

Кошелев Сергей Сергеевич

**Исследование теплофизических свойств ниобия,
применяемого в СВЧ резонаторах ускорителей
элементарных частиц, при температурах 1,6–10 К**

05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,
систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Внутренняя сторона обложки

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор,

Архаров Иван Алексеевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

Нестеров Сергей Борисович,
заместитель генерального дирек-
тора по научной работе ОАО «На-
учно-исследовательский институт
вакуумной техники им. С. А. Век-
шинского»

кандидат физико-математических
наук, доцент,

Юрченко Станислав Олегович,
доцент каф. «Физика» МГТУ
им. Н. Э. Баумана

Ведущая организация:

ОАО НПО «Гелиймаш»

Защита состоится «27» ноября 2013 г. в 14 ч. 30 мин. в конференц зале 314э на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, расположенном по адресу: г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан «18» октября 2013 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенн
просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секрет
тационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

 Колосов Михаил Анатольевич



Общая характеристика работы

Актуальность работы

Основным элементом современного линейного ускорителя является сверхпроводящий СВЧ резонатор. Для криостатирования ниобиевых резонаторов ускорителя используется большая криогенная система с затратами электрической мощности ≈ 15 МВт. Исследования поверхностного слоя, технологии обработки и контроля качества внутренней поверхности ниобиевых резонаторов позволили обеспечить добротность, характеризующую величину потерь, на уровне $\approx 10^{10}$. Однако для снижения затрат электрической мощности криогенной системы ускорителя необходимо глубокое научное изучение физических процессов, связанных не только с диссипацией энергии в поверхностном слое резонатора, но и с обеспечением требуемого температурного поля в его стенках, поскольку увеличение градиента температуры на стенке резонатора повышает испарение гелия в системе. Среди ряда сложностей, возникающих на пути решения этой задачи, выделяется отсутствие точных и достоверных данных по теплопроводности и теплоемкости сверхпроводящего ниобия.

Исследования теплофизических свойств сверхпроводящего ниобия были начаты более 40 лет назад. Объектами для исследования были высокочистые монокристаллы с различным содержанием примесей. Материал современных резонаторов существенно отличается от ранее изученных образцов содержанием и составом примесей, кристаллической структурой, оказывающих сильное влияние на теплофизические свойства, особенно при температурах ниже 2 К.

Существующие данные теплопроводности и теплоемкости не отражают влияние указанных факторов и по этой причине являются неполными и недостаточно точными, что и определяет необходимость настоящей работы. Обеспечение надежности и повышение ресурса систем криостатирования требует экспериментального исследования влияния кристаллической структуры на теплофизические свойства ниобия с целью создания надежных алгоритмов прогноза распространения нормальной зоны.

Используемая в настоящее время математическая модель теплопроводности сверхпроводящего ниобия плохо описывает температурную зависимость теплопроводности при температурах ниже 3 К, поэтому для поиска оптимального решения по снижению затрат электрической мощности криогенных систем линейных ускорителей необходимо совершенствование методов вычислительного моделирования теплопроводности сверхпроводящего ниобия.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей научной работы является экспериментальное исследование влияния фонов-дислокационного рассеивания на межзеренных границах на теплопроводность и теплоемкость сверхпроводящего ниобия с целью повышения стабильности работы и снижения потребления электрической мощности

криогенными системами линейных ускорителей.

Задачи работы:

1. Исследовать влияние кристаллической структуры на теплопроводность сверхпроводящего ниобия.
2. Определить коэффициент фонон-дислокационного взаимодействия на основании результатов измерений.
3. Создать экспериментальный стенд для определения теплопроводности и теплоемкости в диапазоне 1,6–10 К с погрешностью термостатирования не более 5 мК на нижней границе.
4. Модифицировать существующую модель теплопроводности сверхпроводящего ниобия на основе полученных экспериментальных данных.
5. Сделать анализ корреляции зависимостей теплопроводности и теплоемкости крупнокристаллического ниобия от температуры в диапазоне 1,6–2 К.
6. Создать автоматизированный программно-инструментальный измерительный комплекс для регистрации и обработки экспериментальной информации, обеспечивающий погрешность определения теплопроводности менее 2 % и теплоемкости менее 3 %.

Научная новизна

Новизна исследований, выполненных при решении этих задач, заключается в следующем:

1. Получена новая научная информация о зависимости теплопроводности ниобия от его кристаллической структуры.
2. Определены значения коэффициента фонон-дислокационного взаимодействия для крупно- и мелкокристаллического ниобия СВЧ резонаторов.
3. Создана модифицированная модель, позволяющая рассчитывать теплопроводность сверхпроводящего ниобия в диапазоне 1,6–9,2 К.
4. Экспериментально доказано отсутствие корреляции в зависимостях теплопроводности и теплоемкости от температуры для сверхпроводящего ниобия при температурах 1,6–2 К.

Практическая значимость

1. Полученная экспериментальная и аналитическая информация позволяет провести отбор ниобия для изготовления СВЧ резонаторов.

2. Разработанный и сконструированный в рамках настоящей научно-исследовательской работы экспериментальный стенд позволяет производить проверку листового ниобия непосредственно в технологической цепочке резонаторов.
3. Модифицированная математическая модель позволяет рассчитать теплопроводность сверхпроводящего ниобия на основе результатов определения относительного остаточного сопротивления и размера зерна, существенно снижая затраты времени и ресурсов.
4. Даны практические рекомендации по отбору и термообработке листового ниобия для изготовления СВЧ резонаторов.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- Найденная экспериментально зависимость теплопроводности сверхпроводящего ниобия от кристаллической структуры в температурном диапазоне 1,6–9,2 К
- Полученные экспериментальные данные теплоемкости крупнокристаллического ниобия в сверхпроводящем состоянии в диапазоне температур 1,6–9,2 К
- Модифицированная математическая модель, позволяющая определить теплопроводность ниобия в сверхпроводящем состоянии
- Разработанная конструкция экспериментального стенда для исследования теплофизических свойств в диапазоне 1,6–10 К с погрешностью термостатирования < 5 мК
- Экспериментальное доказательство отсутствия корреляции в зависимостях теплопроводности и теплоемкости от температуры для сверхпроводящего ниобия при температурах 1,6–2 К.
- Созданный программно-аппаратный измерительный комплекс, производящий измерение и обработку экспериментальных данных в автоматическом режиме и обеспечивающий относительную погрешность определения теплопроводности менее 1,5 % и теплоемкости менее 2,5 %

Апробация работы

Основные результаты положения диссертации были представлены:

- Доклады-выступления на кафедре Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва) в 2010–2012 гг.

- Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», МГУИЭ, Москва, 8-10 декабря 2010 года
- Доклад-выступление, Семинар им. Г. И. Будкера, Фермилаб, Батавия (США), 12 декабря, 2011 года

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается использованием аттестованных измерительных средств и апробированных методик, а также хорошей воспроизводимостью результатов. Основные уравнения представленных автором математических моделей и соотношений величин базируются на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики.

Личный вклад автора

Автором диссертации разработана конструкция экспериментального стенда, проведен поисково-сравнительный обзор литературы, выбраны методы исследования теплофизических свойств сверхпроводящего ниобия, разработан инструментальный измерительный комплекс, создан программный комплекс в средах разработки LabView и Octave для обеспечения автоматической работы измерительного комплекса, обработки экспериментальных данных теплопроводности, теплоемкости и относительного остаточного сопротивления (ООС), а также анализа погрешностей. Калибровка термометров, подготовка вторичных измерительных преобразователей, подготовка и установка образцов, изготовление нагревателей и приспособлений для работы с экспериментальной установкой также полностью выполнены автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 4 научных работах в рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов, списка обозначений и сокращений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 176 страниц, включая 79 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 103 наименования.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе «Выбор метода исследования. Постановка задач и цели исследования» описаны основные факторы влияющие на добротность современных сверхпроводящих резонаторов, осуществлен выбор методов исследования, и поставлены цель и задачи научной работы.

Теплопроводность ниобия является одним из основных факторов, ограничивающих характеристики современных сверхпроводящих СВЧ резонаторов. В большинстве рассмотренных работ, посвященных исследованию теплопроводности сверхпроводящего ниобия изучались монокристаллические сверхчистые образцы или образцы с высоким содержанием примесей (см. Рис. 1). Все полу-

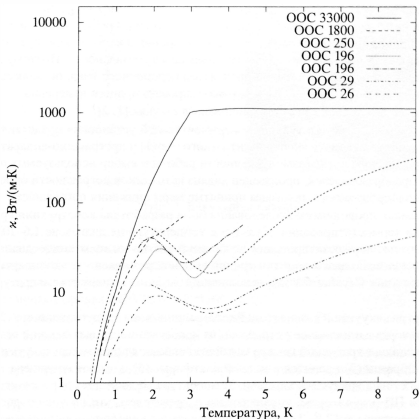


Рис. 1. Теплопроводность монокристаллических образцов ниобия с различным ООС по данным других авторов

ченные кривые теплопроводности недеформированных образцов имели фононный пик вне зависимости от ООС. Мелкокристаллические образцы мало изучены.

Влияние пластических деформаций изучалось на примере бикристаллических образцов плоской формы с межзеренной границей, перпендикулярной градиенту температур. Наиболее широко исследовано влияние последующей термообработки на теплопроводность деформированных образцов, в то время как влияние межзеренных границ не изучалось.

Обзор используемых методов для определения теплопроводности показал, что наиболее подходящим методом для сверхпроводящего образца при низкой температуре является классический метод стационарного теплового потока для вытянутого образца.

В опубликованных ранее работах исследования теплоемкости был применен калориметр Нернста, что ограничивало погрешность измерения $\approx 10\%$. Более точные релаксационный метод и метод двойной кривой не применимы, так как предполагают продолжительность измерения в несколько минут, что в свою очередь, повышает случайную составляющую погрешности. Поэтому для определения теплоемкости был выбран метод переменного тока, позволяющий обеспечить погрешность $\approx 2,5\%$ и автоматизировать процесс измерения.

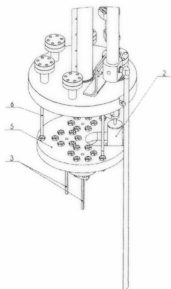
Результаты первой главы опубликованы в статьях [1, 2].

Во второй главе «Описание экспериментальной установки» представлено описание разработанного экспериментального стенда и программно-аппаратного измерительного комплекса, особенности работы и выбор используемых первичных преобразователей, произведен анализ источников погрешности определения теплопроводности, показаны принятые меры снижения погрешности.

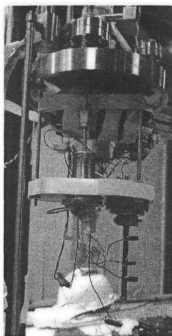
В рамках проводимого исследования была разработана конструкция криостата для термостатирования образцов в температурном диапазоне 1,6–10 K с погрешностью термостатирования не более 5 мK на нижнем конце диапазона. Криостат выполнен в виде погружной вставки, размещенной в стандартном криостате типа Cryofab CVSM, заполненный жидким гелием с температурой 4,5 K.

Внутри вакуумной камеры (см. Рис. 2) расположена градусная камера (2), в которую через капиллярное устройство из криостата поступает жидкий гелий. Испарившийся в градусной камере гелий откачивается при помощи вакуумного насоса. Образцы (3) крепятся к медной платформе (5), которая соединена тепловым мостом с градусной камерой. Температура медной платформы контролируется ПИ-регулятором, управляющим нагревателем, что позволяет достигать температуры ≈ 12 K. Теоретическая расчетная холодопроизводительность градусной камеры составляет ≈ 80 мВт при необходимой мощности охлаждения образца и медной платформы ≈ 10 мВт [3].

Для определения теплопроводности измерение температуры осуществляется при помощи автоматических уравновешенных мостов с напряжением возбуждения термисторов не более 3 мВ. Тепловой поток принимается равным мощности нагревателя и измеряется цифровым мультиметром. Для определе-



(a)



(б)

Рис. 2. Вакуумная камера

ния теплоемкости питание на нагреватель и измерение колебаний температуры образца осуществляется с помощью синхронного усилителя. Экспериментальные данные автоматически обрабатываются вычислительный комплексом, разработанных в средах LabVIEW и Octave.

Результаты второй главы опубликованы в статьях [3, 4].

В третьей главе «Физическое и аналитическое исследование теплопроводности и теплоемкости ниобия» описаны результаты тестовых экспериментов, аргументирована достоверность производимых измерений, представлены результаты и обсуждение результатов определения теплопроводности ниобия.

Проверка точности и достоверности работы экспериментального стенда осуществлена при помощи сравнения экспериментально полученной кривой температурной зависимости теплопроводности меди (см. Рис. 3) и приближенной эмпирической моделью, разработанной Национальным Институтом Стандартов и Технологий США (NIST). Данные эмпирической модели интерполированы до значения относительного остаточного сопротивления (на Рис. 3, RRR) 154,1, полученного в отдельном эксперименте. Полученные результаты хорошо согласуются с рассматриваемой моделью NIST. Относительная погрешность измерения

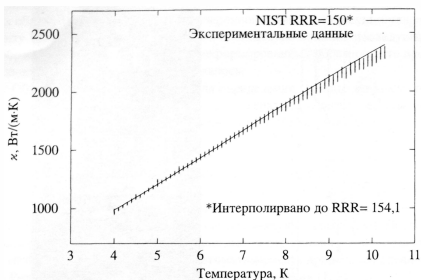


Рис. 3. Теплопроводность меди

не более 1,5%. Воспроизводимость результатов подтверждает достоверность полученных данных и надежность стенда как инструмента измерения.

Результаты определения теплопроводности крупнокристаллического ниобия представлены на Рис. 4. Для сравнения приведены данные бикристаллического (с одной межзеренной границей) образца, исследованного другими авторами [Comparison of the role of moderate heat treatment temperatures on the thermal conductivity of ingot niobium / S. K. Chandrasekaran [et al.] // AIP Conference Proceedings, Newport News. 2011. Vol. 1352. P. 131–141.]. Результаты измерения мелкокристаллического образца представлены на Рис. 5. Теплопроводность крупнокристаллического ниобия в 2 раза превосходит теплопроводность мелкокристаллического в области температур 1,8–2 К, поэтому является целесообразным использовать материал с теплопроводностью не менее 20 Вт/(м·К) для изготовления резонаторов.

В настоящее время для расчета теплопроводности сверхпроводящего ниобия наиболее широко используется следующая полуэмпирическая математическая модель Кёхлина-Бонина (КБ) [Koechlin F., Bonin B. Parametrization of the niobium thermal conductivity in the superconducting state // Superconductor Science and Technology. 1996. Vol. 9, No 6. P. 453–459.], Вт/(м·К):

$$\kappa(T) = R(y) \left[\frac{\rho_{295}}{L_0 RRR T} + aT^2 \right]^{-1} + \left[\frac{1}{D \exp(y)T^2} + \frac{1}{BIT^3} \right]^{-1}, \quad (1)$$

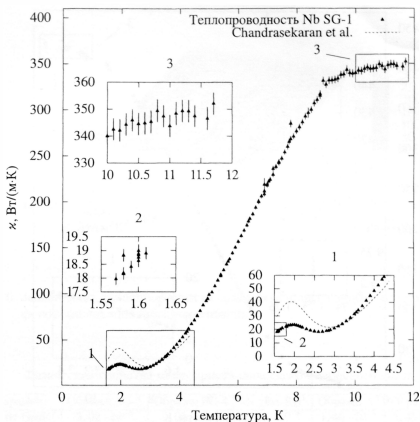


Рис. 4. Теплопроводность крупнокристаллического ниобия (SG-1) в сверхпроводящем состоянии

где ρ_{295} — удельное сопротивление при 295 К, Ом·м; RRR — ООС; l — средняя длина свободного пробега фононов, м; α , м/(Вт·К), L_0 , Вт·Ом/К², D , Вт/К³·м и B , Вт/(м²·К⁴) — коэффициенты рассеивания электронов и фононов, а $R(y)$ — отношение электронной составляющей теплопроводности в сверхпроводящем состоянии к электронной составляющей в нормальном состоянии, зависящее от y , характеризующего число неспаренных электронов.

Значения коэффициентов взаимодействия: α , L_0 , a , D , B , в модели КБ не позволяют рассчитать теплопроводность ниобия в области температур < 3 К (см. Рис. 8 и Рис. 7), поэтому в настоящей работе было проведено исследование и модификация коэффициентов модели.

Наиболее сильно величина фононного пика зависит от коэффициента фонон-дислокационного взаимодействия. Как видно на Рис. 6, наиболее выражен-

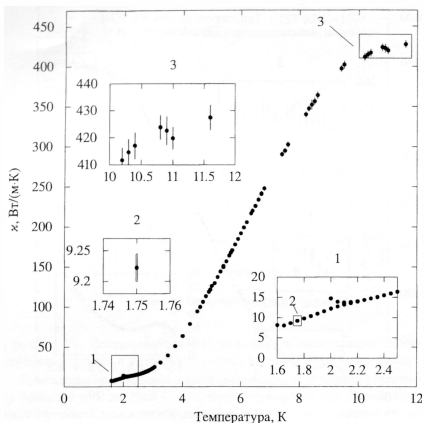


Рис. 5. Теплопроводность мелкокристаллического ниобия (FG-4) в сверхпроводящем состоянии

ный фононный пик соответствует большому значению коэффициента B .

Для определения коэффициентов для данной модели (1) использовался многоступенчатый итерационный подход с использованием метода Левенберга-Марквардта для решения систем нелинейных уравнений на каждой итерации. Полученные значения коэффициентов взаимодействия и их сравнение с результатами других авторов представлены в Таблице 1. В рассматриваемой модели (1) принимается допущение о зависимости фонон-дислокационного рассеивания только от геометрических размеров зерен или образца. Значительные различия значения коэффициента B для разных образцов означает, что использование соотношения $1/BI\tau^3$ для оценки фонон-дислокационного рассеивания и, соответственно, величины фононного пика недостаточно. Поскольку высокая подвижность примесных атомов при комнатной температуре способствует

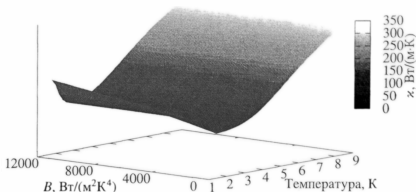


Рис. 6. Зависимость теплопроводности сверхпроводящего ниобия от параметра фонон-дислокационного рассеивания

Таблица 1.
Физические свойства мелкокристаллического ниобиевого листа

Параметр	Образец SG-1	Образец FG-4	Модель КБ ¹	Образец А ²	Образец В ²
L_0 , Вт·Ом/К ²	$3,02 \cdot 10^{-8}$	$3,02 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$	$3,45 \cdot 10^{-8}$
α , м/(Вт·К)	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,52 \cdot 10^{-7}$	...	...
D , Вт/К ³ ·м	1/341	1/341	1/234	1/404	1/224
α	1,826	1,826	1,53	2,04	1,78
B , Вт/(м ² К ⁴)	1190	45170	4340	745	815

[¹Koechlin F., Bonin B. Parametrization of the niobium thermal conductivity in the superconducting state // Superconductor Science and Technology. 1996. Vol. 9, No 6. P. 453–459.

²Parameter estimation of the thermal conductivity of superconducting nionium / S. K. Chandrasekaran [et al.] // Thermal Conductivity. 2010. Vol. 30. P. 742–749.]

образованию скоплений примесей на межзеренных границах, характерный размер зерна оказывает определяющее влияние на процесс фонон-дислокационного рассеивания. Анализ экспериментальных данных показал, что наилучшее соответствие экспериментальным данным обеспечивает использование степенной зависимости для описания фонон-дислокационного рассеивания. Модифициро-

ванная модель может быть представлена в виде, Вт/(м·К):

$$\kappa(T) = R(y) \left[\frac{\rho_{295}}{L_0 RRR T} + aT^2 \right]^{-1} + \left[\frac{1}{D \exp(y)T^2} + \frac{1}{\eta k T^3} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Значения констант подобраны методом наименьших квадратов и составляют $\eta = 15,7$ и $\zeta = 0,22$.

Результат приближения экспериментальных данных модифицированной моделью (2) показан на Рис. 8 для мелкокристаллического ниобия и на Рис. 7 для крупнокристаллического. Для сравнения приведены результаты расчета по модели КБ (1).

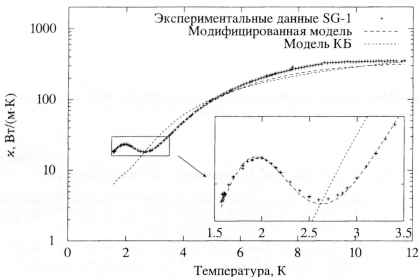


Рис. 7. Результат моделирования теплопроводности крупнокристаллического ниобия

Максимальное расхождение модельной и экспериментальной кривых составляет 22 % для крупнокристаллического образца и 17 % для мелкокристаллического. Для сравнения, погрешность модели КБ составляет 35 %. В области температур 1,6–4 К максимальное расхождение модифицированной модели и экспериментальных данных не превышает 5%. Как видно из представленных графиков, модифицированная модель лучше описывает поведение кривой теплопроводности в области фоновой пики и может быть использована для расчета теплопроводности при проектировании технологии изготовления ниобиевых резонаторов. Для полноценного контроля качества ниобия СВЧ резо-

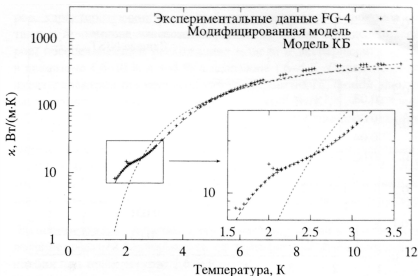


Рис. 8. Результат моделирования теплопроводности мелкокристаллического ниобия

наторов необходимо производить поверку теплопроводности в дополнение к определению ООС и размера зерна.

Определение теплоемкости медной подложки (см. Рис. 9), с установленными термометрами и нагревателями показывает хорошее соответствие эмпирической модели NIST с погрешностью $< 2,5\%$.

Одной из задач настоящего исследования является исследование корреляций температурных зависимостей теплопроводности и теплоемкости крупнокристаллического ниобия. Экспериментальная зависимость теплоемкости крупнокристаллического ниобия (см. Рис. 10) показывает хорошее соответствие экспериментальным данным, полученным ранее, однако не имеет никаких особенностей в области 1,6–2 К, что говорит об отсутствии корреляции.

Основные результаты и выводы

1. Исследована теплопроводность для двух типов кристаллической структуры листового ниобия СВЧ резонаторов. Полученные экспериментальные данные для крупнокристаллического ниобия хорошо согласуются с имеющимися данными бикристаллических образцов со средним расхождением кривых 30% . Также получены данные для мелкокристаллического образца. Данные теплопроводности имеют относительную погрешность $1,5\%$.

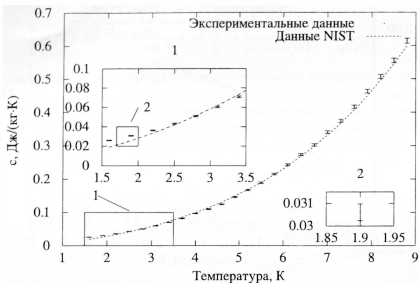


Рис. 9. Теплоемкость медной подложки

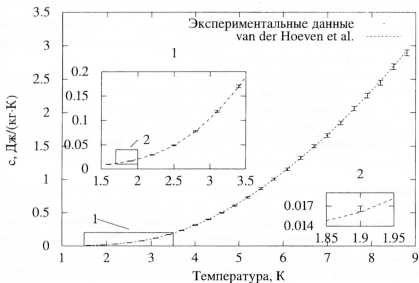


Рис. 10. Теплоемкость ниобия в сверхпроводящем состоянии

2. Исследовано поведение модели теплопроводности при вариации параметров, характеризующих взаимодействие электронов и фононов с дефектами и примесными атомами. Разработан метод определения параметров, обеспечивающий расхождение модели и эксперимента менее 20 % в диапазоне 1,6–10 К и 3–4 % в диапазоне 1,6–4 К. Определены коэффициенты электрон-примесного, электрон-фононного, фонон-электронного рассеивания, которые составляют $3,02 \cdot 10^{-8}$ Вт/К², $7,4 \cdot 10^{-4}$ м/(Вт·К²), 1/341 Вт·К³/м соответственно. Коэффициенты общие для всех образцов.
3. Определен коэффициент фонон-дислокационного взаимодействия для крупно- и мелкокристаллического образцов, равные 1190 Вт/(м²К⁴) и 45170 Вт/(м²К⁴) соответственно. Коэффициент фонон-дислокационного взаимодействия значительно отличается для двух типов кристаллической структуры.
4. Экспериментально доказано отсутствие корреляции в зависимостях теплопроводности и теплоемкости от температуры для сверхпроводящего ниобия при температурах 1,6–2 К.
5. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для определения теплопроводности и теплоемкости в диапазоне 1,6–10 К с погрешностью термостатирования не более 5 мК.
6. Создан автоматический программно-инструментальный измерительный комплекс для регистрации и обработки экспериментальной информации, обеспечивающий погрешность определения теплопроводности $\approx 1,5$ % и теплоемкости $\leq 2,5$ %.

На основе полученных экспериментальных, расчетных данных и их анализа даны следующие рекомендации для совершенствования технологии изготовления ниобиевых резонаторов:

1. Использовать более дешевые и простые в изготовлении крупнокристаллические листы ниобия для сокращения технологического процесса и снижения стоимости
2. Производить высокотемпературный отжиг (> 1000 °С) с выдержкой не менее двух часов, для удаления скоплений примесей из границ зерен и снятия остаточных напряжений для обеспечения большей теплопроводности
3. Осуществлять поверочный контроль теплопроводности не менее, чем пяти образцов из листов, изготовленных из крайних частей слитка. Теплопроводность ниобия должна быть не менее 20 Вт/(м·К).

Расчет теплопроводности с использованием модифицированной модели, Вт/(м·К):

$$\kappa(T) = R(y) \left[\frac{\rho_{295}}{L_0 RRR T} + aT^2 \right]^{-1} + \left[\frac{1}{D \exp(y)T^2} + \frac{1}{\eta^{\zeta} T^3} \right]^{-1},$$

со значениями эмпирических коэффициентов $\eta = 15, 7$ и $\zeta = 0, 22$.

Результаты математического и экспериментального исследования могут быть использованы в научно-исследовательских лабораториях, занимающихся разработкой технологии и использованием СВЧ резонаторов и физикой высоких энергий: УНК ИФВЭ (г. Протвино), ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), Фермилаб (г. Батавия, США), Национальная Ускорительная Лаборатория Аргон (г. Лемонт, США), Лаборатория Джефферсона (г. Ньюпорт-Ньюс, США), а также компаниями производителями современного ниобия СВЧ резонаторов: корпорация Кэбот (г. Бостон, США), корпорация Ва-Чанг (г. Олбани, США) и ОАО Гиредмет.

Список публикаций

1. Архаров И. А., Кошелев С. С., Карканьо Р. Основные проблемы термостатирования сверхпроводящих ниобиевых резонаторов линейных ускорителей элементарных частиц. Влияние сплошности, химической чистоты, газовых примесей, механических напряжений и кристаллической структуры ниобия на теплопроводность и добротность резонатора // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2013. № СВ-4. С. 176–185.
2. Выбор метода исследования теплопроводности ниобия в сверхпроводящем состоянии / И. А. Архаров [и др.] // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2013. № СВ-4. С. 186–195.
3. Экспериментальный стенд для исследования теплофизических свойств ниобия в сверхпроводящем состоянии / И. А. Архаров [и др.] // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2013. № СВ-4. С. 196–201.
4. Алгоритм и функциональная схема сбора информации для стенда исследования теплопроводности при температурах ниже 10 К / И. А. Архаров [и др.] // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2013. № СВ-4. С. 186–195.