

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Жидика Юрия Сергеевича  
«Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной  
полупроводниковой оптоэлектроники», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая  
электроника

Диссертационная работа Жидика Ю.С. «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники» посвящена разработке физико-химических основ технологии получения тонких низкоомных прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления при сниженном радиационно-термическом воздействии на подложку, исследование свойств пленок ИТО и формирование прозрачных омических контактов к изделиям гетероструктурной оптоэлектроники.

### **Актуальность работы**

В настоящее время большое внимание привлекают материалы для мультисенсорных систем, многофункциональной оптоэлектроники и оксидной электроники. Новейшие достижения в этих областях связаны с разработкой и получением новых функциональных материалов. Перспективными материалами для такой обширной области применения выступают широкозонные металлооксидные полупроводниковые соединения, обладающие сочетанием высокой электропроводности и оптической прозрачности, среди которых наиболее выделяются пленки оксида индия, легированного оловом (indium tin oxide, ИТО). Такие пленки ИТО могут быть использованы в качестве прозрачных проводящих контактов устройств оптоэлектроники, слоев растекания тока, а также в качестве антиотражающего покрытия, позволяющего снизить потери при вводе/выводе излучения из полупроводниковых структур.

В этой связи диссертационное исследование, посвященное разработке технологии получения и исследование свойств тонких плёнок ИТО для создания омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы  $A_3B_5$  является актуальным.

### **Содержание диссертации**

Диссертация имеет традиционную структуру, состоящую из введения, обзора литературы, экспериментальной части, выводов по работе и списка литературы. Диссертация изложена на 159 страницах, состоит из введения, 4 глав, обобщенных выводов по диссертационной работе и списка литературы, содержит 56 рисунков, 15 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 39 наименований авторских публикаций и 111 наименований цитируемых источников.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, четко сформулированы задачи и цель работы, ее научная

новизна, а также теоретическая и практическая значимость, приведены методы исследования и положения, выносимые на защиту, указаны личный вклад автора, степень достоверности, апробация результатов и структура работы.

**Первая глава** посвящена литературному обзору, в котором рассматриваются вопросы, посвященные технологии синтеза пленок ИТО, исследованию их структуры и свойств. Соискателем показано, что пленки ИТО являются необходимым и перспективным материалом для изготовления омических контактов приборов оптоэлектроники и радиофотоники. Приведено описание результатов разработки технологии синтеза плёнок ИТО различными исследовательскими коллективами.

В конце главы приводится краткое обобщение и формулировка цели диссертационного исследования.

**Во второй главе** приводится описание экспериментальной установки, технология изготовления экспериментальных образцов пленок ИТО, описание методов исследования их электрофизических свойств.

Автором разработаны технологические режимы осаждения низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО методом реактивного ионно-плазменного распыления, обеспечивающие их удельное сопротивление ниже  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см при коэффициенте пропускания на уровне 85–90%.

Автором установлено, что высокотемпературный отжиг пленок ИТО, проводимый после их осаждения, способствует снижению удельного сопротивления пленок за счет увеличения концентрации носителей заряда и их подвижности. Установлена смена механизма электропроводности пленок ИТО от полупроводникового к металлическому после высокотемпературного отжига при температурах выше 250 °С. Исследования термо-ЭДС пленок ИТО также показали, что в результате высокотемпературного отжига при температурах выше 250 °С после напыления они становятся вырожденным полупроводником *n*-типа с положением уровня Ферми выше уровня  $E_C$  на 0,09 эВ.

**Третья глава** посвящена разработке способа осаждения пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления с устранением электронно-ионного воздействия на них плазмы магнетронного разряда. Приводятся результаты экспериментальных исследований эффективности устранения электронно-ионной бомбардировки поверхности подложки и растущей на ее поверхности плёнки при ионно-плазменном распылении.

С учетом результатов моделирования сконструирована и изготовлена магнитная отклоняющая система, размещаемая между магнетронной распылительной системой и подложкой. Применение отклоняющей системы позволило снизить энергию заряженных частиц, достигающих подложки более чем в 3,5 раз, а их концентрацию в этой области в 13,2 раза.

Показано, что напыление пленок ИТО в условиях отклонения заряженных частиц приводит к снижению концентрации носителей заряда и, как следствие, к росту удельного поверхностного сопротивления в полтора раза. Однако ввиду того, что удельное сопротивление пленок ИТО,

напыленных с применением магнитной отклоняющей системы, остается на достаточно низком уровне, автором сделано заключение о их пригодности для использования в приборах гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям практического применения пленок ИТО, напыленных по разработанной технологии, в качестве омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы  $A_3B_5$  при создании оптоэлектронных приборов: радиофотонной интегральной схемы электрооптического модулятора и полупроводникового светоизлучающего диода.

**В заключении** сформулированы основные **выводы по диссертационной работе**, в которых приводится обобщение основных результатов и выводов. Большинство технических решений и способов, разработанных автором в рамках данной работы, защищены патентами и подтверждаются актами внедрения.

Среди наиболее значимых научных результатов, полученных автором диссертационной работы, можно отметить следующие:

- влияние радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на свойства плёнок ИТО при их нанесении методом реактивного магнетронного распыления;
- новые научные знания об электрофизических свойствах прозрачных проводящих плёнок ИТО, наносимых методом реактивного магнетронного распыления;
- выявленный механизм формирования омического контакта оптически прозрачных плёнок ИТО к слоям  $p$ -InGaAs.

Данные результаты составляет **научную новизну** исследования, а также расширяют существующие фундаментальные представления о свойствах оксидных широкозонных полупроводниках, механизмах их формирования ионно-плазменными методами. Понимание данного механизма дает возможность точного прогнозирования свойств и структуры получаемых оксидных пленок, что позволяет расширить существующую электронную компонентную базу с перспективой разработки новых устройств на их основе.

Следует также отметить несомненную **практическую значимость** полученных результатов:

- разработаны физико-химические основы синтеза электропроводящих оптически прозрачных плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления с возможностью их нанесения на гетероэпитаксиальные полупроводниковые структуры;
- разработан способ уменьшения радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на подложку при нанесении тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления;
- показана перспектива применения плёнок ИТО в качестве слоя растекания в приборах оптоэлектроники. Методом моделирования

показано, что введение слоя растекания тока позволяет увеличить КПД прибора более чем на 50 %.

Результаты, полученные автором, прошли экспериментальную апробацию, защищены патентами, а также внедрены в производство, что подтверждается актами внедрения.

**Достоверность и обоснованность** выполненных исследований диссертации определяется корреляцией с данными известных работ других авторов по аналогичным и смежным тематикам; применением современного аналитического и измерительного оборудования; корреляцией между собой экспериментальных результатов, полученных на различном оборудовании; корреляцией результатов проведенного моделирования с полученными экспериментальными данными; апробацией полученных теоретических и экспериментальных результатов на конференциях и семинарах различного уровня; публикацией статей, содержащих полученные результаты, в рецензируемых журналах; наличием результатов интеллектуальной деятельности; внедрением результатов исследований в промышленное производство.

По результатам исследований автором опубликовано 39 работ, из них 10 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 8 докладов на российских конференциях, 16 докладов на международных конференциях (из них 5 индексировано базами данных *Scopus* и 3 *Web of Science*), 3 патента, 2 свидетельства о регистрации топологий интегральных схем. Российский индекс научного цитирования Жидика Ю.С. – 53, индекс Хирша по РИНЦ – 5.

**Заключение о соответствии диссертации паспорту специальности, а также критериям, установленным Постановлением N 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней»:**

9 – на основании теоретической и практической значимости, а также положений, выносимых на защиту, работа может быть квалифицирована как важное научное достижение, направленное на решение крупной научной задачи, связанной с разработкой технологии получения и исследования свойств тонких плёнок ИТО для создания омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы  $A_3B_5$ .

10 – диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация имеет прикладной и теоретический характер. Сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов подтверждены актами внедрения, патентами РФ на изобретения и полезную модель, свидетельствами о государственной регистрации топологий интегральных микросхем. Научные результаты, полученные автором, позволяют существенно расширить существующие фундаментальные представления о свойствах оксидных широкозонных полупроводниках, механизмах их формирования ионно-плазменными методами;

11 – основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научно-технических журналах, входящих в рекомендованный Перечень ВАК на момент рецензирования;

13 – количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации в рецензируемых изданиях составляет 15 (с учетом приравненных к ним патентов на изобретения, патентов на полезную модель, свидетельств о регистрации топологий интегральных схем), что соответствует требованиям п.13 Постановления N 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней»;

14 – при заимствовании автором материалов или отдельных результатов других авторов, в тексте диссертации присутствует ссылка на источник.

Исследования, изложенные в диссертационной работе Жидика Ю.С. соответствуют паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника», а именно пунктам:

2 – Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника;

4 – Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях;

6 – Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Исследование морфологии ИТО пленок (рисунок 2.10) показало наличие неоднородностей, которые соискатель объясняет «захватом атмосферы рабочих газов и десорбцией газов с поверхности подложки». Скорее всего, это капельная фракция, вызванная дугообразованием на поверхности катода МРС в процессе реактивного магнетронного распыления на постоянном токе.

2. В главе 3 соискатель утверждает, что оснащение МРС системой отклонения предотвращает бомбардировку поверхности подложки высокоэнергетическими частицами плазмы газового разряда. Однако данная система не позволит устранить бомбардировку высокоэнергетическими отрицательными ионами кислорода, созданными и ускоренными в катодном падении потенциала. Как известно, данные ионы играют значительную негативную роль в формировании прозрачных проводящих оксидов.

3. Большая часть главы 4 посвящена применению ИТО пленок в качестве слоя растекания тока для светодиодов. Однако в данной главе приводятся исключительно результаты компьютерного моделирования, нет экспериментального подтверждения полученным характеристикам светодиодов.

4. В тексте диссертации встречаются орфографические и пунктуационные ошибки, а также опечатки автора. Так на рисунке 2.12 представлены не микрофотографии поверхности пленок ИТО, как указано в

тексте, а рентгенограммы пленок ИТО. Также в тексте диссертации нет рисунка 2.14, а есть два рисунка 2.13.

Отмеченные замечания не снижают достоинство представленного научного труда и не влияют на высокую оценку научных и практических результатов диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Жидика Ю.С. представляет собой законченное фундаментальное исследование, направленное на решение крупной научной задачи, связанной с разработкой технологии получения и исследованием свойств тонких плёнок ИТО для создания омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы  $A_3B_5$ . Сильной стороной диссертации, несомненно, являются новые, полученные автором сведения о механизмах электропроводности пленок ИТО, а также принципиально новый, разработанный и запатентованный автором, способ устранения электронно-ионной бомбардировки поверхности подложки и растущей на ее поверхности плёнки при ионно-плазменном распылении путем изменения конфигурации магнитного поля. Данный способ обладает новизной и универсальностью, а также может быть встроен в типовые технологические операции ионно-плазменного нанесения тонких пленок при изготовлении приборов микроэлектроники.

Автором проведен большой объем экспериментальных исследований, выполненных на высоком научном и техническом уровне с применением современной диагностической аппаратуры и апробированных методик исследования, проведен анализ полученных результатов, построены и доказаны выдвинутые гипотезы, проведено моделирование и сопоставление, сделаны научно обоснованные выводы, составляющие научную новизну и практическую значимость.

Сформулированные автором выводы связаны между собой, не имеют внутренних противоречий, а также не противоречат существующим научным представлениям. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научно-технических журналах, входящих в рекомендованный Перечень ВАК. Структура и оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Научные положения, выносимые на защиту, полностью отражают научную новизну и практическую значимость.

Текст автореферата написан технически грамотным языком и дает полное представление о диссертационной работе, имеет пояснения, рисунки и графики, включает четкие и лаконичные формулировки основных полученных результатов; по каждой главе и исследованию в целом имеются научно обоснованные выводы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и дает полное представление о научной новизне, практической значимости, актуальности исследования, личному вкладу, достоверности и значимости научных результатов.

Считаю, что диссертационная работа «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники»

полностью соответствует всем требованиям пунктов 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Жидик Юрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

**Официальный оппонент:**

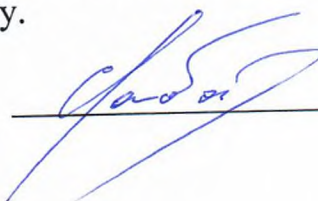
Работкин Сергей Викторович,  
кандидат технических наук,  
научный сотрудник лаборатории  
прикладной электроники  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института сильноточной  
электроники Сибирского  
отделения Российской академии  
наук (ИСЭ СО РАН)



С.В. Работкин

634055, Россия, г. Томск,  
проспект Академический, 2/3  
Тел.: +7 (3822) 491-544  
Факс: +7 (3822) 492-410  
E-mail: [contact@hcei.tsc.ru](mailto:contact@hcei.tsc.ru)

Я, Работкин Сергей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



С.В. Работкин

Подпись С.В. Работкина удостоверяю  
Ученый секретарь Института  
сильноточной электроники СО РАН



И.В. Пегель

