

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской Академии наук (ИФМ СО РАН),

д.ф.н. Номоев А.В.



11.03.2019 г.

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию ЖИДИКА Юрия Сергеевича «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Изучение диссертации и публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК подтверждает, что диссертация является научно-квалификационной работой. В полной мере соответствует требованиям и критериям, установленным действующим постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней».

В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения строго аргументированы и оценены по сравнению с известными техническими решениями. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Диссертацию Ю.С. Жидика можно признать научным трудом, в котором изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения развития оптоэлектроники и радиофотоники. В частности, установление формирования омического контакта при нанесении оптически прозрачных пленок оксида индия, легированного атомами олова (indium tin oxide – ITO) на слой *p*-InGaAs гетероструктуры. Выявление новой методики нанесения оптически прозрачных плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления. Получение новых знаний о радиационно-термическом воздействии плазмы магнетронного разряда на свойства ITO пленок. Выяснение роста коэффициента полезного действия плёнок ITO при

использовании их в качестве слоя растекания тока для гетероструктурных светодиодов.

Кроме того, характер результатов диссертации имеет важное значение для развития критических технологий Российской Федерации - Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 (ред. от 16.12.2015) "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации", п. 17 «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» и приоритетного направления Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации - Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», раздел II, п.20 «Переход ... к новым материалам и способам конструирования...».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации - соглашение № 14.577.21.0281 (2017), государственные задания № 8.4029.2017/ПЧ (2017-2019) и № 0293-2019-0006, государственный контракт № 12411.1006899.11.055 (2012). РФФИ – проекты № 18-32-00708 и № 18-29-11037. Постановление Правительства РФ № 218 - хоздоговорная работа № 73/10 (2010).

Актуальность избранной темы обуславливается неослабевающим интересом исследователей к разработке и изучению устройств оптоэлектроники и радиофотоники на принципе генерации и управления световым излучением. Притом, представляет важный научный и практический интерес понимание необходимости применения сложных гетероструктур и принципиально новых подходов их проектирования, в частности, осаждением тонкопленочных функциональных слоев на гетероэпитаксиальные структуры реактивным магнетронным распылением при изготовлении оптоэлектронных приборов. К началу выполнения настоящей работы оставались недостаточно изученными новые подходы создания оптически прозрачных пленок ИТО омических контактов с улучшенными электрическими и оптическими свойствами (удельное поверхностное сопротивление  $< 1 \cdot 10^{-3}$  Ом·см, интегральный коэффициент пропускания в видимой области  $> 85\%$ ) для устройств оптоэлектроники и радиофотоники. Целесообразность исследований подтверждается обстоятельным критическим анализом реальной ситуации, сложившейся в последнее время при разработке физико-химических основ технологии получения тонких низкоомных прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления на изделия гетероструктурной оптоэлектроники, подходов снижения радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на свойства пленок ИТО при формировании прозрачных омических контактов.

Диссертация Ю.С. Жидика, соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам, направляемым в печать, содержит совокупность новых результатов и научных положений, обоснованность и достоверность которых

сомнений не вызывает.

К наиболее значимым относятся:

Предложение новой методики нанесения оптически прозрачных плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления металлической мишени In/Sn в кислород и аргон содержащей плазме с низким радиационно-термическим воздействием плазмы магнетронного разряда. Доказательство повышения температурной стабильности контактного сопротивления ИТО/*p*-InGaAs, благодаря отклонению падающих на ростовую поверхность плазменных электронов магнитным полем особой конфигурации, применения магнитной отклоняющей системы.

Установление нанесения оптически прозрачных пленок ИТО на слой *p*-InGaAs гетероструктуры радиофотонной интегральной схемы электрооптического модулятора с линейной симметричной вольтамперной характеристикой и сопротивлением омического контакта  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> при коэффициенте пропускания на уровне 85–90%.

Установление снижения удельного сопротивления плёнок ИТО высокотемпературным их отжигом на воздухе либо в азоте, при этом показано, что после проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ИТО становится полностью электрически активной, вследствие увеличения концентрации электронов проводимости.

Доказательство необратимой смены механизма электропроводности от полупроводниковой к металлической, при температуре отжига  $> 573$  К плёнок ИТО и образованию вырожденного полупроводника *n*-типа. При этом уровень Ферми занимает положение выше дна зоны проводимости на 0,09 эВ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается систематическим характером исследований, применением независимых экспериментальных методик, сопоставлением эксперимента и расчета, сравнением полученных результатов с уже признанными результатами других исследователей, демонстрацией применения оптически прозрачных пленок ИТО в качестве слоя растекания в приборах оптоэлектроники.

Значима практическая ценность работы. Продемонстрирована возможность нанесения на гетероэпитаксиальные полупроводниковые структуры электропроводящих оптически прозрачных плёнок ИТО и разработан способ ослабления радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда при нанесении тонкопленочных покрытий методом реактивного магнетронного распыления. Показано применение пленок ИТО в качестве согласующего (антиотражающего) слоя для введения светового излучения из оптоволоконной линии в полупроводниковый волновод радиофотонной интегральной схемы оптического приемника на основе монолитной 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии, органических светоизлучающих диодов, электрохромных панелей и устройств, тонкопленочных нагревательных элементов.

Как свидетельствуют прилагаемые акты, результаты диссертационной

работы использованы при отработке технологии осаждения низкоомных пленок ИТО на листовое стекло (акт использования ОАО «Тинт-ит» от 01.03.2016 № б/н). Внедрены при проведении процессов электрополимеризации порфиринов (акт внедрения в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук от 09.09.2019 № б/н). Использованы в учебном процессе (акт использования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» от 10.09.2019 № б/н).

Наряду с достаточным изложением научно обоснованных новых технических и технологических решений, в диссертации обнаруживаются следующие замечания:

- имеют место неопределенно разные наименования одного процесса получения (нанесения) пленок ИТО реактивным магнетронным распылением - «...напыление..., ...синтез..., ...осаждение..., выращивание...»;

- неубедительно выглядит утверждение (автореферат с. 6) «Изменение конфигурации магнитного поля с помощью разработанной отклоняющей системы позволяет в 13,2 раза уменьшить радиационное и термическое воздействие на подложку за счет уменьшения потока попадающих на нее заряженных частиц». Во-первых, что означает «...уменьшить радиационное и термическое воздействие в 13,2 раза...», физическая природа воздействий разная, во-вторых, магнитным полем отклоняются (с. 95 абзац 2) «...высокоэнергетические электроны...», т.е. плазменные и быстрые вторичные электроны. Требуется пояснения роль ионов, т.к. ионы плазмы слабо отклоняются в магнитном поле 0,05 Тл (рисунок 3.4, с. 84), ларморовский радиус много больше промежутка подложка – мишень;

- в автореферате (с. 9) – в одном случае происходит «...распыление мишени In/Sn в атмосфере ~ O<sub>2</sub> (25%) / Ar (75%)... с последующим отжигом пленок ИТО в атмосфере воздуха...», в другом, ~ O<sub>2</sub> (29%) / Ar (71%) ... с последующим отжигом в атмосфере азота...», требует пояснения, как сравнительно малый рост от 25% до 29% содержания O<sub>2</sub> в смеси газов и незначительное снижение от 75% до 71% содержания Ar, при отжиге в азоте, весьма существенно влияет на электрофизические свойства пленок ИТО (таблица 2.3, с. 66);

- в автореферате (рисунок 1, с.10) по всей видимости, ошибочно указано - «... рентгенограммы... до (а) и после отжига (б)...», если не так, требует пояснения, почему пленки ИТО после отжига становятся рентгеноаморфными (рисунок 1 (б));

- требует пояснения, почему в спектрах (рисунок 2.11, с. 65) коэффициент пропускания пленок ИТО без отжига и после отжига не меняется на длине волны ~1,5 мкм, полученных «...по технологии №1...» и составляет ~55%. Подобное наблюдается для пленок ИТО, полученных «...по технологии №2...» соответственно на длине волны ~3 мкм - коэффициент пропускания ~30%;

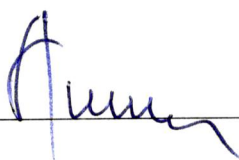
- в автореферате имеют место неудачные выражения: «...четкие знания...» (с. 11), «...стремительно снижается...» (с. 12), «...сонаправленные магниты...», (с. 13), «...самосовмещенный омический контакт...» (с. 16).

Несмотря на отмеченные замечания. Принимая во внимание наукометрические показатели Ю.С. Жидика (российский индекс научного цитирования – 53, научную продуктивность ученого, *h index* – 5), достаточный научный уровень 39 печатных работ по теме диссертации, из них 10 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК с импакт-фактором 0,431 – 0,568. Апробацию результатов диссертации на 23 научных конференциях, из них 3 полнотекстовых доклада индексировано на поисковой платформе Web of Science и 6 докладов в Scopus. Достаточную степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации и выдвигаемых автором для публичной защиты, их достоверность и новизну. Предложенные автором новые принципиальные технические решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями, защищены 2 патентами на изобретения, 1 патентом на полезную модель и 2 свидетельствами о государственной регистрации топологии интегральных схем.

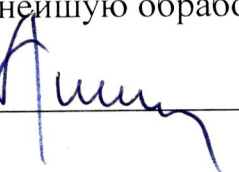
Считаю, диссертационная работа «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, ее автор ЖИДИК Юрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Заведующий лабораторией физического материаловедения, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), доктор технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, профессор по специальности 01.04.04 - физическая электроника,

Семенов Александр Петрович.  
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6,  
телефон: 8(3012)433184,  
e-mail: semenov@ipms.bscnet.ru

  
\_\_\_\_\_ А.П. Семенов

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

  
\_\_\_\_\_ А.П. Семенов



« 11 » ноября 2019 г.