

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Седов Егор Андреевич

**Исследование критической температуры сверхпроводящего перехода
тонких пленок алюминия**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Арутюнов Константин Юрьевич

Москва - 2024

Актуальность темы исследования

За каждым готовым электронным продуктом стоит большой объём научной работы по исследованию параметров и характеристик отдельных узлов и элементов, входящих в состав такого устройства. С появлением сверхпроводящей электроники и наноэлектроники, а также устройств, работающих с использованием квантово-размерных эффектов, возникла потребность в исследовании различных характеристик сверхпроводящих мезоскопических и наноструктур. Кроме того, огромный интерес представляют механизмы, оказывающие влияние на ключевые характеристики таких объектов, и возможность контролируемого изготовления сверхпроводящих объектов с заданными параметрами.

Одним из важнейших параметров сверхпроводника является его критическая температура T_c . Но, к сожалению, большинство материалов, подходящих на роль электронных компонентов имеют очень низкую температуру перехода. Например, алюминий, считающийся наиболее перспективным сверхпроводником для использования в качестве кубита в квантовом компьютере, имеет T_c равную 1.19 К. Только изучение сверхпроводящих свойств алюминиевых объектов требует достаточно дорогих холодильных установок. Так, например, достаточно массовые и относительно недорогие рефрижераторы типа CFMS охлаждаются только до 1.6 К в стандартном исполнении, а получение более низких температур требует либо специализированных вставок с третьим гелием, что приводит к их значительному удорожанию, либо наличие крупных и мощных крио установок, цена которых несопоставима с ценой CFMS. Использование же алюминиевых элементов в сверхпроводящей электронике и наноэлектронике потребует значительного усложнения и удорожания готового прибора. Поэтому особым интересом является возможность увеличения T_c сверхпроводящих низкоразмерных структур из алюминия.

Степень разработанности темы

Факт изменения критической температуры в достаточно малых объектах из алюминия относительно объёмного материала известен достаточно давно [1], более того, такое изменение универсально и проявляется во всех сверхпроводниках с уменьшением их размеров [2]. Однако, о причинах, вызывающих такое изменение, споры ведутся до сих пор. Сложности добавляет ещё и то, что в одних сверхпроводниках (алюминий, индий) T_c увеличивается [3], а в других (ниобий, ванадий) наоборот уменьшается [4].

Долгое время одной из главных и обобщающих причин отклонения T_c тонких плёнок от значения в объёмном материале считается качество изготавливаемых плёнок [5]. Тем не менее, с улучшением методик изготовления, а также качества самих тонких плёнок, сдвиг критической температуры в них всё равно присутствует. С точки зрения теории ответ на этот вопрос лежит, казалось бы, на поверхности: исходя из теории БКШ (1), изменения критической температуры сверхпроводника можно добиться либо за счёт модификации фононного спектра [6], либо за счёт изменения плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми [7].

$$T_c = 1.14\hbar\omega \exp\left[-\frac{1}{N(0)V}\right], \quad (1)$$

где, \hbar - постоянная Планка, ω – некая характерная частота фононов, $N(0)$ – плотность состояний электронов на поверхности Ферми в нормальном состоянии, а V – параметр, физический смысл которого характерная энергия связи между двумя электронами, возникающая из-за взаимодействия с колебаниями решетки (константа электрон-фононного взаимодействия). Со временем появилось также предположение о влиянии квантового ограничения носителей зарядов на изменение T_c [8]. Однако, несмотря на кажущуюся простоту теоретической интерпретации, прийти к общему выводу относительно сдвига критической температуры с уменьшением размеров объекта учёным так и не удалось. Более того, если в теории сформировалось три чётких направления, то на практике, при изготовлении тонких плёнок

возникает ещё больше факторов, влияющих на итоговое значение T_c . В результате чего, определить решающий вклад, оказывающий максимальное влияние на изменение T_c становится весьма затруднительным. А главной проблемой становится тот факт, что каждый из возникающих механизмов довольно сильно влияет друг на друга, что приводит к их достаточно нетривиальному взаимодействию [9]. Наиболее ярко выраженными факторами, влияющими на итоговое значение критической температуры низкоразмерных объектов, являются размер гранул, из которых состоит сам объект [10], механические дефекты [11], наличие магнитных примесей [12], эффект близости [13], шероховатость поверхности [14], поверхностные эффекты [15] и сам размерный эффект [16].

Исходя из столь широкого набора различных влияний, оказывающих воздействие на изменение T_c в тонких плёнках главной задачей исследователя является определение решающего вклада в изменение T_c . Поэтому **основной целью диссертационной работы** является установление зависимости критической температуры низкоразмерного сверхпроводника от его характерных размеров. Для достижения поставленной цели необходимо было решить выполнить **следующие задачи**:

1. Экспериментально исследовать влияние толщины плёнки на изменение критической температуры сверхпроводника.
2. Экспериментально исследовать влияние различных подложек на изменение критической температуры сверхпроводника.
3. Экспериментально исследовать влияние метода изготовления плёнок на изменение критической температуры сверхпроводника.
4. Экспериментально исследовать влияние размера гранул плёнок на изменение критической температуры сверхпроводника.
5. Экспериментально исследовать влияние остаточного сопротивления плёнок на изменение критической температуры сверхпроводника.
6. Исследовать возможность описания экспериментальных результатов в терминах квантового размерного эффекта.

Научная новизна основывается на систематическом исследовании зависимости критической температуры тонких плёнок алюминия от толщины плёнки, морфологии плёнки и материала подложки. В частности:

- Впервые изготовлены сверхпроводящие плёнки алюминия на сапфировых подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии и термического напыления.
- Впервые исследована T_c низкоразмерных плёнок из чистого алюминия, изготовленных на подложках из сапфира.
- Впервые исследована T_c низкоразмерных плёнок из чистого алюминия, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, на подложках из арсенида галлия.
- Впервые проведены сравнительные эксперименты по наблюдению эффекта изменения критической температуры на пленках различного качества.
- Впервые показано, что в более качественных эпитаксиальных плёнках алюминия присутствует эффект изменения критической температуры с толщиной пленки.
- Впервые показано, что независимо от материала подложки (арсенид галлия или сапфир) присутствует эффект изменения критической температуры с толщиной пленки.
- Установлена связь между квантовым размерным эффектом и увеличением T_c в плёнках с уменьшением их толщины.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в систематических измерениях критической температуры алюминиевых плёнок в зависимости от различных факторов и получения большого объёма данных для анализа тех механизмов, которые могут оказывать влияние на сдвиг T_c в

алюминии. Установлена зависимость между изменением критической температуры и толщиной плёнок, материала подложки, размера гранул, остаточного сопротивления тонких плёнок, длины пробега зарядов, качества изготовления исследуемых объектов.

Практическая значимость работы заключается в проработке методики изготовления высококачественных плёнок алюминия методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из сапфира и галлий арсенида. Полученные экспериментальные данные позволяют выделить влияние различных факторов влияющих на T_c сверхпроводящей плёнки алюминия при её изготовлении, что даёт возможность производства плёночных структур с заданной температурой сверхпроводящего перехода для использования в различных устройствах, работающих на сверхпроводниковых элементах.

Методология и методы исследования

В качестве исследуемого материала был выбран алюминий как материал, показывающий наибольшее увеличение T_c относительно объёмного объекта по сравнению с другими сверхпроводниками [17]. Сверхпроводящие плёночные объекты изготавливались методом осаждения электронным лучом и молекулярно-лучевой эпитаксии. Анализ изготовленных структур производился при помощи просвечивающего электронного микроскопа с высоким разрешением, а также при помощи сканирующего просвечивающего электронного микроскопа методом кольцевой визуализации в темном поле.

Экспериментальные исследования T_c проводились на трёх криовставках и с различными термометрами. Измерения сопротивления образцов проводились по четырёхточечной схеме на постоянном токе. Ток подавался на образцы в диапазоне от 0.1 мкА до 10 мкА. Обработка экспериментальных данных проводилась в программе Gnuplot.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Увеличение критической температуры сверхпроводящего перехода T_c в алюминиевых плёнках – истинно размерный эффект, не зависящий от морфологии образца и/или материала подложки.
2. Увеличение среднего размера гранул с 40 нм до 200 нм в сверхпроводящих плёнках алюминия не приводит к существенному снижению температуры сверхпроводящего перехода
3. Использование сапфировых подложек приводит к заметному снижению критической температуры сверхпроводящего перехода в плёнках с толщиной в диапазоне от 15 до 45 нм.
4. Эффект увеличения критической температуры сверхпроводящего перехода T_c в алюминиевых плёнках может быть качественно и количественно объяснен квантовым размерным эффектом.

Достоверность полученных данных

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается количественно идентичными измерениями, полученными на трёх установках, при помощи трёх разных термометров. Воспроизводимостью результатов при повторном изготовлении образцов с заданными параметрами. Одинаковый тренд на увеличение T_c , с уменьшением толщины объекта, в плёнках независимо от их качества и метода их изготовления. А также согласие полученных данных с существующими работами и с теоретическими расчётами. Качество плёнок контролировалось тремя независимыми лабораториями с использованием различных методик исследования.

Личный вклад автора

Личный вклад автора представлен на всех ступенях диссертационного исследования кроме микроанализа структуры плёнок алюминия, проведённого коллегами из университета Аристотеля в Салониках и коллегами из НИУ МИЭТ. Изготовление, измерение и интерпретация полученных результатов производилась автором диссертации или при его непосредственном активном участии.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы были представлены диссертантом на следующих конференциях:

1. **Седов Е.А.**, Завьялов В.В., Арутюнов К.Ю. Квантовый размерный эффект в полуметаллах и сверхпроводниках. XI Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Уфа, 11-14 ноября 2020г.
2. **Седов Е.А.**, Завьялов В.В., Арутюнов К.Ю. Квантовый размерный эффект в сверхпроводниках. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2020. VII Международная молодежная научная конференция, посвященная 100-летию Уральского федерального университета, Екатеринбург, 18-22 мая 2020 г.
3. **Седов Е.А.** Изменение критической температуры сверхпроводящих плёнок алюминия. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. Г. Москва. 2020 г.
4. **Седов Е.А.**, Завьялов В.В., Арутюнов К.Ю. Квантовый размерный эффект в тонких плёнках алюминия. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2019. VI Международная молодежная научная конференция, Екатеринбург, 15-19 мая 2019 г.

5. **E. Sedov**, I. Golokolenov, G. Konstantinidis, A. Stavriniadis, G. Stavriniadis, V. Zavialov, K. Arutyunov. The Enhancement of the Critical Temperature in Thin Aluminium Films. 15th Cryogenics 2019 / IIR International Conference / April 7 – 11, 2019 / Prague / Czech Republic.
6. **Седов Е.А.** Квантовый размерный эффект и плёнки алюминия. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. Г. Москва. 2019 г.
7. **Седов Е.А.** Увеличение T_c сверхпроводника в алюминиевых плёнках. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. Г. Москва. 2018 г.

Список публикаций по теме диссертации

Список статей, в которых отражены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертации и опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS отражающих основные результаты:

1. Arutyunov K., Zavialov Vitalii, **Sedov E.**, Golokolenov I., Заруднева А. А., Шейн К. В., Trun'kin I. N., Vasiliev A. L., Konstantinidis G., Stavriniadis G., Croitoru M. D., Shanenko A. A. Nanoarchitecture: Toward Quantum-Size Tuning of Superconductivity. // *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*. 2019, 1800317, 1-5. (Q1)
2. Arutyunov K., **Sedov E.**, Golokolenov I., V. V. Zav'yalov, Konstantinidis G., Stavriniadis A., Stavriniadis G., Vasiliadis I., Kekhagias T., Dimitrakopoulos G. P., Komninu F., Kroitoru M. D., Shanenko A. A. Quantum Size Effect in Superconducting Aluminum Films / Пер. с рус. // *Physics of the Solid State*. 2019. 61, 9, 1559-1562. (Q3)

3. **Sedov E.**, Golokolenov I., Konstantinidis G., Stavrinidis A., Stavrinidis G., Zavyalov V., Arutyunov K. The enhancement of the critical temperature in thin aluminium films, in: *Cryogenics 2019. Proceedings of the 15th IIR International Conference: Prague, Czech Republic, April 8-11, 2019.* 15, 363-368.
4. **Sedov E.**, Riikonen K., Arutyunov K. Quantum size effect in single-crystalline bismuth nanorods // *Journal of Physics: Conference Series.* 2017. 929. 012088. P. 1-6. **(Q3)**
5. **Sedov E.**, Riikonen K., Arutyunov K. Quantum size phenomena in single-crystalline bismuth nanostructures // *npj Quantum Materials.* 2017. 2. 18. 1-4. **(Q1)**

Публикации соискателя в других изданиях:

1. **Седов Е. А.**, Завьялов В. В., Арутюнов К. Ю. Квантовый размерный эффект в сверхпроводниках // *Известия Уфимского научного центра РАН.* 2021. 1, 39–43.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 124 страниц, включая 4 таблицы и 56 рисунков. Список литературы включает в себя 216 источников.

Во введении представлена актуальность исследования сформулирована цель и определены задачи диссертационной работы, представлены выносимые на защиту положения, описана практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе описаны существующие подходы к решению проблемы изменения критической температуры сверхпроводящих плёнок относительно уменьшения их толщины.

Во второй главе представлено описание метода изготовления сверхпроводящих объектов, исследуемых в работе.

В третьей главе приведены результаты кристаллографического и микроструктурного анализа, а также результатов исследования поверхности образцов.

В четвёртой главе сосредоточены результаты экспериментальных измерений, а также проведён анализ и выявление закономерностей зависимости T_c алюминиевых плёнок в зависимости от различных факторов.

В пятой главе представлено обсуждение полученных результатов и сравнение с существующими теоретическими моделями.

В заключении представлены результаты работы и сделаны выводы проделанного исследования.

Список литературы

- [1] Khukhareva I. S. The Superconducting Properties of Thin Aluminum Films // Soviet Physics JETP. 1963. 16, 4, 828 – 832.
- [2] B. Abeles, Roger W. Cohen, and G. W. Cullen. Enhancement of Superconductivity in Metal Films // Physical Review Letters. 1966. 17, 12, 632 – 634.
- [3] Toxen A. M. Size Effects in Thin Superconducting Indium Films // Physical Review. 1961, 123, 2, 442 – 446.
- [4] Kang L., et al. Suppression of Superconductivity in Epitaxial NbN Ultrathin Films // Journal of Applied Physics. 2011, 109, 033908 – 033914.
- [5] Ginzburg V. L. On Surface Superconductivity // Physics Letters. 1964. 13, 2, 101 – 102.
- [6] Myron Strongin, O. F. Kammerer, and Arthur Paskin. Superconducting Transition Temperature of Thin Films // Physical Review Letters. 1965. 14, 23, 949 – 951.
- [7] Jaeger H. M., et al. Onset of superconductivity in ultrathin granular metal films // Physical Review B. 1989, 40, 1, 182 – 196.
- [8] Chen Y., Shanenko A. A., Peeters F. M. Superconducting transition temperature of Pb nanofilms: Impact of the thickness-dependent oscillations of the phonon mediated electron-electron coupling // Phys. Rev. B. 2012, 85, 224517 – 224523.
- [9] Arutyunov K., et al. Nanoarchitecture: Toward Quantum-Size Tuning of Superconductivity. // Physica Status Solidi - Rapid Research Letters. 2019, 1800317, 1-5.
- [10] Jaeger H. M., et al. Onset of superconductivity in ultrathin granular metal films // Physical Review B. 1989, 40, 1, 182 – 196.
- [11] Shih-Wei Lin, et al. Pure electron-electron dephasing in percolative aluminum ultrathin film grown by molecular beam epitaxy // Nanoscale Research Letters. 2015, 10, 71, 1 – 7.

[12] Ginsberg D. M. Effect of Impurities on the Critical Temperature of Superconductors // *Physical Review*. 1964, 136, 5A, 1167 – 1170.

[13] Hui-Min Z., et al. Detection of a Superconducting Phase in a Two-Atom Layer of Hexagonal Ga Film Grown on Semiconducting GaN (0001) // *Physical Review Letters*. 2015, 114, 107003 – 107007.

[14] Stępniaak A., et al. Atomic Layer Superconductivity // *Surface and Interface Analysis*. 2014, 46, 12, 1262 – 1267.

[15] Landau I. L., Shapovalov D. L., Parshin I. A. Increase in the superconducting transition temperature of a thin film as a result of the deposition of a normal metal on its surface // *Pis'ma JETP*. 1991, 53, 5, 250 – 253.

[16] P. Wójcik. Enhancement of the Critical Temperature Induced by the Quantum Size Effect in Superconducting Nanofilms // *Acta Physica Polonica A*. 2014, 126, 4A, 130 – 133.

[17] Touloukian Y. S., Ho C. Y. Properties of Aluminum and Aluminum alloys // *Thermophysical Properties Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN, Report 21, 1973, p. 46*