

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, М.В. Степанова

Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ПОДМАГНИЧИВАНИЯ ТОНКОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ-ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ

*В работе изложено экспериментальное подтверждение возможности использования датчиков-ограничителей на основе тонких пленок ВТСП, для ограничения амплитуд мощных электромагнитных излучений сверхмалой длительности, и показана возможность изменения чувствительности сверхпроводящих приборов путем изменения внешнего магнитного поля.*

**датчик-ограничитель, высокотемпературный сверхпроводник, электромагнитные излучения**

### Введение

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в работах [1 – 5], показали, что обратимое разрушение сверхпроводимости в тонких пленках высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), например иттриевой керамики ( $YBa_2Cu_3O_7$ ), зависит от параметров протекающего тока и геометрических размеров пленки. Процесс разрушения сверхпроводящей (S) фазы происходит под воздействием транспортного тока, величина которого достигает значения  $I_{c1}$ , при этом в пленке начинается переход из сверхпроводящего в нормальное (N) состояние. Однако, в прикладном аспекте, существует необходимость изменения чувствительности данных сверхпроводящих пленок, для создания активных датчиков-ограничителей (ДО) мощных электромагнитных излучений (МЭМИ). Согласно результатов теоретических исследований [4, 5] увеличение чувствительности возможно за счет внешнего подмагничивания сверхпроводящего элемента. Поэтому **целью данной работы** является подтверждение эффекта обратимого быстрого токового разрушения сверхпроводимости тонкой ВТСП пленки, необходимого для создания схемотехнического элемента защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от воздействия МЭМИ через антенно-фидерные устройства (АФУ) и подтверждение теоретических положений, связанных с изменением чувствительности ДО за счет внешнего подмагничивания.

### Образцы и методика

Для проведения эксперимента использовались: генератор электромагнитного излучения; датчик-ограничитель; измерительное устройство (осциллограф TDS7000/B); блок сопротивлений ( $R=97$  кОм); две дипольные антенны (высота антенны  $h = 0,5$  м).

Генератор электромагнитного излучения – сильноточный релятивистский ускоритель РЭП «Темп-А», формирующий МЭМИ с параметрами: напряженностью электрического поля  $E \sim 0,7 \div 0,8$  МэВ, током  $I \sim 7$ кА, длительностью импульса  $\tau_{и} = 15$  нс, при величине переднего фронта  $\tau_{ф} = 1 \div 2$  нс (рис. 1)

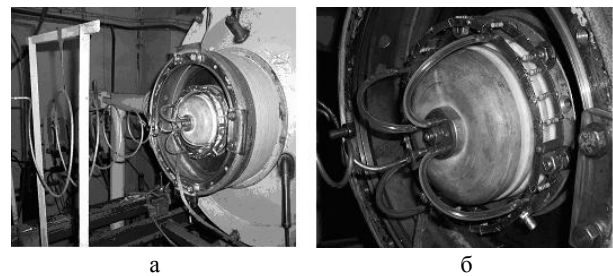


Рис. 1. Сильноточный релятивистский ускоритель РЭП «Темп-А»: а – общий вид спиральной антенны; б – делитель

На рис. 2 – датчик-ограничитель нагрузкой которого является осциллограф TDS7000/B.

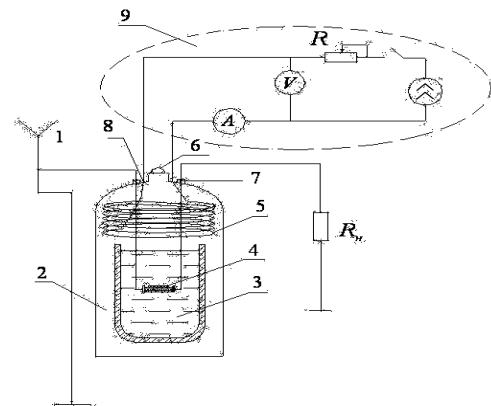


Рис. 2. Датчик-ограничитель: 1 – антенна; 2 – резервуар (термостат); 3 – жидкий азот; 4 – сверхпроводящее защитное устройство; 5 – катушка внешнего подмагничивания; 6 – клапан стравливания; 7 – отверстие для ввода коаксиального кабеля; 8 – отверстие для ввода провода с током и к катушке подмагничивания; 9 – датчик

Основным элементом ДО является сверхпроводящее защитное устройство (СВЗУ) на основе тонкой ВТСП пленки (рис. 3). Конструктивно, данные СВЗУ включают в себя: высокотемпературный сверхпроводник 1 ленточного типа прямоугольного сечения (тонкая пленка), расположен на подложке 2 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r2}$ , на обратной стороне которой находится металлический экран 3 [3, 5]. Данное устройство подключается к коаксиальному кабелю 4 входной цепи АФУ последо-

вательно при помощи коаксиально-полосковых переходов (КПП) 5. Следует также отметить, что во избежание окисления контактов на границе раздела «ВТСП - металл», при замыкании ВТСП пленки с КПП, в качестве припоя применяются Ag или Au (рис. 3). Данная конструкция помещается в термостат с жидким азотом, температура кипения которого составляет 77 К. Для того, чтобы в нормальной фазе получить максимально возможное сопротивление, тонкую ВТСП пленку располагают меандром. При этом сверхпроводник длиной  $l = 0,25$  м и шириной  $W = 40 \cdot 10^{-6}$  м компактно располагается на подложке площадью 2 см<sup>2</sup>, что позволяет достичь сопротивления в сотни кОм в нормальной фазе. Следует отметить, что для реализации механизма быстрого токового разрушения сверхпроводимости, обеспечивающего малую длительность существования смешанного состояния, толщина тонкой ВТСП пленки  $h$  не должна превышать  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м [2].

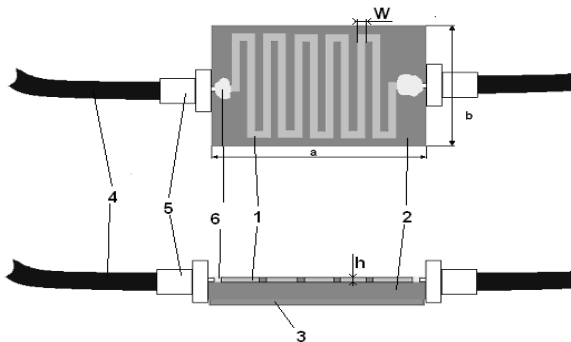


Рис. 3. Сверхпроводящее защитное устройство, на основе тонкой ВТСП пленки, и его конструктивные параметры: 1 – высокотемпературный сверхпроводник; 2 – подложка; 3 – металлический экран; 4 – коаксиальный кабель; 5 – коаксиально-полосковый переход; 6 – золотой припой

Однако данное защитное ВТСП устройство является пассивным элементом, его характеристики зависят не только от параметров импульса, но и от его конструктивных размеров, которые при эксплуатации изменять невозможно.

Использование эффекта внешнего подмагничивания тонкой ВТСП пленки позволит инициировать начало разрушения сверхпроводимости раньше, чем транспортный ток, наводимый МЭМИ, достигнет критического значения  $I_{c1}$  без изменения площади поперечного сечения проводника. Варьируя внешнее магнитное поле, возможно менять значение  $I_{c1}$  тонкой ВТСП пленки. Данное свойство и лежит в основе создания активных датчиков-ограничителей МЭМИ, чувствительность которых возможно изменять при эксплуатации. Поэтому в термостат ДО (рис. 2) помещается катушка 5, которая будет источником внешнего подмагничивающего поля. Катушка внешнего подмагничивания датчика-ограничителя имеет следующие конструктивные параметры: радиус катушки,  $R = 5 \cdot 10^{-3}$  м; высота катушки,  $l = 5 \cdot 10^{-2}$  м; расстояние от центра катушки до объек-

та воздействия,  $x = 3 \cdot 10^{-2}$  м; количество витков в катушке  $N = 100$  витков; ток в обмотке катушки,  $I_{\text{катушки}} \sim (0 \div 577 \cdot 10^{-3})$  А; ток, наводимый магнитным полем катушки в СВЗУ  $I_0 = (0 \div 2.5 \cdot 10^{-3})$  А.

Модель воздействия МЭМИ через АФУ на нагрузку с датчиком-ограничителем, построенным на основе тонкой пленки ВТСП, представлена на схеме проведения эксперимента (рис. 4).

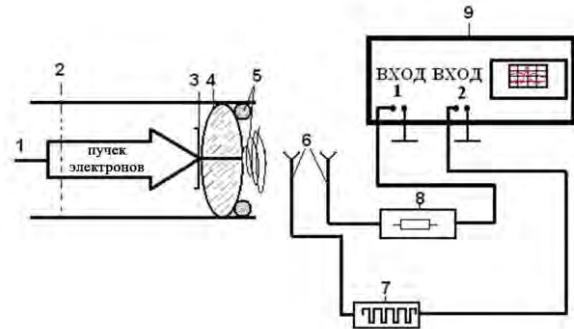


Рис. 4. Схема проведения эксперимента: 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – изолятор; 5 – излучающая (коническая спиральная) антенна; 6 – приемные антенны (дипольные антенны длиной 0,5 м); 7 – датчик-ограничитель; 8 – блок сопротивлений; 9 – осциллограф

В S фазе через сверхпроводник течет транспортный ток, величина которого меньше критического тока  $I_{c1}$ . При достижении током значения  $I_{c1}$  наступает переходный S-N процесс и в ВТСП возникают нормально проводящие области, которые с нарастанием тока распространяются от краев пленки к ее центру. При достижении током значения  $I_{c2}$  переходный процесс заканчивается, и сверхпроводник полностью переходит в N-фазу. При этом сопротивление изменяется от величины, равной волновому сопротивлению линии, до сотен кОм. Соответственно в цепи при S-N переходе коэффициент затухания импульса будет возрастать, а в N фазе достигнет максимума, что существенно ослабит влияние МЭМИ на нагрузку.

Однако с увеличением длительности импульса и уменьшением его амплитуды время срабатывания датчика-ограничителя возрастает до уровня, сравнимого с параметрами полупроводниковых приборов. Так как изменение значения транспортного тока прямо пропорционально изменению значения магнитной индукции, наводимой на поверхности сверхпроводника с цилиндрической симметрией распределения тока, то для увеличения скорости достижения током критических величин необходимо тонкую ВТСП пленку подвергнуть принудительному подмагничиванию, поместив во внешнее магнитное поле. Максимальный ток, который будет протекать по сверхпроводнику без возникновения сопротивления, можно представить в виде разности критического тока для ВТСП без воздействия внешнего магнитного поля и тока, наводимого магнитным полем катушки:

$$I_{c10} = I_{c1} - 2 W + h B_{\text{внеш}} / \mu_0 \mu , \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $B_{внеш}$  – индукция внешнего магнитного поля, создаваемого катушкой, Тл.

Очевидно, что чем меньше значения критических токов в тонкой ВТСП пленке, тем быстрее будет наступать начало времени срабатывания защиты и тем меньше вероятность возникновения необратимых разрушений в чувствительных элементах, входящих в состав нагрузки АФУ.

Расчеты временных зависимостей тока и напряжения в условиях различных токов подмагничивания приведены в работах [4, 5].

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментально генерация мощных электромагнитных импульсов была выполнена на сильноточном ускорителе «Темп-А».

Возбуждение дипольной антенны происходит электронным пучком, сформированным в катод – анодном промежутке ускорителя (рис. 4), который попадает на коллектор (3), связанный с излучающей конической спиральной антенной (5).

Для сравнения результатов воздействия МЭМИ 2 антенны подвергались облучению одновременно. К одной из них в АФУ подсоединялся блок сопротивлений, ослабляющий уровень сигнала, в целях защиты измерительного устройства. В АФУ другой антенны включен ДО.

Полученная в ходе теоретических исследований зависимость напряжения на выходе ДО, находящегося в пассивном режиме (без подмагничивания СВЗУ) от времени, представлена на рис. 5 б, а полученная в ходе эксперимента – на рис. 6.

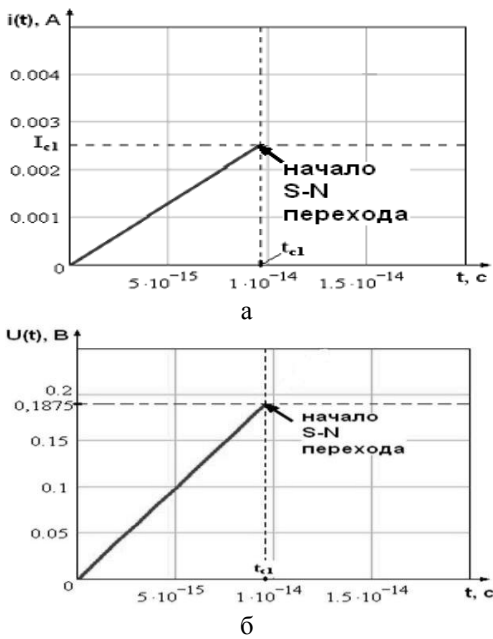


Рис. 5. Расчетные временные зависимости тока, протекающего через нагрузку дипольной антенны длиной 0,5 м (а) и напряжения на нагрузке после ДО (б) в интервале  $0 < t < t_{c10}$  при отсутствии подмагничивания СВЗУ (штриховыми линиями показаны значения  $t_{c1}$  и  $I_{c1}$ )

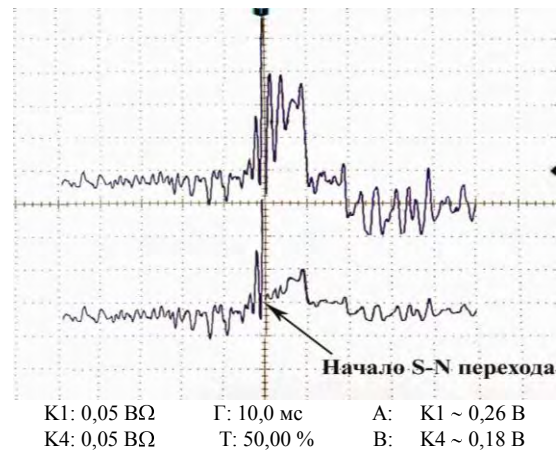


Рис. 6. МЭМИ, генерируемое ускорителем (верхний луч), сигнал на выходе ДО (нижний луч) без подмагничивания

В ДО подвергаем принудительному подмагничиванию тонкую ВТСП пленку, подключив постоянный ток в катушку подмагничивания ( $I_{кат}=140 \cdot 10^{-3} A$ ).

Рассмотренный в теоретических исследованиях импульс, на выходе ДО, в данном режиме работы (с подмагничиванием СВЗУ) примет вид, представленный на рисунке 7, а, а осциллограмма экспериментального импульса на нагрузке антенны – на рис. 8.

Увеличим амплитуду внешнего магнитного поля, увеличив ток в подмагничивающей катушке ( $I_{кат}=139 \cdot 10^{-3} A$ ). Ток наводимый катушкой в ВТСП равен  $I_0=1,7 \cdot 10^{-3} A$ . Форма импульса на нагрузке антенны примет вид рис. 9 – теоретическое значение и рис. 10. – экспериментальное.

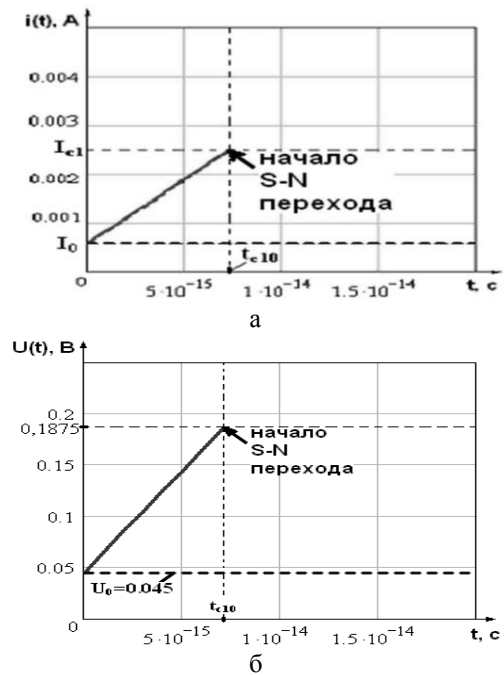


Рис. 7. Расчетные временные зависимости тока, протекающего через нагрузку дипольной антенны длиной 0,5 м (а) и напряжения на нагрузке после ДО (б) в интервале  $0 < t < t_{c10}$  (штриховыми линиями показаны значения  $t_{c10}$  и  $I_{c1} = i(t_{c10}) + I_0$ ,  $I_0$  – ток, наводимый в ВТСП катушкой подмагничивания ( $I_0=0,6 \cdot 10^{-3} A$ ))

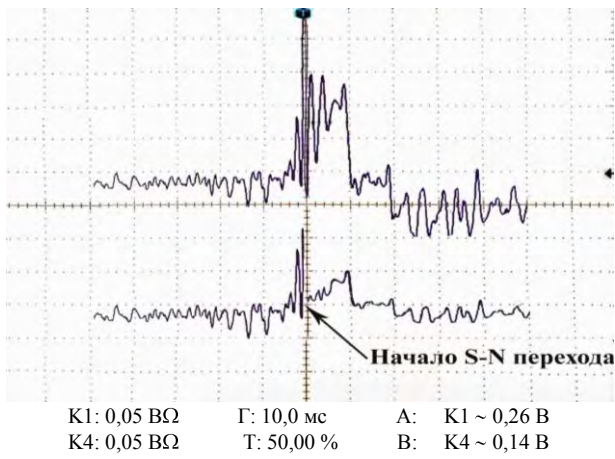


Рис. 8. МЭМИ, генерируемое ускорителем (верхний луч), сигнал на выходе ДО (нижний луч), с подмагничиванием ( $I_{\text{катодки}} = 140 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ) (нижний луч)

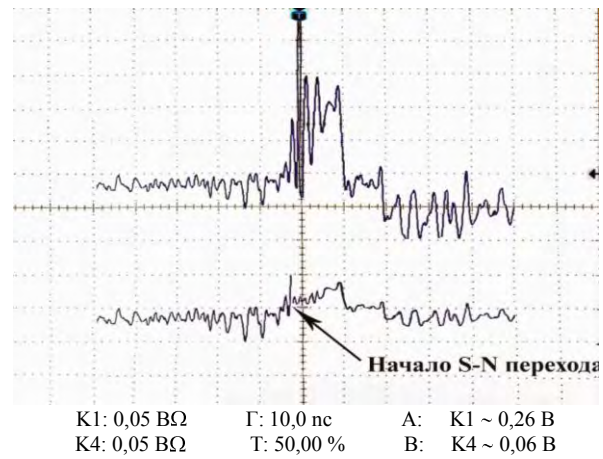


Рис. 10. Импульс, облучающий антенну (верхний луч) и форма сигнала на выходе ДО, с подмагничиванием ( $I_{\text{катодки}} = 390 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ) (нижний луч)

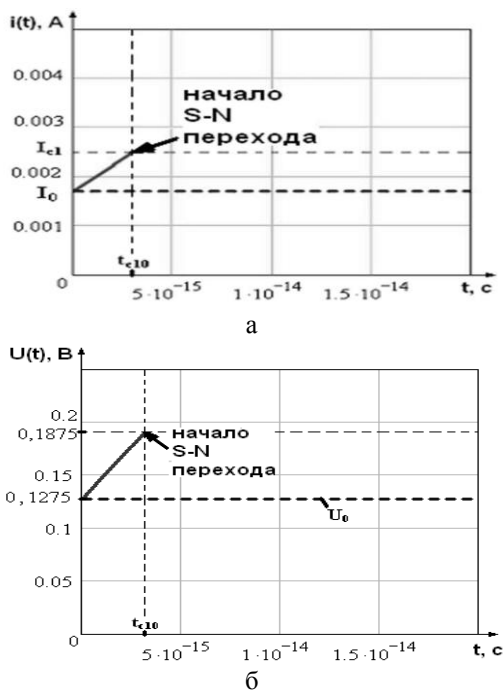


Рис. 9. Расчетные временные зависимости тока, протекающего через нагрузку дипольной антенны длиной 0,5 м (а) и напряжения на нагрузке после ДО (б) в интервале  $0 < t < t_{c10}$  (штриховыми линиями показаны значения  $t_{c10}$  и  $I_{c1} = i(t_{c10}) + I_0$ ,  $I_0$  – ток, наводимый в ВТСП катушкой подмагничивания ( $I_0 = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ))

### Выводы

В работе подробно исследованы основные свойства  $YBa_2Cu_3O_7$  при воздействии МЭМИ. В особенности, как изменяются свойства тонкой ВТСП пленки при ее подмагничивании.

Полученные результаты и их интеграция с теоретическими данными позволяют сделать следующие выводы:

1. Импульсное воздействие на ДО, на основе тонкой ВТСП пленки, сопровождается быстрым токовым разрушением сверхпроводимости.

При этом возникающее активное сопротивление вносит рассогласование системы АФУ, тем самым снижая уровень опасного сигнала на ее нагрузке.

2. Начало разрушения S-фазы в ВТСП возможно инициировать раньше, путем внешнего подмагничивания тонкой пленки. Это свойство делает возможным увеличить чувствительность ДО.

3. Результаты экспериментальных исследований показали хорошую сходимость с теоретическими, проведенными в работах [1 – 5], погрешность составляет 7%.

4. Вышеперечисленные в данной работе результаты исследований свидетельствуют о возможности создания активных ДО на основе тонкой ВТСП пленки, способных осуществлять защиту входных цепей РЭА от воздействия МЭМИ.

### Список литературы

1. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радиосвязь, 1987 – 251 с.
2. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства. – Севастополь: Ахтиар, 1997. – 188 с.
3. Кучер Д.Б., Харланов А.И., Степанова М.В. Особенности применения высокотемпературных сверхпроводников для защиты линий передачи информации от влияния мощных электромагнитных излучений // Сб. научн. тр. – Евпатория, Крым, 2006. – Т. 3. – С. 32-37.
4. Кучер Д.Б., Зайцев С.А., Харланов А.И., Степанова М.В. Основные аспекты повышения чувствительности сверхпроводящих датчиков-ограничителей // Зб. научн. праць. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6 (55). – С. 88-93.
5. Кучер Д.Б., Зайцев С.А., Харланов А.И., Степанова М.В. Особенности варьирования чувствительности сверхпроводниковых датчиков-ограничителей // Зб. научн. пр. – Севастополь: СВМИ, 2006. – Вип. 1 (9). – С. 112-117.

Поступила в редколлегию 1.12.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.О.Якимов, Севастопольский военно-морской институт им. П.С.Нахимова.