

Создание тонких пленок NbN при комнатной температуре подложки

© Б.А. Гурович¹, Б.В. Гончаров^{1,¶}, К.Е. Приходько^{1,2}, Л.В. Кутузов¹, Л.В. Столяров¹, Е.М. Малиева¹

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва, Россия

¶ E-mail: goncharov_bv@nrcki.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Методом магнетронного распыления изготовлены тонкие пленки NbN. Пленки изготовлены на сапфировых подложках при температурах 20–300°C. Температура перехода в сверхпроводящее состояние для различных образцов в зависимости от температуры подложки при напылении составила 8–14 К. Плотность критического тока j_c лежит в диапазоне 0.8–8 MA/cm², что позволяет использовать данные пленки для создания многослойных структур, ввиду отсутствия отжига, которым подвергается каждый нижележащий слой структур при напылении следующего.

Ключевые слова: Тонкие сверхпроводящие пленки NbN; плотность критического тока перехода тонких пленок NbN; магнетронное распыление.

DOI: 10.21883/FIT.2021.09.51245.35N

1. Введение

Тонкие пленки NbN являются одним из наиболее распространенных материалов в области криоэлектроники. На базе данного материала создается широкий спектр устройств, таких как сверхпроводниковые однофотонные детекторы SNSPD, болометры на „горячих электронах“ НЕВ, активные, а также пассивные элементы логических схем. Основным методом изготовления пленок NbN является ионное распыление с использованием магнетронного либо пеннинговского разрядов. При этом типичные величины температуры подложки в процессе напыления обычно составляют ~ 400 и ~ 800°C соответственно.

В НИЦ „Курчатовский институт“ разработана технология создания пассивных и активных элементов криогенных электронных схем при помощи радиационных методов [1–3]. Данная технология открывает возможность создания многослойных структур. Однако при создании многослойных структур возникает ряд технологических сложностей. Это связано с тем, что для формирования интегрированных в сверхпроводящие тоководы элементов схем (таких как сопротивления [4]) используются радиационные методы. Свойства данных элементов могут значительно изменяться после отжига, которым подвергаются все нижележащие слои при синтезе каждого последующего слоя. При этом суммарная длительность отжига зависит от номера слоя (нижний слой подвергается количеству отжига равному суммарному количеству слоев NbN).

Для решения данной проблемы оптимальным представляется изготовление каждого слоя при комнатной температуре подложки и применение, при необходимости, однократного низкотемпературного стабилизирующего

отжига элементов, созданных под действием облучения, после формирования функциональных структур во всех слоях.

В работе [5] описывается методика получения пленок NbN при температурах подложки менее 90°C, которые показали критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c вплоть до 14.2 К, однако все описанные пленки имели толщину более 100 nm. Тем же методом в работе [6], описывается получение пленок NbN толщиной 5 nm, но при температуре подложки 400°C. В ряде работ [7–11] описываются различные методики получения тонких пленок NbN с помощью магнетронного распыления, а также их свойства. В приведенных выше работах сверхпроводящие свойства синтезированных часто были близки к показателям объемного NbN, однако в качестве подложек использовался монокристаллический MgO, либо подложки из SiC/Si, также за исключением [7,11], температуры подложки лежали в интервале 600–800°C. В работе [12], была предпринята попытка получить и описать свойства пленок NbN, полученных при температурах подложки менее 100°C и толщинами от 3.75 до 7 nm. Было показано, что пленки имеют поликристаллическую структуру, фазовый состав Nb_{0.84}N, с критической температурой перехода $T_c = 6–10$ К (в зависимости от толщины), а также резкое падение свойств пленок при толщинах менее 5 nm.

В настоящей работе описываются пленки NbN толщиной 6 nm, созданные при помощи магнетронного распыления на сапфировых подложках при температурах 20–300°C. Полученные пленки характеризуются относительно высокими параметрами T_c и плотности критического тока j_c .

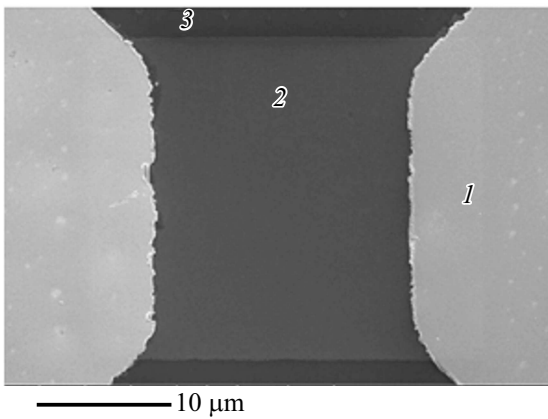


Рис. 1. СЭМ-изображение образца типа „микромост“ с металлизированными контактами: 1) металлизированные контакты Ni/Pt; 2) пленка NbN; 3) сапфировая подложка.

2. Эксперимент

В качестве основного метода изготовления пленок NbN при температурах близких к комнатным, был использован метод магнетронного распыления. В качестве подложек использовались сапфировые пластины размером $15 \times 14 \text{ mm}^2$ и толщиной $300 \mu\text{m}$, а также подложки из монокристаллического кремния с слоем термического оксида SiO_2 ($\sim 0.7 \mu\text{m}$). Поскольку свойства пленок, полученных на различных подложках, практически идентичны все последующие результаты будут представлены для образцов, изготовленных на сапфировых подложках.

Для контроля толщин пленок были проведены предварительные эксперименты. Изготавливались пленки толщинами $50\text{--}100 \text{ nm}$, после чего проводилось измерения толщины с помощью стилусного профилометра. Итоговая скорость напыления составила 33 nm/min .

Начальное давление в рабочей камере для магнетронного распыления составляло менее $2 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$ и достигалось с помощью прогрева установки совместно с откачкой. Качество пленок контролировалось по температуре перехода в сверхпроводящее состояние T_c . Температура подложки варьировалась в пределах $20\text{--}300^\circ\text{C}$, что обусловлено технологическими требованиями для изготовления многослойных структур.

Измерения электрофизических свойств пленок производилось в криостате погружного типа. Температура перехода T_c определялась путем анализа температурной зависимости сопротивления пленки $R(T)$. Для оценки критической плотности тока j_c из пленок (на пленках), были сформированы „микромосты“ размером $20 \times 20 \mu\text{m}$.

Структуры формировались с использованием методов оптической и электронной литографии, а также реактивного ионного травления [4]. Также на образцах были сформированы макроскопические измерительные металлические контакты (Ni/Pt) (рис. 1). Контакты для измерений были созданы методом катодного распыления.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) осуществлялось 4-контактным методом. Измерительные зонды прижимались к макроскопическим контактам. Контактным сопротивлением в данном случае можно пренебречь, поскольку площадь измерительных контактов всегда была много больше площади исследуемой структуры.

3. Результаты и обсуждение

Основной целью работы было выявление влияния температуры подложки в диапазоне $20\text{--}300^\circ\text{C}$ на параметры пленок NbN толщиной 6 nm , полученных методом магнетронного распыления. Главными изучаемыми параметрами являлись: критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) и плотность критического тока (j_c), т. к. именно эти два параметра являются

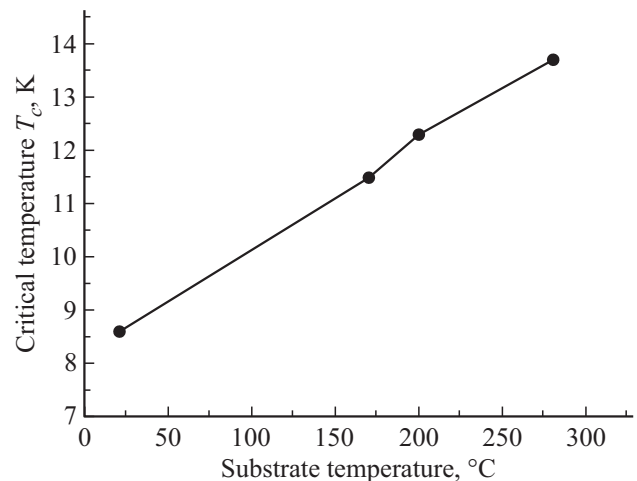


Рис. 2. Зависимость критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c от температуры подложки во время напыления пленок.

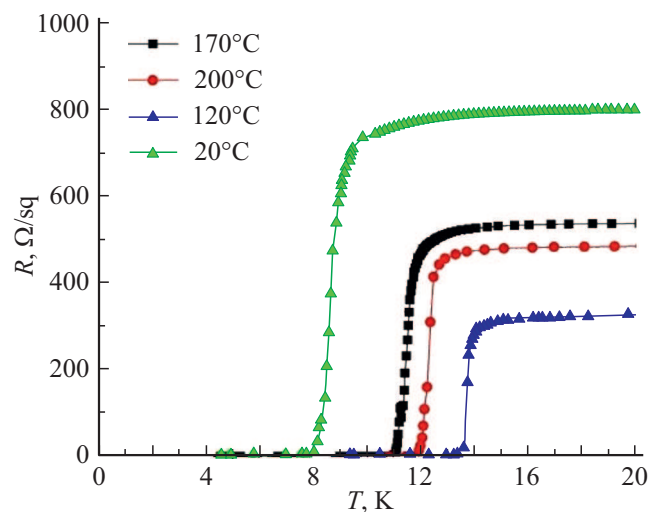


Рис. 3. Зависимости поверхностного сопротивления (Ω/sq) $R(T)$ для пленок, полученных при различных температурах.

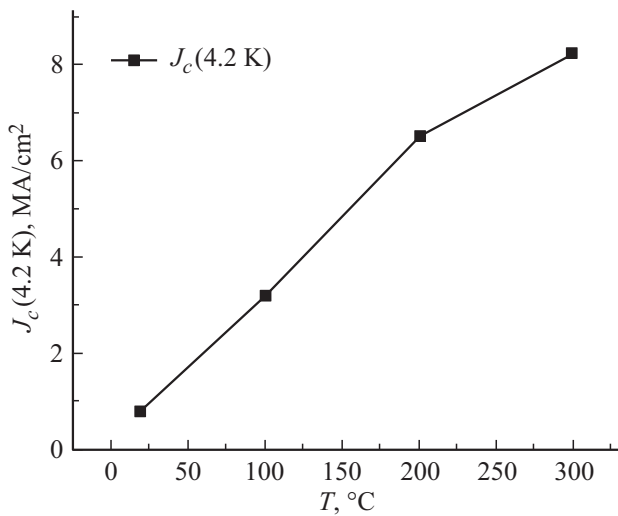


Рис. 4. Зависимость величины критической плотности тока J_c от температуры подложки при напылении пленки.

ключевыми при дальнейшем проектировании и изготовлении функциональных элементов из пленок NbN.

Измерения зависимости $R(T)$ для пленок, полученных при различных температурах (рис. 2), показывают, что с ростом температуры подложки при напылении, сопротивление пленок падает, одновременно возрастает T_c (рис. 3). Поскольку изменения j_c для пленок NbN обычно коррелируют с изменениями T_c , то ожидаемо схожим образом зависит и критическая плотность тока j_c . Значения j_c лежат в диапазоне 0.8–8 MA/cm². Максимальные значения T_c и j_c были получены при температуре подложки 280°C и составили 13.6 K и 8 MA/cm² соответственно. Однако, даже при комнатной температуре подложки величина T_c составляет 8.5 K, а величина $j_c = 0.8$ MA/cm² (рис. 4). Таким образом, характеристики синтезированных пленок, позволяют изготавливать многослойные структуры методами, описанными в работах [1–4], с различными функциональными элементами, которые встроены в каждом из слоев.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке НИЦ „Курчатовский институт“ (приказ от 02.07.2020, № 1055).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B.A. Gurovich, K.E. Prihod'ko, M.A. Tarkhov, A.G. Domantovskii, D.A. Komarov, B.V. Goncharov, E.A. Kuleshova. *Micro Nanosystems* **7**, 172 (2015).
- [2] Б.А. Гурович, К.Е. Приходько. *УФН* **179**, 179 (2009).
- [3] B.A. Gurovich, M.A. Tarkhov, K.E. Prihod'ko, E.A. Kuleshova, D.A. Komarov, V.L. Stolyarov, E.D. Olshanskii, B.V. Goncharov, D.A. Goncharova, L.V. Kutuzov, A.G. Domantovskii. *Nanotechnol. Russ.* **9**, 7–8, 386 (2014).
- [4] B.A. Gurovich, K.E. Prihod'ko, M.A. Tarkhov, E.A. Kuleshova, D.A. Komarov, V.L. Stolyarov, E.D. Olshanskii, B.V. Goncharov, D.A. Goncharova, L.V. Kutuzov, A.G. Domantovskii, Z.V. Lavrukina, M.M. Dement'eva. *Nanotechnol. Russ.* **10**, 7–8, 530 (2015).
- [5] D.D. Bacon, A.T. English, S. Nakahara, F. G. Peters, H. Schreiber, W.R. Sinclair, R.B. van Dover. *J. Appl. Phys.* **54**, 6509 (1983).
- [6] М.А. Давыдченко, Е.О. Смирнов, Б.М. Воронов. В кн.: Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского. Материалы конф. МИЭМ НИУ ВШЭ, М. (2019). С. 192–194.
- [7] Zhen Wang, Akira Kawakami, Yoshinori Uzawa, Bokuji Komiyama. *J. App. Phys.* **79**, 7837 (1996).
- [8] Gin-ichiro Oya, Yutaka Onodera. *J. App. Phys.* **45**, 1389 (1974).
- [9] S.P. Chockalingam, M. Chand, J. Jesudasan, V. Tripathi, P. Raychaudhuri. *Phys. Rev. B* **77**, 214503 (2008).
- [10] J. R.Gao, M. Hajenius. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 062504 (2007).
- [11] A.E. Dane, A.N. McCaughan, Di Zhu, Q. Zhao, Chung-Soo Kim, N. Calandri, A. Agarwal, F. Bellei, K.K. Berggren. *Appl. Phys. Lett.* **111**, 122601 (2017).
- [12] B.V. Goncharov, B.A. Gurovich, K.E. Prihodko, M.M. Dementyeva, V.L. Stolyarov, E.D. Olshansky, A.G. Domantovsky, L.V. Kutuzov, E.M. Malieva, A.A. Cherepanov. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1005**, 012023 (2020).

Редактор Ю.Э. Кутаев