

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ-ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, М.В. Степанова
СВМИ им. П.С.Нахимова, Севастополь

Приведены исследования возможности детектирования мощных электромагнитных излучений сверхмалой длительности, используя эффект обратимого разрушения сверхпроводимости в тонких пленках высокотемпературных сверхпроводников. Основываясь на результатах данных исследований, показана возможность уменьшения времени срабатывания сверхпроводящих приборов внешним магнитным полем.

PACS: 74.76.Db

Анализ результатов исследований, проводимых в области генерирования мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) малой длительности, показывает возможность их применения для вывода из строя чувствительных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) через линии передачи информации [3,2].

Применяемые в данных линиях схмотехнические системы защиты, построенные на газоразрядных и полупроводниковых приборах, не способны обеспечить устойчивое функционирование РЭА в условиях данного электромагнитного воздействия из-за их сравнительно высокой инерционности по сравнению с длительностью МЭМИ [2].

Наиболее перспективным в данной области является применение явления обратимого разрушения тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) для создания быстродействующих датчиков-ограничителей (ДО). Из всех существующих ВТСП второго рода (для которых процесс разрушения сверхпроводимости обусловлен граничными критическими токами начала и окончания перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние (I_{c1} , I_{c2})) в настоящее время наиболее широкое применение в технике нашли сверхпроводники типа $YBa_2Cu_3O_7$, температура перехода в сверхпроводящее состояние которого составляет 92 К. Это связано с тем, что их свойства наиболее глубоко изучены, а приемлемость их эксплуатационных характеристик позволяет реально использовать именно этот тип ВТСП в микроэлектронике [1-4].

В работе [4] был проведен анализ энергетического воздействия МЭМИ на нагрузку антенно-фидерного тракта несимметричного вибратора, и обоснована целесообразность использования ДО на основе ВТСП. На основании результатов, полученных в работе, можно сделать вывод, что для ВТСП пленки характерны три состояния: сверхпроводящая фаза (S), переходный процесс из сверхпроводящей в нормальную фазу (S-N переход), нормальная фаза (N). В S фазе через сверхпроводник течет транспортный ток, величина которого меньше критического тока I_{c1} . При достижении током значения $i(tc1)=I_{c1}$ 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 $i(tc2)=I_{c2}$ переходный процесс заканчивается, и сверхпроводник полностью переходит в N-фазу.

При этом сопротивление изменяется от величины равной волновому сопротивлению линии до сотен килоом. Соответственно в цепи при S-N переходе коэффициент затухания будет возрастать, а в N фазе достигнет максимума, что существенно ослабит влияние МЭМИ на нагрузку. Однако в работах [2,4] показано, что с увеличением длительности импульса и уменьшением его амплитуды, время срабатывания ДО увеличивается, и его характеристики становятся сравнимы с характеристиками полупроводниковых приборов. Поэтому целесообразно проводить усовершенствование рассматриваемого устройства путем увеличения его чувствительности за счет уменьшения критических токов I_{c1} и I_{c2} , что приведет к увеличению скорости перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное.

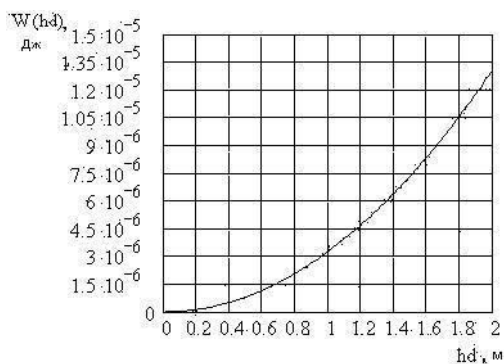


Рис.1. Зависимость выделяемой на нагрузке антенны энергии от длины несимметричного вибратора в сверхпроводящем состоянии ВТСП

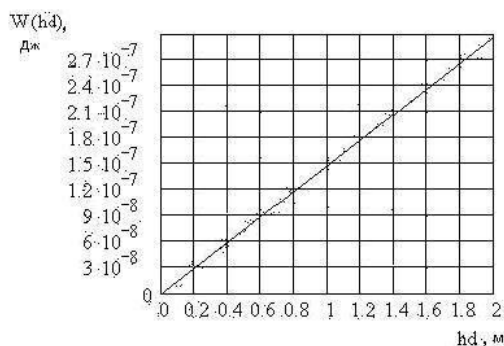


Рис.2. Зависимость выделяемой на нагрузке антенны энергии от длины несимметричного вибратора при S-N переходе

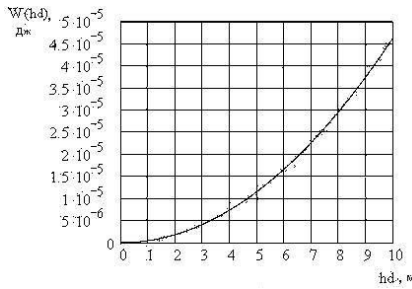


Рис.3. Зависимость выделяемой на нагрузку антенны энергии от длины несимметричного вибратора в нормальном состоянии

В основе принципа действия ДО лежит возможность изменения волнового сопротивления при обратимом разрушении сверхпроводимости ВТСП, и, как следствие, изменения энергии, выделяемой на нагрузку [4]. Графически зависимости энергии от длины антенны, выделяемой на нагрузку, показаны на Рис.1-3.

Конструктивно ДО может быть выполнен в виде микрополосковой линии (МПЛ) передачи, основным элементом которой является тонкая ВТСП пленка (Рис.4).

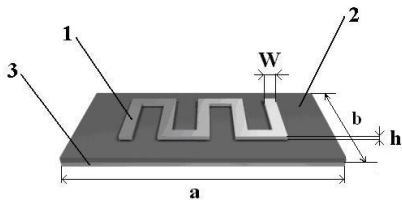


Рис.4. Сверхпроводящее защитное устройство ДО на основе МПЛ и его основные конструктивные параметры. 1 – высокотемпературный сверхпроводник; 2 – подложка; 3 – металлический экран

Высокотемпературный сверхпроводник 1 ленточного типа прямоугольного сечения (тонкая пленка), расположен на подложке 2 с диэлектрической проницаемостью ϵ_{r2} , на обратной стороне которой расположен металлический экран 3. Для того, чтобы в нормальной фазе получить максимально возможное сопротивление, тонкую ВТСП пленку располагают меандром. При этом сверхпроводник длиной $l=50$ см и шириной $W=40 \cdot 10^{-6}$ м компактно располагается на подложке площадью 2 см^2 , что позволяет достичь сопротивления в сотни килоом в нормальной фазе.

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].

Данное устройство подключается к коаксиальному кабелю входной цепи АФУ последовательно при помощи коаксиально-полоскового перехода и помещается в термостат с жидким азотом, температура кипения которого составляет 77 К.

Известно, что изменение значения транспортного тока прямо пропорционально изменению магнитной индукции, наводимой на поверхности сверхпроводника с цилиндрической симметрией распределе-

ния тока, следовательно, для увеличения скорости достижения величин критических токов необходимо поместить ДО во внешнее магнитное поле. Для этого можно использовать катушку с источником постоянного тока. При изменении величины тока в цепи катушки, будет изменяться магнитное поле, которое пронизывает тонкую ВТСП пленку.

Взаимосвязь транспортного тока, протекающего через сверхпроводник, с внешним магнитным полем можно представить следующим образом:

$$Ic1_0 = \frac{2\pi r B_{ic1}}{\mu_0 \mu} - \frac{2\pi r B_{внеш}}{\mu_0 \mu}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды; r – расстояние от проводника с током до точки, в которой определяется магнитная индукция, м; B_{ic1} – индукция магнитного поля, создаваемого транспортным током в ВТСП, Тл; $B_{внеш}$ – индукция внешнего магнитного поля, Тл.

При достижении транспортным током значения $i(tc1_0) = Ic1_0$ (где $Ic1_0 < Ic1$) в тонкой ВТСП пленке начнется переходный процесс, момент начала которого изменяется от $tc1$ до $tc1_0$ (4)

$$tc1_0 = \frac{Ic1_0 \cdot R_i}{A_1 a_1 - A_1 \alpha + \frac{\omega_p^2 A_1}{a_1 + \alpha} + A_2 a_2 - \frac{\omega_p^2 A_2}{a_2 + \alpha} + A_2 a_2}, \quad (2)$$

где

$$A_1^2 = \frac{E_m^2 h_a^2 C_a^2 \omega_p^4 R_n^2 (a_1 - \alpha)^2}{((a_1 - \alpha)^2 + \omega_p^2)^2},$$

$$A_2^2 = \frac{E_m^2 h_a^2 C_a^2 \omega_p^4 R_n^2 (a_2 - \alpha)^2}{((a_2 - \alpha)^2 + \omega_p^2)^2}.$$

Аналогичные расчеты проводятся и для нахождения критического тока $i(tc2_0) = Ic2_0 =$

$$Ic2_0 = \frac{2\pi r B_{внеш}}{\mu_0 \mu}.$$

Очевидно, что чем меньше значения критических токов, тем быстрее будет срабатывать защита и тем меньше вероятность возникновения необратимых разрушений в чувствительных элементах, входящих в состав нагрузки.

Исходя из рассмотренного в работе [1] выражения для реакции дипольной антенны на воздействие импульсного электрического поля, а также критического времени начала и окончания S-N перехода с учетом внешнего подмагничивания (2), значение энергии, выделяемой на нагрузку, в момент разрушения сверхпроводимости можно записать следующим образом:

$$W_{SN} = \int_{tc1_0}^{tc2_0} \left[\frac{\sum_{j=1}^2 (-1)^{j+1} \frac{E_{max} h_a C_a \omega_p^2 R_H (a_j - \alpha(t))}{(a_j - \alpha(t))^2 + \omega_p^2} \times \frac{R_i}{\left[e^{-\alpha(t)t} (\cos(\omega_p t) + \frac{\omega_p}{a_j + \alpha(t)} \sin(\omega_p t)) - e^{-\alpha t} \right]} \right] dt, \quad (3)$$

где E_{max} – амплитуда напряженности электрического поля импульса, В/м; h – длина антенны, м; $h_d = h/2$ – действующая длина антенны, м; C_a – емкость антенны по отношению к земле, Ф; $\omega_p = 1/\sqrt{C_a L_p}$, c^{-1} ; R_H –

сопротивление нагрузки антенны, Ом; R_H – сопротивление излучения антенны в точке первого резонанса, Ом; L_p – индуктивность антенны в точке первого резонанса, Гн; $\alpha(t) = [(R_H + R_H + R(t))C_a \omega_p^2] / 2$ – коэффициент затухания импульса, c^{-1} ; $R(t)$ сопротивление тонкой ВТСП пленки при S-N переходе, Ом; a_i – параметры импульса ($i=1,2$), c^{-1} .

Переход из сверхпроводящего состояния в нормальное осуществляется за столь малый промежуток времени, что функцию, находящуюся под знаком интеграла, можно аппроксимировать путем разложения в ряд Маклорена, выполнив соответствующие преобразования, получим выражение для определения энергии на нагрузке АФУ в момент S-N перехода:

$$W_{SN} = \frac{1}{R_i} \cdot \left[\begin{array}{l} A_1^2 \left[-2k_1 + \frac{2\omega_p}{a_1 + k_1} + 2(k_1 + a_1) - 2a_1 \right] t - \\ - 2A_1 A_2 \left[-2k_1 + \frac{2\omega_p}{a_1 + k_1} + \frac{2\omega_p}{a_2 + k_1} + (k_1 + a_1) + \right. \\ \left. + (k_1 + a_2) - a_1 - a_2 \right] t + \\ \left. + A_2^2 \left[-2k_1 + \frac{2\omega_p}{a_2 + k_1} + 2(k_1 + a_2) - 2a_2 \right] t \right] t^{ic_2} \quad (4) \end{array} \right]_{ic_1}$$

где $k_1 = \frac{(R_H + R_u + R_N \frac{i_0 + v_i t c_2}{I c 2_0}) C_a \omega_p^2}{2}$, $k_2 = \frac{R_N v_i C_a \omega_p^2}{2}$,

$v_i = \frac{I c 2_0 - i_0}{I c 2_0 - I c 1_0}$ – скорость нарастания тока в цепи, i_0

– ток вблизи резистивного состояния, R_N – сопротивление ДО в нормальной фазе, Ом.

Графическая зависимость выделяемой на нагрузке антенны энергии от длины несимметричного вибратора при S-N переходе с учетом управляющего внешнего магнитного поля показана на Рис.5.

В момент начала S-N перехода ток в сверхпроводнике из-за появления сопротивления резко упадет, что неизбежно повлечет за собой резкий скачок магнитного поля, которое, в свою очередь, инициирует скачок тока в катушке. Если при этом в цепь катушки подключить датчик, то данное явление можно будет зафиксировать, т.е. провести детектирование воздействия МЭМИ на радиоэлектронную аппаратуру через АФУ.

FEATURES OF SENSITIZATION OF SENSORS - DELIMITERS ON THE BASIS OF THIN FILMS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

D.B. Kucher, A.I. Harlanov, M.V. Stepanova

In this work authors adduce researches into the ability of detecting of powerful electromagnetic radiations of midget duration by using of the effect of irreversible destruction of superconductivity in thin films of high-temperature superconductors. It is also shown an opportunity of reduction of the extreme time of gauges-terminators' operation by influence of the outer magnetic field.

ОСОБЛИВОСТІ ПДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ДАТЧИКІВ-ОБМЕЖНИКІВ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ПЛІВОК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ

Д.Б. Кучер, О.І. Харланов, М.В. Степанова

Наведені дослідження можливості детектування потужних електромагнітних випромінювань надмалого тривалості, використовуючи ефект оборотного руйнування надпровідності в тонких плівках високотемпературних надпровідників. Грунтуючись на результатах даних досліджень, показана можливість зменшення часу спрацьовування надпровідних приладів зовнішнім магнітним полем.

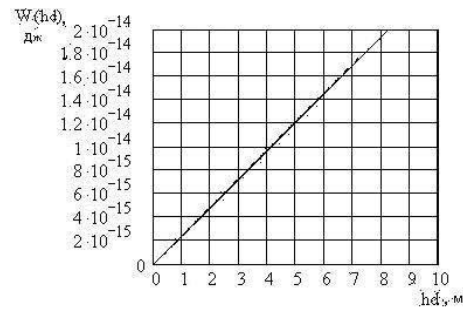


Рис.5. Зависимость выделяемой на нагрузке антенны энергии от длины несимметричного вибратора при S-N переходе с учетом управляющего внешнего магнитного поля

Таким образом, необходимо отметить, что датчики-ограничители в качестве схемотехнических элементов защиты не только значительно уменьшают влияние высоких энергий МЭМИ на РЭА, но и обладают временем срабатывания, значительно меньшим, чем у полупроводниковых и газоразрядных приборов, которое, кроме того, можно регулировать, изменяя внешнее магнитное поле. Поэтому техническое применение данных сверхпроводящих устройств для осуществления быстродействующей защиты РЭА от МЭМИ является одним из наиболее перспективных направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И.Кравченко, Е.А.Болотов, Н.И.Летунова. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: «Радиосвязь», с.1987-251.
2. Д.Б. Кучер. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства. Севастополь: «Ахтиар», 1997, с.188.
3. В.И.Чумаков, А.В.Столярчук, О.И.Харченко Моделирование сверхширокополосных сигналов // Сборник научных трудов.- Харьков, 2005, т.6, с.26-29.
4. Д.Б.Кучер, А.И.Харланов, М.В.Степанова. Особенности применения высокотемпературных сверхпроводников для защиты линий передачи информации от влияния мощных электромагнитных излучений // Сборник научных трудов. Евпатория, Крым, 2006, т.3, с.32-37.