

Нелинейный СВЧ отклик сверхпроводящей YBa₂Cu₃O_{7-δ} микрополосковой линии с сужением

А.А. Каленюк

Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова, бульв. Акад. Вернадского, 36, г. Киев, 03142, Украина
E-mail: kalenyuk@imp.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 8 июля 2008 г.

Проведены экспериментальные исследования потерь СВЧ мощности $IL(P_{in})$, вносимых сверхпроводящей пленочной YBa₂Cu₃O_{7-δ} микрополосковой линией с сужением, в интервале температур 78–90 К. При протекании СВЧ тока с амплитудой большей, чем критическое значение $I_{c(rf)}$, в линии возникали потери, которые стремительно нарастали с увеличением вводимой СВЧ мощности. При увеличении и последующем уменьшении СВЧ мощности обнаружен гистерезис функции $IL(P_{in})$. Проведенный расчет показал, что потери в линии связаны с образованием в области сужения резистивных поперечных доменов, температура которых выше критической. Показано, что небольшое сужение микрополосковой линии из пленки ВТСП можно рассматривать как сосредоточенный нелинейный резистивный элемент, на базе которого возможно создание ограничителя СВЧ мощности.

Проведено експериментальні дослідження втрат НВЧ потужності $IL(P_{in})$, які внесено надпровідною плівочною YBa₂Cu₃O_{7-δ} мікросмужковою лінією зі звуженням, в інтервалі температур 78–90 К. При протіканні НВЧ струму з амплітудою більшою, ніж критичне значення $I_{c(rf)}$, у лінії виникали втрати, які стрімко наростали зі збільшенням НВЧ потужності, яка вводиться. При збільшенні та наступному зменшенні НВЧ потужності виявлено гистерезис функції $IL(P_{in})$. Проведений розрахунок показав, що втрати в лінії пов'язані з утворенням в області звуження резистивних поперечних доменів, температура яких вище критичної. Показано, що невелике звуження мікросмужкової лінії із плівки НТСП можна розглядати як зосереджений нелінійний резистивний елемент, на базі якого можливо створення обмежника НВЧ потужності.

PACS: 74.25.Nf Отклик на воздействие электромагнитных полей;
74.25.Qt Вихревые решетки, пиннинг потока, ползучесть потока;
74.72.Bk Купраты на основе Y;
74.78.Bz Пленки с высокой T_c .

Ключевые слова: СВЧ, поверхностный импеданс, сверхпроводящая пленка, YBa₂Cu₃O_{7-δ} купрат, вихри Абрикосова.

1. Введение

Хорошо известно, что нелинейность высокочастотных свойств пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), проявляемая, например, в существовании нелинейной зависимости поверхностного импеданса $Z_s(P_{in}) = R_s(P_{in}) + iX_s(P_{in})$ от мощности приложенного СВЧ поля P_{in} , генерации высших гармоник, интермодуляционном искажении сигнала, — один из основных сдерживающих факторов для широкого их применения в пассивных СВЧ устройствах. Возможные механизмы нелинейности высокочастотного отклика ВТСП пленок, а также их связь с дефектной структурой пленок, геометрией неоднородного

распределения полей и токов в пленочных СВЧ устройствах являются предметом исследований и обсуждаются во многих работах [1–5]. Среди обсуждаемых в литературе возможных причин нелинейности высокочастотных свойств ВТСП пленок можно выделить, как основные, следующие: разогрев ВТСП пленок высокочастотными токами [1,6,7]; наличие джозефсоновских слабых связей на высокоугловых границах зерен и плоских дефектах в пленке, играющих роль нелинейных элементов [2–4]; эффекты, связанные с вхождением в пленку (через ее края) магнитных вихрей — абрикосовских или джозефсоновских (для межзеренных границ), которые индуцируются высокочастотным полем [2,8–11]; специфический ме-

ханизм нелинейности, обусловленный куперовским d -спариванием электронов в ВТСП, проявляющийся, в первую очередь, в интермодуляционных эффектах [4,5,12,13].

Возникновение нелинейности поверхностного сопротивления $R_s(P_{in})$ приводит к дополнительным потерям в СВЧ устройствах. Кроме того, появляются интермодуляционные и гармонические искажения сигнала, которые не только изменяют его форму, но и являются причиной рождения в спектре дополнительных гармоник, амплитуда которых может быть достаточной для их ошибочного детектирования. С другой стороны, на основе эффекта нелинейности поверхностного сопротивления ВТСП пленок можно создать широкополосные быстродействующие ограничители СВЧ мощности.

Благодаря простоте исполнения в СВЧ технике часто используются микрополосковые, копланарные и другие планарные (пленочные) структуры. Эти топологии идеально подходят для изготовления СВЧ устройств из тонких ВТСП пленок [14]. Поперечное распределение плотности СВЧ тока в таких структурах неоднородно и характеризуется наличием острых максимумов плотности тока на краях пленки [14,15]. Такое распределение плотности тока является причиной появления нелинейной зависимости $Z_s(P_{in})$ даже при небольших значениях мощности P_{in} . Нелинейное поверхностное сопротивление ВТСП линий приводит к возникновению нелинейной зависимости вносимых потерь $IL(P_{in})$ (Insertion Loss: $IL(P_{in}) = 10 \text{ Log} (P_{out}/P_{in})$).

В работе исследована нелинейная зависимость вносимых потерь ВТСП микрополосковой линией от мощности приложенного СВЧ поля. В качестве объекта исследований использован 8 мм отрезок микрополосковой 50 Ом линии с сужением в центре (рис. 1). Подобная топология применялась для увеличения плотности СВЧ тока при небольших значениях P_{in} . Показано, что нелинейный режим распространения СВЧ сигнала в линии, определяемый по зависимости

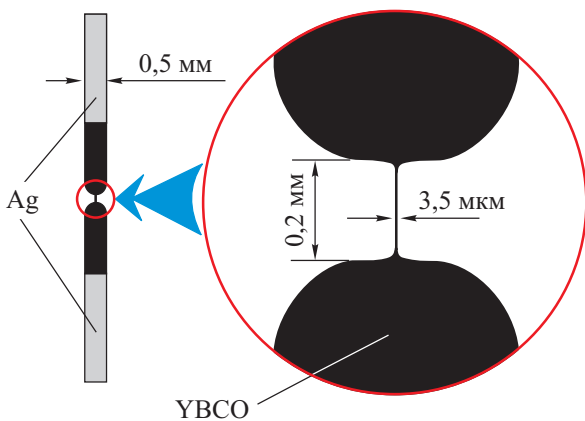


Рис. 1. Топология микрополосковой линии с сужением.

$IL(P_{in})$, возникает при достижении амплитудой СВЧ тока своего критического значения I_c в области сужения. При этом величина I_c , по всей видимости, обусловлена депиннингом вихрей, индуцированных в пленке высокочастотным полем. В нелинейной области (при $I > I_c$) становятся существенными эффекты разогрева, связанные с движением вихрей и приводящие к гистерезисной зависимости $IL(P_{in})$.

2. Изготовление YBCO линии с сужением

Микрополосковая линия была изготовлена из ВТСП пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) толщиной 200 нм. Пленка YBCO получена методом лазерного осаждения на сапфировую подложку толщиной 0,5 мм с тонким буферным слоем SeO_2 (30 нм). После изготовления пленка была полностью покрыта тонким слоем серебра (магнетронное распыление в среде аргона).

Получение микрополосковой линии из покрытой серебром YBCO пленки проходило в три этапа. Все этапы были проведены с помощью фотолитографии с жидкостным травлением. Сначала было стравлено серебряное покрытие за пределами линии. Затем в 1% растворе ортофосфорной кислоты травлению подверглась сама пленка, и, наконец, удалено серебро с сужения и прилегающей части линии.

В итоге получена микрополосковая линия с сужением в центре и с серебряными контактными площадками (рис. 1), к которым впоследствии подключались внешние СВЧ линии (подача и детектирование прошедшей сквозь исследуемую линию СВЧ мощности).

3. Расчет вносимых потерь микрополосковой линии с сужением

3.1. Идеальная линия ($\alpha = 0$)

На рис. 2 представлена эквивалентная схема измерительной СВЧ цепи, состоящей из соединенных каскадно СВЧ элементов. Для расчета СВЧ характеристик микрополосковой линии с сужением был

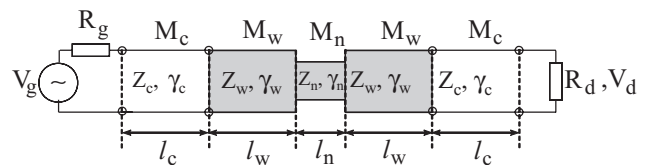


Рис. 2. Схематическое представление СВЧ измерительной цепи. V_g, R_g — напряжение и внутреннее сопротивление генератора в анализаторе СВЧ цепей, Z_c, γ_c, l_c — волновое сопротивление, коэффициент распространения и длина подводящих СВЧ кабелей, Z_w, γ_w, l_w, l_n — волновое сопротивление, коэффициент распространения и длина широкой и узкой частей микрополосковой линии, R_d — нагрузка на входе анализатора СВЧ цепей.

использован анализ, основанный на свойствах классической матрицы передачи (ABCD матрице) [16].

Для каждого СВЧ элемента, представляющего собой отрезок СВЧ линии, можно записать ABCD матрицу в виде:

$$ABCD = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & Z \cdot \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z} & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\gamma = \alpha + i\beta$ — коэффициент распространения, α — коэффициент затухания;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

— коэффициент фазы (λ — длина волны в линии); Z — волновое сопротивление линии; l — длина линии.

Подставляя в (1) значения волнового сопротивления, коэффициента распространения и длины, получаем набор ABCD матриц (M_c, M_w, M_n), каждая из которых будет соответствовать определенному участку линии (рис. 2).

Построим эквивалентную ABCD матрицу M для всей СВЧ цепи путем перемножения ABCD матриц каждого отрезка линии:

$$M = M_c M_w M_n M_w M_c = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где A, B, C, D — комплексные элементы эквивалентной матрицы.

С помощью элементов эквивалентной матрицы M находим коэффициент передачи по напряжению:

$$S_{12} = \frac{V_d}{V_g} = \frac{R_d}{AR_d + B + CR_g R_d + DR_g}, \quad (4)$$

где V_d — напряжение на нагрузке линии (рис. 2).

Используя (4), находим вносимые линией потери, выраженные в децибелах [16]:

$$IL = 10 \lg \left(\left| \frac{1}{S_{12}} \right|^2 \frac{R_d}{4R_g} \right). \quad (5)$$

В итоге получаем функцию вносимых линией потерь $IL(R_g, R_d, A, B, C, D)$, зависящую от сопротивлений генератора и входа СВЧ анализатора, а также A, B, C, D элементов матрицы M . В элементы матрицы M входят волновые сопротивления, коэффициенты распространения и длины всех отрезков линии (из-за громоздкости полные выражения для нахождения элементов эквивалентной матрицы СВЧ цепи не приводятся).

В наших экспериментах параметры имели следующие значения: $R_g = R_d = 50$ Ом, $Z_c = Z_w = 50$ Ом, $Z_n = 130$ Ом (значения Z_w, Z_n, λ найдены с помощью численного метода конечно-разностной аппроксимации

уравнений Лапласа для решения статических задач [9]), $\alpha_c = 0$ (потери в подводящих линиях были учтены при калибровке анализатора СВЧ цепей). Размеры отрезков линий: $l_c = 150$ см, $l_w = 0,2$ см, $l_n = 0,2$ мм, α_c определялся значением СВЧ частоты, на которой проходят исследования (2).

Используя (5), была построена частотная зависимость функции вносимых потерь идеальной линии (коэффициенты затухания широкого (α_w) и узкого (α_n) отрезков равны 0).

На рис. 3 видно, что для идеальной линии ($R_s = 0$) вносимые потери не превышают величину 0,01 дБ. Вклад сужения в АЧХ линии пренебрежимо мал.

3.2. Неидеальная линия ($\alpha \neq 0$)

Для нахождения частотной зависимости $IL(F)$ неидеальной линии необходимо выразить α_w и α_n через величину поверхностного сопротивления пленки R_s .

Потери в используемых сапфировых диэлектрических подложках малы по сравнению с потерями в ВТСП полоске [14]. В этом случае коэффициент затухания широкой части линии α_w определяется величиной погонного сопротивления R_w [17]:

$$\alpha_w = \frac{R_w}{2Z_w}. \quad (6)$$

Погонное сопротивление сверхпроводящей микрополосковой линии (мейсснеровское состояние) зависит от величины поверхностного сопротивления сверхпроводящей пленки, из которой изготовлена линия [15]:

$$R_w = \frac{R_s}{w_w} \frac{8}{\pi^2} \left[1 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{w_w}{\lambda_{\perp}} - 1 \right) \right], \quad (7)$$

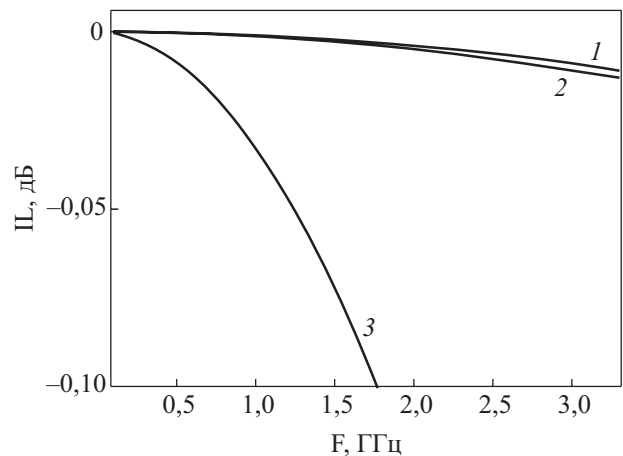


Рис. 3. Зависимость вносимых потерь IL микрополосковой линии с сужением от частоты СВЧ поля F (с учетом $R_s \sim F^2$) в линейном режиме для различных R_s , мОм: 0 (1); 0,2 (2); 30 (3).

где $\lambda_{\perp} = \frac{2\lambda_L^2}{d}$, а λ_L — лондоновская глубина проникновения.

Найдем коэффициент затухания узкой части линии. Поскольку длина сужения l_n намного меньше длины волны λ_n , сужение выступает в роли активного сопротивления R_n [18] (реактивная часть сопротивления незначительна, в противном случае существовали бы потери в линии (рис. 3, случай идеальной линии)):

$$R_n = R_S \frac{l_n}{w_n}. \quad (8)$$

С другой стороны,

$$R_n = R_{n0} l_n, \quad (9)$$

где $R_{n0} = 2\alpha_n Z_n$ — погонное сопротивление.

Из (8) и (9) получим:

$$\alpha_n = \frac{R_S}{2Z_n w_n}. \quad (10)$$

В дальнейшем, в интервале температур 78–86 К, были измерены температурные зависимости собственной добротности $Q_0(T)$ ($Q_0(8600-155)$) и резонансной частоты $F_0(T)$ ($F_0(78) \sim 1,9$ ГГц) микрополосковых резонаторов, изготовленных из аналогичных YBCO пленок (зависимости получены в линейном режиме [11] при входящей мощности $P_{in} = -40$ дБм). Из $Q_0(T)$ и $F_0(T)$ были найдены температурные зависимости поверхностного сопротивления $R_s(T)$ ($R_s(0,2-11)$ мОм) и глубины проникновения электромагнитного $\lambda(T)$ поля $\lambda_L(500-1800)$ нм [37]. R_s YBCO пленки сильно возрастает с приближением температуры к T_c . Поэтому для последующих расчетов был расширен диапазон изменения $R_s(0,2-30)$ мОм. Исходя из этих данных, используя (6) и (7), находим изменение коэффициентов затухания: $\alpha_w(0,118-11)$ мНп/см, а из (10) — $\alpha_n(2,597-390)$ мНп/см.

Учитывая частотную зависимость коэффициента затухания $\alpha \sim R_s \sim F^2$ [15,38], построим с помощью (3), (5) частотную зависимость $IL(F)$ вносимых линией потерь (рис. 3). Найденная в результате расчета функция $IL(F)$ для значения $R_s = 30$ мОм, которое соответствует температуре немного меньшей, чем T_c , показывает недостаточную величину для обнаружения потерь в линии вплоть до частоты 1,75 ГГц (в дальнейших экспериментальных исследованиях абсолютная точность определения IL составила 0,1 дБ). Следовательно, во всем интервале температур ниже, чем начало перехода в нормальное состояние, потери в линии, связанные с конечным значением R_s в линейном режиме, для частот меньших, чем 1,75 ГГц, экспериментально наблюдаться не будут.

В описанном методе нахождения вносимых линией потерь не учитывается излучение линии (особенно в местах резкого изменения ширины), которое может приводить к возникновению дополнительных потерь,

а также емкостная связь между двумя широкими частями линии, которая приводит к шунтированию узкой части и уменьшению величины вносимых потерь. Для частот ~ 1 ГГц эти вклады ничтожны [16]. Наличие резких поворотов (углов) в реальной YBCO структуре приводит к повышенной концентрации СВЧ токов в них, и, как следствие, в этих местах могут возникать различные нелинейные эффекты [19]. Поэтому для уменьшения влияния излучения связи широких частей линии, краевых нелинейных эффектов в исследуемой в дальнейшем структуре с сужением были сглажены все резкие повороты краев линии (топология на рис. 1).

Проведенное моделирование показало, что сужение линии можно рассматривать как сосредоточенный резистивный элемент, емкостью и индуктивностью которого можно пренебречь.

4. Эксперимент и результаты

4.1 Критическая мощность линии

Амплитудные зависимости вносимых потерь $IL(P_{in})$ микрополосковой YBCO линии с сужением (рис. 4) измерены векторным анализатором цепей (Advantest R3762BH) с помощью стандартного двухпортового метода [14]. Вносимые потери определялись как:

$$IL(P_{in}) = 10 \text{ Log} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (11)$$

где P_{in} , P_{out} — входящая в линию и исходящая мощность соответственно.

На зависимостях вносимых потерь в малых амплитудах СВЧ поля при температурах вплоть до температуры сверхпроводящего перехода до некоторого порогового значения мощности P_c потери не наблюдаются: $IL(P_{in} < P_c) = 0$. Это полностью соответствует проведенному выше теоретическому расчету (рис. 3). Начиная с критической мощности P_c , в линии появляются потери. Величина P_c не зависит от частоты СВЧ поля в диапазоне частот 0,3–3 ГГц (рис. 4,а).

При мощности $P_{in} > P_c$ зависимость $IL(P_{in})$ имеет как резкие, так и более пологие участки (рис. 4). Критическая мощность $P_c(T)$ уменьшается с ростом температуры. При этом участок с резким уменьшением функции $IL(P_{in})$ при $P_{in} > P_c$ становится все более пологим (рис. 4,б).

При достижении входящей СВЧ мощности значения P_c в узкой части линии течет критический СВЧ ток $I_{c(rf)}$, величину которого можно определить по формуле:

$$I_{c(rf)} = \sqrt{\frac{P_c}{Z_0}}, \quad (12)$$

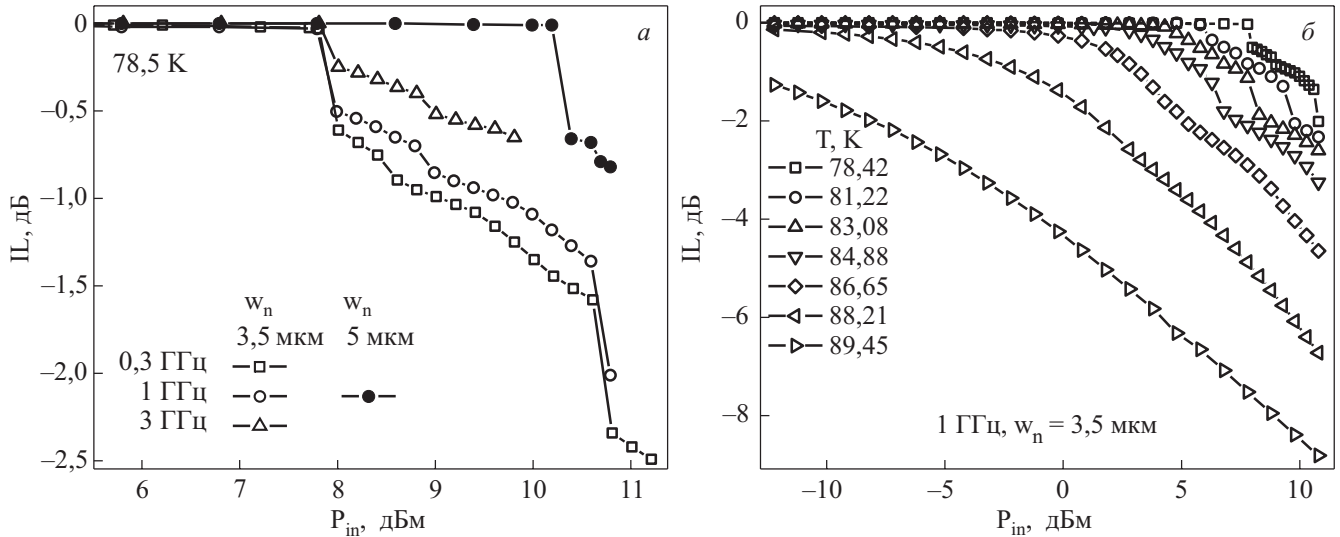


Рис. 4. Частотные (а) и температурные (б) зависимости вносимых потерь микрополосковой линии с сужением (дБм — децибел-милливатт).

где Z_0 — общее волновое сопротивление микрополосковой линии с сужением, $Z_0 = Z_w = 50$ Ом. (Сужение, ввиду своей малой длины по сравнению с длиной СВЧ волны, не вносит существенной поправки в волновое сопротивление линии. В противном случае существовало бы рассогласование линии и как следствие — возникновение существенных потерь (рис. 3, кривая 1).)

Исследования амплитудных зависимостей вносимых потерь линий с различной шириной сужения $w_n = (3,5; 5; 10)$ мкм (линии находились на одной подложке размером 10×10 мм) показали, что существует зависимость $P_c \sim w_n^2$. Такой вид зависимости возможен при равномерном распределении тока вдоль ширины линии (плотность тока на краях практически равна

плотности в центре). В этом случае плотность критического СВЧ тока можно определить как

$$J_{c(rf)} = \frac{I_{c(rf)}}{dw_n}, \quad (13)$$

где d — толщина пленки.

Из зависимости $P_c(T)$ для линий с $w_n = (3,5; 5; 10)$ мкм, используя (12), (13), были получены температурные зависимости плотности критического тока (рис. 5).

4.2. Транспортный критический ток линии

Для получения транспортным методом вольт-амперных характеристик (ВАХ) линии с сужением к серебряным СВЧ контактам (рис. 1) были подключены токовые и потенциальные контакты.

В целом ВАХ, полученные при разных температурах, хорошо описывались функцией вида:

$$U(I) = U_0 e^{-(I_0/I)^m}, \quad m \leq 1, \quad (14)$$

характерной для режима коллективного крипа вихрей в состоянии так называемого «вихревого стекла» или же в случае депиннинга вихрей с протяженных линейных дефектов («бозе-стекло») [20,21]. ВАХ такого типа, характеризуемые отрицательной кривизной зависимости $U(I)$, хорошо известны для монокристаллов и пленок ВТСП (см., например, [22–25]). Эту зависимость можно в разных интервалах изменения напряжения U аппроксимировать степенной функцией $U = U_0 (I/I_c)^n$ с показателем степени $n \approx 19$ для $U < 10$ мкВ и $n \approx 7$ для $U > 10$ мкВ (вставка на рис. 5).

Из ВАХ на уровне $U = 10$ мкВ были определены величины транспортного критического тока $I_{c(dc)}$ и ана-

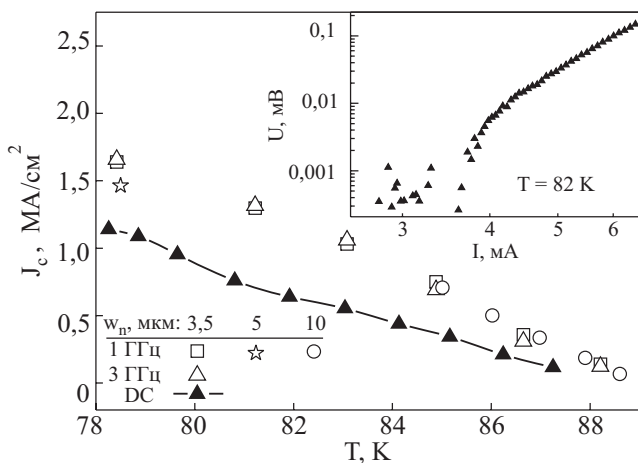


Рис. 5. Плотности критического тока, полученные из СВЧ экспериментов и транспортных измерений на постоянном токе. На вставке изображена ВАХ линии с сужением. Ширина сужения $w_n = 3,5$ мкм.

логично с (13) были найдены температурные зависимости плотности критического тока $J_{c(dc)}$ (рис. 5).

4.3. Резистивные домены

Во время измерений вносимых потерь микрополосковой линией с сужением при нарастании и последующем уменьшении амплитуды СВЧ поля был обнаружен гистерезис функции $IL(P_{in})$ (рис. 6). Форма и размеры петель гистерезиса $IL(P_{in})$ в исследуемом диапазоне 0,3–3 ГГц не зависят от частоты поля. Гистерезис проявляется на участках резкого увеличения потерь в линии (рис. 6, участки 1–3).

Как уже отмечалось выше, при увеличении температуры происходит выполаживание этих участков. При этом размах петель гистерезиса уменьшается. При дальнейшем увеличении температуры резкое увеличение потерь в линии при $P > P_{c(rf)}$ сменяется плавным (см. рис. 4,б для $T > 86,5$ К) и гистерезис зависимости $IL(P_{in})$ пропадает.

Проведенный расчет вносимых потерь с помощью ABCD матриц показывает, что резкое увеличение потерь в линии возможно лишь в случае сильного роста коэффициента затухания в узкой части линии α_n . Учитывая то, что при температурах ниже T_c потери в линии ничтожно малы (рис. 3), можно сделать вывод, что резкое увеличение потерь связано с переходом фрагмента узкой части линии в нормальное состояние с образованием поперечного резистивного домена с температурой большей, чем T_c [26]. Поверхностное сопротивление образованного резистивного домена будет равно поверхностному сопротивлению пленки при $T > T_c$ ($R_{sd} = R_s(T > T_c)$).

Найдем длину первого резистивного домена. Для этого в выражении (3) матрицу M_n запишем как произведение двух матриц:

$$M_n = M_{n-d} \cdot M_d,$$

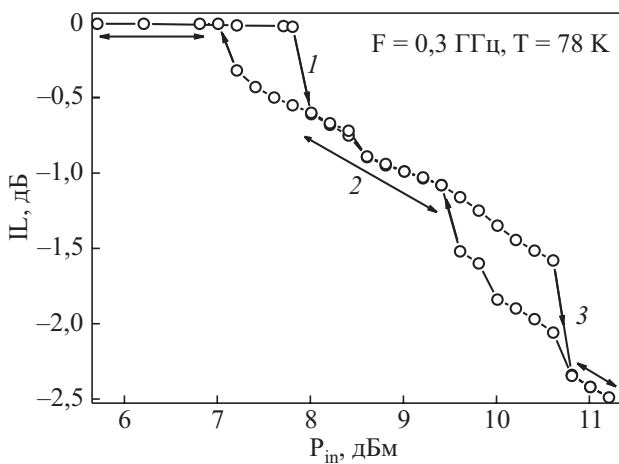


Рис. 6. Гистерезис функции $IL(P_{in})$ при немонотонном изменении мощности СВЧ поля.

где M_d — матрица резистивного домена с длиной l_d и $\alpha_d = \alpha_n(T_c)$, M_{n-d} — матрица оставшейся части сужения с длиной $l_{n-d} = l_n - l_d$ и $\alpha_{n-d} = \alpha_n$.

Изменение функции $IL(P_{in})$ на участке 1 рис. 6 равно $\Delta IL_1(P_{in}) = 0,57$ дБ. Приняв значения $R_{sd} = R_s(T_c) = 0,7$ Ом [27,28], используя (10), получим, что длина первого резистивного домена равна 58 мкм. Аналогичный расчет показал, что длина второго резистивного домена равна 14 мкм, а третьего — 78 мкм.

Подтверждением образования резистивных доменов является наличие гистерезиса на зависимости $IL(P_{in})$ (рис. 6). Гистерезис возникает при переходе части линии из сверхпроводящего в нормальное (разогретое) состояние и обратно. При этом для возникновения доменов необходим СВЧ ток больший, чем для поддержания его существования (выделяемая тепловая мощность пропорциональна сопротивлению). Поэтому схлопывание доменов происходит при меньшей мощности (токе), чем его образование.

В промежутке между точками образования доменов (отсутствие гистерезиса) происходит, по всей видимости, повышение температуры образованных резистивных доменов и, как следствие, наблюдается более пологая зависимость $IL(P_{in})$.

На рис. 4,а видно, что с увеличением частоты микроволнового сигнала амплитуда резкого изменения функции $IL(P_{in})$ уменьшается. Предположительно, это может быть связано с тем, что возникает емкостная связь между краями резистивного домена, и для более точных расчетов необходимо представить резистивный домен в виде сосредоточенного элемента, состоящего из параллельного соединения сопротивления домена и его емкости.

Близкие значения амплитуды резкого уменьшения функции $IL(P_{in})$ для частот 0,3 и 1 ГГц (рис. 4,а) показывают, что проведенный выше расчет справедлив для частот вплоть до 1 ГГц.

4.4. Диссипация энергии в сужении. Ограничитель СВЧ мощности

Входящая в линию мощность распределяется среди выходящей P_{out} , отраженной от линии P_{ref} и рассеиваемой (выделяется в виде тепла) P_{dis} мощностей:

$$P_{in} = P_{out} + P_{dis} + P_{ref}. \quad (15)$$

Используя матрицу эквивалентного четырехполюсника линии с сужением (3), найдем входное сопротивление линии Z_{in} [16]:

$$Z_{in} = \frac{AR_d + B}{CR_d + D}.$$

Обратные (RL — return loss) потери в линии при этом будут равны [29]:

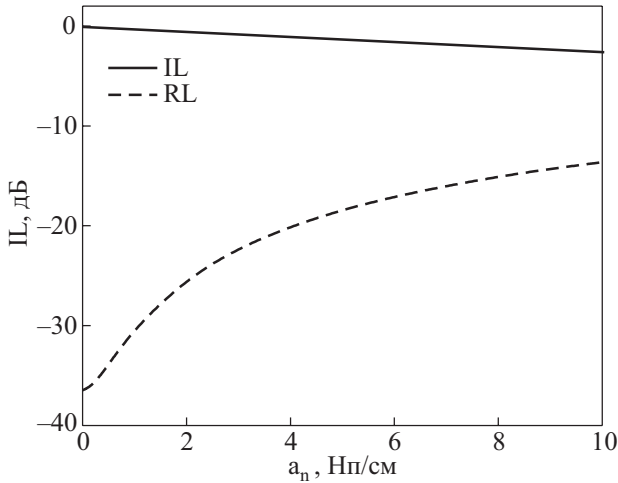


Рис. 7. Зависимость включенных IL и обратных RL потерь линии с сужением от коэффициента затухания узкой части линии α_n .

$$RL = -20 \log \left(\frac{R_g - Z_{in}}{R_g + Z_{in}} \right). \quad (16)$$

На рис. 7 видно, что в интервале $\alpha_n(0, 10)$ Нп/см, что соответствует $R_s(0, 0,9)$ Ом, $IL > RL$ — отражение в линии практически отсутствует, и возникновение потерь связано исключительно с выделением тепла. Учитывая это, из (15) следует:

$$P_{dis} = P_{in} - P_{out}. \quad (17)$$

Используя (17) и (11), получаем, что в сужении в конце первого резкого уменьшения функции $IL(P_{in})$ (рис. 4,а) для $w_n = 3,5$ мкм $P_{dis} = 0,675$ мВт. При этом мощность, выделяемая на единицу площади возникшего домена $P_{dis}/(w_n l_d) = 3,32$ мВт/м².

Эффект стремительного увеличения потерь в ВТСП микрополосковой линии с сужением можно использовать для построения ограничителя СВЧ мощности.

Используя (11) и зависимости $IL(P_{in})$ (рис. 4,б), построим зависимости $P_{out}(P_{in})$ (рис. 8). Начиная с мощности $P_{in} > P_c$, происходит отклонение функции $P_{out}(P_{in})$ от линейной зависимости $P_{out} = P_{in}$ и возникает ограничение выходящей мощности. При этом простым изменением температуры линии можно регулировать мощность ограничения P_c .

Скорость срабатывания подобного ограничителя определяется, прежде всего, теплопроводностью и теплоемкостью подложки и пленки. Предварительные исследования показывают, что скорость срабатывания подобной структуры не больше 5 мкс [30].

Значения транспортных плотностей критических токов J_{cdc} (рис. 5) дает возможность произвести приблизительный расчет критической мощности без предварительных СВЧ измерений.

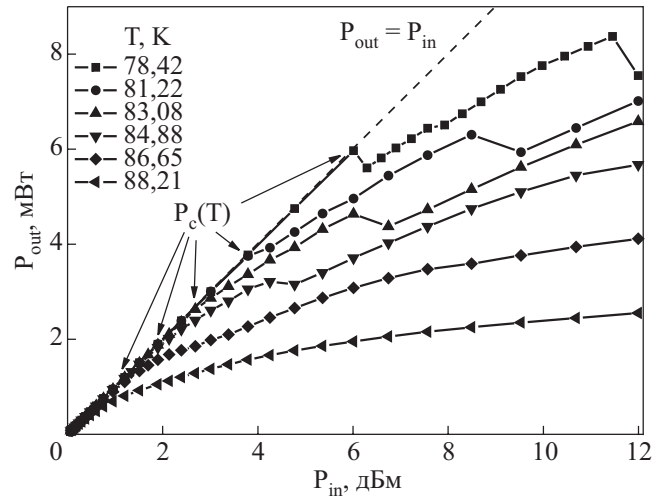


Рис. 8. Ограничение СВЧ мощности. Зависимости $P_{out}(P_{in})$ для разных температур. Зависимости получены на частоте 1 ГГц.

Теоретический предел использования подобных ограничителей связан с тем, что с увеличением частоты длина волны становится соизмеримой с длиной сужения. При этом от сужения в результате возникшего несогласования волновых сопротивлений будет отражаться волна и, следовательно, будут наблюдаться потери в линии даже при $R_s = 0$.

5. Заключение

Проведены измерения нелинейных потерь YBCO линии с сужением $IL(P_{in})$. Начиная с входящей мощности $P_{in} > P_c$, наблюдается резкое увеличение потерь, связанных с возникновением в сужении резистивных доменов, температура которых превышает критическую температуру пленки.

Измеренные транспортным методом и вычисленные из значений критической мощности плотности критического тока $J_{c(dc)}$ и $J_{c(rf)}$ показали близкие зависимости (рис. 5).

Такая корреляция, по всей видимости, указывает на то, что именно вихри участвуют в первоначальном разогреве пленки и, как следствие, приводят к возникновению резистивных доменов. Выяснение причин подобной корреляции СВЧ и транспортных критических токов требует дальнейшего исследования. Основываясь на полученных результатах, можно, однако, полагать, что для исследуемых пленок YBCO слабые связи джозефсоновского типа, возникающие на границах зерен с высокими углами разориентации или каких-либо иных плоских дефектах и приводящие к локальному нелинейному высокочастотному отклику, регистрируемому в ВТСП пленках с помощью сканирующего лазерного или микроволнового микроскопа [19,31,32], не играют существенной роли в интеграль-

ных характеристиках пленки (ВАХ на постоянном токе, поверхностный импеданс пленки на СВЧ или же исследованная в данной работе зависимость коэффициента прохождения высокочастотной мощности через пленочную СВЧ линию передачи). Это указывает на то, что в пленках данного типа доминирующую роль играют малоугловые межзеренные границы, которые при углах разориентации зерен $\leq 1-2^\circ$ в плоскости ab являются прозрачными для протекания тока сверхтекучего конденсата и, более того, содержат c -ориентированные краевые дислокации, являющиеся сильными центрами пиннинга для вихрей [33–36]. Такое предположение о структуре пленок, использовавшихся в данной работе, согласуется с высокими значениями плотности критического тока и видом ВАХ.

Эффект стремительно нарастающих потерь в линии с сужением можно использовать для построения СВЧ ограничителей мощности. Найденная зависимость $P_c \sim w_n^2$ позволяет легко рассчитывать мощность ограничения P_c , а корреляция между плотностями критического rf и dc тока — подбирать соответствующие YBCO пленки.

В заключение автор выражает благодарность А.И. Ребикову за помощь в проведении транспортных измерений исследуемых микрополосковых линий YBCO на постоянном токе, а также А.Л. Касаткину, В.Ф. Тарасову и В.М. Пану за плодотворное обсуждение полученных результатов.

1. A.V. Velichko, M.J. Lancaster, and A. Porch, *Supercond. Sci. Technol.* **18**, R24 (2005).
2. D.E. Oates, P.P. Nguen, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, G. Koren, and E. Polturak, *J. Supercond.* **8**, 725 (1995).
3. J. Halbritter, *J. Supercond.* **8**, 691 (1995).
4. J. Halbritter, *J. Supercond. Novel Magn.* **19**, 547 (2006).
5. D.E. Oates, *J. Supercond. Novel Magn.* **20**, 3 (2007).
6. M. Hein, C. Bauer, W. Diete, S. Hensen, T. Kaiser, G. Muller, and H. Piel, *J. Supercond.* **10**, 109 (1997).
7. J. Wosik, L.M. Xie, J.H. Miller, and S.A. Long, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 1470 (1997).
8. S. Sridhar, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1054 (1994).
9. Y.M. Habib, C.J. Lehner, D.E. Oates, L.R. Vale, R.H. Ono, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev.* **B57**, 13833 (1998).
10. P.P. Nguyen, D.E. Oates, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, and A.C. Anderson, *Phys. Rev.* **B51**, 6686 (1995).
11. V.M. Pan, D.A. Luzhbin, A.A. Kalenyuk, A.L. Kasatkin, V.A. Komashko, A.V. Velichko and M. Lancaster, *Low Temp. Phys.* **31**, 254 (2005).
12. T. Dahm, and D.J. Scalapino, *J. Appl. Phys.* **82**, 464 (1997).
13. M.I. Salkola and D.J. Scalapino, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 112509 (2005).
14. M.J. Lancaster, *Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors*, United Kingdom, Cambridge University Press (1997).
15. О.Г. Вендик, А.Ю. Попов, *ЖТФ* **63**, № 7, 1 (1993).
16. В. Фуско, *СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование*, Радио и связь, Москва (1990).
17. R.E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering. Second Edition*, IEEE, New York (2001).
18. S.A. Maas, *The RF and Microwave Circuit Design Cookbook*, Artech House (1998).
19. A.P. Zhuravel, A.G. Sivakov, O.G. Turutanov, A.N. Omelyanchouk, S.M. Anlage, A. Lukashenko, and A.V. Ustinov and D. Abraimov, *Fiz. Nizk. Temp.* **32**, 775 (2006).
20. M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity* (2nd Edition), McGraw-Hill, Inc. (1996).
21. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
22. T.K. Worthington, M.P.A. Fisher, D.A. Huse, J. Toner, A.D. Marwick, T. Zabel, C.A. Feild, and F. Holtzberg, *Phys. Rev.* **B46**, 11854 (1992).
23. N.-C. Yeh, W. Jiang, D. S. Reed, U. Kriplani, and F. Holtzberg, *Phys. Rev.* **B47**, 6146 (1993).
24. C. Dekker, W. Eidelloth, and R.H. Koch, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 3347 (1992).
25. J.M. Woltgens, C. Dekker, J. Swuste, and H.W. de Wijn, *Phys. Rev.* **B48**, 16826 (1993).
26. A.N. Resnik, A.A. Zharov, and M.D. Chernobrovtsseva, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, No. 2, June (1995).
27. J.H. Oates, R.T. Shin, D.E. Oates, M.J. Tsuk and P.P. Nguyn, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 17 (1993).
28. V.M. Pan, A.A. Kalenyuk, A.L. Kasatkin, O.M. Ivanyuta, and G.A. Melkov, *J. Supercond. Novel Magnetism* **20**, 59 (2007).
29. D.M. Pozar, *Microwave Engineering* (Second Edition), John Wiley&Sons, Inc., New York (1998).
30. A.A. Kalenyuk, A.L. Kasatkin, and V.M. Pan, *MSMW'07 Proc.* **1**, 413 (2007).
31. S.-C. Lee and S.M. Anlage, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**, 3594 (2003).
32. S.-C. Lee and S.M. Anlage, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1893 (2003).
33. D. Larbalestier, A. Gurevich, D.M. Feldmann, and A. Polyanskii, *Nature* **414**, 368 (2001).
34. Ю.В. Федотов, С.М. Рябченко, Э.А. Пашицкий, А.В. Семенов, В.И. Вакарюк, В.М. Пан, В.С. Флис, *ФНТ* **28**, 245 (2002).
35. V.M. Pan, Yu.V. Cherpak, V.A. Komashko, S.A. Pozigun, C.G. Tretiatchenko, A.V. Semenov, E.A. Pashitskii, and A.V. Pan, *Phys. Rev.* **B73**, 054508 (2006).
36. A.I. Kosse, A.Yu. Prokhorov, V.A. Khokhlov, G.G. Levchenko, A.V. Semenov, D.G. Kovalchuk, M.P. Chernomorets, and P.N. Mikheenko, *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 075015 (2008).
37. N. Belk, D.E. Oates, D.A. Feld, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev.* **B56**, 11966 (1997).
38. N. Klein, H. Chaloupka, and G. Muller, *J. Appl. Phys.* **67**, 6940 (1990).

Nonlinear microwave response
of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ transmission
strip line with constriction

A.A. Kalenyuk

Microwave insertion loss $IL(P_{\text{in}})$ in the superconducting thin-film $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ transmission line with a cross-section constriction is measured within the temperature interval 78–90 K. An abrupt increase of insertion loss was observed at some threshold critical value of induced rf current amplitude $I_{c(\text{rf})}$. At higher input power levels a strong increase of insertion loss in the line was observed. Above the threshold value of input power P_{in} , corresponding to the induced current amplitude $I_{c(\text{rf})}$, the insertion loss dependence $IL(P_{\text{in}})$ exhibits a hysteretic behavior with increasing and decreasing the input power. The model calculations show that the microwave losses in the transmission line under

consideration are mainly related to the formation of resistive domains in the constriction region which possess a temperature, higher than the critical point value. It is also demonstrated that a small constriction of the superconducting thin film transmission line can be considered as a lumped nonlinear resistive element, which in turn may be used to design a microwave power limiter.

PACS: 74.25.Nf Response to electromagnetic fields (nuclear magnetic resonance, surface impedance, etc.);
74.25.Qt Vortex lattices, flux pinning, flux creep;
74.72.Bk Y-based cuprates;
74.78.Bz High- T_c films.

Keywords: microwaves, surface impedance, superconducting film, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ cuprate, Abrikosov vortices.