

904166

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

17-2010-43

На правах рукописи
УДК 537.533.2

K-295

КАТКОВ
Всеволод Леонидович

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСОБЕННОСТЕЙ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
С УГЛЕРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы.

Экспериментальное открытие многообразия различных структур на основе атома углерода в sp^2 гибридизации породило огромный исследовательский интерес к этим объектам как с точки зрения фундаментальной физики, так и с точки зрения возможных практических приложений. В 1995 году три научные группы (Чернозатонского [1], де Хира [2] и Ринзлера [3]) обнаружили, что углеродные нанотрубки (УНТ) обладают хорошими автоэмиссионными свойствами: эмиссия характеризуется малыми пороговыми напряжениями, большими токами и хорошей временной стабильностью. Нанотрубки представляют собой сильно вытянутые цилиндры, свернутые из одного листа графита - графена, их замечательные эмиссионные свойства обусловлены большим аспектным отношением (отношение длины к радиусу), хорошими механическими свойствами, достаточно большой электропроводностью, а также тем, что УНТ образованы из атомов, соединенных не металлическими, а ковалентными связями. Последнее обстоятельство существенно увеличивает энергию активации атомов поверхностной миграции и приводит к повышению стабильности процесса эмиссии.

Вскоре на основе УНТ был разработан автоэмиссионный дисплей [4], а затем источник света [5]. В настоящее время многие научные коллективы проектируют различные приборы, основанные на автоэлектронной эмиссии с углеродных нанотрубок, например, такие как яркие лампы, рентгеновские трубки, источники электронов для электронных микроскопов с высоким разрешением. Можно отметить, что яркие лампы и рентгеновские трубки на основе УНТ это уже успешный коммерческий продукт [6]. Вместе с тем, исследования показывают, что не только углеродные нанотрубки являются хорошими источниками автоэлектронной эмиссии. Углеродные наноконусы [7], углеродные наноспиральи [8], углеродные нанохорны [9], графитоподобные пленки [10] и углеродные наноленты [11-14] также можно считать хорошими кандидатами на эту роль.

Вслед за интенсивным экспериментальным изучением эмиссии с углеродных структур примерно с 2000-го года началось активное теоре-

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
В.А. Осипов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Л.А. Чернозатонский
доктор физико-математических наук
В.О. Нестеренко

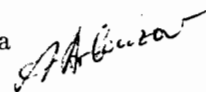
Ведущая организация: Саратовский филиал ИРЭ им. В.А.Котельникова
Российской академии наук

Защита состоится "26" мая 2010 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан "22" апреля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А.Б. Арбузов

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

тическое исследование данного процесса, прежде всего, с целью найти способы повышения эффективности эмиссии. Многие работы по моделированию автоэлектронной эмиссии с конкретных структур представляют собой расчеты из первых принципов. Если эмиттеры состоят из небольшого числа атомов, то такое вычисление на современных компьютерах становится возможным [16, 17]. Данный подход безусловно полезен, когда речь идет об описании конкретных структур. Однако наряду с ним активно развиваются другие подходы, основанные на модификации туннельной модели Фаулера-Нордгейма. Актуальность проведения теоретических исследований именно в этом направлении обусловлена тем, что с их помощью можно ответить на вопрос, каким образом те или иные физические характеристики эмиттера влияют на его эмиссионные свойства. Известная связь физических характеристик с эмиссионными, с одной стороны, указывает пути увеличения эффективности эмиссии электронов, а с другой - позволяет исследовать физические характеристики на основе эмиссионных. Так как количество углеродных структур, претендующих на роль эффективных эмиттеров, велико, исследованиям в данной области посвящено большое количество научных публикаций. В частности, специфика эмиссии, обусловленная геометрической формой различных эмиттеров, была учтена в работах [18–21]. Влияние зонной структуры на ток эмиссии и энергетическое распределение электронов для УНТ изучено в [22–26]. Таким образом, можно заключить, что исследование автоэлектронной эмиссии с углеродных структур является важной прикладной и интересной физической проблемой.

Цель работы.

1. Разработать способ учета зонной структуры при расчете автоэлектронной эмиссии.
2. Исследовать влияние зонной структуры при автоэлектронной эмиссии с углеродных нанотрубок, графита и углеродных листов.
3. Рассчитать геометрические эффекты при эмиссии с углеродных листов и трубок.

Научная новизна и практическая ценность.

В представленной диссертации разработан метод учета зонной структуры при автоэлектронной эмиссии, который может быть назван *методом независимых каналов*. На основе данного метода найдены законы эмиссии для одностеночных углеродных нанотрубок. Полученные результаты могут быть полезны при экспериментальном определении хиральности конкретной нанотрубки.

Разработанный метод был использован для расчета закона автоэлектронной эмиссии с простого гексагонального графита для двух случаев: когда графитовые слои ориентированы параллельно вектору напряженности электрического поля и когда они ориентированы перпендикулярно ему. Обнаружены следующие эффекты: анизотропия плотности эмиссионного тока, связанная с особенностями зонной структуры, и влияние механической деформации на автоэмиссионный ток. Данные результаты могут быть использованы при экспериментальном измерении параметров зонной структуры графита.

В рамках метода независимых каналов рассчитано энергетическое распределение при эмиссии электронов с углеродных листов, состоящих из нескольких графитовых слоев, а также найдены законы эмиссии для монослоя графена и двуслоя графена. Положение и количество обнаруженных в энергетическом распределении суб-пигов напрямую связано числом графитовых слоев в листе. Наличие этих суб-пигов является прямым проявлением квантово-размерного эффекта. Полученные результаты показывают, что измерение распределения эмитированных электронов по энергиям может быть использовано как метод определения числа графитовых слоев в листе, а также как метод определения энергии взаимодействия между соседними слоями наряду с такими подходами как Рамановское рассеяния и фотоэмиссионные эксперименты.

Еще одним результатом диссертации является расчет геометрических эффектов при эмиссии с протяженного горизонтального выступа, имеющего полуэллиптический профиль, и с вытянутого вертикального полуэллипсоида при нанометровых радиусах кривизны у вершины. Обнаружено, что для протяженного выступа геометрические эффекты

выражены гораздо меньше. Полученные в результате соотношения связывают геометрические параметры эмиттера с нелинейностью кривых в координатах Фаулера-Нордгейма и могут быть использованы для оценки радиуса кривизны и фактора усиления поля.

Апробация работы.

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, были представлены в качестве постерного доклада на сессии ПКК ОИЯИ, а также докладывались на следующих конференциях:

1. XXIV International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, March 6-13, 2010, Kirchberg in Tirol, Austria.
2. International Bogolyubov Conference Problems Of Theoretical And Mathematical Physics, August 21-27, 2009, Moscow-Dubna, Russia.
3. XIII научной конференции ОМУС-2009, 16-21 февраля 2009 года.
4. IV научной конференции конференция "Нанозлектроника, нанофотоника и нелинейная физика", 7-9 сентября 2009 года, Саратов.
5. "Dubna-Nano2008", July 11-17, 2008, Dubna, Russia.
6. XII научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 4-8 февраля 2008 года.
7. XXII International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, March 1-8, 2008, Kirchberg in Tirol, Austria.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации 87 страни машинописного текста, включая 26 рисунков и список литературы из 93 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проводимых исследований. Дано краткое содержание диссертации.

В первой главе приводится расчет закона эмиссии для одностенных углеродных нанотрубок с учетом зонной структуры. Для расчета использованы приближение Фаулера-Нордгейма для коэффициента прозрачности барьера

$$D(\varepsilon) = \exp \left\{ -\frac{\zeta}{F} [\phi^{3/2} v(y) - 3/2 \phi^{1/2} \varepsilon t(y)] \right\} = b \exp(d\varepsilon), \quad (1)$$

а также приближение нулевой температуры. $\zeta = 8\pi(2m_0)^{1/2}/3eh$, $y = (eF/4\pi\varepsilon_0)^{1/2}/\phi$, F - напряженность электрического поля, ϕ работа выхода, ε_0 диэлектрическая проницаемость вакуума, а $b = \exp(-\zeta\phi^{3/2}v(y)/F)$ и $d = 3\zeta\phi^{1/2}t(y)/2F$ - обозначения, введенные для краткости. Функции $v(y)$ и $t(y)$ описывают отклонения потенциального барьера, который преодолевает электрон, от треугольной формы. В результате плотность тока выражена в форме суммы по всем ветвям в энергетическом спектре, определяющим каналы эмиссии:

$$j_q^{out} = \sum_q j_q, \quad (2)$$

$$j_q = j_0 \exp \left(-\frac{3}{2} \frac{\zeta \phi^{1/2} t(y) \varepsilon_g^q}{F} \right) = j_0 \exp \left(-d \frac{\varepsilon_g^q}{2} \right), \quad (3)$$

$$j_0 = \frac{4}{3} \frac{e}{hl_x l_y} \frac{F}{\zeta \phi^{1/2} t(y)} \exp \left(-\frac{\zeta}{F} \phi^{3/2} v(y) \right) = \frac{2eb}{hl_x l_y d}. \quad (4)$$

Каждый следующий член этой суммы экспоненциально подавляется значением запрещенной зоны для данной ветки, поэтому в случае тонких нанотрубок актуально рассмотрение лишь первых слагаемых. Различный характер зависимости первого слагаемого от диаметра у полупроводниковых и металлических трубок приводит к принципиальной разнице в поведении плотности тока при уменьшении диаметра трубки. Тот же метод обобщен на случай эмиссии со стопки невзаимодействующих слоев графита. Далее

рассмотрен случай взаимодействующих слоев. Принято, что плоскости графита расположены непосредственно один напротив другого, то есть графит имеет простую гексагональную упаковку, (упаковку типа ААА).

Анализ формы поверхности Ферми показывает, что каналы эмиссии - траектории вылетающих электронов в p -пространстве, можно разделить на пять различных типов в зависимости от того, пересекают они поверхность Ферми или нет, и в какой области это происходит. Пересечение может происходить либо в области дырочного, либо в области электронного карманов. Найден вклад каналов каждого типа в плотность эмиссионного тока. Результирующая плотность тока определена путем суммирования вкладов каналов всех типов и имеет следующий вид:

$$j_{tot}^{\parallel} = \frac{2eb[8d\alpha_1/\pi + I_0(2d\alpha_1) - L_0(2d\alpha_1)]}{h^2 d^2 c v_F} \quad (5)$$

Здесь α_1 характеризует энергию взаимодействия графитовых слоев, v_F - скорость Ферми электронов в одном слое графита, $L_0(x)$ - модифицированная функция Струве, и $I_0(x)$ - модифицированная функция Бесселя. Далее производится аналогичное вычисление для случая, когда электрическое поле направлено перпендикулярно слоям. Теперь поверхность Ферми повернута на девяносто градусов относительно направления эмиссии. Число различных типов каналов для данной конфигурации равно двум. Как и раньше, производится вычисление вклада каждого канала и суммирование всех вкладов. Результат - закон эмиссии для данного случая, выглядит следующим образом:

$$j_{tot}^{\perp} = \frac{4\pi eb}{(dh)^3 v_F^2} [(2\alpha_1 d)^2 + 1 - \exp(-2\alpha_1 d)] \quad (6)$$

Приведен анализ полученных законов эмиссии. В обоих случаях отличия от закона Фаулера-Нордгейма заключаются только в предэкспоненциальном факторе, в то время как экспонента полностью соответствует известной формуле. Показано, что зависимость предэкспоненты от напряженности электрического поля в обоих случаях практически одинакова. Критическое увеличение поля приводит к тому, что плотность тока эмиссии

при направлении вектора напряженности поля параллельно слоям стремится к плотности тока невзаимодействующих слоев, то есть сильное электрическое поле подавляет эффект взаимодействия между слоями. Обнаружено, что когда вылетающие при эмиссии электроны движутся вдоль слоев графита, плотность тока заметно выше, чем когда вылетающие электроны пересекают слои. В работе рассмотрена зависимость плотности тока от степени сжатия. В деформированном графите величина энергии взаимодействия между слоями меняется. Данный параметр входит в законы эмиссии, поэтому можно достаточно просто найти связь плотности тока с относительной деформацией для обоих рассмотренных случаев. Показано, что плотность тока для случая эмиссии поперек слоев гораздо более чувствительна к сжатию кристалла графита.

Во второй главе на основе описанного в первой главе метода производится учет влияния зонной структуры листов, состоящих из нескольких графитовых слоев, на автоэлектронную эмиссию. Зонная структура нанолитов вычисляется при помощи энергетического спектра графита структуры Бернала в модели Слонжевского-Вейса-МакКлюэ (СВМ), в котором учтено размерное квантование в направлении поперек слоев. В качестве первого приближения учтены лишь два наибольших параметра СВМ - γ_0 и γ_1 . Найденное при этом распределение эмитированных электронов по энергиям имеет следующий вид:

$$P(\epsilon) = \frac{2g}{v_F} f(\epsilon) D(\epsilon) \sum_{n=1}^{n=N} \theta(\epsilon_n) \sqrt{|\epsilon| \epsilon_n}, \quad (7)$$

где $\epsilon_n = |\epsilon| + \gamma_1^n$, $g = 4e/(h^2 N c)$, N - число слоев в листе, $f(\epsilon)$ - функция распределения Ферми-Дирака, $\theta(\epsilon)$ - функция Хэвисайда,

$$\gamma_1^n = \gamma_1 \times 2 \cos\left(\frac{\pi n}{N+1}\right), \quad n = 1 \dots N. \quad (8)$$

Результат расчета по приведенным формулам для двуслоя представлен на рисунке 1. В общем случае полученные кривые представляют собой два больших пика, обусловленные зоной проводимости и валентной зоной, а также суб-пики, связанные с наличием в спектре углеродных листов вет-

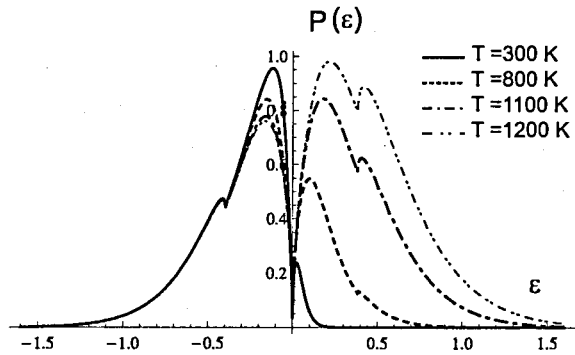


Рис. 1: Распределение электронов по энергиям с графенового двуслоя при различных температурах. $F = 4 \text{ V/nm}$.

вей, отстоящих от уровня Ферми. Далее был произведен расчет распределения для случая, когда все параметры включены. В результате обнаружено небольшое смещение локального минимума вблизи уровня Ферми для структур с числом слоев больше двух. Показано, что получившиеся результаты могут быть поняты и воспроизведены с помощью несложных геометрических соображений, хорошо иллюстрирующих суть метода независимых каналов. Исследованы температурные эффекты. В результате обнаружено, что при высокой температуре правая часть распределения (эмиссия из зоны проводимости) имеет суб-пиковую структуру, симметричную левой части, а также то, что кривые эмиссии в координатах Фаулера-Нордгейма практически идентичны для листов с разным количеством слоев. Эти кривые нелинейны в области слабых полей, причем нелинейность усиливается с ростом температуры.

В третьей главе исследуется влияние геометрической формы на эмиссию в случае осесимметричного выступа - полуэллипсоида (иголки) и протяженного выступа с полуэллиптическим профилем (бортика). Рассчитано влияние электрического поля на изменения площади поверхности, с которой происходит эмиссия электронов и на наклон кривых в координатах Фаулера-Нордгейма. Распределение электростатического потенциала и сила зеркального отражения для иголки известны, в то время как для

бортика приведены необходимые вычисления. Распределение потенциала для бортика найдено путем решения уравнения Лапласа с помощью известного метода преобразований в комплексной плоскости. Сила зеркального изображения для бортика найдена как сила взаимодействия заряда и металлического цилиндра, радиус которого равен радиусу кривизны у вершины бортика. Для определения силы взаимодействия между зарядом и цилиндром решается уравнение Пуассона в цилиндрических координатах с необходимыми граничными условиями. Так как в результате получается довольно сложная функция, производится численная аппроксимация с помощью простой модельной формулы.

Для того чтобы характеризовать изменение величины области с которой происходит эмиссия при изменении напряженности поля введен новый параметр - эффективная площадь эмиссии. Приводится расчет данного параметра для трех различных радиусов кривизны (0.5 nm, 1 nm и 3 nm) в зависимости от напряженности поля. Анализ наклона кривых эмиссии в координатах Фаулера-Нордгейма показывает, что как в случае иголки, так и в случае бортика этот наклон мало зависит от радиуса кривизны. Последнее обстоятельство позволяет написать общие соотношения, связывающие наклон в координатах Фаулера-Нордгейма, напряженность, работу выхода, геометрический фактор усиления на вершине и радиус кривизны эмиттера:

$$s^{wl} \approx s_{FN}(1 + 4x/5) = s_{FN} \left(1 + \frac{4}{5} \frac{\phi}{\rho\beta F} \right), \quad (9)$$

$$s^{as} \approx s_{FN} \exp(kx) = s_{FN} \exp \left(k \frac{\phi}{\rho\beta F} \right), \quad (10)$$

где $k \approx 1.69$, $x = \phi/(\rho\beta F)$, $s_{FN} = -\zeta\phi^{3/2}/\beta$, ρ - радиус кривизны вершины, β - коэффициент усиления поля на вершине.

В заключении кратко сформулированы полученные в диссертации результаты.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Разработан метод учета зонной структуры при автоэлектронной эмиссии. На его основе найдена связь между зонной структурой и законом эмиссии одностеночных углеродных нанотрубок, а также описана зависимость между плотностью тока и диаметром нанотрубок.
2. Получены законы эмиссии для кристалла гексагонального графита при различных направлениях электрического поля: вдоль и поперек слоев графита. Исследовано влияние деформации кристалла на эмиссионный ток.
3. Изучено влияние зонной структуры на эмиссию с углеродных листов, состоящих из нескольких графитовых слоев. Предсказано наличие пиков и суб-пиков в распределении электронов по энергиям. Их положение и количество определяется числом слоев в углеродном листе, что является проявлением квантово-размерного эффекта.
4. Исследовано влияние геометрии эмиттера с нанометровым радиусом кривизны на эмиссию с протяженных вертикальных и вытянутых горизонтальных структур, имеющих эллиптический профиль. В каждом случае описана связь наклона кривых эмиссии в координатах Фаулера-Нордгейма с геометрическими параметрами, и определена зависимость площади эмиссии от напряженности внешнего поля.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. *Influence of tip geometry on the field emission law from axisymmetric and wall-like emitters,*
V.L. Katkov and V.A. Osipov, Europhysics Letters, **89**, 17002 (4pp) (2010)
2. *Energy distributions of field emitted electrons from carbon nanosheets: manifestation of the quantum size effect,*
В.Л. Катков и В.А. Осипов, Письма в ЖЭТФ, **90**, 304-308 (2009)
3. *Effect of band structure on field emission of crystalline graphite,*
V.L. Katkov and V.A. Osipov, Journal of Physics: Condensed Matter, **20**, 035204 (6pp) (2008)
4. *Влияние электронного спектра на автоэлектронную эмиссию с графитового двуслоя типа AA,*
В.Л. Катков и В.А. Осипов, труды XIII научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 197-200 (2009)
5. *Автоэлектронная эмиссия с протяженных структур,*
В.Л. Катков и В.А. Осипов, труды VI научной конференции молодых ученых "Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика", Саратов, 33-34 (2009)
6. *The specific of field emission for single walled carbon nanotubes and graphite,*
В.Л. Катков и В.А. Осипов, труды XII научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 122-125 (2008)

Список литературы

- [1] L.A. Chernozatonskii, Y.V. Gulyaev, Z.Y. Kosakovskaya, N.I. Sinitsyn, G.V. Torgashov, Yu.F. Zakharchenko, E.A. Fedorov and V.P. Val'chuk, Chem. Phys. Lett. **233**, 63 (1995)
- [2] W.A. de Heer, A. Chatelain and D. Ugarte, Science **270**, 1179 (1995).
- [3] A.G. Rinzler, J.H. Hafner, P. Nikolaev, L. Lou, S.G. Kim, D. Tomanek, P. Nordlander, D.T. Colbert and R.E. Smalley, Science **269**, 1550 (1995)
- [4] Q.H. Wang, A.A. Setlur, J.M. Lauerhaas, J.Y. Dai, E.W. Seelig and R.-P. H. Chang, Appl. Phys. Lett. **72**, 2912 (1998)
- [5] Y. Saito and S. Uemura, Carbon **38**, 169 (2000)
- [6] B.N. Jonge and J. Bonard, Phil. Trans. R. Soc. A **362**, 2239 (2004)
- [7] J.J. Li, C.Z. Gu, Q. Wang, P. Xu, Z.L. Wang, Z.Xu and X.D. Bai, Appl. Phys. Lett. **87**, 143107 (2005)
- [8] G. Zhang, X. Jiang and E. Wang, Appl. Phys. Lett. **84**, 2646 (2004)
- [9] J.-M. Bonard, K.A. Dean, B.F. Coll and C. Klinke, Phys. Rev. Lett. **89**, 197602 (2002)
- [10] А.Н. Образцов, А.П. Волков и И.Ю. Павловский, Письма в ЖЭТФ **68**, 56 (1998)
- [11] M. Bagge-Hansen, R.A. Outlaw, P. Miraldo, M.Y. Zhu, K. Hou, N.D. Theodore, X. Zhao and D.M. Manos, J. Appl. Phys. **103**, 014311 (2008)
- [12] K. Hou, R.A. Outlaw, S. Wang, M. Zhu, R.A. Quinlan, D.M. Manos, M.E. Kordesch, U. Arp and B.C. Holloway, Appl. Phys. Lett. **92**, 133112 (2008)
- [13] Goki Eda, H.E. Unalan, N. Rupesinghe, Gehan A.J. Amaratunga and M. Chhowalla, Appl. Phys. Lett. **93**, 233502 (2008)
- [14] A. Malesevic, R. Kemps, A. Vanhulsel, M.P. Chowdhury, A. Volodin and C.V. Haesen-donck, J. Appl. Phys. **104**, 084301 (2008)
- [15] Л.А. Чернозатонский, Е.Ф. Шека и А.А. Артюх, Письма в ЖЭТФ **89**, 412 (2009)
- [16] J. Luo, L.-M. Peng, Z.Q. Xue and J.L. Wu, Phys. Rev. B **66**, 155407 (2002)
- [17] S. Han and J. Ihm, Phys. Rev. B **66**, 241402(R) (2002)
- [18] Jun He, P.H. Cutler and N.M Miskovsky, Appl. Phys. Lett., **59** 1644 (1991)
- [19] G.N. Fursey and D.V. Glazanov, J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 910 (1998)
- [20] T.A. Sedrakyan, E.G. Mishchenko and M.E. Raikh, Phys. Rev. B **73**, 245325 (2006)
- [21] C.J. Edgcombe, Philos. Mag B **82**, 1009 (2001)
- [22] Shi-Dong Liang and N.S. Xu, App. Phys. Lett. **83**, 1213(2003)
- [23] Shi-Dong Liang, N.Y. Huang, S.Z. Deng, and N.S. Xu, Appl. Phys. Lett. **85**, 813 (2004)
- [24] Shi-Dong Liang, N.Y. Huang, Lu Chen, S.Z. Deng, and N.S. Xu, Phys. Rev. B **73**, 245301 (2006)
- [25] Shi-Dong Liang, Shao Zhi Deng, and Ning Sheng Xu Phys. Rev. B **74**, 155413 (2006)
- [26] H. Tang, Shi-Dong Liang, S.Z. Deng and N.S. Xu, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, 5280 (2006)

Получено 30 марта 2010 г.