

МИКРОПОЛОСКОВОЕ УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ МОЩНОГО РАДИОИМПУЛЬСА С ВТСП ЭЛЕМЕНТОМ

Б. А. Беляев^{1,2}, И. В. Говорун², А. А. Лексиков², А. М. Сержантов³

¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет, Красноярск

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск

Получена 30 июня 2011 г.

Аннотация. Продемонстрирована возможность создания устройства защиты от мощного радиоимпульса на основе микрополосковых резонаторов, связь между которыми осуществляется через третий резонатор, содержащий ВТСП элемент. Работа устройства основана на том, что под действием радиоимпульса, мощность которого превосходит заданный порог, ВТСП элемент переходит из сверхпроводящего в нормальное, высокорезистивное состояние, вследствие чего добротность связующего резонатора падает до неопределяемой величины, а связь между входным и выходным резонаторами "разрушается".

Ключевые слова: устройство защиты, микрополосковый резонатор, ВТСП, коэффициенты связи резонаторов, уровень заграждения.

Abstract. An ability is demonstrated to create a device protecting from intense radio-pulse on the base of microstrip resonators coupled trough the third one containing HTS element. The device operates as follows. Under radio-pulse action whose intense exceeds a specific threshold the HTS element switches from the superconductive state to the normal one having high resistance, as a sequence, the quality factor of the coupling resonator drops, and the coupling between input and output resonators is destroyed.

Keywords: protector, microstrip resonator, HTS, coupling coefficients, rejection level.

Введение

Устройства защиты от мощного радиоимпульса применяются как одно из средств в системах электронного противодействия, а также для предохранения входных цепей радиолокаторов различного назначения от собственного излучения. Очень хорошие характеристики – малое время срабатывания и высокий уровень заграждения – имеют устройства на основе циклотронного резонанса [1], однако они довольно сложны в изготовлении и настройке, а также отличаются значительной массой. Очень широкое распространение получили полупроводниковые устройства – ограничители мощности, однако их скорости срабатывания сравнительно малы [2,3]. Появление высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), обладающих довольно высоким удельным сопротивлением в нормальном состоянии, положило начало исследованиям их возможного применения в устройствах защиты. В первую очередь это было связано с чрезвычайно малым ($\sim 10^{-13}$ с) временем перехода ВТСП из сверхпроводящего состояния в нормальное под действием магнитного поля или электрического тока при превышении ими порогового значения. Очевидно, что благодаря такому обстоятельству время срабатывания устройств на их основе должно быть рекордно малым.

Как правило, устройство защиты на основе ВТСП представляет собой отрезок полосковой или копланарной линии, согласованной с трактом и выполненной из этого же материала [4]. Принцип действия такого устройства 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 ток и ограничивается. Однако следует иметь в виду, что за время, которое необходимо для переключения, импульс по линии пройдет десятки или сотни доли миллиметра, и этим будет определяться длина ее участка, перешедшего в нормальное состояние. Очевидно, что чем меньше площадь такого участка, тем меньшим уровнем мощности такое устройство может быть выведено из строя. В [5] описана конструкция, которая представляет собой, по сути,

микрорезонансный полосно-пропускающий фильтр, полосковые проводники резонаторов которого выполнены из ВТСП материала. Принцип действия такого устройства тоже достаточно очевиден: при превышении мощности сигнала, поступающего в устройство, определенной величины плотность высокочастотного тока в резонаторе превысит пороговое для данного материала значение, и тот перейдет в нормальное состояние. Вследствие этого добротность резонатора резко упадет, а потери в полосе пропускания фильтра резко возрастут. Однако здесь тоже значительная часть мощности сигнала, от которого и должно устройство защищать, поглощается полосковыми проводниками резонаторов (выполненными из ВТСП материала), что может вывести его из строя. Поэтому актуальной является задача создания таких устройств, в которых как можно большая часть мощности сигнала отражалась бы от входа при переходе ВТСП материала в нормальное состояние. В [6] предложено устройство, которое по структуре представляет собой трехзвенный микрорезонансный фильтр, а топология полосковых проводников в нем подобрана такой, что на частотах первой моды колебаний индуктивное и емкостное взаимодействия входного и выходного резонаторов компенсируют друг друга, связь между ними осуществляется через третий (средний) резонатор, имеющий в центральной части вставку (полосковый проводник), выполненную из ВТСП пленки – ВТСП элемент. При прохождении через устройство сигнала, мощность которого превышает некоторый порог, в ВТСП элементе наводятся токи, плотность которых превышает критическое для данного ВТСП материала значение, и он переходит в нормальное состояние с высоким значением сопротивления. Это приводит к резкому падению добротности среднего резонатора и "разрушению" связи через него между входным и выходным резонаторами, вследствие чего коэффициент прохождения устройства падает на 20 и более децибел. В настоящей работе приводятся результаты исследований, выполненные на макете подобного устройства, в котором связь ВТСП элемента с полосковыми проводниками резонатора не гальваническая, а осуществлена емкостным способом.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена конструкция исследуемого устройства, которое представляет собой, по сути, трехзвенный микрополосковый фильтр на подложке 1, нижняя сторона которой 2 полностью металлизирована (заземляемое основание). Входной 3 и выходной 4 резонаторы выполнены из нормального металла (медь) и имеют форму "шпилек". Средний резонатор 5 – составной, он в целом тоже имеет форму "шпильки", в центре которой сделан вырез, "шунтируемый" ВТСП элементом 6. ВТСП элемент, имеющий форму "гантели", выполнен из пленки $YBaCuO$, нанесенной на подложку из $NdGaO_3$ (на рисунке не показана). Широкими участками ВТСП элемент прижимается к полосковым проводникам среднего резонатора, выполненным из меди. Гальваническая связь между ними отсутствует, но емкостная имеет величину, достаточную, чтобы в таком резонаторе возбуждался резонанс на рабочей частоте устройства.

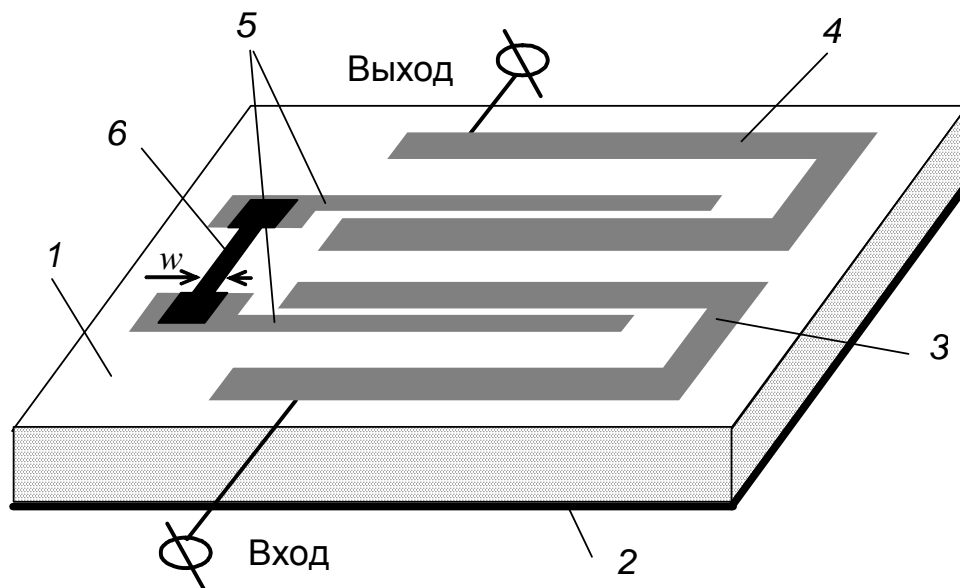


Рис. 1. Конструкция устройства защиты. 1 – подложка, 2 – заземляемое основание, 3,4 – полосковые проводники резонаторов, непосредственное взаимодействие между которыми скомпенсировано на рабочей частоте, 5 – полосковые проводники составного резонатора, 6 – пленочный проводник ВТСП элемента.

Микрополосковые резонаторы в форме шпильки известны тем, что они имеют аномальное поведение полного коэффициента связи от расстояния между ними при их сонаправленной взаимной ориентации. На рис. 2 приведены характерные зависимости модуля полного коэффициента связи $|k|$, а также индуктивного k_L и емкостного k_C , от расстояния между такими резонаторами, нормированного на толщину подложки [7]. Следует отметить, что эти зависимости рассчитаны на резонансной частоте с использованием одномерной модели и квазистатического приближения. При этом сами коэффициенты индуктивной и емкостной связи вычислялись на основе энергетического подхода – как отношение энергий соответственно магнитного и электрического полей, запасаемых резонаторами совместно, к полной энергии резонаторов [7].

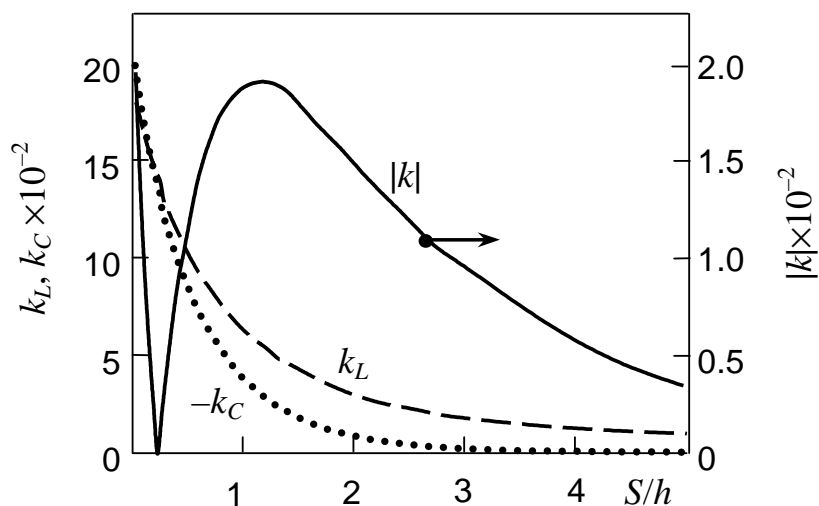


Рис. 2. Зависимости модуля полного $|k|$, индуктивного k_L и емкостного k_C коэффициентов связи микрополосковых резонаторов от расстояния между ними, нормированного на толщину подложки, в структурах с аномальным поведением взаимодействия между резонаторами [7].

Видно, что с увеличением расстояния полный коэффициент связи сначала падает, обращаясь в нуль на определенном расстоянии, затем растет, что и является аномалией, достигает максимума, и, наконец, снова, как и положено, падает. Такое поведение полного коэффициента связи обусловлено тем, что, во-первых, коэффициенты индуктивного k_L и емкостного k_C взаимодействия

резонаторов имеют разные знаки, а, во-вторых, разный характер спада с расстоянием между ними. Поэтому имеется определенное расстояние, при котором эти коэффициенты становятся равными по модулю и компенсируют друг друга. В результате связь между резонаторами на резонансной частоте пропадает, а на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) такого "фильтра" вместо полосы пропускания появляется полюс затухания [7].

В исследуемом устройстве расстояние между резонаторами 3 и 4 выбрано таким, что в отсутствие ВТСП элемента 6 (это равносильно отсутствию резонатора 5), связь между входным и выходным резонатором отсутствует, т.е. $|k|=0$ на резонансной частоте. При наличии ВТСП элемента 6 и его сверхпроводящем состоянии формируется резонатор 5 с собственной частотой, равной частоте резонаторов 3 и 4, и система в целом функционирует как трехзвенный фильтр с полосой пропускания, определяемой величиной попарного взаимодействия резонаторов 3 – 5 и 4 – 5. Это взаимодействие в основном емкостное, при этом сравнительно слабое индуктивное взаимодействие имеет одинаковый с ним знак на резонансных частотах. При переходе ВТСП элемента в нормальное, высокорезистивное состояние добротность резонатора 5 падает до неопределяемой величины, что приводит к "разрыву" связи между входным и выходным резонаторами, а коэффициент передачи устройства падает на несколько десятков децибел, причем преимущественно за счет отражения сигнала от входа.

На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента передачи макета устройства, конструкция которого приведена на рис. 1, для двух случаев – первый, когда ВТСП элемент находится в сверхпроводящем состоянии (СС), и второй, когда он находится в нормальном состоянии (НС). Сплошными линиями приведены результаты, полученные моделированием с помощью программы Sonnet Lite, а точками, экспериментально измеренные. Видно, что когда ВТСП элемент находится в сверхпроводящем состоянии, устройство имеет полосу пропускания (рабочую полосу) шириной примерно 350 МГц, центрированную на частоте около 2 ГГц. При переходе ВТСП элемента в

нормальное состояние коэффициент передачи устройства падает до $-20...-30$ дБ в рабочей полосе макета, и примерно также по результатам моделирования. Значительно более высокие, чем по результатам моделирования, потери в рабочей полосе макета получились, по-видимому, вследствие невысокого качества используемых в эксперименте ВТСП пленок.

При моделировании использовались значения поверхностного сопротивления ВТСП пленки, взятые из литературных данных [8] для сверхпроводящего состояния, и $95 \text{ Ом}/\square$ в нормальном состоянии по результатам измерений. Удельная проводимость медных проводников принималась в восемь раз более высокой в соответствии с рабочей температурой устройства 78 К . Зазор между ВТСП проводником и проводниками 5 составного резонатора был принят равным 0.02 мкм .

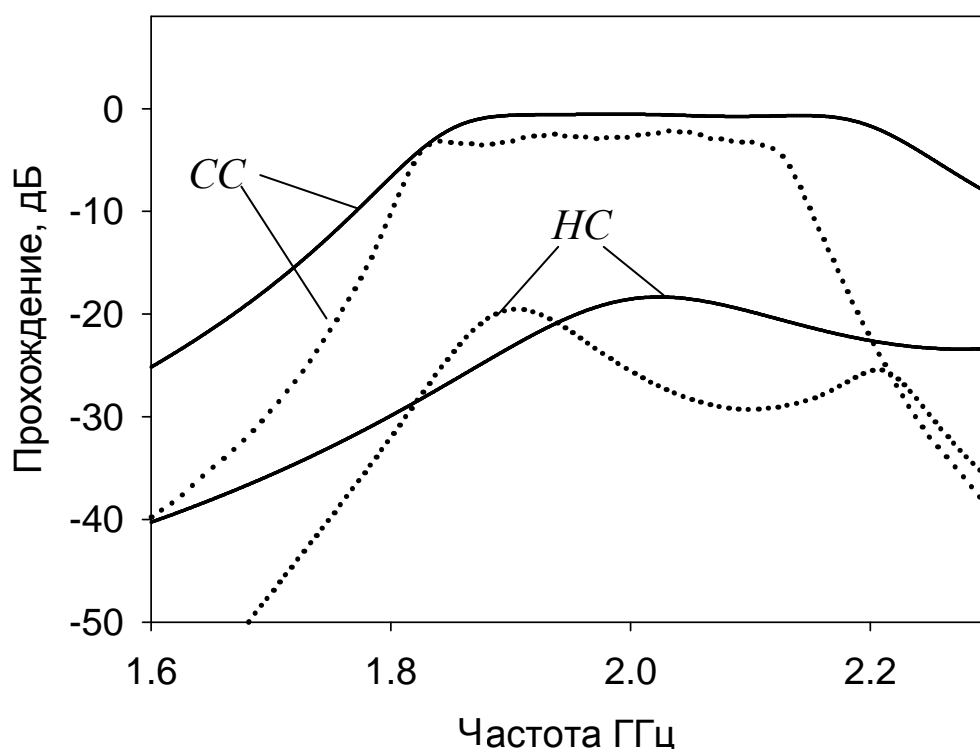


Рис. 3. АЧХ устройства при сверхпроводящем (СС) и нормальном (НС) состоянии ВТСП элемента. Сплошные линии – результат моделирования, точки – эксперимент.

Конструктивные параметры макета были следующие. Подложка из керамики поликор ($\epsilon=10.5$) толщиной 0.5 мм, размеры резонаторов-шпилек 3 и 4: 10.2×8.2 мм при ширине образующего их полоскового проводника 0.5 мм. Расстояние между ними 2.8 мм. Размеры проводников 5, образующих составной резонатор: длина и ширина высокоомных участков 17.9 мм и 0.6 мм соответственно, длина и ширина низкоомных участков по 2 мм. Зазоры между проводниками 5 и проводниками резонаторов 3 и 4 – 0.1 мм. Три пленочных ВТСП (YBaCuO, толщина 0.1 мкм) элемента 6 использовались в эксперименте. Они были выполнены на подложке из NdGaO₃ толщиной 0.5 мм и имели форму "гантельки". При одинаковых размерах крайних участков (2×2 мм) и длине "перешейка" (1.4 мм), они отличались шириной последнего: 0.5 мм, 0.3 мм и 0.1 мм. В эксперименте ВТСП элемент прижимался широкими участками непосредственно к широким участкам проводников 5, образующих составной резонатор. Рабочая температура устройства задавалась охлаждением жидким азотом.

Следует отметить, что приведенные на рис. 3 АЧХ устройства соответствуют ширине узкого участка ВТСП элемента 0.3 мм.

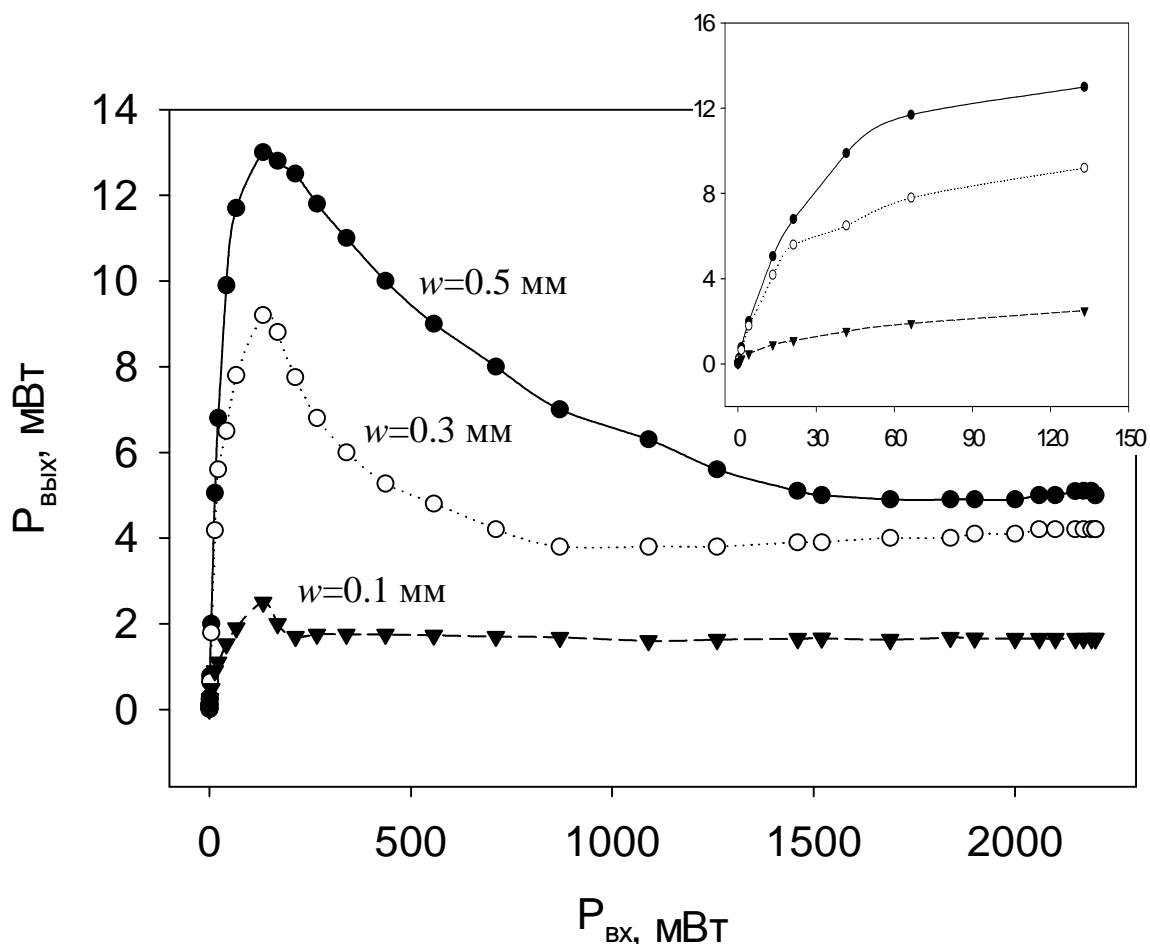


Рис. 4. Зависимости выходной мощности от мощности на входе макета защитного устройства для разных значений ширины узкого участка ВТСП элемента w . Частота 2 ГГц.

На рис. 4 приведены передаточные характеристики макета защитного устройства для трех значений ширины узкого участка ВТСП элемента w : 0.5, 0.3 и 0.1 мм. Измерения проводились в непрерывном режиме на частоте 2 ГГц. Во вставке приведены начальные участки этих зависимостей, из которых видно, что ширина узкого участка ВТСП элемента влияет на величину уровня входной мощности, при которой происходит резкое изменение "наклона" передаточной характеристики: при $w=0.5$ мм $P_{\text{ВХ}} \approx 50$ мВт, при $w=0.3$ мм $P_{\text{ВХ}} \approx 20$ мВт и при $w=0.1$ мм $P_{\text{ВХ}} < 10$ мВт. Уровень входной мощности, при котором происходит изменение наклона передаточной характеристики, является порогом срабатывания устройства, и, таким образом, шириной узкого участка ВТСП элемента w можно задавать этот порог, и, кроме того, как видно из рис. 4, максимальный уровень мощности, проходящей через устройство.

Нетривиальный ход кривых при входных мощностях 150 мВт и более можно объяснить, по-видимому, тем, что используемый в работе тип ВТСП материала относится к сверхпроводникам второго рода, фазовый переход которых по полю или току происходит не скачком, а в некотором интервале их величин. Поэтому после достижения сигналом пороговой мощности происходит переход ВТСП в промежуточное состояние, характеризующееся сосуществованием сверхпроводящей и нормальной фаз, причем доля последней растет с увеличением мощности сигнала, что ведет к постепенному увеличению сопротивления "перешейка" ВТСП элемента и проявляется в том, что в некоторых пределах выходная мощность сигнала не зависит от его мощности на входе в "запертом" состоянии устройства.

Поскольку проводимость ВТСП элемента зависит от мощности обрабатываемого сигнала, то это должно приводить к заметным нелинейным явлениям при работе устройства. Была предпринята попытка оценить нелинейность исследуемого макета по величине, как это общепринято, третьей гармоники сигнала рабочей частоты. С этой целью был изготовлен и установлен на выходе защитного устройства микрополосковый фильтр, настроенный на центральную частоту 6 ГГц и с подавлением сигнала частотой 2 ГГц на 60 дБ. Были вновь измерены зависимости мощности теперь уже на выходе фильтра от мощности сигнала на входе в устройство. Полученные зависимости оказались полностью подобными приведенным на рис. 4, с той лишь разницей, что величины $P_{\text{вых}}$ при этом были ровно на 60 дБ ниже. Этот результат показывает, что либо нелинейность в подобной конструкции крайне невелика, либо ее собственные селективные свойства достаточны для существенного подавления третьей гармоники.

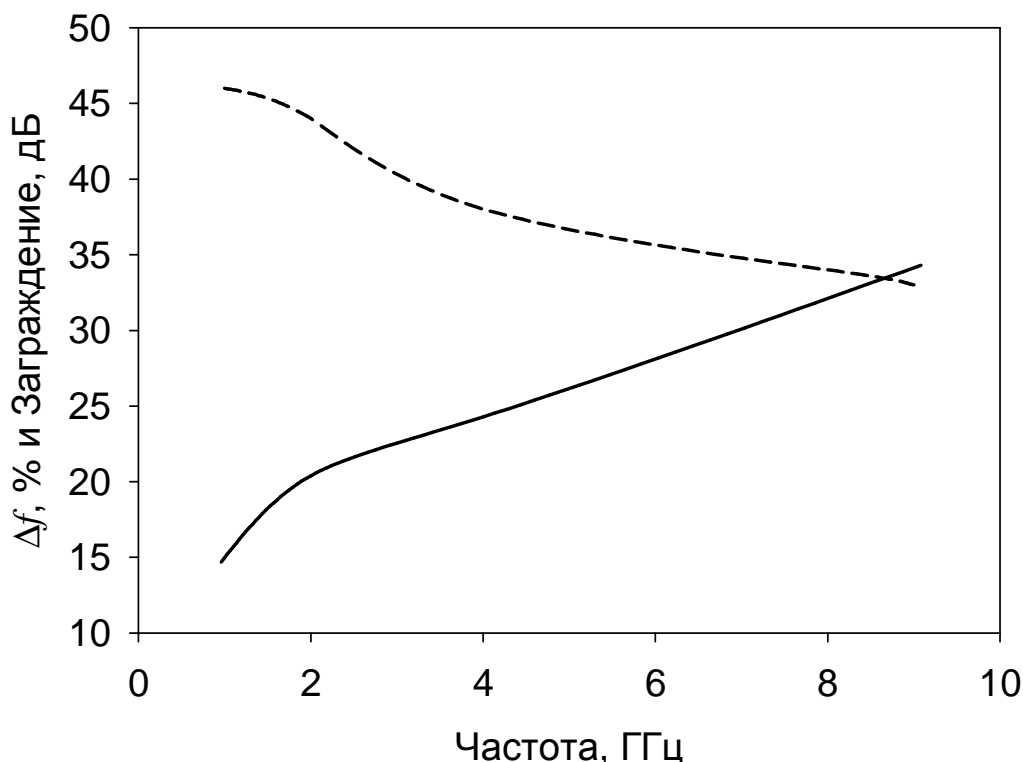


Рис. 5. Рассчитанные зависимости относительной ширины полосы пропускания (сплошная линия) и уровня заграждения в запертом состоянии (штрихованная линия) от рабочей частоты устройства.

Очень важным с точки зрения проектирования устройства на основе конкретной конструкции знать, как зависят в ней относительная ширина полосы пропускания в открытом состоянии и уровень заграждения в запертом от выбранной рабочей частоты. С этой целью с помощью моделирования было проведено исследование, конструкции, которая отличалась от вышеописанного макета тем, что ВТСП элемент в ней представлял полосковый проводник шириной 0.1 мм, непосредственно соединяющий проводники 5 составного резонатора. На рис. 5 приведены полученные таким образом зависимости: сплошная линия – относительная ширина полосы пропускания в открытом состоянии, штрихованная – уровень заграждения сигнала устройством в запертом состоянии. Эти результаты свидетельствуют, что в обозначенном

диапазоне частот можно проектировать работоспособные устройства на основе предложенной конструкции.

Работа выполнена при поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы.

Литература

1. Пат. 2167480 Российская Федерация / Будзинский Ю.А., Кантюк С.П., Петровский В.Б.; опубл. 20.05.2001, Бюл. №14.
2. Ропий А.И., Старик А.М., Шутов К.К. Сверхвысокочастотные защитные устройства. М.: Радио и связь, 1993. – 128 с.
3. Пат. 2058630 Российская Федерация / Семенов А.В., Боженов В.Г., Геннеберг В.А.; опубл. 2000, Бюл. №17.
4. Каленюк А.А. // Физика низких температур. – 2009.– Т.35. – №2. – С.141-149.
5. Козырев А.Б. // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8. – № 1. – С. 93–100.
6. Говорун И.В., Лексиков А.А, Сержантов А.М. // Известия ВУЗов, Физика. – 2010. – №9/2. – С. 175-179.
7. Беляев Б.А., Сержантов А.М., // Радиотехника и Электроника. – 2004. – Т. 49. – №1. – С. 24-31.
8. *Newman N., Lyons W.G.* // *J. Superconductivity*. 1993. – V. 6. – N 3. – P. 119-160.