

На правах рукописи

МАТАСОВ Максим Дмитриевич

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА
И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИШЕНИ
НА ВТОРИЧНО-ИОННЫЙ ФОТОЭФФЕКТ**

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО

«Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
на кафедре физики полупроводников
факультета nano- и биомедицинских технологий

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Роках Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Гусятников Виктор Николаевич, заведующий
кафедрой прикладной математики и информатики
Саратовский государственный социально-
экономический университет (г. Саратов)
кандидат технических наук, **Козырев Антон
Андреевич**, старший технолог ОАО «НПП «Инжект» (г.
Саратов), лауреат премии Правительства Российской
Федерации в области науки и техники

Ведущая организация: Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю.А.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в 15:30 на заседании
диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном
университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул.
Астраханская, 83, III корп., Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им.
В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул.
Университетская, 42).

Автореферат разослан « 26 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время изучение влияния света на распыление вещества при бомбардировке образца первичными ионами представляет собой как общенаучный, так и практический интерес. Процессы выбивания вторичных ионов из образца имеют тесную связь со многими другими физическими процессами, протекающими в полупроводниковой мишени. Сложность процессов, происходящих при распылении вещества при воздействии первичных ионов, требует рассмотрения более широкого круга явлений, сопутствующих ионному распылению, учета большего числа параметров, влияющих на выход вторичных ионов. В частности, для объяснения ионообразования существует необходимость уделить повышенное внимание электронным процессам, происходящим в мишени [1], таким как изменение распределения носителей заряда по энергиям, заполнение мелких ловушек и центров рекомбинации электронами.

До недавнего времени не было замечено, что влияние дополнительного освещения заметно изменяет выход вторичных ионов. В то же время это явление, названное вторично-ионным фотоэффектом (ВИФЭ), может иметь, кроме выяснения механизмов явлений, происходящих в мишени, и технологическое значение. Исследование электронных процессов, задействованных при ионном распылении, позволяет получить информацию о явлениях, не относящихся непосредственно к ионному распылению материала, но сопутствующих ему. Такие явления могут быть маркерами определенных этапов процесса распыления. Например, интенсивность и спектральный состав люминесценции, возникающей при распылении материала, может говорить о локализации выхода вторичных ионов и толщине стравленного слоя, т. е. в данном случае фотолюминесценция является одновременно дополнительным источником информации об измеряемых параметрах материала и ходе ионного травления. В связи с потребностью в независимом источнике информации при исследовании методом вторично-ионной масс-спектрометрии полупроводниковых многокомпонентных материалов и структур на их основе в диссертационной работе был исследован ряд явлений, сопутствующих ионному распылению и непосредственно с ним связанных.

Дополнительное освещение при распылении материала также можно использовать для повышения точности определения химического состава образцов, а в некоторых случаях для обеспечения нереализуемой без дополнительного освещения возможности измерения химического состава плохо проводящих мишеней методом вторично-ионной масс-спектрометрии [2]. Необходимость в использовании дополнительных эффектов и манипуляций часто возникает в связи с особенностью строения или физическими свойствами исследуемых объектов. В частности, исследование химического состава диэлектриков является важным вопросом в современном вторично-ионном анализе. Если исследуемый диэлектрик обладает фотопроводимостью, то мы можем уменьшить его сопротивление, используя тот или иной спектральный интервал освещения [3]. Получается, что, переводя исследуемый объект в другое электрическое состояние, мы получаем возможность реализации метода прямого вторично-ионного анализа, который является на сегодняшний день самым чувствительным из всех известных методов определения химического состава. Такое направление исследований в измерительной технике является перспективным и актуальным.

Исследования влияния света на выход вторичных ионов могут иметь и большое технологическое применение. Выявление механизмов изменения потока вторичных ионов из распыляемой мишени позволяет создавать устройства, осуществляющие напыление тонкопленочных образцов с регулируемым количеством примесей во время их создания. Возможность такого управления открывает широкие перспективы модификации как технологического, так и измерительного оборудования.

В то же время в предыдущих исследованиях практически не учитывался такой важный фактор, как изменение спектрального состава света, соответствующего составу полупроводниковой мишени.

Изменяя по заданному закону интенсивность освещения или его спектральный состав, можно добиться создания образцов с модуляционно-легированной структурой, множественными квантовыми ямами, сверхрешетками. Все эти объекты находятся на передовом рубеже нанотехнологий.

Цель диссертационной работы — Экспериментальное и теоретическое изучение влияния спектрального состава дополнительного освещения и фазового состава распыляемого вещества на выход вторичных ионов из полупроводниковых поликристаллических мишеней, а также изучение корреляции этих процессов с фотопроводимостью и люминесценцией.

Задачи исследования

1. Предварительная классификация исследуемых объектов по электрическим и оптическим свойствам. Изучение морфологии поверхности и элементного состава распыляемых мишеней. Математическое описание баланса заряда при бомбардировке и распылении.
2. Экспериментальное и теоретическое исследование спектральной характеристики вторично-ионного фотоэффекта для образцов твердых ограниченных растворов сульфида свинца и кадмия. Определение взаимосвязи между характером изменения выхода вторичных ионов и спектральным составом облучающего образец света. Изучение реакции выхода отрицательных ионов кислорода на освещение. Сравнение проявлений вторично-ионного фотоэффекта для случаев распыления ионами кислорода и ионами аргона. Теоретическое описание спектральной характеристики вторично-ионного фотоэффекта. Прогнозирование по полученной функциональной зависимости выхода вторичных ионов при освещении распыляемой мишени сложного фазового состава светом со сложным спектральным составом.
3. Изучение оптических, фотоэлектрических и люминесцентных свойств образцов твердых ограниченных растворов. Описание взаимосвязи между электронными процессами, участвующими во взаимодействии фотонов света с веществом, и процессами, приводящими к ионному распылению. Теоретический расчет влияния фазового состава образца на полный спектр его фотолюминесценции. Установление корреляции между оптическими и фотоэлектрическими свойствами образца, с одной стороны, и изменением выхода вторичных ионов элементов, входящих в его состав, при освещении образца во время его распыления, с другой стороны.
4. Разработка модели, для численной оценки аномального ВИФЭ, описывающей транспорт энергии из широкозонной матрицы в узкозонную фазу гетерофазной полупроводниковой мишени. Теоретическое описание накачки

узкозонных включений, входящих в состав образца, при поглощении фотонов основным объемом образца коротковолновых фотонов. Объяснение корреляции между длинноволновой люминесценцией и процессом накачки при освещении широкозонной фазы. Установление связи коэффициента распыления вещества и интенсивности люминесценции, соответствующей узкозонной фазе материала.

Научная новизна

1. Построена модель процесса образования вторичных ионов, включающая механизм взаимодействия света с полупроводниковой мишенью, позволяющая объяснить смену знака вторично-ионного фотоэффекта.
2. Установлено, что ВИФЭ наблюдается в широком классе материалов и структур, отличающихся наличием в их составе нескольких фаз с различной шириной запрещенной зоны и фотопроводимостью. Исследован ВИФЭ на монокристаллических образцах бинарных соединений элементов III и V групп в многослойной структуре и аморфном монооксиде кремния. Проведено исследование выхода отрицательных ионов, соответствующих атомам состава из многокомпонентного материала.
3. Разработан алгоритм вычисления спектра люминесценции образцов твердых ограниченных растворов, отличающийся выполнением действий по учету наличия распределения фаз, и сделан аналитический вывод соответствующего выражения с учетом распределения фаз и агрегатных состояний с разной шириной запрещенной зоны.
4. Предложена методика для расчета скорости ионного травления образца, основанная на феноменологическом рассмотрении баланса носителей заряда, позволяющая прогнозировать глубину травления в зависимости от яркости источника первичных ионов.
5. Построена математическая модель, описывающая фотопроводимость сильно рассеивающих свет образцов, включающая математическое описание взаимодействия оптического излучения с квазисвободными носителями заряда, связывающая оптические параметры образца со спектром фототока. Дано объяснение спектра фототока, возникающего при облучении светом разных длин волн включенного в цепь фотосопротивления на основе твердого ограниченного раствора CdS-PbS.
6. Предложен подход к описанию и диагностике процессов переноса неравновесных инжектированных носителей заряда между фазами, основанный на анализе интенсивности люминесценции, возникающей за счет рекомбинации носителей в узкозонной фазе.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность результатов выполнения диссертационной работы подтверждается многократными экспериментами, выполненными при различных граничных условиях, но приводящих к одному и тому же выводу. Выводы и результаты работы не противоречат основным физическим законам и постулатам. Результаты вычислений получены при использовании только хорошо известных, математически доказанных методов анализа и преобразований. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением стандартной современной измерительной аппаратуры и соответствует ранее полученным данным.

Практическая значимость

1. Показана возможность изменения выхода вторичных ионов из фоточувствительных мишеней посредством изменения спектрального состава подсветки. Получено полуэмпирическое выражение, описывающее спектральную характеристику ВИФЭ.
2. Показана возможность управления выходом как положительных, так и отрицательных ионов посредством изменения спектрального состава дополнительной подсветки распыляемой мишени, а также за счет комбинации фазового состава распыляемых объектов.
3. На основании теоретических выводов показана возможность управления легированием для получения сверхрешеток и тонких пленок, получаемых в процессе ионного распыления. Контроль потока и состава осаждаемых частиц реализуется изменением спектрального состава и интенсивности подсветки при распылении фоточувствительных мишеней, содержащих необходимые химические элементы.

Положения, выносимые на защиту

1. В гетерофазных фотопроводящих поликристаллических пленках ограниченных твердых растворов CdS-PbS, используемых как модельное вещество для исследования ВИФЭ, зависимость выхода вторичных положительных ионов от длины волны излучения видимого диапазона, индуцирующего данный выход, различна для Cd^+ и Pb^+ , при этом спектральная зависимость выхода определяется спектром фотопроводимости.
2. В фотопроводящих пленках CdS-PbS экспериментально определен спектральный диапазон, в котором проявляется аномальный ВИФЭ для ионов Pb^+ , вышедших из узкозонной фазы, совпадает со спектральным диапазоном интенсивной фотолюминесценции, что подтверждает рекомбинационный механизм аномального ВИФЭ.
3. При облучении фотопроводящих пленок CdS-PbS светом, имеющим плотность мощности, сравнимую с плотностью мощности пучка первичных ионов, плотность мощности, передаваемая за счет переноса дырок из широкозонной в узкозонную фазу, на три порядка меньше плотности мощности первичного ионного пучка. При этом повышение выхода вторичных ионов составляет 5–15%.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- 1) Международная молодежная научная школа по оптике, лазерной физике и биофотонике «Saratov Fall Meeting» Саратов, Россия, 23–26 сентября 2008 г.;
- 2) XI международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» Ульяновск, Россия, 23–25 мая 2009 г.;
- 3) Международная молодежная научная школа по оптике, лазерной физике и биофотонике «Saratov Fall Meeting» Саратов, Россия, 21–24 сентября 2009 г.;
- 4) Международная молодежная научная школа по оптике, лазерной физике и биофотонике. «Saratov Fall Meeting» Саратов, Россия, 5–8 октября 2010 г.;
- 5) XLV Школа ПИЯФ РАН Гатчина секция физики конденсированного состояния. – Гатчина, Россия, 14–19 марта 2011 г.;

- б) XIII международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» Ульяновск, Россия, 4–7 сентября 2012 г.;
- 7) XXII Международная научно-техническая конференция, по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва: ФГУП «НПО Орион», Россия, 21–25 мая 2012 г.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении исследований по грантам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): 06-08-01609-а «Взаимодействие радиационно-стойких гетерофазных полупроводников с ускоренными ионами и видимым светом» (2006–2007 гг.), 08-08-00764-а «Исследование процессов самоорганизации наноразмерных кластеров в фотопроводниках и их влияние на радиационную стойкость» (2008–2010 гг.).

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, **опубликовано 23** работы [1-23], в том числе **5** статей из списка изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, **5** статей в других изданиях и **13** тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях 2008–2012 гг.

Личный вклад автора состоит в изучении литературных источников в области вторично-ионной масс-спектрометрии и смежных с ней областей, проведении всех опытов и экспериментов, описанных в работе, построении математических моделей, описывающих основные результаты исследований, проведении числового расчета всех параметров, необходимых для формулирования защищаемых положений и написания выводов, выявлении закономерностей, связывающих результаты работы с уже известными фактами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 131 страниц машинописного текста, включая 58 рисунков, 2 таблицы, 1 приложение. Список литературы содержит 82 наименований и изложен на 6 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Рассмотрено историческое развитие проблемы, исследуемой в диссертации. Сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, описана практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, изложено ее краткое содержание.

В первой главе проведен литературный обзор по методам вторично-ионной масс-спектрометрии, фотоэлектрическим и люминесцентным явлениям в полупроводниках (применительно к основной проблеме данной работы к выяснению влияния освещения на выход вторичных ионов в вакуум). Рассмотрена классификация оборудования и устройств, предназначенных для исследований в области масс-спектрометрии.

Во второй главе рассмотрены морфологические и структурные особенности модельного вещества — гетерофазного полупроводника на основе сульфидов кадмия и свинца, на котором было проведено изучение ВИФЭ. Феноменологически

описан баланс заряда при распылении твердого тела. Получено выражение для скорости травления:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Y_{tot}}{qn(z)} \cdot \frac{b_s(D(\ell-F))^2}{(\ell F)^2}, \quad (1)$$

где z — глубина травления, b_s — яркость источника, F — фокусное расстояние ионной конденсорной линзы, q — заряд электрона, $n(z)$ — зависимость концентрации вещества от глубины травления, D — диаметр ионной конденсорной линзы, Y_{tot} — коэффициент распыления, ℓ — расстояние от источника эмиссии до линзы.

Спектральная характеристика ВИФЭ была получена теоретически, основываясь на формуле, ранее приведенной в работах [4] и описывающей относительный ионный выход элемента в зависимости от изменения электронной работы выхода. С учетом спектральной зависимости поперечной фотопроводимости мишени было получено полуэмпирическое соотношение изменения работы выхода от длины волны. Полученные спектральные характеристики представлены на графиках рис. 1.

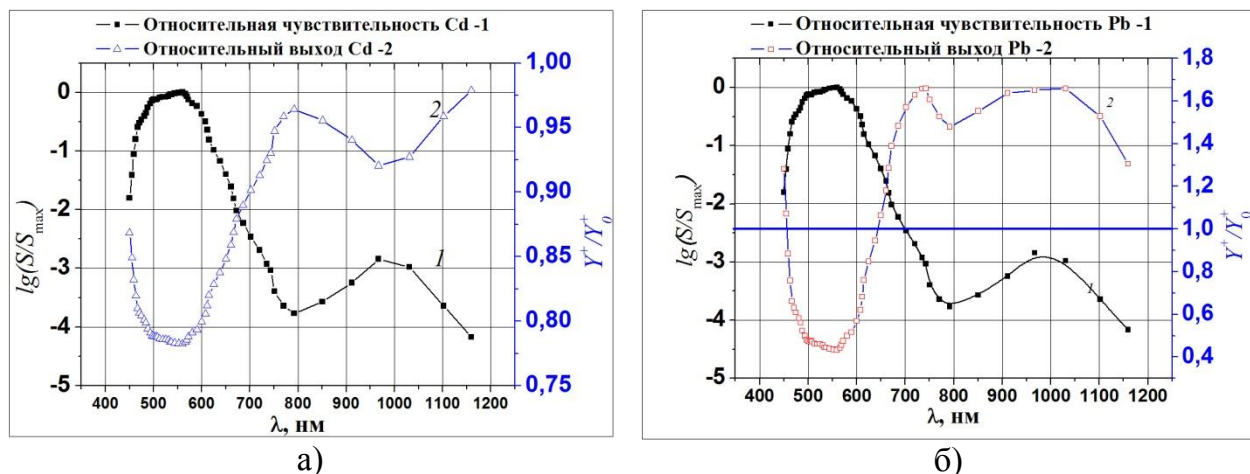


Рисунок 1. Сравнение спектральных характеристик фотопроводимости и ВИФЭ для вторичных ионов: а) кадмия; б) свинца

Выведена формула, позволяющая рассчитать изменение работы выхода ΔA при освещении образца белым светом.

$$\Delta A = kT \ln \left(\frac{I_T}{I_T + \sum_i A \Omega \langle S(\lambda) \cdot T(\lambda) b_\lambda \rangle_i \Delta_i} \right), \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура, I_T — темновой ток, A — площадь освещаемого образца, Ω — телесный угол, под которым виден конденсор с поверхности источника излучения, $S(\lambda)$ — спектральная чувствительность, $T(\lambda)$ — пропускание оптической системы, b_λ — яркость источника, Δ_i — спектральный интервал длин волн.

Спектральные характеристики выхода вторичных ионов свинца и кадмия, полученные с помощью светофильтров, при ином травлении были исследованы

экспериментально и теоретически. На рисунке 2 проведено сравнение величин выхода вторичных ионов, полученных экспериментально и рассчитанных теоретически. В условиях проведения эксперимента и точности определения подгоночных параметров данное совпадение является удовлетворительным.

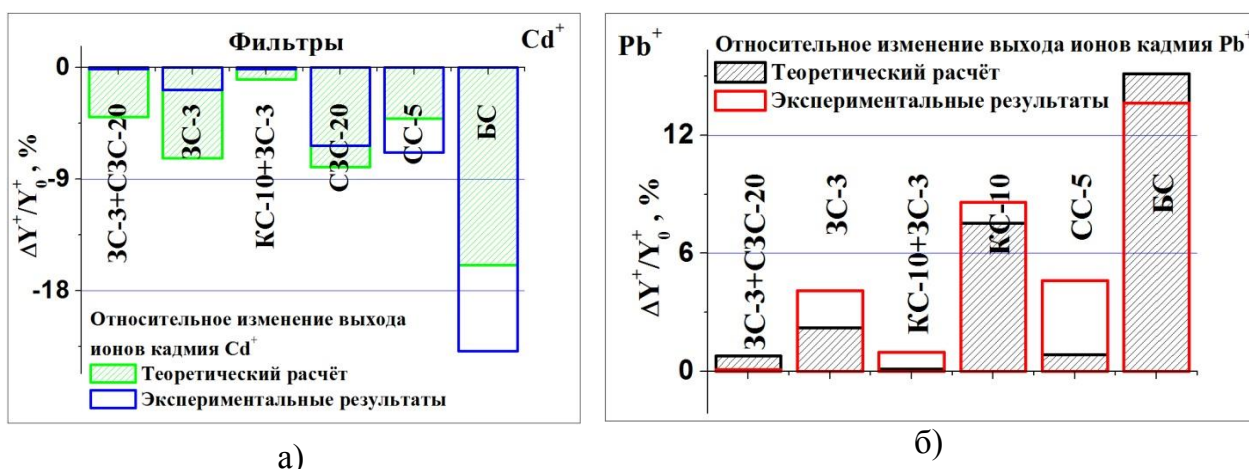


Рисунок 2. Сравнение экспериментально полученного спектра ВИФЭ с теоретически рассчитанным: а) для кадмия; б) для свинца

В диапазоне длин волн, соответствующем значениям относительной чувствительности (отношение фотоэлектрической чувствительности на определенной длине волны к максимально достижимому значению чувствительности), не превышающем $6 \cdot 10^{-5}$, работает аппроксимация для относительного выхода ионов свинца рис. 3а.

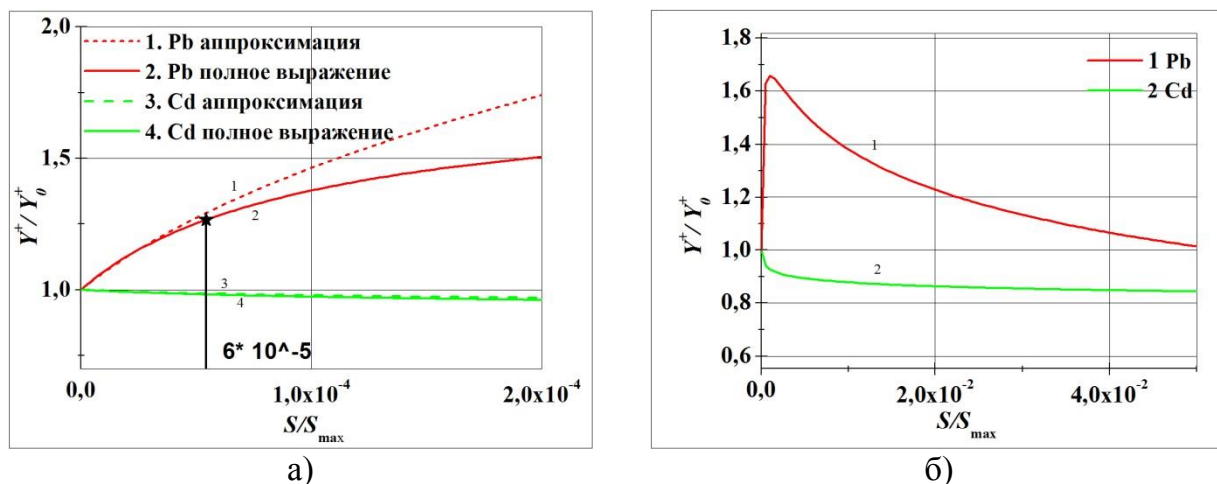


Рисунок 3. Теоретические зависимости относительного выхода ионов кадмия и свинца от значения относительной спектральной чувствительности: а) участок малого изменения относительной чувствительности; б) широкий диапазон изменений

Из рисунка 3б видно, что аномальный ВИФЭ (увеличение выхода при освещении) может наблюдаться в диапазоне относительных чувствительностей от 0 до $5 \cdot 10^{-2}$, что соответствует от 630 нм спектрального диапазона. Исследовав зависимость относительного выхода ионов от относительной спектральной чувствительности на экстремум, получим: кратность фототока, соответствующую максимуму $n_{max} \approx 16,7$. Соответствующая этой кратности относительная

чувствительность $\xi_{\max} \approx 7,33 \cdot 10^{-4}$. Значение абсциссы максимума можно определить и по рисунку (рис. 1б). Начиная с длины волны 750 нм, что соответствует $\xi = 9 \cdot 10^{-4}$, соотношение форм кривых относительного выхода и спектральной чувствительности меняется по сравнению с зависимостями, показанными на рисунке (рис. 1а).

Далее приводятся наблюдаемые закономерности ВИФЭ на других веществах и структурах, например *SiO* на *GaAs*. Для других веществ наблюдаются закономерности, аналогичные тем, что были установлены для сульфидов.

Полный профиль травления пленки SiO положительными ионами аргона представлен на рисунке 4, где видно, что в конце травления пленки монооксида кремния проявляется увеличение выхода вторичных ионов кремния, причем выход ионов утрачивает чувствительность к свету, имевшуюся на более ранних этапах травления (аномальный ВИФЭ).

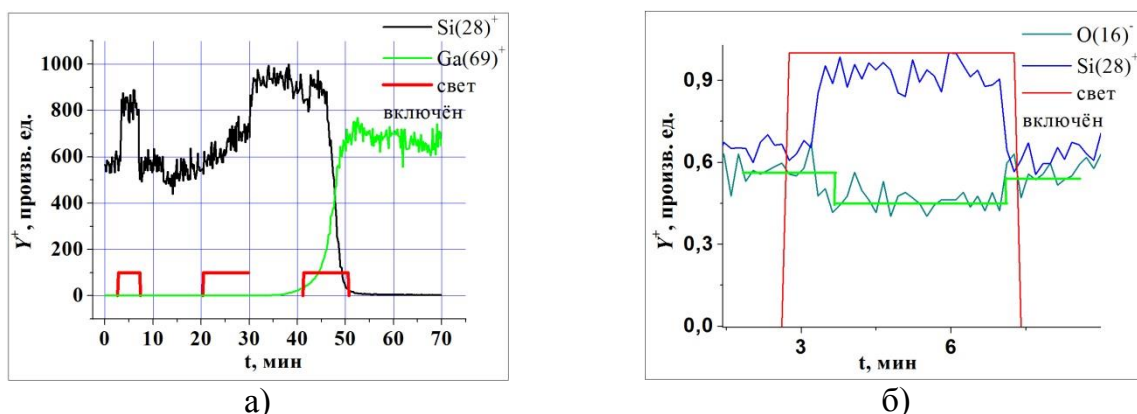


Рисунок 4. Профиль структуры SiO-GaAs: а) выход вторичных ионов Si⁺ и Ga⁺ в темноте и при освещении; б) выход вторичных ионов Si⁺ и Ga⁺ из SiO при освещении

При начале травления арсенида галлия не проявляется зависимости выхода вторичных ионов от освещения, поскольку арсенид галлия был сильно легирован донорной примесью кремния и, следовательно, уже обладал высокой концентрацией носителей заряда (электронов), которую освещение повысить практически не могло.

Наряду с кремнием (рис. 4б) зависимость от освещения показал выход вторичных отрицательных ионов кислорода (уменьшение выхода — нормальный ВИФЭ). На этом рисунке результаты приведены в относительных единицах. Заметим, что в одинаковых абсолютных единицах выход отрицательных ионов кислорода во много раз меньше выхода положительных ионов кремния.

Обнаруженные свойства ВИФЭ делают возможным использование этого явления в процессе создания ряда объектов нанотехнологий, таких как квантовые нити и плоскости. Добавляя за счет освещения распыляемых мишеней в процесс магнитоплазменного распыления ионы, можно изменять количество примесей в напыляемых образцах. Кроме того, модулируя поток дополнительных ионов, возможно создание периодических структур.

В третьей главе изучаются оптические и фотоэлектрические свойства исследуемых образцов. Спектральная изоквантовая чувствительность S_φ описывается следующим выражением (3)

$$S_{\phi} = \frac{q\beta}{T_r} \tau_{tot} A(\lambda), \quad (3)$$

где β — квантовый выход, T_r — время пролета между электродами фотоносителей, возбужденных светом, τ_{tot} — время жизни фотоносителей, $A(\lambda)$ — интегральный коэффициент поглощения (рис. 5а). Форма кривой спектральной чувствительности фотопроводимости пропорциональна физической величине, равной $\tau_{tot} A(\lambda)$.

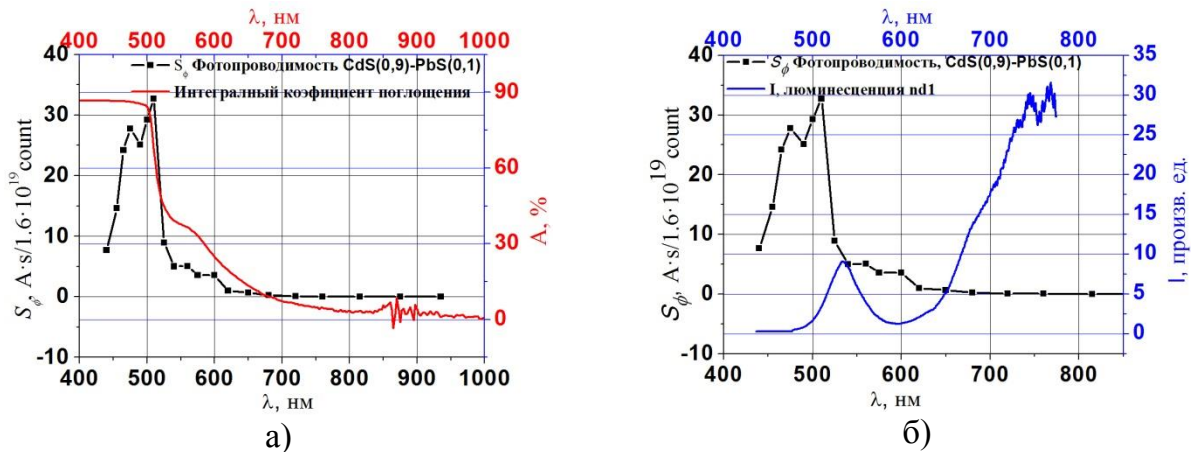


Рисунок 5. Зависимость фотопроводимости от длины волны: а) сравнение спектральных кривых фотопроводимости и коэффициента поглощения плёнок твердых ограниченных растворов $CdS(0,9)-PbS(0,1)$, полученных при температуре отжига 550 °С; б) спектр фотопроводимости и спектр фотолюминесценции пленок твердых ограниченных растворов $CdS(0,9)-PbS(0,1)$, полученных при температуре отжига 550 °С

Сравнивая спектры фотопроводимости и спектры фотолюминесценции, можно увидеть, что спектральные участки их активности не совпадают (рис. 5б): там, где наблюдается значительная люминесценция, фотопроводимость мала. Это может объясняться различной зависимостью интенсивности фотолюминесценции и фототока от времени жизни: фототок пропорционален времени жизни, а интенсивность люминесценции обратно пропорциональна ему.

В четвертой главе произведён расчёт плотности мощности, которая передаётся узкозонной фазе за счёт поглощения света в широкозонной. Основным понятием, которое используется при объяснении влияния электронных процессов на распыление, является «накачка» энергией одной части (фазы) материала мишени за счет переноса электрон-дырочных пар из другой [4].

Переходя из одной фазы в другую, носители заряда в узкозонной фазе передают решетке при термализации часть своей энергии, равной разности энергии, которую они имели в области пространственного заряда широкозонной фазы, и энергии, которую они приобрели при термализации в узкозонной фазе, попав в квазинейтральные области. В результате этого поднимается температура решетки, возникают дефекты (неупругие деформации) в решетке, что способствует ее «разрыхлению» и, как следствие, увеличению выхода ионов при распылении (рис. 6).

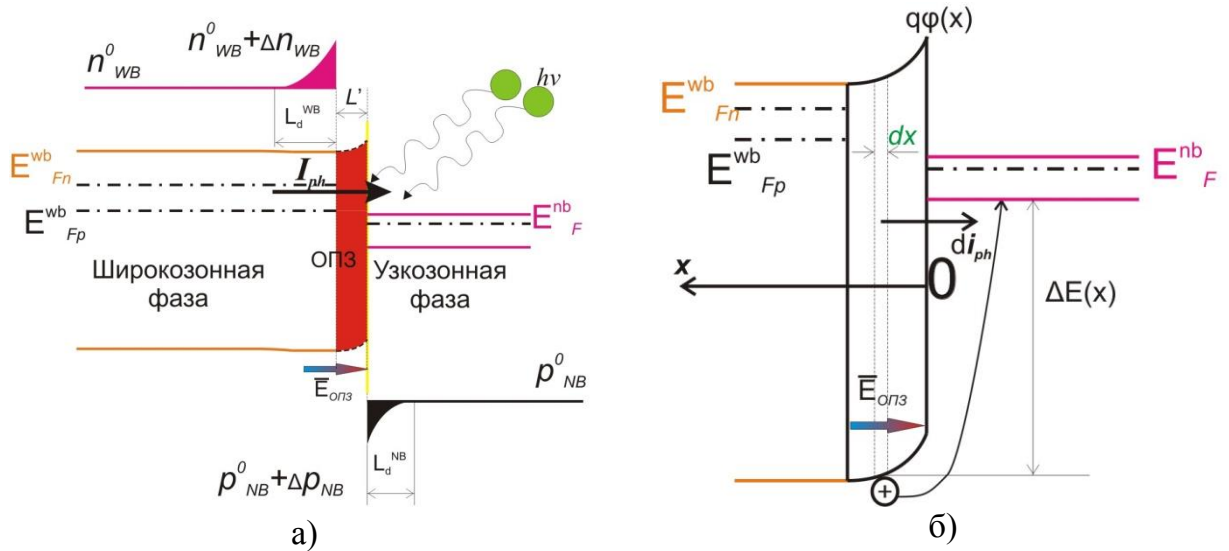


Рисунок 6. Зонная диаграмма переноса дырок из широкозонной фазы в узкозонную: а) изменение зонной структуры при облучении гетероперехода светом, где E_F^{wb} , E_F^{nb} — уровень Ферми в широкозонной и узкозонной фазе соответственно, I_{ph} — возникший фототок, Δn_{WB} , Δn_{NB} — изменение концентрации электронов в зонах, $h\nu$ — кванты падающего света, $\bar{E}_{ОПЗ}$ — напряженность электрического поля в ОПЗ, n_{WB} , n_{NB} — концентрация электронов в широкозонной фазе (*wb*), узкозонной фазе (*nb*); б) процесс термализации неравновесных носителей, инжектированных в узкозонную фазу

Расчет энергии, передаваемой решетке, показал, что выражение для расщатывающей решетку мощности P состоит из двух слагаемых линейного P_l и нелинейного члена P_{nl} .

$$P = P_l + P_{nl}, \quad (4)$$

$$\frac{P_l(R_0)}{S} = \left(\Delta E_g + q\Delta\chi - \frac{4}{3}\Delta E_{F0} \right) A \frac{F_\varphi}{S} \left(1 - e^{-\frac{R_0}{L_d}} \right), \quad (5)$$

$$\frac{P_{nl}(R_0)}{S} = \frac{2}{3} kTA \frac{F_\varphi}{S} \ln \left(1 + \frac{qAF_\varphi}{I_s} \right) \left(1 - e^{-\frac{R_0}{L_d}} \right), \quad (6)$$

где ΔE_g — разница ширин запрещенной зоны, $q\Delta\chi$ — разница энергий сродства электронов, ΔE_{F0} — разница уровней Ферми в широкозонной и узкозонной фазе, F_φ — поток фотонов, падающий на гетеропереход, A — интегральный коэффициент поглощения, I_s — ток насыщения, T — температура, R_0 — глубина выхода вторичных ионов, L_d — длина диффузии, на которую распространяются носители за время релаксации их по энергиям.

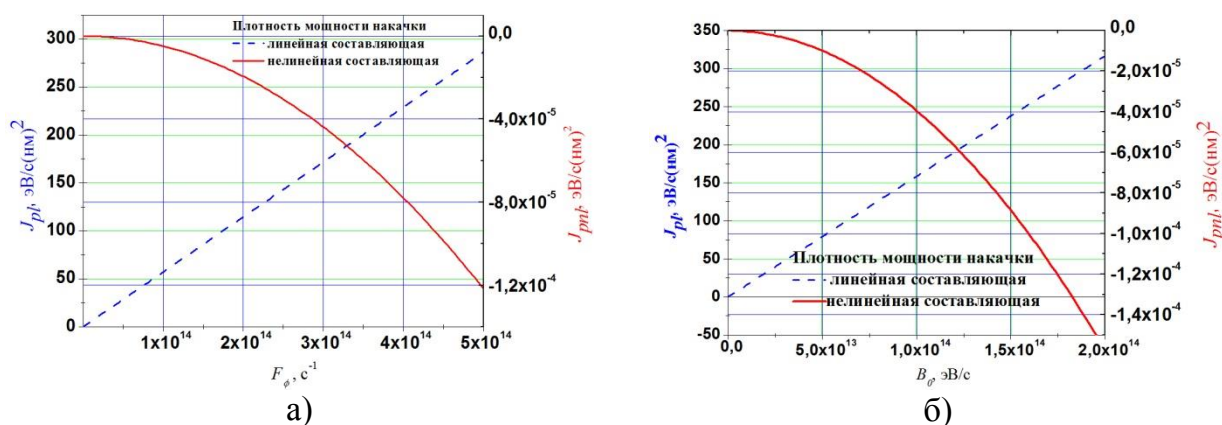


Рисунок 7. Зависимость *нелинейной* $\frac{P_{nl}(F_\phi)}{S}$ и *линейной* $\frac{P_l(F_\phi)}{S}$ составляющей мощности накачки от: а) значения потока фотонов; б) значения интенсивности люминесценции B_0

На основе построенных графиков рис. 7 можно провести следующую оценку. При ионном распылении и освещении образца область эмиссии вторичных ионов начинает люминесцировать в диапазоне, соответствующем межзонным переходам узкозонной фазы. Поток люминесценции составляет порядка 10^{14} эВ/с со всей площади распыления.

Значения мощности накачки, идущей на расшатывание решетки, рассчитанной на основании параметров материала, а полученные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение интенсивности воздействия света и потока ионов на распыление гетерофазного полупроводника

Параметры	Ионы, <i>ion</i>	Фотоны, ϕ
Плотность потока ионов $J, \text{c}^{-1} \cdot \text{нм}^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-31}$	2,7–270
Концентрация $N, \text{см}^{-3}$	$6 \cdot 10^{-60}$	$9 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-2}$
Мощность на единицу площади $P(R_0)/S, \text{эВ} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{нм}^{-2}$	15–15 $\cdot 10^3$	$6,7 \cdot 10^{-0,67}$

Рассмотрев значения освещенности мишени, характерные для минимального и максимального случая засветки распыляемой мишени, получаем границы диапазонов, представленные в таблице. Расшатывающая решетку плотность мощность накачки световым потоком на три порядка меньше, чем средняя поверхностная плотность мощности, приносимая пучком ионов (см. табл. 1). Поэтому мощность оптической накачки может расходоваться не непосредственно на выбивание ионов и атомов, а на расшатывание решетки, способствующее увеличению выхода вторичных ионов и образованию заряженных атомов в объеме вещества.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. При исследовании аномального ВИФЭ в гетерофазных фотопроводящих поликристаллических пленках ограниченных твердых растворов CdS-PbS экспериментально установлено, что область спектральной чувствительности совпадает со спектром фотолюминесценции, и это подтверждает рекомбинационный механизм возникновения аномального ВИФЭ.

2. Определена спектральная граница разделения аномального и нормального ВИФЭ на модельном веществе CdS-PbS, которая соответствует 630 нм. Кратность изменения сопротивления, соответствующая максимуму выхода вторичных ионов в условиях эксперимента равна 20. Значение оптимальной фотоэлектрической кратности говорит о том, что вещества, на которых может наблюдаться аномальный ВИФЭ, могут иметь кратность изменения сопротивления не превышающую два порядка.

3. Модель, построенная для описания перекачки возбуждений, созданных светом в широкозонной фазе, показывает, что возникновение аномального ВИФЭ обусловлено собственным поглощением света в широкозонной фазе и переносом дырок в узкозонную фазу. При этом мощность световой накачки узкозонной фазы может быть на три порядка меньше мощности первичного ионного пучка.

4. Совместное аналитическое рассмотрение фотопроводимости и люминесценции позволило сделать вывод о том, что фотопроводимость пропорциональна, а люминесценция обратно пропорциональна времени жизни, что подтверждает эмпирическое правило Бьюба, гласящее, что люминесценция велика там, где мала фотопроводимость.

5. Расчеты показали, что скорость травления мишени пучком первичных ионов обуславливается только яркостью источника, конфигурацией линзы (в частности, ее фокусным расстоянием, расстоянием от зоны эмиссии до линзы, ее диаметром) и коэффициентом распыления, в широком диапазоне не зависящим от ускоряющего напряжения. При постоянной яркости источника скорость травления не зависит, от силы тока пучка первичных ионов в диапазоне токов и энергий порядка миллиампер и килоэлектрон-вольт.

6. Показана возможность спектрального управления выходом вторичных ионов для создания ионных пучков, достаточных для получения конденсатов в виде пленок и сверхрешеток нанометровой толщины.

7. Оценка интенсивности люминесценции B_0 , возникающей в образце при совместной бомбардировке его первичными ионами и облучении светом (от 1 мкВт до 100 мкВт), дала величину порядка 10^{14} Эв/с со всей площади распыления.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК при Минобрнауки РФ

1.* *Роках А.Г., Сердобинцев А.А., Матасов М.Д., Кондратьев А.П.* О спектральной характеристике вторично-ионного фотоэффекта // Вестник СГТУ. 2007. Т. 26, в 1, № 3, С. 106-111.

2.* *Rokakh A.G., Serdobintsev A.A., Stetsyura S.V., Zhukov A.G., Matasov M.D, Malyar., I.V.* Optical Control of Ion Sputtering // Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications / Ed. by J. K. Lang. Nova Science Publishers. 2009. P. 325-344.

- 3.* *Роках А.Г., Матасов М.Д.* Парадоксы фотопроводящей мишени и оптическое управление выходом вторичных ионов. // ФТП. 2010. Т.44, вып. 1. С 101-108.
- 4.* *Роках А.Г., Матасов М.Д., Жуков А.Г.* Спектральное управление вторично- ионным фотоэффектом путь к оптоионике // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5, вып. 5-6. С. 69-74.
- 5.* *Маляр И.В., Матасов М.Д., Стецюра С.В.* Формирование люминесцирующих кристаллитов в результате распада пересыщенного твердого раствора PbS–CdS // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 36, вып. 16. С. 42-50.

Статьи в научных сборниках

6. *Роках А.Г., Стецюра С.В., Сердобинцев А.А., Жуков А.Г., Матасов М.Д.* Графическое представление вторично-ионного фотоэффекта из неоднородно легированной мишени // Вопросы прикладной физики : Межвуз. научн. сб. 2006. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2006. Вып. 13. С. 79-81.
7. *Роках А.Г., Сердобинцев А.А., Матасов М.Д.* Исследование спектральной характеристики вторично-ионного фотоэффекта // Вопросы прикладной физики : Межвуз. научн. сб. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007. Вып. 14. С. 35-40.
8. *Матасов М.Д.* Управление интенсивностью ионных пучков изменением спектрального состава подсветки. // Научные исследования студентов Саратовского государственного университета. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2008. С. 14-17.
9. *Матасов М.Д., Роках А.Г.* Возможна ли оптоионика? // Проблемы оптической физики и биофотоники : Материалы 12-ой Международной Молодежной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофотоники. Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2009. С 158-164.
10. *Роках А.Г., Кочубей В.И., Забенков И.В., Матасов М.Д., Березин А.С., Шишкин М.И.* Примесная фотолюминесценция и выход вторичных ионов меди в пленках CdS-PbS при освещении // Проблемы оптической физики и биофотоники, 2009, Материалы 13-ой Международной Молодежной науч. Школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. - 2009. Саратов: Изд-во «Новый ветер», С 84-92.
11. *Rokakh A.G., Matasov M.D.* External ionic photoeffect: Paradoxes and models// Physics express. 2011. Vol. 1, Iss. 1. P. 57-66.
12. *Rokakh A.G., Shishkin M. I., Perepelitsyn Yu. N., Venig S. B., Matasov M. D.* Connection of a secondary-ion photoeffect with crystallinity and photoconductivity of some semiconductor compounds // Physics Express. 2013. Vol. 3, Iss. 2. P. 1-8.

Материалы научных конференций

13. *Жуков А.Г., Матасов М.Д., Роках А.Г., Березин А.С.* Влияние спектра подсветки на выход молекулярных ионов из фотопроводящих мишеней // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XI междунар. конф. Ульяновск: УлГУ, 2009. С. 41.
14. *Матасов М.Д., Роках А.Г.* От оптоэлектроники к оптоионике. // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XI междунар. конф. Ульяновск: УлГУ, 2009. С. 27.
15. *Кочубей В.И., Матасов М.Д., Роках А.Г., Шишкин М.И.* Фотолюминесценция видимого диапазона пленок CdS–PbS // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XI междунар. конф. Ульяновск: УлГУ, 2009. С. 9.
16. *Матасов М.Д., Роках А.Г.* Вторичный ионный фотоэффект на ионах кремния. // XLV Школа ПИЯФ РАН. Секция физики конденсированного состояния. Гатчина, 2011. С. 118
17. *Шишкин М.И., Перепелицын Ю.Н., Матасов М.Д., Роках А.Г.* Фотопроводимость и фотоиндуцированное распыление монокристаллов GaAs // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы : Труды XIII междунар. конф. Ульяновск : УлГУ, 2011. С. 357.
18. *Шишкин М.И., Матасов М.Д., Перепелицын Ю.Н., Роках А.Г.* Особенности

продольной фотопроводимости и вторично-ионного фотоэффекта в монокристаллах *CdTe*. // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы : Труды XIII международной конференции. Ульяновск : УлГУ, 2011. С. 361.

19. Матасов М.Д., Роках А.Г. Фотоиндуцированное ионное распыление пленочной структуры *SiO-GaAs* // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы : Труды XIII междунар. конф. Ульяновск : УлГУ, 2011. С. 39.

20. Матасов М.Д., Роках А.Г. Электронно-микроскопическое исследование пленочной структуры *SiO-GaAs*, подвергнутой ионно-лучевому травлению. // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XIII междунар. конф. Ульяновск : УлГУ, 2011. С. 406.

21. Роках А.Г., Матасов М.Д., Сердобинцев А.А., Александров В.А. Фотоиндуцированный выход вторичных ионов *SiO-AlGaAs-GaAs*. // Труды XXII Междунар. научно-технической конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва: ФГУП «НПО Орион», 2012. С. 36-37

22. Матасов М.Д., Роках А.Г. Оценка мощности световой накачки узкозонной фазы при фотоиндуцированном распылении. // Труды XXII Междунар. научно-технической конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва: ФГУП «НПО Орион», 2012. С. 36-37

23. Шишкин М.И., Скапцов А.А., Матасов М.Д., Роках А.Г. О фотоэмиссии в дальнем инфракрасном диапазоне // Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика: тез. докл. VIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. С. 278-279.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Antal J. On the quantum theory of the emission of secondary ions // *Phys. Lett. A*. 1976. V. 8, Iss. 55. P. 493-494.
2. Gnaser and Hubert Low-Energy Ion Irradiation of Solid Surfaces. Berlin: Springer. 1999. Vol. 146. P. 7-82. (Interaction Low-Energy Ions with Solids).
3. Garrison B. J., Winograd N. and Harrison D. E. Atomic and molecular ejection from ion-bombarded reacted single-crystal surface. Oxygen on copper (100) // *Phys. Rev.* 1978. V. 18. Iss. 11. P. 6000-6010.
4. Сердобинцев А.А., Роках, А. Г.; Стецюра, С. В.; Жуков, А. Г. Вторично-ионная масс-спектрометрия фотопроводящих мишеней // *ЖТФ*. 2007. Т. 77. С. 96-100.

Подписано в печать 23.11.2013. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. – печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 567_а.

Типография «Новый Проект».
Саратов, Московская, 160.
Тел. 26-38-48