

УДК 537.8

## МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ТОНКОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ

Головкина М.В.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,  
Самара, e-mail: nauka77@yandex.ru

В работе рассматриваются электродинамические свойства тонкопленочных высокотемпературных сверхпроводников, находящихся в смешанном состоянии. Магнитные свойства тонкой сверхпроводящей пленки учитываются в рамках модели динамической магнитной восприимчивости для случая линейного отклика решетки вихрей Абрикосова на малое внешнее воздействие. Учитывается зависимость магнитной проницаемости сверхпроводника от внешнего магнитного поля, температуры и характерных размеров сверхпроводника. Проводятся расчеты коэффициента отражения от тонкой сверхпроводящей пленки из иттриевой керамики, находящейся на диэлектрической подложке для случая, когда внешнее магнитное поле направлено нормально поверхности. Результаты проведенных расчетов показывают, что коэффициент отражения от исследуемой структуры существенным образом зависит как от величины приложенного внешнего магнитного поля, так и от температуры. Особенностью рассматриваемой структуры является наличие резкого максимума в зависимости коэффициента отражения как от частоты, так и от величины внешнего магнитного поля. Результаты, полученные в работе, показывают, что тонкая пленка сверхпроводника второго рода, находящегося в смешанном состоянии, может обладать достаточно сильными магнитными свойствами, достаточными для того, чтобы существенным образом влиять на величину коэффициента отражения от сверхпроводника. Поэтому структура из сверхпроводящей пленки на диэлектрической подложке может использоваться для создания перестраиваемых магнитным полем высокочувствительных устройств.

**Ключевые слова:** высокотемпературные сверхпроводники, вихри Абрикосова, тонкие пленки, магнитное поле, коэффициент отражения

## METHODS OF EFFECT ON REFLECTION COEFFICIENT FROM THIN SUPERCONDUCTING FILM

Golovkina M.V.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Povolzhskiy State University  
of Telecommunications & Informatics», Samara, e-mail: nauka77@yandex.ru

In this paper the electrodynamic properties of thin film high-temperature superconductors in a mixed state are discussed. The magnetic properties of a thin superconducting film are taken into account in the model of the dynamic magnetic susceptibility for the case of a linear response of an Abrikosov vortex lattice to a small external effect. The dependence of the permeability of the superconductor on the external magnetic field, temperature and characteristic parameters of the superconductor is taken into account. The thin superconducting film of yttrium ceramic located on a dielectric substrate is considered. The reflection coefficient from this film is calculated for the case when the external magnetic field is directed perpendicular to the film surface. The results of the calculations show that the reflection coefficient of this structure depends on both the magnitude of the applied external magnetic field and the temperature. A specific feature of the considered structure is the presence of a sharp maximum in the dependence of the reflection coefficient both on the frequency and on the magnitude of the external magnetic field. The results obtained in the work show that the thin film of a type II superconductor in a mixed state can have strong magnetic properties. These magnetic properties can substantially influence the value of the reflection coefficient from the superconductor. Therefore, the structure of a superconducting film on a dielectric substrate can be used to create highly sensitive devices that are tunable by a magnetic field.

**Keywords:** high-temperature superconductors, Abrikosov vortices, thin films, magnetic field, reflection coefficient

Высокотемпературные сверхпроводники все чаще рассматриваются в качестве перспективных материалов для создания обладающих малыми потерями устройств фотоники и микроэлектроники. Наличие у высокотемпературных сверхпроводников очень малого сопротивления при температурах ниже критической уменьшает диссипацию энергии и увеличивает действие устройств на их основе. Большое распространение нашли тонкопленочные сверхпроводящие устройства [1]. Отличительной особенностью

высокотемпературных сверхпроводников является наличие смешанного состояния, в котором магнитное поле может проникать в сверхпроводник [2]. При этом при протекании транспортного тока в сверхпроводнике возникает проблема термомангнитной неустойчивости сверхпроводящего состояния, обусловленная дополнительной диссипацией энергии из-за наличия омических потерь. Термомангнитная неустойчивость приводит к скачкам магнитных свойств сверхпроводника вблизи критической температуры, что может при-

водить к переходу из сверхпроводящего состояния в обычное при любых сколь угодно малых внешних воздействиях [3]. Если же использовать высокотемпературные сверхпроводники в виде тонких пленок на подложке, то такая конструкция способствует отводу дополнительного тепла и уменьшает термомагнитную неустойчивость [3, 4]. В настоящей работе рассматриваются электродинамические свойства тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника в резистивном состоянии, находящейся на диэлектрической подложке. В резистивном состоянии магнитное поле, величина которого не превышает второе критическое поле, проникает в толщу сверхпроводящей пленки в виде упорядоченной структуры несверхпроводящих нитей, которая получила название решетки вихрей Абрикосова. Цилиндрические вихри Абрикосова ориентируются вдоль внешнего магнитного поля и составляют упорядоченную структуру. При увеличении температуры при  $T > 0$  из-за тепловых флуктуаций вихри будут отклоняться от положения равновесия и упорядоченная решетка вихрей начинает «плавиться». Такая же картина наблюдается при протекании транспортного тока по пленке из-за влияния силы Лоренца. В настоящее время существует несколько моделей, которые описывают поведение вихревой структуры в сверхпроводнике при температурах, приближающихся к критической. Среди них можно назвать ХУ-модель, модель взаимодействия двумерных бозонов, модель замкнутых вихрей [2]. В данной работе для описания свойств вихревой жидкости используется модель динамической магнитной восприимчивости [5].

**Материалы и методы исследования**

Геометрия структуры изображена на рис. 1. Слой № 1 – высокотемпературный сверхпроводник толщиной  $d_1$ , слой № 2 – диэлектрик толщиной  $d_2$ . Структура находится в магнитном поле  $B$ , направленном перпендикулярно границе раздела слоев. Величина магнитного поля не превышает второго критического поля для сверхпроводника  $B_{c2}$ . Тонкая пленка высокотемпературного сверхпроводника находится в смешанном состоянии. В режиме смешанного состояния магнитное поле проникает в сверхпроводящую пленку в виде решетки вихрей Абрикосова, и высокотемпературный сверхпроводник приобретает слабые магнитные свойства [6]. Электромагнитная волна падает на рассматриваемую структуру под углом  $\theta$ .

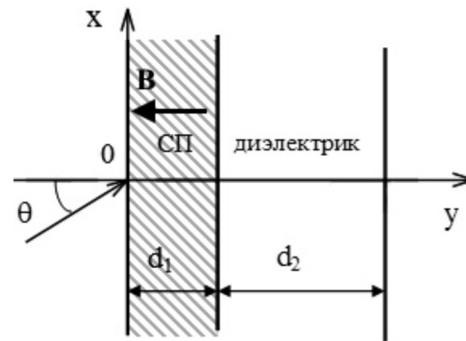


Рис. 1. Геометрия структуры

Для расчета магнитных свойств тонкой сверхпроводящей пленки рассмотрим модель динамической магнитной восприимчивости, которая учитывает возможность изменения параметров вихрей Абрикосова. Будем исследовать случай «вихревой жидкости», которая демонстрирует линейный отклик решетки вихрей Абрикосова на малое внешнее возмущение. В рамках рассматриваемой модели магнитная восприимчивость тонкой сверхпроводящей пленки рассчитывается по формуле [6]:

$$\chi = \frac{1}{4\pi\sqrt{i\omega}} \operatorname{th}(\delta\sqrt{i\omega}) \frac{ch(\delta n\sqrt{i\omega})}{ch(n\sqrt{i\omega})} + \frac{1}{4\pi\sqrt{i\omega}} \frac{sh(n\sqrt{i\omega}) - sh(\delta n\sqrt{i\omega})}{ch(n\sqrt{i\omega})}, \quad (1)$$

где  $u = l\sqrt{\omega / D_1}$  – безразмерный параметр,  $D = c^2/(4\pi\rho_v)$  – коэффициент диффузии,  $2l$  – ширина образца,  $\sqrt{\omega / D_1}$  – характерная длина диффузии,  $\delta = d/l$  – доля объема образца, занятого так называемой внутренней областью,  $\rho_v$  – удельное линейное сопротивление, обусловленное движением вихрей,  $n = \sqrt{D_1 / D_2}$  – коэффициент нелинейности вольт-амперной характеристики сверхпроводника, который связан с величиной коэффициентов диффузии  $D_1$  и  $D_2$ .

Магнитная проницаемость образца рассчитывается по формуле

$$\mu = 1 + \chi. \quad (2)$$

Мы рассматриваем высокотемпературный сверхпроводник в смешанном состоянии, которое возникает в том случае, если магнитное поле, которое приложено к сверхпроводящей пленке, находится в следующих пределах:  $B_{c1} < B < B_{c2}$ , где  $B_{c1}$  – первое критическое поле,  $B_{c2}$  – второе критическое поле для сверхпроводника. При этом внутри сверхпроводящей тонкой пленки из магнитных вихрей формируется

упорядоченная решетка вихрей Абрикосова. Причем магнитные свойства будут зависеть как от внешнего магнитного поля, температуры, так и от соотношения характерных времен тепловых и электромагнитных процессов в сверхпроводящей пленке, а также, опосредованно, и от характерных размеров сверхпроводника [2].

В данной работе исследуется, как зависят электродинамические параметры сверхпроводящей тонкой пленки от величины внешнего магнитного поля  $B$ . Рассмотрим случай однородной и изотропной пленки сверхпроводника в параллельном магнитном поле. Зависимость удельной проводимости для тонких пленок из высокотемпературной иттриевой керамики в слабых магнитных полях была исследована в работе [6]. Для однородного сверхпроводника второго рода удельная проводимость находится из решения уравнения Гинзбурга – Ландау. При этом зависимость удельной проводимости от величины внешнего магнитного поля описывается выражением [7]:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_0} = \frac{1}{\sqrt{\xi_H}} - \frac{2}{\sqrt{\xi_H + h}} + \frac{1}{\sqrt{\xi_H + 2h}} + \frac{7h + 2\xi_H}{8(\xi_H + 2h)^{3/2}}, \quad (3)$$

$$\xi_H = (\Omega Th)^{2/3} F^{-2} \left[ \frac{(1 + \Lambda)T / T_c - 1 + h}{(\Omega Th)^{2/3}} \right],$$

$$\Lambda = \Omega T_c \frac{\ln 8d^2}{2d},$$

где  $h = B/B_{c2}(0)$  – магнитное поле, отнесенное к величине  $B_{c2}(0)$ ,  $B_{c2}(0)$  – второе критическое поле для сверхпроводника при температуре  $T = 0$  К,  $\xi_H$  – выполняет роль безразмерной температуры,  $\sigma_0$  – константа с размерностью удельной проводимости,  $d = s/2\xi_c(0)$ ,  $s$  – расстояние между  $\text{CuO}$  плоскостями,  $\xi_c(0)$  – корреляционная длина в направлении, перпендикулярном плоскости  $\text{CuO}$  иттриевой керамики,  $\xi_{ab}(0)$  – корреляционная длина в направлении плоскости  $\text{CuO}$  иттриевой керамики.

Величина  $\Omega$  принимает следующие значения:

$$\Omega = \frac{8\pi^2(2k^2 - 1)\xi_c(0)k_B}{\gamma^2\Phi_0^2}, \quad (4)$$

где  $\gamma = \xi_c(0)/\xi_{ab}(0)$  – параметр анизотропии,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока,  $k$  – параметр Гинзбурга – Ландау,  $F(x)$  – некоторая функция, удовлетворяющая кубическому уравнению  $xF(x) = 1 - F^3$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим влияние магнитного поля на электродинамические свойства тонкой пленки высокотемпературного проводника при высоких частотах. Расчет коэффициента отражения от структуры сверхпроводящая пленка – диэлектрическая подложка проводился с использованием матричного метода. Матрица преобразования для слоя диэлектрика известна (см. работу [8]), матрица преобразования для тонкой пленки сверхпроводника приведена в работе [9]. Результаты расчета зависимости модуля коэффициента отражения рассматриваемой структуры от магнитного поля представлены на рис. 2. Параметры, использованные для расчета: толщина сверхпроводящей пленки  $d_1 = 25$  нм, толщина диэлектрической подложки  $d_2 = 0,25$  мкм, диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_2 = 9,8$ , угол падения на структуру  $\theta = 0,1$ ,  $\alpha = 20$ ,  $\gamma = 2$ ,  $\sigma(1) = 3,5 \times 10^6$  См/м,  $\lambda(0) = 0,13$  мкм,  $T_c = 89$  К,  $d = 0,7$ .

Из рис. 2 видно, что коэффициент отражения от тонкой сверхпроводящей пленки на диэлектрической подложке существенным образом зависит как от магнитного поля, так и от температуры. Причем при увеличении температуры максимум коэффициента отражения наблюдается при более низких магнитных полях. На рис. 3 показан результат расчета частотной зависимости модуля коэффициента отражения от рассматриваемой структуры для разных значений температуры, а на рис. 4 представлена частотная зависимость модуля коэффициента отражения для разных значений величины внешнего магнитного поля. Параметры структуры те же, что и на рис. 2.

Из рис. 3 и 4 видно, что при соответствующем выборе величины магнитного поля и температуры коэффициент отражения  $R$  демонстрирует резкий максимум, причем в максимуме величина  $R$  практически равна единице (кривая 2 на обоих рисунках). Равенство единице коэффициента отражения при определенной частоте говорит о том, что на данной частоте электромагнитная волна не может распространяться в исследуемой структуре. Как показано в работе [10], вблизи данной частоты существует область, в которой электромагнитная волна полностью проходит через тонкую пленку сверхпроводника. Нахождение этой области аналитическими методами является весьма сложным и требует численного подбора всех параметров сверхпроводника, включая величину внешнего магнитного поля, температуру, угол падения и толщину.

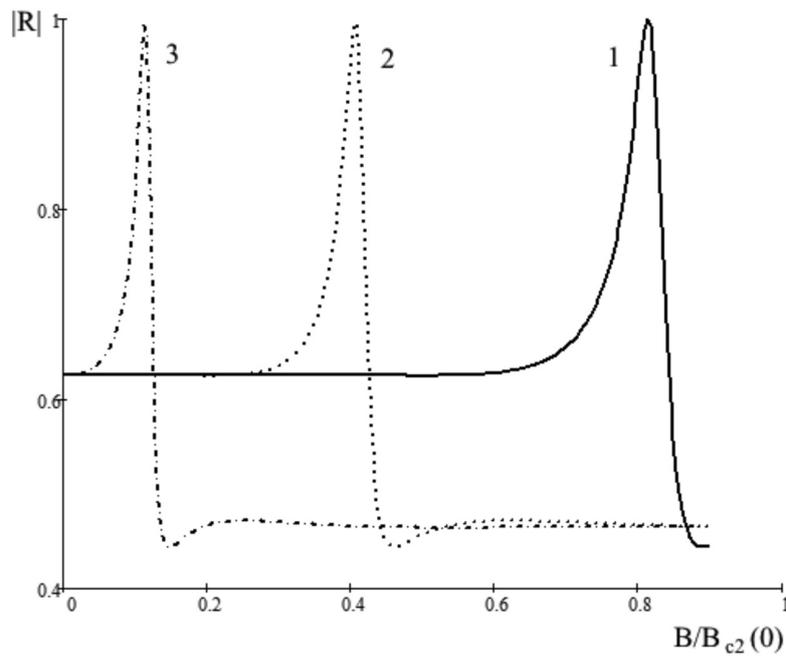


Рис. 2. График зависимости модуля коэффициента отражения от двухслойной структуры тонкая сверхпроводящая пленка – диэлектрик от величины магнитного поля  $V/V_{c2}(0)$  для разных температур. Кривая 1:  $t = 0,56$ , кривая 2:  $t = 0,7$ , кривая 3:  $t = 0,8$ , частота  $\omega = 10^{12}$  рад/с

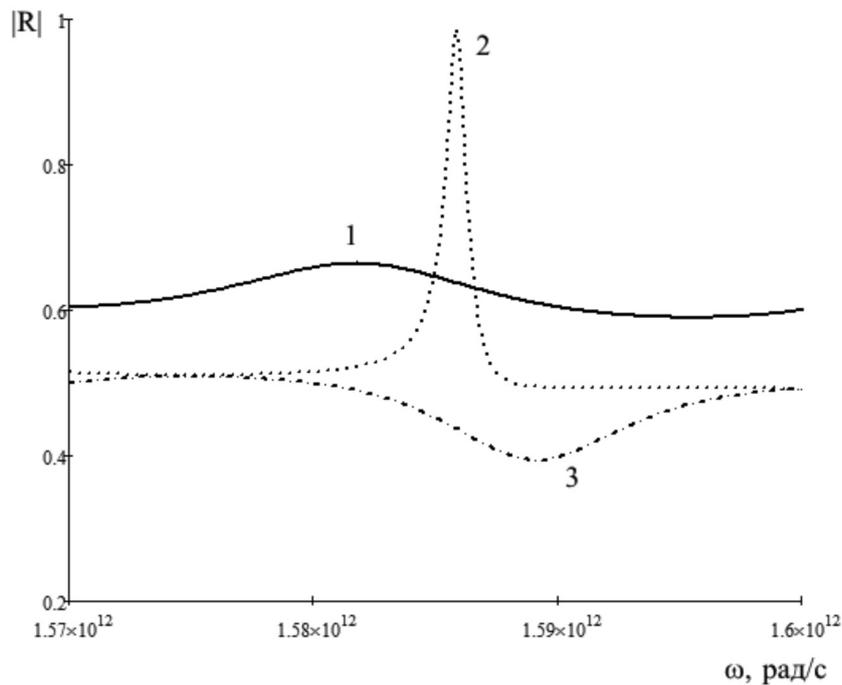


Рис. 3. График зависимости модуля коэффициента отражения от двухслойной структуры сверхпроводник – диэлектрик от частоты для разных значений температуры. Кривая 1:  $t = 0,5$ , кривая 2:  $t = 0,52$ , кривая 3:  $t = 0,55$ ,  $h = 0,3$

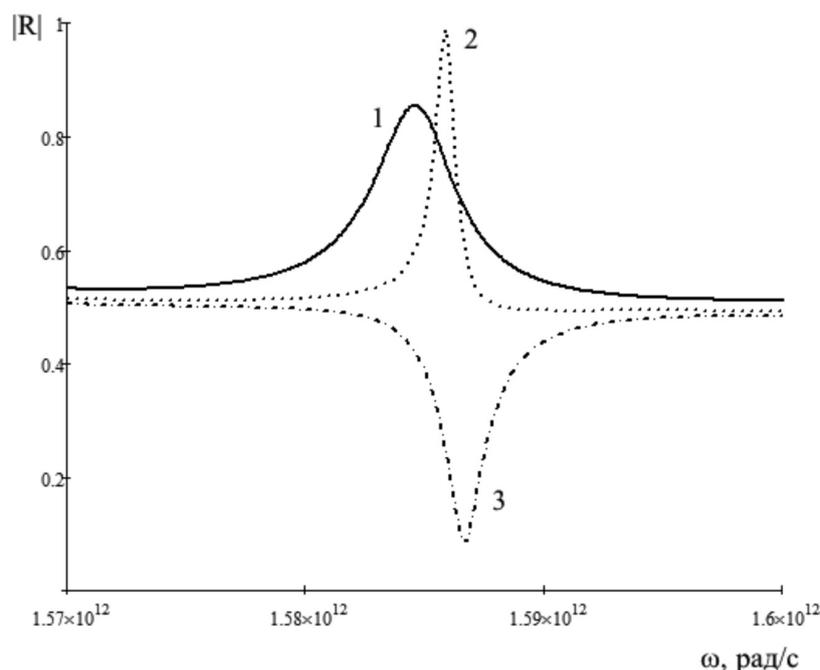


Рис. 4. График зависимости модуля коэффициента отражения от двухслойной структуры сверхпроводник – диэлектрик от величины частоты для разных значений магнитного поля  $h = B/B_{c2}(0)$ . Кривая 1:  $h = 0,27$ , кривая 2:  $h = 0,3$ , кривая 3:  $h = 0,31$ ;  $t = 0,52$

### Выводы

Таким образом, в работе показано, что тонкие пленки сверхпроводника второго рода, находящиеся во внешнем магнитном поле, могут демонстрировать достаточно сильные магнитные свойства, наблюдаемые для СВЧ-диапазона, а также при более высоких частотах. Использование ферромагнитной подложки повышает магнитный отклик тонких сверхпроводящих пленок. Наличие резкой зависимости коэффициента отражения от величины внешнего магнитного поля и температуры означает, что рассматриваемая двухслойная структура из тонкой сверхпроводящей пленки и слоя диэлектрика может служить высокоэффективным фильтром, полоса пропускания которого меняется под воздействием магнитного поля. Причем соответствующий подбор параметров, включающих температуру и толщину сверхпроводника, позволяет получить устройство с очень высокой чувствительностью.

### Список литературы

1. Govorun I.V., Leksikov A.A. Compact microwave power limiter with HTSC element. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2018. vol. 11. no. 1. P. 35–39.
2. Embon L., Anahory Y., Jelic Z.L., Lachman E.O., Myasoedov Y., Huber M.E., Mikitik G.P., Silhanek A.V., Milosevic M.V., Gurevich A., Zeldov E. Imaging of super-fast dy-

namics and flow instabilities of superconducting vortices. Nature Communications. 2017. vol. 8. P. 85–1 – 85–12.

3. Jing Xia J., Li M., Zhou Y. Numerical investigations on the characteristics of thermomagnetic instability in  $MgB_2$  bulks. Superconductor Science and Technology. 2017. vol. 30. no. 7. P. 1–28.

4. Петропавловский В.М., Топоркова Л.В. Способ стабилизации мощности излучения лазера // Инфокоммуникационные технологии. 2013. № 2. С. 65–68.

5. Trillaud F., Berger K., Douine B., Leveque J. Distribution of current density, temperature and mechanical deformation in YBCO bulks under Field-Cooling magnetization. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. vol. 28. no. 4. P. 6800805-1–6800805-8.

6. Zou S. Magnetization of high temperature superconducting trapped-field magnets. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017. 130 p.

7. Shantsev D.V., Gaevski M.E., Suris R.A., Bobyl A.V., Gasumyants V.E., Shalaev O.L. Temperature and magnetic field dependence of conductivity of YBaCuO films in the vicinity of superconducting transition: Effect of Tinhomogeneity. Physical Review B. 1999. vol. 60. P. 12485–12494.

8. Golovkina M.V. Electromagnetic wave propagation in a multilayered periodic structure containing negative index material. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2007; Proceedings IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2007. Tomsk, 2007. P. 174–178.

9. Головкина М.В. Особенности распространения электромагнитных волн в волноводной структуре со сверхпроводящей пленкой и метаматериалом // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 12. С. 1739–1743.

10. Bepalov A.A., Mel'nikov A.S., Buzdin A.I. Magnon radiation by moving Abrikosov vortices in ferromagnetic superconductors and superconductor-ferromagnet multilayers. Physical Review B. 2014. vol. 89. P. 054516-1–054516-12.