

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МЕДИ В Cu-Nb-КОМПОЗИТЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.О. Леденёв, Д.О. Леденёв, О.П. Леденёв, М.А. Тихоновский

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина

Методом поглощения ультразвука при низких температурах $T=0,35...2\text{К}$ исследовано возникновение сверхпроводимости в медной матрице в Cu-Nb композитных образцах, обусловленное эффектом близости (proximity effect). Медь-ниобиевые композитные образцы цилиндрической формы были получены в ходе *in situ* процесса. Продольная ультразвуковая волна частотой 30 МГц распространялась вдоль оси цилиндрических образцов. Было обнаружено, что при $T < 2\text{ К}$ уменьшение температуры приводит также к заметному уменьшению поглощения продольного ультразвука, тогда как в чистых ниобии и меди оно не изменяется существенно при таких низких температурах. Проведены расчетные исследования полученных экспериментальных результатов с использованием компьютерного моделирования в программных пакетах Matlab и Mathematica. Из результатов исследований можно сделать вывод о существовании в этой системе температурно-зависимого эффекта близости, который индуцирует сверхпроводимость в медной матрице вблизи границы с ниобием. Также наблюдаются зависящие от температуры андреевские отражения электронных возбуждений на границе Cu-Nb (нормальный металл-сверхпроводник), что сказывается на виде зависимости поглощения ультразвука от температуры. Проведена оценка индуцированных в условиях данного эксперимента сверхпроводящих параметров меди.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные микроструктурированные материалы обладают рядом интересных механических и физических свойств, что позволяет использовать их в прикладных инженерных разработках в качестве материалов с улучшенными физическими параметрами для изготовления элементов электрических устройств и механизмов, работающих в напряженных условиях. Электрофизические свойства таких систем не являются простой суммой свойств компонентов, что особенно наглядно проявляется при достаточно низких температурах. Слоистые и волокнистые материалы, содержащие медь, широко исследуются как типичные системы класса сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник (S-N-S), в которых в качестве сверхпроводника используются различные сверхпроводящие металлы с относительно высокой критической температурой T_c . Хорошо известно, что в таких системах при низких температурах наблюдается эффект близости [1], который может существенно изменять электронные свойства нормальных включений, индуцируя в них сверхпроводимость. Эффект близости был обнаружен в различных S-N-S-системах, и одно из проявлений этого эффекта заключается в возможности протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой нормального металла. Так в слоистой S-N-S (Nb-Cu-Nb)-системе наблюдались свойства джозефсоновского перехода [2], размерный 3D-2D кроссовер [3, 4], проявлялось влияние эффекта близости на сверхпроводящий критический ток и температуру перехода [5] и другие свойства [6].

Эффект близости в Cu-Nb однослойной системе был ранее обнаружен и исследован при температуре до 21 мК по диамагнитным свойствам [7]. Влияние электрон-фононного взаимодействия на электронные свойства такой джозефсоновской системы наблюдалось косвенным образом с помощью термоэлектрического [9] и акусто-электрического эффектов [10]. Для традиционных ультразвуковых иссле-

дований более удобно использовать массивный композитный Cu-Nb-материал, также имеющий слоистую внутреннюю структуру и образуемый в результате *in situ* процесса [11, 12]. Физические свойства такого материала близки к свойствам многослойной тонкопленочной S-N-S-системы, и механические свойства таких систем исследованы в [11, 12, 13]. Электрическое сопротивление в нормальном состоянии измерялось в работе [14], и сверхпроводящие свойства изучены в [12]. Механические и сверхпроводящие свойства композита с микронитями ниобия в медной матрице, полученного методом волочения, были исследованы в статьях [15, 16, 17]. Критические магнитные поля тонкопленочной слоистой системы ферромагнетик-сверхпроводник (Fe/Pb) измерены в [18] методом поглощения поверхностной акустической волны. В то же время ультразвуковые объемные исследования, с помощью которых можно согласно теории BCS [8] получить суждение о сверхпроводящей энергетической щели, индуцируемой в нормальном металле, на одиночных микроскопических S-N-S-образцах провести весьма затруднительно. В данной работе Cu-Nb объемная мезоскопическая система, состоящая из тонких слоев меди и ниобия была использована в качестве образцов для исследования особенностей сверхпроводящих свойств, проявляющихся в композитной среде. Исследование электронных и сверхпроводящих свойств таких систем интересно и в связи с созданием все более мелких наноструктурированных композитных сред, в которых подобные эффекты могут происходить и при более высоких температурах и играть важную роль в особенностях их характеристик.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Двухфазные композитные сплавы медь–ниобий (Cu-Nb), содержащие Nb в количестве 40 объемных процентов, были изготовлены из высокочистых металлов путем их сплавления в форме из высококачественного графита в чистой газообразной гелиевой атмосфере, как это описано, например, в [13]. Слитки, содержащие дендриты Nb с размерами, близкими к 10 мкм, были опрессованы в цилиндры диаметром 20 мм и затем протянуты до диаметра 4,95 мм путем проведения нескольких стадий волочения с промежуточными отжигами при температуре 650 °С. Образцы для измерения ультразвукового поглощения и электросопротивления соответственно длиной 10 и 30 мм были вырезаны из цилиндрических стержней электроэрозионным способом. Протравленная поверхность основания образца цилиндрической формы показывает равномерное распределение нитей ниобия со средним значением их диаметра, близким к 3 мкм, и средним расстоянием между нитями Nb в медной матрице равным ~3...4 мкм.

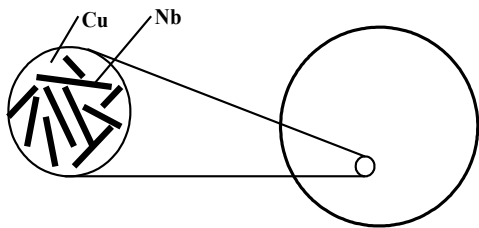


Рис. 1. Условное изображение структуры волокон ниобия на поперечном срезе цилиндрического композитного образца Cu-Nb

Нити из ниобия пересекаются в образце случайным образом, и их длина ограничена несколькими сотнями микрометров. Условная картина вида поперечного среза образца показана на рис.1. Продольная ориентация нитей совпадает с направлением оси волочения цилиндрических образцов.

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ

Электронная проводимость композитных образцов, состоящих из меди с относительным объемным содержанием ниобия равным V_{Nb} , в случае пренебрежения эффектами поверхностного рассеяния представляет собой линейную комбинацию электросопротивлений компонентов. Усредненное удельное электросопротивление может быть записано в виде

$$\rho = (1 - V_{Nb}) \rho_{Cu} + V_{Nb} \rho_{Nb},$$

где ρ_{Cu} и ρ_{Nb} – удельные электросопротивления меди и ниобия соответственно. В исследуемых образцах $V_{Nb} = 0,4$ и при комнатной температуре $\rho_{Nb} / \rho_{Cu} \geq 10$, поэтому проводимость образца почти полностью определяется проводимостью меди.

Удельное электросопротивление измерялось четырехточечным методом на образцах длиной 30 мм, и его значения при комнатной температуре и 10 К равны соответственно $\rho_{293K} = 1/\sigma_{293K} = 2,13 \cdot 10^{-6}$ Ом·см и $\rho_{10K} = 1/\sigma_{10K} = 7,22 \cdot 10^{-8}$ Ом·см. Отношение сопротивлений равнялось 29,5.

Электрическая проводимость в простой электронной теории (см., например, [19]) равна

$$\sigma = n e^2 \tau / m^*,$$

где n – электронная плотность; e – заряд электрона; τ – время релаксации; m^* – эффективная электронная масса. Это выражение может быть переписано как

$$(\rho l) = \rho_F / n e^2,$$

где l – длина свободного пробега электронов. Оно обычно используется для определения значения l в нормальном металле [20, 21]. В случае меди получаем оценку длины свободного пробега электрона в нормальном металле при температуре $T = 10$ К равную $l \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$ см при следующих значениях основных параметров: $m^* = 1,38 m_e$, $n = 8,45 \cdot 10^{22}$ см⁻³, $v = 1,57 \cdot 10^8$ см/с, где m_e – масса электрона (см., например, [19]).

В ходе исследований был проведен ряд измерений удельного электрического сопротивления ρ образцов и выяснено, что при температуре ниже критической для ниобия $T_C \approx 9,2$ К они все переходят в сверхпроводящее состояние с $\rho = 0$. Это свидетельствует о том, что в исследуемом случае концентрация ниобия в образце выше, чем порог перколяции для неупорядоченных 3-мерных систем, и сверхпроводящий ток в образце протекает через контакты нитей Nb-Nb даже в случае, когда медная матрица находится в нормальном состоянии. Поэтому токовые характеристики образца не дают полного представления о его состоянии. Диамагнитные свойства (например, исследование намагниченности) также характеризуют лишь токовый отклик поверхностного слоя системы и не позволяют получить достоверных данных ни о доле образца, находящейся в сверхпроводящем состоянии, ни о сверхпроводимости, индуцируемой в нормальном металле в глубине образцов. С целью более подробного изучения этого вопроса авторами были проведены исследования поглощения продольного ультразвука в данном композитном материале. Температурная зависимость ультразвукового поглощения позволяет получить данные о сверхпроводящей энергетической щели, возникающей в медных слоях под влиянием сверхпроводящего ниобия, и сделать более подробные выводы о поведении такого материала при низких температурах.

Для проведения экспериментальных ультразвуковых исследований была собрана установка, состоящая из генератора сигналов опорной частоты, генератора импульсных сигналов ультразвуковой частоты, синхронизатора, аттенюатора, приемника сигналов ультразвуковой частоты, с возможностью осуществления перестройки частоты и временной селекции и самописца (рис.2).

Эти блоки были подключены к криогенной части установки, состоявшей из низкотемпературного гелиевого сосуда Дюара, в который помещался обра-

зец с прикрепленными кварцевыми пьезопреобразователями ультразвука и датчиками для измерения температуры. Перед проведением измерений проводилась калибровка измерительной части установки. Низкотемпературный криостат, содержащий жидкий ^3He , был помещен вместе с адсорбционным насосом в криостат с жидким ^4He (рис. 3).

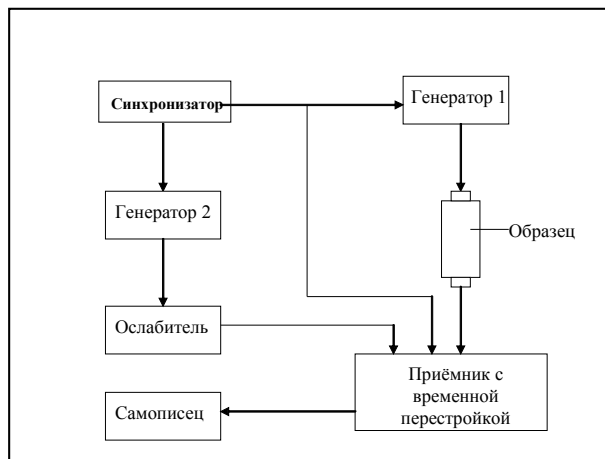


Рис. 2. Блок-схема электронного оборудования для измерения затухания ультразвука частотой 30 МГц в композитном многоволоконном образце Cu-Nb

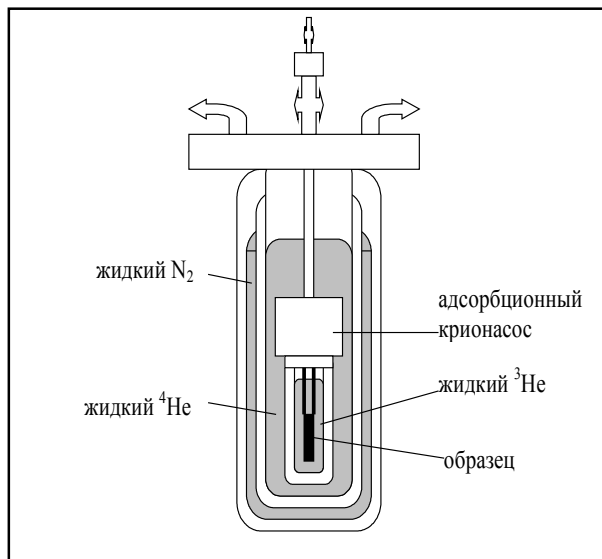


Рис. 3. Схема криогенной части установки, использовавшейся для измерений поглощения ультразвукового сигнала в композитных многоволоконных образцах Cu-Nb

Экспериментальная установка, используемая для проведения измерений затухания ультразвука в композиционных образцах структуры Cu-Nb, была подобна установке, которая применялась ранее для проведения измерений как по ослаблению ультразвука в промежуточном состоянии сверхпроводников [19], так и по поглощению ультразвуковых осцилляций в малых магнитных полях в чистых металлах [23].

Исследования поглощения ультразвука проводились на образцах длиной 10 мм и диаметром 4,95 мм, которые были изготовлены с высокой

точностью вышеописанным методом. Ультразвуковая волна распространялась вдоль продольной оси в направлении оси волочения образца. Во время измерений образец полностью находился в жидком ^3He . Температура измерялась высокочувствительным германиевым термометром, а также путём измерения паров ^3He с точностью $T = \pm 0,001$ К. Генератор ультразвукового сигнала частотой в 30 МГц генерировал электромагнитные импульсы временной длительностью ~ 1 мкс с частотой повторения 50...200 циклов/с. Они передавались через коаксиальный кабель к кварцевому преобразователю X среза с частотой основной моды 10 МГц, который закреплялся на одном из оснований образца. Сигнал от второго кварцевого преобразователя, который закреплялся на втором основании, поступал в приёмник. Сравнивая амплитуду сигнала, прошедшего через образец, с сигналом, также поступающим через аттенуатор от измерительного генератора на приёмник, можно было провести точные измерения амплитуд эхо-импульсов ультразвуковых сигналов, которые распространялись в образцах. Точность измерений ультразвукового сигнала составляла $\pm 0,05$ дБ.

1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследований было установлено, что композитные образцы Cu-Nb обладают очень высокими волноведущими свойствами, и в них удавалось наблюдать свыше 20 эхо-сигналов, которые распространялись без видимой дисперсии и с хорошей экспоненциальной зависимостью спада амплитуды затухания. Это позволило измерять поглощение в образце путем регистрации затухания амплитуды между первым и пятым эхо-сигналами. Эффективный акустический путь, проходимый между сигналами, составлял 8 см. Скорость распространения продольного ультразвука вдоль продольной оси образца при температуре 4,2 К, найденная по измерению времени прохождения ультразвукового импульса в образце, составляла $(5,11 \pm 0,02) \cdot 10^5$ см/с. Это значение скорости ультразвука близко к величине $5,09 \cdot 10^5$ см/с для направления $\langle 110 \rangle$ в кристаллической решётке ниобия [24], а также к величине $5,12 \cdot 10^5$ см/с для поликристалла меди. Скорости распространения ультразвука для различных направлений кристаллической решетки в монокристалле меди Cu исследованы в [25]. При комнатной температуре скорость распространения ультразвука для продольных волн составляла $5,01 \cdot 10^5$ см/с [25]. Как показано в работах [26, 27], упругие свойства меди зависят от строения и чистоты её кристаллической решетки. В статье [11] было определено, что в композиционных *in situ* сформированных образцах Cu-Nb после деформации ОЦК (bcc)-ниобий образует текстурированную вдоль $\langle 110 \rangle$ кристаллическую волоконную структуру. Рентгеноструктурный анализ кристаллической решетки образцов, используемых в эксперименте, показал, что волокна ниобия имеют подобную ориентацию. Поликристаллическая медная матрица имела слабовыраженную текстуру в направлении $\langle 111 \rangle$. Исходя из измерений скорости затухания ультразвукового сигнала в об-

разце, можно полагать, что в исследуемом случае после деформации и отжига медная ГЦК (fcc)-матрица представляет собой поликристалл со слабо выраженной структурой вдоль $\langle 111 \rangle$, ориентированной в направлении оси волочения. В нашем случае длина волны ультразвукового сигнала составляла $\lambda \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$ см и была больше, чем характерные размеры $d \sim (3 \dots 7) \cdot 10^{-4}$ см, свойственные многоволоконной структуре Cu-Nb. Таким образом, образец можно было рассматривать как однородное тело, в котором затухание ультразвука не зависит от периодичности многоволоконной структуры. Однако такая зависимость возникает в образцах, для которых выполняется соотношение $\lambda/d \sim 1$ [28].

Типичная температурная зависимость затухания продольного ультразвука частотой 30 МГц в композитных многоволоконных образцах Cu-Nb показана на рис. 4.

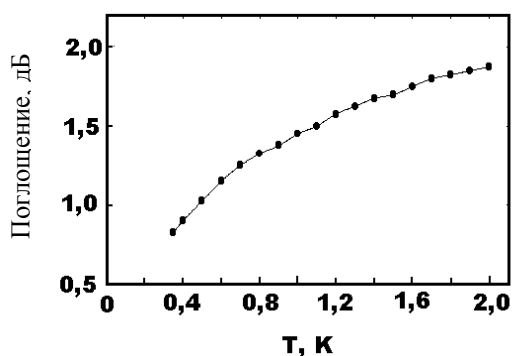


Рис. 4. Температурная зависимость поглощения ультразвука частотой 30 МГц в Cu-Nb-образце между 1 и 5 эхо-сигналами

Из графика видно, что затухание амплитуды ультразвука плавно уменьшается с понижением температуры. Величина изменения амплитуды ультразвукового сигнала в единицах логарифмической шкалы составляет порядка $\sim 1,1$ дБ или $\sim 0,138$ дБ/см в температурном диапазоне 0,35...2 К. Эта зависимость неожиданна, так как в этой области температур и в медной матрице, и в ниобии поглощение ультразвука не может в такой мере зависеть от температуры, как это следует из эксперимента. Полученные результаты показывают, что в этих композитных образцах возможен некоторый иной механизм изменения электронного поглощения ультразвука, связанный, видимо, с эффектом близости. В соответствии с теорией сверхпроводимости БКШ (см., например, [8, 29]) отношение поглощения продольного ультразвукового сигнала в сверхпроводящем и нормальном состояниях может быть записано в виде

$$\alpha_s / \alpha_n = 2 / [1 + \exp(\Delta(T) / k_B T)], \quad (1)$$

где $\Delta(T)$ — зависящая от температуры энергетическая щель сверхпроводника; k_B — постоянная Больцмана; T — температура.

Затухание ультразвука в результате взаимодействия ультразвуковой волны с электронами в нормальном металле α_n было изучено, например, в работе [30], а также в обзорах [31]. Для случая $q \ll 1$,

который соответствует композитному образцу Cu-Nb, оно может быть представлено в виде:

$$\alpha_n = (\hbar q^2 / 4\pi^3 M v_s) \int D^2 l ds = (4/15) n m v (q^2 l) / M v_s, \quad (2)$$

где $q=2\pi/\lambda$ — волновое число; M — плотность металла; v_s — скорость распространения ультразвука в сверхпроводнике; D — деформационный параметр; $\hbar = h/2\pi$.

Затухание ультразвукового сигнала в чистом сверхпроводящем Nb было исследовано в [24]. Согласно теории БКШ при температуре ниже 3 К затухание ультразвука должно быть незначительным, потому что $\alpha_s \ll \alpha_n$ и почти не зависит от температуры. Поглощение ультразвука в нормальной меди было изучено в работах [25, 32]. При температуре $T < 10$ К в меди, используемой в образце, оно также должно оставаться постоянным, так как длина свободного пробега электрона в ней уже не зависит от температуры. Как отмечалось выше, исходя из измерений электрического сопротивления в композитном образце Cu-Nb при температуре 10 К, длина свободного пробега электрона составляет $l \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$ см. Это значение длины свободного пробега электрона меньше, чем величина $l \approx 6,1 \cdot 10^{-4}$ см при $T=30$ К, найденная в работе [32]. Поэтому можно сделать вывод, что l в композитных образцах, исследуемых в данной работе, не зависит от температуры при $T < 10$ К. Необходимо отметить, что в соответствии с результатами измерений, представленных в работах [11, 14], медная матрица может быть и более чистой с удельным сопротивлением $\rho \approx 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·см. Расчёты, проведенные для меди, дают величину затухания ультразвуковой волны в этом металле близкую к $\alpha_n \approx 7,16 \cdot 10^{-2}$ дБ/см для частоты 30 МГц и длину свободного пробега электрона, равную $l=1,26 \cdot 10^{-4}$ см. Ультразвуковое поглощение в исследуемых композитных образцах, содержащих медь в количестве 60 об. %, должно составлять $\alpha_n \approx 3,44 \cdot 10^{-1}$ дБ/см между 1 и 5 эхо-сигналами. Наблюдаемая же величина затухания ультразвука оказывается меньшей и может быть объяснена, если предположить, что медь становится частично сверхпроводящей под влиянием эффекта близости.

Используя упрощённую модель структуры нормальный металл-сверхпроводник-нормальный металл (S-N-S) для представления композитного многоволоконного образца с плоскими волокнами ниобия толщиной d_s и расстоянием d_n между волокнами в медной матрице (рис. 5), оказалось возможным рассчитать температурную зависимость α_s/α_n для медной матрицы в случае эффекта близости и затем сравнить её с экспериментальной зависимостью. На рис. 5 схематично изображена зависимость сверхпроводящей щели в слоях Nb и Cu от расстояния, использованная для расчета поглощения ультразвука в композитных образцах.

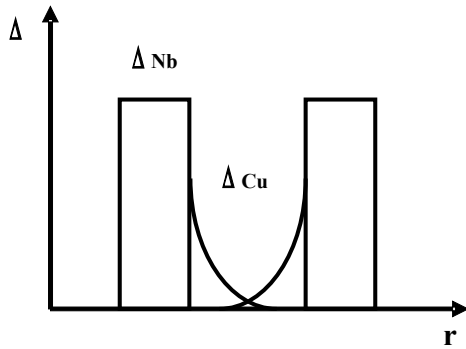


Рис.5. Условное изображение величин сверхпроводящей щели Δ в слоях Nb и Cu

Согласно теории эффекта близости [1] сверхпроводящий параметр порядка записывается в виде:

$$\Psi(r) \sim \Delta(r) \sim \exp[2\pi i (pr - \epsilon t) / \hbar],$$

где χ - фаза; $p = \nabla\chi$. Эта функция экспоненциально спадает в нормальном металле:

$$\Psi(x) \sim \exp[-kx],$$

где x - расстояние от границы нормальный металл-сверхпроводник; $k = 2\pi/\lambda_N$ - волновое число; λ_N - расстояние в нормальном металле, на котором изменяется сверхпроводящий параметр порядка; \hbar - постоянная Планка. В теории рассматриваются два возможных предельных случая для температурной зависимости длины корреляции волновой функции сверхпроводящих электронов в нормальном металле $\xi_N = k^{-1}$.

В случае, когда $l > \xi_N(T)$, т.е. длина свободного пробега электрона больше, чем корреляционная длина сверхпроводящих электронов в нормальном металле, что соответствует чистому нормальному металлу, $\xi_N(T) = \hbar v / 2\pi k_B T$.

Когда $l < \xi_N(T)$, что наблюдается в нормальном металле с примесями, то $\xi_N(T) = (\hbar \cdot v \cdot l / 6\pi \cdot k_B \cdot T)^{1/2}$.

В обоих случаях сверхпроводящий параметр порядка, который индуцируется в нормальном металле, зависит как от расстояния, так и от температуры:

$$\Psi_N(x, T) \sim \Psi_{N0} \exp[-x/\xi_N(T)].$$

В металле с примесями можно полагать, что затухание ультразвукового сигнала определяется в каждой точке образца энергетической щели $\Delta(x, T)$, которая равна локальной величине $\Psi_N(x, T)$ [35], и полное затухание ультразвукового сигнала выражается интегралом по расстоянию x от границы нормальный металл-сверхпроводник с пределами от 0 до $d_N/2$. Используя безразмерное расстояние $x/(d_N/2)$, выражение для симметричных элементов структуры может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \alpha_S(T)/\alpha_N &= \int_0^{d_N/2} \frac{2}{1 + \exp\left[\frac{A \exp(-x/\xi_N(T))}{k_B T}\right]} dx = \\ &= \int_0^{0.5} \frac{2}{1 + \exp\left[\frac{A/k_B}{T \exp(BxT^{1/2})}\right]} dx, \end{aligned}$$

где A - константа, пропорциональная величине энергетической щели Δ_{N0} на границе нормальный металл-сверхпроводник; B - отношение между $d_N/2$ ξ_N при температуре $T=1$ К, которое равно $B \approx 0,75$.

Эти зависимости, рассчитанные для нескольких значений Δ , изображены на рис. 6.

Тут же приведена и экспериментальная зависимость. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчётов, проведенными в пакетах Matlab и Mathematica, показывает, что данное выражение хорошо описывает затухание ультразвукового сигнала в композитных многоволоконных образцах Cu-Nb на основе эффекта близости. Используя выражение для константы A , которая близка к величине энергетической щели в теории BCS:

$$A = 3,5 k_B T^*,$$

где T^* - эффективная критическая температура меди, были найдены значения эффективных критических температур в двух интересующих случаях: 1 - $T^* \approx 70$ мК в диапазоне температуры эксперимента $T=2 \dots 0,6$ К; 2 - $T^* \approx 100$ мК в диапазоне температуры эксперимента $T=0,5$ К.

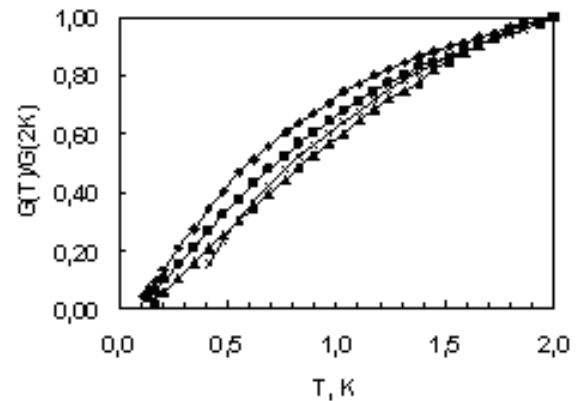


Рис.6. Расчетные кривые отношения поглощения ультразвука $G(T)$ при температуре T к поглощению при $T=2$ К для значений $\Delta=36$ мК (ромбы), $\Delta=57$ мК (квадраты), $\Delta=95$ мК (треугольники) и экспериментальная кривая (кресты)

Ранее в работе [7] было найдено, что эффективная критическая температура составляет величину $T^* \approx 40$ мК для слоя меди покрывающего ниобий, и такая эффективная критическая температура по сути является термодинамической критической температурой T_{CN} для меди как сверхпроводника с фазовым переходом первого рода при $T < T^*$. Длина свободного пробега электрона в композитном образце $l \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$ см находится в хорошем соответствии с величиной B . Необходимо отметить, что в композитном образце Cu-Nb полное затухание ультразвука зависит от длины свободного пробега электрона в медной матрице. Длина когерентности ξ_N в меди также зависит от длины свободного пробега электронов, которая определяется их рассеянием на неоднородностях и примесях вблизи границ нормальный металл-сверхпроводник. Более быстрое уменьшение затухания ультразвука с понижением температуры при $T \leq 0,6$ К в эксперименте по сравнению с расчетной величиной может быть, отчасти, объяснено тем, что при моделировании используется упрощенная модель структуры. Однако, видимо, можно полагать, что основной вклад в это отклонение дает более быстрый рост Δ_{Cu} при понижении температуры, чем это

следует из теоретической модели. Также необходимо учитывать, что при низких температурах длина когерентности ξ_N велика и возможно дальнедействующее упорядочение среди ниобиевых волокон Nb в композитном образце Cu-Nb, которое не рассматривается в выбранной расчётной модели.

Также было исследовано влияние слабого магнитного поля на поглощение ультразвука в композиционном многоволоконном образце Cu-Nb. Ранее в [7] было показано, что эффект близости очень чувствителен к магнитному полю в области 2-3 Э, так как даже такое магнитное поле уменьшает длину когерентности в композитном образце в десятки раз. В исследованных нами образцах, магнитное поле величиной до 100 Э не оказывало влияния на затухание ультразвукового сигнала, так как в данных композитных многоволоконных образцах структура распределения ниобиевых волокон Nb в медной матрице была иной, и ниобиевые волокна, имея разветвленную структуру, контактировали друг с другом. Магнитное поле в этом случае не проникало в образец, потому что система ниобиевых волокон обладала экранирующими диамагнитными свойствами с большой величиной сверхпроводящего критического тока [36].

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследовании поглощения ультразвука при низких температурах в композитных образцах Cu-Nb было обнаружено влияние эффекта близости. Отклонение в величине поглощения сигнала, которое было зарегистрировано в проведенных экспериментах при низких температурах $T < 0,6$ К, от того, которое было рассчитано нами теоретически с использованием выражения (2), видимо, возникает из-за зависимости длины свободного пробега электрона в металле, с одной стороны, от температуры, и, с другой - от изменения условий рассеяния электронов на границе нормальный металл-сверхпроводник. Температурная зависимость выражается в виде условия

$$l^{-1} = l_0^{-1} + l^{-1}(T),$$

где l_0 – длина свободного пробега электронов в металле, зависящая от их рассеяния на неоднородностях в металле; $l(T)$ – длина свободного пробега электронов в металле, зависящая от электрон-фонного рассеяния с характерной зависимостью при низких температурах $\sim T^{-3}$. Необходимо отметить тот факт, что существует определенное несоответствие значений длины свободного пробега электрона в металле l , полученных исходя из электрических и ультразвуковых измерений, как это отмечается, например, в [31]. Электрическая проводимость зависит от интеграла от длины свободного пробега электрона в металле, взятого по всей поверхности Ферми, в то время как затухание ультразвука в металле зависит от интеграла от произведения квадрата деформационного параметра и длины свободного пробега электрона в металле $D^2 \cdot l$. В нашем случае исследуемые композитные образцы не являются очень чистыми $q/\ll 1$, и анизотропия деформационного параметра D не играет важной роли в отклонении меж-

ду результатами измерений. Полная длина свободного пробега электрона в металле l , которая определяется рассеянием электронов на неоднородностях, находящихся как в объеме, так и около границ Cu-Nb, в композитном образце записывается в виде

$$l^{-1} = l_{0V}^{-1} + l_{0B}^{-1} + l^{-1}(T),$$

где l_{0V} – длина свободного пробега электрона в объеме меди; l_{0B} – длина свободного пробега электрона в металле, ассоциирующаяся с неоднородностями на границе. При низкой температуре неоднородности, находящиеся на границе, не принимают участия в процессе рассеяния электронных возбуждений в условиях, когда сверхпроводящая энергетическая щель возникает вблизи N-S-границы под действием эффекта близости. В этом случае реализуются условия, при которых происходят андреевские отражения [33]. Электронные возбуждения, которые находятся в нормальном металле, имеют большую длину свободного пробега, что и сказывается на зависящем от температуры поглощении [34]. Величина частоты ультразвукового сигнала ω оказывается меньшей, чем частоты рассеяния электронов на дефектах. В результате расчетов было найдено, что длина свободного пробега электрона в объеме меди Cu имеет значение $l_{0V} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ см, исходя из выражения (2) с учетом экспериментальной величины затухания ультразвука $\sim 1,1$ дБ для случая $q/\ll 1$, который соответствует композитному образцу Cu-Nb. Результаты электрических измерений, приведенных в работах [11, 14], подтверждают, что объем медной матрицы действительно оказывается более чистым, чем области, находящиеся вблизи границ Cu-Nb, где концентрация дефектов более велика и соответственно их роль в рассеянии падает при возникновении эффекта близости.

Можно также предположить, что при низких температурах происходит более существенный рост энергетической щели в нормальном металле, чем это предполагается в теории, так как в образце при оценке величины индуцируемой корреляционной длины ξ_N оказывается необходимым перейти от грязного предела к чистому, что конечно увеличивает значение щели в глубине слоя нормального металла – меди.

ВЫВОДЫ

Проведенные авторами экспериментальные исследования на примере композитного многоволоконного образца Cu-Nb показали, что эффект близости существенно влияет на затухание ультразвуковых волн в нормальном металле, который находится в близком контакте со сверхпроводником. Измерения затухания ультразвука представляются наиболее информативным методом для исследования систем сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник (S-N-S). Была проведена оценка длины свободного пробега электрона l в композите Cu-Nb, которая зависит от рассеяния электронов на дефектах как в объеме всего композита, так и на границе нормальный металл–сверхпроводник. Экспериментальные данные были сравнены с теоретическими

расчетами, сделанными для предела с большим рассеянием электронов.

ЛІТЕРАТУРА

1. P.G. de Gennes. *Superconductivity of Metals and Alloys*. 1966, Benjamin, New York; G.Deutscher and P.G. de Gennes. *Superconductivity*, Ed. by Parks R.D., N.Y., Marcel Dekker Inc., 1969, v.2, p.1005.
2. V.M. Krasnov, N.F. Pedersen, V.A. Oboznov and V.V. Ryazanov // *Phys. Rev. B*. 1994, v. 49, p. 12969.
3. I.Banerjee and I.K.Schuller // *J. Low Temp. Phys.* 1984, v.54, p.501.
4. V.M. Krasnov, A.E. Kovalev, V.A. Oboznov and V.V. Ryazanov // *Physica*. 1993, v.C 215, p.265.
5. V.M. Krasnov, N.F. Pedersen, and V.A. Oboznov // *Phys. Rev. B*. 1994, v.50, 1106; I. Sternfeld, V. Shelukhin, A. Tsukernik, M. Karpovski, A. Gerber, A. Palevski // *Phys. Rev. B*. 1994, v.71, p. 064515.
6. T. van Duser and C.W. Turner. *Principles of Superconductive Devices and Circuits*, 2 ed., Elsevier, N.Y. 1998.
7. Y. Oda and H. Nagano // *Solid State Comm.* 1980, v.35, p. 631.
8. J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer // *Phys. Rev.* 1957, v.108, 1175.
9. M.V. Kartsovnik, V.V. Ryazanov and V.V. Schmidt // *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1981, v.33, p. 373.
10. A.P. Volodin, G.Y. Logvenov, V.V. Ryazanov and Fal'kovskiy // *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1987, v.46, p. 40.
11. J. Bevk, J.P. Harbison and J.L. Bell // *J. Appl. Phys.* 1978, v.49, p. 6031.
12. R. Roberge and J.L. Fihey // *J. Appl. Phys.* 1978, v.50, p. 406.
13. V.I. Dotsenko, I.F. Kislyak, F.F. Lavrent'ev, V.T. Petrenko, Yu.A. Pokhil and M.A. Tikhonovskii // *Mekhanika Kompozitnykh Materialov*. 1988, v.1, p. 50.
14. K.R. Karasek and J. Bevk // *J. Appl. Phys.* 1981, v.52, p. 1370.
15. B.P. Strauss and R.M. Rosse // *J. Appl. Phys.* 1968, v.39, p. 1638.
16. J.K. Klein and R.M. Rose // *J. Appl. Phys.* 1987, v.61, p. 2212.
17. J.K. Klein and R.M. Rose // *J. Appl. Phys.* 1987, v.61, p. 2979.
18. G.N. Bishop // *J. Phys. F: Metal. Phys.* 1975, v.5, p. 278.
19. C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. J.Wiley and Sons Inc., N.Y., 4 ed., Chap.7.
20. B.N. Aleksandrov // *Sov. Phys. JETP*. 1963, v.16, p. 286
21. R. Simoneau and G. Begin // *J. Appl. Phys.* 1974, v.45, p. 3828.
22. O.P. Ledenyov and V.P. Fursa // *Fizika Nizk. Temp.* 1985, v.11, p. 57.
23. O.P. Ledenyov // *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1986, v.43, p. 330.
24. J.M. Perz and E.R. Dobbs // *Proc. Roy. Soc.* 1966, v.296A, p. 113.
25. R.E. MacFarlane, and J.A. Rayne // *Phys. Rev.* 1967, v.162, p. 532.
26. E.P. Papadakis. *Physical Acoustics: Principles and Methods*. Academic Press / Ed. by W.P. Mason, 1968, v. 6, part B, chapter 6.
27. G.A. Alers and Y.C. Liu // *Trans AIME*. 1966, v.236, p. 482.
28. A. Kueny, M. Grimsditch, K. Miyano, I. Banerjee, C.M. Falco, and I.K. Schuller // *Phys. Rev. Lett.* 1982, v.48, p.166.
29. J. Bardeen and J.R. Schrieffer. *Progress in Low-Temperature Physics* / Ed. by C.J. Gorter, North Holland Publishing Comp. 1961, v. III, chapter VI.
30. A.B. Pippard // *Rep. Progr. Phys.* 1960, v.23, p.176.
31. J.A. Rajne and C.K. Jones, *Physical Acoustics: Principles and Methods* / Ed. by W.P. Mason and R.N. Thurston, Academic Press, 1970, v. 7, chapter 3.
32. E.Y. Wang, R.J. Kolouch and K.A. McCarthy // *Phys. Rev.* 1968, v.175, p. 723 .
33. A.F. Andreev // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1964, v.46, p. 1823; *JETP*. 1964, v.19, p. 1228.
34. A.F. Andreev // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1967, v.53, p. 680 .
35. A.L. Fetter and P.C. Hohenberg. *Superconductivity* / Ed. Parks R.D., N.Y., Marcel Dekker Inc. 1969, v. 2, p.817.
36. V.K. Aksenov, N.F. Andrievskaya, O.I. Volchok, M.M. Oleksienko, Ya.D. Starodubov and M.A. Tikhonovskii // *Metallofizika*. 1991, v. 13, N 5, p. 24 .

УЛЬТРАЗВУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ МІДІ В Cu-Nb-КОМПОЗИТІ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.О. Леденьов, Д.О. Леденьов, О.П. Леденьов, М.А. Тихоновський

Методом поглинання ультразвуку при низьких температурах $T=0,35...2$ К досліджене виникнення надпровідності в мідній матриці в Cu-Nb-композитних зразках, обумовлене ефектом близькості (proximity effect). Мідь-ніобієві композитні зразки циліндричної форми були отримані в ході *in situ* процесу. Поздовжня ультразвукова хвиля частотою 30 МГц поширювалася уздовж осі циліндричних зразків. Було виявлено, що при $T < 2$ К зменшення температури приводить також до помітного зменшення поглинання поздовжнього ультразвуку, тоді як у чистих ніобії й міді воно не змінюється істотно при таких низьких температурах. Проведено розрахункові дослідження отриманих експериментальних результатів з використанням комп'ютерного моделювання в програмних пакетах Matlab й Mathematica. З результатів досліджень можна зробити висновок про існування в цій системі температурно-залежного ефекту близькості, що індукуює надпровідність у мідній матриці поблизу границі з ніобієм. Також спостерігаються залежні від температури андріївські розсіювання електронних збуджень на границі Cu-Nb (нормальний метал-надпровідник), що позначається на виді залежності поглинання ультразвуку від температури. Проведено оцінку індукованих в умовах даного експерименту надпровідних параметрів міді.

ULTRASONIC INVESTIGATION OF SUPERCONDUCTIVITY OF COPPER IN Cu-Nb COMPOSITE AT LOW TEMPERATURES

V.O. Ledenyov, D.O. Ledenyov, O.P. Ledenyov, M.A. Tikhonovskiy

The nature of superconductivity in copper matrix in Cu-Nb composite samples, caused by the proximity effect, is researched by the method of ultrasound absorption in Cu-Nb composite samples at low temperatures $T=0,35...2\text{K}$. The Copper - Niobium composite samples of cylindrical form were prepared using the *in-situ* process. The longitudinal ultrasonic wave with 30 MHz frequency was propagating along the axis of cylindrical samples. It was revealed that the decrease of temperature reduces also in the noticeable decrease of absorption of longitudinal ultrasonic wave at $T < 2$, whereas it does not vary so strongly in the pure niobium and copper at such low temperatures. The computing researches of obtained experimental results were performed with the use of computer modeling and simulation in the Matlab and Mathematica software programs. From the results of given investigation, it is possible to make a conclusion about the existence of the temperature dependent proximity effect, which induces the superconductivity in copper matrix near to the interface with niobium. The temperature-dependent Andreev scattering of electronic excitations at Cu-Nb (normal metal-superconductor) boundary is also observed, which has an effect on a sort of dependence of the absorption of ultrasonic wave in Cu-Nb composite samples from the temperature. The estimation of induced superconducting parameters of copper in conditions of given experiment is completed.