

## ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ДАТЧИКОВ-ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ

Д.Б. Кучер<sup>1</sup>, С.А. Зайцев<sup>2</sup>, А.И. Харланов<sup>1</sup>, М.В. Степанова<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова,

<sup>2</sup>Управление Связи и АСУ Военно-морских Сил ВС Украины, Севастополь)

*В работе рассмотрена возможность использования датчиков-ограничителей на основе тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников, для детектирования мощных электромагнитных излучений сверхмалой длительности и показана возможность варьирования чувствительности сверхпроводящих приборов путем изменения внешнего магнитного поля.*

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

Анализ результатов экспериментальных исследований, проводимых в области генерирования мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) малой длительности, показал возможность их использования для вывода из строя чувствительных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) через линии передачи информации [1, 2, 3]. При этом применяемые в данных линиях схмотехнические системы защиты, построенные на основе использования газоразрядных и полупроводниковых приборов не способны обеспечить устойчивое функционирование РЭА из-за их сравнительно высокой инерционности по сравнению с длительностью МЭМИ [2].

Наиболее перспективным в данной области является применение явления обратимого разрушения сверхпроводимости тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) для создания быстродействующих датчиков-ограничителей (ДО). В настоящее время наиболее широкое применение в технике нашли сверхпроводники типа  $YBa_2Cu_3O_7$ . Это связано с тем, что их свойства наиболее глубоко изучены, а приемлемость их эксплуатационных характеристик позволяет реально использовать этот тип ВТСП в микроэлектронике [1 – 4].  $YBa_2Cu_3O_7$  – ВТСП второго рода, для которого процесс разрушения сверхпроводимости обусловлен граничными критическими токами начала и окончания перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние ( $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ), а температура перехода в сверхпроводящее состояние составляет 92 К [2].

На основании результатов, полученных в работах [2, 4], можно сделать вывод, что для ВТСП пленки характерны три состояния: сверхпро-

водящая 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 кОм. Соответственно в цепи при S-N переходе коэффициент затухания будет возрастать, а в N фазе достигнет максимума, что приведет к рассогласованию антенно-фидерного тракта, и существенно ослабит влияние МЭМИ на нагрузку [4]. Результаты исследований, проведенных в работах [2, 4], подтвердили спад энергии на нагрузке АФУ. Однако в S состоянии уровень энергии, выделяемой на нагрузке, составляет  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  Дж. Полученные данные лежат на границе пороговых значений энергии чувствительных элементов РЭА (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем).

Снизить опасные уровни энергии можно за счет повышения чувствительности защитного устройства, ускорив начало S-N перехода. Это возможно, поместив ВТСП пленку во внешнее магнитное поле, источником которого может быть обычная катушка с независимым источником постоянного тока. Поэтому целью данной работы является повышение чувствительности ДО за счет подмагничивания тонкой ВТСП пленки.

Постоянный ток  $I_c$ , наводимый в сверхпроводнике индукцией внешнего магнитного поля, будет инициировать начало S-N перехода в более ранний момент времени. Взаимосвязь транспортного тока, протекающего через сверхпроводник, с внешним магнитным полем можно представить следующим образом

$$I_{c1_0} = \frac{2(W+h)B_{Ic1}}{\mu_0\mu} - \frac{2(W+h)B_{внеш}}{\mu_0\mu}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $W$  и  $h$  – соответственно ширина и высота ВТСП пленки, м;  $B_{Ic1}$  – индукция магнитного поля, создаваемого транспортным током в ВТСП, Тл;  $B_{внеш}$  – индукция внешнего магнитного поля, Тл.

При достижении транспортным током значения  $i(tc1_0) = I_{c1_0}$  (где  $I_{c1_0} < I_{c1}$ ) в тонкой ВТСП пленке начнется переходный процесс, момент начала которого изменяется от  $tc1$  до  $tc1_0$  (2)

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

где  $A_1 = \frac{E_m h_d C_a \omega_p^2 R_H (a_1 - \alpha)}{(a_1 - \alpha)^2 + \omega_p^2}$ ,  $A_2 = \frac{E_m h_d C_a \omega_p^2 R_H (a_2 - \alpha)}{(a_2 - \alpha)^2 + \omega_p^2}$ ,  $E_{max}$  – 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;  $R_{И}$  – сопротивление излучения антенны в точке первого резонанса, Ом;  $L_p$  – индуктивность антенны в точке первого резонанса, Гн;  $a = [(R_H + R_{И}) C_a \omega_p^2]/2$  – коэффициент затухания импульса,  $c^{-1}$ ;  $a_i$  – параметры импульса ( $i = 1, 2$ ),  $c^{-1}$ .

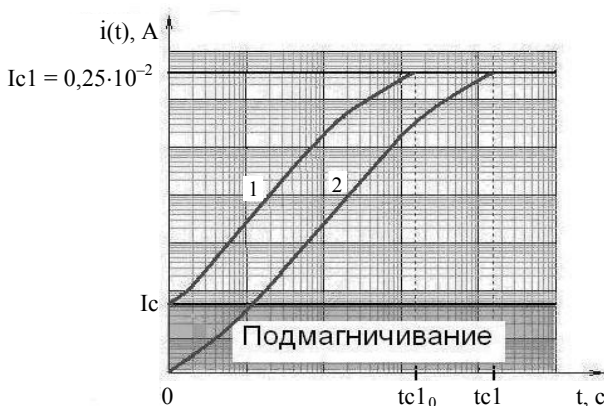


Рис. 1. Амплитудно-временная зависимость транспортного тока ВТСП в S-состоянии: 1 – с учетом внешнего подмагничивания; 2 – без внешнего воздействия

Анализируя выражение (2), следует отметить, что при воздействии внешнего магнитного поля на тонкую ВТСП пленку, время достижения током значения  $Ic1$  уменьшается вследствие нарастания транспортного тока не от нуля, а от значения тока, наведенного внешним магнитным полем. Очевидно, чем меньше значение критического тока, обуславливающего начало перехода из сверхпроводящей фазы в нормальную, тем меньше время срабатывания защиты и ниже вероятность возникновения необратимых разрушений в чувствительных элементах нагрузки.

Выражение для энергии, проходящей через ДО, находящийся в S-состоянии и выделяющейся на нагрузке, имеет вид

$$\begin{aligned}
W &= \frac{E_m^2 h_d^2 C_a^2 \omega_p^4 R_H (a_1 - \alpha)^2}{((a_1 - \alpha)^2 + \omega_p^2)^2} \times \\
&\times \left[ \begin{aligned}
&\frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha} + \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) + \frac{\omega_p}{a_1 + \alpha} \cdot \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \times \\
&\times (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \frac{e^{-(\alpha+a_1)t_2}}{(\alpha + a_1)^2 + \omega_p^2} (-(\alpha + a_1) \cos(\omega_p t_2) + \\
&+ \omega_p \sin(\omega_p t_2)) + \frac{\omega_p}{a_1 + \alpha} \cdot \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \\
&- \frac{\omega_p^2}{4\alpha(a_1 + \alpha)^2} \cdot e^{-2\alpha t_2} - \frac{\omega_p^2}{(a_1 + \alpha)^2 \cdot (4\alpha^2 + 4\omega_p^2)} \cdot e^{-2\alpha t_2} (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \\
&+ \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) - \frac{\omega_p}{a_1 + \alpha} \cdot \frac{e^{-(\alpha+a_1)t_2}}{(\alpha + a_1)^2 + \omega_p^2} \times \\
&\times (-\alpha - a_1) \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \frac{1}{2a_1} \cdot e^{-2a_1 t_2}
\end{aligned} \right]_{0}^{t_1} \\
&- \frac{2E_m^2 h_d^2 C_a^2 \omega_p^4 R_H (a_1 - \alpha)(a_2 - \alpha)}{((a_1 - \alpha)^2 + \omega_p^2)((a_1 - \alpha)^2 + \omega_p^2)} \times \\
&\times \left[ \begin{aligned}
&-\frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha} + \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) + \\
&+ \frac{\omega_p}{a_2 + \alpha} \cdot \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \times (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \\
&- \frac{e^{-(\alpha+a_2)t_2}}{(\alpha + a_2)^2 + \omega_p^2} (-(\alpha + a_2) \cos(\omega_p t_2) + \omega_p \sin(\omega_p t_2)) + \frac{\omega_p}{a_1 + \alpha} \times \\
&\times \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \\
&\times - \frac{\omega_p^2}{4\alpha(a_1 + \alpha)(a_2 + \alpha)} \times e^{-2\alpha t_2} - \frac{\omega_p^2}{(a_1 + \alpha)(a_2 + \alpha) \cdot (4\alpha^2 + 4\omega_p^2)} \times \\
&\times e^{-2\alpha t_2} (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) - \frac{\omega_p}{a_1 + \alpha} \cdot \frac{e^{-(\alpha+a_2)t_2}}{(\alpha + a_2)^2 + \omega_p^2} \times \\
&\times (-\alpha - a_2) \sin(\omega_p t_2) - \omega_p \cos(\omega_p t_2)) - \frac{e^{-(\alpha+a_1)t_2}}{(\alpha + a_1)^2 + \omega_p^2} \times \\
&\times (-\alpha - a_1) \cos(\omega_p t_2) + \omega_p \sin(\omega_p t_2)) - \frac{\omega_p}{a_2 + \alpha} \cdot \frac{e^{-(\alpha+a_1)t_2}}{(\alpha + a_1)^2 + \omega_p^2} \times \\
&\times (-\alpha - a_1) \sin(\omega_p t_2) - \omega_p \cos(\omega_p t_2)) - \frac{1}{a_1 + a_2} \cdot e^{-(a_1+a_2)t_2}
\end{aligned} \right]_{0}^{t_1} \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{E_m^2 h_d^2 C_a^2 \omega_p^4 R_H (a_2 - \alpha)^2}{((a_2 - \alpha)^2 + \omega_p^2)^2} \times \\
 & \left[ -\frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha} + \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) + \frac{\omega_p}{a_2 + \alpha} \cdot \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \times \right. \\
 & \times (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \frac{e^{-(\alpha+a_2)t_2}}{(\alpha+a_2)^2 + \omega_p^2} (-\alpha + a_2) \cos(\omega_p t_2) + \\
 & + \omega_p \sin(\omega_p t_2) + \frac{\omega_p}{a_2 + \alpha} \cdot \frac{e^{-2\alpha t_2}}{4\alpha^2 + 4\omega_p^2} \cdot (-\alpha \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2)) - \\
 & \times \left. -\frac{\omega_p^2}{4\alpha(a_2 + \alpha)^2} \cdot e^{-2\alpha t_2} - \frac{\omega_p^2}{(a_2 + \alpha)^2 \cdot (4\alpha^2 + 4\omega_p^2)} \cdot e^{-2\alpha t_2} (-\alpha \cos(2\omega_p t_2) + \right. \\
 & + \omega_p \sin(2\omega_p t_2)) - \frac{\omega_p}{a_2 + \alpha} \cdot \frac{e^{-(\alpha+a_2)t_2}}{(\alpha+a_2)^2 + \omega_p^2} \times \\
 & \left. \times (-\alpha + a_2) \sin(2\omega_p t_2) - \omega_p \cos(2\omega_p t_2) \right] - \frac{1}{2a_2} \cdot e^{-2a_2 t_2}
 \end{aligned}$$

где  $tcl_0$  – время начала S-N перехода, зависящее от величины индукции внешнего магнитного поля  $B_{внеш}$ , с.

Из выражений (1), (2), (3) следует, что за счет изменения чувствительности ДО уменьшится энергия, выделяемая на нагрузке.

Графическая зависимость энергии, выделяемой на нагрузке АФУ, от напряженности внешнего магнитного поля, воздействующего на ДО, показано на рис. 2. Конструктивно ДО может быть выполнен в виде микрополосковой линии (МПЛ) передачи, основным элементом которой является тонкая ВТСП пленка (рис. 3). 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. 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

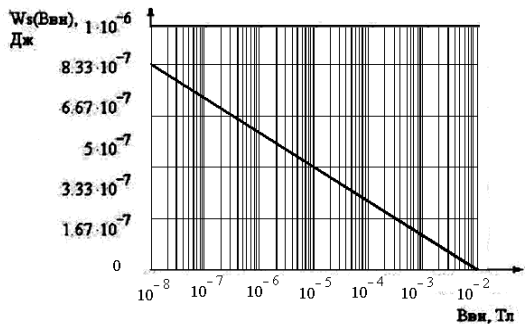


Рис. 2. Зависимость энергии, выделяемой на нагрузке АФУ, от величины индукции внешнего магнитного поля, воздействующей на ДО в S-фазе

подложке площадью  $10 \text{ мкм}^2$ , что позволяет достичь сопротивления в сотни кОм в нормальной фазе.

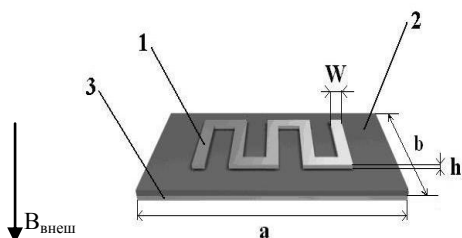


Рис. 3. Сверхпроводящий ДО на основе МПЛ и его основные конструктивные параметры

Следует отметить, что для реализации механизма быстрого токового разрушения сверхпроводимости, обеспечивающего малую длительность существования смешанного состояния, толщина тонкой ВТСП пленки  $h$  не должна превышать  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  [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  $77 \text{ К}$ . Внешнее магнитное поле создается катушкой, расположенной в термостате, при помощи настраиваемого источника постоянного тока.

Таким образом, датчики-ограничители в качестве схемотехнических элементов защиты позволяют снизить влияние высоких энергий МЭМИ на РЭА. Немаловажным фактором, влияющим на уровень энергии, выделившейся на нагрузке, является чувствительность защитного устройства, которую 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. 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. Чумаков В.И., Столярчук А.В., Харченко О.И. Моделирование сверхширокополосных сигналов // Сборник научных трудов. – Х., 2005. – Т. 6. – С. 26-29.
4. Кучер Д.Б., Харланов А.И., Степанова М.В. Особенности применения высокотемпературных сверхпроводников для защиты линий передачи информации от влияния мощных электромагнитных излучений // Сборник научных трудов. – Евпатория, 2006. – Т. 3. – С. 32-37.

Поступила 30.05.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.А. Якимов,  
Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова