

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.419

## Исследование тонких пленок для изготовления туннельных переходов Nb/AlN/NbN и линий передач NbTiN-SiO<sub>2</sub>-Al

Чекушкин А.М., Филиппенко Л.В., Кашин В.В., Фоминский М.Ю., Кошелец В.П.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: [chekushkin@hitech.cplire.ru](mailto:chekushkin@hitech.cplire.ru), [lyudmila@hitech.cplire.ru](mailto:lyudmila@hitech.cplire.ru), [vkashin@cplire.ru](mailto:vkashin@cplire.ru), [demiurge@hitech.cplire.ru](mailto:demiurge@hitech.cplire.ru), [valery@hitech.cplire.ru](mailto:valery@hitech.cplire.ru)

Поступила 03.11.2021, рецензирована 10.11.2021, принята 17.11.2021

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** В представленной работе изучена поверхность тонких пленок Nb, Al, NbTiN, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые необходимы для создания высокочувствительных устройств терагерцового диапазона. Кратко описана технология изготовления подобных структур. Все пленки были изготовлены при помощи установки магнетронного напыления Kurt J. Lesker. Исследование шероховатости поверхности пленок проводилось при помощи атомно-силового микроскопа Bruker Ikon. Было показано, что для используемых пленок качество поверхности определяется не столько режимом напыления, сколько последующими технологическими операциями травления в плазмохимической установке. Получены лучшие значения среднеквадратического отклонения профиля поверхности  $R_q = 2$  нм для используемой пленки NbTiN толщиной 325 нм. Изучено формирование тонких слоев Al, используемых для создания туннельного барьера в сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник структурах. Показано, что пленки Al толщиной более 6 нм уже сплошные. Изучены шероховатости поверхностей однослойных и многослойных пленок.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, тонкие пленки, магнетронное напыление, джозефсоновские переходы, шероховатость поверхности

УДК 539.231

**Благодарности:** Работа поддержана РФФ (проект № 19-19-00618). Оборудование УНУ "Криоинтеграл" было использовано при проведении данного исследования. УНУ поддержана грантом от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-667. Авторы благодарят С. Краевского (Carl Zeiss, Москва, Россия) за выполнение АСМ изображений.

**Для цитирования:** Чекушкин А.М., Филиппенко Л.В., Кашин В.В., Фоминский М.Ю., Кошелец В.П.

Исследование тонких пленок для изготовления туннельных переходов Nb/AlN/NbN и линий передач NbTiN-SiO<sub>2</sub>-Al. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):419-426. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.419.

## Investigation of thin films for fabrication of Nb/AlN/NbN tunnel junctions and microstrip lines of NbTiN-SiO<sub>2</sub>-Al

Artem M. Chekushkin, Lyudmila V. Filippenko, Vadim V. Kashin, Mikhail Yu. Fominskiy, Valery P. Koshelets

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>  
Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [chekushkin@hitech.cplire.ru](mailto:chekushkin@hitech.cplire.ru), [lyudmila@hitech.cplire.ru](mailto:lyudmila@hitech.cplire.ru), [vkashin@cplire.ru](mailto:vkashin@cplire.ru), [demiurge@hitech.cplire.ru](mailto:demiurge@hitech.cplire.ru), [valery@hitech.cplire.ru](mailto:valery@hitech.cplire.ru)

Received November 03, 2021, peer-reviewed November 10, 2021, accepted November 17, 2021

**Abstract:** The surface of thin films of Nb, Al, NbTiN, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is investigated in this work. These films are necessary for the fabrication of high-sensitive devices of THz range. The fabrication processes of such devices are described briefly. All films were fabricated using a Kurt J. Lesker magnetron sputtering system. The study of the film surface roughness was carried out using a Bruker Ikon atomic force microscope. The surface quality of films is determined not only deposition

mode, but plasma etching process also. The best values of the root-mean-square deviation of the surface profile  $R_q = 2$  nm were obtained for the used NbTiN film with a thickness of 325 nm. Thin Al-layers that is used for tunnel barrier formation is studied. It is shown than Al films with a thickness of more than 6 nm are already continuous. The surface roughness of the single-layer and multilayer films has been studied

*Keywords:* superconductivity, tunnel junctions, magnetron sputtering, thin films, surface roughness

UDC 539.231

*Acknowledgements:* The study is supported by the Russian Science Foundation (project No. 19–19–00618). The equipment of USU "Cryointegral" was used to carry out the research; USU is supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2021-667. We thank S. Kraevsky (Carl Zeiss, Moscow, Russia) for performing AFM imaging.

*For citation:* Artem M. Chekushkin, Lyudmila V. Filippenko, Vadim V. Kashin, Mikhail Yu. Fominskiy, Valery P. Koshelets. Investigation of thin films for fabrication of Nb/AlN/NbN tunnel junctions and microstrip lines of NbTiN-SiO<sub>2</sub>-Al. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):419-426. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.419.

## Содержание

1. Введение (420)
  2. Технология изготовления СИС-структур (420)
  3. Исследование поверхности пленок (421)
  4. Выводы (425)
- Литература (425)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания приемных структур терагерцового диапазона важно знать и контролировать параметры используемых тонких пленок. Как для микрополосковой линии, так и для джозефсоновского перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) необходимы тонкие пленки требуемых параметров: шероховатость поверхности, удельное сопротивление, температура критического перехода (для сверхпроводников). В качестве сверхпроводников для СИС-переходов используются Nb и NbN. На их основе реализуются Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb переходы с предельной частотой 700 ГГц и Nb-AlN-NbN переходы с возможной предельной частотой 1.4 ТГц [1,2]. Для электродов микрополосковой линии используется NbTiN и Al, а в качестве диэлектрика выбран SiO<sub>2</sub>.

Туннельные СИС-переходы на основе ниобия являются основными элементами

для создания сверхчувствительных детекторов для задач радиоастрономии [3,4]. Качество поверхности, используемых для изготовления устройств, пленок напрямую влияет на их свойства. Например, в работе [5] продемонстрировано, что пленка NbTiN, имеющая более развитую кристаллическую структуру (шероховатость пленки определяется кристаллитами большего размера), имеет также более низкую температуру перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ ) и более высокое удельное сопротивление, что негативно сказывается при работе устройства на высоких частотах (более 1 ТГц).

Данная статья является продолжением работы по оптимизации режимов изготовления тонких пленок для сверхпроводниковых устройств [5] и направлена на определение качества их поверхности.

### 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИС-СТРУКТУР

Все структуры формируются на подложках двух типов: высокоомный полированный кремний или аморфный полированный кварц. Последний необходим для достижения предельных параметров для волноводных СИС-структур, поскольку его диэлектрическая постоянная существенно

меньше, чем у кремния. При этом кварц толщиной 200 мкм после изготовления образца полируется до толщины порядка 40 мкм для приемных структур с рабочей частотой 1 ТГц. На выбранную подложку по всей поверхности напыляется слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 100 нм. Этот буферный слой работает как стоп-слой при последующем травлении NbTiN во фторсодержащих газах и позволяет избежать травления подложки. Все пленки были нанесены методом магнетронного напыления.

Первым слоем рабочей структуры формируется нижний электрод из NbTiN толщиной 325 нм. Данная толщина обусловлена лондоновской глубиной проникновения в этом материале [6]. Слой NbTiN напыляется по всей площади подложки, а затем травится по резистивной маске при помощи плазмохимического травления во фторсодержащих газах (CF<sub>4</sub>). Следует отметить, что подобные процессы травления используются и для слоев Nb и NbN. Такой подход позволяет обеспечить ровный край электрода, в отличие от технологии взрывной литографии, которая в условиях магнетронного напыления и при подобных толщинах может оставлять "стенки" из металла вдоль краев. Кроме того, этот слой является нижним слоем микрополосковой линии NbTiN-SiO<sub>2</sub>-Al, в которой текут высокочастотные токи. Ввиду того, что глубина проникновения поля большая, неоднородности порядка 10 нм не очень важны. Для алюминия, который является верхним электродом микрополосковой линии, токи текут по нижней поверхности, поэтому верхняя шероховатость пленки также не принципиальна.

Следующим шагом является напыление трехслойной структуры Nb-AlN-NbN (толщины 80-7-80 нм) по всей поверхности подложки и ее последующее травление по резистивной маске насквозь до слоя NbTiN.

В результате на поверхности нижнего электрода формируются "столбики" из трехслойной структуры, которые являются СИС-переходами. Характерные площади перехода могут быть от 0.5 до 40 мкм<sup>2</sup>, что определяется поставленными задачами. На этом шаге важно вовремя остановить травление нижнего слоя в трехслойной структуре (Nb), чтобы избежать травления слоя NbTiN. После этого производится процесс анодизации поверхности NbTiN и торцов СИС-перехода в растворе тетрабората аммония с гликолем. По той же резистивной маске происходит напыление слоя изолятора толщиной 250 нм, который необходим и как слой диэлектрика в микрополосковой линии, и как изолирующий слой от торцевых контактов между СИС-переходом и верхним электродом. Верхний электрод формируется из слоя алюминия толщиной 450 нм.

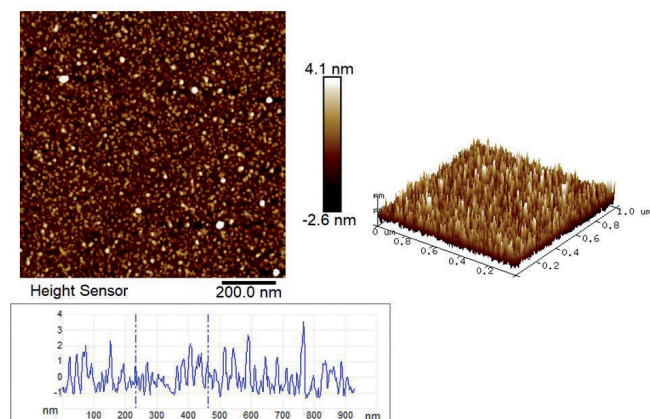
### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК

Исследование пленок происходило при помощи атомно-силового микроскопа Bruker Ikon АСМ в PeakForce Tapping® режиме, обработка результатов проходила в программном пакете Nanoscope V.

Важными параметрами при определении шероховатости пленок являются среднеарифметическое отклонение профиля поверхности  $R_a$ , а также среднеквадратическое отклонение профиля поверхности  $R_q$ .

Шероховатость поверхности тонкой пленки существенно зависит от качества поверхности и материала, на который она наносится. Была исследована поверхность Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 100 нм, напыленного с помощью RF-магнетрона на подложке из кремния. Получены значения  $R_q = 1.02$  нм,  $R_a = 0.8$  нм. Результат сканирования изображен на **Рис. 1**. Для сравнения, для поверхности оптического кварца, отполированного механико-химическим способом  $R_a = 0.2$  нм [7].

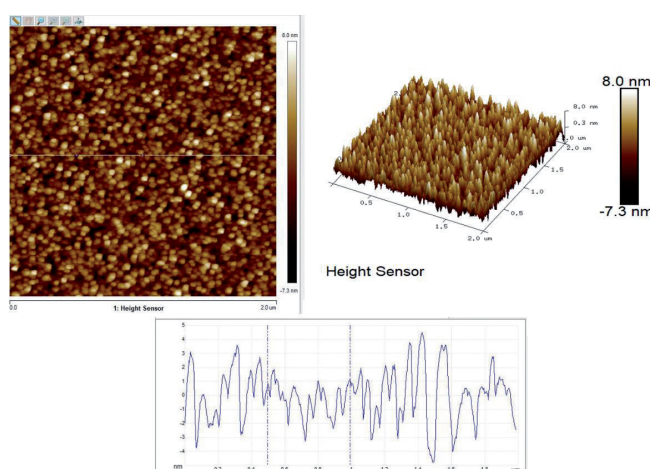
Слой NbTiN толщиной 325 нм был



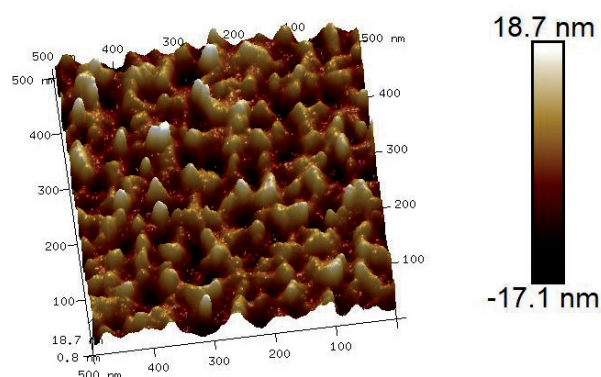
**Рис. 1.** Изображение пленки оксида алюминия в АСМ. Площадь сканирования  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>. Слева сверху вид 2D скана, справа сверху он же в 3D, снизу на рисунке сечение по центру сканирования.

напылен на подложку из кремния. На площади сканирования  $90 \times 90$  мкм<sup>2</sup> были получены значения  $R_q = 2$  нм и  $R_a = 1.3$  нм. Для этого же образца, но на площади сканирования  $4$  мкм<sup>2</sup>,  $R_q$  и  $R_a$  составили  $2.24$  нм и  $1.81$  нм соответственно, профиль поверхности изображен на **Рис. 2**.

Поверхность NbTiN также контролировалась после процедур плазмохимических травлений. Для этого был подготовлен образец, на который напылили слой из Nb толщиной  $80$  нм, а затем протравили его в  $CF_4$ . На **Рис. 3** изображена поверхность NbTiN после травления слоя



**Рис. 2.** Изображение NbTiN толщиной  $325$  нм в АСМ. Площадь сканирования  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>. Слева сверху вид 2D скана, справа сверху он же в 3D, снизу на рисунке сечение по центру сканирования.

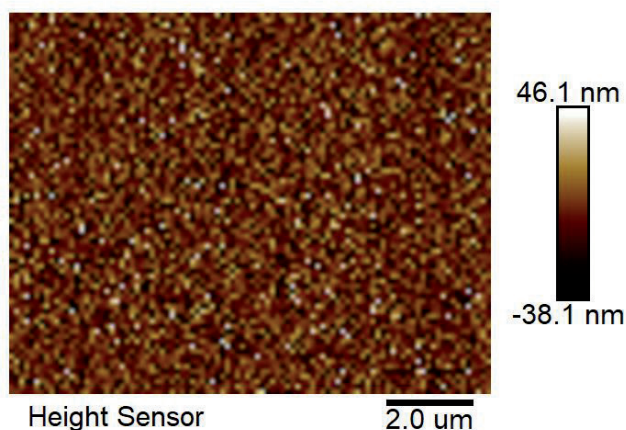


Height Sensor

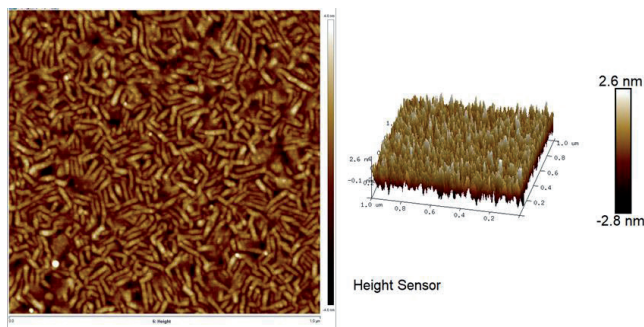
**Рис. 3.** Поверхность NbTiN после травления Nb. Размер окна сканирования  $0.5 \times 0.5$  мкм<sup>2</sup>.

Nb. Заметно, что шероховатость пленки стала существенно выше,  $R_q = 5.2$  нм,  $R_a = 4.14$  нм.

Поверхность NbTiN была изучена также после травления структуры Nb/AlN/NbN насквозь. Для площади сканирования  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup> получены значения  $R_q = 11.6$  нм,  $R_a = 8.2$  нм. Результат сканирования изображен на **Рис. 4**. Можно сделать однозначный вывод о том, что поверхность NbTiN существенно портится при травлении насквозь вышележащих слоев, что может быть связано с анизотропным травлением материала. В дальнейших исследованиях планируется использовать тонкий слой Al (до  $5$  нм) как стоп-слой, чтобы предотвратить травление NbTiN во фторсодержащих газах.



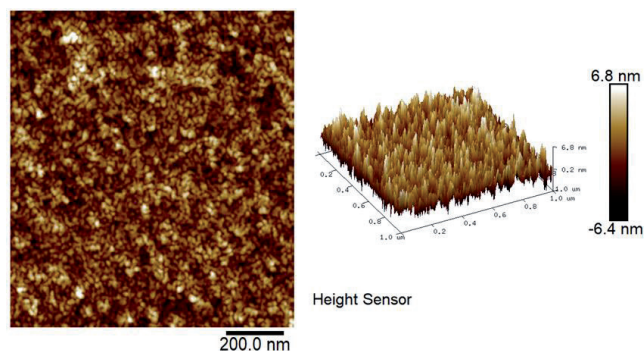
**Рис. 4.** Поверхность NbTiN после травления Nb/AlN/NbN. Площадь окна сканирования  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** Скан размером  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup> пленки Nb, толщиной 200 нм, в АСМ и его 3D изображение.

Кроме того, в литературных источниках есть информация, что слой Al может смачивать слой NbTiN или Nb, что позволит уменьшить шероховатость поверхности [8].

По технологической карте слой Nb напыляется поверх слоя NbTiN. Изготовление этого слоя на установке магнетронного напыления возможно как при помощи DC-магнетрона, так и при помощи RF-магнетрона. В работах [9,10] было показано, что в случае использования DC-магнетрона поверхность пленок получается более гладкой, что лучше подходит для создания джозефсоновских переходов высокого качества. В работе была исследована шероховатость пленки Nb толщиной 200 нм, напыленной на подложку из кремния, а также шероховатость пленки Nb толщиной 80 нм, напыленной поверх слоя NbTiN. Для первого случая получены значения  $R_q = 0.78$  нм и  $R_a = 0.62$  нм. Результат сканирования, а также вид в 3D изображены на **Рис. 5**. Во втором случае  $R_q$  и  $R_a$  составили 1.86 нм и 1.48 нм на площади сканирования в 1 мкм<sup>2</sup> (см. **Рис. 6**).

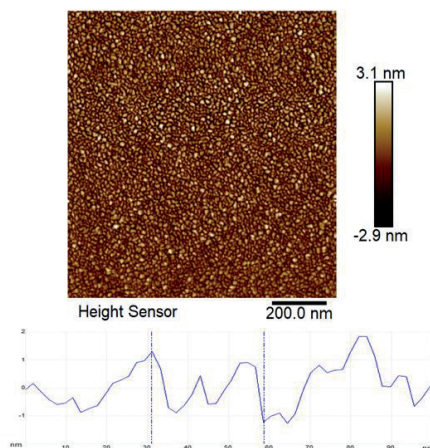


**Рис. 6.** Скан размером  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup> пленки Nb, толщиной 80 нм, в АСМ и его 3D изображение.

В сравнении с характеристиками шероховатости поверхности NbTiN, шероховатость поверхности Nb, напыленного поверх слоя NbTiN, имеет лучшие значения  $R_q$  и  $R_a$ .

Были изучены тонкие пленки Al толщиной 3 нм, 6 нм, 20 нм, 124 нм, напыленные на кремниевую подложку с буферным слоем из 100 нм Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Пленки с толщинами 3, 6 и 20 нм пылятся с низкой скоростью напыления 0.2 нм/с и с пониженной мощностью, подаваемой на магнетрон (300 Вт). Более толстые пленки Al изготавливаются при мощности магнетрона 500 Вт, скорость напыления при этом составляет 1 нм/с.

Характерные толщины барьерного слоя в СИС-переходе составляют 1-1.5 нм, а его формирование происходит в вакуумной камере магнетронной установки без разрыва вакуума между сверхпроводящими слоями. При таких условиях изготовления невозможно напрямую исследовать поверхность барьерного слоя AlO<sub>x</sub> или AlN из-за того, что при атмосферном давлении поверхность этих слоев изменится – произойдет дополнительное окисление. Вначале происходит напыление тонкого слоя Al толщиной 5-7 нм [8,11], затем либо окисление в атмосфере кислорода при характерном давлении 10<sup>-1</sup> мбар, либо нитризация в высокочастотной плазме азота (давление 6·10<sup>-3</sup> мбар, мощность 75 Вт). На **Рис. 7** изображен скан, размером  $1 \times 1$



**Рис. 7.** Пленка Al толщиной 3 нм и ее сечение.

мкм<sup>2</sup> пленки Al толщиной 3 нм.

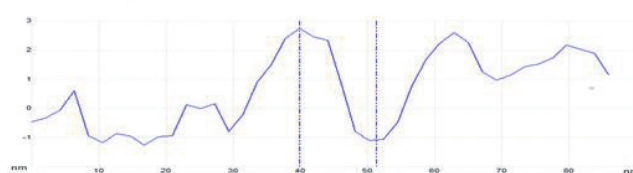
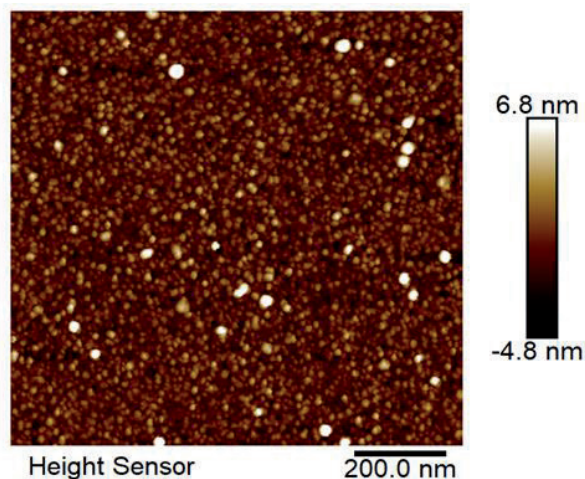
У сечения *peak-to-peak* порядка 3 нм, что соответствует толщине напыленной пленки, а значит, что при толщине в 3 нм пленка алюминия еще островковая,  $R_q = 0.9$  нм,  $R_a = 0.75$  нм, что нельзя считать истинным значением, т.к. островная пленка повторяет рельеф нижнего слоя -  $Al_2O_3$ .

Результаты сканирования пленки Al, толщиной 6 нм изображены на **Рис. 8**.

Здесь, как и на пленке Al 3 нм, видно, что расстояние между пиками достигает 6 нм, однако зерна пленки уже гораздо крупнее. Для этой пленки получены значения  $R_q = 2.3$  и  $R_a = 1.7$  нм.

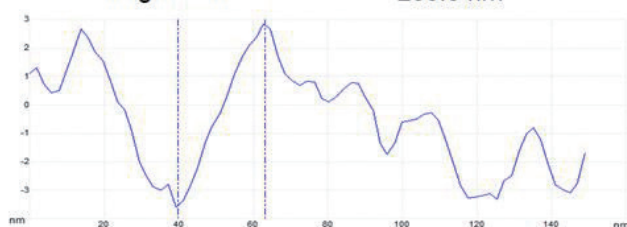
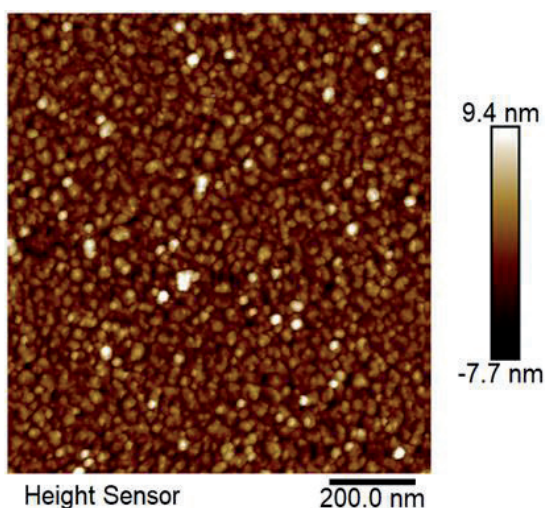
Скан пленки Al толщиной 20 нм показан на **Рис. 9**. Для этой пленки  $R_q = 1.5$  нм,  $R_a = 1.1$  нм, что меньше, чем для пленки Al с толщиной 6 нм. Это связано с тем, что пленка уже сплошная, а не островная, что также подтверждается расстоянием между пиками, не превышающим 4 нм.

Пленки алюминия, изготавливаемые при более высоких скоростях и больших толщинах имеют существенно выше

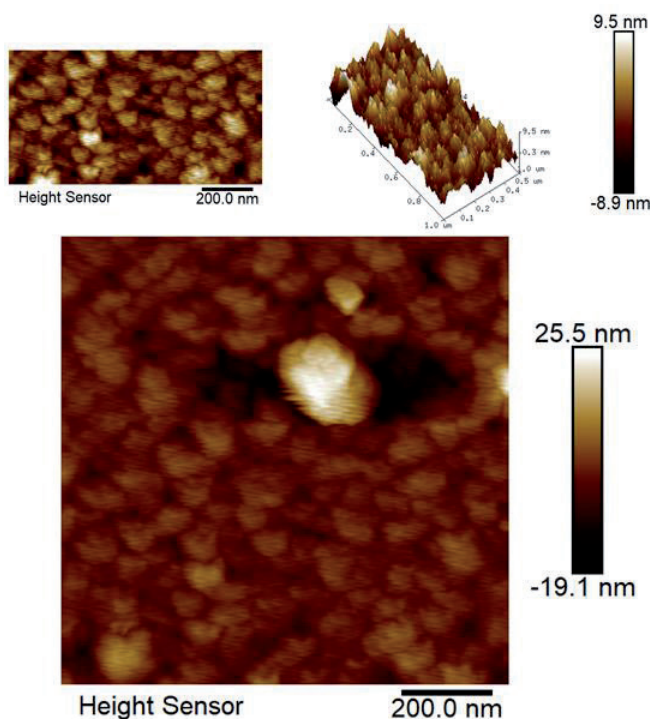


**Рис. 9.** Скан площадью  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup> пленки Al, 20 нм и его сечение.

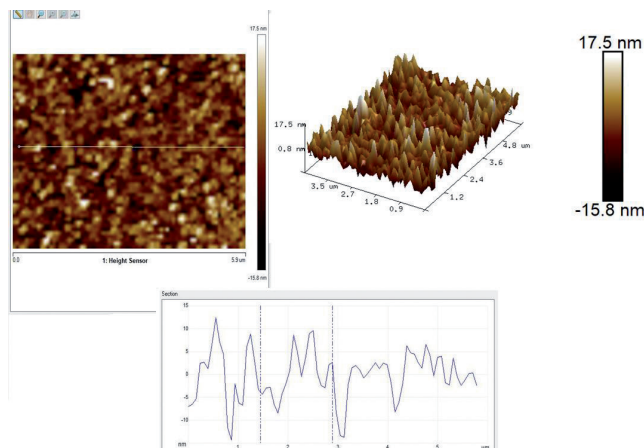
шероховатость. Для Al толщиной 124 нм на кремниевой подложке с подслоем  $Al_2O_3$   $R_q = 2.57$  нм,  $R_a = 2$  нм (**Рис. 10**, сверху), но если учитывать сильную особенность, которая



**Рис. 8.** Скан  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>, Al, 6 нм и его сечение.



**Рис. 10.** Al, 124 нм. Сверху: область сканирования с однородной поверхностью, снизу – с особенностью, которая проявляется периодически по всей пленке.

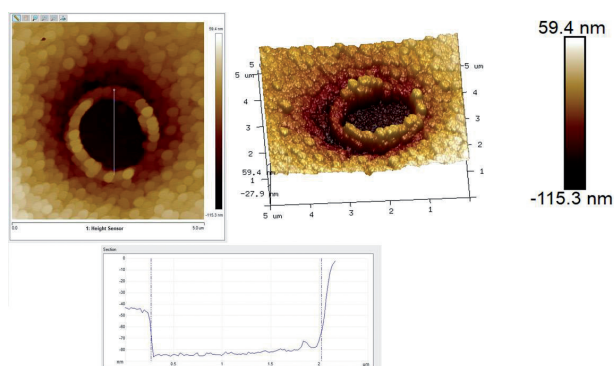


**Рис. 11.** Скан  $6 \times 6$  мкм<sup>2</sup> поверхности SiO<sub>2</sub> напыленной поверх NbTiN. Слева сверху вид в 2D, справа он же в 3D, снизу - характерный профиль сечения пленки.

может проявляться на больших толщинах, то  $R_q = 4.5$  нм,  $R_a = 3$  нм (Рис. 10 снизу).

Было проведено исследование поверхности SiO<sub>2</sub>, напыленной после травления трехслойной структуры, поверх слоя NbTiN:  $R_q = 4.0$  нм,  $R_a = 3.0$  нм, что лучше, чем поверхность NbTiN после травления. Результат сканирования показан на **Рис. 11**.

Также исследована поверхность SiO<sub>2</sub> непосредственно возле сформированных СИС-переходов: диаметр перехода 1.8 мкм, характерный размер гранулы SiO<sub>2</sub> составляет 250 нм (**Рис. 12**).



**Рис. 12.** Поверхность SiO<sub>2</sub> и СИС-переход. Размер окна сканирования  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>. Сверху слева вид в 2D, справа сверху он же в 3D, снизу профиль сечения вдоль СИС-перехода.

## ВЫВОДЫ

Методом атомно-силовой микроскопии исследованы тонкие пленки Al, Nb, NbTiN, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, необходимые для создания приемных структур терагерцового диапазона. Измеренные значения  $R_q$  и  $R_a$  свидетельствуют о том, что поверхности этих пленок подходят для дальнейшей работы по изготовлению СИС-переходов. Показано, что поверхность NbTiN сильно зависит от последующих технологических операций, а именно от плазмохимического травления. Предложено в дальнейшем использовать слой тонкого алюминия, который должен предотвратить травление NbTiN после травления Nb. Продемонстрировано, что необходимая толщина для формирования сплошной пленки Al составляет более 6 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jackson BD, de Lange G, Zijlstra T, Kroug M, Klapwijk TM, Stern JA. Niobium titanium nitride-based superconductor-insulator-superconductor mixers for low-noise terahertz receivers. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(11):113904.
2. Jackson BD, de Lange G, Zijlstra T, Kroug M, Kooi JW, Stern JA, Klapwijk TM. Low-noise 0.8-0.96- and 0.96-1.12-THz superconductor-insulator-superconductor mixers for the Herschel Space Observatory. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2006, 54(2):547-558.
3. Kerr AR, Pan SK, Claude SM, Dindo P, Lichtenberger AW, Effland JE, Lauria EF. Development of the ALMA band-3 and band-6 sideband-separating SIS mixers. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(2):201-212.
4. Baryshev AM, Hesper R, Mena FP, Klapwijk TM, Van Kempen TA, Hogerheijde MR, Jackson BD, Adema J, Gerlofsma GJ, Bekema ME, Barkhof J, de Haan-Stijkel LHR, van dem Bemt M, Koops A, Keizer K, Pieters C, van het Jagt JK, Schaeffer HHA, Zijlstra T,

- Kroug M, Lodewijk CFJ, Wielinga K, Boland W, de Graauw MWM, van Dishoeck EF, Jager H, Wild W. The ALMA Band 9 receiver-Design, construction, characterization, and first light. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 577:A129.
5. Чекушкин АМ, Филиппенко ЛВ, Ломов АА, Liu Dong, Sheng-Cai Shi, Кошелец ВП. Оптимизация режимов изготовления пленок Nb, NbN, NbTiN и высококачественных туннельных переходов на их основе для приемных структур терагерцевого диапазона. *Журнал технической физики*, 2021, 91(10):1577-1582.
  6. Lap BNR, Khudchenko A, Hesper R, Rudakov KI, Dmitriev PN, Khan F, Koshelets VP, Baryshev AM. Characterization of superconducting NbTiN films using a dispersive Fourier transform spectrometer. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(15):152601.
  7. Bo D, Jianwei Z, Yuling L, Mingbin S, Yufeng Z. Surface roughness of optical quartz substrate by chemical mechanical polishing. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(11):116001.
  8. Imamura T, Hasuo S. Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>2</sub>/sub x/-Al/Nb Josephson junctions. II. Deposition of thin Al layers on Nb films. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 1992, 2(2):84-94.
  9. Imamura T, Shiota T, Hasuo S. Fabrication of high quality Nb/AlO<sub>2</sub>/sub x/-Al/Nb Josephson junctions. I. Sputtered Nb films for junction electrodes. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 1992, 2(1):1-14.
  10. Gurvitch M, Washington MA, Huggins HA. High quality refractory Josephson tunnel junctions utilizing thin aluminum layers. *Applied Physics Letters*, 1983, 42(5):472-474.
  11. Rowell JM, Gurvitch M, Geerk J. Modification of tunneling barriers on Nb by a few monolayers of Al. *Physical Review B*, 1981, 24(4):2278.
- Чекушкин Артем Михайлович**  
научный сотрудник  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
[chekushkin@hitech.cplire.ru](mailto:chekushkin@hitech.cplire.ru)
- Филиппенко Людмила Викторовна**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
[lyudmila@hitech.cplire.ru](mailto:lyudmila@hitech.cplire.ru)
- Кашин Вадим Валерьевич**  
научный сотрудник  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
[vvkashin@cplire.ru](mailto:vvkashin@cplire.ru)
- Фоминский Михаил Юрьевич**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
[demiurge@hitech.cplire.ru](mailto:demiurge@hitech.cplire.ru)
- Кошелец Валерий Павлович**  
д.ф.-м.н., профессор  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
[valery@hitech.cplire.ru](mailto:valery@hitech.cplire.ru)