

**О ЯВЛЕНИИ ПОЛНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
ЧЕРЕЗ СЛОИ ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМОПОДОБНЫХ СРЕД
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

P.P. Рамазашвили

Показано, что явление полного прохождения электромагнитных волн через слои плотной плазмы и металлов из-за возбуждения поверхностных волн дает возможность создания поляризаторов и спектральных фильтров, работающих на фиксированной частоте.

В работе¹ было показано, что неоднородный слой плазмы со сверхкритической плотностью в максимуме может оказаться полностью прозрачным для падающей *p*-поляризованной волны в пренебрежении диссипативными процессами, если происходит скачкообразное изменение плотности с докритического до сверхкритического значения. Было показано, что возможность такого просветления плотного слоя обусловлена резонансным возбуждением на скачках плотности поверхностных волн, обеспечивающих передачу энергии падающей волны через непрозрачную область слоя. Доказательство возможности полного просветления в работе¹ было дано лишь для пространственно симметричного слоя (рис. 1), но было отмечено, что возможно безотражательное прохождение волн и через несимметричный слой, изображенный на рис. 2. В работе² тоже сделан вывод о возможности полного просветления симметричного слоя плазмы, изображенного на рис. 1. Эксперимент³ моделирует прохождение электромагнитных волн через симметричный слой плазмы с помощью трехслойной системы диэлектрик – металл – диэлектрик, зажатой между двумя призмами с большим показателем преломления, пространственное распределение диэлектрической проницаемости в которой носит такой же характер, как для слоя на рис. 1. Было обнаружено прохождение до 70 % *p*-поляризованного излучения через систему, тогда как *s*-поляризованная волна практически не проникала через слой. (Ранее такие результаты были получены при экспериментальном исследовании трехслойного оптического поляризатора в работе⁴). Идея создания такого поляризатора была предложена в работе⁵). В работах^{2, 3} содержится утверждение, что для полного прохождения волн необходима пространственная симметрия системы. Ниже на простом примере двухслойной системы покажем, что полное прохождение *p*-поляризованных волн возможно и в случае несимметричной системы.

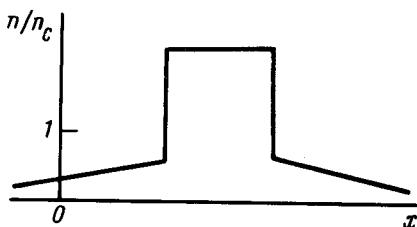


Рис. 1. Профиль плотности слоя плазмы $n(x)$
(n_c – критическая плотность)

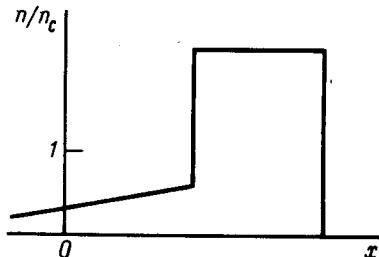


Рис. 2

Пусть два контактирующих слоя с толщинами l_1 и l_2 и диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 соответственно находятся между двумя призмами с диэлектрической проницаемостью ϵ_p . Призмы будем считать заполняющими полупространство. Коэффициент отражения (отношение амплитуд отраженной и падающей волн) на колонно падающей *p*-поляризованной волны от двухслойной системы запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
 R = & \{ (g_1 + g_2)[(g_p - ig_1)(g_2 - ig_p) + (g_p + ig_1)(g_2 + ig_p)] \exp(-2\kappa_1 l'_1 - 2\kappa_2 l'_2)] + \\
 & + (g_1 - g_2)[(g_p + ig_1)(g_2 - ig_p) \exp(-2\kappa_1 l'_1) + (g_p - ig_1)(g_2 + ig_p) \exp(-2\kappa_2 l'_2)] \} / \\
 & / \{ (g_1 + g_2)[(g_p + ig_1)(g_2 - ig_p) + (g_p - ig_1)(g_2 + ig_p)] \exp(-2\kappa_1 l'_1 - 2\kappa_2 l'_2) + \\
 & + (g_1 - g_2)[(g_p - ig_1)(g_2 - ig_p) \exp(-2\kappa_1 l'_1) + (g_p + ig_1)(g_2 + ig_p) \exp(-2\kappa_2 l'_2)] \}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Здесь ω и $k_{\parallel} = k \sin \theta$ – частота и параллельная слоям составляющая волнового вектора, θ – угол падения волны на первый слой, а остальные обозначения таковы:

$$g_p = \sqrt{\epsilon_p - n_{\parallel}^2} / \epsilon_p; g_{1,2} = \kappa_{1,2} / \epsilon_{1,2}; \kappa_{1,2} = \sqrt{n_{\parallel}^2 - \epsilon_{1,2}}; n_{\parallel}^2 = k_{\parallel}^2 c^2 / \omega^2; l'_{1,2} = \omega l_{1,2} / c. \quad (2)$$

Условие $R = 0$ равносильно двум уравнениям:

$$g_1 + g_2 = 0 \quad \text{и} \quad \kappa_1 l_1 = \kappa_2 l_2. \quad (3)$$

Для выполнения первого условия необходимо, чтобы $\epsilon_1 \epsilon_2 < 0$. Из него следует дисперсионное уравнение поверхностных волн на границе раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 :

$$n_{\parallel}^2 = \epsilon_1 \epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2). \quad (4)$$

Второе условие означает равенство эффективных толщин слоев, гарантирующее равенство падающего и прошедшего потоков излучения, так как при выполнении этого условия усиление поля в одном слое компенсируется его ослаблением в другом.

Детали условий просветления зависят от конкретных дисперсионных свойств слоев. Рассмотрим два случая:

- Первая среда диэлектрик с $\epsilon_1 = \text{const} > 0$, а вторая среда плазмоподобна с $\epsilon_2 = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$. Из условий просветления и уравнения $k^2 = \omega^2 \epsilon_p / c^2$ следует:

$$\omega^2 = \omega_p^2 l_2 / (l_2 + \epsilon_1 l_1); \quad k_{\parallel}^2 = \frac{\omega_p^2}{c^2} \frac{\epsilon_1 l_2 l_1}{(l_1 - l_2)(l_1 \epsilon_1 + l_2)}; \quad \sin^2 \theta = \epsilon_1 l_1 / [\epsilon_p (l_1 - l_2)]. \quad (5)$$

При этом для выполнения последнего равенства необходимо, чтобы

$$\epsilon_p > \epsilon_1 l_1 / (l_1 - l_2). \quad (6)$$

- Оба слоя плазмоподобны:

$$\epsilon_1 = 1 - \omega_{p1}^2 / \omega^2; \quad \epsilon_2 = 1 - \omega_{p2}^2 / \omega^2; \quad \omega_{p2}^2 > \omega_{p1}^2. \quad (7)$$

В этом случае условия полного просветления дают:

$$\omega^2 = \frac{l_1 \omega_{p1}^2 + l_2 \omega_{p2}^2}{l_1 + l_2}; \quad k_{\parallel}^2 = \frac{l_1 l_2}{l_1^2 - l_2^2} \frac{\omega_{p2}^2 - \omega_{p1}^2}{c^2}; \quad \sin^2 \theta = \frac{l_1 l_2}{(l_1 - l_2) \epsilon_p} \frac{\omega_{p2}^2 - \omega_{p1}^2}{l_1 \omega_{p1}^2 + l_2 \omega_{p2}^2}. \quad (8)$$

При этом необходимо выполнение неравенства:

$$\epsilon_p > \frac{l_1 l_2}{l_1 - l_2} \frac{\omega_{p2}^2 - \omega_{p1}^2}{l_1 \omega_{p1}^2 + l_2 \omega_{p2}^2}. \quad (9)$$

Таким образом, при заданных параметрах слоев однозначно определяются те значения частоты и угла падения волны, при которых двухслойная система оказывается полностью прозрачной. Тем самым возможность полного просветления несимметричной системы доказана.

Легко убедиться, что слабая неоднородность слоя плазмы (рис. 2) не является препятствием для безотражательного прохождения p -поляризованных волн через плотную плазму.

Отметим важное отличие между симметричными и несимметричными системами, заключающееся в том, что в симметричной системе из-за геометрии задачи равенство падающего и проходящего потоков излучения в безотражательном режиме выполняется автоматически, и уравнение $R = 0$ дает лишь связь между ω и k_{\parallel} проходящей волны¹, тогда как несимметричная система пропускает волну лишь при однозначно определенных значениях частоты и угла падения. Это означает, что на основе двухслойной системы можно создавать спектральные фильтры с жестко фиксированной полосой пропускания. Относительная ширина полосы пропускания такого фильтра будет определяться величиной $\exp(-2\kappa_1 l'_1)$ и при достаточно толстых слоях может оказаться малой. Отметим, однако, что она не может быть слишком малой, сравнимой с пренебрежимыми мнимыми частями диэлектрических проницаемостей.

В заключение выражаю искреннюю благодарность В.П.Силину за интерес к работе и стимулирующие обсуждения.

Литература

1. *Ramazashvili R.R.* Proceedings of the Conference on Surface Waves in Plasmas, Blagoevgrad, Bulgaria, 1981. Sofia, 1983, p. 268.
2. *Vuković S., Dragila R.* The Australian National University, Institute of Advanced Studies, rep. LPL 8429, 1984.
3. *Dragila R., Luther-Davies B., Vuković S.* Phys. Rev. Lett., 1985, 55, 1117.
4. *Salwen A., Stansland L.* Optics Commun., 1970, 2, 9.
5. *Otto A.* Optyk, 1969, 29, 246.
6. *Ландау Л.Д., Либшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982, с. 425.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
7 января 1986 г.