

05.4;07

©1993

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТОКИ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ТУННЕЛИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

С.А.Афанасьев, В.В.Ефимов, Д.И.Семенцов

В [1,2] при изучении особенностей туннельной интерференции, имеющей место в случае нормального падения на поглощающий слой двух встречных когерентных электромагнитных волн, основное внимание было уделено интерференционному потоку и его зависимости от параметров системы. Между тем, с точки зрения управления энергетическими параметрами волны, проходящей через тонкую металлическую пленку, основной интерес представляет полный энергетический поток, включающий, наряду с интерференционным, падающий, отраженный потоки одной волны и проходящий через поток другой волны. В настоящей работе получены выражения для полного потока внутри и вне поглощающего слоя и исследуется его зависимость от толщины слоя и разности начальных фаз падающих волн.

Пусть на плоскопараллельный слой ($0 \leq y \leq L$) с комплексным показателем преломления $n^* = n_1 + in_2$ из вакуума с противоположных сторон падают нормально линейнополяризованные когерентные волны с частотой ω , амплитудами A и B и начальными фазами φ_a и φ_b . Решая граничную задачу и находя электрическое и магнитное поля внутри и вне слоя, запишем выражения для усредненных по периоду полных потоков в областях I ($y < 0$) и III ($y > L$):

$$\langle S_I \rangle = \frac{c}{8\pi} \left(B^2 - |r|^2 \cdot B^2 - |t|^2 \cdot A^2 - 2I_I \cdot A \cdot B \right),$$

$$\langle S_{III} \rangle = -\frac{c}{8\pi} \left(A^2 - |r|^2 \cdot A^2 - |t|^2 \cdot B^2 - 2I_{III} \cdot A \cdot B \right). \quad (1)$$

Здесь амплитудные коэффициенты отражения и прохождения

$$r = (2i/G)(\alpha^2 - 1) \sin kL, \quad t = 4\alpha/G,$$

$$G = (1 + \alpha)^2 \exp(ikL) - (1 - \alpha)^2 \exp(ikL),$$

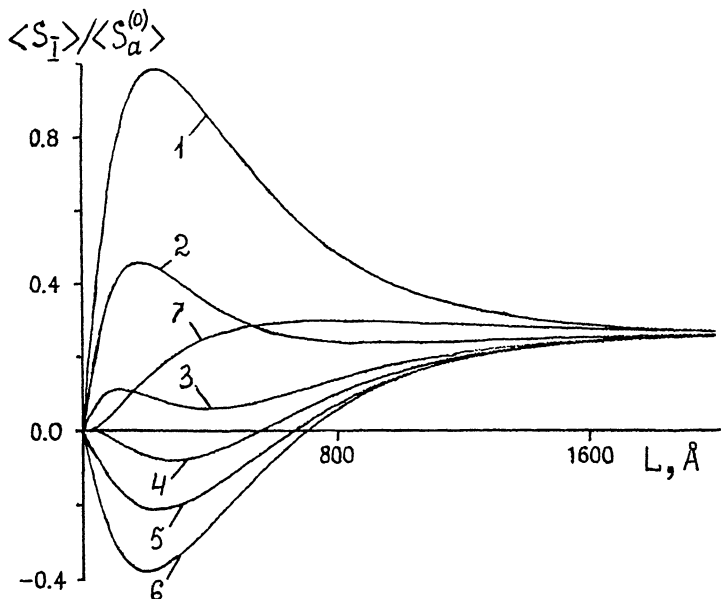


Рис. 1. Зависимость нормированного полного потока в области I от толщины слоя при $A = B$.

1 — $\Delta\varphi_{ab} = -\pi/2$, 2 — 0, 3 — $\pi/6$, 4 — $\pi/4$, 5 — $\pi/3$, 6 — $\pi/2$, 7 — π .

где $\alpha = 1/n^*$, $k = k_0 n^*$, $k_0 = \omega/c$, c — скорость света в вакууме.

Коэффициенты интерференционной прозрачности

$$I_I = (r_1 t_1 + r_2 t_2) \cos \delta + (r_1 t_2 - r_2 t_1) \sin \delta,$$

$$I_{III} = (r_1 t_1 + r_2 t_2) \cos \delta - (r_1 t_2 - r_2 t_1) \sin \delta,$$

где $r_1 + ir_2 = r$, $t_1 + it_2 = t$, $\delta = \varphi_a - \varphi_b - k_0 L$ — разность фаз, падающих на слой волн на его поверхностях. В случае равенства амплитуд падающих волн ($A = B$) полный поток состоит только из интерференционного $\langle S_{I,III}^{int} \rangle = \mp \mp \frac{c}{4\pi} I_{I,III} \cdot A \cdot B$ (за исключением поглощенной части, так как $1 - |r|^2 - |t|^2 = |d|^2$, где d — амплитудный коэффициент поглощения).

Ниже представлены расчетные зависимости интерференционного и полного потоков, полученные для слоев с параметрами $n_1 = 0.62$ и $n_2 = 2.57$ (медь для длины волны $\lambda = 0.589$ мкм [3]). На рис. 1 приведены зависимости полного потока, нормированного на величину потока падающей волны с амплитудой A ($S_a^{(0)}$), в области I от толщины слоя, полученные для равных амплитуд падающих волн и нескольких значений разности фаз $\Delta\varphi_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$. Из приведенных

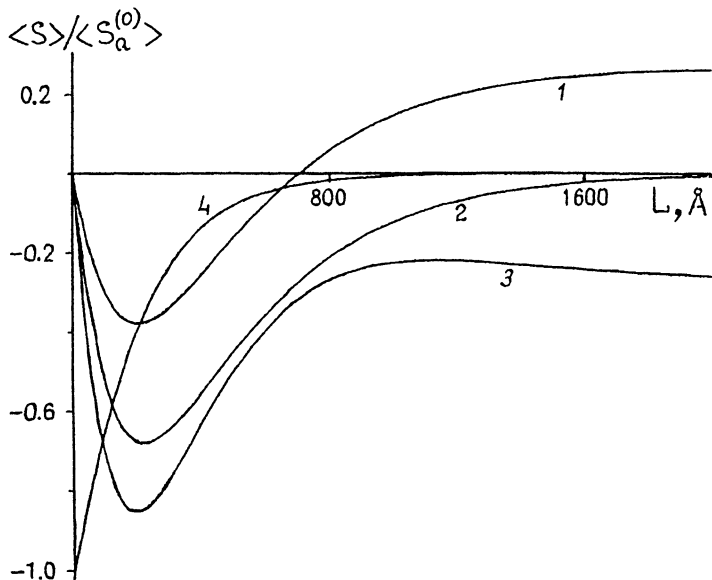


Рис. 2. Зависимости нормированных потоков $\langle S_I \rangle$ (1), $\langle S_I^{int} \rangle$ (2), $\langle S_{III} \rangle$ (3), $\langle S_a^{(t)} \rangle$ (4), от толщины слоя при $A = B$ и $\Delta\varphi_{ab} = \pi/2$.

кривых видно, что в зависимости от значения $\Delta\varphi_{ab}$ полный поток может менять знак, а может быть и знакопостоянным при изменении L . При достаточно больших толщинах слоев ($k_0 n_2 L \gg 1$) полный поток стремится к постоянному значению, определяемому балансом падающего и отраженного потоков для массивного поглощающего материала.

На рис. 2 приведена зависимость от L нормированных полных потоков в областях I (кривая 1) и III (кривая 3), интерференционного потока в области I (кривая 2) при $\Delta\varphi_{ab} = \pi/2$ и $A = B$. Кривая 4 соответствует прошедшему через слой потоку $\langle S_a^{(t)} \rangle$ при наличии только одной падающей на слой волны с амплитудой A (в области III). Знак потоков определяет их направление по отношению к положительному направлению оси y . При больших толщинах потоки справа и слева от слоя становятся одинаковыми и направленными к пленке. Разность $\langle S_I \rangle - \langle S_{III} \rangle$ определяет энергию, поглощаемую слоем в единицу времени. Сравнивая кривые 2 и 4, видим, что имеется достаточно широкая область толщин, в которой проходящий поток одиночной волны достаточно мал и интерференционный поток (того же знака) значительно превышает поток $\langle S(t)_a \rangle$. Именно в этом заключается эффект "просветления" поглощающего слоя при наличии встречной когерентной волны.

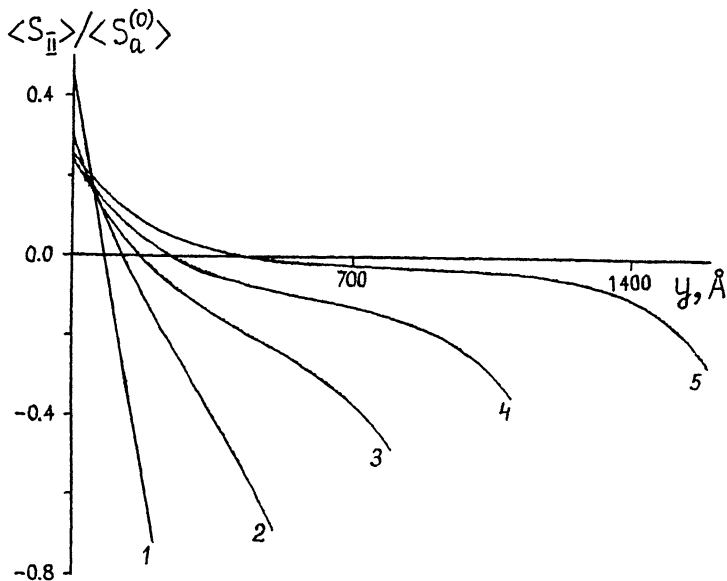


Рис. 3. Зависимость нормированного полного потока внутри слоя от координаты при $A = B$ и $\Delta\varphi_{ab} = 0$.

1 — $L = 200$, 2 — 500, 3 — 800, 4 — 1100, 5 — 1600 Å.

На рис. 3 представлено распределение полного потока $\langle S_{II} \rangle$ внутри слоя, полученное для равных амплитуд падающих волн и различных значений толщины слоя при $\Delta\varphi_{ab} = 0$. Для малых толщин ($k_0 n_2 L \ll 1$) зависимость $\langle S_{II}(y) \rangle$ близка к линейной, увеличение толщины слоя приводит к нелинейности указанной зависимости и уменьшению интервала значений потока $\langle S_{II} \rangle$. Внутри слоя поток электромагнитной энергии направлен к сечению, в котором $\langle S_{II} \rangle = 0$. Закон сохранения энергии требует наличия в слое теплового потока от указанного сечения к поверхностям слоя.

В заключение укажем, что в эксперименте эффект туннельной интерференции удобно исследовать при наклонном падении пучков на слой, позволяющем пространственно разделить интерферирующие и падающий пучки.

Список литературы

- [1] Сидоренков В.В., Толмачев В.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 21. С. 34-37; 1990. Т. 16. В. 3. С. 20-25.
- [2] Семенцов Д.И., Ефимов В.В., Афанасьев С.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 11. С. 6-11.
- [3] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.

Филиал Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова в Ульяновске

Поступило в Редакцию
8 октября 1993 г.
