

06
Исследование неоднородности свойств тонких пленок нитрида ниобия, полученных методом атомно-слоевого осаждения

© М.В. Шибалов,¹ А.А. Шибалова,¹ А.Р. Шевченко,¹ А.М. Мумляков,¹ И.А. Филиппов,¹ М.А. Тархов^{1,2}

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
119991 Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“,
111250 Москва, Россия
e-mail: maxshibalov@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 мая 2024 г.

В окончательной редакции 24 сентября 2024 г.

Принято к публикации 6 октября 2024 г.

Изучена неоднородность свойств тонкой пленки нитрида ниобия, полученной методом атомно-слоевого осаждения, усиленного плазмой на 100 нм кремниевой подложке со слоем оксида кремния. Неоднородность распределения поверхностного сопротивления составила 7% на диаметре 92 мм. Неоднородность распределения толщины пленки, измеренная с помощью рентгеновской рефлектометрии в центральной части пластины и в четырех местах на удалении от центра на 40 мм, составила 4%. Рентгеновская дифракция, проведенная в этих же местах на подложке, не показала видимых сдвигов рефлексов. Расхождение в параметре решетки для разных областей составила всего 0.06%. Сверхпроводящие измерения показали максимальное отклонение на 1.6% по температуре перехода в сверхпроводящее состояние и 7% по плотности критического тока на диаметре 80 мм.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, плазма, нитрид ниобия, неоднородность, температура перехода в сверхпроводящее состояние, критическая плотность тока.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59463.183-24

Введение

В последнее время наблюдается значительный рост интереса к получению и исследованию тонких пленок нитрида ниобия (NbN), полученных методом атомно-слоевого осаждения, усиленного плазмой (PEALD) [1–3]. Этот метод позволяет удовлетворить потребности в атомарном контроле скорости роста пленки, конформном и однородном осаждении за счет использования последовательных, самоограниченных химических поверхностных реакций [4,5]. Если каждая из двух поверхностных реакций является самоограниченной, то эти две реакции могут протекать последовательно, обеспечивая осаждение тонкой пленки с контролем на атомном уровне. Поскольку в процессе роста пленки не должно оставаться не занятых поверхностных участков на поверхности подложки, пленки, как правило, получают сплошными и без отверстий. Этот фактор чрезвычайно важен для осаждения высококачественных пленок на технологических подложках. Также за счет того, что поверхностные реакции протекают раздельно, два реактанта в газовой фазе не контактируют. Такое разделение двух реакций ограничивает возможные побочные газофазные реакции, в результате которых могут образовываться частицы, способные осесть на поверхности подложки и создавать шероховатые пленки с включениями частиц.

Тонкие пленки NbN используются в различных сверхпроводящих устройствах и пассивных элементах, та-

ких как болометры на горячих электронах (HEB) [6], детекторы на сверхпроводящем туннельном переходе (STJ) [7], параметрические усилители (TWPA) [8], однофотонные детекторы (SNSPD) [9,10], сверхпроводящие линии задержки [11]. Для масштабируемого изготовления таких устройств необходимы пленки NbN с высокой однородностью по толщине и ее характеристикам. Например, общая длина TWPA может достигать нескольких сантиметров, поскольку от общей длины зависит величина усиления. Недостаточная однородность пленки NbN может приводить к ухудшению параметров данных усилителей. При переходе от однопиксельных к многопиксельным устройствам на основе SNSPD, которые нужны, в частности, для приложений визуализации [12,13], однородность характеристик сверхпроводящих тонких пленок NbN становится важным параметром. Величина температуры перехода в сверхпроводящее состояние и критической плотности тока каждого детектора в многопиксельном устройстве, должна иметь минимальное отклонение друг от друга. Именно поэтому PEALD NbN вызывает высокий интерес у исследователей. С использованием термического метода атомно-слоевого осаждения можно получать пленки с неоднородностью по толщине менее 1% на базе 100 нм подложки. Однако в отличие от термического процесса ALD, однородность которого достаточно хорошо исследована для диэлектрических пленок оксидов металлов и для некоторых проводящих пленок нитридов металлов [14–16], полученных из хлоридных прекурсоров,

однородность процесса PEALD нитридов металлов для прекурсоров свободных от хлора, исследована недостаточно. В работе [17] авторы достигли неоднородности температуры перехода в сверхпроводящее состояние и плотности критического тока, равной 1 и 12%, соответственно, на диаметре 2 дюйма. В работе [18] исследователи получили неоднородность температуры перехода в сверхпроводящее состояние и плотности критического тока, равной 4.5 и 39%, соответственно, на диаметре 4 дюйма на монокристаллической кремниевой подложке. В процессах PEALD помимо источников неоднородности, которые присутствуют и в термическом процессе ALD, такие как перекрытие импульсов подачи материалов, неравномерное распределение прекурсора в газе носителе, неоднородность температуры на поверхности подложки и другие, имеется неоднородность, связанная с распределением плазмы [16]. Параметры импульса плазмы могут изменять количество и качество реакционных элементов в газовой фазе над подложкой, а также реакционные участки на подложке. Таким образом, равномерная плотность плазмы имеет решающее значение для получения хорошей однородности пленки. В настоящей работе мы исследуем тонкую пленку NbN, полученную методом PEALD на кремниевой подложке с аморфным слоем оксида кремния. По сравнению с работой [18], где рост пленки NbN осуществлялся на монокристаллической кремниевой подложке, мы используем кремниевую подложку с аморфным оксидом кремния и исследуем неоднородность поверхностного сопротивления, толщины, параметра кристаллической решетки, температуры перехода в сверхпроводящее состояние и критической плотности тока. Исследование характеристик неоднородности пленки NbN на аморфном подслое оксида кремния позволит в дальнейшем изготавливать пленку NbN с требуемыми параметрами неоднородности на распределенном брэгговском отражателе или волноводах из аморфного нитрида кремния.

1. Эксперимент

В качестве подложки для осаждения была выбрана кремниевая подложка *n*-типа диаметром 4 дюйма. Перед осаждением слоев подложка отмывалась в гидромеханической установке отмывки. После отмывки подложка загружалась в шлюз и отправлялась в камеру плазмохимического осаждения для формирования пленки SiO₂ толщиной 100 nm. После осаждения пленки SiO₂ подложка отправлялась в камеру атомно-слоевого осаждения без разрыва вакуумного цикла. Пленка NbN осаждалась повторением реакционных серий, включающих в себя подачу металлоорганического прекурсора TBTDEN (tris(diethylamido)(tert-butylimido) niobium(V)) и двух реактантов, состоящих из двух различных газовых смесей. Первым реактантом выступала газовая смесь NH₃/Ar. По окончании воздействия плазмы первого реактанта, сразу же подавался второй реактант

и зажигалась плазма. В качестве второго реактанта использовалась газовая смесь H₂/Ar. Процесс осаждения атомного слоя NbN состоял из пяти основных этапов. На первом этапе подавался металлоорганический прекурсор TBTDEN (3 s, 55 mTorr). После воздействия прекурсора камера продувалась аргоном (5 s, 50 mTorr). Далее подавался первый реактант, газовая смесь NH₃/Ar, и зажигалась плазма. По окончании воздействия плазмы газовой смеси NH₃/Ar подавался второй реактант, газовая смесь H₂/Ar, и также зажигалась плазма. В завершении цикла камера продувалась аргоном (10 s, 100 mTorr) для удаления продуктов реакции. Количество циклов осаждения было равно 96. Осаждение проходило при температуре 350°C. Давление в камере на шаге воздействия плазмы определялось отношением потоков газов NH₃/Ar и H₂/Ar при полностью открытой заслонке и находилось в диапазоне 3–4 mTorr. Мощность источника индуктивно-связанной плазмы (ICP) составляла 100 W.

Поверхностное сопротивление пленки NbN измерялось четырехзондовым методом на зондовой станции 4D Automatic Four Point Probe Meter Model 280 с возможностью построения карты распределения по поверхности 100 mm пластины. Диаметр подложки для построения карты поверхностного сопротивления был равен 92 mm, чтобы избежать измерений на краях пластины. Карта распределения поверхностного сопротивления измерялась по 25 точкам.

Определение толщин исследуемых образцов было проведено методом рентгеновской рефлектометрии. Съемка рефлектограмм осуществлялась на рентгеновском дифрактометре, в геометрии параллельного зеркала и параллельно-пластинчатого коллиматора, с использованием пропорционального детектора. Режим сканирования рефлектограмм: ω -2 θ с использованием излучения CuK α ($\lambda = 1.540605 \text{ \AA}$), при ускоряющем напряжении 45 kV и 40 mA. Шаг сканирования 0.003, экспозиция 2 s. Анализ и обработка полученных рефлектограмм был проведен в специализированном программном обеспечении AMASS.

Для изучения кристаллической структуры и определения параметров кристаллической решетки тонких пленок NbN была проведена рентгеновская дифракция при скользящем падении пучка (GIXRD). Съемка проведена на рентгеновском дифрактометре с использованием пропорционального детектора. Съемка дифрактограмм проводилась в режиме сканирования по углу 2 θ при угле падения рентгеновского излучения на образец $\omega = 0.5^\circ$ с использованием излучения CuK α ($\lambda = 1.540605 \text{ \AA}$) при ускоряющем напряжении 45 kV и 40 mA. Шаг сканирования составил 0.05°, а экспозиция 2 s. Обработка и анализ дифрактограмм осуществлялись в специализированном программном обеспечении HighScore.

Измерение критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние и величины критического тока проводилось в криостате замкнутого цикла Гиффорда–МакМагона, охлаждаемого до температуры 2.4 K. Термостатирование образца осуществлялось с

помощью криогенного держателя с интегрированным и калиброванным термометром, и резистивным нагревателем. Термометрия и контроль температуры осуществлялся автоматически через PID-контролер.

Для измерения критического тока на пленках нитрида ниобия формировались микропсты шириной $2\ \mu\text{m}$ с помощью контактной литографии. Травление нитрида ниобия осуществлялось в реакторе с ICP-плазмой в смеси газов SF_6/Ar (соотношение потоков газов 2:1). Ширина сформированных микропст контролировалась с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов для точного контроля критической плотности тока. Измерения критического тока осуществлялись по двухточечной схеме измерений с использованием малошумящего прецизионного источника тока Keithley 6221A. Исследование зависимости критической плотности тока от температуры осуществлялось по вольт-амперным характеристикам, полученным в режиме стабилизации напряжения при фиксированной температуре. По величине критического тока и геометрическим размерам исследуемого образца определялась критическая плотность тока.

2. Результаты и обсуждение

При проведении съемки рефлектограмм и дифрактограмм пластина с пленкой NbN размещалась на столике гониометра. При проведении рентгеновской рефлектометрии (XRR) и GIXRD съемка проводится при скользящих углах наклона источника рентгеновского излучения, поэтому пятно рентгеновского луча на образце имеет вытянутую форму и ограничивается системой масок и щелей фокусирующей системы. На рис. 1, *a* схематично показаны зоны съемки для XRR- и GIXRD-анализа. Первоначально съемка проводилась в центральной области подложки, далее подложка смещалась относительно центра на 40 mm вдоль направления X и Y после чего также проходила съемка. После обработки полученных рефлектограмм, изображенных на рис. 1, *b* были определены толщины пленки NbN в различных зонах подложки, которые показаны в табл. 1. Разница положений и частоты резонансов на рефлектограммах указывает на различную толщину осажденной пленки. Разница положений также может зависеть от наложения разных слоев образца, например, пленка NbN и сверху окисленный кислородом воздуха слой оксида ниобия. Однако, поскольку рефлектограммы снимались сразу же после осаждения пленки нитрида ниобия, окисленного слоя не наблюдалось. Инертная среда для переноса не использовалась. Неоднородность распределения толщины пленки, рассчитанная по формуле: $U_d = (d_{\text{max}} - d_{\text{min}})/2 \cdot d_{\text{mean}}$, где d_{max} , d_{min} — максимальная и минимальная измеренная толщина пленки NbN, d_{mean} — средняя толщина пленки NbN, составила 4% на диаметре 80 mm. Также можно отметить, что имеется некоторое утолщение в центральной части подложки относительно боковых частей.

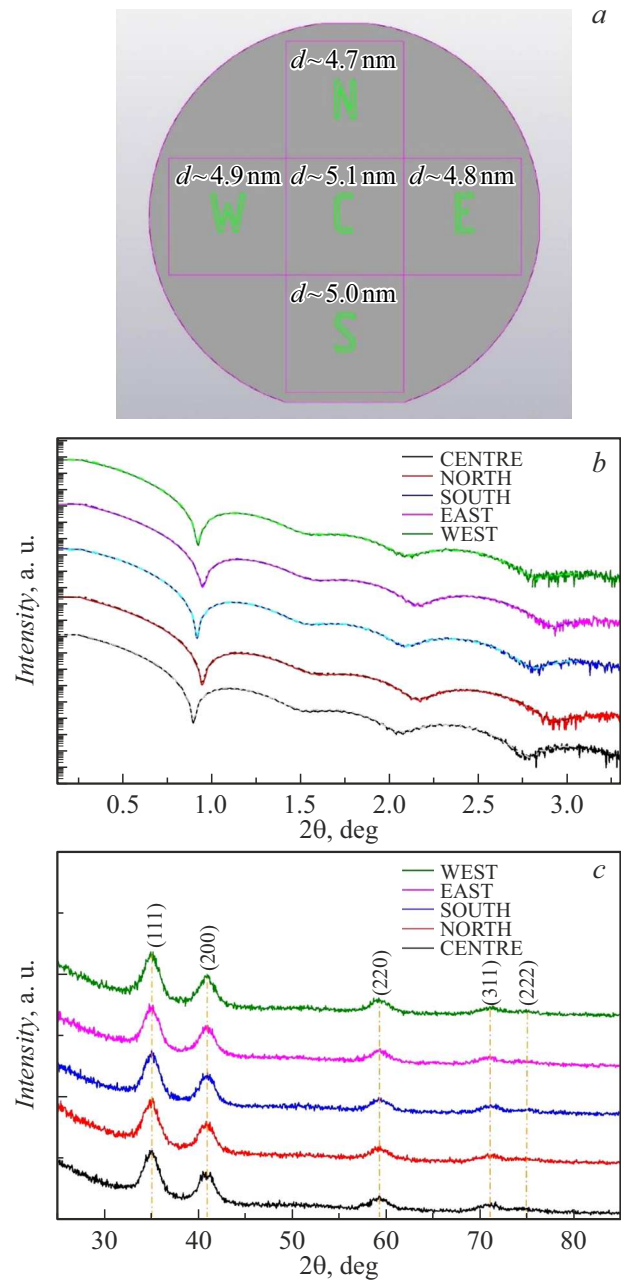


Рис. 1. Схематичное изображение подложки с зонами проведения XRR, GIXRD (*a*). На каждой зоне указана измеренная толщина пленки NbN. Рефлектограммы для разных зон на подложке (*b*). Дифрактограммы для разных зон на подложке (*c*).

На рис. 1, *c* показаны дифракционные пики, снятые в различных зонах подложки. Анализируя полученные дифрактограммы, пленка во всех частях подложки состоит из δ -фазы Nb_xN_y , кубической сингонии. Химический состав пленки в настоящей работе не исследовался. Однако для уменьшения количества углерода из металлоорганического прекурсора и остаточного кислорода в процессной камере в растущей пленке, был использован специальный двухстадийный режим осаждения с двумя неметаллическими реагентами NH_3/Ar и H_2/Ar .

Таблица 1. Рассчитанные толщины пленок и параметр кристаллической решетки для пленки NbN в зависимости от расположения на подложке

Область съемки	Толщина пленки, nm	Параметр решетки, Å
Centre	5.1 ± 0.3	4.404
South	5 ± 0.3	4.398
North	4.7 ± 0.3	4.404
West	4.9 ± 0.3	4.401
East	4.8 ± 0.3	4.404

На шаге воздействия плазмы NH₃/Ar эффективно удаляется углерод, а на стадии воздействия плазмы H₂/Ar происходит восстановление растущей пленки NbN. Так же хочется отметить, что изучение химического состава пленки толщиной менее 5 nm методом ожэ-электронной спектроскопии затруднительно, ввиду сильного перемешивания при распылении ее пучком аргона. Параметр кристаллической решетки δ-фазы был рассчитан для каждой дифрактограммы по отражениям (200), (220) и (311) и в среднем для всех исследуемых областей равен 4.40 Å. Неоднородность параметра решетки составила всего 0.07%. Рассчитанные значения параметра решетки показаны в табл. 1. Стоит обратить внимание, что при смещении подложки относительно центральной точки на 40 mm по всем направлениям дифракционные пики не смещаются и их интенсивность остается неизменной.

Температурные зависимости сопротивления микромостов для образцов из разных частей подложки показаны на рис. 2. Неоднородность температуры перехода в сверхпроводящее состояние составила 1.6%. По полученным зависимостям не прослеживается явной зависимости температуры перехода от расположения образца на подложке.

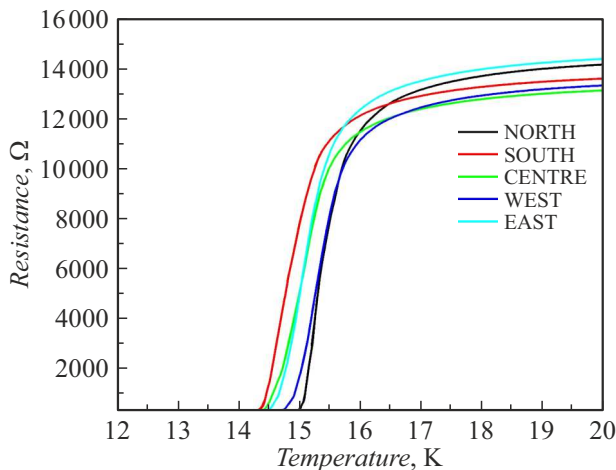


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления в зависимости от расположения образцов на подложке.

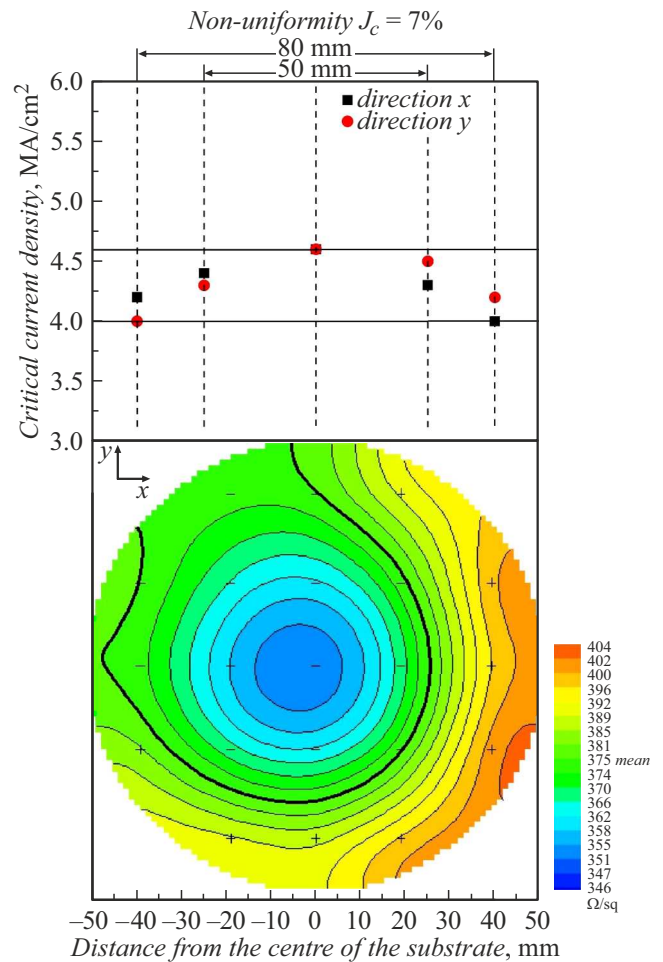


Рис. 3. Распределение критической плотности тока и карта поверхностного сопротивления на диаметре 50 и 80 mm соответственно.

Карта поверхностного сопротивления для пленки NbN показана в нижней части рис. 3. Среднее значение поверхностного сопротивления составило 375 Ω/sq. Неоднородность распределения поверхностного сопротивления составляет 7.5% на диаметре 92 mm. На карте в центральной части подложки отчетливо видна зона с более низким поверхностным сопротивлением, чем по краям подложки. Для определения неоднородности критической плотности тока были измерены 9 образцов с изготовленными микромостами. Для этого использовались 4 образца с каждой стороны подложки на удалении 25 mm от центра, 4 образца на удалении 40 mm от центра и образец, расположенный в центральной части. В верхней части рис. 3, показано распределение критической плотности тока. Видно, что критическая плотность тока в центре подложки имеет наибольшее значение, равное 4.6 MA/cm². По мере отдаления от центра подложки критическая плотность тока снижается в обоих направлениях до 4 MA/cm². В табл. 2 для сравнения приведены величины критической плотности тока, для пленок, полученных различными методами.

Таблица 2. Величины критической плотности тока и его неоднородность, для пленок, полученных различными методами

Коллектив	Метод получения	Подложка	$T_{\text{sub}}, ^\circ\text{C}$	d , nm	T_c , К	J_c , МА/см ²	Отклонение J_c на диаметре 2 дюйма, %
D. Dochev et al. [19]	Магнетронное распыление	SiO ₂	800	≈ 8.6	9.3	1.14	–
R. Romestain et al. [20]	Магнетронное распыление	Al ₂ O ₃	600	6.4	11.3	4.6	–
R. Espiau de Lamaestre et al. [21]	Магнетронное распыление	Al ₂ O ₃	600	4.4	11.3	4	–
M. Ziegler et al. [22]	Атомно-слоевое осаждение	SiO ₂	350	28	14	7.1	–
S. Linzen et al. [23]	Атомно-слоевое осаждение	SiO ₂	350	40	13.8	7	–
E. Knehr et al. [17]	Атомно-слоевое осаждение	SiO ₂	380	6.1	10.3	5.7	12
M. Shibalov et al. [1]	Атомно-слоевое осаждение	SiO ₂	350	7	12.3	9	–
Настоящая работа	Атомно-слоевое осаждение	SiO ₂	350	4.9	15	4.6	1

Как видно из таблицы, метод атомно-слоевого осаждения не уступает по величине критической плотности тока методу магнетронного распыления.

Неоднородность плотности критического тока составила 7% на диаметре 80 mm. Такое распределение поверхностного сопротивления и критической плотности тока напрямую связано с конфигурацией установки, диаметром источника индуктивно-связанной плазмы и выбранным рабочим давлением. При атомно-слоевом осаждении с источником удаленной плазмы, который и используется в настоящей работе, источник плазмы располагается на расстоянии от подложки. Таким образом, подложка практически не участвует в генерации плазмы. Однако в отличие от атомно-слоевого осаждения с радикальным усилением плазма все еще присутствует над поверхностью подложки, и плотности электронов и ионов имеют ненулевое значение. Плазма в области „downstream“, т.е. непосредственно под колбой источника, может быть достаточно активной и проводить ионизацию поверхности подложки. В совокупности с увеличенной длиной свободного пробега электронов и ионов, за счет работы на низком давлении, присутствует эффект направленной ионной бомбардировки в центральной части подложки, за счет чего и имеются отличия в характеристиках пленки. В ряде работ было показано, что чем меньше давление на шаге воздействия плазмы неметаллического реактанта при росте пленки NbN, тем выше сверхпроводящие характеристики и ниже удельное сопротивление пленки. Работа при

низком давлении является определяющим фактором для получения высококачественных пленок NbN. Исходя из этого, однородность пленок может быть улучшена двумя путями. Это использование источника плазмы большего диаметра или же применение второго источника, за счет которого можно подавать внешнее смещение для активной бомбардировки поверхности подложки при более высоком давлении.

Заключение

Метод атомно-слоевого осаждения обеспечивает высокую однородность пленок, особенно для процессов термического осаждения оксидов переходных металлов. Однако при атомно-слоевом осаждении, усиленным плазмой нитридов металлов, однородность получаемых пленок сильно зависит от конфигурации реактора и параметров процесса осаждения. Это связано с неоднородностью распределения плазмы в процессной камере.

В работе была исследована неоднородность характеристик пленки NbN, полученной методом PEALD на 100 mm подложке в различных точках. Мы достигли неоднородности поверхностного сопротивления в 7.5% на диаметре 92 mm и 3% на диаметре 50 mm. Неоднородность толщины пленки и параметра решетки составила 4 и 0.06% соответственно на диаметре 80 mm. Сверхпроводящие измерения показали, что температура перехода в сверхпроводящее состояние и величина

критической плотности тока имеют неоднородность 1.6 и 7% соответственно на диаметре 80 mm. В работе [17] была достигнута неоднородность температуры перехода в сверхпроводящее состояние и критической плотности тока в 1 и 12% соответственно на диаметре 2 дюйма. В дальнейшем мы намерены использовать полученные результаты для создания многопиксельного массива однофотонных детекторов.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке проекта № 122040800157-8 Министерства образования и науки РФ. При выполнении работы использовалось оборудование, входящее в УНУ „КУТГИ“ Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.V. Shibalov, A.M. Mumlyakov, I.V. Trofimov, E.R. Timofeeva, A.P. Sirotina, E.A. Pershina, A.M. Tagachenkov, Y.V. Anufriev, E.V. Zenova, M.A. Tarkhov. *Superconductor Science Technol.*, **34** (8), 085016 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/ac0d09
- [2] M.V. Shibalov, A.P. Sirotina, E.A. Pershina, V.P. Martovitskii, A.A. Shibalova, A.M. Mumlyakov, I.V. Trofimov, E.R. Timofeeva, N.V. Porokhov, E.V. Zenova, M.A. Tarkhov. *Appl. Surf. Sci.*, **612**, 155697 (2023). DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.155697
- [3] M.J. Sowa, Y. Yemane, J. Zhang, J.C. Palmstrom, L. Ju, N.C. Strandwitz, B.P. Fritz, J. Provine. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **35** (1), (2017). DOI: 10.1116/1.4972858
- [4] S.M. George. *Chem. Rev.*, **110** (1), 111 (2010). DOI: 10.1021/cr900056b
- [5] M. Ritala, M. Leskelä. *Handbook of Thin Films* (2002). DOI: 10.1016/B978-012512908-4/50005-9
- [6] S.A. Ryabchun, I.V. Tretyakov, M.I. Finkel, S.N. Maslennikov, N.S. Kaurova, V.A. Seleznev, B.M. Voronov, G.N. Goltsman. *Signal*, **270**, 320 (2008).
- [7] L. Parlato, G. Peluso, G. Pepe, U.S. di Uccio, R. Cristiano, E. Esposito, L. Frunzio, S. Pagano, H. Akoh, H. Nakagawa, S. Takada, M. Gutsche, H. Kraus. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **370** (1), 95 (1996). DOI: 10.1016/0168-9002(95)01060-2
- [8] B.K. Tan, F. Boussaha, C. Chaumont, J. Longden, J.N. Montilla. *Open Research Europe*, **2**, (2022).
- [9] G.N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, R. Sobolewski. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (6), 705 (2001). DOI: 10.1063/1.1388868
- [10] F. Marsili, F. Najafi, E. Dauler, F. Bellei, X. Hu, M. Csete, R.J. Molnar, K.K. Berggren. *Nano Lett.*, **11** (5), 2048 (2011). DOI: 10.1021/nl2005143
- [11] G.K.G. Hohenwarter, E.K. Track, R.E. Drake, R. Patt. *IEEE Transactions Appl. Superconductivity*, **3** (1), 2804 (1993). DOI: 10.1109/77.233499
- [12] Y.Z. Wang, W.J. Zhang, X.Y. Zhang, G.Z. Xu, J.M. Xiong, Z.G. Chen, Y. Hong, X. Liu, P. Yuan, L. Wu, Z. Wang, L.X. You. *arXiv preprint arXiv:2402.02311*. (2024).
- [13] G.G. Taylor, D. Morozov, N.R. Gemmell, K. Erotokritou, S. Miki, H. Terai, R.H. Hadfield. *Opt. Express*, **27** (26), 38147 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.038147
- [14] D. Koushik, M. Jošt, A. Dučinskas, C. Burgess, V. Zardetto, C. Weijters, M.A. Verheijen, W.M.M. Kessels, S. Albrecht, M. Creatore. *J. Mater. Chem. C*, **7** (40), 12532 (2019). DOI: 10.1039/C9TC04282B
- [15] J.A. Oke, T.C. Jen. *J. Mater. Res. Technol.*, (2022). DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.064
- [16] K.E. Elers, T. Blomberg, M. Peussa, B. Aitchison, S. Haukka, S. Marcus. *Chem. Vapor Deposition*, **12** (1), 13 (2006). DOI: 10.1002/cvde.200500024
- [17] E. Knehr, M. Ziegler, S. Linzen, K. Ilin, P. Schanz, J. Plentz, M. Diegel, H. Schmidt, E. Il'ichev, M. Siegel. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **39** (5), (2021). DOI: 10.1116/6.0001126
- [18] C.T. Lennon, Y. Shu, J.C. Brennan, D.K. Namburi, V. Varghese, D.T. Hemakumara, L.A. Longcha, S. Srinath, R.H. Hadfield. *Mater. Quant. Technol.*, **3** (4), 045401 (2023). DOI: 10.1088/2633-4356/ad0aa5
- [19] D. Dochev, V. Desmaris, A. Pavolotsky, D. Meledin, Z. Lai, A. Henry, E. Janzén, E. Pippel, J. Woltersdorf, V. Belitsky. *Superconductor Sci. Technol.*, **24** (3), 035016 (2011). DOI: 10.1088/0953-2048/24/3/035016
- [20] R. Romestain, B. Delaet, P. Renaud-Goud, I. Wang, C. Jorel, J.C. Villegier, J.P. Poizat. *New J. Phys.*, **6** (1), 129 (2004). DOI: 10.1088/1742-6596/97/1/012087
- [21] R. Espiau de Lamaestre, P. Odier, J.C. Villégier. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (23), (2007). DOI: 10.1063/1.2820607
- [22] M. Ziegler, S. Linzen, S. Goerke, U. Brückner, J. Plentz, J. Dellith, A. Himmerlich, M. Himmerlich, U. Hübner, S. Krischok, H.G. Meyer. *IEEE Transactions Appl. Superconductivity*, **27** (7), 1 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2017.2744326
- [23] S. Linzen, M. Ziegler, O.V. Astafiev, M. Schmelz, U. Hübner, M. Diegel, E. Il'ichev, H.G. Meyer. *Supercond. Sci. Technol.*, **30** (3), 035010 (2017). DOI: 10.1088/1361-6668/aa572a