

09;12

Устройство защиты от радиоимпульса на микрополосковой структуре с пленкой высокотемпературного сверхпроводника

© Б.А. Беляев, И.В. Говорун, А.А. Лексиков, А.М. Сержантов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск
Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск
Сибирский федеральный университет, Красноярск
E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 16 августа 2011 г.

Создана новая конструкция эффективного устройства защиты от мощного радиоимпульса на основе пары невзаимодействующих микрополосковых резонаторов, связь между которыми в рабочей полосе частот осуществляется через третий резонатор с пленочным элементом из высокотемпературного сверхпроводника, находящимся в сверхпроводящем состоянии. Под действием радиоимпульса, мощность которого превосходит некоторый порог, пленочный элемент переходит из сверхпроводящего в нормальное, высокорезистивное состояние, „разрушая“ связь между резонаторами, вследствие чего происходит ограничение мощности на выходе устройства за счет ее сильного отражения от входа.

Известно, что устройства защиты от мощного электромагнитного излучения (ограничители мощности) используются в радиолокаторах для предохранения входных цепей от собственных зондирующих радиоимпульсов, а также применяются как одно из средств борьбы с системами электронного противодействия. Наиболее широкое распространение в технике сверхвысоких частот (СВЧ) получили различные полупроводниковые ограничители [1,2], но они в некоторых случаях не удовлетворяют требованиям современной техники как по электрической прочности, так и по скорости срабатывания. Достаточно хорошие характеристики — малое время срабатывания, высокий уровень ограничения и высокую электрическую прочность — имеют вакуумные электронные устройства, использующие поперечную группировку электронного пучка в условиях циклотронного резонанса [3,4], физика

работы которых подробно рассмотрена в [5]. Однако такие устройства довольно сложны в изготовлении и настройке, имеют относительно большие габариты и массу, так как требуют присутствия сравнительно высокого постоянного и однородного магнитного поля.

Появление высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), обладающих чрезвычайно малым временем перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние ($\sim 10^{-13}$ s) и довольно высоким удельным сопротивлением в нормальном состоянии, положило начало исследованиям их возможного применения в устройствах защиты от электромагнитного излучения. Как правило, такие устройства представляют собой отрезки полосковых, микрополосковых или копланарных линий, согласованных с трактом, проводники которых выполнены из ВТСП материала [6]. Принцип действия устройств очевиден: если проходящий по линии сигнал имеет мощность, при которой плотность тока в линии превышает критическое значение, материал линии переходит в нормальное (высокорезистивное) состояние, вследствие чего и происходит ограничение падающей мощности на выходе. Однако при этом практически вся мощность, не дошедшая до выхода, поглощается в таких линиях передачи. Поэтому электрическая прочность таких устройств невысока и, в первую очередь, она определяется эффективностью теплоотвода.

В [7] описана конструкция, которая представляет собой, по сути, микрополосковый полосно-пропускающий фильтр, полосковые проводники резонаторов которого выполнены из ВТСП материала. Принцип действия такого устройства тоже достаточно очевиден: при превышении определенной величины мощности поступающего сигнала плотность высокочастотного тока в проводнике входного резонатора превысит пороговое для данного материала значение, и тот перейдет в нормальное состояние. Вследствие этого добротность резонатора резко падает, а потери в полосе пропускания фильтра резко возрастут. Однако и здесь, как показывают исследования [8], довольно значительная часть мощности сигнала не отражается, а поглощается входным резонатором, что снижает электрическую прочность устройства. Поэтому весьма актуальной является задача создания таких устройств, в которых как можно большая доля падающей мощности сигнала отражалась бы от входа при переходе ВТСП материала в нормальное состояние.

В [9] предложены устройства, конструкции которых представляют собой двухзвенные микрополосковые фильтры с топологией полосковых проводников, обеспечивающей компенсацию индуктивного и емкостного взаимодействия резонаторов на частотах первой полосы пропускания.

При этом полоса пропускания формируется благодаря связи между резонаторами, которая осуществляется через тонкопленочный элемент из ВТСП материала в форме кольца, охватывающего пучности высокочастотных токов обоих резонаторов, когда этот элемент находится в сверхпроводящем состоянии. При прохождении через устройство сигнала, мощность которого превышает некоторый порог, ВТСП элемент переходит в нормальное состояние с высоким значением сопротивления, что приводит к „разрушению“ связи резонаторов. Вследствие этого коэффициент прохождения СВЧ-мощности через устройство падает более чем на 20 dB, причем в основном за счет ее отражения. Однако в таком устройстве связь с ростом частоты падает, поэтому не удается получить относительную ширину рабочих частот более 10% в сантиметровом диапазоне длин волн. В данной работе исследована оригинальная микрополосковая конструкция защиты от радиоимпульса с пленочным ВТСП элементом, лишенная этого недостатка.

Конструкция устройства представляет собой, по сути, трехзвенный микрополосковый фильтр (рис. 1, *a*) на подложке 1, нижняя сторона которой 2 полностью металлизирована (заземляемое основание). Проводники одинаковых входного и выходного резонаторов 3 выполнены из „нормального“ металла (медь) и имеют форму „шпильки“. Средний резонатор 4 — составной, также имеет форму „шпильки“ и выполнен из меди, но в его центральной части сделан небольшой разрез, „шунтируемый“ ВТСП элементом 5. Полосковый проводник ВТСП элемента изготовлен в форме „гантели“ из пленки YBaCuO, нанесенной на подложку из NdGaO₃ толщиной 0.5 мкм (на рисунке не показана). Пленка ВТСП защищена от влияния атмосферы тонким слоем диэлектрика, поэтому она не имеет гальванического контакта с проводниками 4 среднего резонатора. Однако крайние, широкие участки ВТСП элемента, образуя с медными полосковыми проводниками достаточно большие емкости, обеспечивают практически „короткое“ замыкание на СВЧ.

Работа устройства основана на аномальной зависимости полного коэффициента связи на частоте первой моды колебаний сонаправленных шпильковых резонаторов от расстояния между их полосковыми проводниками [10]. Это явление было обнаружено на связанных резонаторах типа „гантели“ [11], которые использовались в устройстве защиты [9]. На рис. 1, *b* приведены зависимости модуля полного коэффициента связи $|k|$, а также коэффициентов индуктивного k_L и емкостного k_C взаимодействия шпильковых резонаторов от расстояния между их проводниками S , нормированного на толщину подложки h [10]. Аномальное

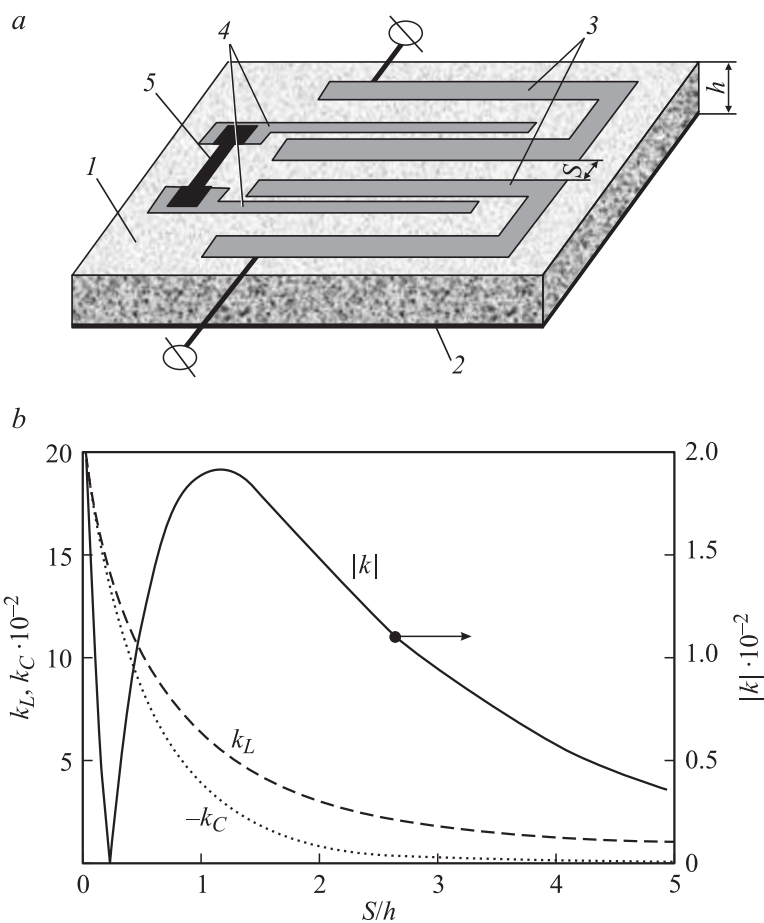


Рис. 1. Конструкция устройства защиты и зависимости модуля полного $|k|$, индуктивного k_L и емкостного k_C коэффициентов связи наружных микрополосковых резонаторов от расстояния между ними, нормированного на толщину подложки: 1 — подложка, 2 — экран (заземляемое основание), 3 — полосковые проводники резонаторов с компенсацией связи, 4 — полосковые проводники составного резонатора, 5 — пленочный проводник ВТСП элемента.

поведение полного коэффициента связи заключается в том, что с увеличением расстояния S он сначала резко падает, обращаясь в нуль при некотором зазоре между проводниками, а затем растет, достигая определенного максимума, и лишь только после этого наблюдается его нормальное монотонное уменьшение. Это связано, во-первых, с тем, что коэффициенты индуктивного k_L и емкостного k_C взаимодействия резонаторов имеют разные знаки, во-вторых, они по-разному спадают с расстоянием S . Поэтому при определенном зазоре между полосковыми проводниками, где эти коэффициенты становятся равными по модулю, они, естественно, компенсируют друг друга. В результате связь между резонаторами в микрополосковой структуре пропадает, и на ее амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) вместо первой полосы пропускания наблюдается полюс затухания [10].

В исследуемой конструкции (рис. 1, a) зазор S между резонаторами 3 подобран таким, чтобы в отсутствие ВТСП элемента 5 прохождение СВЧ мощности на частотах в области первой моды колебаний было бы минимальным. В этом случае связь между входным и выходным резонаторами отсутствует, т.е. $|k| = 0$. При наличии ВТСП элемента в сверхпроводящем состоянии микрополосковая конструкция настроена как трехзвенный фильтр, но уже на встречно-направленных шпильковых резонаторах, полоса пропускания которого определяется величиной взаимодействия среднего резонатора с крайними. Важно отметить, что для встречно-направленных шпильковых резонаторов в первой полосе пропускания емкостное и индуктивное взаимодействия имеют одинаковый знак и поэтому усиливают друг друга [10]. Переход ВТСП элемента в нормальное, высокорезистивное состояние „разрушает“ средний резонатор, что приводит к значительному подавлению связи между входным и выходным резонаторами. В результате коэффициент передачи устройства падает на несколько десятков децибел, причем преимущественно за счет отражения сигнала от входа.

В подтверждение вышесказанному на рис. 2 приведены АЧХ исследуемой конструкции, когда ВТСП элемент находится в сверхпроводящем состоянии (1, 3) и когда он находится в нормальном состоянии (2, 4); здесь же вверху представлена фотография макета устройства. Микрополосковая структура устройства изготавливалась на подложке из поликора с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9.8$ толщиной 0.5 mm. Внешние размеры входного и выходного шпильковых резонаторов 3 (рис. 1, a) 10.2×8.2 mm, а ширина образующих их полосковых проводников 0.6 mm, при этом величина зазора $S = 2.8$ mm. Длина и

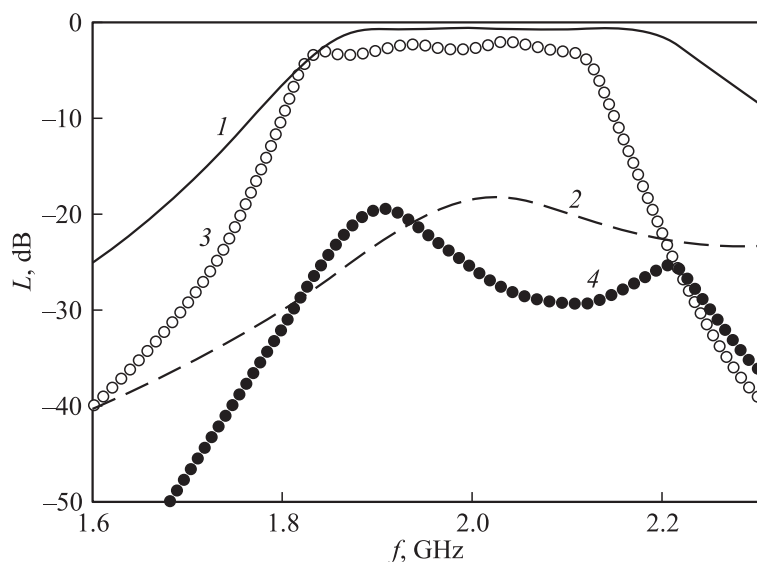
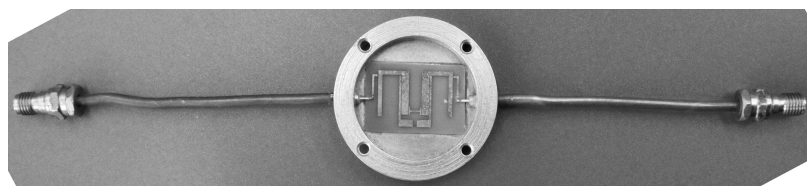


Рис. 2. Фотография устройства и его АЧХ при сверхпроводящем (1,3) и нормальном (2,4) состоянии ВТСП элемента. Сплошные линии — результат моделирования, точки — эксперимент.

ширина высокоомных участков нерегулярных проводников 4, образующих составной средний резонатор, 17.9 и 0.6 mm соответственно, длина и ширина низкоомных участков по 2 mm. Зазоры между проводниками 4 и проводниками крайних резонаторов — 0.1 mm. Рабочая температура устройства задавалась охлаждением жидким азотом.

Видно (рис. 2), что результаты численного расчета 3D-модели рассматриваемой конструкции (сплошная и штриховая линии) качественно совпадают с экспериментальными измерениями (точки). При этом в мо-

дели для ВТСП пленки в сверхпроводящем состоянии использовалась рассчитанная на рабочей частоте величина поверхностного сопротивления [12], а в нормальном состоянии — измеренное значение $95 \Omega/\square$ (толщина пленки $0.1 \mu\text{m}$). Крайние участки элемента в форме гантели из ВТСП пленки имели размеры $2 \times 2 \text{ mm}$ при длине „перешейка“ 1.4 mm и его ширине 0.3 mm . В таком устройстве, как показал эксперимент (белые точки), ширина полосы пропускания, определяющая рабочую полосу частот, примерно 350 MHz с центральной частотой $\sim 2 \text{ GHz}$, но при переходе ВТСП элемента в нормальное состояние коэффициент передачи в этой полосе частот падает более чем на 20 dB (черные точки), что хорошо согласуется с расчетом.

На рис. 3, *a* приведены передаточные характеристики макета защитного устройства для трех значений ширины узкого участка ВТСП элемента: 0.6 mm (кривая 1), 0.3 mm (кривая 2) и 0.1 mm (кривая 3). Измерения проводились в непрерывном режиме на частоте 2 GHz . Как и следовало ожидать, наблюдается снижение порога ограничения мощности с уменьшением ширины „перешейка“ ВТСП элемента, что связано с ростом плотности высокочастотного тока в нем. Этот факт подтверждается также существенным различием наклона кривых на начальном этапе (см. вставку на рис. 3, *a*). Характер наблюдаемых зависимостей объясняется тем, что используемый в работе тип ВТСП материала относится к сверхпроводникам второго рода, фазовый переход в которых с увеличением магнитного поля или тока происходит не скачком, а в некотором интервале. При достижении сигнала пороговой мощности в этом интервале наблюдается сосуществование сверхпроводящей и нормальной фаз, причем доля последней растет с увеличением мощности сигнала. Это приводит к постепенному увеличению сопротивления „перешейка“ ВТСП элемента и проявляется в том, что выходная мощность „запертого“ устройства в некоторых пределах не зависит от мощности на входе.

Очень важно знать при проектировании устройств защиты от радиоимпульса, как зависят в используемой конструкции относительная ширина полосы пропускания в открытом состоянии (ширина полосы рабочих частот) и уровень заграждения в запертом состоянии от центральной частоты названной рабочей полосы частот. Для выяснения этого был проведен численный анализ конструкции, которая отличалась от вышеописанного макета лишь тем, что ВТСП элемент в ней представлял полосковый проводник шириной 0.1 mm , непосредственно

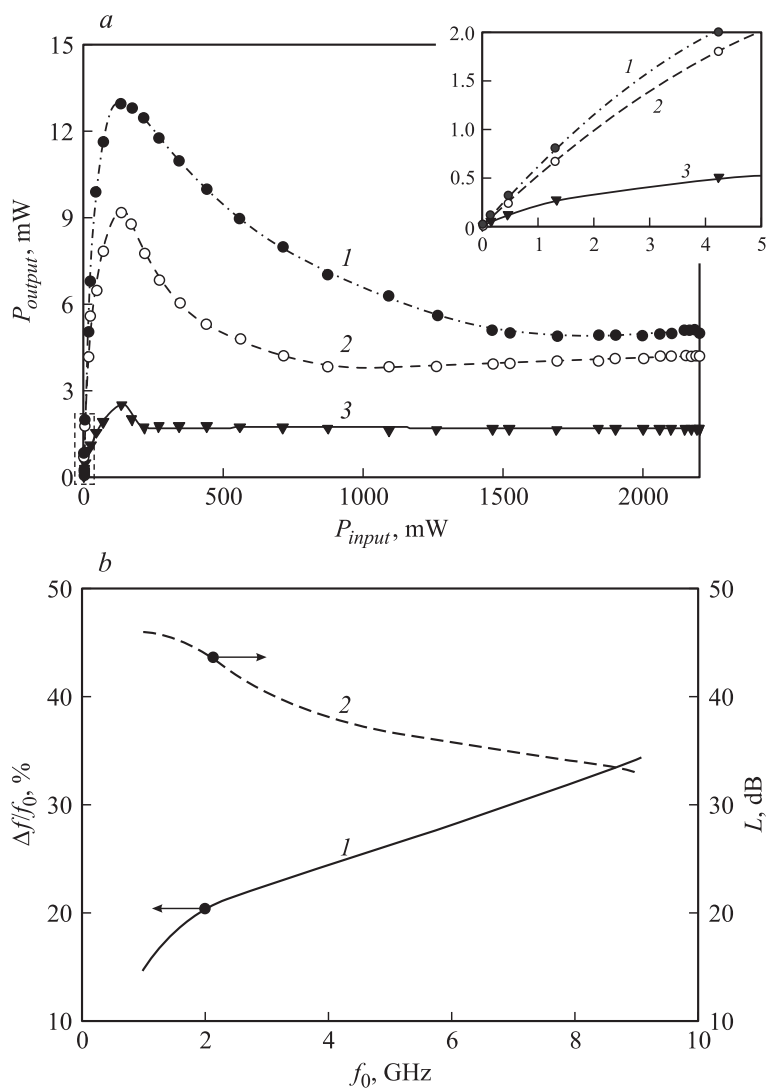


Рис. 3. *a* — измеренные зависимости выходной мощности от мощности на входе устройства для трех значений ширины узкого участка ВТСП элемента: 1 — 0.6 mm; 2 — 0.3; 3 — 0.1 mm. *b* — зависимости относительной ширины полосы пропускания (1) и уровня загораждения в запертом состоянии (2) от центральной частоты устройства.

соединяющий проводники составного резонатора. На рис. 3, *b* приведены полученные таким образом зависимости: сплошная линия — относительная ширина полосы пропускания в открытом состоянии, штриховая — уровень заграждения сигнала устройством в запером состоянии. Эти результаты свидетельствуют, что на основе предложенной конструкции в обозначенном диапазоне частот можно проектировать работоспособные устройства, при этом параметры устройства остаются достаточно высокими в достаточно широком диапазоне, охватывая дециметровый и сантиметровый диапазоны длин волн.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, интеграционного проекта № 5 СО РАН.

Список литературы

- [1] Ропий А.И., Старик А.М., Шутов К.К. Сверхвысокочастотные защитные устройства. М.: Радио и связь, 1993. 128 с.
- [2] Семенов А.В., Боженов В.Г., Геннеберг В.А. // Патент России № 2058630. БИ. 2000. № 17.
- [3] Будзинский Ю.А., Кантюк С.П., Петровский В.Б. // Патент России № 2167480. БИ. 2001. № 14.
- [4] Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Ванке В.А. // Электроника. 2005. № 4. С. 38–42.
- [5] Ванке В.А. // УФН. 2005. Т. 175. № 9. С. 957–978.
- [6] Каленюк А.А. // Физика низких температур. 2009. Т. 35. № 2. С. 141–149.
- [7] Козырев А.Б. // Соревский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 93–100.
- [8] Говорун И.В., Лексиков А.А. // Сб. науч. трудов „Современные проблемы радиоэлектроники“. Красноярск: СФУ, 2011. С. 300–305.
- [9] Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Говорун И.В. // Патент России № 2395872. БИ. 2010. № 21.
- [10] Беляев Б.А., Сержантов А.М. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 1. С. 24–31.
- [11] Беляев Б.А., Титов М.М., Тюрнев В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 8. С. 722–727.
- [12] Newman N., Lyons W.G. // J. Superconductivity. 1993. V. 6. N 3. P. 119–160.