационные процессы приводят к размытию «низкоэнергетического» пика ($m = -1$) в дублете Зеемана в полосу с осцилляциями интерференционной природы.

Основные публикации по теме диссертации

1. Математическое моделирование одномерного молекулярного иона $D2(-)$ в продольном магнитном поле / В. Д. Кревчик, А. А. Марко, М. Б. Семенов, А. Б. Грунин // Изв. вузов. Поволжский регион. Сер. Естественные науки. – 2003. – № 6/ – С. 57–65.
2. Марко А. А. Квантово-размерный эффект Зеемана в квантовых нитях с $D_2^{(-)}$ -центрами // Десятая Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых. – Екатеринбург; Москва, 2004. – С. 488.
3. Марко А. А. Эффект увлечения одномерных электронов при фотоионизации молекулярных ионов $D_2^{(-)}$ в продольном магнитном поле // Ломоносов – 2004: Тр. V Междунар. конф. – М., 2004. – С. 68.
4. Эффект гибридизации размерного и магнитного квантования в спектрах оптического поглощения наногетеросистем с $D^{(-)}$ -состояниями / В. Д. Кревчик, А. А. Марко, А. Б. Грунин, М. Б. Семенов // Изв. вузов. Сер. Физика. – 2004. – № 9. – С. 67–75.
5. Кревчик В. Д. Магнитооптические свойства молекулярного иона $D2(-)$ в квантовой нити / В. Д. Кревчик, А. А. Марко, А. Б. Грунин // ФТТ. – 2004. – № 11. – С. 2099–2104.
6. Термы одномерного молекулярного иона $D2(-)$ в продольном магнитном поле / В. Ч. Жуковский, В. Д. Кревчик, А. А. Марко, М. Б. Семенов, А. Б. Грунин // Вестник МГУ. Сер. Физика. Астрономия. – 2004. – № 5. – С. 7–10.
7. Марко А. А. Магнитооптические свойства $D^{(-)}$ -центра в микросужении // Тез. докл. Шестой Всерос. молодежной науч. конф. по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. – СПб., 2004. – С. 78.

Цитируемая литература

1. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры (обзор) / Н. Н. Леденцов, В. М. Устинов, В. А. Шукин, П. С. Копьев, Ж. И. Алфёров, Д. Бимберг // ФТП. – 1998. – № 32(4). – С. 385–410.
2. Magneto-optics of quantum wires with D^- -centers / V. D. Krevchik, A. B. Grunin, A. K. Aringazin, M. B. Semenov, E. N. Kalinin, V. G. Mayorov, A. A. Marko, S. V. Yashin // Hadronic Journal. – 2003. – V. 26. – № 1. – P. 31–56.
3. Кревчик В. Д. Эффект увлечения одномерных электронов при фотоионизации D^- -центров в продольном магнитном поле / В. Д. Кревчик, А. Б. Грунин // ФТТ. – 2003. – № 45(7). – С. 1272–1279.
4. Галкин Н. Г. Внутризонное поглощение электромагнитного излучения квантовыми наноструктурами с параболическим потенциалом конфайнмента / Н. Г. Галкин, В. А. Маргулис, А. В. Шорохов // ФТТ. – 2001. – № 43(3). – С. 511–519.
5. Fujito M. Magneto-optical absorption spectrum of a D ion in a GaAs-Ga_{0.75}Al_{0.25}As quantum well / M. Fujito, A. Natori, H. Yasunaga // Phys. Rev. B. 1995. – V. 5. – № 7. – P. 4637–4640.
6. Huant S. Two-Dimensional D^- – centers / S. Huant, S. P. Najda // Phys. Rev. Lett. – 1990. – V. 65. – № 12. – P. 1486–1489.
7. Huant S. Well-width dependence of D^- -cyclotron resonance in quantum wells / S. Huant, A. Mandray // Phys. Rev. B. – 1993. – V. 48. – № 4. – P. 2370–2374.
8. Глазман Л. И. Нелинейная квантовая проводимость микросужения / Л. И. Глазман, А. В. Хаецкий // Письма ЖЭТФ. – 1988. – № 48(10). – С. 546–549.
9. Галкин Н. Г. Электронный транспорт через микросужение в произвольно ориентированном однородном магнитном поле / Н. Г. Галкин, В. А. Гейлер, В. А. Маргулис // ЖЭТФ. – 2000. – Т. 117. – С. 593–603.
10. Faist J. Possible observation of impurity effects on conductance quantization / J. Faist, P. Gueret, H. Rothuizen // Phys. Rev. B. – 1990. – V. 42. – № 5. – P. 3217–3223.
11. Transport properties of a Si/SiGe quantum point contact in the presence of impurities / D. Tobben, D. A. Wharam, G. Abstreiter, J. P. Kotthaus, F. Schaffler // Phys. Rev. B. – 1995. – V. 52. – № 7. – P. 4704–4708.

Марко Антон Александрович

Магнитооптика
квантовых проволок и сужений
с D^- - и D_2^- -центрами

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

Редактор *Т. Н. Судовчихина*
Технический редактор *Н. А. Вялакова*
Корректор *С. Н. Сухова*
Компьютерная верстка *С. П. Черновой*

ИД № 06494 от 26.12.01

Сдано в производство 27.04.05 Формат 60x84¹/16

Бумага писчая Печать офсетная Усл. печ. л. 1,39

Заказ № 283. Тираж 100

Издательство Пензенского государственного университета
440026, Пенза, Красная, 40

4

5

6

7

РНБ Русский фонд

2006-4

6327

Р - 9 7 8 2