

На правах рукописи

ДУБОВ Виктор Викторович

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ
С ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

01.04.02. - теоретическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2002

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Взаимодействие электронов малых и промежуточных (от единиц электронвольт до единиц килоэлектронвольт) энергий с приповерхностной областью твердого тела является предметом интенсивного изучения. Возрастающая значимость исследований в этой области науки определяется их важностью как для решений фундаментальных задач физики, так и для практических приложений. Роль работ по взаимодействию электронов с кристаллами в становлении и развитии квантовой механики трудно переоценить, равно как и практическое значение исследований рассеяния частиц приповерхностной областью твердого тела, например, в методах диагностики поверхностей твердых тел.

Физические процессы вблизи поверхности играют важную роль в многочисленных задачах физики, полупроводниковых технологиях, в том числе наноэлектронике, оптоэлектронике и других высокотехнологичных разделах физики и химии. На исследованиях таких взаимодействий базируются современные методы контроля поверхности, как в стационарных условиях, так и в разного рода технологических процессах. Пучки электронов являются одним из самых эффективных инструментов детального изучения на атомарном уровне поверхности и приповерхностной области твердого тела.

Теоретические исследования рассеяния электронов промежуточных энергий кристаллами, имеющиеся в литературе, оказываются недостаточными для описания эффектов взаимодействия, проявляющихся в различного рода особенностях пространственного распределения эмитируемых электронов и энергетических спектров разных групп электронов и излучения, выходящих из твердых тел при облучении последних первичными электронами промежуточных энергий. Одна из причин такой ситуации следующая. В области высоких энергий внешних электронов для описания взаимодействия широко используется теория возмущений. В области самых малых энергий определяющим является взаимодействие частиц с поверхностным барьером. Основную сложность теоретического описания в области промежуточных энергий взаимодействующих частиц представляет необходимость использовать точное решение уравнений квантовой механики при описании, как когерентного рассеяния частиц, так и отдельных актов некогерентного рассеяния (упругого некогерентного рассеяния, потери энергии в процессе ионизации, возбуждения коллективных колебаний и так далее).

В настоящей работе впервые результаты теоретических исследований автора сравниваются с экспериментальными данными, полученными самыми современными методами регистрации спектров эмитируемых электронов с разрешением по углу и спину.

Цель работы заключается в построении последовательной квантовой теории взаимодействия электронов малых и промежуточных энергий с приповерхностной областью твердого тела. В работе также решается ряд конкретных задач, возникающих при изучении процессов рассеяния электронов поверхностями полупроводников.

Для теоретического рассмотрения процессов, имеющих место при взаимодействии электронов промежуточных энергий с приповерхностной областью твердых тел, в работе развита и используется удобная диаграммная техника. Она применима для произвольных типов межчастичных и коллективных взаимодействий и произвольных распределений силовых рассеивающих центров при рассматриваемых рассеяниях. Эта диаграммная техника учитывает симметрию решаемых, в том числе и в представленной работе, задач, когда исследуются взаимодействия внешних частиц с полубесконечными кристаллами, слоистыми структурами, пленками и подобными объектами. Представленная диаграммная техника позволяет проводить аналитическое рассмотрение процессов рассеяния в области промежуточных энергий электронов, когда применение методов теории возмущений ограничено.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- проведено полное теоретическое описание квазиупругого рассеяния внешних электронов на протяженном приповерхностном потенциале твердого тела при различных температурах образцов;
- развит комплексный подход, позволивший использовать электронную спектроскопию высокого энергетического разрешения для детального исследования свойств и электронного строения приповерхностной области твердого тела;
- сформулирован точный метод расчета неупругого отражения электронов промежуточных энергий приповерхностной областью твердых тел, поверхностью, слоистыми и иными двумерными структурами, как упорядоченными, так и неупорядоченными, когда существенным является некогерентное рассеяние на большие углы;
- получено описание и сформулирована четкая методика анализа квазиупругих энергетических спектров рассеяния электронов исследуемого диапазона энергий легированными полупроводниками во всем диапазоне температур;

- создана аналитическая модель формирования приповерхностного потенциала в случае полупроводников и иных материалов, на поверхности которых находятся электроны на дискретных уровнях, либо поверхностных электронных зонах;
- дан анализ совокупности дифракционного и резонансного рассеяния электронов поверхностью твердого тела вблизи порогов возникновения поверхностных дифракционных пучков, показывающий парциальный вклад резонансных процессов и позволяющий идентифицировать поверхностные резонансы среди остальных особенностей спектров отражения электронов;
- проведено изучение асимметрии резонансного рассеяния поляризованных электронов за счет учета спин-орбитального (для немагнитных материалов) и обменного (для магнитных взаимодействий) взаимодействий, позволившее использовать поляризованные электроны как более точный инструмент идентификации и исследования резонансных особенностей энергетических спектров;
- проведены расчеты потенциалов вблизи поверхностей полупроводников с учетом естественных неоднородностей и исследовано влияние этих неоднородностей на рассеяние электронов малых и промежуточных энергий;
- детально рассмотрено влияние неоднородностей поверхностного потенциала на резонансное рассеяние неполяризованных и поляризованных электронов, упругое отражение и вторичную эмиссию (в том числе Оже-эмиссию) и формирование спектров потенциалов возбуждения мягкого рентгеновского излучения;
- представлен квантовый эффект, проявляющийся, в частности, в новом типе слабой пространственной локализации рассеивающихся в приповерхностной области неупорядоченного твердого тела электронов;
- детально проанализированы проявления нового квантового эффекта при Оже-эмиссии электронов, в особенностях угловых распределений, в том числе – азимутальных, неупруго отраженных от твердого тела частиц.

Вклад автора диссертации в выполненную работу заключается в том, что мной были сформулированы все основные цели и задачи работы, выбраны методы теоретического исследования, непосредственно выполнены аналитические расчеты и их анализ. В опубликованных в

соавторстве работах участие автора было определяющим в той части полученных результатов, которые нашли отражение в диссертации.

Достоверность полученных результатов гарантируется правильным применением проверенных строгих методов квантовой электродинамики и квантовой механики, а также соответствием теоретических выводов диссертационной работы и полученных результатов и расчетов наблюдаемым экспериментальным данным.

Научная и практическая значимость работы. Исследования, изложенные в диссертационной работе, существенно развивают квантовую теорию рассеяния электронов на поверхностях и приповерхностных областях твердых тел. Результаты могут быть использованы как при создании новых приборов в нанoeлектронике и оптоэлектронике, так и при развитии новых технологий в этих и смежных с ними динамично развивающихся областях науки. С помощью предложенного диаграммного метода функций Грина электрона вне рамок теории возмущений проведено теоретическое описание квазиупругого рассеяния падающих на поверхность твердого тела электронов, развит подход, позволивший использовать электронную спектроскопию высокого энергетического разрешения для детального исследования свойств и электронного строения приповерхностной области твердых тел; сформулирован метод расчета рассеяния электронов назад вне рамок теории возмущений. Полученные результаты позволяют учитывать многократные потери энергии электронов при квазиупругом и неупругом рассеянии, учитывать неоднородность приповерхностного потенциала и, в частности, его влияние на резонансное рассеяние электронов. Предложенный и развитый в диссертации метод может быть применен при теоретических исследованиях других процессов рассеяния. Существенное внимание в работе уделено возможности использования развиваемых теоретических подходов для расчетов конкретных процессов рассеяния электронов твердыми телами с определенными значениями параметров. В диссертационной работе описан новый тип слабой пространственной локализации рассеивающихся в приповерхностной области электронов и детально проанализированы проявления нового квантового эффекта в различных характеристиках рассеянных электронов. В настоящее время полученные результаты используются в учебном процессе на физико-механическом и радиофизическом факультетах СПб ГПУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод диаграммной техники, учитывающий симметрию задач, когда исследуются взаимодействия внешних частиц с полубесконечными

кристаллами, слоистыми структурами, пленками и подобными объектами. Эта диаграммная техника применима для произвольных типов межчастичных и коллективных взаимодействий и произвольных распределений силовых рассеивающих центров при рассматриваемых рассеяниях и удобна, когда движущийся в среде электрон испытывает одновременно акты, как упругого когерентного рассеяния, так и некогерентного рассеяния.

2. Теория квазиупругого рассеяния электронов малых и промежуточных энергий на протяженном потенциале кристалла в широком диапазоне температур. Получены точные аналитические формулы, открывающие новые возможности электронной спектроскопии высокого энергетического разрешения для определения параметров полупроводниковых твердых тел.
3. Модель формирования приповерхностного потенциала вблизи твердых тел, имеющих электроны на дискретных поверхностных уровнях и поверхностные электронные зоны, позволяющая полностью описывать насыщение потенциала у поверхности полупроводниковых кристаллов.
4. Анализ поверхностного резонансного рассеяния электронов, в том числе поляризованных, позволяющий детально изучать пространственную зависимость внутрикристаллического приповерхностного потенциала, а также выделять поверхностные резонансные структуры на энергетических зависимостях интенсивностей упруго отраженных электронов даже при сравнительно низком энергетическом разрешении анализаторов или в случае частичного перекрытия пиков резонансов, имеющих различную природу.
5. Детальный анализ влияния естественных неоднородностей приповерхностного потенциала на рассеяние частиц. Вывод о необходимости учета неустранимых неоднородностей при исследовании угловых зависимостей и энергетических спектров частиц и излучений, регистрируемых при облучении твердых тел электронами низких и промежуточных энергий. Вывод о применимости развиваемых теоретических представлений и методов в случае веществ с естественными неоднородностями приповерхностного потенциала.
6. Теория квантового транспорта и нового типа слабой локализации электронов, рассеивающихся неупруго в приповерхностной области неупорядоченных твердых тел.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

XIII, XIV, XVI, XIX Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1983, 1984, 1986, 1989); XX Совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1990); XXIX, XXX, XXXI, XXXII Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1999, 2000, 2001, 2002); Всесоюзной конференции «Поверхность-89» (Москва, 1989); VII Международном симпозиуме по вторичной электронной, фотоэлектронной эмиссиям и спектроскопии поверхности твердого тела (Ташкент, 1990); XIX и XXI Всесоюзных конференциях по эмиссионной электронике (Ташкент, 1984 и Ленинград, 1991); VII Симпозиуме по вторичной электронной, фотоэлектронной эмиссиям и спектроскопии поверхности твердого тела (Ташкент, 1990); VI Всесоюзном симпозиуме по фотоэлектронной эмиссии и вторичным электрон-электронной и ионно-электронной эмиссиям (Рязань, 1986); Конференции по вторичной эмиссии и спектроскопии твердого тела (Ташкент, 1996); Симпозиуме: Эмиссия с поверхности полупроводников (Львов, 1989); V и VI Всесоюзных симпозиумах по фотоэлектронной эмиссии и вторичным электрон-электронной и ионно-электронной эмиссиям (Рязань, 1983 и 1986); II Конференции по физической электронике (Ташкент, 1999); V и VI Всероссийских научно-технических конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» (СПб, 2001 и 2002); Международных конференциях NDTCS-98, NDTCS-99, NDTCS-2000, NDTCS-2001 (СПб 1998, 1999, 2000, 2001); научных семинарах Физико-технического института им А.Ф. Иоффе; научных семинарах СПбГУ; научных семинарах кафедры физической электроники СПбГПУ; научных семинарах кафедры теоретической физики СПбГПУ.

Публикации. Теме диссертационной работы посвящена 51 печатная работа. Основное содержание диссертации опубликовано в 39 работах [1 – 39].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 244 страницах машинописного текста, включает 22 рисунка и 191 библиографическую ссылку на литературу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы тема и актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи работы, показаны ее новизна, практическая значимость, обоснованность выводов, а также

изложены краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы проведено теоретическое описание квазиупругого рассеяния электронов на протяженном приповерхностном потенциале твердого тела при различных температурах образцов. Этот потенциал распространяется во внешнюю от твердого тела область на большие (до сотен ангстрем) расстояния от его поверхности. Рассеяние медленных электронов на протяженном потенциале кристалла сопровождается малыми (на величину от 1 до 100 мэВ) изменениями энергии частиц и называется квазиупругим рассеянием. Квазиупругое рассеяние частиц лежит в основе электронной спектроскопии высокого разрешения. Последняя интенсивно развивается как один из самых чувствительных методов исследования поверхности твердых тел, процессов адсорбции, структуры поверхности, фононных спектров и так далее. Развитый автором и изложенный в первой главе подход позволил использовать электронную спектроскопию высокого энергетического разрешения для детального исследования микроскопических свойств и электронного строения приповерхностной области полупроводников.

В случае полупроводников малые потери энергии обусловлены существованием низкоэнергетичных (от 0,1 мэВ) плазменных колебаний в веществе. Существенную роль в этих процессах играют электроны поверхностных зон и заряды в приповерхностной области полупроводниковых твердых тел.

При подлете частиц к среде электроны в течение довольно длительного времени пролета области протяженного потенциала взаимодействуют со слабым электромагнитным полем, формируемым флуктуациями плотности электрического заряда в приповерхностной области кристалла. Изменения энергии внешних частиц при рассеянии на протяженном потенциале в одном элементарном акте рассеяния составляют величину от 0.1 мэВ до значений порядка нескольких эВ. Отражение таких частиц, обычно обуславливаемое рассеянием на большой (большой $\pi/2$) угол, происходящим без потери электроном энергии, как показано, следует связывать с рассеянием на атомных остовах, которые описываются потенциалом U_{bs} . Это определяется тем, что упругое рассеяние электронов рассматриваемых энергий на большие углы за счет одного только дифракционного рассеяния весьма маловероятно. В то же время, пространственное распределение дифрагирующих электронов обуславливает вероятность некогерентного рассеяния на большой угол.

Развиваемый в работе метод позволил учесть рассеяние на U_{bs} точно (элементарный акт рассеяния на протяженном флуктуационном потенциале можно рассматривать в борновском приближении). Влияние неупругих каналов рассеяния, не связанных с рассеянием на протяженном потенциале, при этом учитывается в приближении оптического потенциала.

Для расчета вероятности рассеяния в процессе, сопровождающемся малой однократной потерей энергии на протяженном потенциале, была сформулирована и использовалась удобная диаграммная техника. Эта техника является развитием известных методов и диаграммных подходов Бома и Пайнса и использует их элементы, полезные при рассмотрении рассеяния частиц приповерхностными областями твердых тел и двумерными структурами. Сформулированы правила суммирования диаграмм, удобные, в частности, в случае полубесконечного кристалла и протяженного флуктуационного потенциала. Эти правила учитывают симметрию процессов рассеяния, которая в нашем случае может существенно отличаться от ситуации, имеющей место, например, в атомной физике или физике элементарных частиц. Рассмотрение включает в себя как случаи двухчастичных, так и коллективных взаимодействий частиц. В случае квазиупругого рассеяния предложенный метод позволил суммировать главные последовательности диаграмм при вычислении функций Грина рассматриваемых процессов. При наличии некогерентных процессов рассеяния уравнение для функции Грина электрона имеет вид:

$$G(\vec{p}, \vec{p}') = G_0(\vec{p})\delta(\vec{p} - \vec{p}') + \int \frac{d^3 p''}{(2\pi)^3} G_0(\vec{p}) u(\vec{p} - \vec{p}'') S(\vec{p} - \vec{p}') G_u(\vec{p}'', \vec{p}') \quad (1)$$

и помимо функции Грина нулевого приближения $G_0(\vec{p})$, фурье-образа $u(\vec{p} - \vec{p}'')$ потенциала отдельного атома и суммы по атомным координатам $S(\vec{p} - \vec{p}') = \sum_l \exp[-i(\vec{p} - \vec{p}')\vec{R}_l]$, содержит G_u - функцию Грина электрона, точно описывающую взаимодействие с одним единственным атомом, находящимся в начале координат. Эта функция удовлетворяет обычному уравнению Дайсона.

Предложенный диаграммный подход используется не только при описании квазиупругого рассеяния частиц, но и при рассмотрении других процессов, имеющих место при облучении твердого тела внешними электронами промежуточных энергий и детально исследуемых в других главах представленной работы.

Теоретическое рассмотрение квазиупругого рассеяния, проведенное в первой главе, охватывает весь диапазон малых потерь энергии (по отношению к однократной потере) и полный диапазон температур кристаллических образцов. В этом случае необходимо учитывать кратные потери энергии, которые будут существенны вследствие того, что достаточно велики тепловые множители, задающиеся распределениями Бозе-Эйнштейна. В случае подробно рассматриваемых во второй части первой главы легированных полупроводниковых твердых тел эти распределения следует записывать для флуктуационных плазменных колебаний в кристалле.

Получены формулы для вероятностей многократных потерь при квазиупругом рассеянии электронов промежуточных энергий, которые описывают энергетический спектр частиц, отраженных от твердых тел с малыми изменениями энергии. В аналитическом виде получено выражение для полуширины энергетического спектра. В большом диапазоне температур вероятность изменения энергии электрона на величину $\hbar\omega$ в единицу времени имеет вид:

$$W(\omega) = e^{-z} I_{\omega/\omega_{sp}}(z), \quad (2)$$

где $z \cong \frac{AT}{\hbar\omega_{sp}}$, (A – константа), а $I_{\omega/\omega_{sp}}(z)$ – модифицированная функция

Бесселя первого рода вещественного порядка ω/ω_{sp} , ω_{sp} – поверхностная плазменная частота для конкретных групп электронов твердого тела.

Далее в первой главе подробно рассмотрено неупругое рассеяние медленных электронов поверхностью легированного кремния в широком диапазоне температур. Проведенный анализ показывает, что при низких (до значений 300K) температурах квазиупругий пик отраженных от кремния электронов формируется в результате рассеяния внешних электронов на электронах поверхностных зон. Величина однократной потери при таком рассеянии мала, она составляет обычно величину менее 2 мэВ при достаточно высокой температуре. Из-за высокой кратности результат уширения будет симметричным и не зависящим от дисперсии поверхностной моды. При этом контур потерь будет гауссовским. Если учесть затухание или малую дисперсию колебаний, форма контура станет близкой к лоренцевскому.

При температуре более 300 K были учтены потери за счет процессов в приповерхностной области, что привело к подтвержденному экспериментальными наблюдениями асимметричному уширению квазиупругого пика. Получена точная аналитическая формула,

описывающая энергетический спектр квазиупруго отраженных электронов. Показано, что при очень высоких температурах ($T \propto 1500 \text{ K}$) необходимо учитывать дисперсию приповерхностных высокоэнергетических колебаний при определении вероятностей и, тем самым, форм пиков квазиупругого рассеяния.

Результаты теоретического рассмотрения, изложенные в первой главе нашли хорошее подтверждение в экспериментах по изучению уширения квазиупругого пика при облучении твердого тела лазером.

Проведенное рассмотрение открывает широкие возможности в использовании предложенного метода и полученных результатов не только для исследования процессов рассеяния кристаллами электронов рассматриваемого диапазона энергий, включающих в себя двухчастичные элементарные акты рассеяния и коллективные взаимодействия, но и для определения параметров твердых тел (особенно полупроводниковых).

Развитая диаграммная техника оказывается также полезной при описании взаимодействия частиц с твердыми телами в случаях, когда частица, движущаяся в среде, может испытывать одновременно рассеяния различных типов. Такая ситуация имеет, в частности, место, когда движущийся в среде электрон испытывает одновременно акты, как упругого когерентного рассеяния, так и некогерентного рассеяния, и детально исследуется в четвертой главе.

Во **второй главе** представленной работы рассмотрено рассеяние электронов малых и промежуточных энергий вблизи поверхности твердого тела (на расстояниях порядка единиц кристаллических межплоскостных расстояний, то есть существенно меньших рассматриваемых в первой главе работы), а также непосредственно поверхностное резонансное рассеяние. Исследованы особенности формирования приповерхностного потенциала твердого тела.

В первой части второй главы рассмотрено формирование приповерхностного потенциала, на котором рассеиваются внешние нерелятивистские электроны, для твердых тел, имеющих электроны на дискретных поверхностных уровнях или поверхностные электронные зоны. К таким веществам, в частности, относятся полупроводниковые кристаллы.

Простейший потенциал взаимодействия между твердым телом и электроном, находящимся вблизи его поверхности, получаемый с помощью метода изображений, имеет обычный кулоновский вид. Даже он, являясь довольно грубым приближением, позволяет получать основные качественные и некоторые количественные результаты. Безусловным

недостатком такого модельного потенциала является его несоответствующее реальному профилю поведение в области непосредственно на границе твердого тела, в частности отсутствие плавного перехода к среднему внутрикристаллическому потенциалу. На формировании потенциала непосредственно вблизи поверхности в первую очередь сказываются дисперсия поляризуемости среды, квантовый обмен и корреляционные эффекты.

Если учесть обменные и корреляционные эффекты, связанные с насыщением сил изображения у поверхности, барьер меняет форму – в нем, в частности, появляются квадратичные члены, и отсутствует расходимость потенциала на границе твердого тела. Однако, детальные расчеты и точные оценки насыщения сил изображения вблизи поверхности кристаллов сложны. Поэтому аналитическая зависимость потенциала вблизи поверхности не определяется однозначно.

Большинство используемых моделей приповерхностного потенциала описываются расчетными, либо параметрическими формулами. Все эти модели базируются на разумных физических предположениях и на сравнениях полученных по ним компьютерных расчетов с результатами наблюдаемых экспериментов. Построение последовательной аналитической модели приповерхностного потенциала даже в случае конкретных групп веществ представляет большие сложности.

В работе автора было показано, что в случае полупроводниковых твердых тел для создания аналитической модели, соответствующей реальной зависимости потенциала сил изображения непосредственно вблизи поверхности, достаточно учитывать поляризуемость собственных электронов полупроводника, находящихся на самой поверхности вещества. Соответствующие расчеты представлены автором в первой части второй главы. С помощью такого потенциала можно корректно описывать процессы движения внешней частицы с малой и промежуточной энергией вблизи поверхности твердого тела, в частности – процесс резонансного рассеяния.

Вклад, вносимый взаимодействием с электронами поверхностных зон, в величину насыщения потенциала твердого тела вблизи поверхности и некоторые другие характеристики потенциала у поверхности кристалла оказывается важным и в некоторых случаях определяющим. Такой вклад должен учитываться как при определении характеристик рассеяния частиц рассматриваемого диапазона энергий, так и при вычислении параметров потенциала твердого тела вблизи его поверхности. Проведенное рассмотрение позволяет использовать регистрируемые экспериментально

характеристики рассеяния электронов на поверхностных барьерах для получения дополнительной информации об электронных структурах поверхностей полупроводников.

Во второй части второй главы рассмотрено резонансное рассеяние электронов, в том числе поляризованных, поверхностью твердого тела. Поверхностное резонансное рассеяние частиц наблюдалось в виде тонкой структуры на энергетических спектрах, зависимостях интенсивности упруго отраженных от кристаллов электронов в экспериментальных исследованиях по мере развития техники при достижении разрешения аппаратуры по энергии порядка 10 - 30 мэВ, а по углу 1° . Часть особенностей этой тонкой структуры коррелирует с энергией возникновения поверхностных дифракционных пучков, проявляясь вблизи энергетических порогов при энергиях чуть меньше пороговых. Эти особенности возникают в результате резонансного взаимодействия электронов с поверхностью твердого тела и обусловлены квазистационарными электронными поверхностными состояниями.

Качественное отличие рассматриваемых резонансов от общеизвестных атомных или ядерных резонансов заключается в том, что в атомном случае рассеяние происходит на трехмерном центральном потенциале. В нашем же случае рассеяние идет на одномерном несимметричном приповерхностном потенциале. Важно также, что при этом энергия первичного электрона определенным образом перераспределяется между двумя составляющими – энергией нормального к поверхности движения и энергией движения вдоль поверхности.

Описываемый эффект впервые заметил МакРей и подробно исследовал его. При рассматриваемом резонансном рассеянии электрон длительное время находится вблизи поверхности твердого тела и электронный пучок распространяется под очень малым углом к поверхности. Это соответствует тому, что в нормальном к поверхности направлении электрон движется в приповерхностном одномерном потенциале, формирование которого исследовалось в предыдущей части второй главы.

Автором было показано, что в случае полупроводниковых материалов поляризуемости собственных электронов полупроводника, находящихся на самой поверхности вещества, связанной с переходами между поверхностными зонами, достаточно для создания приповерхностного потенциала сил изображения непосредственно вблизи поверхности, с помощью которого можно корректно описать процесс рассматриваемого резонансного рассеяния.

Длительное время одной из важнейших проблем интерпретации наблюдаемых пороговых эффектов являлось разделение последних на резонансные и интерференционные. Исследования, представленные во второй главе показали, что наблюдаемая в экспериментах по отражению от приповерхностной области твердых тел медленных электронов тонкая структура на энергетических зависимостях интенсивностей зеркального отражения вблизи порогов возникновения новых дифракционных пучков имеет двойное происхождение. Проведен расчет парциальных вкладов процессов различного типа в полные интенсивности зеркально отраженного пучка медленных электронов (энергии до 50 эВ), рассеиваемых поверхностью твердого тела, на примере образца кристаллического вольфрама.

Резонансные эффекты практически всегда вносят вклад в рассматриваемый процесс формирования интенсивностей зеркально отраженных от кристаллов электронов в области энергий, близких к порогам возникновения новых поверхностных дифракционных пучков. Этот вклад будет тем более существенным, чем более выражены условия резонанса, сформулированные во второй главе работы. Исследования последних лет, проведенные различными авторами, также подтверждают вывод о необходимости учитывать поверхностное резонансное рассеяние медленных частиц при описании многочисленных процессов взаимодействия электронов с твердыми телами.

На основании проведенного анализа можно сформулировать алгоритм исследования резонансного рассеяния электронов поверхностью твердого тела вблизи энергетических порогов возникновения новых дифракционных поверхностных пучков. Во-первых, следует определить существование вблизи рассматриваемых энергий значение энергии порога возникновения дифракционного поверхностного пучка. Затем определить условия резонанса. Чем более четко выполняются эти условия, тем более ярко выражен вклад резонансного поверхностного рассеяния и тем эффективнее использование этого явления для определения значений параметров, а также характеристик твердого тела и характеристик процессов приповерхностного рассеяния частиц.

Проведенное теоретическое рассмотрение позволило использовать предложенный метод, например, для определения параметров внутреннего строения твердого тела, детального изучения пространственной зависимости внутрикристаллического приповерхностного потенциала.

В последнем разделе второй главы рассмотрено резонансное рассеяние поляризованных электронов. Влияние на рассеяние электронов

рассматриваемого в работе диапазона энергий спин-орбитального и, в случае магнитных материалов, обменного взаимодействия при дифракции медленных электронов на поверхности кристалла приводит, к поляризации электронных пучков, формирующих брегговский рефлекс и, в случае поляризованного первичного электронного пучка, к асимметрии рассеяния. Регистрация асимметрии рассеяния позволяет получать в экспериментах с поляризованными электронами большую информацию, чем в случаях без учета спиновой ориентации. То есть поляризованные электроны являются более точным инструментом исследования процессов поверхностного рассеяния. Этим обусловлена актуальность методов исследований взаимодействия поляризованных электронов с поверхностями магнитных твердых тел.

Проведенное во второй главе изучение рассеяния поляризованных электронов малых энергий в приповерхностной области твердых тел на конкретных примерах показало возможность при использовании поляризованных электронов выделять поверхностные резонансные структуры на энергетических зависимостях интенсивностей упруго отраженных электронов даже при сравнительно низком энергетическом разрешении анализаторов или в случае частичного перекрытия пиков резонансов, имеющих различную природу. Помимо этого, изучение рассеяния поляризованных электронов поверхностью твердого тела в дополнение к исследованию рассеяния частиц без учета спина позволяет сделать вывод о более существенном вкладе резонансных эффектов в наблюдаемые особенности на энергетических спектрах рассеянных частиц. Полученные во второй главе результаты на основании рассмотрения как без учета спина, так и поляризованных частиц, позволяют формировать и описывать общую картину процессов резонансного рассеяния частиц в рассматриваемом диапазоне энергий с учетом реально существующих экспериментальных возможностей.

В третьей главе работы исследовано влияние естественных неоднородностей приповерхностного потенциала на рассеяние частиц. Этот потенциал имеет сложную пространственную структуру как в нормальном по отношению к поверхности твердого тела, так и в тангенциальном по отношению к поверхности направлении. Невозможность использования в аналитических рассмотрениях точных пространственных зависимостей потенциальной энергии приводит к необходимости использования различных моделей приповерхностного потенциала. Поэтому, актуальным является вопрос о точности этих аппроксимаций, особенно в тех случаях, когда неоднородности хода

потенциальных зависимостей вблизи поверхностей являются неустранимыми. Необходимость рассмотрения влияния неоднородностей приповерхностного потенциала на изучаемые процессы рассеяния связана также с оценкой достоверности развиваемого в работе и используемого теоретического метода описания этих процессов в области промежуточных энергий электронов.

Причины формирования неоднородностей приповерхностного потенциала могут иметь различную природу. К ним, в частности, относятся: наличие непосредственных дефектов приповерхностных слоев атомов, объемные незранированные заряды атомов примесей в обедненных приповерхностных слоях, адсорбированные поверхностью твердого тела частицы и так далее. С целью более полного изучения влияния возможных неоднородностей на приповерхностные эффекты в третьей главе работы рассмотрено взаимодействие электронов с легированными полупроводниковыми твердыми телами, неоднородности поверхностного потенциала которых могут быть выражено особенно четко.

Наличие различного рода неоднородностей приповерхностного потенциала, о которых шла речь выше, подтвердили проведенные ранее прямые экспериментальные измерения. Вследствие неоднородности поверхности твердых тел возможно возникновение локальных областей с большими величинами проницаемостей. Через такие области может осуществляться аномальный выход электронов из кристаллов. Аналогичное явление наблюдалось при исследовании барьеров Шоттки. Особая ситуация возникает в связи с наличием вблизи поверхности легированного полупроводникового твердого тела области пространственного заряда. Эта область может быть существенно неоднородна в широком интервале параметров. Она формируется дискретными зарядами примеси.

В третьей главе проведены расчеты потенциалов в приповерхностной области полупроводниковых твердых тел с учетом естественных неоднородностей и исследовано влияние этих неоднородностей на рассматриваемые в предложенной работе процессы рассеяния. Подробно исследован случай, когда на поверхности твердого тела имеются электронные поверхностные зоны и примесные уровни. Анализ распределений неоднородностей поверхностного потенциала полупроводниковых кристаллов позволил сделать однозначный вывод о том, что в среднем величина этих неоднородностей может быть порядка изменений потенциала в приповерхностной области твердого тела.

Амплитуда потенциала и величина электрического поля могут значительно (в несколько раз) превосходить свои усредненные значения. Причем размеры областей, где имеются значительные отклонения потенциалов, оказываются достаточными для осуществления в них разного рода аномальных процессов. Проведенное рассмотрение показало, что относительная доля площади поверхности, где существенны отклонения поверхностного потенциала от значений, рассчитанных без учета наличия естественных неоднородностей поверхности, может достигать 30% от общей площади поверхности твердого тела. Особо следует отметить, что приведенные относительные значения площадей с существенными отклонениями потенциала от своих средних значений имеют место в случае обычных, классических значений параметров полупроводниковых кристаллов. В то же время детальный анализ показал, что влияние естественных неоднородностей не приводит к качественным изменениям характеристик рассеяния, но может существенно изменять количественные характеристики. Результаты конкретных расчетов для различных групп электронов приведены на рисунках 1 и 2.

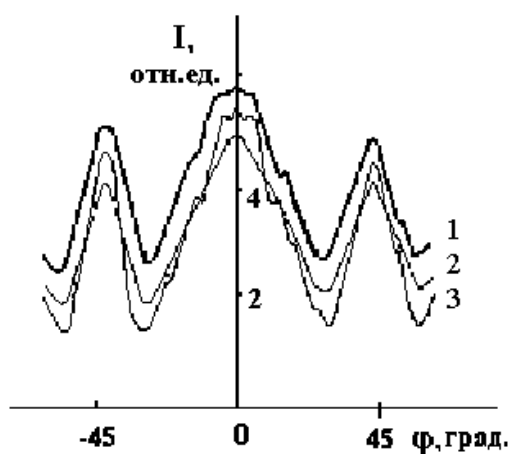


Рис. 1. Угловые зависимости эмиссии Оже-электронов с учетом влияния естественных неоднородностей поверхности: кривая 1 соответствует случаю близкого к нормальному выхода электронов (сдвинута вверх), кривая 2 – касательному выходу. Кривая 3 – стандартный спектр без учета влияния неоднородностей.

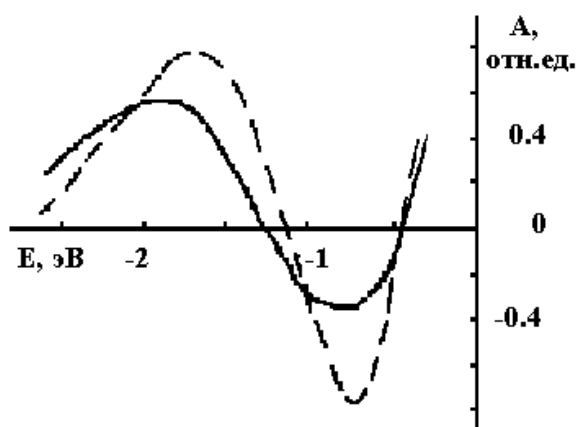


Рис. 2. Энергетическая зависимость асимметрии A поверхностного резонансного рассеяния поляризованных электронов без учета (пунктирная кривая) и при наличии (сплошная кривая) естественных неоднородностей. Энергия отсчитывается от порога возникновения поверхностного дифракционного пучка.

Практическая значимость проведенного в третьей главе теоретического рассмотрения и компьютерных расчетов заключается в возможности использовать наблюдаемые результаты рассеяния электронов на естественных неоднородностях для получения информации как о параметрах рассеяния частиц в приповерхностной области твердых тел, так и о параметрах самой приповерхностной области. Важное значение имеет и вывод о применимости развиваемого в работе теоретического метода в случае наличия естественных неоднородностей приповерхностного потенциала.

Исследовано влияние естественных неоднородностей приповерхностного потенциала на энергетические спектры и угловые зависимости различных конкретных групп частиц при взаимодействии электронов малых и промежуточных энергий с твердыми телами. Детально рассмотрены: резонансное поверхностное рассеяние без учета спина электронов и в случае поляризованных частиц, упругое отражение и вторичная эмиссия, в том числе Оже-эмиссия частиц и формирование спектров потенциалов возбуждения мягкого рентгеновского излучения. Как показали расчеты, во всех случаях рассеяния Оже-электронов влияние естественных неоднородностей сказывается менее существенно на формах спектров, чем в случае регистрации эффектов слабой локализации или, например, поверхностного резонансного рассеяния частиц. Проведенное рассмотрение позволяет использовать модифицированные угловые спектры вторичной эмиссии как инструмент для детального анализа вида и свойств волновой функции первичных электронов вблизи поверхности и в приповерхностной области твердого тела.

В **четвертой** главе работы представлен и рассматривается новый квантовый эффект, который имеет место при рассеянии внешней частицы в приповерхностной области неупорядоченного твердого тела. Этот эффект приводит, в частности, к появлению нового типа слабой пространственной локализации рассеивающихся частиц. Теоретическое рассмотрение основано на учете квантового транспорта электронов, испытывающих одновременно как упругие, так и неупругие столкновения в неупорядоченной рассеивающей среде.

Рассмотрение поправок к столкновительному члену кинетического уравнения Больцмана, которые связаны с явлением квантовой интерференции, проводится давно. Эта же проблема, но в ее классическом волновом аспекте, возникла, когда выяснилось, что при описании переноса излучения на основе волновых уравнений и на основе стандартной теории переноса результаты совпадают не всегда. Наиболее отчетливо это

различие проявилось при описании процесса отражения электромагнитных волн от неоднородных сред в направлении точно назад.

Новый этап в рассмотрении этого вопроса наступил, когда было осознано, что, если движение электронов или фотонов происходит в неупорядоченной среде, то интерференция приводит не просто к количественным поправкам к результатам, получающимся с помощью кинетического уравнения Больцмана (что может, например, проявляться в уменьшении электропроводности), а качественно новым эффектам. Этот этап связан с концепцией андерсоновской локализации. Тот аспект квантового транспорта, который связан с явлением слабой локализации, является универсальным и проявляется как в известных задачах теории проводимости, так и в задачах переноса излучения и вещества.

В последние годы квантовый транспорт и слабая локализация в частности интенсивно изучаются экспериментально и теоретически. Идет поиск новых физических ситуаций и материалов, в которых может проявиться слабая локализация волн. Например, обсуждается возможность слабой локализации в искусственно создаваемых несоизмеримых слоистых системах и в случае поверхностных волн. Ранее рассматривалась слабая локализация гармоник электромагнитного поля, которые возникают в среде, являющейся одновременно неупорядоченной и нелинейной. Изучаются корреляции интенсивности при прохождении волн через неупорядоченную среду и т. п. Отрицательное аномальное магнетосопротивление в физике твердого тела и слабая локализация света в классической электродинамике могут считаться двумя основными экспериментальными свидетельствами реальности своеобразных интерференционных явлений в неупорядоченных средах.

Обычная слабая локализация электронов обусловлена упругими их столкновениями с центрами рассеяния. Неупругие столкновения, как до сих пор было принято считать, подавляют квантовые интерференционные процессы. Это несомненно верно в отношении обычной слабой локализации андерсоновского типа. Однако неупругие процессы, как оказалось, могут одновременно быть источником новых квантовых интерференционных явлений, что нашло свое выражение в возможности существования слабой локализации нового типа. Новый вид квантового транспорта, как показано, представляет особый интерес в случае электронов промежуточных энергий.

Возможность существования эффектов квантового транспорта нового типа в канале неупругого рассеяния была предсказана в предположении, что движение электронов осуществляется так, что кроме

неупругого рассеяния они испытывают упругие многократные столкновения на малые углы и однократное на большой угол. Потому возникает принципиальный вопрос, будет ли иметь место слабая локализация нового типа в реальных условиях упругого многократного рассеяния на произвольные углы. Кроме того, первоначально не было выяснено, как влияет наличие поверхности среды на рассматриваемый эффект и не носит ли это влияние фатальный характер. Эти два вопроса являются принципиальными с точки зрения проявления слабой локализации нового типа в природных процессах, их важности в физике твердого тела, возможности прямого наблюдения открытого эффекта, а также практического использования результатов.

В настоящей работе в модели изотропно рассеивающих силовых центров показано, что квантовый транспорт нового типа имеет место при наличии многократного рассеяния электронов на произвольные углы. При этом возникают эффекты слабой локализации нового типа. Показано, как меняются угловые зависимости неупруго рассеянных электронов в условиях квантового транспорта из-за наличия поверхности, ограничивающей среду.

Теоретическое рассмотрение эффектов квантового транспорта нового типа проводилось на основе предложенной и используемой в работе диаграммной техники.

Из 9 типов диаграмм, описывающих рассматриваемые процессы рассеяния электрона в приповерхностной области твердого тела, только диаграммы двух видов, изображенные на рисунке 3, соответствуют процессам квантового транспорта, приводящим к новому типу слабой локализации частиц.



Рис. 3.

Волнистой линии на рисунке соответствует неупругое взаимодействие, а остальные процессы когерентного и некогерентного рассеяния описываются заштрихованным блоком (так называемым *M*-блоком). Диаграммное уравнение для *M*-блока удастся решить в аналитическом виде.

Квантовый транспорт не сводится к одной только слабой локализации. Из общих, исследованных в четвертой главе, эффектов квантового транспорта выделен и отдельно детально исследован тот аспект, который проявляется в виде слабой локализации нового типа.

Полученные в четвертой главе работы результаты относятся не только к электронному транспорту. В целом они применимы и к переносу излучения. В частности следует ожидать существования нового типа слабой локализации света при комбинационном его рассеянии. Эффект квантового транспорта и слабой локализации нового типа могут проявиться и в задачах теории проводимости при переносе горячих электронов в неупорядоченных или сильно легированных полупроводниках.

Детально проанализированы конкретные проявления предложенного эффекта. В частности рассмотрен новый тип слабой локализации электронов, возникающий при эмиссии электронов в условиях Оже-эмиссии. Он вызывает изменения в особенностях угловых спектров неупруго отраженных от твердого тела частиц, вызвавших ионизации атомов. Особое внимание уделено азимутальным угловым зависимостям токов неупруго отраженных электронов, которые содержат более четко выраженную, чем для других типов угловых зависимостей, информацию о процессах слабой локализации частиц.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности фиксирования эффектов нового типа слабой локализации электронов при неупругом отражении различных групп частиц в условиях Оже-эмиссии. Характеристики регистрируемых спектров можно использовать как для определения параметров твердого тела, так и для изучения элементарных актов взаимодействия частиц в твердых телах.

Рассмотрен также квантовый транспорт Оже-электронов, эмитируемых неупорядоченным твердым телом. Уникальность группы Оже-электронов заключается в том, что такие электроны эмитируются внутри полубесконечной среды, где и происходит формирование основных особенностей на угловых зависимостях регистрируемых интенсивностей. Учет квантового транспорта приводит к слабой локализации нового типа Оже-электронов, испытавших неупругое рассеяние. Эффект проявляется в возникновении дополнительных неоднородностей на азимутальных зависимостях интенсивностей Оже-эмиссии. Исследованы случаи двухчастичных и многочастичных неупругих процессов. Эффект оказывается более ярко выраженным в случае плазменных потерь. Он очень чувствителен к параметрам рассеяния и характеристикам твердого

тела, что позволяет говорить о возможности использования описанного эффекта в прикладной электронной Оже-спектроскопии.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Дубов В.В., Кораблев В.В., Румянцев В.В. Особенности упругого рассеяния электронов промежуточных энергий в упорядоченных структурах. // ФТТ. – 1982. – Т.24. - №7. – С.1953 - 1959.
2. Румянцев В.В., Кораблев В.В., Дубов В.В., Морозов Ю.А. Влияние кристаллической структуры твердого тела на упругое отражение электронов промежуточных энергий. // Изв. АН СССР, сер. физ. – 1982. – Т.46. - №7. - С.1336 - 1341.
3. Дубов В.В. Кратное тепловое рассеяние электронов кристаллами в широком диапазоне температур. // Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 29 – 31 мая 1989 г. - М.: Изд. МГУ, 1989. - С.36.
4. Дубов В.В., Румянцев В.В. Роль поверхностных электронов в формировании потенциалов изображения. // Радиотехника и электроника. – 1992. - Вып.2. - С.340 - 345.
5. Rumyantsev V.V., Doubov V.V. Quantum transport of electrons scattered inelastically from disordered media. // Phys. Rev. B. – 1994. – V.49. - N.13. - P.8643 – 8655.
6. Чирков А.Г., Дубов В.В. Избранные задачи квантовой механики. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001. – 161 С.
7. Doubov V.V. The surface potential formation in a wide temperature range. // Preprints on new approaches to hi-tech 98 international workshop NDTCS-98. – Proceedings of SPAS. – 1998. – P.B4.
8. Дубов В.В. Квазиупругое рассеяние электронов в широком диапазоне температур. // ФТТ. – 1991. - Т.33. - №8. - С.2241 - 2249.
9. Петров В.Н., Мамаев Ю.А., Старовойтов С.А., Дубов В.В. Резонансное рассеяние поляризованных электронов на поверхности вольфрама. // Всесоюзная конференция «Поверхность-89»: Тезисы докладов. - М.: Изд. ОИХФАН СССР, 1989. - С.29.
10. Дубов В.В., Румянцев В.В., Кораблев В.В. Резонансное рассеяние электронов при наличии поверхностных зон. // Тезисы докладов XX совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 1990. - С. 31.

11. Дубов В.В., Румянцев В.В. Роль поверхностных электронов в формировании потенциала изображения. // XXI Всесоюзная конференция по эмиссионной электронике: Тезисы докладов. - Л.: Изд. ФТИ, 1990. - Т.1. – С.106.
12. Румянцев В.В., Дубов В.В. Ориентационные эффекты (анизотропия входа) во вторичной эмиссии при дифракции электронов. // VII Симпозиум по вторичной электронной, фотоэлектронной эмиссиям и спектроскопии поверхности твердого тела: Тезисы докладов. – Ташкент: Изд. ТПИ, 1990. - С.18.
13. Дубов В.В., Румянцев В.В., Кораблев В.В. Резонансное рассеяние электронов при наличии поверхностных зон. // Тезисы докладов XX совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 1990. - С. 31.
14. Кораблев В.В., Румянцев В.В., Дубов В.В. Волновая функция электронов промежуточных энергий вблизи поверхности монокристаллов. // ФТТ. -1983. - Т.26. - №12. - с.3825-3829.
15. Кораблев В.В., Румянцев В.В., Дубов В.В., Ершов С.Г. Квазиупругое отражение электронов от полупроводников при высоких температурах. // Эмиссия с поверхности полупроводников, Львов, 17 – 19 октября 1989 г. : Тезисы докладов Симпозиума. – Львов: Изд. УЭП, 1989. - С. 14.
16. Дубов В.В., Подойницын С.К. Поверхностные резонансы. – Ростов: Изд. РГУ, 1988. – 13 С.
17. Кораблев В.В., Румянцев В.В., Дубов В.В. Ориентационный эффект при эмиссии Оже-электронов разных энергий из монокристаллов. // V Всесоюзный симпозиум по фотоэлектронной эмиссии и вторичным электрон-электронной и ионно-электронной эмиссиям: Тезисы докладов. - Рязань: Изд. РРТИ, 1983. - С.114 - 115.
18. Дубов В.В., Кораблев В.В. Рассеяние на поверхностях с естественными неоднородностями. // Тезисы XXXI Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 2001. - С.83.
19. Дубов В.В., Кораблев В.В. Рассеяние Оже-электронов на поверхностях с естественными неоднородностями. // Поверхность. – 2002. - № 4. – С.27 - 31.
20. Кораблев В.В., Дубов В.В. Резонансное рассеяние электронов на поверхностях с естественными неоднородностями. // II Конференция по физической электронике: Тезисы докладов. – Ташкент: Изд. ИЭАНРУ, 1999. - С.17.

21. В.В. Кораблев, В.В. Дубов. Отражение электронов с энергиями 1 – 100 эВ от поверхностей твердых тел. // Тезисы VI Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». - СПб.: Изд. СПб ГПУ, 2002. – С. 129.
22. Дубов В.В., Кораблев В.В. Влияние неоднородности и дискретности заряда на формирование приповерхностного потенциала. // Тезисы XXIX Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 1999. - С.83.
23. Korablev V.V., Dubov V.V. Surface electron scattering by natural nonuniformities. // Proceedings of SPAS. - V.3. – 1999. - P.B28 - B29.
24. Дубов В.В., Кораблев В.В. Влияние неоднородностей поверхности кристалла на рассеяние поляризованных электронов. // Тезисы XXX Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 2000. - С.150.
25. Korablev V.V., Dubov V.V. Fine structure of the surface resonance by natural nonuniformities. // Preprints on new approaches to hi-tech 2000 international workshop NDTCS-2000. – SPb: SPb. Ac. Sci., 2000. – P.22.
26. Korablev V.V., Dubov V.V. The effect of the surface and bulk electrons on the surface potential formation. // // Proceedings of the International Society for Optical Engineers. - 2002. - V.4627. – N.2. - P.34 – 37.
27. Кораблев В.В., Дубов В.В. Влияние естественных неоднородностей на ориентационные эффекты резонансного рассеяния электронов. // Тезисы V Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». - СПб.: Изд. СПб ГТУ, 2001. – С. 17.
28. Korablev V.V., Dubov V.V. Fine structure of the surface resonance by natural nonuniformities. // // Proceedings of the International Society for Optical Engineers. - 2001. - V.4348. N.2. – P.17-20.
29. Кораблев В.В., Дубов В.В. Влияние естественных неоднородностей на тонкие ориентационные эффекты приповерхностного рассеяния. // Тезисы XXXII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 2002. - С.90.
30. Ершов С.Г., Дубов В.В. Поверхностное резонансное рассеяние. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1994. – 44 С.
31. Кораблев В.В., Дубов В.В., Румянцев В.В., Блехер Б.Э., Брытов И.А. Ориентационные эффекты взаимодействия электронов с монокристаллами в спектроскопии потенциалов возбуждения мягкого рентгеновского излучения. // ФТТ. – 1986. - Т.28. - №7. - С.2146 - 2201.

32. Дубов В.В. Взаимодействие электронов промежуточных энергий с приповерхностной областью твердых тел. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 2002. - 155 С.
33. Кораблев В.В., Дубов В.В. Слабая локализация электронов с фиксированными потерями энергии. // Поверхность. – 2002. - №4. – С.90 - 94.
34. Дубов В.В., Кораблев В.В. Квантовый транспорт неупруго рассеивающихся Оже-электронов. // Тезисы XXXII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 2002. - С.65.
35. Дубов В.В., Кораблев В.В. Влияние поверхности твердого тела на квантовый транспорт электронов. - СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001. – 51 С.
36. Дубов В.В., Кораблев В.В. Слабая локализация неупруго отраженных электронов в условиях Оже-эмиссии. // ФТТ. – 2001.- Т.43. - № 8. - С.1392 – 1395.
37. Кораблев В.В., Дубов В.В. Слабая локализация электронов. // Тезисы XXXI Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 28 – 30 мая 2001 г. - М.: Изд. МГУ, 2001. - С.84.
38. Dubov V.V., Korablev V.V. Weak localization electrons by Auger emission. // Proceedings of SPIE. - 2001. - V.4348. – N.2 – P.21- 24.
39. Dubov V.V., Korablev V.V. Weak localization of electrons by quasielastic scattering. // Proceedings of SPIE. - 2002. - V.4627. – N.2. - P.30 – 33.