

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

к.т.н. Д.Б. Кучер
(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

Рассматривается динамика изменения волнового сопротивления сверхпроводящего защитного устройства, при его переходе из сверхпроводящего в смешанное и нормальное состояния.

Высокие потенциальные возможности сверхпроводниковой электроники по сравнению с традиционной полупроводниковой открыли широкие перспективы практического использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в направлении создания быстродействующих защитных устройств от проникновения мощных электромагнитных излучений малой длительности (МЭМИ) через антенно-фидерный тракт [1-4]. Одним из возможных вариантов построения сверхпроводящего защитного устройства (СВЗУ) является микрополосковая линия передачи.

Сверхпроводящее защитное устройство на основе микрополосковой линии (МПЛ) передачи представляет собой тонкую ВТСП-пленку толщиной h и шириной W , расположенную на диэлектрической подложке толщиной h_n на обратной стороне, которой расположен металлический экран шириной a [1].

В работах [1-3] показано, что при включении СВЗУ, находящихся в сверхпроводящем состоянии, в линию передачи (антенно-фидерный тракт), законы распределения тока и напряжения в основном характеризуются согласованием между волновым сопротивлением линии и волновым сопротивлением защитного устройства. Очевидно, что данный вывод справедлив для случая, когда параметры сигнала, проходящего через СВЗУ не превышают критических для тонкой сверхпроводящей пленки. Однако, проникновение МЭМИ, параметры которого намного превышают критические для данного ВТСП, в антенно-фидерный тракт неизбежно вызывает разрушение сверхпроводимости защитных устройств. Поэтому целью данной работы является определение волнового сопротивления СВЗУ, находящегося в сверхпроводящем (S), смешанном (фазовый S-N переход) и нормальном (N) состояниях.

Для сверхпроводящего защитного устройства, находящегося в S состоянии волновое сопротивление в предположении, что $\frac{h}{h_n} = 0$, $a \rightarrow \infty$, диэлек-

трическая проницаемость тонкой пленки в сверхпроводящем состоянии $\epsilon_{r1} = 1$, можно вычислить по формулам [1]:

$$Z_{zyS} = \frac{k}{\pi} \sqrt{2(\epsilon_{r2} + 1)} \left(\ln \frac{8h_{\Pi}}{W} + \frac{W^2}{32h_{\Pi}^2} - \frac{(\epsilon_{r2} - 1)}{2(\epsilon_{r2} + 1)} \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \ln \frac{4}{\pi} \right) \right), \quad (1)$$

при $\frac{W}{h_{\Pi}} < 1$;

$$Z_{zyS} = \frac{k}{2} \sqrt{\epsilon_{r2}} \left(\frac{W}{2h_{\Pi}} + 0,441 + \frac{0,082(\epsilon_{r2} - 1)}{\epsilon_{r2}^2} + \frac{A_1(\epsilon_{r2} + 1)}{2\pi\epsilon_{r2}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

при $\frac{W}{h_{\Pi}} > 1$,

где $k = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $A = 1,451 + \ln \left(\frac{W}{h_{\Pi}} + 0,94 \right)$, ϵ_{r2} - диэлектрическая проницаемость подложки.

Однако для согласования СВЗУ с фидерным трактом необходимо, чтобы волновое сопротивление защитного устройства было равно волновому сопротивлению линии Z_{Π} , значение которого известно. Следовательно, необходимо выполнить обратную задачу - найти по заданному Z_{zyS} конструктивные размеры. Выбирая $Z_{zyS} = 50 \text{ Ом}$ для подложки с известной

ϵ_{r2} , получаем параметр $\frac{W}{h_{\Pi}}$:

$$\frac{W}{h_{\Pi}} = \frac{8}{(e^d - e^{-d})}, \quad (3)$$

при $d > 2,1$

$$\frac{W}{h_{\Pi}} = \frac{2(d_1 - 1)}{\pi} - \frac{2}{\pi} \ln(2d_1 - 1) + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{\pi\epsilon_{r2}} \left(\ln(2d_1 - 1) + 0,293 - \frac{0,517}{\epsilon_{r2}} \right), \quad (4)$$

при $d < 2,1$,

где $d = 2Z_{\Pi} \frac{\pi}{k} \sqrt{\epsilon_{r2} + 1} + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{\epsilon_{r2} + 1} \left(0,226 + \frac{0,12}{\epsilon_{r2}} \right)$, $d_1 = \frac{60\pi^2}{Z_{\Pi} \sqrt{\epsilon_{r2}}}$.

Кроме того, с конструктивным параметром $\frac{W}{h_{\Pi}}$ связана емкость между сверхпроводящей полоской и металлическим экраном C_2 . Величина этой емкости может быть оценена с помощью эффективной диэлектрической проницаемости:

$$C_2 = \varepsilon_{\text{эфф}} C', \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\varepsilon_{r2} + 1}{2} + \frac{\varepsilon_{r2} - 1}{2\sqrt{1 + \frac{10h_d}{W}}}$, C' - емкость линии при отсутствии диэлектрической подложки, которая определяется как [4]:

$$C' = 2\varepsilon_0 \ln \left[\frac{1}{\pi} \left(\ln \pi \frac{W}{2h_d} + 1 \right) + \frac{W}{2h_d} \right] = C_{\text{кр}} + \varepsilon_0 \frac{W}{h}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_0 \frac{W}{h}$ - емкость плоского конденсатора образованного плоскостью сверхпроводящей пластины и экраном без учета краевых эффектов;

$C_{\text{кр}} = 2\varepsilon_0 \ln \left(\ln \pi \frac{W}{2h_d} + 1 \right)$ - краевая емкость, образующаяся за счет проникновения полей за края плоского конденсатора.

Для защитного устройства, находящегося в смешанном состоянии, волновое сопротивление можно записать:

$$Z_{\text{звS-N}} = \sqrt{\frac{R_{0\text{S-N}}(j\omega)}{j\omega C_{0\text{S-N}}(j\omega)}}, \quad (7)$$

где $R_{0\text{S-N}}(j\omega)$ и $C_{0\text{S-N}}(j\omega)$ - погонные активное сопротивление и емкость сверхпроводящего защитного устройства, находящегося в смешанном состоянии.

Активное сопротивление на единицу длины линии для сверхпроводящего защитного устройства, находящихся в смешанном состоянии, можно определить на основании работ [3-5]:

$$R_{0\text{S-N}} = \frac{R_{\text{S-N}}^{\text{пов}}(j\omega)}{W} + \frac{R_3^{\text{пов}}}{MW}, \quad (8)$$

где $R_{\text{S-N}}^{\text{пов}}(j\omega)$ - активная составляющая поверхностного сопротивления тонкой сверхпроводящей пленки в момент фазового S-N перехода, которую можно записать следующим образом [3]:

$$R_{\text{S-N}}^{\text{пов}}(j\omega) = \frac{(\omega \mu_0)^2 \sigma_N \lambda_N(j\omega)^4}{2h}. \quad (9)$$

где σ_N - удельная проводимость ВТСП в нормальном состоянии,

$\lambda_N(j\omega) = \frac{2\lambda_1^2}{hI_{c1}} I(j\omega)$ - ширина N области, $I(j\omega)$ - ток, протекающий через сверхпроводник.

Очевидно, что для смешанного состояния $R_{S-N}^{NOB}(j\omega) \gg R_3^{NOB}$. Тогда выражение (8) можно переписать в виде:

$$R_{\theta_{S-N}}(j\omega) \approx \frac{R_{S-N}^{NOB}(j\omega)}{W}. \quad (10)$$

Анализ экспериментальных исследований, проведенных в работах [4,5], показал, что краевая емкость при возникновении нормальных областей незначительна. Поэтому для защитного устройства, построенного на основе микрополосковой линии передачи и находящегося в смешанном состоянии, емкость на единицу длины можно определить как:

$$C_{0_{S-N}}(j\omega) = \left(\epsilon_0 \frac{(\epsilon_{r2} + 1)(W - 2\lambda_N(j\omega))M}{2h} \right). \quad (11)$$

Тогда волновое сопротивление сверхпроводящих защитного устройства, находящегося в смешанном состоянии, можно определить, основываясь на (10), (11):

$$Z_{zy_{S-N}}(j\omega) = \sqrt{\frac{R_{S-N}^{NOB}(j\omega)}{j\omega C_{0S}^*(W - 2\lambda_N(j\omega))}}, \quad (12)$$

где C_{0S}^* - емкость на единицу длины микрополосковой линии передачи находящейся в сверхпроводящем состоянии, без учета $C_{0кр}$.

Учитывая выражение (9), перепишем (12) в виде:

$$Z_{zy_{S-N}}(j\omega) = \frac{R_{S-N}^{NOB}(j\omega)^2}{R_N} K(j\omega), \quad (13)$$

где $K(j\omega) = \frac{4\lambda_1^2 I_{c2}}{h^2 I_{c1}} \sqrt{\frac{1}{R_{S-N}^2} \frac{R_S^{NOB}}{j\omega C_{0S}^*(W - 2\lambda_N(j\omega))}}$,

$R_{S-N}(j\omega) = \frac{1}{\sigma_N Wh} \frac{I(j\omega)}{I_{c2}}$ - сопротивление тонкой пленки в смешанном состоянии, $R_{S-N*} = \frac{1}{\sigma_N Wh} \frac{I_{c1}}{I_{c2}}$ - сопротивление тонкой пленки вблизи смешанного состояния.

Коэффициент $K(j\omega)$ характеризуют влияние фазового S-N перехода на реактивную составляющую волнового сопротивления сверхпроводящего защитного устройства.

Невозможность перехода в динамическое смешанное состояние обеспечивает достижение в импульсном режиме при больших скоростях нарастания тока ситуации, при которой плотность тока на краях тонкой ВТСП-пленки может значительно превосходить критическое значение плотности тока аннигиляции сверхпроводящих электронов, то есть на краях полосы

появляются области нормальной проводимости, которые с увеличением величины плотности тока будут двигаться поперек полоски к ее середине, что приведет к быстрому разрушению сверхпроводимости. Таким образом, достижение током, протекающим через защитное устройство, значения I_{c1} приводит к образованию на краях тонкой пленки нормальных областей шириной $\lambda_N(j\omega)$. При этом защитное устройство переходит в смешанное состояние, что характеризуется резким изменением активного сопротивления до значения R_{S-N} . Однако существование смешанного состояния, говорит о том, что сверхпроводимость тонкой пленки нарушена лишь частично, то есть сохраняется S область шириной $W - 2\lambda_N(j\omega)$ [5]. Таким образом, увеличение реактивной составляющей компенсируется наличием сверхпроводящей области, обладающей поверхностным сопротивлением $R_S^{пов}$, и не вносит значительный вклад в изменение волнового сопротивления защитного устройства, построенного на основе микрополосковой линии передачи. Очевидно, что $K(j\omega)$ будет близок к единице только при достаточно высоких частотах входного сигнала (ЭМИ высотного ядерного взрыва, СЭМИ) [1].

Тогда, выражение (13), характеризующие волновое сопротивление сверхпроводящего защитного устройства на основе микрополосковой линии, можно переписать в виде:

$$Z_{zyS-N}(j\omega) \approx \frac{R_{S-N}(j\omega)^2}{R_N}. \quad (14)$$

Таким образом, волновое сопротивление защитных устройств в смешанном состоянии в основном определяется изменением активного сопротивления тонкой сверхпроводящей пленки. Данный вывод получил подтверждение в ходе экспериментальных исследований, приведенных в работах [3,4].

Волновое сопротивление сверхпроводящего защитного устройства, находящегося в нормальном состоянии можно записать, основываясь на выражении (3.49):

$$Z_N \approx R_N. \quad (15)$$

Таким образом, волновое сопротивление сверхпроводящего защитного устройства, находящегося в сверхпроводящем, смешанном и нормальном состояниях можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} Z_{zyS} = Z_{л} & I < I_{c1}; \\ Z_{zyS-N}(j\omega) \approx \frac{R_{S-N}(j\omega)^2}{R_N} & I_{c1} \leq I \leq I_{c2}; \\ Z_{zyN} \approx R_N & I \geq I_{c2}. \end{cases} \quad (16)$$

Тогда коэффициент отражения в линии передачи с учетом включения защитного устройства будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \dot{\Gamma} = 0 & I < I_{c1}; \\ \dot{\Gamma} = \frac{R_{S-N}(j\omega)^2 - Z_e R_N}{R_{S-N}(j\omega)^2 + Z_e R_N} & I_{c1} \leq I \leq I_{c2}; \\ \dot{\Gamma} = \frac{R_N - Z_e}{R_N + Z_e} & I \geq I_{c2}. \end{array} \right. \quad (17)$$

Таким образом, степень отражения входного сигнала сверхпроводящим защитным устройством находящимся как в смешанном, так и в нормальном состоянии в основном определяется активным сопротивлением тонкой пленки, то есть ее конструктивными параметрами. Поэтому для наибольшего ослабления сигнала МЭМИ тонкая ВТСП-пленка должна обладать как можно большей длиной, что на ограниченной площади подложки возможно, уложив ВТСП меандром или спиралью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие защитные устройства. Севастополь, Ахтиар, 1997, 188 с.
2. Кучер Д.Б. Исследование формирования нормальных областей в тонкой сверхпроводящей пленке // радиотехника. Харьков, ХТУРЭ, 1999, вып. 109, с.38-41.
3. Вендик О.Г., Гайдуков М.М., Козырев А.Б. свойства высокотемпературных сверхпроводников в СВЧ диапазоне и перспективы их применения в технике СВЧ // Обзоры по высокотемпературной сверхпроводимости. Москва, 1992, вып. 4(8), с.43-101.
4. Вендик О.Г., Козырев А.Б., Митрофанов А.П., Самойлова Т.Б., Пахомов О.В. Влияние уровня СВЧ-мощности на характеристику передачи линии на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – Т.3, №6. – С.1041-1044.
5. Аксаев Э.Е., Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н. и др. Механизмы детектирования электромагнитного излучения в пленках $YBa_2Cu_3O_7$. Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – Т.3, №6 (часть 2). – С.1928-1942.