

На правах рукописи

Васильев Денис Дмитриевич

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК WSI ДЛЯ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С
ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И ПЛОЩАДЬЮ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Специальность 05.27.06 – Технологии и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель:

Моисеев Константин Михайлович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Снигирев Олег Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики полупроводников
и криоэлектроники физического факультета
ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова»

Лямин Андрей Николаевич
кандидат технических наук,
доцент кафедры радиоэлектроники,
телекоммуникаций и нанотехнологий
ФГБОУ ВО «МАИ»

Ведущая организация:

Акционерное общество
Научно-исследовательский институт
точного машиностроения (АО «НИИТМ»)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Ваш отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.18
кандидат технических наук, доцент



Мешков С. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (Superconducting Nanowire Single Photon Detector – SNSPD) благодаря высокой эффективности детектирования (~93%) при низких темновых отсчетах (~1000 с⁻¹), низкому джиттеру (~3 пс), широкому диапазону длин волн (от 0,6 до 5,0 мкм) и малому времени восстановления (~2 нс), имеют преимущества перед другими типами однофотонных детекторов: фотоэлектронными умножителями, болометрами и лавинными диодами. Недостатками SNSPD являются низкие температуры работы (~2,0 К) и относительно небольшие размеры активной области (~15x15 мкм).

Конструкция SNSPD была разработана и представлена в 2001 г. научной группой Гольцмана Г. Н. С того времени научные группы, работающие по данному направлению, исследуют и изготавливают детекторы преимущественно на базе пленок NbN толщиной от 4 до 8 нм. В 2011 г. научной группой из университета NIST (США) предложен альтернативный материал – $W_xSi_{(1-x)}$, который имеет относительно NbN меньшую энергию сверхпроводящей щели (1,5 мВ) и большой коэффициент диффузии электронов (0,75 см²/с), что увеличивает эффективность детектирования как в видимом диапазоне света, так и в ИК диапазоне. При этом пленки $W_xSi_{(1-x)}$ имеют рентгеноаморфную структуру, что также должно обеспечить больший выход годных на одной пластине вследствие меньшей чувствительности к материалу подложки и пониженные требования к параметрам процесса осаждения пленок. Все это делает детекторы на пленках $W_xSi_{(1-x)}$ перспективными для современных применений: в квантовых компьютерах, для визуализации глубины предмета высокого разрешения на дальних расстояниях, в коротковолновых инфракрасных однофотонных камерах и оптической космической связи, где необходимы детекторы с увеличенной площадью зоны детектирования, либо массив (матрица) детекторов, а также детекторы с повышенной квантовой эффективностью в ИК диапазоне длин волн.

Состояние проблемы

Наряду с научной группой Гольцмана Г. Н. из МПГУ (Россия) формированием и исследованием пленок $W_xSi_{(1-x)}$ и детекторов на их основе занимались коллективы Двизенко А.Ю. из ХПИ (Украина), из университетов NIST (США), JPL NASA (США), MIT (США), SIMIT (КНР), Цюрихского университета (Швейцария). При этом все исследователи формируют пленки $W_xSi_{(1-x)}$ для применения в SNSPD методом магнетронного распыления преимущественно из двух источников с гомогенными мишенями. Несмотря на постоянно возрастающий интерес к пленкам $W_xSi_{(1-x)}$, до настоящего времени только в нескольких работах научных групп из университетов NIST, MIT, SIMIT и Цюрихского университета эмпирически исследовано влияние соотношения компонентов и толщины пленок на выходные параметры детектора: критическую температуру перехода, плотность критического тока, диффузию электронов, длину когерентности и глубину проникновения магнитного поля. При этом четко не определены требования к равномерности толщины пленок по площади и соотношению компонентов по толщине, не сформулированы требования к технологическому оборудованию, отсутствуют исследования влияния параметров и режимов процесса осаждения на структуру и сверхпроводящие свойства пленок $W_xSi_{(1-x)}$, что не позволяет воспроизводимо получать их с максимально высокими значениями характеристик.

Поэтому **целью работы** является создание научных и технологических основ формирования ультратонких двухкомпонентных пленок $W_xSi_{(1-x)}$ методом магнетронного распыления для повышения квантовой эффективности однофотонных сверхпроводниковых детекторов в расширенном диапазоне длин волн, увеличения активной площади детектора и выхода годных по пластине.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

- 1) провести литературный обзор для выявления требований к пленкам $W_xSi_{(1-x)}$, используемым в сверхпроводниковых однофотонных детекторах;
- 2) обосновать выбор метода и режимов процесса формирования пленок $W_xSi_{(1-x)}$ и оценить их влияние на сверхпроводящие свойства пленок;

3) определить требования к оборудованию для формирования пленок $W_xSi_{(1-x)}$ и модернизировать экспериментальную установку;

4) провести экспериментальные исследования для выявления взаимосвязей между параметрами процесса формирования, структурой и выходными характеристиками пленок $W_xSi_{(1-x)}$;

5) разработать технологию формирования пленок $W_xSi_{(1-x)}$, изготовить на основе полученных пленок детекторы и исследовать их выходные характеристики.

В ходе выполнения работы определены положения **научной новизны**:

1) впервые определено комплексное влияние технологических параметров процесса формирования ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ методом магнетронного распыления (температура подложки, потенциал смещения на подложке, ионизация распыляемого материала) на их выходные характеристики (критическую температуру);

2) разработана и экспериментально подтверждена модель расчета неравномерности пленок при магнетронном распылении из двух источников, расположенных под углом 90° друг к другу, имеющая погрешность расчета толщины пленки 5,4% на вращающейся подложке диаметром 50 мм;

3) для процесса нанесения ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ методом магнетронного распыления из двух источников, расположенных под углом 90° друг к другу, теоретически рассчитаны и экспериментально подтверждены параметры осаждения, обеспечивающие неравномерность $\pm 1,2\%$ по толщине и $\pm 0,4\%$ по составу на подложке диаметром 50 мм.

Практическая ценность исследований:

1) разработана и апробирована технология формирования методом магнетронного распыления из двух источников под углом 90° друг к другу ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ с требуемыми характеристиками: толщиной 6 нм, соотношением компонентов 80% вольфрама и 20% кремния;

2) разработана методика формирования двухкомпонентных ультратонких пленок методом магнетронного распыления, позволяющая получать

пленки толщиной до 10 нм с заданным соотношением компонентов во всем диапазоне варьирования;

3) модернизирована лабораторная вакуумная установка ВУП-11М для формирования ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ методом магнетронного распыления из двух источников, расположенных под углом 90° друг к другу;

4) получены чувствительные элементы (меандры) на пленках $W_{0,8}Si_{0,2}$ с внутренней квантовой эффективностью 100%, на базе которых изготовлены детекторы с кантовой эффективностью 65%, темновыми отсчетами 1 с^{-1} , с низким значением коэффициента NEP (мощность, эквивалентная шуму) $2,8 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ для излучения 1,55 мкм и отношением квантовой эффективности к темновым отсчетам SDE/DC 0,65 с.

Результаты внедрения

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Результаты работы использованы при выполнении гранта Российского научного фонда №18-12-00364, а также в инициативной НИР ЗАО «СКОНТЕЛ» по созданию однофотонных детекторов с улучшенными характеристиками.

Методы исследования

Для определения путей решения проблемы проведены патентные исследования в области сверхпроводниковых однофотонных детекторов. Выбор метода формирования и измерения пленок выполнен с использованием критериального анализа. Анализ зонной модели Келли-Арнелла позволил определить режимы формирования пленки для получения определенной структуры пленки. Проведены экспериментальные исследования зависимости сверхпроводящих свойств от параметров процесса осаждения пленки согласно полному факторному алгоритму планирования. Степень влияния толщины меандра и ширины проводника на внутреннюю квантовую эффективность в ИК спектре изучена благодаря количественному сравнению детекторов. Измеренные

значения неравномерности пленки подтверждаются результатами моделирования с использованием среды MathCad.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы обусловлена использованием поверенных средств измерения на предприятии ЗАО «СКОНТЕЛ» и в лабораториях МГТУ им. Н. Э. Баумана, результатами проведенных экспериментальных исследований (получением модели), прошедших проверку на адекватность.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) для создания сверхпроводниковых однофотонных детекторов с повышенной чувствительностью в ИК области, увеличенной площадью детектирования или матрицы детекторов необходимо использовать двухкомпонентные пленки с рентгеноаморфной структурой и определенным соотношением компонентов, в частности, $W_{0,8}Si_{0,2}$, обладающие более низкой энергией сверхпроводящей щели и более высоким коэффициентом диффузии электронов, чем кристаллические пленки, такие как NbN;

2) для обеспечения неравномерности двухкомпонентной пленки по толщине $\pm 1,2\%$ и по соотношению материалов $\pm 0,4\%$ на подложке диаметром 50 мм при осаждении из двух магнетронов диаметром 100 и 50 мм необходимо располагать магнетроны под углом 90° , а подложку на пересечении осей магнетронов под углом 45° к каждому магнетрону на расстоянии более 90 мм, обеспечивая при этом вращение подложки вокруг своей оси;

3) использование предложенной в работе технологии нанесения ультратонких двухкомпонентных пленок методом магнетронного распыления из двух источников, расположенных под углом 90° друг к другу, позволяет воспроизводимо формировать пленки толщиной до 10 нм с заданным соотношением компонентов;

4) для получения пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$ с критической температурой 3,7 К и плотностью тока $1,13 \cdot 10^6$ А/см² при толщине 6 нм необходимо формировать пленку на подложках кремния с естественным оксидом при комнатной

температуре, без потенциала смещения на подложке и импульсном распылении вольфрама с коэффициентом заполнения импульса 27% и частотой 15 кГц.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 22–26-ой научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, 2015–2019; V и VIII Международной молодежной научной конференции «Нanomатериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы», Саратов, 2016 и 2018; 24-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2017», Санкт-Петербург, 2017; 10-ой Юбилейной международной научно-технической конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2015; V международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2015; XX Международном симпозиуме «Нанofизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2015; VI Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего», Санкт-Петербург, 2018; Международной научно-технической конференции «Автоматизация», Сочи, 2020.

Публикации

Результаты исследований по теме диссертационной работы представлены в 20-ти научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах и трудах конференций, из них 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 8 в научно-технических журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад

Автором проведен анализ методов формирования пленок $W_xSi_{(1-x)}$ и обоснован метод магнетронного распыления из двух источников. Определены требования к пленкам $W_xSi_{(1-x)}$ и проведен расчет допусков неравномерности пленки для обеспечения заданных требований. Проанализированы зонные модели структуры пленок и определена совокупность параметров, позволяющих получить требуемую структуру. Составлена модель расчета неравномерности пленки при магнетронном распылении. Модернизирована экспериментальная

установка ВУП-11М, отработаны технологические режимы и проведены эксперименты по формированию и исследованию ультратонких сверхпроводящих пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения, приложения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 157 страницах машинописного текста (73 рисунков, 29 таблиц, список литературы из 120 наименований).

Содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность тематики работы, формулируются ее цель и задачи, определяются научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ конструкции, принципа работы и применений сверхпроводниковых однофотонных детекторов, на основании результатов которого обосновывается перспективность сверхпроводящих ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ для современных применений SNSPD.

В результате обзора обнаружено, что исследования свойств тонких пленок соединений W-Si проводились только для толщин более 100 нм. Выявлено, что максимальная критическая температура перехода пленок $W_xSi_{(1-x)}$ толщиной более 100 нм в сверхпроводящее состояние составляет 5 К и достигается при содержании в пленке 80% вольфрама и рентгеноаморфной структуре.

Для ультратонких пленок толщиной менее 10 нм значения критической температуры перехода ниже и существенно зависят от толщины. Исследовательской группой из SIMIT по созданию экспериментальных детекторов на пленках $W_xSi_{(1-x)}$ определено, что высокая плотность критического тока наблюдается на подложках кремния с естественным оксидом на поверхности, а для получения внутренней квантовой эффективности, равной 100%, требуются пленки толщиной от 4 до 9 нм. Исследования других научных групп экспериментально показали, что при увеличении толщины пленки и отклонении от концентрации вольфрама 80% в обе стороны диффузия

электронов, длина когерентности и глубина проникновения магнитного поля уменьшаются.

Однако отсутствует комплексное исследование свойств ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$ для их эффективного использования в SNSPD, особенно для применений, где требуется повышенная эффективность детектирования в ИК области, увеличенная площадь меандра или массив детекторов.

Во второй главе определены требования к процессу и режимам формирования пленок $W_xSi_{(1-x)}$, показано их влияние на свойства пленок. Обоснованы требования к допустимым значениям неравномерности толщины пленок по площади и по соотношению компонентов в пленке по толщине. Сформулированы требования к технологическому оборудованию для формирования ультратонких пленок $W_xSi_{(1-x)}$.

Рассмотрены методы формирования двухкомпонентных пленок и выбран метод магнетронного распыления, обеспечивающий получение рентгеноаморфных пленок при комнатной температуре подложки, имеющий стабильную и невысокую (от 0,1 до 0,5 нм/с) скорость осаждения пленок, а также позволяющий варьировать энергию осаждаемых частиц и соотношение компонентов пленки. Для варьирования соотношения компонентов в пленке применяются два магнетронных источника с гомогенными мишенями.

Пленки $W_xSi_{(1-x)}$ для SNSPD должны иметь плотноупакованную структуру с малым размером зерен. Анализ зонной модели структуры пленки Келли-Арнелла, получаемой магнетронным распылением, показывает, что такая структура находится на границе зон 1 и 2 и соответствует следующим параметрам магнетронного распыления: потенциал смещения на подложке порядка -30 В; отношение потока ионов к потоку осаждаемых атомов $\sim 0,56$; температура подложки ~ 303 К.

Проведенный расчет показал, что при толщинах пленок до 10 нм для обеспечения критической температуры по подложке в пределах $\pm 1\%$ требуется обеспечить неравномерность пленки $\pm 11,4\%$ по толщине и $\pm 3,4\%$ по соотношению компонентов, а для обеспечения критического тока по подложке в

пределе $\pm 1\%$ требуется обеспечить неравномерность пленки $\pm 2,7\%$ по толщине и $\pm 1,3\%$ по соотношению компонентов

Для обеспечения таких требований разработана модель расчета относительной толщины пленки на подложке, учитывающая такие факторы, как изменение профиля мишени; распределение плотности ионного тока по мишени; экспериментальные данные по угловому распределению потока от материала мишени:

$$h(x, y) = \int_{\alpha} \int_R \frac{(A \cdot \cos^m(\varphi) - B \cdot \cos^n(\varphi) + C) \cdot \cos(\theta(x, y, \alpha, R)) \cdot \sqrt{1 + (f'(R))^2} \cdot g(R) \cdot R}{L(x, y, \alpha, R)^2} dR d\alpha, \quad (1)$$

где, x, y – координаты точки на подложке; R – радиус на магнетроне; α – угол интегрирования в цилиндрических координатах; φ – угол распыления; θ – угол осаждения; A, m, B, n, C – коэффициенты профиля распыления; L – расстояние от точки на магнетроне до точки на подложке; $f(R)$ – профиль зоны эрозии; $g(R)$ – распределение плотности ионного тока.

Моделирование на подложке диаметром 50 мм при ее вращении вокруг своей оси на пересечении осей магнетронов 50 мм и 100 мм, расположенных под 90° друг другу, на расстоянии 90 мм от каждого магнетрона показало уменьшение неравномерности покрытия по толщине до $\pm 1,5\%$ по сравнению с $\pm 33,0\%$ без вращения, и соотношению компонентов до $\pm 1,3\%$ по сравнению с $\pm 16,9\%$ без вращения.

Проанализированы методы контроля толщины пленки и выбран метод микровзвешивания на основе кварцевого резонатора. При расчете толщины используется формула Зауэрбрея, связывающая изменение резонансной частоты и массы на поверхности электрода кварца. Для расчета необходимо использовать плотность пленки, которая может отличаться от табличного значения, поэтому в работе используется масса пленки, осажденной на единицу площади резонатора.

В результате выдвинуты требования к технологическому процессу и экспериментальному оборудованию для нанесения пленок $W_xSi_{(1-x)}$ и измерения их толщины.

В третьей главе описана модернизация установки ВУП-11М, создание стенда микровзвешивания и результаты предварительных экспериментов по отработке режимов формирования и исследованию пленок $W_xSi_{(1-x)}$.

Для обеспечения предъявленных требований в лабораторную установку ВУП-11М, изначально оснащенную одним магнетронным источником, смонтирован второй источник под углом 90° к имеющемуся. Спроектирован подложкодержатель, который установлен под углом 45° к магнетронам и позволяет нагревать образцы до 573 К , подавать потенциал смещения до -60 В . Подложкодержатель оснащен шаговым двигателем и реализовано его управление через компьютер с возможностью задания алгоритма вращения.

Разработан и собран стенд микровзвешивания, измерение частоты кварцевых резонаторов реализовано на базе схемы Пирса.

Рассчитаны и отработаны режимы осаждения пленок из каждого источника для формирования пленки $W_xSi_{(1-x)}$ с концентрацией вольфрама от $66,5\%$ до $84,4\%$. Максимальная критическая температуры перехода $3,3\text{ К}$ получена у образца $W_{80}Si_{20}$ толщиной 5 нм .

Обнаружено существенное изменение скорости формирования пленок на начальной стадии вследствие эффекта переосаждения и определено, что время стабилизации процесса для данной конфигурации установки составляет 30 с .

Толщина пленок измерена на трехмерном бесконтактном оптическом профилометре Taylor Hobson Talysurf CCI, сканирующем зондовом микроскопе Solver NEXT, методом кварцевого микровзвешивания на разработанном стенде, а также рассчитана через скорости осаждения. Во всех случаях средние значения толщины находятся в интервале от $5,9$ до $6,1\text{ нм}$.

Проведен комплексный эксперимент по определению режимов формирования пленки $W_{0,8}Si_{0,2}$ и изучению влияния варьируемых параметров: температуры подложки от 295 до 573 К ; потенциала смещения на подложке от 0 до -60 В ; пикового тока при импульсном распылении вольфрама в диапазоне от $0,5$ до $3,5\text{ А}$ на массу осажденной за время $14,9\text{ сек}$ пленки $W_xSi_{(1-x)}$, который позволил определить режимы формирования пленок одинаковой массы.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке полученных зависимостей сверхпроводящих свойств пленки $W_{0,8}Si_{0,2}$ от параметров и режимов магнетронного распыления, а также сравнению равномерности покрытия, полученного на экспериментальном стенде, с расчетной моделью.

С учетом результатов расчетов и предварительных экспериментов сформированы пленки $W_{0,8}Si_{0,2}$ постоянной массы при варьировании температуры подложки, потенциала смещения и пикового тока при импульсном распылении вольфрама. Анализ результатов измерений поверхностного сопротивления и критической температуры перехода показал (Рисунок 1), что на увеличение критической температуры перехода влияет повышение пикового тока импульсного распыления, тогда как потенциал смещения и температура уменьшают критическую температуру перехода, увеличивая при этом сопротивление пленки.

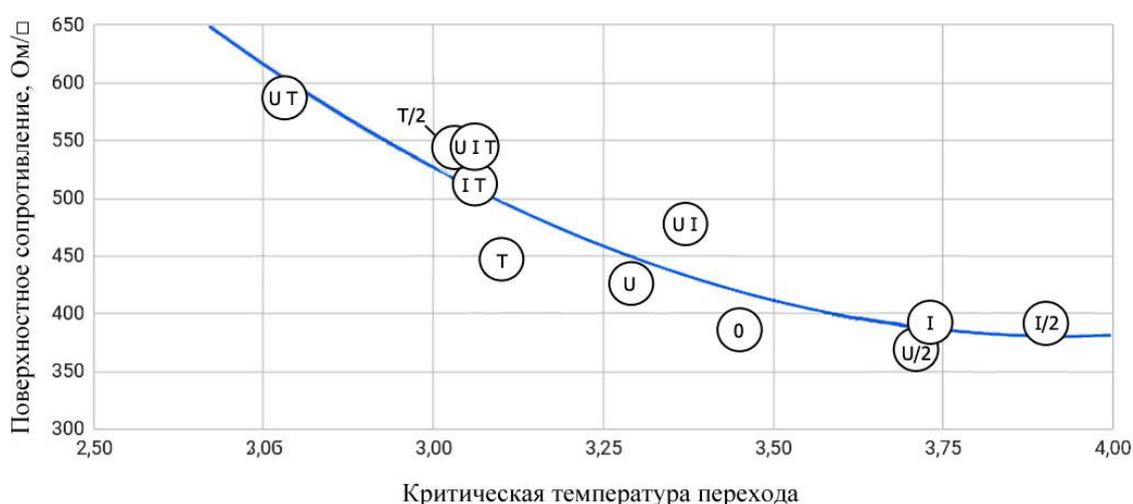


Рисунок 1. Зависимость поверхностного сопротивления от критической температуры перехода пленки при варьировании параметров процесса осаждения

Измерение равномерности пленки от каждого источника по подложке диаметром 50 мм с вращением при помощи кварцевого микровзвешивания показало неравномерность пленки $W_{0,8}Si_{0,2}$ по толщине $\pm 1,2\%$ и по соотношению материалов $\pm 0,4\%$, что дает расхождение с моделью на 5,4% по толщине и на 1,7% по соотношению материалов, Результаты полностью удовлетворяют требованиям по отклонению критической температуры и критического тока $\pm 1\%$.

Обнаружено, что плотность критического тока на кремниевых подложках ($1,13 \cdot 10^6$ А/см²) в среднем в 4 раза выше, чем на сапфировых подложках ($0,31 \cdot 10^6$ А/см²), и имеет меньший процент среднеквадратичного отклонения, что, учитывая результаты научной группы из университета SIMIT, опровергает предположение об отсутствии влияния материала подложки на плотность критического тока для рентгеноаморфных пленок.

На измерениях на сканирующем электронном микроскопе поверхность пленок гладкая, подобно рентгеноаморфной. Включений в пределах разрешения СЭМ не наблюдается.

Измерения пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$ на кремнии и сапфире методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии показывают, что на поверхности пленки наблюдаются оксиды кремния, возникшие при естественном окислении. В пленках присутствует низший силицид W_5Si_3 , на границе кремния и пленки наблюдается высший силицид W_2Si , что обусловлено влиянием подложки на пленку (Рисунок 2).

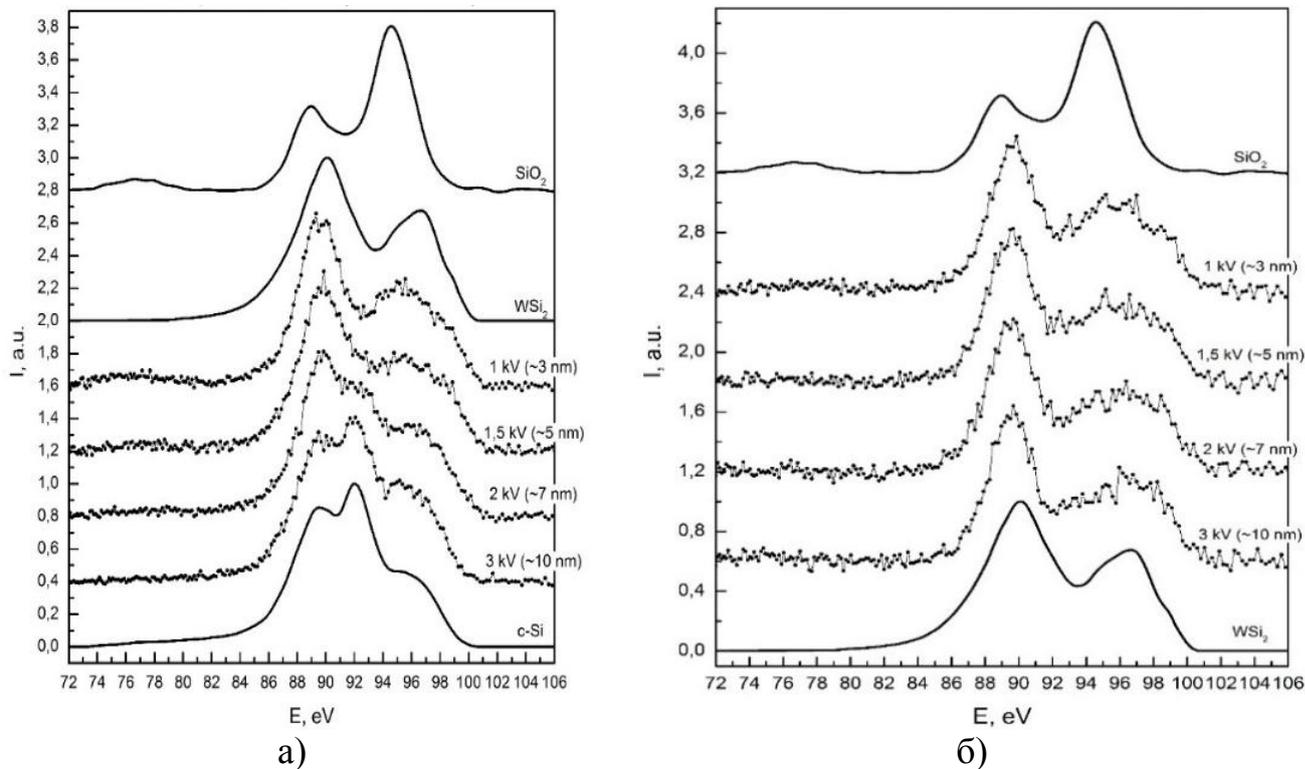


Рисунок 2. Спектры пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$, полученные методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии: а) на кремнии; б) на сапфире

В пятой главе представлены разработанная методика формирования ультратонких двухкомпонентных пленок и исследование параметров сверхпроводниковых детекторов на основе пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика формирования двухкомпонентных пленок толщиной до 10 нм, учитывающая наличие как стационарной, так и подвижной подложки, а также отключение питания магнетронных источников оператором в ручном режиме или при помощи компьютера в установленное время.

На базе пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$ толщинами 5, 7 и 9 нм изготовлены SNSPD. Детектор с толщиной пленки 7 нм и четвертьволновым резонатором показал внутреннюю эффективность 100%, а квантовую эффективность системы – 65% (Рисунок 3). При этом мощность, эквивалентная шуму NEP, составляет $2,8 \cdot 10^{-19}$ Вт·Гц^{-1/2}, а отношение квантовой эффективности к темновым отсчетам SDE/DC – 0,65 с, что превосходит известные значения детекторов на $W_xSi_{(1-x)}$ ($3,9 \cdot 10^{-19}$ Вт·Гц^{-1/2} и $3 \cdot 10^{-3}$ с соответственно).

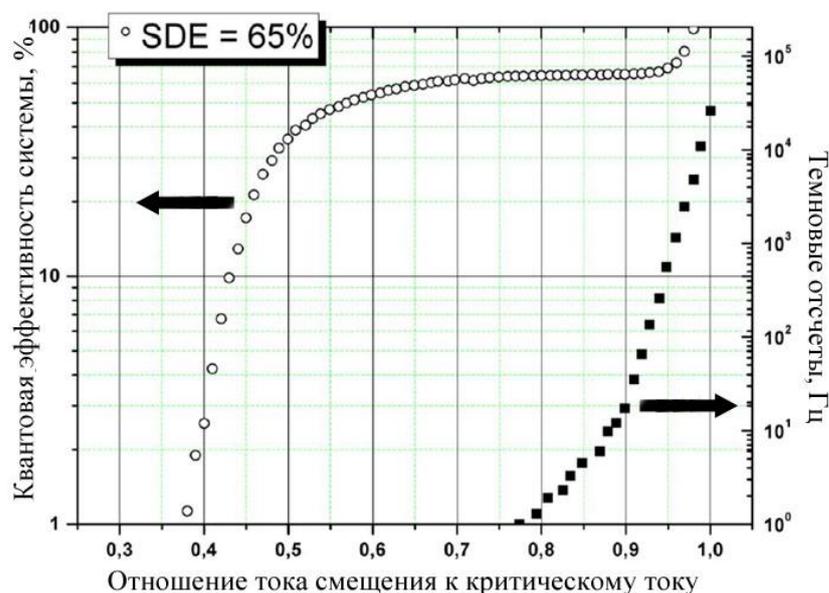


Рисунок 3. Квантовая эффективность детектора и темновые отсчеты на четвертьволновом резонаторе ($\eta_{sde} = 65\%$)

Квантовая эффективность детектора в ИК диапазоне показала отсутствие уменьшения квантовой эффективности на длинах волн от 1,3 до 2,5 мкм при стандартной ширине полоски меандра 80 нм (Рисунок 4).

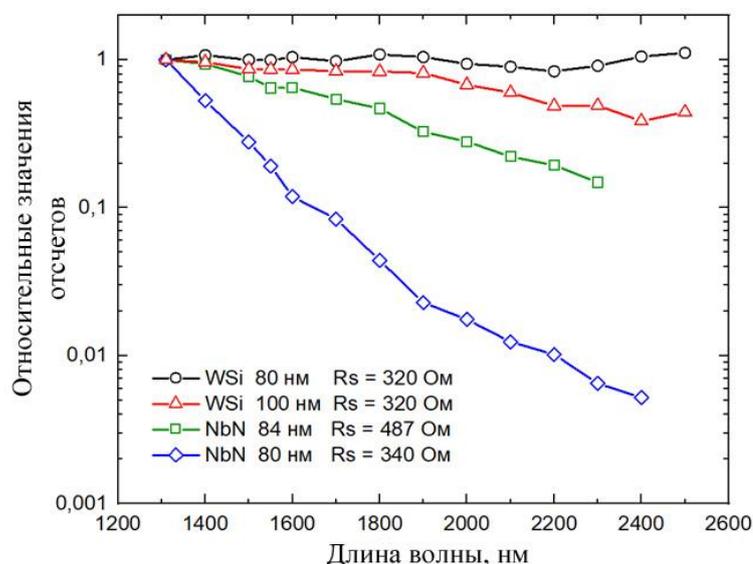


Рисунок 4. Зависимость относительного числа отсчетов от длины волны излучения для NbN и $W_{0,8}Si_{0,2}$ структур с различными ширинами нанопроводов

В заключении анализируются полученные результаты и приводятся общие выводы по работе.

Основные результаты и выводы

1. Анализ требований к пленкам чувствительных элементов SNSPD показал, что для детекторов с повышенной квантовой эффективностью в ИК диапазоне длин волн и увеличенным выходом годных по пластине рекомендуется использовать рентгеноаморфные пленки $W_xSi_{(1-x)}$ в соотношении $W_{0,8}Si_{0,2}$.

2. Для формирования двухкомпонентных пленок с неравномерностью не более $\pm 3,8\%$ по толщине и не более $\pm 1,9\%$ по соотношению компонентов, рентгеноаморфной плотноупакованной разупорядоченной структурой требуется установка с двумя расположенными под углом магнетонами, вращающимся вокруг своей оси подложкодержателем, одинаково расположенным к обоим магнетронам, с возможностью нагрева подложки до 573 К и подачи потенциала смещения до $-60В$, системой автоматического управления для проведения процесса в автоматическом режиме.

3. Экспериментально установлено, что максимальная критическая температура 4,7 К пленок $W_xSi_{(1-x)}$ наблюдается при концентрации вольфрама 80% при толщине пленки 100 нм, а при толщине 6 нм критическая температура составляет 3,7 К при том же соотношении компонентов.

4. Для формирования пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$ толщиной 6 нм с высокой критической температурой 3,9 К необходимо распылять вольфрам униполярными импульсами с пиковым током 2,0 А, при этом потенциал смещения должен соответствовать 0 В, температура подложки комнатная.

5. Экспериментально подтверждено, что вращение подложки диаметром 50 мм вокруг своей оси, расположенной на пересечении осей двух магнетронов, расположенных под углом 90° , уменьшает неравномерность пленки с $\pm 24,3\%$ до $\pm 1,2\%$ по толщине и с $\pm 13,3\%$ до $\pm 0,4\%$ по соотношению компонентов.

6. Для получения максимального критического тока $1,13 \cdot 10^6$ А/см² пленок $W_{0,8}Si_{0,2}$ толщиной 6 нм необходимо использовать кремниевую подложку с естественным оксидом на поверхности.

7. Сформированные по разработанной технологии однофотонные детекторы на пленках $W_{0,8}Si_{0,2}$ демонстрируют:

– высокую квантовую эффективность системы 65% при низком уровне темнового счета 1 с^{-1} , низкую мощность, эквивалентную шуму, $2,8 \cdot 10^{-19}$ Вт·Гц^{-1/2} и высокое отношение эффективности детектирования системы к темновым отсчетам 0,65 с на телекоммуникационной длине волны 1,55 мкм;

– 100% внутреннюю квантовую эффективность в ближнем ИК спектре (от 1,3 до 2,5 мкм) по сравнению с детекторами на пленках NbN при ширине полосы 80 нм.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Исследование равномерности состава двухкомпонентной пленки W_xSi_{1-x} по толщине при магнетронном распылении из двух источников / Васильев Д.Д. [и др.] // Научные технологии. 2020. Т. 21, № 9. С. 15-21. (0,61 п.л./0,24 п.л.).

2. Разработка магнетронной распылительной системы с двумя источниками для формирования ультратонких покрытий WSI для SNSPD / Васильев Д.Д. [и др.] // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S2. С. 39-46. (0,92 п.л./0,23 п.л.).

3. Investigation of WSi and NbN superconducting single-photon detectors in mid-IR range / Vasilev D.D. [et al.] // IOP Conference Series. 2020. Vol. 781. Is. 1 Art.no 012011. (0,51 п.л./0,10 п.л.).
4. Providing of Ultra-Thin Film Thickness Uniformity by Magnetron Sputtering from Two Sources / Vasilev D.D. [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 781. Is 1. Art.no 012012. (0,76 п.л./0,19 п.л.).
5. Automation of the Process of Ultrathin Two-Component Films Deposition from Two Sputtering Sources / Vasilev D.D. [et al.] // Proceedings – 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. 2020. P. 856-880. (0,50 п.л./0,22 п.л.).
6. Influence of Deposited Material Energy on Superconducting Properties of the WSi Films / Vasilev D.D. [et al.] // IOP Conference Series. 2020. Vol. 781. Is. 1. Materials Science and Engineering. Art. no 012013. (0,69 п.л./0,28 п.л.).
7. Simulation of the cut-off wavelength of superconducting single-photon detectors based on WSi thin films for systems for optical space communications / Vasilev D.D. [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. Art. no 110012. (0,55 п.л./0,14 п.л.).
8. Расчет движения подложки для повышения равномерности покрытий в установках с планарными цилиндрическими магнетронами / Васильев Д.Д. [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 10. С. 579-587. (0,46 п.л./0,30 п.л.).
9. Vacuum coating system for deposition of superconducting $W_x Si(1-x)$ ultrathin films used in single photon detectors / Vasilev D.D. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 872. Is. 1. P. 1-5. (0,53 п.л./0,21 п.л.).
10. Superconducting detector of IR single-photons based on thin WSi films / Vasilev D.D. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 737. Is. 1. Art. no 012032. (0,95 п.л./0,19 п.л.).
11. Influence of the planar cylindrical target erosion zone of magnetron sputtering on the uniformity of a thin-film coating / Vasilev D.D. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 584. No 1. Art.no 012012. (0,52 п.л./0,34 п.л.).