На правах рукописи

Лискин Дмитрий Александрович

Плазмонно-индуцированная фотопроводимость плёнок стабилизированного диоксида циркония с наночастицами Au

Специальность 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ).

Научный Филатов Дмитрий Олегович,
руководитель: доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» ННГУ.

Официальные Гришин Максим Вячеславович, физико-математических оппоненты: доктор наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова» Российской академии наук, лаборатория физики наноструктур, химической ведущий научный сотрудник.

Борисюк Пётр Викторович,

кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», и.о. заведующего кафедрой физико-технических проблем метрологии.

Ведущая Федеральное государственное автономное образовательное организация: учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Защита диссертации состоится "<u>5</u>" <u>октября</u> 2022 г. в <u>14-00</u> на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 при ННГУ им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022 Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23, корпус 3, ауд. 227 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ННГУ им. Н.И. Лобачевского и на сайте https://diss.unn.ru/1257

Автореферат разослан "____" июля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.340.01, кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

Актуальность темы диссертации

Создание новых материалов со структурой нанометрового масштаба, демонстрирующих электрофизические, оптические и другие свойства, является одним из приоритетных направлений развития физики конденсированного состояния, твердотельной микроэлектроники и оптоэлектроники [1, 2]. Особое внимание уделяется нанокомпозитным материалам на основе диэлектриков со встроенными металлическими наночастицами (МНЧ) [3, 4], которые демонстрируют специфические спектры оптического поглощения, связанные с возбуждением плазмонных колебаний в МНЧ.

экспериментальных Анализ И теоретических исследований показывает, что к настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных изучению коллективных плазмонных колебаний в МНЧ [5, 6], достаточно хорошо развиты технологии формирования структур с металлическими нановключениями, в том числе и в матрицах на основе оксидов. Построены теоретические модели для описания оптических свойств таких структур [7, 8]. Такие материалы находят применение при создании оптических фильтров, фотоэлектрических преобразователей с повышенными характеристиками, при разработке твердотельных лазеров, в медицине. В частности, продемонстрирована возможность увеличения эффективности преобразования энергии фотоэлементов до 8,92% и внешнего квантового выхода ~ 81,5% за счёт встраивания массива наночастиц (НЧ) Ад в активный приборный слой [9]. активные исследования по применению специальных Ведутся биологических растворов с МНЧ для излечения раковых заболеваний [10]. Эффект плазмонного оптического поглощения в МНЧ позволяет локально разогревать раковые клетки до заданных температур, что приводит к их гибели.

В то же время фотоэлектронные процессы, такие, как плазмоннофотопроводимость индуцированная (ΦΠ) в нанокомпозитных диэлектрических структурах (плёнках), остаются слабо изученными. Опубликовано лишь ограниченное число работ, в которых представлены экспериментальные результаты наблюлении 0 изменения электросопротивления плёнок диэлектрика с внедрёнными МНЧ. обусловленного коллективными плазмонными возбуждениями в плотных массивах МНЧ (см., например, [11, 12]). Спектры ФП нанокомпозитов с МНЧ имеют пик проводимости, который связан с пиком оптического возбуждения поверхностных плазмонно-поляритонных колебаний в МНЧ [13, 14]. Вместе с тем практически не изучены детали механизма плазмонно-индуцированной ФП в таких системах, а также процессы

преобразования энергии плазмонных колебаний в массивах МНЧ в изменение электропроводности нанокомпозитных структур.

Исследования в данном направлении являются актуальными с точки зрения установления механизмов ФП в таких материалах, результаты исследований могут применяться при создании твердотельных лазеров, волоконных планарных волноводов и усилителей, управляемой светом энергонезависимой памяти и других оптоэлектронных приборов.

В настоящей работе впервые на примере оксида переходного металла ZrO₂(Y) со встроенными НЧ Аи исследована ФП, обусловленная поверхностными плазмонными возбуждениями массиве МНЧ. в Объектами исследования являлись тонкоплёночные структуры на основе ZrO₂(Y) с НЧ Аu, сформированные в оксидном слое на подложках из плавленого кварца методом послойного магнетронного осаждения с последующим отжигом. Выбор диэлектрической матрицы связан с тем, что стабилизированный иттрием в кубической фазе диоксид циркония является всесторонне изученным материалом, который нашёл широкое применение в различных областях науки и техники (материал для твердотельных топливных элементов, кислородных датчиков, термобарьерных покрытий, резистивных энергонезависимых элементов памяти и др.). В силу высоких значений статической диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 25$) и показателя преломления в видимом диапазоне (*n* ≈ 2,1) данный материал является перспективным для использования в качестве подзатворного high-к диэлектрика в МОП транзисторах, оптоэлектронике И интегральной оптике. Кубический $ZrO_2(Y)$ характеризуется повышенной полвижностью ионов кислорода. С вакансиями кислорода в ZrO₂(Y) связаны глубокие дефектные состояния в запрещённой зоне диэлектрика [15]. Когда молярная доля Y2O3 в ZrO2 составляет ~ 0,1, кислородные вакансии образуют дефектную зону (αзону) [16] в ZrO₂(Y), которая оказывает влияние на механизм электропроводности.

Ha момент работы над диссертацией начала литературе в исследованиях об отсутствовали данные ΦП в плёнках стабилизированного (в кубической фазе) диоксида циркония ZrO₂(Y) с внедрёнными в них МНЧ. В связи со сказанным выше исследование механизма ФП в плёнках ZrO₂(Y) с массивами МНЧ является актуальным.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является установление механизмов фотопроводимости в плёнках ZrO₂(Y) с однослойными массивами наночастиц Au.

В работе решаются следующие задачи:

 измерение спектров оптического пропускания и спектра фотопроводимости плёнок ZrO₂(Y) с наночастицами Au;

 изучение зависимости фотопроводимости от интенсивности фотовозбуждения, кинетики, температурных зависимостей фотопроводимости планарных образцов на основе плёнок ZrO₂(Y) с наночастицами Au;

• моделирование болометрической проводимости и фотопроводимости в матрице ZrO₂(Y) с наночастицами Au;

• изучение локальной поперечной фотопроводимости ультратонких плёнок ZrO₂(Y) с наночастицами Au методом контактной туннельной атомно-силовой микроскопии.

Научная новизна и практическая значимость работы

• Впервые экспериментально установлено, что механизм фотопроводимости в материалах на основе плёнок ZrO₂(Y) с однослойными массивами наночастиц Au обусловлен фотовозбуждением коллективных плазмонных колебаний в наночастицах Au, фотоэмиссией электронов из наночастиц Au в дефектную α-зону в плёнках ZrO₂(Y) и болометрическим эффектом.

• Показано, что на формирование фотопроводимости в плёнках ZrO₂(Y) с наночастицами Au существенное влияние оказывает наличие дефектной α-зоны, которая образуется в диоксиде циркония после стабилизации иттрием.

• Установлено, что температурная зависимость проводимости в плёнках ZrO₂(Y) с наночастицами Au подчиняется закону Мотта, а при температурах ниже 230 К болометрическая проводимость подчиняется закону Эфроса-Шкловского.

• С помощью зондовых измерений (атомно-силовой микроскопии) показано, что поперечная проводимость носит прыжковый характер, а при высоких значениях напряжённости электрического поля проявляется механизм электронной автоэмиссии из НЧ Аu.

Основные положения, выносимые на защиту

• Фотопроводимость плёнок ZrO₂(Y) с наночастицами Au обусловлена возбуждением коллективных плазмонных колебаний в плотных массивах наночастиц Au и включает два процесса: 1) фотоэмиссию электронов из наночастиц Au в α-зону ZrO₂(Y) и 2) болометрический эффект — увеличение проводимости по α-зоне ZrO₂(Y) из-за нагрева матрицы в слое наночастиц, разогретых вследствие плазмонного возбуждения.

• Болометрический механизм фотопроводимости плёнок $ZrO_2(Y)$ с наночастицами Au доминирует при высоких температурах (≈ 300 K) и

ослабевает с понижением температуры вследствие уменьшения прыжковой проводимости в матрице ZrO₂(Y) между наночастицами Au.

• В области низких температур ($T \sim 77$ K) доминирует компонента, связанная с плазмон-индуцированным возбуждением электронов с уровня Ферми наночастиц Au в вакансионную α -зону барьеров $ZrO_2(Y)$ и транспортом электронов по α -зоне между ближайшими наночастицами Au.

• Фотопроводимость в поперечной геометрии при напряженности электрического поля ~ 10⁷ В/см и выше подчиняется закону Фаулера и обусловлена фотовозбуждением электронов в наночастицах Au с последующим туннелированием через потенциальный барьер на границе материалов Au/ZrO₂(Y) (полевая эмиссия).

Личный вклад автора в получение результатов работы

Результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Проведение и планирование экспериментов научными сотрудниками выполнялось совместно с Научнообразовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» (НОЦ ФТНС) к.ф.-м.н. М.Е. Шениной, к.ф.-м.н. А.П. Горшковым, к.ф.-м.н. Д.А. Антоновым. Для объяснения экспериментальных данных автор выполнил аналитическое моделирование фотопроводимости исследуемых структур. Постановка целей и задач диссертации, планирование и проведение экспериментов, анализ результатов экспериментов и их обобщение, расчёты, подготовка докладов для научных конференций и публикаций в научных журналах по тематике исследования осуществлялись совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Д.О. Филатовым.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современной и зарекомендовавшей себя измерительной техники, соответствующей мировому уровню, комплексом хорошо апробированных экспериментальных известных И методик И воспроизводимыми моделей, экспериментальными теоретических данными. Исследования диссертации опираются на результаты работ, ранее опубликованные по данной тематике, и обширную литературную базу, приведённую в списке литературы.

Апробация работы

Основные результаты исследовательской работы докладывались на всероссийских и международных научных конференциях:

• 18-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (28 ноября – 2 декабря 2016 г., Санкт-Петербург).

• XXI, XXII международные симпозиумы «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Бор, 2017 – 2018 г.);

6

Промежуточные результаты работы докладывались на семинарах НОЦ ФТНС Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (ННГУ).

<u>Публикации</u>

По теме диссертационной работы автором опубликовано в соавторстве 6 печатных научных работ. Основные результаты работы представлены в 3 статьях, опубликованных в российских и зарубежных изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ и в 3 публикациях в материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из списка основных сокращений и обозначений, введения, 4 глав основного содержания, заключения, списка литературы, приложения. Текст диссертации содержит 120 страниц, включая 44 рисунка и 5 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 99 наименований. В приложении приведён список публикаций автора по теме диссертации.

Основное содержание диссертации

Во **Введении** обоснована актуальность научного направления, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора в получение результатов работы, сведения об апробации работы, публикациях автора по теме диссертации.

<u>Глава 1</u> диссертации представляет собой литературный обзор. Рассмотрены вопросы, связанные с методами получения МНЧ на поверхности и в объеме диэлектриков [13, 17]. Проанализированы результаты исследований оптических свойств диэлектрических матриц со встроенными МНЧ, в том числе двумерных массивов плотно упакованных НЧ [13]. Опубликованы отдельные работы, в которых авторы на основании совпадения спектрального положения пиков в спектрах ФП и оптического поглощения исследуемых образцов [13] сделали вывод, что наблюдаемая ФП обусловлена возбуждением поверхностных плазмонполяритонных колебаний в массиве НЧ [18], а также вывод о том, что эффект ФП имеет болометрическую природу.

В целом анализ литературных данных позволяет сделать вывод, что ФП в диэлектрических плёнках с МНЧ зависит как от плазмонных свойств массивов МНЧ, так и от механизма проводимости матрицы, в которую встраивают МНЧ. Механизм ФП диэлектрических материалов на основе оксидов переходных металлов с МНЧ остаётся неизученным.

В <u>Главе 2</u> приводится технология изготовления планарных структур для исследования ФП, экспериментальные методики исследований и методика обработки спектров фоточувствительности.

Образцы нанокомпозитных плёнок ZrO₂(Y) со встроенными НЧ Au сформированы исследований ΦП были высокочастотным для магнетронным распылением в смеси газов Ar-O₂ (50:50 % мол.) из порошковых оксидных мишеней при помощи вакуумной системы Torr International[®] MSS-3GS. Молярная доля стабилизирующего оксида Y₂O₃ в мишени была $\approx 0,12$, температура подложки составляла $T_g \approx 300^{\circ}$ С. Нанокомпозитные пленки ZrO2(Y) были осаждены на полированных подложках из плавленого кварца. Для измерений ФП были сформированы при помощи фотолитографии полосковые электроды Au(20 нм)/Cr(20 нм), отстоящие друг от друга на ~ 1 мм. Зазор между кончиками электродов составлял ~ 1 мкм, электроды в зазоре были заострены с целью увеличения напряжённости электрического поля. ПЭМ снимок и схема образцов представлены на рис. 1.



Рис. 1. *а* — ПЭМ изображение поперечного среза плёнки ZrO₂(Y) с HЧ Au [19], б — схема структуры для исследований ФП (поперечное сечение зазора между электродами).

Измерение фототока выполнялось при помощи методики синхронного детектирования с модулированным фотовозбуждением. Для фотовозбуждения использовался лазер с длиной волны $\lambda = 660$ нм (что соответствует длине волны плазмонного резонанса в исследуемых структурах) и мощностью P = 1 Вт.

Измерения спектров оптического пропускания проводились в двулучевом режиме при 300 К. Спектры ФП измерялись при помощи методики с набором полосовых светофильтров. В качестве широкополосного источника фотовозбуждения использовалась Хе лампа мощностью 500 Вт. При измерении спектров ФП с целью увеличения фоточувствительности изготавливались образцы в плоской геометрии со встречно-штыревой структурой (ВШС) размером 5х5 мм².

В <u>Главе 3</u> представлены результаты исследования ФП в планарных структурах на основе плёнок ZrO₂(Y) толщиной 40 нм с однослойными массивами наночастиц Au диаметром в диапазоне 1 – 3 нм. Приводятся результаты исследований кинетики ФП, зависимости ФП от уровня фотовозбуждения, температурных, спектральных и полевых зависимостей ФП. Приводится аналитическое моделирование болометрической проводимости планарных структур.

В спектрах фоточувствительности (фотопроводимости) зафиксирован пик на длине волны 660 нм (рис. 3), положение которого практически совпадает с положением максимума в спектрах оптического пропускания в плёнках $ZrO_2(Y)$ с НЧ Au (рис. 2), обусловленного плазмонным поглощением в массиве наночастиц. Ширины и положения соответствующих максимумов в спектрах оптического пропускания и ФП совпадают, что даёт основание утверждать о плазмонно-индуцированном характере ФП.



Рис. 2. Спектры оптического пропускания (300 К) плёнок ZrO₂(Y) с HЧ Au на подложке из плавленого кварца. Номинальная толщина слоя Au d_{Au} , нм: 1 — 2,0; 2 — 1,0; 3 — 0,5; 4 — 0

(подложка SiO₂).



Рис. 3. Спектр фоточувствительности структуры ZrO₂(Y) с НЧ Au с ВШС электродами.

С целью выяснения механизмов ФП измерялись зависимости ФП от интенсивности, частоты модуляции возбуждающего излучения и температуры структуры. На рис. 4 представлены зависимость ФП плёнки $ZrO_2(Y)$ с НЧ Au от интенсивности фотовозбуждения I_{ex} при $\lambda = 660$ нм и при температурах 300 К и 77 К.



Рис. 4. Зависимость ФП плёнки $ZrO_2(Y)$ с НЧ Au от интенсивности фотовозбуждения I_{ex} при $\lambda = 660$ нм при *T*: *1* — 300 K, *2* — 77 K.

Как видно из рис. 4, зависимость $\Phi\Pi$ от интенсивности фотовозбуждения I_{ex} имеет суперлинейный характер при 300 К, однако при 77 К наблюдалась сублинейная зависимость. Различный характер кривых 1 и 2 указывает на различные механизмы $\Phi\Pi$ при разных температурах.

Влияние разогрева матрицы в области локализации НЧ Аи, обусловленного их собственным разогревом [18] В результате резонансного оптического поглощения и возбуждения плазмонных колебаний, было исследовано с помощью изучения кинетики ФП. Показано. что амплитуда переменной составляющей ΦП при модулированном фотовозбуждении на длине волны $\lambda = 660$ нм (T = 300 K) уменьшается с увеличением частоты модуляции f (рис. 7, кривые 1 и 3). Полученные результаты указывают на проявление болометрического эффекта и его вклад в наблюдаемую ФП. Это подтвердили и результаты измерений ФП от f, выполненные при 77 K, которые показали слабую зависимость (независимость) ФП от частоты модуляции. Установлено, что температурная зависимость I_{ph} при фотовозбуждении на длине волны ПР $\lambda_R = 660$ нм вблизи 300 К подчиняется закону Мотта так же, как и температурная зависимость темнового тока I_d (рис. 5). При низких температурах температурная зависимость проводимости подчиняется закону Эфроса-Шкловского.

Величина ФП зависит от устройства зонной структуры диэлектрика. Возможными механизмами ФП в плёнках $ZrO_2(Y)$ с НЧ Аи является внутренняя фотоэмиссия электронов с уровня Ферми в НЧ Аи в α -зону $ZrO_2(Y)$ или в зону проводимости $ZrO_2(Y)$. В диссертации исследовались также структуры с НЧ Аи на основе нестабилизированного ZrO_2 , в котором α -зона отсутствует. Для таких структур ФП на ~ 2 порядка ниже, чем в структурах на основе стабилизированного диоксида циркония (рис. 7, кривые 1 и 3).



Рис. 5. Температурные зависимости фототока (2) и темнового тока (1) для плёнки $ZrO_2(Y)$ с HЧ Au. $V_g = 10$ B, $\lambda = 660$ нм, P = 1 BT.

Полученные результаты подтверждают предположение, что транспорт фотовозбуждённых электронов межу НЧ Au по α -зоне в ZrO₂(Y) происходит по прыжковому механизму. При $T \approx 230$ K на температурной зависимости I_{ph} наблюдается излом, который можно связать с влиянием кулоновской щели в плотности состояний.



Рис. 6. Зависимости фототока от интенсивности модулированного фотовозбуждения: 1, 3 — результаты измерений фототока при 300 и 77 К; 2 и 4 — результат расчёта болометрического тока при 300 и 77 К.

Чтобы подтвердить болометрический механизм, обусловленный прыжковой проводимостью носителей по α-зоне, выполнялось моделирование болометрического тока. И решалась залача теплопроводности. Считалось, что поглощение происходит в слое НЧ Аи, остальные материалы прозрачные. Для расчёта тока использовались аппроксимации температурных экспериментальных зависимостей Мотта и Эфроса-Шкловского.

На рис. 6 представлены результаты моделирования болометрического тока в зависимости от интенсивности модулированного фотовозбуждения.



Рис. 7. Зависимости ФП плёнки $ZrO_2(Y)$ с HЧ Au ($d_{Au}=2,0$ нм) от частоты модуляции f: l, 3 — эксперимент (300 K), 2, 4 — расчёт при 300 К и 77 К. $I_{ex} = 65$ Вт/см², $\lambda = 660$ нм. Молярная доля Y: l — 0,12, 3 — 0.

На рис. 7 представлены результаты расчёта кинетики $\Phi\Pi I_{ph}(f)$ при температурах 300 К (кривая 2) и 77 К (кривая 4). Кривые фототока при 300 К на рис. 6-7 близки по абсолютному значению.

Различия между экспериментальными и расчётными кривыми при температуре 77 К (рис. 6) по абсолютному значению объясняется тем, что проводимость при 77 К нельзя объяснить лишь болометрическим механизмом. Другим механизмом ФП является фотоэмиссия электронов из НЧ Аu, не зависящая от частоты модуляции лазерного луча.

<u>Глава 4</u> содержит результаты исследований локальной поперечной ФП тонких (~ 4 нм) плёнок ZrO₂(Y) с массивами наночастиц Au на кварцевой подложке с проводящим подслоем ITO толщиной ~ 1 мкм при помощи туннельной атомно-силовой микроскопии (ACM).

Результаты исследований показали, что, как и в случае планарной геометрии, локальная поперечная ФП имеет прыжковый механизм. Показано также, что при увеличении напряжённости электрического поля проводимость меняет характер на полевой (подчиняется закону Фаулера).



Рис. 8. Схема эксперимента по изучению локальной поперечной ФП плёнок ZrO₂(Y) с HЧ Au методом туннельной ACM.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в контактной моде при фотовозбуждении области контакта сфокусированным лазерным лучом с длиной волны 660 нм (рис. 8).



Рис. 9. ВАХ контакта АСМ зонда с поверхностью плёнки ZrO₂(Y)/ITO с наночастицами Au (темновая и при фотовозбуждении).

На рис. 9 приведены ВАХ контакта ACM зонда с поверхностью плёнки $ZrO_2(Y)$ с HЧ Au — темновая и при фотовозбуждении. Увеличение силы электрического тока через ACM зонд I_t при фотовозбуждении связано с внутренней фотоэмиссией электронов с уровня Ферми в HЧ Au в зону проводимости матрицы $ZrO_2(Y)$, усиленной плазмонным резонансом в HЧ Au.

В области напряжений 1 – 4 В ВАХ имеет экспоненциальный вид, что указывает на механизм прыжковой проводимости через α -зону в ZrO₂(Y). Высокое значение электрического поля в промежутках между НЧ не удавалось получить в планарных структурах. В экспериментах по измерению поперечной ФП напряжённость электрического поля может достигать величин ~ 10⁷ В/см и выше. На рис. 10 представлен участок ВАХ контакта АСМ зонда с поверхностью плёнки ZrO₂(Y) с НЧ Аu, измеренный в условиях фотовозбуждения, в координатах $I_t/(V_g)^2 - 1/V_g$. Участок ВАХ в области напряжений $V_g = 4 - 5$ В спрямляется в координатах Фаулера, что



Рис. 10. Участок ВАХ контакта АСМ зонда с поверхностью плёнки ZrO₂(Y)/ITO с наночастицами Au, измеренной в условиях фотовозбуждения, в координатах Фаулера.

туннелирование носителей указывает через треугольный на потенциальный барьер (в режиме автоэлектронной эмиссии), то есть при достаточно высокой напряжённости электрического поля проводимость меняет характер на полевой (закон Фаулера-Нордхейма). Значение высоты потенциального барьера для туннелирования ф, полученное аппроксимацией прямого участка ВАХ формулой Фаулера, составляет ≈ 0,5 эВ, что в совокупности с энергией фотона $hv \approx 1,9$ эВ близко к высоте барьера на границе $Au/ZrO_2(Y)$ (≈ 2.5 эВ). потенциального Лля механизма фотоэмиссии была смоделирована объяснения зонная диаграмма.

В <u>Заключении</u> сформулированы основные результаты диссертационной работы:

• Разработана технология получения тонких плёнок (4-40 нм) на основе $ZrO_2(Y)$, ZrO_2 с массивами наночастиц Au. Наночастицы Au по форме, близкой к сферической и диаметром $D \sim 1-3$ нм, располагались в одной плоскости посередине плёнок диэлектриков. Среднее расстояние между наночастицами составляло $L \sim 3-4$ нм.

• Разработаны макеты и топологии образцов для исследования планарной и локальной поперечной фотопроводимости. Использовались образцы трёх видов: образцы с полосковыми электродами и встречноштыревые структуры (на основе диэлектрических плёнок толщиной 40 нм с массивами наночастиц на кварцевой подложке), тонкие плёнки ZrO₂(Y) толщиной ~ 4 нм со встроенными массивами наночастиц Au на проводящих прозрачных подложках для исследования поперечной фотопроводимости методом комбинированной ACM/CTM.

• Установлено, что фотопроводимость плёнок ZrO₂(Y) со встроенными массивами наночастиц Au состоит из двух компонент: обусловленная фотовозбуждением электронов в наночастицах Au и связанная с болометрическим эффектом. Компоненты

фоточувствительности доминируют при различных температурах. В области низких температур (Т ~ 77 К) доминирует компонента, связанная с плазмон-индуцированным фотовозбуждением электронов с уровня Ферми наночастиц Au в вакансионную α-зону барьеров ZrO₂(Y) и транспортом электронов по α-зоне между ближайшими наночастицами Аи. В области высоких температур (Т ~ 300 К) преобладает $ZrO_2(Y)$ болометрический вследствие между механизм нагрева наночастицами разогретыми Au, при плазмонном оптическом поглощении.

• Построена аналитическая модель теплопроводности тонкой плёнки на подложке с тепловыделением в бесконечно тонком слое, расположенном в сечении посередине плёнки. На основании полученной модели выполнено моделирование болометрической проводимости образцов на основе ZrO₂(Y) с наночастицами Au.

• Исследования локальной поперечной фотопроводимости при помощи комбинированной ACM/CTM показали, что поперечная фотопроводимость подчиняется закону Фаулера при напряженности электрического поля в $ZrO_2(Y) \sim 10^7$ В/см и выше и обусловлена оптическим возбуждением электронов в наночастицах Au с последующим туннелированием через потенциальный барьер на границе материалов Au/ZrO₂(Y) (полевая эмиссия).

В <u>Приложении</u> приводится список публикаций по теме диссертации:

A1. D A Liskin, D O Filatov, O N Gorshkov, A P Gorshkov, I N Antonov, M E Shenina, S Y Zubkov, and D S Sinutkin. Plasmon resonance induced photoconductivity of $ZrO_2(Y)$ films with embedded Au nanoparticles. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 816, 012010 (2017).

A2. D. O. Filatov, I. N. Antonov, D. Yu. Sinutkin, D. A. Liskin, A. P. Gorshkov, O. N. Gorshkov, V. E. Kotomina, M. E. Shenina, S. V. Tikhov, and I. S. Korotaeva. Plasmon Resonance Induced Photoconductivity in the Yttria Stabilized Zirconia Films with Embedded Au Nanoclusters. ISSN 1063-7826, Semiconductors. V. 52, $N_{\rm P}$ 4, p. 465–467 (2018).

АЗ. Д. А. Лискин, Д. О. Филатов, О. Н. Горшков, Д. А. Антонов, И. Н. Антонов, М. Е. Шенина, А. С. Новиков. Исследование локальной фотопроводимости пленок ZrO₂(Y) с наночастицами Аи методом туннельной атомно-силовой микроскопии. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 5, с. 70–74 (2019).

А4. Д.А. Лискин, Д.О. Филатов. Фотопроводимость плёнок ZrO₂(Y) со встроенными наночастицами Au. Тезисы докладов 18-й всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур,

полупроводниковой опто- и наноэлектронике. 28 ноября – 2 декабря 2016 года, Санкт-Петербург, издательство Политехнического университета, с. 30.

А5. Д.О. Филатов, Д.А. Лискин, О.Н. Горшков, А.П. Горшков, И.Н. Антонов, В.Е. Котомина, М.Е. Шенина, С.В. Тихов, И.С. Коротаева, Д.С. Синуткин. Фотопроводимость плёнок ZrO₂(Y) со встроенными наночистицами Аu, индуцированная плазмонным резонансом. Материалы XXI Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». 13-16 марта 2017 г., Нижний Новгород, издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. Том 2, с. 750-751.

Аб. Д.А. Лискин, Д.О. Филатов, О.Н. Горшков, Д.А. Антонов, И.Н. Антонов, М.Е. Шенина, А.С. Новиков. Исследование локальной фотопроводимости плёнок ZrO₂(Y) с наночастицами Au методом туннельной атомно-силовой микроскопии. Материалы XXII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». 12-15 марта 2018 г., Нижний Новгород, издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. Том 1, с. 336-337.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № 3.2441.2014/К и 16.7864.2017/БЧ).

Список литературы

1. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Основы наноэлектроники. Учебное пособие, Новосибирск: издательство НГТУ (Новосибирский государственный технический университет), 332 стр. (2000).

2. L.E. Foster. Nanotechnology: Science, Innovation, and Opportunity. Prentice Hall PTR (2005).

3. Intech Open. Plasmonics – Principles and Applications. Edited by Ki Young Kim, 558 p. (2012).

4. N.G. Bastús, J. Piella, V.F. Puntes. Quantifying the Sensitivity of Multipolar (Dipolar, Quadrupolar and Octapolar) Surface Plasmon Resonances in Silver Nanoparticles: The Effect of Size, Composition and Surface Coating. Langmuir, Just Accepted Manuscript (2015).

5. A. Trügler. Optical Properties of Metallic Nanoparticles: Basic Principles and Simulation. Berlin-Heidelberg: Springer, 227 p. (2016).

6. H. Ammari, Y. Deng, P. Millien. Arch. Rational Mech. Anal., v. 220, p. 109 (2016).

7. G. Mie. Beitrage zur optic truber Medien, speziell kolloidaler Metallosungen. Annalen der Physik, b. 3, s. 377–445 (1908).

8. A. Meldrum et al. Structure and properties of nanoparticles formed by ion implantation. Topics Appl. Physics, v. 116, p. 255–285 (2010).

9. J.A. Tofflinger, E. Pedrueza, V. Chirvony et al. Photoconductivity and optical properties of silicon coated by thin TiO2 film in situ doped by Au nanoparticles. Phys. Status Solidi A, 210, N° 4, 687–694 (2013).

10. A. Blaeser, N. Million, D.F. Duarte Campos et al. Laser-based in situembedding of metal nanoparticles into bioextruded alginate hydrogel tubes enhances human endothelial cell adhesion. Nano Research (2016).

11. M. Pelton, J. Aizpurua, G. Bryant. Laser & Photon, v. 2, p. 136 (2008).

12. P. Banerjee, D. Conklin, S. Nanayakkara et al. ACS Nano, v. 4, p. 1019 (2010).

13. E.V. Shirshneva-Vaschenko, I.M. Sosnin, R.K. Nuryev et al. Electrical and optical properties of transparent conducting ZnO:Al/AgNP multilayer films. Materials Physics and Mechanics, v. 29, p. 145-149 (2016).

14. T. Hashimoto. Electrical detection of surface plasmon resonance phenomena by a photoelectronic device integrated with gold nanoparticle plasmon antenna. Applied Physics Letters, 102(8), 083702 1–4 (2013).

15. E.V. Gusev (Ed.). Defects in High-k Gate Dielectric Stacks. Nano-Electronic Semiconductor Devices. Berlin-Heidelberg: Springer, 492 (2006).

16. H.A. Abbas. Stabilized Zirconia for Solid Oxide Fuel Cells or Oxygen Sensors. Characterization of Structural and Electrical Properties of Zirconia Doped with Some Oxides. New York: LAP Lambert Academic (2012).

17. F. Ren, X. Heng, X. Guang et al. Engineering embedded metal nanoparticles with ion beam technology. Appl. Phys. A., 96, 2, p. 317-326 (2009).

18. M.A. Mangold, C. Weiss, M. Calame et al. Appl. Phys. Lett., v. 94, № 16, p. 161104 (2009).

19. O. Gorshkov, I. Antonov, D. Filatov et al. Adv. Mater. Sci. Eng., 1759469 (2017).