



УДК 538.132

А. И. КИРИЛЕНКО

## ЯВЛЕНИЕ БРЮСТЕРА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПАДЕНИИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ДВУХ ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ СЛОИ

Явление Брюстера, понимаемое как прохождение волны определенной поляризации через границу раздела сред без отражения, находит широкое применение в оптике и радиофизике. Нами обнаружено, что при определенных условиях на границе параллельных слоев (при компланарном падении) существуют волны определенной поляризации, которые переносят энергию перпендикулярно к границе раздела и при этом на границе не отражаются. Предпосылкой для существования такого эффекта служит установленный С. А. Богуславским факт зависимости направления потока энергии неоднородной волны (вектор Пойнтинга), распространяющейся в поглощающей среде, от ее поляризации [1]. Цель нашей работы — установить, на границах каких сред и при каких параметрах волн указанное явление возможно.

Вопрос о том, каким образом в поглощающей среде сформировать волну с заданной структурой, обсуждался в литературе, и мы его рассматривать не будем. Считаем, что на границу раздела  $z=0$  двух сред падает волна вида [2]:

$$\vec{E} = A_s [\vec{q}e] - A_p [e [\vec{q}e]]; \quad \vec{H} = NA_s [e [\vec{q}e]] + NA_p [\vec{q}e], \quad (1)$$

где множитель  $\exp\{i[\omega t - k(\vec{m}, \vec{r})]\}$  опущен;  $N = n - i\kappa = n(1 - i \operatorname{tg} \delta)$  — показатель преломления (ПП);  $\vec{m} = N\vec{e} = N(\vec{e}_1 + i\vec{e}_2) = \vec{m}_1 + i\vec{m}_2$  — вектор рефракции;  $\vec{e}_1 \sim \operatorname{ch} \vartheta \{\sin \alpha, 0, \cos \alpha\}$  — вектор волновой, а  $\vec{e}_2 \sim \operatorname{sh} \vartheta \{\cos \alpha, 0, -\sin \alpha\}$  — вектор амплитудной нормали;  $\alpha$  — угол (параметр) падения;  $\vartheta$  — параметр неоднородности;  $\vec{q} = \{0, 0, 1\}$  — нормаль к границе раздела. Известно, что  $s$ - и  $p$ -волны (1) при отражении и преломлении не меняют своего типа, и на границе раздела амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн связаны соотношениями, которые можно представить в том же виде, что и формулы Френеля. Явление Брюстера состоит в том, что коэффициент отражения  $R_p$  обращается в нуль, что дает [2]:

$$\operatorname{tg}(\alpha + i\vartheta) = \frac{N'}{N} = n_1 - i\kappa_1, \quad (2)$$

где  $N' = n' - i\kappa'$  — ПП среды, в которой распространяется преломленная волна. Соотношение (2) позволяет однозначно определить параметры волны  $\alpha$  и  $\vartheta$ , при которых  $p$ -волна проходит границу раздела без отражения. С другой стороны, для  $p$ -волны (1) падающий поток энергии перпендикулярен к границе раздела, если

$$\operatorname{tg} \alpha = u \operatorname{th} \vartheta, u = \frac{4 \operatorname{tg} \frac{\delta}{3} + \sqrt{3} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\delta}{3}\right)}{1 - 3 \operatorname{tg}^2 \frac{\delta}{3}} \quad (3)$$

при  $0 < \delta < \pi/2$ .

Таким образом, если удастся найти такие  $\alpha$  и  $\vartheta$ , что они одновременно будут удовлетворять соотношениям (2) и (3), получим явление Брюстера при нормальном потоке энергии. Из (2) и (3) имеем два уравнения относительно  $\operatorname{tg} \alpha$ :

$$\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{u}{\kappa_1} \operatorname{tg} \alpha - \frac{n_1 u}{\kappa_1} = 0; \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{n_1} \operatorname{tg} \alpha + \frac{\kappa_1 u}{n_1} = 0, \quad (4)$$

у которых должен быть хотя бы один общий вещественный корень. Это приводит к условиям, которым должны удовлетворять параметры граничащих сред:

$$1 \geq 4 n_1 \kappa_1 u \geq -u^2, \\ \frac{(n'^2 + \kappa'^2)^2 + (n^2 - \kappa^2)(n'^2 - \kappa'^2) + 4 n \kappa n' \kappa'}{(n^2 - \kappa^2) n' \kappa' - (n'^2 - \kappa'^2) n \kappa} = \frac{1 - u^2}{u}. \quad (5)$$

На четыре параметра, характеризующие граничащие среды, будет, по существу, одно ограничение, т. е. три параметра можно задавать произвольно. Однако нужно иметь в виду, что, несмотря на большое разнообразие  $n$  и  $\kappa$ , для одной среды эти параметры не являются независимыми. Это обстоятельство делает условия (5) довольно жесткими, поэтому для примера покажем, что система уравнений (2)–(3) решения имеет.

Зададимся относительными параметрами  $n_1 = 1,5$ ;  $\kappa_1 = -0,5$ . По этим значениям с помощью (5) находим  $u = 11,09$ , а по  $u$  через (3) — угол потерь первой среды:  $\delta = 74^\circ, 543$ . По известному  $u$  определяем общий корень уравнений (4):  $\alpha = 58^\circ, 28$ . Это, в свою очередь, дает возможность найти параметр неоднородности падающей волны  $\vartheta = 0,147$ . Неоднородную волну с такими значениями  $\alpha$  и  $\vartheta$  довольно легко сформировать, например, используя падение однородной волны на поглощающий клин. Обратимся к параметрам сред. Используя определение (2) и найденное значение  $\delta$ , получаем:  $\kappa = 3,616 n$ ;  $n' = 3,31 n$ ;  $\kappa' = 4,92 n$ ;  $\delta = 56^\circ, 1$ . Здесь  $n$  — действительная часть показателя преломления первой среды — свободный параметр.

Как видно из (1), падающая  $p$ -волна линейно поляризована по магнитному вектору и эллиптически — по электрическому; эллипс располагается в плоскости падения.

Нами также проанализирован случай непараллельных слоев (некомпланарное падение). Явление Брюстера при нормальном падении потока энергии здесь также возможно, но ограничения на среды гораздо менее жесткие благодаря наличию еще одного параметра — параметра некомпланарности, характеризующего волну.

В заключение автор выражает глубокую благодарность А. П. Хапалюку за обсуждение результатов.

### Список литературы

1. Богуславский С. А. Избранные труды по физике. М., 1961.
2. Кирilenko А. И. Изв. вузов СССР: Радиофизика. 1981. Т. 24. С. 1416.

Поступила в редакцию 08.02.88.

УДК 621.396.670

С. В. МАЛЫЙ, И. Т. КРАВЧЕНКО

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОРЕЖЕННЫХ ВИБРАТОРНЫХ РЕШЕТОК

Вибраторные антенные и дифракционные решетки широко применяются в различных технических приложениях. Среди методов их математического моделирования наибольшее развитие получили методы числен-