

УДК 538.7

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-1-106-110

**ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КИНЕТИЧЕСКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ**

© К.В. Шейн, К.Ю. Арутюнов, В.В. Завьялов

Исследовались тонкие сверхпроводящие полоски в форме плотноупакованных меандров, изготовленных из ультратонких сверхпроводящих полосок нитрида ниобия (NbN) шириной примерно 100 нм, толщиной 5 нм и длиной до 100 мкм. В структурах был обнаружен эффект большой кинетической индуктивности при температурах ниже критической. Изучалась зависимость резонансной частоты LC-контура от температуры, где в качестве индуктивности L был использован сверхпроводящий меандр с большой кинетической индуктивностью, а емкости C – чип-конденсатор. Экспериментальные данные указывают на то, что кинетическая индуктивность зависит от температуры, так как наблюдался сдвиг резонансной частоты при температурах ниже критической относительно нормального состояния, что указывает на то, что в таких системах меняется импеданс за счет возрастания кинетической индуктивности при переходе в сверхпроводящее состояние. Данный эффект имеет значение как в прикладных, так и в фундаментальных исследованиях. При использовании различных сверхпроводящих детекторов кинетическая индуктивность может заметно влиять на их быстродействие. В фундаментальных разработках, где требуется on-chip реализация стабилизации заряда (тока), большой импеданс подводящих цепей по высокой частоте – крайне полезное явление.

Ключевые слова: сверхпроводимость, тонкие пленки, кинетическая индуктивность, высокий импеданс.

Введение. В последние пятьдесят лет в мире наблюдалось бурное развитие микроэлектроники, описываемое законом Мура: число транзисторов в интегральных схемах удваивается каждые 18 месяцев, что введет к уменьшению размеров электронной техники и увеличению производительной мощности. Последние исследования показали, что закон Мура перестает работать, так как в электронных компонентах, размеры которых порядка десяти нанометров, важную роль начинают играть различные квантовые явления, которые накладывают ограничения на дальнейшую миниатюризацию данных компонентов. Соответственно, становится актуальна разработка элементной базы, которая могла бы работать на таких масштабах.

Наряду с фундаментальными причинами, ограничивающими миниатюризацию, присутствует еще и чисто техническая – невозможность эффективного отвода тепла, рассеиваемого в единице объема (площади) интегральной схемы сверхмалых размеров. Решением данной

проблемы может быть переход от обычных проводников электрического тока к сверхпроводникам. Однако значительная часть современной электроники работает на высоких частотах порядка нескольких ГГц, а, как известно, на конечных частотах импеданс сверхпроводника отличается от нулевого, что может быть объяснено наличием так называемой кинетической индуктивности. Данный эффект ограничивает быстродействие сверхпроводящих элементов в нанoeлектронных устройствах, например таких, как квантовые логические элементы – кубиты. Помимо логических, есть ряд других нанoeлектронных устройств, где вклад кинетической индуктивности принципиален, например, в сверхпроводящих болометрах [1] или в однофотонных детекторах [2].

Из сказанного следует, что явление кинетической индуктивности интересно для прикладных и фундаментальных исследований. Целью настоящей работы является исследование эффекта кинетической индуктивности в тонких

ШЕИН Кирилл Вячеславович, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», e-mail: sheinkv97@gmail.com

АРУТЮНОВ Константин Юрьевич – д.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, e-mail: karutyunov@hse.ru

ЗАВЬЯЛОВ Виталий Вадимович – к.ф.-м.н., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, e-mail: vzavyalov@hse.ru

сверхпроводящих каналах из NbN: материала, широко используемого для изготовления различных криоэлектронных устройств, как, например, однофотонные детекторы [3].

Теоретическая часть. Вместе со всем известной магнитной индуктивностью L_m , любой проводник электрического тока также имеет так называемую кинетическую индуктивность L_K . В отличие от L_m , кинетическая индуктивность L_K возникает не из-за запасенной магнитной энергии, а из-за сохраненной энергии движения носителей заряда. Кинетическая индуктивность прямо пропорциональна длине проводника и обратно пропорциональна площади поперечного сечения, из чего следует, что в довольно компактных системах с характерными размерами порядка микрометра можно получить структуру с большим значениям индуктивности. Важно заметить, что кинетическая индуктивность – не чисто квантовый эффект и может проявиться и в обычных (несверхпроводящих) металлах, но – на достаточно высоких частотах. Все дело в том, что электроны обладают конечной массой и, соответственно, им нужно некоторое время, чтобы изменить направление своего движения. Этот эффект, часто называемый инерцией тока или инерцией заряда, ответственен за кинетическую индуктивность. В несверхпроводящих объектах резистивная составляющая доминирует над кинетической индуктивностью, так как в таких структурах происходит диссипация энергии при движении носителей зарядов.

Однако в системах, обладающих сверхпроводящими свойствами при температуре ниже критической T_c , резистивная часть импеданса становится равной нулю и преобладает активная составляющая за счет конечной (кинетической) индуктивности.

В рамках модели Гинзбурга–Ландау, рассматривающей сверхпроводящий переход как фазовый переход второго рода, описываемый параметром порядка Δ , можно вывести формулу для кинетической индуктивности:

$$L_K = \left(\frac{m}{2e^2}\right) \left(\frac{1}{wd}\right) \left(\frac{1}{n_s(0)\left(1-\frac{T}{T_c}\right)}\right) = L_K(0) \frac{1}{\left(1-\frac{T}{T_c}\right)} \quad (1)$$

где m – масса электрона, e – его заряд, l , w и d – длина, ширина и толщина сверхпроводящего канала, $n_s(0)$ и $L_K(0)$ – концентрация сверхпроводящих электронов и кинетическая индуктивность при нулевой температуре $T=0$. Приближение, в рамках которых получено выражение

(1), работает только для температур близких к T_c и при токе смещения $I \rightarrow 0$. Исходя из формулы (1), получим выражение для $L_K(0)$:

$$L_K(0) = \left(\frac{m}{2e^2}\right) \left(\frac{1}{wdn_s(0)}\right). \quad (2)$$

Концентрация сверхпроводящих электронов $n_s(T)$ зависит от температуры и описывается хорошо известной формулой

$$n_s(T) = n_s(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right). \quad (3)$$

Учитывая, что при $T \rightarrow 0$ концентрация сверхпроводящих электронов стремится к значению концентрации носителей заряда в нормальном состоянии, величину $n_s(0)$ можно принять равной n , где n – концентрация электронов при комнатной температуре.

Концентрация сверхпроводящих носителей заряда n_s также зависит и от тока I , и эту зависимость можно выразить через градиент фазы вдоль длины (k) и сверхпроводящую длину когерентности (ξ). Соответственно, выражение для кинетической индуктивности может быть записано как [5]:

$$L_K(k\xi) = L_K(0) \frac{1}{\left(1 - 3k^2\xi^2\right)}. \quad (4)$$

Основываясь на микроскопической теории сверхпроводимости Бардина, Купера, Шриффера (БКШ) и соотношении (3), можно вывести следующую зависимость [4]:

$$L_K = \frac{1}{w} \frac{R_{\square}}{2\pi\Delta(T)} \frac{1}{\tanh\left(\frac{\Delta(T)}{2k_b T}\right)}, \quad (5)$$

где R_{\square} – сопротивление на квадрат в несверхпроводящем состоянии. При $T \ll T_c$: $\Delta(T) \approx \Delta(0) = 1.76 kT_c$.

Из вышеизложенных фактов можно понять, что есть несколько основных параметров, которые влияют на величину кинетической индуктивности: сопротивление в нормальном состоянии R_n , величина энергетической щели Δ и критическая температура T_c . В качестве материала для изготовления микроструктур был выбран нитрид ниобия NbN, который имеет высокое сопротивление в нормальном состоянии, и критическую температуру, позволяющую работать при температуре кипящего гелия прямо в транспортном Дьюаре.

Методика измерений. В данной работе при различных температурах исследовались транспортные характеристики меандров из NbN с толщиной $d=5$ нм, шириной $w \approx 100$ нм и дли-

ной l до 100 мкм по 4-точечной схеме подключения [6]. Температура образца в каждый момент времени измерялась датчиком на основе RuO_2 , выполненным в виде чип-резистора (Cinetech RMC – 18).

Для измерения АЧХ (амплитудно-частотных характеристик) был использован Vector Network Analyzer (VNA: miniVna pro). Данный прибор может работать в двух режимах: отраженной мощности Return loss(R_i) и прошедшей мощности Transmission loss(T_i). Соответствующие коэффициенты рассчитываются для стоячих волн следующим образом.

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_s}{Z_l + Z_s} \quad (6)$$

$$R_i(\text{dB}) = -20 \log_{10} |\Gamma|, \quad (7)$$

где Γ – коэффициент отражения, Z_l – импеданс нагрузки, Z_s – импеданс источника.

Основной экспериментальной задачей данной работы является определение кинетической индуктивности исследуемых образцов при различных температурах и частотах пробного сигнала.

Как известно, колебательный контур, состоящий из емкости и индуктивности, обладает резонансной частотой. С учетом сверхпроводящего состояния изучаемой системы будем считать, что наш контур имеет чисто активное сопротивление. Резонансную частоту можно найти по формуле Томсона:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8)$$

Соответственно, для определения индуктивной составляющей был изготовлен резонансный контур из неизвестной (кинетической) индуктивности и конденсатора с известной величиной емкости, которая сохраняет свое значение в широком температурном диапазоне. В качестве такого элемента использовался керамический конденсатор с номиналом 50 пФ, и в отдельном эксперименте было показано, что эта величина практически не меняется при охлаждении до криогенных температур.

В общем виде эквивалентная схема представлена на рис. 1.

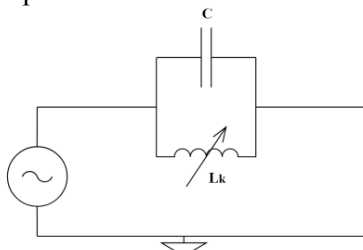


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема

Из выражения (8) следует, что экспериментально можно найти значения индуктивности, зная резонансную частоту контура и значение емкости:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_{res}^2 C}, \quad (9)$$

что и делалось в эксперименте.

Результаты измерений. Зависимости сопротивления от температуры для всех исследованных структур продемонстрировали сверхпроводящий переход в области температуры $T_c \approx 6.5$ К (рис. 2). Значение нормального сопротивления R_n и критической температуры T_c в дальнейшем будет использовано в расчетах величины кинетической индуктивности.

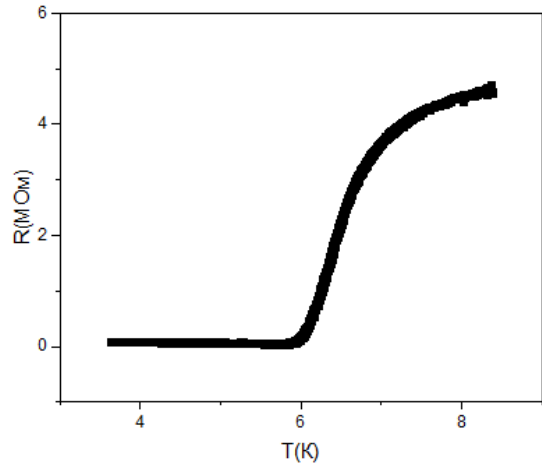


Рис. 2. Типичная зависимость сопротивления от температуры тонкопленочного образца из NbN

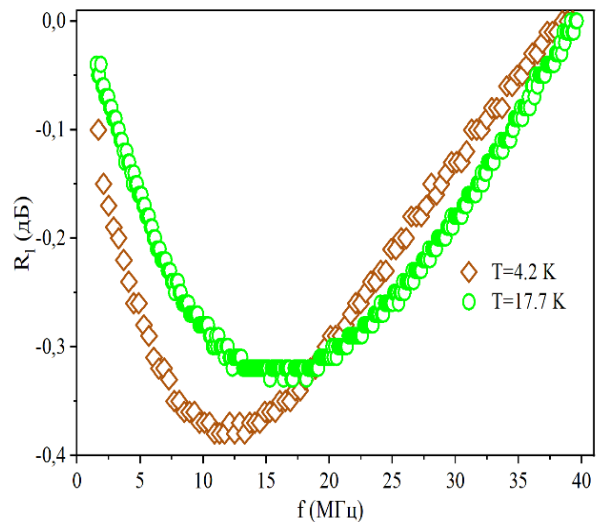


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения $R_i(\text{dB})$ от частоты f при различных значениях температуры

Также измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Измерения проводились с помощью метода, описанного в работе [6], с помощью VNA. Зависимости коэффициента поглощения R_l от частоты f при двух температурах $T_1=17.7$ К и $T_2=4.2$ К, выше и ниже критической, приведены на рис. 3. Наблюдаются два резонансных «провала» на $f_{\text{res}}=12$ МГц и на $f_{\text{res}}=17.5$ МГц при температурах 4.2 К и 17.7 К соответственно. Сдвиг резонансной частоты может быть объяснен вкладом кинетической индуктивности, существенно увеличивающейся при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние.

Используя выражение (8), можно оценить величину кинетической индуктивности, которая для типичных структур, исследованных в настоящей работе, в сверхпроводящем состоянии при температуре $T=4.2$ К, составила $L_K \approx 3.2$ мкГн.

Заключение. В работе представлен простой метод измерения АЧХ сверхпроводящих микроструктур: тонких меандров из NbN . В эксперименте отчетливо наблюдается сдвиг резонансной частоты при измерениях зависимости $R_l(f)$ при температурах выше и ниже критической. Эффект может быть объяснен увеличением общей индуктивности системы за счет того, что вклад ее кинетической составляющей возрастает при переходе в сверхпроводящее состояние. Результаты работы представляют интерес при проектировании широкого класса криоэлектронных микро- и наноустройств, использующих сверхпроводящие компоненты.

Работа выполнена при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Корнеевой и Е.О. Смирнову за предоставление микроструктур из тонких пленок нитрида ниобия.

Литература

1. Sauvageau J.E., McDonald D.G. Superconducting kinetic inductance bolometer // IEEE Transactions on Magnetics. 1989. V. 25, № 2. P. 1331–1334.
2. Day P.K., Leduc H.G., Mazin B.A., Vayonakis A., Zmuidzinas J. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays // Nature. 2003. V. 425. P. 817–821.
3. Korneeva Y., Vodolazov D.Y., Semenov A.V., Florya I., Simonov N., Baeva E., Korneev A., Goltsman G., Klapwijk T.M. Optical single-photon detection in micrometer-scale NbN bridges // Physical Review Applied. 2018. Vol. 9, № 6. P. 1–13.
4. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. К теории сверхпроводимости // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. С. 1064.
5. Tinkham M. Introduction to superconductivity. Second edition. New York, McGraw-Hill, 1996. 454 с.
6. Zavyalov V.V., Chernyaev S.A., Shein K.V., Shukaleva A.G., Arutyunov K.Yu. Examination of cryogenic filters for a multistage RF filtering system required for ultralow temperature experiments, Journal of Physics. Conference Series. 2018. V. 969. P. 012086.

References

1. Sauvageau J.E., McDonald D.G. Superconducting kinetic inductance bolometer. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 1331–1334.
2. Day P.K., Leduc H.G., Mazin B.A., Vayonakis A., Zmuidzinas J. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays. Nature, 2003, vol. 425, pp. 817–821.
3. Korneeva Y., Vodolazov D.Y., Semenov A.V., Florya I., Simonov N., Baeva E., Korneev A., Goltsman G., Klapwijk T.M. Optical single-photon detection in micrometer-scale NbN bridges. Physical Review Applied, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 1–13.
4. Ginzburg V.L., Landau L.D. On the theory of superconductivity. Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki, 1950, vol. 20, p. 1064.
5. Tinkham M. Introduction to superconductivity. Second edition. New York, McGraw-Hill, 1996. 454 p.
6. Zavyalov V.V., Chernyaev S.A., Shein K.V., Shukaleva A.G., Arutyunov K.Yu. Examination of cryogenic filters for a multistage RF filtering system required for ultralow temperature experiments, Journal of Physics. Conference Series, 2018, vol. 969, p. 012086.



**MEASURING AMPLITUDE AND FREQUENCY CHARACTERISTICS
OF KINETIC INDUCTANCE IN SUPERCONDUCTING FILMS**

© **K.V. Shein¹, K.Yu. Arutyunov^{1,2}, V.V. Zavialov^{1,2}**

¹ National Research University "Higher School of Economics",
20, ulitsa Myasnitskaya, 101000, Moscow, Russian Federation

² Kapitsa Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences,
2, str. 2, ulitsa Kosygina, 119334, Moscow, Russian Federation

This research was performed using thin superconducting strips in the shape of tightly packed meanders made of niobium nitride (NbN) ultrathin superconducting strips about 100 nm wide, 5 nm thick and up to 100 μm long. The structures revealed the effect of high kinetic inductance at temperatures lower than the critical temperature. Consideration was given to the temperature dependence of LC-circuit resonant frequency where a highly-inductive superconducting meander was used as a source of L inductance and a chip capacitor as a source of C capacitance. Experimental data point to the fact that kinetic inductance depends on temperature, since there was a shift in the resonant frequency at temperatures lower than the critical one relative to the normal state. This is indicative to the fact that in such systems impedance is changed due to growing kinetic inductance during the transition to the superconducting state. This effect is of relevance both in applied and basic research. When using different superconducting detectors, kinetic inductance can exert a distinct effect on their response rate. In basic research developments, where the on-chip implementation of charge (current) stabilization is required, high frequency impedance of connecting circuits is very useful.

Key words: superconductivity, thin films, kinetic inductance, high impedance.