УДК 537.311.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ ЛИНИЙ

О. Г. Вендик, А. Я. Зайончковский, С. Г. Колесов, О. В. Пахомов, А. С. Рубан

Приведены экспериментальные зависимости поверхностного сопротивления тонких пленок ниобия и нитрида ниобия от температуры на частоте 7.5 ГГц. Исследованы особенности затухания СВЧ сигнала в копланарных линиях передачи, выполненных на основе этих пленок, при переводе центрального проводника линии из сверхпроводящего состояния в нормальное импульсами транспортного тока. Установлено определяющее влияние теплофизических параметров системы пленка—подложка на температурную зависимость тока удержания нормального состояния.

Использование сверхпроводниковых пленок в СВЧ микроэлектронике делает возможным создание линий передачи с малыми потерями и открывает перспективы создания переключаемых СВЧ элементов (модуляторы, коммутаторы, переключатели и т. п.), принцип действия которых основан на переключении пленки из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно [1, 2]. Теоретические исследования частотных и температурных зависимостей поверхностного сопротивления тонких ниобиевых пленок и параметров микрополосковой линии, выполненной на их основе, приведены в работе [3].

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований особенностей затухания СВЧ сигнала в копланарных линиях передачи, выполненных из сверхпроводниковых пленок ниобия и нитрида ниобия, в сверхпроводящем состоянии и при переводе транспортным током центрального проводника линии из сверхпроводящего состояния в нормальное.

Методика и результаты эксперимента

Методика эксперимента аналогична описанной в [4] и состояла в исследовании временных зависимостей затухания СВЧ сигнала отрезка сверхпроводниковой копланарной линии передачи при пропускании по центральному проводнику линии импульсов тока. Одновременно исследовались временные зависимости падения напряжения на центральном проводнике линии и тока, протекающего по нему.

Центральный проводник и экраны исследуемых копланарных линий формировались при помощи фотолитографии из пленок ниобия и нитрида ниобия, нанесенных на подложки из сапфира или ситалла методами электронно-лучевого осаждения или катодного распыления. Волновое сопротивление линии 50 Ом. В средней части линии на длине $l_0=2\div10$ мм ширина центрального проводника w постоянна и для разных образцов составляла 10—30 мкм. По обе стороны от этого участка линии ширина центрального проводника и зазоры между ним и экранами плавно увеличивались, что позволяло обеспечить широкополосное согласование копланарной линии с коаксиальным измерительным трактом посредством стандартных переходов. Параметры исследованных об-

Номер образца	Подложка		Центральный проводник								
	Материал	H, мм	Материал	h, нм	w, мкм	l_0, мм	T_C, К	$\Delta T_н = T_N - T_C$, К	$R^{\square}_N$, Ом	A, Вт·м$^{-2}$×К$^{-4}$
1	Сапфир	1	Nb	50	20	10	6.8	0.4	3.9	380
2	Поликор	1	Nb	200	25	7.5	7.5	1.5	0.45	356
3	Ситалл	1	Nb	150	10	10	6.7	0.5	1.2	—
4	Сапфир	1	NbN	100	20	3	10.4	1.8	306	520
5	Сапфир	1	NbN	170	30	2	12.2	1.3	139	480

разцов приведены в таблице. (Номера кривых на всех рисунках соответствуют номеру образца в таблице).

СВЧ измерения осуществлялись «на проход». Мощность непрерывного СВЧ сигнала частотой 7.5 ГГц, подводимого к входу копланарной линии, не превышала 10^{-5} Вт. Огибающая прошедшего через линию СВЧ сигнала наблюдалась на экране двухканального осциллоскопа С1-75. Измерения затухания проводились с помощью калиброванного СВЧ аттенюатора.

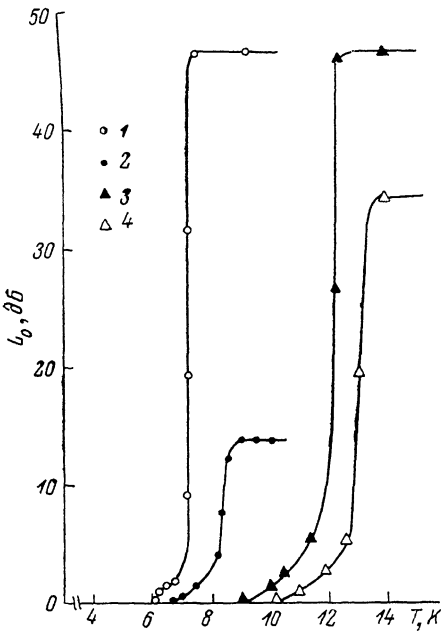

Рис. 1.

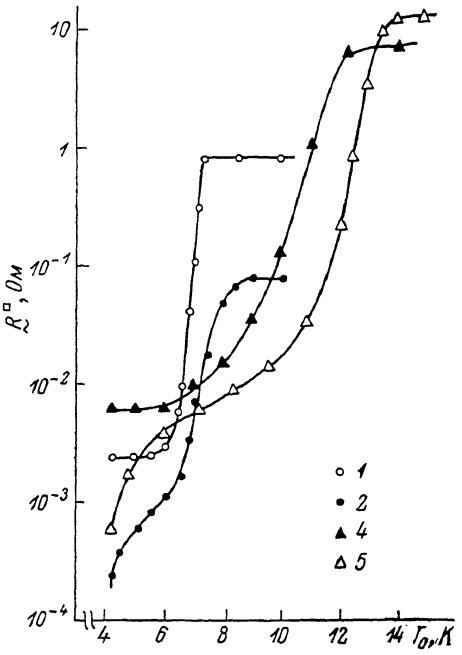

Рис. 2.

Импульсы тока длительностью $\tau_и$ от $3\cdot10^{-9}$ до $5\cdot10^{-3}$ с подавались на центральный проводник исследуемой линии через фильтр нижних частот от генератора с внутренним сопротивлением $R_г$=50 Ом. Период следования импульсов регулировался в пределах $T_и=10^{-3}\div1$ с. Форма импульса тока, протекающего через центральный проводник, или падения напряжения на нем наблюдались на экране осциллоскопа одновременно с огибающей СВЧ сигнала. Сигнал, соответствующий импульсу тока, снимался с эталонного резистора $R_э$=1 Ом, включенного последовательно с центральным проводником линии в цепь генератора импульсов. Минимальные значения измеряемых амплитуд импульсов напряжения и тока составляли 10^{-3} В и 10^{-4} А.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости затухания СВЧ сигнала L_0 в исследованных линиях на длине l_0 от температуры в отсутствие транспортного тока через центральный проводник. При $T_0 \geqslant T_N$ затухание в линиях максимально и не зависит от температуры. В области сверхпроводящего перехода затухание резко уменьшается при понижении температуры,

при $T_0/T_C \leqslant 0.85$ для всех исследованных линий составляло 0.1—0.2 дБ и оставалось постоянным при дальнейшем понижении температуры термостата вплоть до 4.2 К, что связано, по-видимому, с потерями на согласовании исследуемых линий с измерительным трактом. Затухание в линиях при $T_0/T_C \leqslant 0.85$ может быть рассчитано по значениям поверхностного сопротивления пленок на рабочей частоте $R^{\square}$, определенных по резонансным измерениям. С этой целью из пленок, полученных в единых технологических циклах с исследуемыми образцами, с помощью фотолитографии формировались полуволновые несим-

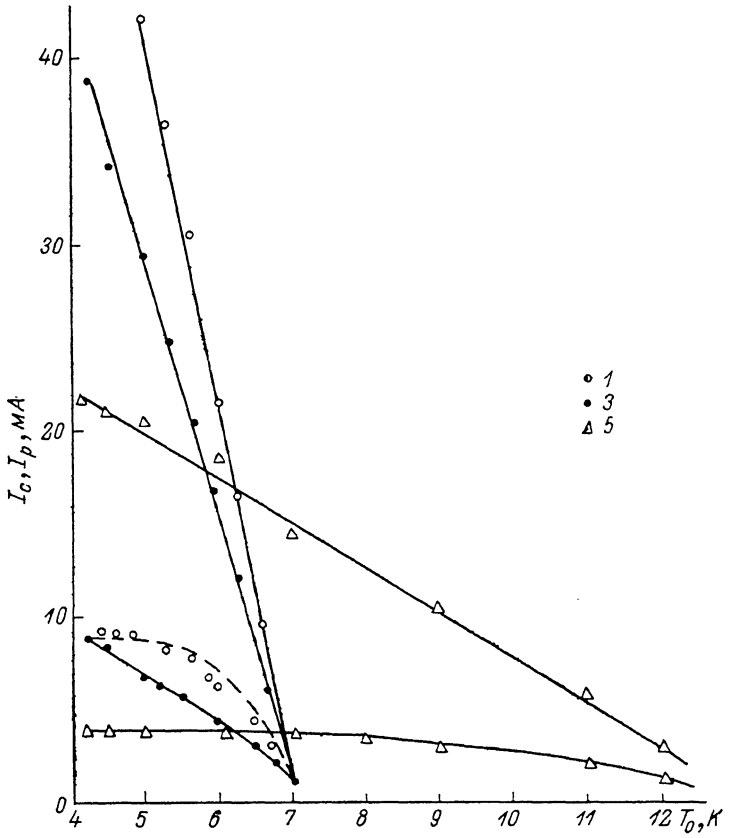

Рис. 3.

метричные микрополосковые резонаторы с шириной полоска 1 мм и длиной резонансного отрезка 7.1 мм. По измеренным значениям добротности резонаторов рассчитывалась активная составляющая поверхностного импеданса $R^{\square}$ исследуемых пленок. На рис. 2 представлены зависимости $R^{\square}$ от температуры. $R^{\square}$ при $T_0/T_C \leqslant 0.85$ определялось из резонансных измерений, а при $T_0/T_C > 0.85$ рассчитывалось по измеренным значениям затухания (рис. 1).

При температурах термостата 4.2 К $\leqslant T_0 \leqslant 0.85\ T_C$ через центральный проводник пропускался транспортный ток. При амплитуде импульсов тока I_m, равной критическому току I_C, часть центрального проводника переходила в нормальное состояние и устанавливались новые значения транспортного тока, затухания и сопротивления постоянному току. Характерное время установления τ_y зависело от I_m и при изменении I_m/I_C от 1 до 10 уменьшалось от 10^{-4} до 10^{-9} с [4]. Установившееся значение транспортного тока I_p для данного образца при заданной температуре T_0 оставалось постоянным во всем диапазоне изменения I_m/I_C.

На рис. 3 представлены зависимости I_C и I_p от температуры термостата. Видно, что для образцов на сапфире I_p не зависит от температуры при $T_0/T_C < 0.8$, а для образца на ситалле I_p увеличивается при уменьшении темпера-

туры вплоть до 4.2 К ($T_0/T_C=0.6$). На рис. 4 представлены зависимости установившегося значения затухания L от отношения I_m/I_p (*а*) и от мощности, рассеиваемой в нормальнопроводящей области P (*б*), при $T_0/T_C=0.8$. По ме-

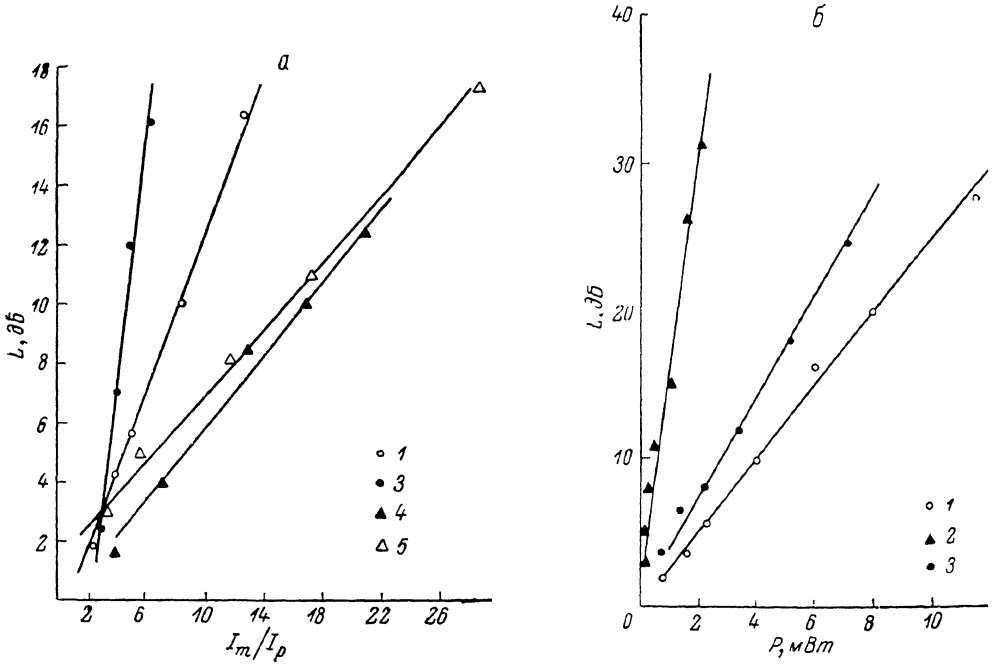

Рис. 4.

тодике, описанной в [4], экспериментально определялось время восстановления сверхпроводящего состояния $\tau_в$ после окончания импульса тока. Оно равнялось длительности импульса тока при изменении $\tau_и$ от $3\cdot10^{-9}$ до 10^{-7} с для образцов на подложках из сапфира и от $3\cdot10^{-9}$ до $3\cdot10^{-3}$ с для образцов на подложках из ситалла и оставалось неизменным при дальнейшем увеличении $\tau_и$.

Обсуждение результатов экспериментов

Экспериментальные зависимости поверхностного сопротивления пленок ниобия от температуры хорошо количественно согласуются с данными теоретической работы [3], полученными для пленок ниобия толщиной 30—90 нм на частоте 10 ГГц.

Для образцов из пленок ниобия различной толщины (образцы № 1, 2) получены существенно различные зависимости поверхностного сопротивления на СВЧ $R^{\square}$ от температуры при $T_0/T_C \leqslant 0.85$ (рис. 2). Аналогичные различия были обнаружены и для образцов из пленок нитрида ниобия (образцы № 4, 5). Независимость $R^{\square}$ от температуры для образцов № 1 и 4 связана, по-видимому, с остаточным сопротивлением, обусловленным рассеянием на дефектах.

Затухание СВЧ сигнала в исследованных линиях, рассчитанное по значениям $R^{\square}$ при температурах $4.2\ \text{К} \leqslant T_0 \leqslant 0.85\ T_C$, составило 0.1 дБ для образцов № 1, 4, уменьшаясь от 0.1 до 0.02 дБ для образцов № 2, 5.

Экспериментально установлено, что в нормальном состоянии при температуре на несколько градусов выше критической значения поверхностного сопротивления на СВЧ $R^{\square}$ и на постоянном токе $R^{\square}$ существенно различаются (см. таблицу и рис. 2). Это может быть связано с особенностями структуры пленок, из которых выполнены исследованные образцы. Обнаруженное отличие наиболее значительно для образцов из нитрида ниобия, для которых характерна гранулированная столбчатая структура [5].

Экспериментальные результаты, связанные с исследованием затухания СВЧ сигнала в копланарных линиях при пропускании через центральный про-

водник линии транспортного тока, позволяют установить некоторые особенности разрушения сверхпроводящего состояния в широких ($w > \lambda_\perp$) пленках.

При токе $I=I_C$ по всей ширине центрального проводника образуется нормальная поперечная полоска. Линейный характер зависимости I_C от температуры для образцов из ниобия и нитрида ниобия (рис. 3) свидетельствует о неоднородности распределения тока по поперечному сечению пленки [6]. Численные оценки для неоднородного тока распаривания $I_C^{\text{неодн}}$ показывают, что для исследованных образцов $I_C^{\text{неодн}}=(5-10)\,I_C$. Поэтому образование нормальной поперечной полоски при $I_m=(5-10)\,I_C$ может быть обусловлено вхождением вихрей с краев пленки и их движением под действием транспортного тока, что сопровождается нагревом пленки вдоль траектории движения вихрей [7] или развитием вихревой неустойчивости [8, 9]. Джоулева мощность, рассеиваемая в нормальной полоске, приводит к увеличению ее размеров до установившегося значения за счет разогрева. При этом установившееся значение затухания L в линии определяется длиной нормальнопроводящего участка l, образовавшегося в центральном проводнике линии под действием начального тока I_m (рис. 4, *а*). Длина нормальнопроводящей области l, образовавшейся в центральном проводнике под действием транспортного тока, определялась по установившемуся значению сопротивления R

$$l = Rw/\underline{R}_N^{\square},$$

где $\underline{R}_N^0$ — поверхностное сопротивление пленки в нормальном состоянии на постоянном токе. Наличие разогрева нормальнопроводящего участка подтверждается зависимостями L от мощности, рассеиваемой в этом участке (рис. 4, *б*).

После окончания импульса тока разогретый участок центрального проводника остывает до исходной температуры за счет теплообмена с подложкой. Это подтверждается сильной зависимостью постоянной времени восстановления сверхпроводящего состояния $\tau_в$ от теплопроводности подложки при длительности импульса тока $\tau_и$ больше постоянной времени нагревания подложки. В экспериментах нами исследовались образцы на подложках с существенно различной теплопроводностью — на сапфире и ситалле. Для сапфира коэффициент теплопроводности $\varkappa=200$ Вт/м·К при $T=5$ К [10]. Коэффициент теплопроводности ситалла из-за отсутствия в справочной литературе экспериментальных результатов принимался, для оценок, ~ 0.1 Вт/м·К (по теплопроводности плавленого кварца при $T=5$ К). Численные оценки для времени остывания подложек толщиной 1 мм из сапфира и ситалла, сделанные по тепловой модели [11], дают значения 10^{-7} и $3\cdot10^{-3}$ с соответственно, что согласуется с экспериментальными значениями $\tau_в$ и свидетельствует о правильности принятого значения $\varkappa$ для ситалла.

Для сравнения мощностей, необходимых для удержания в нормальном состоянии центрального проводника исследованных линий, использовался параметр q_T, определяемый следующим образом:

$$q_T = I_p^2 \underline{R}_N^{\square}/w^2\,(T_C - T_0).$$

Величина q_T характеризует плотность мощности, отводимой в термостат с температурой T_0 от центрального проводника, разогретого до температуры T_C током I_p. Значения q_T для образцов на сапфире и ситалле, несмотря на существенное отличие коэффициентов теплопроводности, одного порядка ($3\cdot10^5$ и $9\cdot10^4$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ соответственно), что дает основание предполагать, что теплоотвод от пленки определяется термическим сопротивлением границы пленка—подложка.

В работе [12] показано, что при образовании под действием тока нормальной области в сверхпроводящей пленке установившееся значение тока может быть рассчитано из выражения

$$I_p = \left[\frac{2\alpha_T w^2}{\underline{R}_N^{\square}}\,(T_{\text{гр}} - T_0)\right]^{1/2}, \qquad (1)$$

где α_T — термическая проводимость единицы площади структуры пленка—подложка, а $T_{\text{гр}}$ — температура на границах нормальной области. В [12] пред-

полагалось, что α_T не зависит от температуры, а $T_{гр}=T_C$. Экспериментальная зависимость $I_p(T_0)$ для образца на ситалле (рис. 3, *3*) описывается выражением (1) во всем диапазоне изменения T_0/T_C. Это означает, что α_T в данном случае определяется теплопроводностью материала подложки и практически не зависит от температуры в исследованной области.

Экспериментальные зависимости $I_p(T_0)$ для пленок на сапфире, приведенные в [13, 14] и в настоящей работе, могут быть описаны выражением (1) лишь при $T_0/T_C > 0.8$. Выражение для I_p во всем диапазоне изменения T_0/T_C может быть получено, если учесть, что теплоотвод от пленки в этом случае определяется контактным термическим сопротивлением, следовательно $\alpha_T=AT_0^3$ [15], где A — коэффициент, не зависящий от температуры, а температура на границах нормальной области $T_{гр}$ меньше T_C и является функцией тока I_p, т. е. $T_{гр}=T_C-kI_p$. Экспериментально коэффициент k может быть определен по наклону зависимости $I_C(T_0)$ (рис. 3). Тогда, используя выражение (1), получим

$$I_p=[B(T_C-T_0)-B^{3/2}k(T_C-T_0)^{1/2}]^{1/2}, \qquad (2)$$

где

$$B=2\frac{AT_0^3}{R_N^{\square}}w^2.$$

Значения коэффициента A, полученные из соотношения (2) по измеренным значениям I_p и $R_N^{\square}$, представлены в таблице. На рис. 3, *1* штрихом представлена расчетная зависимость I_p от температуры, полученная из (2), которая хорошо согласуется с результатами эксперимента. Таким образом, благодаря учету зависимости $\alpha_T(T_0)$ и зависимости $T_{гр}(I_p)$ получено выражение для I_p во всем исследованном диапазоне изменения температуры.

Авторы благодарны В. А. Сухову, С. Г. Карабашеву и В. В. Лановенко за изготовление пленок нитрида ниобия и ниобия.

Литература

[1] *Вендик О. Г., Козырев А. Б.* Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1983, т. 26, № 10, с. 18—28.
[2] *Кошелец В. П., Овсянников Г. А.* Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 6, с. 31—50.
[3] *Вендик О. Г., Козырев А. Б., Попов А. Ю., Бельски М.* ЖТФ, 1986, т. 56, № 1, с. 173—177.
[4] *Вендик О. Г., Зайончковский А. Я., Колесов С. Г.* и др. ФНТ, 1986, т. 12, № 6, с. 576—583.
[5] *Антонова Е. А., Сухов В. А.* ФНТ, 1981, т. 7, № 8, с. 1002—1009.
[6] *Ларкин А. И., Овчинников Ю. Н.* ЖЭТФ, 1971, т. 61, № 3, с. 1221—1230.
[7] *Иванченко Ю. М., Михеенко П. Н., Хирный В. Ф.* ЖЭТФ, 1981, т. 80, № 1, с. 171—182.
[8] *Ларкин А. И., Овчинников Ю. Н.* ЖЭТФ, 1975, т. 68, № 5, с. 1915—1927.
[9] *Волоцкая В. Г., Дмитренко И. М., Сиваков А. Г.* ФНТ, 1984, т. 10, № 4, с. 347—357.
[10] *Кожевников И. Г., Новицкий Л. А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.
[11] *Мибрян Р. Г., Носов Ю. Р.* В сб.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Федотова Я. А. М.: Сов. радио, 1972, в. 26, с. 144—155.
[12] *Skocpol W. J., Beasley M. R., Tinkham M.* J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 9, p. 4054—4066.
[13] *Dharmadurai G., Chopra V. C.* Phys. Stat. Sol. (a), 1981, v. 67, N 2, p. 677—681.
[14] *Dharmadurai G.* Phys. Stat. Sol. (a), 1980, v. 62, N 11, p. 11—33.
[15] *Baer X.* Phys. Kondens. Materie, 1968, v. 8, N 1, p. 1—30.

Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию 20 июня 1986 г.