

УДК 537.876.46

## ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДНИК-ПОЛУПРОВОДНИК

Головкина М.В.

*ПГУТИ, Самара, Россия*

**Исследовано отражение от структуры, состоящей из тонкой пленки сверхпроводника второго рода в смешанном состоянии, находящейся на слое из полупроводника. Показана возможность усиления электромагнитных волн при отражении от рассматриваемой структуры за счет энергии вихрей Абрикосова в слое сверхпроводника. Показана возможность управления усилением или затуханием волны путем изменения внешнего магнитного поля.**

**Ключевые слова:** сверхпроводник, полупроводник, отражение.

Успехи, достигнутые в области технологии изготовления наноматериалов и тонкопленочных наноструктур за последнее время, привлекают пристальное внимание исследователей к изучению различных свойств наноструктур. Тонкие пленки высокотемпературных сверхпроводников демонстрируют свойства, которые не могут проявиться в объемном сверхпроводнике. Возможность эффективного взаимодействия электромагнитной волны с решеткой вихрей Абрикосова в тонких пленках сверхпроводника второго рода показана в работах [1, 2].

Рассмотрим тонкую пленку сверхпроводника второго рода, находящегося на подложке из полупроводникового материала. Толщина слоя сверхпроводника  $t$ , причем  $t \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - лондоновская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Направим ось  $Oy$  перпендикулярно границам раздела слоев, ось  $Ox$  параллельно границам раздела. Вся структура находится в магнитном поле

$$\frac{\partial B_y}{\partial t}(y=t) + \frac{j_{z0}\Phi_0}{\eta} \frac{\partial B_y}{\partial t}(y=t) = \frac{B_{y0}\Phi_0}{\eta t} \frac{\partial}{\partial x} [H_x(y=t) - H_x(y=0)], \quad (1)$$

где  $j_{z0}$  - плотность транспортного тока в сверхпроводнике,  $\eta$  - коэффициент вязкости магнитного вихря,  $t$  - толщина сверхпроводящей пленки,  $B_{y0}$  - величина внешнего магнитного поля,  $\Phi_0$  - квант магнитного потока. Пусть волна из полу-

$B_{y0}$ , направленном противоположно оси  $Oy$ . Величина магнитного поля находится в диапазоне  $B_{c1} < B_{y0} < B_{c2}$ , где  $B_{c1}$  - значение первого критического поля для сверхпроводника,  $B_{c2}$  второе критическое поле. Под действием транспортного тока, направленного перпендикулярно полю  $B_{y0}$  вдоль оси  $Oz$ , решетка вихрей Абрикосова в слоях сверхпроводника приходит в движение вдоль оси  $Ox$ . Рассмотрим распространение в данной структуре  $H$ -волны в плоскости  $xOy$  под углом  $\theta$  к оси  $Oy$ . Для простоты будем предполагать, что в плоскости слоев поля зависят только от одной координаты, и положим  $\partial/\partial z = 0$ . Как показано в работах [1, 2], наличие тонкой сверхпроводящей пленки можно учесть введением специального граничного условия

безграничного диэлектрика падает на тонкий слой сверхпроводника под углом  $\theta_1$  и выходит в слой полупроводника под углом  $\theta_2$ . Коэффициент отражения от структуры сверхпроводник - полупроводник имеет вид

$$R = \frac{\omega - \frac{j_{z0} \Phi_0}{\eta} k_{x1} + \frac{B_{y0} \Phi_0}{\eta t \mu_0} (k_{y1} - k_{y2})}{-\omega + \frac{j_{z0} \Phi_0}{\eta} k_{x1} + \frac{B_{y0} \Phi_0}{\eta t \mu_0} (k_{y1} + k_{y2})}, \quad (2)$$

где  $k_{x1} = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \cos \theta_1$ ,  
 $k_{y1,2} = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2}} \sin \theta_{1,2}$ ,  $\epsilon_{1,2}$  и  $\mu_{1,2}$  - диэлектрическая и магнитная проницаемость сред, индексы 1 и 2 относятся к диэлектрику (воздуху в рассматриваемом случае) и полупроводнику.

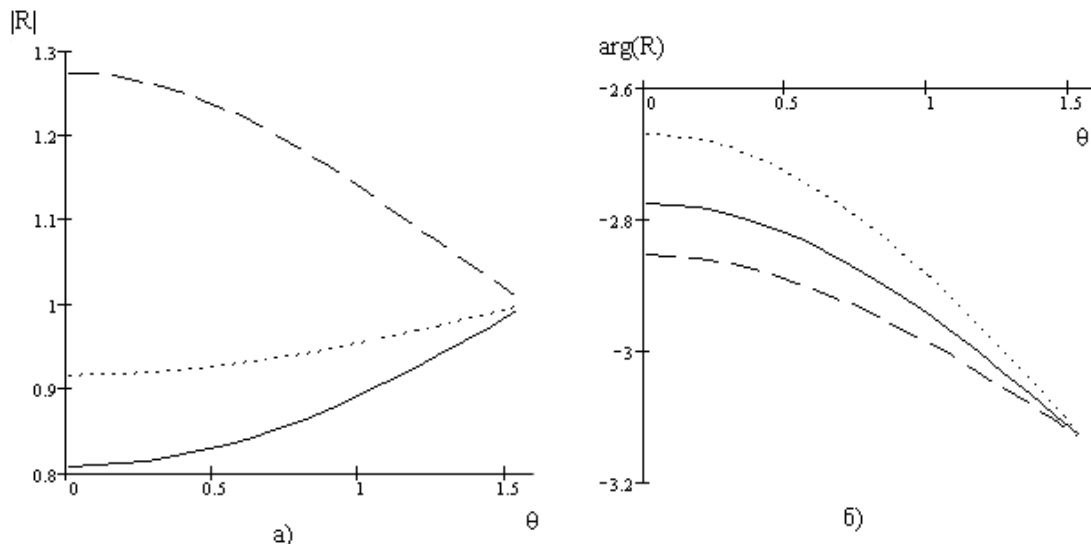
В качестве полупроводника рассмотрим полярный полупроводник (например, GaAs или AlGaAs). В рамках модели диэлектрического континуума диэлектрическая проницаемость полупроводника определяется выражением [3]

$$\epsilon_2(\omega) = \epsilon_\infty \frac{\omega_{LO}^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma}{\omega_{TO}^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma}, \quad (3)$$

где,  $\epsilon_\infty$  - решеточная часть диэлектрической проницаемости,  $\omega_{LO}$  и  $\omega_{TO}$  - частоты продольного и поперечного фононов,  $\Gamma$  - столкновительная частота.

отражения от структуры сверхпроводник - полупроводник в зависимости от величины угла падения для разных значений величины внешнего магнитного поля  $B_{y0}$ .

На рисунке 1 а, б представлены результаты численного расчета коэффициента



**Рис. 1, а), б).** Зависимость модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения от угла падения. Сплошная линия:  $B_{y0} = 0,3 Tл$ , короткий пунктир:  $B_{y0} = 1 Tл$ , длинный пунктир:  $B_{y0} = 10 Tл$ . Параметры структуры  $t = 10 нм$ ,  $j_{z0} = 10^8 A / м^2$ ,  $\eta = 10^{-8} (H \cdot c) / м$ .

Мы видим, что при увеличении угла падения модуль коэффициента отражения стремится к единице. Хорошо видно, что

значение внешнего магнитного поля существенным образом влияет на величину коэффициента отражения. В достаточно

сильных магнитных полях при определенном соотношении диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2(\omega)$ , которое определяется выбором частоты падающей электромагнитной волны, коэффициент отражения превышает единицу. Это означает, что при отражении наблюдается усиление волны за счет ее взаимодействия с движущейся вихревой структурой в слое сверхпроводника. Усиление может наблюдаться также в структуре сверхпроводник - диэлектрик [1, 2, 4], однако при введении в структуру слоя полупроводника появляется возможность изменения в широких пределах его диэлектрической проницаемости за счет наличия у нее частотной дисперсии.

Таким образом, рассмотренная в работе структура, содержащая тонкий слой сверхпроводника второго рода и слой полупроводника, может применяться при

создании различного рода устройств, например усилителей или фильтров, параметры которых зависят от частоты падающей электромагнитной волны и от величины внешнего магнитного поля. Управление полосой пропускания - усиления в таких устройствах может осуществляться путем изменения внешнего магнитного поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глущенко А.Г., Головкина М.В. // Письма в ЖТФ. -1998. - Т. 24. - Вып. 1. -С. 9.
2. Попков А.Ф. // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т. 15. -Вып. 5. - С. 9.
3. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. - М.: Физматлит. -2002. - 560 с.
4. Glushchenko A.G., Golovkina M.V. // International Symposium on Electromagnetic Compatibility "EMC'98 ROMA" Rome, Italy. - 1998. -V 2. -P. 483.

### THE REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES FROM STRUCTURE SUPERCONDUCTOR-SEMICONDUCTOR

Golovkina M.V.  
Samara, Russia

The reflection of electromagnetic waves from thin type II superconducting film situated on the semiconductor layer is investigated. The possibility of electromagnetic wave amplification as a result of coupling to the flux-line-lattice in superconductor film is showed. The ability to control of reflection coefficient is demonstrated.

Keywords: superconductor, semiconductor, reflection.