13

Свойства пленок алюминия при криогенном и комнатном напылении

© Д.С. Жогов,[1,2] А.А. Ломоносов,[1,2] М.В. Стрелков,[1] Н.Н. Котова,[1,2] Р.К. Козулин,[1] А.А. Гунбина,[1] А.М. Чекушкин,[1] А.А. Татаринцев,[3] М.А. Тарасов[1]

[1]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
[2]Московский физико-технический институт,
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[3]НИЦ „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: dzhog02@gmail.com

Поступило в Редакцию 6 мая 2026 г.
В окончательной редакции 6 мая 2026 г.
Принято к публикации 6 мая 2026 г.

Исследовано влияние температуры осаждения на свойства тонких пленок алюминия и созданных на их основе сверхпроводящих копланарных резонаторов. Ключевое различие между изготовленными образцами заключается в условиях формирования: первая серия напылялась при комнатной температуре, тогда как вторая — на охлаждаемую жидким азотом подложку. Криогенное воздействие способствовало изменению микроструктуры металла, в частности, уменьшению среднего размера кристаллического зерна с 45 до 24 nm и существенному росту плотности межзеренных границ. Установлено, что подобное структурное разупорядочение закономерно повышает удельное сопротивление материала в нормальном состоянии. В свою очередь, это обеспечивает значительное увеличение кинетической индуктивности измерительных структур. Результаты подтверждают, что описанный технологический подход позволяет целенаправленно управлять электродинамическими параметрами цепей и открывает пути для пространственной миниатюризации компонентов перспективных квантовых устройств.

Ключевые слова: сверхпроводимость, кинетическая индуктивность, криогенное напыление, структура пленок, копланарный резонатор.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63625.130-26

Введение

Сверхпроводниковые копланарные резонаторы являются ключевыми элементами в современных квантовых технологиях, поскольку они находят широкое применение в архитектурах схемной квантовой электродинамики и высокочувствительных детекторах излучения [1]. Фундаментальную роль в определении характеристик таких устройств играет кинетическая индуктивность, возникающая вследствие инерционной массы куперовских пар, реагирующих на переменное электромагнитное поле [2]. В отличие от геометрической индуктивности этот параметр чувствителен к микроскопическим свойствам материала и плотности куперовских пар [3]. Структурный беспорядок и морфология пленки, которые зависят от условий осаждения, могут существенно изменять электродинамический отклик сверхпроводника. В частности, формирование пленок при криогенных температурах является одним из способов модификации зернистости структуры и транспортных свойств алюминия [4].

Алюминий традиционно занимает центральное место в технологиях квантовой обработки информации, однако характеристики создаваемых на его основе копланарных резонаторов жестко детерминированы микроструктурой пленки. Ключевым фактором, определяющим электрофизические параметры, выступает средний размер кристаллического зерна, который напрямую зависит от термодинамических условий роста. Если осаждение при комнатной температуре (298 K) способствует формированию крупных кристаллитов, свойственных эпитаксиальным пленкам, то использование криогенных температур блокирует поверхностную диффузию. Это приводит к образованию мелкозернистой структуры с высокой степенью атомного беспорядка [4–6]. Схожий эффект дробления зерен наблюдается и при уменьшении толщины пленки, что ограничивает длину свободного пробега электронов [3].

Основная цель настоящей работы — исследовать, как охлаждение кремниевой подложки до 77 K в процессе напыления влияет на кинетическую индуктивность тонких пленок алюминия. Предполагается, что формирование мелкозернистой структуры при таких низких температурах осаждения должно привести к существенному росту кинетической индуктивности по сравнению с образцами, полученными при комнатной температуре. Низкая температура ограничивает подвижность осаждаемых атомов по поверхности, из-за чего возникает плотная сеть межзеренных границ, которая заметно меняет свойства сверхпроводника. Чтобы проверить это на практике, были изготовлены копланарные резонаторы в двух разных температурных режимах, после чего

проводилось прямое сравнение их параметров. Подобный эксперимент поможет наглядно показать, насколько метод криогенного напыления удобен для настройки индуктивности и создания компактных элементов сверхпроводящих квантовых схем.

Переход алюминия в режим „грязного предела“ влечет за собой важные электродинамические последствия. Увеличение плотности границ зерен усиливает рассеяние носителей заряда, что приводит к повышению поверхностного сопротивления пленки в нормальном состоянии ($R_\square$). Согласно теории Маттиса–Бардина, величина кинетической индуктивности (L_K) непосредственно зависит от этого параметра и может быть описана следующим аналитическим выражением [7]:

$$L_K(T) = \frac{\hbar R_\square(T_c)}{\pi\Delta(T)} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\Delta(T)}{2k_B T}\right)} \left(\frac{l}{w}\right), \qquad (1)$$

где $R_\square(T_c)$ — сопротивление пленки на квадрат в нормальном состоянии, $\Delta(T) \approx 1.74\Delta(0)\sqrt{1-\frac{T}{T_c}}$ — температурная зависимость энергетической щели, $\Delta(0) = 1.76k_B T_c$ — величина щели при нулевой температуре, $\left(\frac{l}{w}\right)$ — количество квадратов сверхпроводящей пленки.

Анализ данного выражения показывает, что рост $R_\square$ в гранулированных пленках вызывает существенное увеличение кинетической индуктивности, что критически важно для создания компактных высокоимпедансных устройств. Кроме того, сопутствующий структурный беспорядок и эффекты размерного квантования в нанозернах обеспечивают повышение критической температуры ($T_c > 1.5\,\mathrm{K}$) и критического магнитного поля по сравнению с объемным металлом [4,6,7].

Основным риском использования гранулированных пленок считается потенциальный рост диэлектрических потерь, поскольку границы зерен могут служить местами локализации двухуровневых систем (TLS). Тем не менее экспериментальные данные свидетельствуют, что внутренняя добротность (Q_i) резонаторов из „грязного“ криогенного алюминия достигает значений 10^5-10^6, не уступая эталонным образцам [2,4]. Это подтверждает, что управляемое уменьшение размера зерна позволяет улучшать индуктивные свойства элементов квантовых схем без критической потери когерентности.

1. Результаты

Образцы изготавливались в установке Leybold Heraeus Z400, модернизированной для получения возможности охлаждать подложку во время напыления [8]. Алюминий термически осаждался на ориентированную подложку кремния Si (111). Толщина осаждаемого алюминия составляет 100 nm.

Для охлаждения образцов жидким азотом был изготовлен специальный проточный держатель, устанавливаемый вместо штатного смотрового окна вакуумной камеры. Главной технической задачей при сборке узла стало обеспечение хорошей пропускной способности медных трубок для хладагента и теплоизоляции конструкции, чтобы полностью исключить промерзание резиновых вакуумных уплотнителей фланца. После достижения стабильного температурного режима начался этап тестового формирования пленок.

Первые же эксперименты выявили существенную проблему: при непрерывном термическом напылении температура подложки начинала довольно быстро расти. Этот паразитный нагрев происходит по двум причинам. Во-первых, горячие атомы испаряемого алюминия при конденсации передают свою энергию образцу. Во-вторых, разогретая лодочка с металлом работает как сильный источник теплового излучения. Из-за такого температурного воздействия целевая мелкокристаллическая структура сохранялась только на начальном этапе напыления — в слоях, непосредственно прилегающих к кремнию. По мере дальнейшего нагрева подложки верхние слои растущей пленки теряли нужные свойства. Алюминий снова приобретал аморфную структуру, а размер зерен увеличивался до значений, характерных для образцов, напыляемых при обычной комнатной температуре.

Чтобы решить эту проблему и сохранить мелкое зерно по всей толщине материала, было решено изменить методику и проводить напыление дробно. Весь процесс разделили на три этапа. Сначала на подложку осаждалась первая треть от итоговой толщины алюминия. Затем образец перекрывали специальной механической шторкой (шаттером), надежно защищая его от парового потока и излучения. В таком закрытом состоянии подложку выдерживали некоторое время, давая ей возможность отдать накопленное тепло и снова остыть до температуры жидкого азота.

Во время этой технологической паузы происходил еще один важный процесс. Поскольку температура кипения кислорода (90 K) выше температуры жидкого азота, остаточный кислород из вакуумного объема камеры активно оседал на холодную поверхность. Такое естественное окисление изолировало границы зерен, делая структуру пленки еще более мелкокристаллической и ярковыраженной гранулированной. После полного остывания напылялась вторая треть алюминия, за которой следовала точно такая же пауза для глубокого охлаждения и оседания молекул кислорода. В завершение осаждалась последняя треть металла. Таким образом, пленка формировалась за три этапа с промежуточным охлаждением. После окончания этого цикла готовый образец дополнительно окисляли в атмосфере чистого кислорода при давлении 1 mbar в течение 5 min для создания на поверхности надежного защитного оксидного слоя.

На рис. 1 показаны изображения сколов и поверхностей пленок, напыленных при разных температурах.

Из рисунка видно, что размер зерен уменьшается при напылении на охлаждаемую подложку. Для образца,

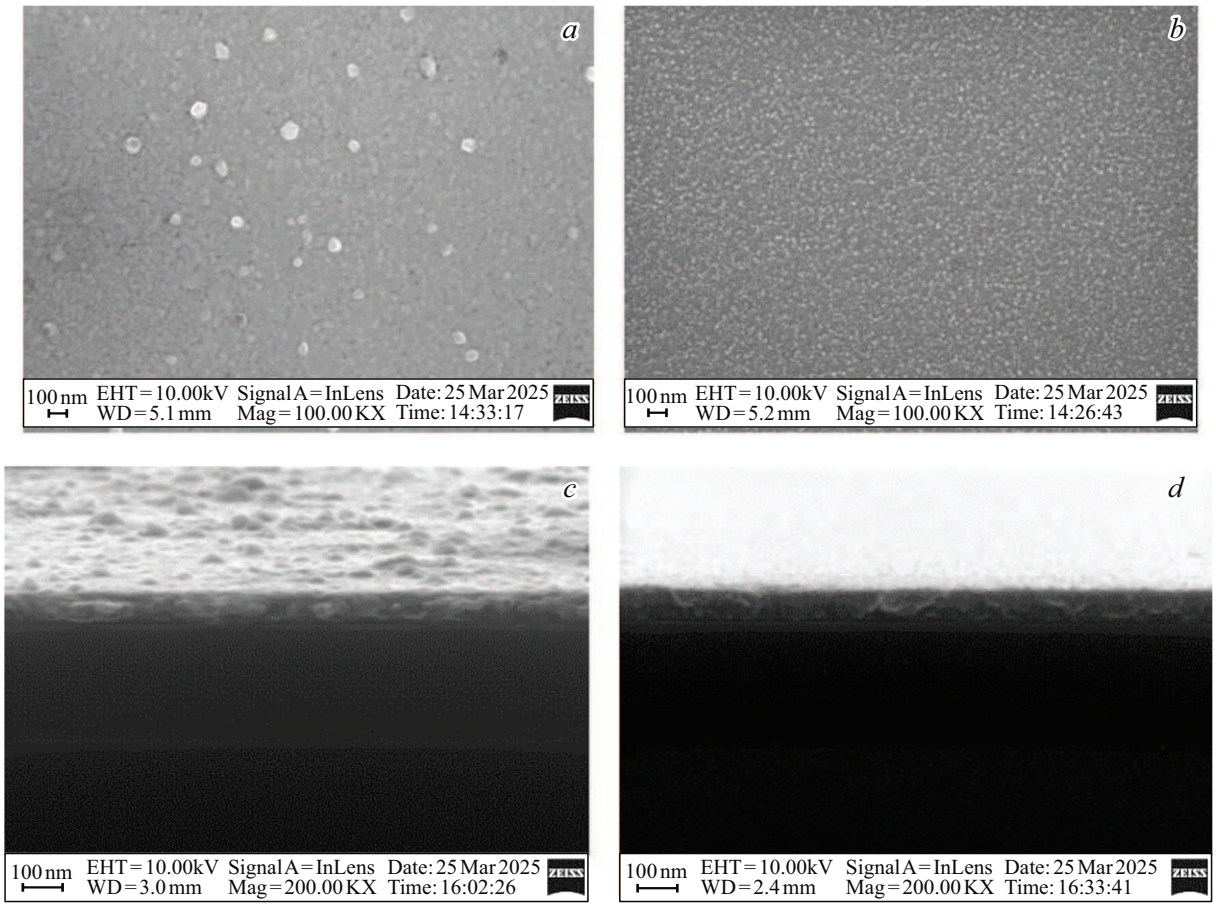

Рис. 1. Изображение сколов пленок, напыленных при комнатной температуре (*a*) и температуре жидкого азота (*b*), изображение поверхностей пленок, напыленных при комнатной температуре (*c*) и температуре жидкого азота (*d*).

напыленного на комнатной температуре, средний размер зерна составил 45 nm, в то время как для образца, напыленного на охлаждаемую подложку, средний размер зерна составил 24 nm. Также максимальный размер зерна для пленок, напыленных при комнатной температуре, достигал 100 nm, в то время как максимальный размер пленок, напыленных при температуре жидкого азота, составил всего 36 nm. Таким образом, охлаждение подложки до температуры жидкого азота при напылении приводит к значительному измельчению структуры пленок. В результате криогенного воздействия средний размер зерна уменьшился почти в два раза, а максимальный показатель сократился практически в три раза — со 100 до 36 nm. Уменьшение размера зерен приводит к резкому возрастанию плотности межзеренных границ, что повышает удельное сопротивление пленки и соответственно кинетическую индуктивность [5].

Спектральный анализ (рис. 2) отражает особенности элементного состава исследуемых образцов. По оси ординат представлена интенсивность сигнала в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — энергия квантов (keV). На графике идентифицируются пики углерода, кислорода, алюминия и доминирующий пик кремния

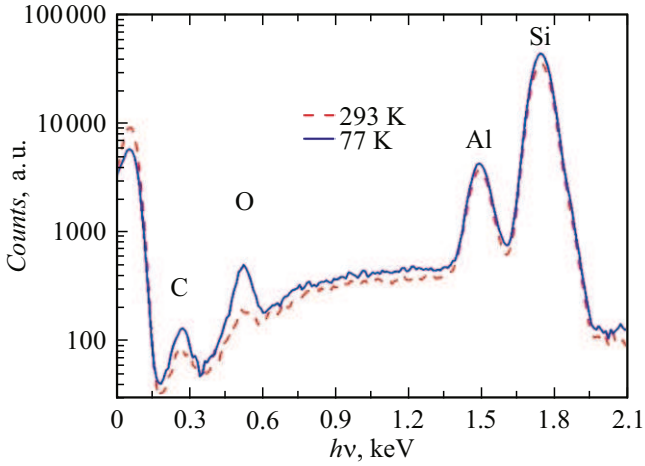

Рис. 2. Состав изготовленных пленок, полученный рентгеновской дифрактометрией.

(около 1.7 keV), определяемый материалом подложки. Интенсивность характеристических линий алюминия (1.5 keV) для обеих структур практически совпадает. Ключевое визуальное отличие кривых заключается в

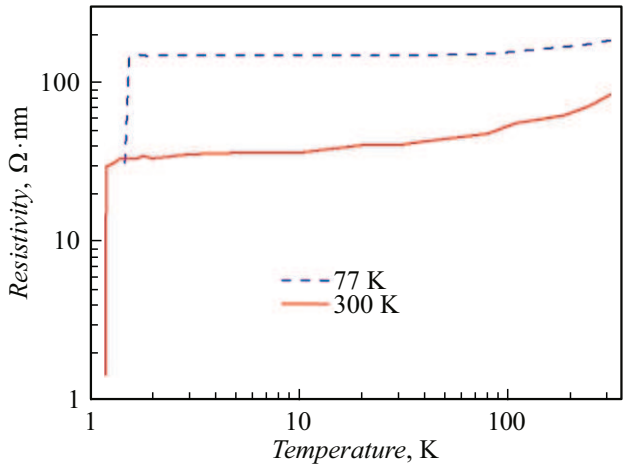

Рис. 3. Удельные сопротивления пленок, напыленных при температуре жидкого азота (штриховая линия) и комнатной температуре (сплошная линия).

поведении спектральной линии кислорода (0.5 keV). Для пленки, осажденной при 77 K (сплошная синяя линия), амплитуда данного пика заметно превышает аналогичный показатель для высокотемпературного образца (красный пунктир) при сохранении общего профиля спектров.

Согласно работе [2], введение кислорода в процессе осаждения трансформирует микроструктуру пленки в гранулированный алюминий (grAl). Кислород изолирует границы зерен, образуя аморфные барьеры AlO_x, что ограничивает рост металлических кристаллитов.

На рис. 3 приведены температурные зависимости удельного сопротивления алюминиевых пленок, сформированных при комнатной температуре и при охлаждении подложки жидким азотом (77 K).

Измерения показали, что температурный режим осаждения радикально меняет транспортные свойства структур. Удельное сопротивление образца, напыленного на криогенно охлаждаемую подложку, существенно превышает показатели пленки, полученной в стандартных условиях, на всем исследованном температурном интервале. В частности, при измерениях на комнатной температуре удельное сопротивление криогенного образца зафиксировано на уровне 390 Ω·nm. В то же время для пленки, напыленной без дополнительного охлаждения, аналогичный параметр составил 100 Ω·nm. Наблюдаемое увеличение резистивности является прямым макроскопическим следствием измельчения зеренной структуры и роста плотности дефектов, выступающих центрами рассеяния электронов. Помимо изменения транспортных характеристик в нормальном состоянии, криогенное напыление оказало влияние на сверхпроводящие параметры материала. На графике зафиксирован выраженный сдвиг температуры сверхпроводящего перехода (T_c). Для гранулированного образца, напыленного при 77 K, критическая температура возросла до 2.3 K. В свою очередь, пленка, сформированная при комнатной температуре, переходит в сверхпроводящее состояние при $T_c = 1.2$ K, что близко к справочным значениям для объемного алюминия. Данные результаты подтверждают эффективность низкотемпературного осаждения для перевода пленок в режим грязного предела.

2. Резонаторы

В сверхпроводящем режиме резонансная частота четвертьволновых структур из алюминия становится функцией температуры вследствие вклада кинетической индуктивности куперовских пар. Данная зависимость описывается выражением

$$f_{res}(T) = \frac{1}{4\sqrt{[L_G + L_K(T)]C_G}}, \tag{2}$$

где C_G — геометрическая емкость, а L_G и L_K — геометрическая и кинетическая индуктивность резонатора соответственно.

При известных параметрах резонатора можно вычислить кинетическую индуктивность, измеряя резонансную частоту при разных температурах в состоянии сверхпроводимости:

$$L_K = L_G\left(\frac{f_0^2}{f^2} - 1\right), \tag{3}$$

где f_0 — геометрическая резонансная частота, f — экспериментальная резонансная частота в состоянии сверхпроводимости.

На снимке (рис. 4) показан образец, где резонаторы размещены по обе стороны от центральной линии. Изготовленные структуры различались формой изгибов и параметрами связи. Частота f_0 зависит главным образом от длины резонатора: при размере 5 mm она составила 5.15 GHz, а при 7.5 mm – 3.35 GHz.

Для полученных образцов была измерена резонансная частота до перехода алюминия в сверхпроводящее состояние. Охлаждение образцов производилось в криостате замкнутого цикла Гиффорда–Мак–Магона в диапазоне температур от 2.5 до 23 K. На рис. 5 представлены резонансные кривые, полученные при различных температурах выше точки сверхпроводящего перехода. Измерения демонстрируют, что до перехода в сверхпроводящее состояние профиль резонанса, наблюдаемого вблизи отметки 4.51 GHz, является относительно широким, что обусловлено значительными омическими потерями в гранулированной пленке. Добротность резонатора, рассчитанная из этих кривых, составляет величину порядка 200. С понижением температуры наблюдается увеличение глубины резонанса.

3. Кинетическая индуктивность

На рис. 6 представлены результаты расчетного моделирования температурной зависимости кинетической

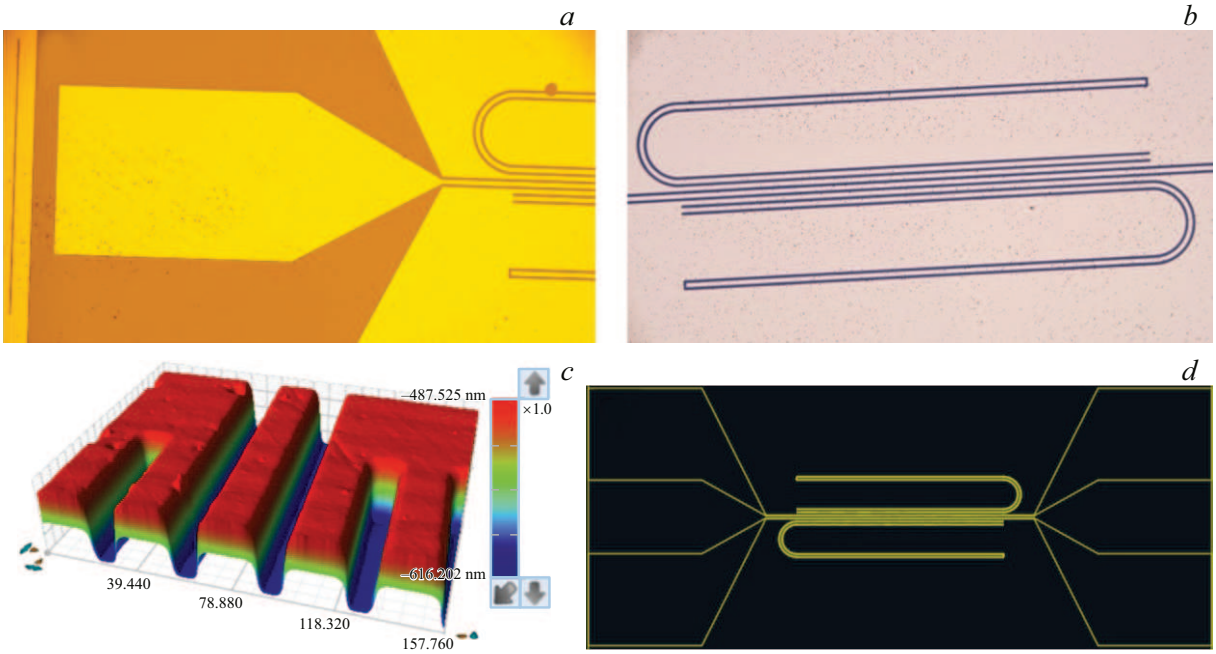

Рис. 4. Снимки образца с оптического микроскопа (a, b), изображение образца с оптического профилометра (c), AutoCAD-изображение одной из геометрий образца (d).

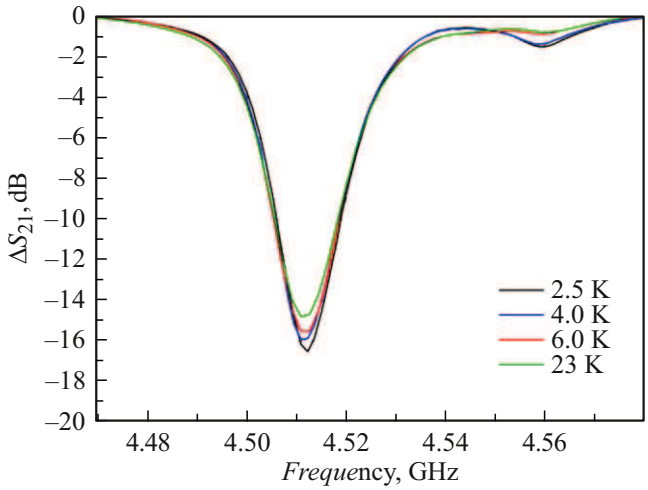

Рис. 5. Экспериментальные измерения резонансной частоты при различных температурах до перехода в сверхпроводящее состояние.

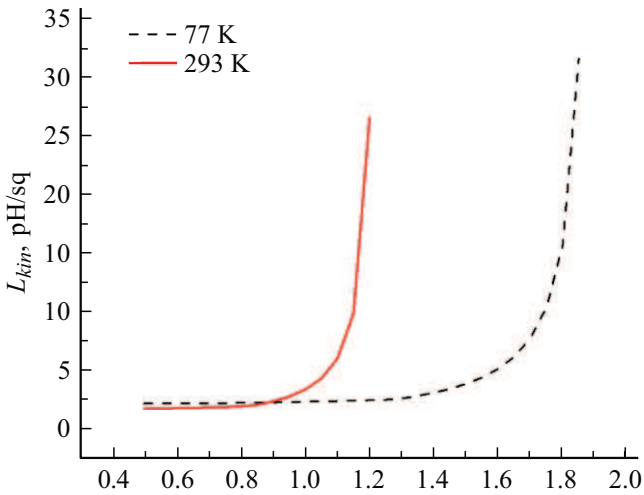

Рис. 6. Теоретическая оценка температурной зависимости кинетической индуктивности для образца, напыленного на охлаждаемую подложку (сплошная линия), и для образца, напыленного при комнатной температуре (штриховая линия).

индуктивности в диапазоне температур от 0.5 до 1.85 K. Расчеты проводились согласно формуле (1). Данные кривые построены на основе аналитических выражений, использующих параметры полученных пленок алюминия. В частности, для проведения математических расчетов применялись экспериментально измеренные значения критической температуры сверхпроводящего перехода и сопротивления квадрата пленки при комнатной температуре. Сравнение двух полученных зависимостей демонстрирует различие электродинамических характеристик исследуемых структур. Как следует из расчетов, образец, сформированный при непрерывном охлаждении подложки жидким азотом, обладает более высокой кинетической индуктивностью во всем исследованном диапазоне температур по сравнению с пленкой, осажденной при 293 K. Кроме того, на графике отмечено смещение критической температуры криогенного образца в область более высоких значений. Таким образом, анализ расчетных и экспериментальных данных подтвер-

ждает целесообразность применения метода криогенной конденсации для создания высокоимпедансных сверхпроводящих структур.

Заключение

В работе исследовано влияние криогенного охлаждения подложки до 77 K с осаждением кислорода в процессе формирования алюминиевых пленок. Установлено, что понижение температуры подавляет поверхностную диффузию атомов, а содержание кислорода в процессе осаждения способствует формированию изолирующих аморфных барьеров из оксида алюминия на границах зерен. Совокупность данных факторов приводит к эффективному гранулированию металла и измельчению его микроструктуры. Измерения показали, что для пленок, напыленных при температуре жидкого азота, средний размер зерна составил 24 nm по сравнению с 45 nm для образцов комнатного напыления (293 K). Максимальный размер кристаллитов также продемонстрировал уменьшение со 100 до 36 nm.

Структурное разупорядочение и высокая плотность окисленных межзеренных границ закономерно обусловили рост удельного сопротивления пленки в нормальном состоянии. Для криогенных образцов этот показатель достиг 390 $\Omega\cdot$nm, тогда как для стандартных пленок он составил 100 $\Omega\cdot$nm. Согласно расчетам, выполненным по теории Маттиса–Бардина с учетом экспериментально полученных параметров, зафиксированное увеличение поверхностного сопротивления напрямую обеспечивает рост кинетической индуктивности криогенных структур во всем исследованном температурном диапазоне. Кроме того, измельчение зерен привело к сдвигу критической температуры сверхпроводящего перехода: для гранулированных криогенных образцов температура возросла до 2.3 K, в то время как у пленок комнатного напыления она составила 1.2 K, что близко к значениям объемного алюминия.

Полученные результаты подтверждают, что криогенное напыление в присутствии кислорода является эффективным технологическим методом управления электрофизическими параметрами сверхпроводников. Значительное увеличение кинетической индуктивности позволяет решать задачи пространственной миниатюризации микроволновых элементов без критической потери квантовой когерентности. Предложенный подход может быть успешно применен для создания компактных высокоимпедансных копланарных резонаторов, сверхчувствительных детекторов электромагнитного излучения и квантовых параметрических усилителей. Формирование гранулированных сверхпроводящих сред с высокой нелинейностью открывает перспективы для их интеграции в современные архитектуры схемной квантовой электродинамики и масштабируемые системы квантовой обработки информации.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ „Структурные и электрофизические характеристики сверхпроводящих пленок алюминия и туннельных переходов на их основе“ № 23-79-00022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Chatel, R. Russo, L. Mazzone, Q. Boinay, R. Farsi, J. Brugger, G. Boero, H. Furci. Supercond. Sci. Technol., **38** (12), 125008 (2025). DOI: 10.1088/1361-6668/ae26d8

[2] K.J. Ramos, I. Curci, E. Potosí, I. Lobato, L.S. Alarcón, H. Pastoriza, L. Tosi. *Microwave characterization of superconducting coplanar resonators made out of granular aluminium. arXiv preprint.* arXiv:2508.03873 (2025), DOI: 10.48550/arXiv.2508.03873

[3] D. López-Núñez, A. Torras-Coloma, Q. Portell-Montserrat, E. Bertoldo, L. Cozzolino, G.A. Ummarino, A. Zaccone, G. Rius, M. Martínez, P. Forn-Díaz. Supercond. Sci. Technol., **38** (9), 095004 (2025). DOI: 10.1088/1361-6668/adf360

[4] W.J. Yánez-Parreño, T. van Schijndel, A.P. McFadden, K. Ji, S. Tan, Y. Wu, S. Frolov, S. Zollner, R.W. Simmonds, Ch.J. Palmstrøm. Phys. Rev. Mater., **10** (4), 044801 (2026). DOI: 10.1103/7kzr-571v

[5] М.А. Тарасов, А.А. Ломов, А.М. Чекушкин, А.А. Татаринцев, Б.М. Середин, М.А. Маркина, Е.Ф. Позднякова, А.Д. Голованова, М.В. Стрелков, Д.С. Жогов, Р.К. Козулин, К.Ю. Арутюнов. Письма в ЖТФ, **51** (4), 42 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59843.20149

[6] М.А. Тарасов, Л.С. Кузьмин, Н.С. Каурова. ПТЭ, **6**, 122 (2009). [M.A. Tarasov, L.S. Kuzmin, N.S. Kaurova. Instrum. Exp. Tech., **52** (6), 877 (2009). DOI: 10.1134/S0020441209060220]

[7] J. Zmuidzinas. Annu. Rev. Condens. Matter Phys., **3** (1), 169 (2012).

[8] М. Стрелков, А. Чекушкин, М. Фоминский, Р. Козулин, С. Краевский, А. Татаринцев, Д. Захаров, А. Ломов, М. Тарасов. ФТТ, **66** (7), 1038 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58369.35HH