

- [1] Пилия А.Д., Федоров В.И. Вопросы теории плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1984. 265 с.
- [2] Гусakov Е.З., Савельев А.Н. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 7. С. 826-834.
- [3] Бардеев И.Н., Румянцев С.А. / Геомагнетизм и астрономия. 1989. Т. 29. № 5. С. 765-769.
- [4] Андреев Н.Е., Силин В.П., Силин П.В. // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. № 4. С. 1293-1302.
- [5] Амелин В.В., Зелексон Л.А. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 12. С. 1523-1526.
- [6] Ахиезер А.И., Ахиезер И.А., Половин Р.В. и др. Электродинамика плазмы. М.: Наука, 1974. 719 с.
- [7] Пермьяков В.А. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 2. С. 1478-1485.

Полярный геофизический
институт АН СССР,
Апатиты

Поступило в Редакцию
8 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17 12 сентября 1990 г.

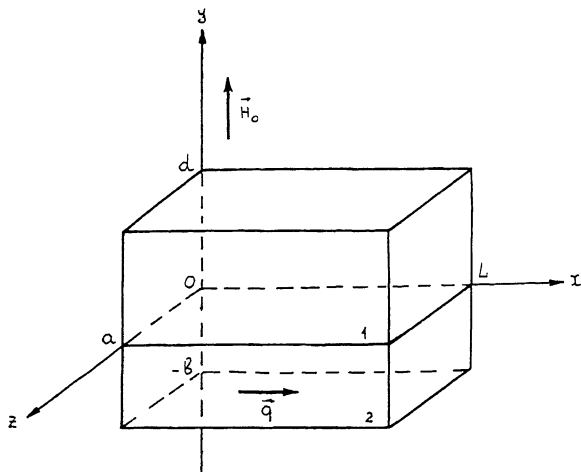
05.4

© 1990

ЭФФЕКТ УВЛЕЧЕНИЯ ВИХРЕЙ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ
ВОЛНОЙ В СТРУКТУРЕ ФЕРРИТ —
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИК

Н.И. Ползикова, А.О. Раевский

Проблема взаимодействия магнитостатической волны (МСВ) с пленкой высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) вызывает интерес и обсуждается как в теоретическом, так и в экспериментальном плане [1-5]. В [3-5] был обнаружен эффект электронного поглощения МСВ в структуре феррит-ВТСП. При поглощении электронами спиновой волны кроме уменьшения энергии волны происходит передача ее импульса к электронам ВТСП, что должно приводить к эффектам увлечения. Это может проявиться в возникновении разности потенциалов в разомкнутом проводнике по типу эффектов, наблюдавшихся в слоистых структурах феррит-полупроводник [6, 7]. Цель данной работы — выявить специфику увлечения электронов спиновыми волнами в структурах феррит-ВТСП. Попытка разобраться с этим вопросом уже предпринималась в литературе. В работе [2] было показано, что поле МСВ, проникая в пленку ВТСП, может вызывать в ней движение вихрей с постоянной сред-



Исследуемая структура: 1 – пленка ЖИГ, 2 – пленка или пластина ВТСП.

ней скоростью \vec{v}_{cp} . Этот результат явился следствием нелинейной связи мгновенной скорости вихря с полем МСВ. Далее будет показано, что для нахождения ЭДС увлечения необходимо учитывать также эффект возникновения сгустков вихрей, которые попадают в потенциальные ямы, созданные неоднородным магнитным полем МСВ. Это явление аналогично акустоэлектронному эффекту в пьезоэлектрическом полупроводнике [8].

Рассмотрим распространение МСВ в слоистой структуре феррит толщиной d – пленка ВТСП толщиной b , находящейся во внешнем магнитном поле $\vec{H}_0 = (0, H_0, 0)$ (см. рисунок). Величина поля удовлетворяет неравенству $H_{c1} \ll H_0 \ll H_{c2}$, где H_{c1} , H_{c2} – нижнее и верхнее критические поля ВТСП. Переменное электромагнитное поле МСВ создает в ВТСП переменный ток с плотностью \vec{j} и силу Лоренца, действующую на вихри $\vec{F} = \phi_0 [\vec{j}, \vec{n}]/c$, где ϕ_0 – квант магнитного потока, c – скорость света, \vec{n} – единичный вектор вдоль оси вихря. Пренебрегая инерционностью вихрей и их взаимодействием друг с другом, а также считая, что частота волны $\omega > \omega_p$ (ω_p – деппининговая частота), находим скорость движения вихрей

$$\vec{v} = \frac{\phi_0}{c\eta} [\vec{j}, \vec{n}], \quad (1)$$

где η – коэффициент вязкости вихрей. В результате этого движения в образце возникает дополнительное электрическое поле с напряженностью $[\vec{v}, \vec{B}]/c$, а связь тока с электрическим полем \vec{E} приобретает вид

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} - \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}]), \quad (2)$$

где $\vec{B} = \vec{B}_0 + \delta\vec{B}$, $\delta\vec{B}$, \vec{B}_0 - переменная и постоянная составляющие магнитной индукции в ВТСП, $\sigma = \sigma' + i\sigma''$ - комплексная проводимость сверхпроводника в системе покоящихся вихрей. В (2) помимо линейных по амплитуде волны слагаемых, содержатся нелинейные слагаемые двух типов $\sim ([\delta\vec{v}_2, \vec{B}_0] + [\delta\vec{v}_1, \delta\vec{B}_1])$. Первое слагаемое содержит нелинейную скорость вихрей $\delta\vec{v}_2$, связанную с нелинейной плотностью тока, и вычислялось в [2] (для поверхностной МСВ). Второе слагаемое есть произведение двух линейных по амплитуде волны величин $\delta\vec{v}_1$ и $\delta\vec{B}_1$, и учитывает возникновение переменной концентрации вихрей $\delta n_v = \delta B_{1y} / \Phi_0$, т.е. группировку вихрей. Производя операцию усреднения (1) и (2) по периоду волны, находим выражение для постоянного тока, создаваемого МСВ:

$$\langle \vec{j} \rangle = \sigma_B \langle \vec{E} \rangle + \vec{j}_{CT}, \quad (3)$$

$$\vec{j}_{CT} = -\sigma_B \langle [\delta\vec{v}_1, \delta\vec{B}_1] \rangle, \quad (4)$$

где $\sigma_B \approx c^2 \gamma / B_0 \Phi_0$ - эффективная проводимость сверхпроводника в условиях вязкого движения вихрей, \vec{j}_{CT} - сторонний ток, угловые скобки означают усреднение по периоду волны. Для нахождения \vec{j}_{CT} необходимо иметь решение для $\delta\vec{v}_1$, $\delta\vec{B}_1$. С этой целью решалась связанная система уравнений Максвелла и уравнений прецессии магнитного момента в безобменном приближении, дополненные стандартными электродинамическими граничными условиями. Такой квазилинейный подход для решения нелинейной задачи справедлив при условии, что амплитуда колебания вихря много меньше длины волны. При этом оказывается, что $j_{CT} \sim |\delta\vec{E}_s|^2$, где $\delta\vec{E}_s$ - переменное электрическое поле в сверхпроводнике. Это поле выражается через мощность МСВ, определяемую соотношением $W = (c/8\pi) \iint dydz \operatorname{Re} [\delta\vec{E}, \delta\vec{H}^*]$, где $\delta\vec{E}$ и $\delta\vec{H}$ - переменные электрические и магнитные поля, вычисляемые во всех средах. Далее приведем результаты расчета в приближении тонких слоев сверхпроводника и феррита, когда

$$q'd \ll 1, \quad l \gg b, \quad q'l \ll 1, \quad b/q'l^2 \ll 1, \quad (5)$$

$$\vec{j}_{CT} = \{0, 0, j_{CT}(x)\}, \quad j_{CT}(x) = -\frac{2\pi q'}{cB_0 a} W_0 e^{-2q''x}, \quad (6)$$

где $l = \sqrt{c^2 / 2\pi\sigma_B \omega}$ - глубина проникновения электромагнитного поля в сверхпроводник, a - поперечный размер структуры в направлении O_y , W_0 - входная мощность, $q = q' + iq''$. Под влиянием стороннего тока в слое сверхпроводника устанавливается распределение статического поля $\langle \vec{E} \rangle = -\vec{\nabla}\varphi(x, z)$. Это поле можно найти, решив уравнение Лапласа для потенциала

$$\Delta\varphi(x, z) = 0, \quad (7)$$

вытекающее из уравнения $\text{div } \vec{j} = 0$ и уравнений (3, 4, 6). Для разомкнутого образца на границе слоя должно выполняться условие

$$\vec{N} \cdot \vec{j} = 0, \quad (8)$$

где \vec{N} — нормаль к боковой поверхности сверхпроводника. Решение (6), (7) имеет вид

$$\varphi(x, z) = \frac{4q'q''L}{cB_0\alpha} W_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1 - (-1)^n e^{-2q''L}}{n^2 \left[(\pi n)^2 + (2q''L)^2 \right]} \cdot \frac{\text{sh} \frac{\pi n}{L} \left(z - \frac{a}{2} \right)}{\text{ch} \frac{\pi n a}{2L}} \cos \frac{\pi n}{L} x. \quad (9)$$

Здесь L — продольный размер сверхпроводника. Из (9) видно, что возникает разность потенциалов как в поперечном V_{\perp} , так и в продольном V_{\parallel} относительно \vec{q} направлении. Возникновение V_{\parallel} обусловлено появлением в образце круговых токов согласно (8).

При слабом затухании волны на длине L ($q''L \ll 1$) главную роль в сумме играет член с $n=0$. Тогда $V_{\parallel} = \varphi(L, z) - \varphi(0, z) \sim q''L V_{\perp}$, а для $V_{\perp} = \varphi(x, a) - \varphi(x, 0)$ получаем

$$V_{\perp} = \frac{2\pi q'}{cB_0} W_0. \quad (10)$$

Выражение для ЭДС увлечения V_{\perp} может быть получено и в духе методики Вайнрайха [8], основанной на использовании законов сохранения энергии и импульса. При этом получается

$$V_{\perp} = \frac{\gamma B_0 q''}{c\omega n_0 \eta b} W_0, \quad (11)$$

где γ — коэффициент электронного поглощения волны, вводимый феноменологически, $n_0 = B_0/\Phi_0$ — статическая концентрация вихрей. Из полученного в линейном приближении дисперсионного уравнения следует, что $\gamma = 2\pi\omega\eta b/B_0\Phi_0$. Подставляя это в (11), видим, что (11) и (10) совпадают точно.

Таким образом, рассмотренный эффект прямо пропорционален коэффициенту электронного поглощения волны и аналогичен эффекту увлечения электронов волнами различной природы в структурах феррит-полупроводник, пьезоэлектрический полупроводник и др.

Оценим величину вольт-ваттной чувствительности по формуле (8). Приняв, что $q'/B_0 \sim 0.1 \div 1$ (см·Гс) $^{-1}$, а все остальные параметры удовлетворяют неравенствам (4), получаем $V_{\perp}/W_0 \sim 10^{-2} \div 10^{-1}$ В/Вт, что по порядку сравнимо с получаемой экспериментально в структурах феррит-полупроводник [7]. Величина среднего электрического поля $\langle \vec{E} \rangle \sim V_{\perp}/a$ и амплитуда переменного поля $|\delta \vec{E}|$ оказываются по оценкам гораздо меньше критического электрического поля, при котором возникают нелинейные эффекты, обусловлен-

ные возрастанием энергии нормальных возбуждений при движении вихрей [9]. Это дает возможность использовать квазилинейный подход. Рассматриваемый эффект может в принципе быть использован для создания устройств обработки информации на МСВ: конвольверов, датчиков и др.

Авторы благодарят П.Е. Зильбермана за полезное участие в обсуждении работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Попков А.Ф. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 14. С. 9-14.
- [2] Попков А.Ф. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 112-117.
- [3] Анфиногенов В.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 14. С. 24-28.
- [4] Анфиногенов В.Б. и др. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1989. Т. 2. В. 12. С. 5-14.
- [5] Лебедь Б.М., Яковлев С.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 19. С. 27-29.
- [6] Вашковский А.В. и др. // ФТТ. 1975. Т. 17. В. 11. С. 3395-3398.
- [7] Медников А.М. и др. // ФТТ. 1981. Т. 23. В. 7. С. 2116-2120.
- [8] Weinreich G. // Phys. Rev. 1957. V. 107. N 1. P. 317-318.
- [9] Larkin A.I., Ovchinnikov // Nonequilibrium Superconductivity, ed. by D.N. Langenberg and A.I. Larkin, North-Holland, Amsterdam, 1986. P. 493-542.

Поступило в Редакцию
28 февраля 1990 г.
В окончательной редакции
23 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17 12 сентября 1990 г.

08

© 1990

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПАВ СТОУНЛИ НА ГРАНИЦЕ ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ЖИДКОСТЬ

С.Н. Гужев, Р.Г. Маев

В работе [1] для генерации и приема поверхностных акустических волн (ПАВ) Стоунли (или Шолте) на границе твердого тела и жидкости было предложено использовать встречно-штыревые