

На правах рукописи

Дубовис Сергей Александрович

ТЕОРИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНА
В КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Автор:

Москва, 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Маныкин Эдуард Анатольевич

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Башаров Асхат Масхудович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Захаров Сергей Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор Алексеев Владимир Анатольевич

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита состоится «24» сентября 2008 года в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.130.05 в МИФИ по адресу: 115409, Москва,
Каширское шоссе, д. 31, корп. «К», ауд. 608.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан «___» _____ 2008 года.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.130.05



И. В. Евсеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Изучение различных явлений, возникающих в наноразмерных объектах под воздействием электромагнитного поля, представляет как теоретический, так и практический интерес. С теоретической точки зрения, системы, состоящие из квантовых точек и/или квантовых ям, позволяют в рамках относительно простых моделей исследовать фундаментальные квантовомеханические закономерности, что, в свою очередь, позволяет глубже понимать уже известные и предсказывать новые физические эффекты. С практической точки зрения, исследование систем, характерные размеры которых составляют несколько нанометров, представляет интерес, поскольку такие системы открывают возможности для создания новых устройств, приборов и т.д.

Исследование динамики электрона в наноразмерных системах является необходимым, в частности, для понимания возможностей дальнейшего уменьшения отдельных элементов традиционной полупроводниковой микроэлектроники. С другой стороны, исследование эффектов, подобных переносу электрона между квантовыми точками, открывает возможности для создания принципиально новых электронных устройств, которые могут использоваться, например, для реализации квантовой логики (квантовых вычислений).

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование различных механизмов и режимов управляемого оптического переноса электрона между удаленными квантовыми точками и/или квантовыми ямами, а также поиск параметров задачи, при которых возможен перенос электрона с вероятностью близкой к единице.

Научная новизна

В диссертационной работе показано, что в задачах об оптическом переносе электрона между связанными состояниями удаленных квантовых точек необходимо учитывать состояния непрерывного спектра, поскольку они существенно влияют на максимально возможную вероятность указанного переноса. Приведенный в работе аналитический и численный анализ доказывает, что двухфотонные переходы между двумя связанными состояниями квантовомеханической системы не требуют наличия других связанных состояний, т. к. функцию квазирезонансных энергетических уровней могут эффективно выполнять состояния непрерывного спектра.

Другой важный результат, впервые выявленный в данной работе, заключается в том, что перенос электрона между двумя стационарными состояниями, локализованными в удаленных квантовых точках и обладающими одинаковой энергией, происходит под воздействием электромагнитной волны произвольной частоты, т. е. не требует какой-либо настройки этого воздействия. При этом в системах из квантовых ям двухфотонные процессы протекают существенно быстрее, чем в системах из квантовых точек, что связано с особенностями закона дисперсии вблизи дна зоны проводимости в квазиодномерном случае квантовых ям.

Практическая значимость

Предложенный в диссертационной работе метод учета непрерывного спектра (зоны проводимости) с помощью унитарного преобразования является достаточно общим, т. е. может использоваться не только для описания динамики электрона в квантовых точках, но и для исследования других задач (например, динамики ультрахолодных атомов в магнитных ловушках).

Перенос электрона между квантовыми точками, в т. ч. с помощью предложенных в диссертационной работе механизмов, может использоваться для реализации наноэлектронных приборов, например, элементов квантовой логики. Кроме того, принципы двухфотонного переноса, аналогичные предложенным в настоящей работе, могут использоваться для измерения различных параметров квантовых точек, квантовых ям и других наноструктурных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развита метод унитарного преобразования применительно к задачам об оптическом переносе электрона между связанными состояниями удаленных квантовых точек; показана необходимость учитывать состояния непрерывного спектра (зоны проводимости) при рассмотрении таких задач.
2. Предложен новый механизм управляемого переноса электрона между квантоворазмерными объектами, основанный на резонансных двухфотонных процессах с использованием в качестве квазирезонансных уровней состояний непрерывного спектра (зоны проводимости).

3. Получено детальное описание двухфотонного переноса электрона в системах, состоящих из квантовых точек, а также в системах, состоящих из квантовых ям; выявлены особенности протекания двухфотонного переноса электрона в указанных системах.

4. Показано, что предложенный двухфотонный перенос электрона между стационарными состояниями, обладающими одинаковой энергией, слабо зависит от частоты внешнего воздействия и, таким образом, не требует какой-либо настройки этой частоты.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на 7 международных и российских конференциях: *X International Conference on Quantum Optics ICQO-2004* (Минск, 2004 г.); *Семинар по квантовой оптике памяти Д. Н. Клышко* (Москва, 2005 г.); *Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии* (Калининград, 2005 г.); *Научная конференция «Исследования в области физики конденсированного состояния, наносистем и сверхпроводимости»* (Москва, 2006 г.); *International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO-2007* (Минск, 2007 г.); *X-th International Workshop On Quantum Optics* (Самара, 2007 г.); *Конференция по физике конденсированного состояния, сверхпроводимости и материаловедению* (Москва, 2007 г.).

Публикации по теме работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных трудах, в том числе 6 статей – в журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий («Оптика и спектроскопия» – 2 статьи, «Журнал экспериментальной и теоретической физики» – 1 статья, «Квантовая электроника», – 1 статья, «Physics Letters A» – 2 статьи):

1. А. М. Башаров, С. А. Дубовис, Об оптическом переносе электрона между квантовыми точками, Оптика и спектроскопия 99, №4, 607-616 (2005).
2. А. М. Башаров, С. А. Дубовис, Нерезонансный двухфотонный перенос электрона между квантовыми точками, ЖЭТФ 128, №3, 476-488 (2005).
3. А. М. Башаров, С. А. Дубовис, Двухфотонный перенос электрона между квантовыми точками, Квантовая электроника 35, №8, 683-687 (2005).
4. S. A. Dubovis, A. M. Basharov, Electromagnetically induced electron transfer between quantum dots via conduction band, Phys. Lett. A 359, 308-313 (2006).
5. S. A. Dubovis, A. N. Voronko, A. M. Basharov, Stark-like electron transfer between quantum wells, Phys. Lett. A 372, 1682-1686 (2007).
6. M. Basharov, S. A. Dubovis, and N. V. Znamenskiy, Nutation oscillations of an electromagnetic wave propagating through an ensemble of quantum dots, Proc. SPIE 6729, 67291 (2007).
7. S. A. Dubovis and A. M. Basharov, Electromagnetically induced electron transfer between coupled quantum wells, Proc. SPIE 6728, 67281 (2007).

8. А. М. Башаров, С. А. Дубовис, Н. В. Знаменский, Нутиационный эффект при нерезонансном распространении электромагнитной волны в ансамбле квантовых точек, Оптика и спектроскопия 104, №5, 784-492 (2008).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из пяти глав (в т. ч. одна глава – введение и одна – заключение) и списка литературы из 59 наименований; изложена на 111 страницах и содержит 16 рисунков и графиков.

Содержание работы

Глава 1. Обзор литературы. Введение.

Отличительной особенностью большинства работ по оптическому переносу электронов является то, что они в той или иной мере основаны на резонансных переходах [1-6] между дискретными уровнями электронной системы с существенно различными энергиями. Например, работа [1] положила начало исследованиям трехуровневых систем, в которых оптический перенос электрона между низколежащими состояниями двух идентичных квантовых точек осуществляется через третий энергетический уровень, расположенный близи верхней границы барьера, разделяющего квантовые точки (Рис. 1.а). Частота внешнего воздействия при этом выбирается таким образом, чтобы пара нижних энергетических уровней попадала в резонанс с верхним уровнем.

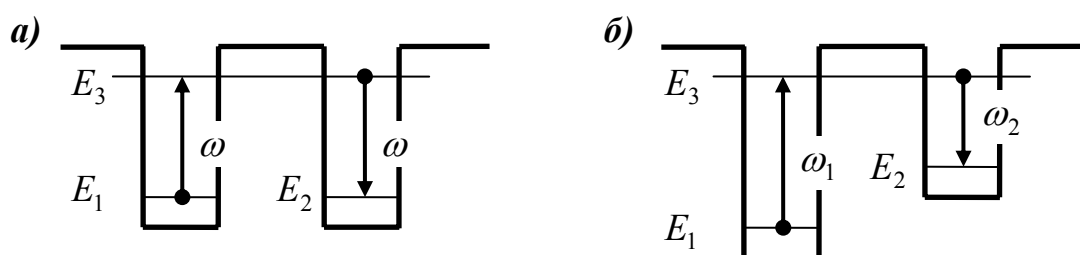


Рис. 1. Перенос электрона между двумя квантовыми точками через третье связанное состояние, делокализованное между ними:

а) квантовые точки идентичны; электромагнитное поле состоит из гармонической волны одной частоты $E_3 - E_1 = E_3 - E_2 = \omega$;

б) квантовые точки различные; электромагнитное поле состоит из двух гармонических волн разных частот: $E_3 - E_1 = \omega_1$, $E_3 - E_2 = \omega_2$.

Экспериментальная проверка описанного механизма связана со значительными трудностями, в первую очередь из-за технологической сложности изготовления двух почти идентичных квантовых точек с изначально заданными свойствами. Чтобы избежать этих трудностей и осуществить перенос электрона между неидентичными квантовыми точками через делокализованное между ними состояние [4, 5], необходимо использовать две различные монохроматические волны (Рис. 1.б), каждая из которых настроена на резонанс между соответствующей парой уровней: $E_3 - E_1 = \omega_1$, $E_3 - E_2 = \omega_2$ (здесь и далее $\hbar = 1$).

В рамках моделей, рассмотренных в работах [1-6], непрерывный спектр, описывающий зону проводимости матрицы, в которой сформирована квантовая точка, никак не учитывается. Между тем, возможность эффективного туннелирования во многих случаях предполагает близость верхних уровней квантовых точек ко дну зоны проводимости, поэтому в поле резонансной электромагнитной волны становится актуальным учет оптических переходов с этих уровней в зону проводимости.

Резонансный характер переноса электрона в трехуровневых системах приводит к тому, что резонансный уровень E_3 оказывается заселенным в промежуточные моменты времени. При этом резонансный уровень должен находиться достаточно близко к границе непрерывного спектра. Это обстоятельство приводит к возможности однофотонной ионизации в непрерывный спектр за счет воздействия электромагнитной волны.

От ионизации в непрерывный спектр и связанных с этим недостатков свободен механизм, основанный на эффекте комбинационного резонанса [6] (см. также [7-9]). В рамках этого механизма периодические переходы между двумя стационарными состояниями с энергиями E_1 и E_2 возникают под

воздействием двух монохроматических волн, частоты которых ω_1 и ω_2 подобраны таким образом, чтобы выполнялось условие комбинационного резонанса $E_2 - E_1 \approx \omega_1 - \omega_2$ (Рис. 2).

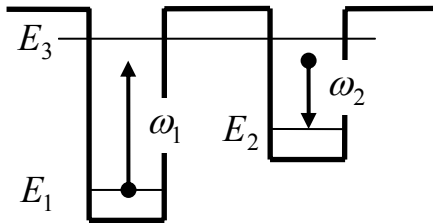


Рис. 2. Комбинационный перенос электрона в трехуровневой системе под воздействием двух монохроматических волн $E_2 - E_1 \approx \omega_1 - \omega_2$

Однако двухфотонный механизм [6] так же, как и все рассмотренные выше схемы, обладает другим недостатком – он требует наличия третьего дискретного состояния, которое играет роль резонансного (или квазирезонансного) уровня. Необходимость наличия такого уровня накладывает существенные ограничения на параметры задачи.

Чтобы обойти эти ограничения, необходимо исследовать возможность использования в качестве квазирезонансных уровней состояний непрерывного спектра, которые присутствуют в потенциальном рельефе любого вида. Именно такое исследование наряду с обобщением описанных выше механизмов переноса электрона является основной задачей диссертационной работы.

Глава 2. Влияние переходов в непрерывный спектр на однофотонные механизмы

Во второй главе диссертации развивается метод унитарного преобразования и с его помощью исследуется влияние состояний непрерывного спектра на динамику электронных переходов между дискретными уровнями, вызванных воздействием электромагнитной волны. С целью демонстрации наиболее общих закономерностей сначала рассматривается простейшая модель квантовой точки (Рис. 3.а), аналогичная двухуровневому атому. Как известно [10], под воздействием электромагнитной волны, частота которой резонансна разности энергий стационарных состояний $\omega = E_2 - E_1$, помещенный в такую систему электрон периодически переходит с нижнего уровня на верхний и назад (осцилляции Раби). Традиционно для описания осцилляций Раби используют приближение первого по полю порядка (приближение вращающейся волны), которое отражает резонансные однофотонные процессы. Во второй главе диссертации развивается более строгий математический аппарат, который позволяет описать влияние непрерывного спектра на резонансные процессы.

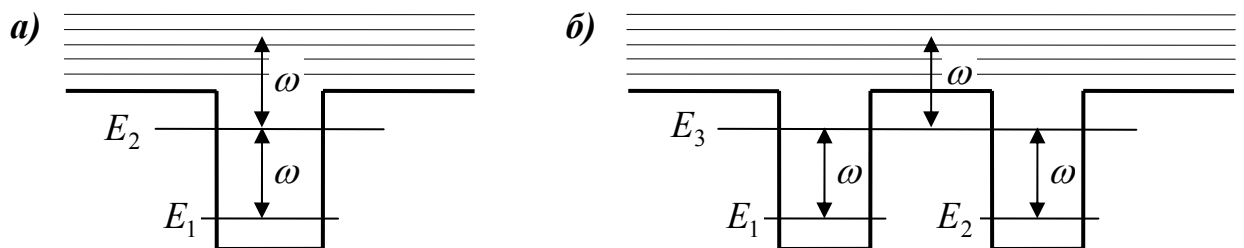


Рис. 3. Ионизация электрона в непрерывный спектр в процессе электронных переходов между связанными состояниями:

- а) ионизация в процессе осцилляций Раби в двухуровневом атоме;
 б) ионизация в процессе переноса электрона между квантовыми точками.

Эффективный гамильтониан двухуровневой квантовой точки, полученный методом унитарного преобразования, содержит в себе не только слагаемые первого по полю порядка, описывающие однофотонные резонансные переходы, но и слагаемые более высоких порядков. В частности, слагаемые эффективного гамильтониана второго порядка описывают высокочастотный Штарковский сдвиг связанных состояний и вызванное этим сдвигом изменение резонансной частоты. Кроме того, для важного с практической точки зрения частного случая, когда энергия фотона ω больше энергии связи верхнего состояния E_1 , указанные слагаемые эффективного гамильтониана позволяют описать однофотонную ионизацию электрона в непрерывный спектр.

Чтобы проанализировать влияние непрерывного спектра на задачи о переносе электрона между связанными состояниями квантоворазмерных объектов, описанные выше общие результаты применяются к трехуровневой системе, состоящей из двух идентичных квантовых точек (Рис. 3.б). Как указано выше, важной особенностью такой системы является близость верхнего транспортного уровня E_3 к вершине потенциального барьера, разделяющего квантовые точки, т. е. фактически к границе непрерывного спектра. С учетом этой особенности возникает необходимость учета процессов, связанных с возможностью однофотонной ионизации электрона с верхнего уровня E_3 в непрерывный спектр, что и выполнено в диссертационной работе. Помимо общих аналитических выражений, описывающих влияние однофотонной ионизации на вероятность переноса электрона между квантовыми точками, во второй главе диссертации проведены количественные оценки характерных величин.

Глава 3. Двухфотонные механизмы переноса электрона между квантовыми точками

В третьей главе диссертации исследуется влияние состояний непрерывного спектра на двухфотонные резонансные процессы, и на основе полученных результатов предлагается новая реализация переноса электрона между удаленными квантовыми точками. Основная модель (Рис. 4), рассматриваемая в рамках третьей главы, представляет собой систему из двух квантовых точек, каждая из которых имеет по крайней мере одно стационарное состояние, причем энергии этих состояний мало отличаются друг от друга $E_1 \approx E_2$. Высоты потенциального барьера, разделяющего квантовые точки, и расстояние между ними предполагаются достаточно большими, что фактически исключает возможность туннелирования и позволяет рассматривать состояния системы, соответствующие строгой локализации электрона в одной из квантовых точек.

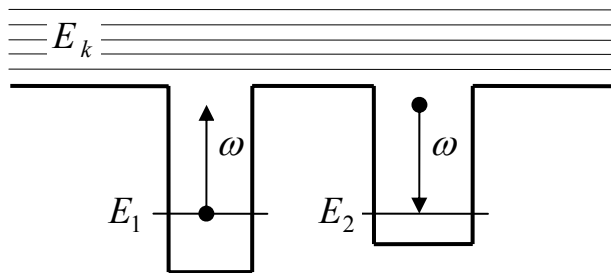


Рис. 4. Нерезонансный двухфотонный перенос электрона между квантовыми точками, $E_1 \approx E_2$.

В работе получен эффективный гамильтониан такой системы, находящейся под воздействием электромагнитной волны произвольной частоты, и показано, что недиагональные матричные элементы эффективного гамильтониана, соответствующие переходам электрона из первой точки во вторую (и назад), отличны от нуля. Этот результат является математическим

отражением двухфотонных резонансных процессов, протекание которых в такой системе возможно, поскольку выполняется условие резонанса: $E_1 - E_2 \approx \omega - \omega = 0$ (один фотон поглощается, другой такой же – испускается). Как известно, для возникновения двухфотонных переходов между двумя уровнями необходимо наличие промежуточных квазирезонансных состояний, в качестве которых традиционно рассматриваются другие дискретные состояния. В третьей главе диссертации показано, что функцию таких квазирезонансных состояний могут эффективно выполнять состояния непрерывного спектра.

Аналитические выражения, описывающие динамику электрона в рассматриваемой системе, совпадают с аналогичными выражениями, описывающими осцилляции Раби в двухуровневом атоме. Единственное отличие заключается в переопределении частоты Раби Λ : если в случае двухуровневого атома $\Lambda = \vec{\varepsilon} \vec{d}_{12}$ (где $\vec{\varepsilon}$ – амплитуда напряженности электромагнитной волны; \vec{d} – оператор дипольного момента), то в случае двухфотонных резонансных процессов

$$\Lambda = -|\varepsilon|^2 \sum_k d_{1k} d_{k2} \left(\frac{1}{\omega_{k1} + \omega} + \frac{1}{\omega_{k2} - \omega} \right)$$

где суммирование идет по всем состояниям непрерывного спектра. Наряду с аналитическими выражениями, во второй главе приводятся количественные оценки частоты Раби для двухфотонного переноса электрона между квантовыми точками (т. е. фактически оценки интенсивности данного процесса). Помимо этого выполняется анализ различных факторов, накладывающих ограничения на возможности практического использования данного механизма.

Глава 4. Перенос электрона между квантовыми ямами

В четвертой главе диссертации исследуются механизмы переноса электрона между квантовыми ямами, аналогичные тем, которые выше рассматривались для случая квантовых точек. Основной моделью, анализируемой в данной главе, является система из двух удаленных квантовых ям, энергетический спектр которой в поперечном направлении аналогичен изображенному на Рис. 4. Эффективный гамильтониан такой системы, полученный методом эквивалентного преобразования, имеет отличные от нуля матричные элементы как и ранее.

Аналитические выражения, описывающие основные параметры системы квантовых ям, выглядят так же, как они выглядели бы в гипотетическом одномерном пространстве. В частности, в выражении для частоты Раби суммирование (интегрирование) фактически идет по энергетическому спектру одномерного электронного газа, плотность состояний которого вблизи нуля стремится к бесконечности. Эта особенность приводит к тому, что основной вклад в сумму (интеграл) вносят состояния вблизи нижней границы непрерывного спектра, не приводя при этом ко взаимному ослаблению.

Задача о переносе электрона между квантовыми ямами сводится к квазиодномерным выражениям, что в силу простоты открывает дополнительные возможности для исследования. Так, например, в четвертой главе диссертации приводится аналитический и численный анализ простейшей модельной системы, состоящей из двух дельта-функциональных ям.

Глава 5. Заключение

В заключении работы приводится краткий перечень полученных результатов и возможные сферы их применения. Изложенный метод учета состояний непрерывного спектра при помощи унитарного преобразования является достаточно общим. С помощью такого подхода можно учесть распад в непрерывный спектр не только в задачах ионизации электрона, но и в таких задачах, как когерентные переходные процессы с участием ридберговских атомов, ультрахолодных атомов в оптических решетках, примесных атомах в полупроводниках.

Предложенный и изученный в данной работе эффект нерезонансного двухфотонного переноса электрона между квантовыми точками доступен для наблюдения и использования в самых разнообразных системах из квантовых точек, но весьма труден для исследования в обычных атомно-молекулярных системах. Причина этого заключается в том, что, как показано в диссертационной работе, эффект существенно зависит от размеров квантовых точек и расстояния между ними.

Хотя эффект нерезонансного двухфотонного переноса и рассмотрен на примере идеализированных моделей, по-видимому, он может наблюдаться в обычных слоистых структурах, получаемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Таким образом, в качестве следующего шага целесообразно исследовать модель, состоящую из двух квантовых ям с присоединенными к ним проводящими контактами (Рис. 5), поскольку такую систему достаточно просто реализовать на эксперименте.

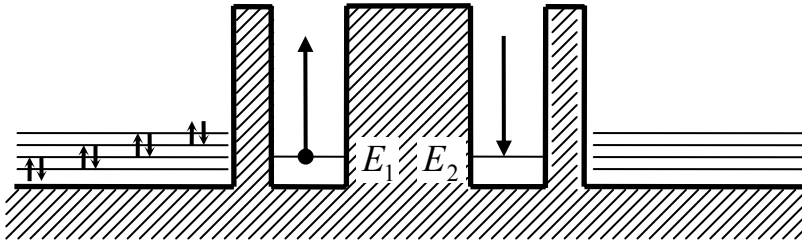


Рис. 5. Потенциальный рельеф системы, предлагаемой для дальнейшего исследования (показаны не все состояния непрерывного спектра).

Потенциальный барьер между контактом и ямой в такой системе целесообразно сделать существенно меньшим, чем барьер между ямами, чтобы возникли условия для эффективного подвода и отвода электронов путем туннелирования. Сила тока, протекающего через такую структуру, должна существенно зависеть от наличия и интенсивности внешнего периодического воздействия. Естественно, разность потенциалов между контактами должна быть такой, чтобы выполнялось условие равенства энергий $E_1 \approx E_2$. Экспериментальная реализация такой системы позволит проверить правомерность основных выводов диссертационной работы.

Список литературы, цитируемой в автореферате

1. L. A. Openov, *Resonant electron transfer between quantum dots*, Phys. Rev. B 60, 8798-8803 (1999).
2. T. H. Stoof and Yu. V. Nazarov, *Time-dependent resonant tunneling via two discrete states*, Phys. Rev. B 53, 1050-1053 (1996).
3. D. Greentree, J. H. Cole, A. R. Hamilton, and L. C. L. Hollenberg, *Coherent electronic transfer in quantum dot systems using adiabatic passage*, Phys. Rev. B 70, 235317 (2004).
4. L. A. Openov, A. V. Tsukanov, *Charge qubit rotations in a double-dot nanostructure*, Pis'ma v ZhETF 80 (7), 572-575 (2004)
5. Alexander V. Tsukanov, *Single-qubit operations in the double-donor structure driven by optical and voltage pulses*, Phys. Rev. B 76, 035328 (2007).
6. U. Hohenester, F. Troiani, E. Molinari, G. Panzarini, and C. Macchiavello, *Coherent population transfer in coupled semiconductor quantum dots*, Appl. Phys. Lett. 77, 1864 (2000).
7. М. О. Скалли, М. С. Зубайри, *Квантовая оптика*, М.: Физматлит (2003).
8. A. I. Maimistov and A. M. Basharov, *Nonlinear optical waves*, Dordrecht: Kluwer Academic (1999).
9. А. М. Башаров, *Фотоника. Метод унитарного преобразования в нелинейной оптике*, М.: МИФИ (1990).
10. L. Allen, and J. H. Eberly, *Optical resonance and two-level atoms*, Wiley-Interscience, New York (1975).