

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛИИИ НА ОСНОВЕ ВТСП

И.Н. Бондаренко, А.А. Лавринович*

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники
14, пр. Ленина, Харьков, 61166, Украина
E-mail: ibond@kture.kharkov.ua*

** Институт радиопроизводства и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины
12, ул.Ак.Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: lavr@ire.kharkov.ua*

Рассмотрена возможность использования отрезка линии СВЧ планарной структуры, изготовленной из высокотемпературного сверхпроводника, в качестве устройства защиты электроники от импульсных электромагнитных сигналов. Проведено экспериментальное исследование поведения отрезка тонкопленочной копланарной линии ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на сапфире) при воздействии СВЧ импульсов различной мощности и длительности. Зафиксирован переход в резистивное состояние, а также рост потерь при увеличении длительности импульсов.

Розглянуто можливість використання відрізка лінії НВЧ планарного типу, яка виготовлена з високотемпературного надпровідника, у якості пристрою захисту електроніки від імпульсних електромагнітних сигналів. Проведено експериментальне дослідження поведінки відрізка тонкоплівкової копланарної лінії ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на сапфірі) при впливі НВЧ імпульсів різної потужності та тривалості. Зафіксований перехід у резистивний стан, а також зростання втрат при збільшенні тривалості імпульсів.

Широкое практическое использование ВТСП материалов в микроволновой технике в первую очередь ограничено проявлением нелинейной зависимости поверхностного сопротивления от амплитуды микроволнового поля.

На сегодняшний день нет однозначного понимания механизмов и причин, приводящих к нелинейному отклику, несмотря на значительное число как экспериментальных, так и теоретических работ, посвященных исследованию нелинейной зависимости поверхностного сопротивления сверхпроводников.

Известно несколько механизмов возникновения нелинейного отклика ВТСП пленки в микроволновом поле. Наиболее вероятными причинами нелинейности считаются: распаривание носителей сверхтока, генерация вихрей внешним высокочастотным полем, наличие слабых связей, наличие крипа потока, локальный перегрев при больших мощностях СВЧ тока и другие механизмы, которые, в свою очередь, могут зависеть от наличия примесей, дефектов кристаллической решетки и содержания кислорода, механической обработки образца и прочих факторов [1].

В тоже время одним из наиболее очевидных применений сверхпроводящих линий передачи является построение на их основе устройств защиты электроники от мощных разрушающих сигналов или сильных помех, в которых как раз используется эффект перехода в резистивное состояние. При этом сам входной микроволновый сигнал управляет ослаблением за счет перехода защитного устройства или его элементов из сверхпроводящего в нормальнопроводящее состояние. Перепад сопротивлений при этом может

достигать 10^3 и более, а время перехода (для нетепловых процессов) $\sim 10^{-12}$ с.

При этом необходимо конструкцию и структуру защитного устройства создавать такими, чтобы стимулировать и управлять процессами перехода в нормальное состояние (а также восстановлением сверхпроводящего состояния) и обеспечивать максимальное быстродействие.

Наиболее подходящими для реализации таких устройств являются тонкопленочные отрезки линий передачи, созданных на основе планарных технологий, такие как микрополосковые, щелевые или копланарные линии. При таком исполнении проще обеспечить необходимое качество ВТСП пленки, хорошее охлаждение и отвод тепла.

В этой связи представляется целесообразным проведение исследования линий СВЧ планарного типа с целью выявления факторов, влияющих на их характеристики.

С точки зрения обеспечения высокого быстродействия необходимо создать условия для реализации наиболее быстрого механизма S-N перехода. В работе [2] проведен анализ процессов перехода ВТСП пленок в резистивное состояние. Показано, что в зависимости от качества пленки, определяемого соотношением размеров дефектов r_{def} и длины когерентности ξ ($r_{def} \ll \xi$ – бездефектные, $r_{def} \sim \xi$ – со слабыми связями, $r_{def} \gg \xi$ – с несверхпроводящими микровкраплениями) пленки будут по разному реагировать на внешнее (в нашем случае, микроволновое) магнитное поле и иметь различный перепад параметров в сверхпроводящем и резистивном состоянии за счет участия различных процессов. В бездефектных

совершенных пленках – это распаривание носителей сверхтока и глобальный перегрев. Во втором случае – образование джозефсоновских вихрей и проскальзывание фазы с последующим появлением резистивных областей, локальным и глобальным нагревом. В сильнодефектных пленках – образование абрикосовских вихрей, локальный нагрев и последующий переход в резистивное состояние.

Таким образом, характер поведения линии СВЧ при внешнем микроволновом воздействии будет существенно зависеть от качества используемой сверхпроводящей структуры.

Поскольку создание пленок ВТСП с идентичными неоднородностями практически невозможно, в качестве объекта исследования была выбрана копланарная линия (КПЛ), выполненная на основе малодефектной пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Структура КПЛ позволяет использовать в качестве рабочих пленки, сформированные в результате общего процесса нанесения ВТСП покрытия на подложку.

Для экспериментальных исследований была изготовлена КПЛ в виде меандровой структуры, нанесенной на сапфировую подложку (r -срез, толщина $h = 0,5$ мм) размером $\sim 20 \times 20$ мм. Выбор сапфира в качестве подложки обусловлен его высокой теплопроводностью, что позволяет обеспечить хороший отвод тепла от ВТСП пленок и уменьшить постоянную времени тепловых процессов при перегреве. Характерные размеры структуры следующие: $w = 0,186$ мм, $a = 0,386$ мм, расстояние между секциями структуры – $0,4$ мм, длина секций $\approx 18,25$ мм, количество секций – 25 , общая длина КПЛ $l \approx 506$ мм. Пленка $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ наносилась методом лазерного распыления с буферным слоем SeO_2 на обе стороны подложки (рабочую и экранную), толщина пленки $d = 150 \dots 200$ нм, $T_c \sim 92$ К.

Если пренебречь неравномерным распределением тока по проводникам КПЛ, то можно произвести некоторые приближенные оценки.

Величина тока в проводнике КПЛ I при критической плотности тока $j_c \approx 2 \cdot 10^6$ А/см²:

$$I = j_c \cdot w \cdot d = 0,744 \text{ А.} \quad (1)$$

Выделяющаяся при этом мощность составит

$$P = \frac{R \cdot I^2}{2} \approx 0,14 \text{ Вт,} \quad (2)$$

где $R = R_s \cdot l/w \approx 0,5$ Ом при $R_s \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Используя (1), (2) и учитывая, что потери мощности на единицу длины составляют

$$P_1 = \delta_n P_0 = (1 - 10^{-\alpha/l}) P_0, \quad (3)$$

где α – величина затухания, вносимого единицей длины КПЛ, дБ, можно определить величину

мощности входного P_0 сигнала, при которой достигается критическое значение плотности тока,

$$P_0 = \frac{P}{\delta_c \cdot l} = \frac{(R_s \cdot l/w) \cdot (j_c \cdot w \cdot d)^2}{2 \cdot \delta_c \cdot l} = 4,6 \text{ Вт.} \quad (4)$$

На практике распределение плотности тока по проводникам КПЛ является существенно неравномерным [3] и соответствует приведенному на рис. 1.

Величина λ_{\perp} , указанная на рис. 1, определяется с учетом следующих соотношений [3, 4]:

$$\lambda_{\perp} = 2\lambda_L^2/d; \quad (5)$$

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_L(0)}{\sqrt{1 - 0,1t - 0,9t^2}}, \quad (6)$$

где $t = T/T_c$; T – рабочая температура; T_c – температура сверхпроводящего перехода (при расчетах принималось, что $T_c = 92$ К); $\lambda_L(0)$ – лондоновская глубина проникновения поля при $T = 0$ (для высококачественных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ – $\lambda_L(0) \approx 160 \dots 200$ нм [4]); d – толщина сверхпроводящей пленки (в нашем случае $d \approx 200$ нм).

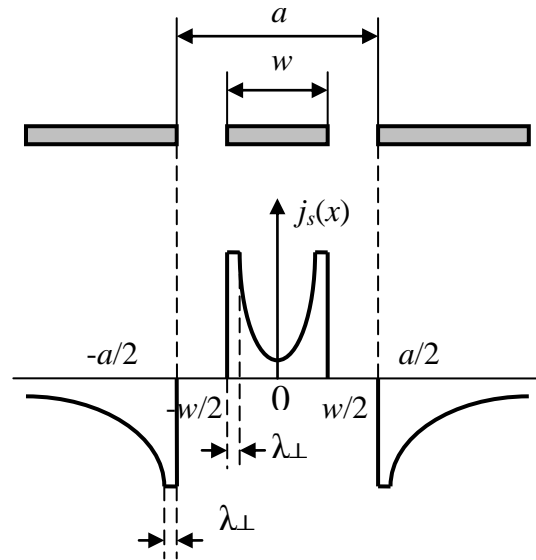


Рис. 1. Распределение плотности тока по проводникам КПЛ

При указанных выше размерах КПЛ плотность тока на краях центрального проводника КПЛ ($\Delta l \approx \lambda_{\perp}$) превышает плотность тока в его центре примерно в 470 раз. Оценки показывают, что 85% всего продольного тока протекает по краевым участкам ($\sim w/80$) и только $\sim 15\%$ по всей остальной ширине.

Исходя из значения тока, найденного из выражения (1) с учетом неравномерности его распределения (рис. 1), используя соотношение (4) можно оценить величину входной мощности

P_0 , при которой на краях центрального проводника КПЛ достигается значение критической плотности тока j_c , $-P_0 \sim 10^{-3}$ Вт.

Таким образом, приведенные оценки показывают, что уже при уровнях мощности порядка 10^{-3} Вт может начинаться процесс проникновения в пленку ВТСП абрикосовских вихрей, образованных СВЧ полем, а, следовательно, проявляться нелинейные эффекты и формироваться области пониженной проводимости. Подтверждением этого являются результаты, полученные в работе [5] для КПЛ на основе поликристаллической пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при изменении импульсной мощности от 10^{-3} до 10^{-1} Вт.

Структурная схема измерительной установки приведена на рис. 2. Импульсы СВЧ ($f_c = 9,3$ ГГц) формировались с помощью магнетрона ($\Gamma_{свч}$) и генератора импульсов прямоугольной формы Г5-54 ($\Gamma_{имп}$). Выходная мощность магнетрона изменялась в пределах $0 \dots 12$ Вт и контролировалась по изменению анодного тока I_a с использованием калибровочной кривой зависимости выходной мощности от тока $P_w = f(I_a)$. Копланарная линия (КПЛ), размещалась в специально разработанном медном герметичном боксе (ИО), заполняемом инертным газом. КПЛ прижималась к корпусу бокса медной пластиной через индиевую фольгу для обеспечения хорошего

гальванического и теплового контактов. Бокс помещался в криостат, температура в котором изменялась в пределах $77 \dots 296$ К. Изменение температуры контролировалось датчиком температуры (ДТ), который располагался непосредственно на самом боксе. Бокс с КПЛ включался в СВЧ тракт с помощью коаксиальной линии передачи (РК-50-2-25; $L = 1,19$ дБ/м) и волноводно-коаксиальных переходов (ВКП). Для уменьшения мощности, подаваемой в исследуемую КПЛ, во входном СВЧ тракте установлен аттенуатор с фиксированными потерями (Ат) (-10 дБ). Для регулирования мощности на входе и мощности, поступающей на детектор с выхода КПЛ, на входе и выходе ВКП включены измерительные аттенуаторы (Ат/и) типа Д5-5. Для удобства контроля и измерения входного и выходного сигнала в тракте был установлен волноводный переключатель (ВП), что позволило проводить измерения с помощью одного детектора и тем самым уменьшить ошибку измерений, которая могла быть вызвана неидентичностью характеристик разных СВЧ детекторов на входе и выходе. Входной СВЧ импульс и импульс, прошедший через исследуемую структуру, индицировались на экране индикаторного устройства (ИУ), функцию которого выполнял осциллограф С1-70.

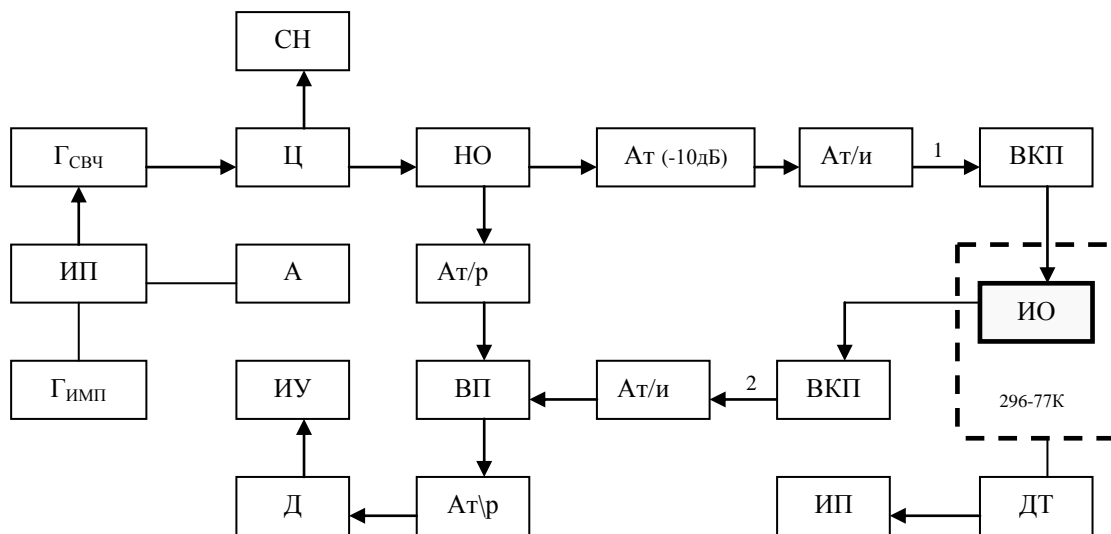


Рис.2. Структурная схема измерительного стенда: $\Gamma_{свч}$ – СВЧ генератор (магнетрон М-857; $f_c = 9,3$ ГГц); ИП – источник питания; $\Gamma_{имп}$ – генератор импульсов прямоугольной формы Г5-54; А – измеритель постоянного тока (амперметр); Ц – ферритовый циркулятор; СН – согласованная нагрузка; НО – направленный ответвитель; Ат/р – аттенуатор развязывающий; Ат/и – аттенуатор измерительный (Д5-5); Ат(-10дБ) – аттенуатор, потери которого на частоте измерения составляют -10 дБ; ВП – волноводный переключатель; ВКП – волноводно-коаксиальный переход; ИУ – индикаторное устройство (осциллограф С1-70); ИО – исследуемый объект, размещенный в криостате, температура в котором изменяется в пределах $296-77$ К; ИП – измерительный прибор (В7-35); ДТ – датчик температуры; Д – детектор (ДК-В3).

Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. Полученная на первом этапе

зависимость изменения затухания ΔL (в разгах) в исследуемой структуре (с учетом потерь в пере-

дающей линии) от уровня импульсной ($\tau_n = 20 \mu\text{s}$) СВЧ мощности P_{in} на входе КПЛ, охлажденной до температуры 77К, приведена на рис. 3. Входная мощность P_{in} указана с учетом ослабления на 10 дБ (с помощью Ат (-10 дБ)). На вставке приведена та же зависимость, но изменение потерь в структуре представлено в дБ. Видно, что с увеличением выходной мощности до 200 мВт (точка 1) потери в структуре практически не меняются. Увеличение P_{in} до 350 мВт (точка 2) приводит к росту потерь ΔL почти в два раза, что можно связать с разрушением сверхпроводимости в самой КПЛ СВЧ током.

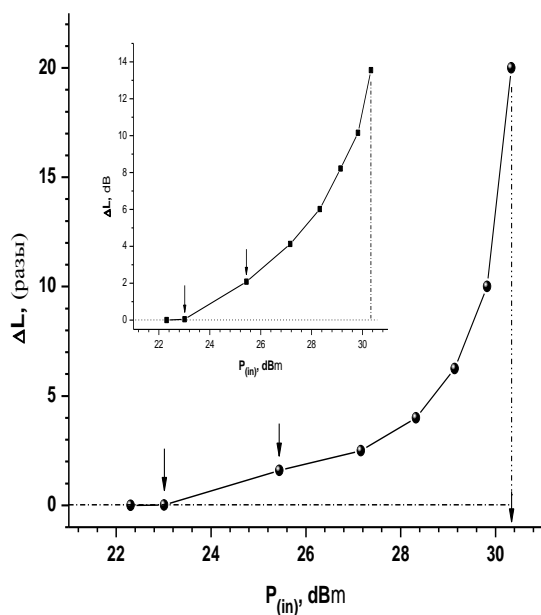


Рис. 3. Зависимость изменения затухания ΔL в исследуемой структуре от уровня импульсной СВЧ мощности P_{in} на входе КПЛ при температуре 77К (на вставке ΔL указана в дБ).

Этот эффект достаточно хорошо виден на зависимости мощности, прошедшей через КПЛ, от входной мощности $P_{out} = f(P_{in})$. Дальнейшее увеличение P_{in} до значения 1080 мВт (точка 3) приводит к достаточно резкому изменению потерь в КПЛ (до 20 раз).

Тестирование структуры при комнатной температуре после проведенных измерений с повышенной мощностью входных импульсов показало, что свойства структуры изменились (последующая проверка состояния структуры у изготовителя показала, что в КПЛ появился непроводящий при комнатной температуре участок линии – микроразрыв).

Второй цикл измерений был проведен после того, как было обнаружено изменение потерь в структуре (вместе с ВКП на участке 1-2 (см. рис. 3) при температуре 77К. (Перед проведением первого цикла измерений были определе-

ны потери ΔL в структуре (ИО) на участке 1-2 при температурах 296К и 77К: $\Delta L = L_{296} - L_{77} = 41 - 25 = 16$ дБ. После проведения измерений было обнаружено, что ΔL изменились и составляют $\Delta L = L_{296} - L_{77} = 44 - 38 = 6$ дБ). Такое изменение потерь указало на необходимость повторных измерений, результаты которых представлены на рис. 4. Видно, что увеличение длительности импульса до 50 μs при входной мощности $P = 600$ мВт и выше приводит к изменению наклона зависимости $P_{in} = f(P_{out})$ по сравнению с зависимостями для $\tau_n = 5 \mu\text{s}$, $\tau_n = 20 \mu\text{s}$, что, по-видимому, можно объяснить влиянием теплового эффекта (разогрев структуры) на характеристики самой структуры.

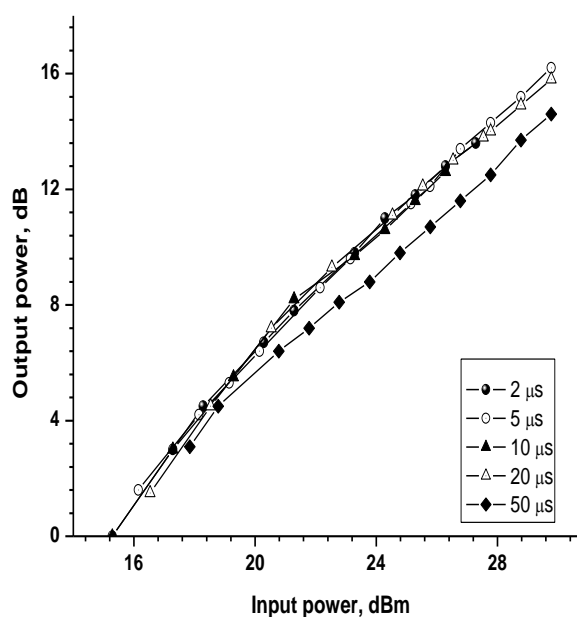


Рис.4. Зависимость мощности прошедшей через КПЛ (P_{out}) от входной мощности (P_{in}) при температуре 77К.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- физическая природа полученной зависимости, временные характеристики переходных процессов при включении и выключении микроволнового поля и влияние различных факторов на наблюдаемый нелинейный эффект требуют дальнейшего изучения.

- наблюдается эффект значительного роста затухания в ВТСП линии при увеличении входной мощности (рис.3), который можно объяснить переходом из сверхпроводящего в резистивное состояние.

- экспериментальные зависимости, приведенные на рис.4, позволяют утверждать, что рост затухания не связан с медленными тепловыми

процессами, которые начинают проявляться при длительностях импульсов ~ 50 мкс.

– анализ процессов, происходящих в макете защитного устройства, может быть проведен только после исследования подобного макета (или аналогичного ему) в более широком диапазоне длительностей СВЧ импульсов (хотя бы до ~ 10 нс) и мощностей СВЧ сигнала (от 10 мВт до 10 Вт). Кроме того, желательно проведение экспериментов по оценке искажений СВЧ импульсов, проходящих через макетную структуру. Это поз-

волит провести косвенную оценку широкополосности ВТСП линии, используемой в качестве основы макета защитного устройства, а также возможности работы с длительностями импульсов ~ 1 нс и менее.

Авторы признательны Н.Т. Черпаку за плодотворные консультации и постоянное внимание к работе, а также В.М. Пану и А.А. Каленюку (ИМФ НАНУ, г. Киев) за изготовление исследованной тестовой структуры.

Литература

1. Черпак Н.Т., Величко А.В. Высокотемпературные сверхпроводники в микроволновой технике // Успехи современной радиоэлектроники. 2000. - №4. – С.3-47.
2. M. Hein, High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1999. – 394p.
3. Vendik I.B., Vendik O.G., Kaparkov D. High Temperature Superconductor Devices for Microwave Signal Processing. Part II, Superconducting Microwave Circuits. – СПб.: ТОО „Складень”, 1997. – 135с.
4. Simons Rainee N. Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems. – John Wiley & Sons, Inc., 2001. – 440p.
5. Вендик О.Г., Козырев А.Б., Митрофанов А.П., Самойлова Т.Б., Пахомов О.В. Влияние СВЧ мощности на характеристику передачи линии на основе пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – 3, №6. – С.1041-1044.

THING FILM HTSC COPLANAR LINE INVESTIGATION

I.N. Bondarenko, A.A. Lavrinovich

The high-temperature superconductor planar microwave line section possibility as the device of protection of electronics from

pulse electromagnetic signals is considered. The experimental research of behaviour of a thin-film coplanar line section ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$ on sapphire) is carried out at influence of the microwave pulses of various power and duration. Transition in a resistive condition is observed, and also growth of losses is fixed at increase in duration of pulses.