

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number: 1027000890168,  
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



ТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе и  
инновациям ТПУ, д.х.н., профессор

*Ю. С.*  
Юсубов М. С.

10 декабря 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Жидика Юрия Сергеевича на тему «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объёмом 159 страниц основного текста, включая 83 рисунка и 10 таблиц, а также библиографический список из 150 наименований;
- автореферат на 21 странице, в котором изложены основные положения диссертации и представлен список публикаций автора по теме работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений.

### Актуальность работы

Повышение эффективности оптоэлектронных приборов является одним из важных направлений развития современной техники. Поэтому значительный научный и практический интерес представляют исследования по разработке

способов формирования прозрачных омических контактов на гетероэпитаксиальных структурах. Такие контакты не препятствуют прохождению светового излучения и способствуют равномерному распределению тока по поверхности.

Наиболее перспективным материалом для прозрачных омических контактов является легированный оловом оксид индия (ITO), осаждение которого технологически лучше всего производить с помощью реактивного магнетронного распыления.

Однако здесь есть трудности, которые связаны как с необходимостью достичь требуемой электропроводности и прозрачности омических контактов, так и обеспечить стабильность их характеристик и, по возможности, снизить радиационно-термическое воздействие потока заряженных частиц на поверхность полупроводниковой подложки в процессе осаждения плёнок ITO.

В работе Жидика Ю.С. предложены, исследованы и успешно реализованы пути решения этих проблем, актуальных для современной оптоэлектроники.

**Целью работы** является создание научно-практических основ технологии получения высокопроводящих прозрачных омических контактов из плёнок ITO на поверхности гетероэпитаксиальной структуры путём реактивного магнетронного распыления при условии снижения радиационно-термического воздействия на подложку. Другой аспект работы заключался в изучении свойств данных плёнок и их влияния на характеристики оптоэлектронных устройств.

### **Анализ содержания диссертации**

Во *Введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, приведены защищаемые положения, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

В *Главе 1* дан обзор литературы по теме работы. На его основе автором установлено, что для получения плёнок ITO оптимальным является реактивное магнетронное распыление мишени из сплава индия и олова. Отмечена необходимость уменьшения воздействия заряженных частиц на полупроводниковую подложку.

*Глава 2* посвящена исследованию путей осаждения и изучению свойств низкоомных слоёв ITO с большими коэффициентами пропускания видимого света. В результате этой работы подобраны два оптимальных технологических

режима, детально рассмотрены характеристики полученных плёнок, выявлена смена механизма их электропроводности после отжига.

В *Главе 3* выполнена разработка магнитной системы для снижения воздействия потока заряженных частиц газоразрядной плазмы на подложку во время осаждения тонких слоёв ИТО. Применение этой системы показало, что в результате энергия бомбардирующих подложку электронов, концентрация заряженных частиц вблизи подложки и её температура заметно снизились.

*Глава 4* посвящена исследованиям практического применения плёнок ИТО в качестве омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы  $A_3B_5$ . Установлено, что все контакты являются омическими. При использовании магнитной отклоняющей системы, контактное сопротивление слоя ИТО показало большую стабильность. На основе полученной информации разработан технологический маршрут изготовления электрооптического модулятора. Моделирование светодиоидного чипа со слоем растекания тока из плёнки ИТО показало увеличение его КПД более чем на 50%.

В *Заключении* обобщены основные результаты выполненной работы.

#### **Обоснованность защищаемых научных положений и выводов**

Защищаемые положения и выводы однозначно следуют из полученного в работе экспериментального материала. В целом они корректно сформулированы, адекватно отражают содержание диссертации и имеют хорошую доказательную базу.

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, а также выводы и положения, выносимые на защиту.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением современного аттестованного и сертифицированного оборудования, методов измерения характеристик исследуемых образцов, а также корректным сравнением полученных данных со сведениями, приведёнными в публикациях других авторов.

Результаты, изложенные в диссертации, носят непротиворечивый характер, взаимно дополняют друг друга и соответствуют существующим представлениям о процессах на поверхности твёрдого тела и свойствах тонких плёнок ИТО.

Кроме того, их достоверность подтверждена апробацией на ряде научных семинаров, а также в процессе выступлений автора на российских и международных конференциях.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Показано, что при реактивном магнетронном распылении металлической мишени, прозрачные проводящие плёнки ИТО, осаждённые на полупроводниковые гетероэпитаксиальные структуры, формируют омический контакт.

2. Разработана и подтвердила свою высокую эффективность специальная магнитная система, позволяющая снизить радиационно-термическую нагрузку на подложку.

3. Доказано, что отжиг плёнок ИТО при температуре более 300 °С приводит к необратимому изменению их механизма электропроводности, который становится ближе к электропроводности металлов.

### **Практическая значимость**

Проведённые исследования являются полноценной основой для создания перспективной промышленной технологии формирования электропроводящих оптически прозрачных омических контактов и слоёв растекания тока для оптоэлектронных приборов на основе гетероструктур. Результаты работы представляются особенно полезными в случае термочувствительных подложек, когда осаждение тонких плёнок на их поверхность ведётся с использованием плазменного магнетронного распыления. Практическая значимость её подтверждается актами об использовании результатов.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника; п. 2. Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника; п. 6. Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких плёнок и плёночных структур.

Результаты диссертационной работы хорошо представлены на российских и зарубежных научных конференциях, а также опубликованы в журналах, индексируемых в системе SCOPUS и рекомендованных ВАК. Автором получены три патента РФ.

Мы не обнаружили в работе серьёзных смысловых ошибок и противоречий. Но у нас есть несколько **существенных замечаний**.

1. Изменение спектров пропускания плёнок ИТО при различных режимах теплового воздействия соискатель связывает с флуктуацией концентрации свободных электронов. Однако механизм этого влияния не обсуждается.

2. Автор использует понятие оптимальной скорости осаждения покрытий при наиболее выгодном соотношении потоков аргона и кислорода. Но в диссертации отсутствует методика выбора их количественных значений.

3. Автором предложены два варианта технологий осаждения плёнок ИТО, отличающихся содержанием Ar и O<sub>2</sub> в газовой смеси. Остальные параметры поддерживаются постоянными. Свойства этих плёнок существенно различаются. Однако в диссертации слабо затронут вопрос о влиянии состава газовой смеси на параметры плёнок ИТО.

4. На стр. 73 диссертации приведены сведения о влиянии фотолитографии на поверхностное сопротивление  $\rho_s$ . Указано, что при этой операции происходит увеличение  $\rho_s$  на 8,5%, а при проведении допроявления - на 27%. При этом не дано заключение о том, являются ли эти изменения приемлемыми.

Высказанные замечания не снижают нашей общей положительной оценки работы, которая выполнена на должном уровне.

### **Заключение**

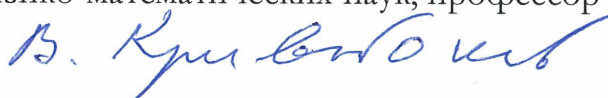
Проведённый анализ позволяет утверждать, что диссертация Жидика Ю.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для физической электроники и оптоэлектроники. Получены новые данные, которые являются физико-химическими основами технологии формирования прозрачных

проводящих оптических контактов и других функциональных слоёв оптоэлектронных приборов.

Считаем, что по содержанию, объёму проведённых исследований, качеству полученных результатов, научной новизне и практической значимости представленная к защите диссертация соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Жидик Юрий Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены и одобрены на научном семинаре Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга Инженерной школы ядерных технологий ТПУ, протокол № 181 от 09.12.2019.

Заведующий кафедрой - руководитель Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга на правах кафедры Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор физико-математических наук, профессор



**Кривобоков В.П.**

Кривобоков Валерий Павлович, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30  
Телефон: (3822) 606-418 (вн. 2317), E-mail: [krivobokov@tpu.ru](mailto:krivobokov@tpu.ru)

Научный сотрудник лаборатории «Радиационные и плазменные технологии» Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук



**Баинов Д.Д.**

Баинов Даши Дамбаевич, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30  
Телефон: (3822) 606-415, E-mail: [das@tpu.ru](mailto:das@tpu.ru)

