

ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Применение нанесения диэлектрических слоев на металлические поверхности широко распространено в СВЧ-технике, в частности – при разработке и создании металло-диэлектрических волноводов. В настоящей работе рассмотрено формирование отраженной и волны при отражении от пленки, нанесенной на металлическую поверхность, при наклонном падении для ТЕ- и ТМ-волны. Для решения данной задачи необходимо предварительно решить задачу об отражении и прохождении когерентной электромагнитной волны через плоско- параллельный диэлектрический слой. В оптике данная задача решалась неоднократно. Особенность решения для радиодиапазона заключается в наличии заведомо большой длине когерентности волны. Что в свою очередь требует учета интерференционных эффектов. Можно показать, что при использовании формул Френеля, эффективные коэффициенты передачи $Q_{эф}$ и отражения $\Gamma_{эф}$ имеют вид:

$$Q_{эф} = t_{12}t_{21}R_{21}e^{i\varphi} \left(1 + \frac{R_{21}^2 e^{i\varphi}}{1 - R_{21}^2 e^{i\varphi}}\right), \quad (1)$$

$$\Gamma_{эф} = -R_{12} + \frac{t_{12}t_{21}R_{21}e^{i\varphi}}{1 - R_{21}^2 e^{i\varphi}} \quad (2)$$

где $\Phi = 2\varphi + \psi = \frac{4\pi n^2 H \cos^2 \alpha}{\lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}$ – общий фазовый набег, $\psi = \frac{4\pi n H \sin^2 \alpha}{\lambda \cos \beta}$ – фазо-

вый набег, обусловленный наклонностью падения, а $\varphi = \frac{2\pi n H}{\lambda \cos \beta}$ – фазовый набег, обусловленный разностью хода внутри слоя, H – толщина слоя, α – угол падения, β – угол преломления.

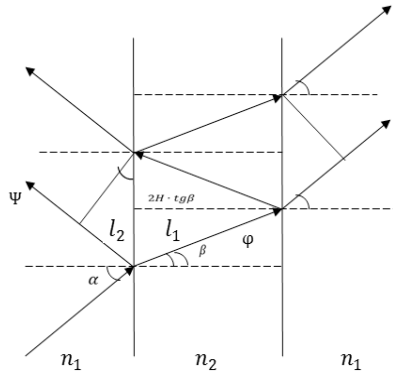


Рисунок 1 – Прохождение волны через плоский слой

Соответствующие коэффициенты передачи и отражения на каждой границе выражаются через известные формулы Френеля, причем для поляризации в плоскости падения (ТМ-волна):

$$t_{12} = \frac{2\cos\alpha}{n\cos\alpha + \cos\beta}, \quad t_{21} = \frac{2\cos\beta}{\cos\beta + n\cos\alpha}, \quad R_{12} = \frac{n\cos\alpha - \cos\beta}{n\cos\alpha + \cos\beta},$$

$$R_{12} = \frac{n\cos\alpha - \cos\beta}{n\cos\alpha + \cos\beta},$$

а для перпендикулярной поляризации (ТЕ-волна):

$$t_{12} = \frac{2\cos\alpha}{\cos\alpha + n\cos\beta}, \quad t_{12} = \frac{2n\cos\beta}{\cos\alpha + n\cos\beta}, \quad R_{12} = \frac{\cos\alpha - n\cos\beta}{\cos\alpha + n\cos\beta},$$

$$R_{21} = \frac{n\cos\beta - \cos\alpha}{\cos\alpha + n\cos\beta}.$$

На рисунках 2, 3 представлены зависимости коэффициентов прохождения и отражения от угла падения для слоев малой электрической толщины для ТЕ- и ТМ-волн.

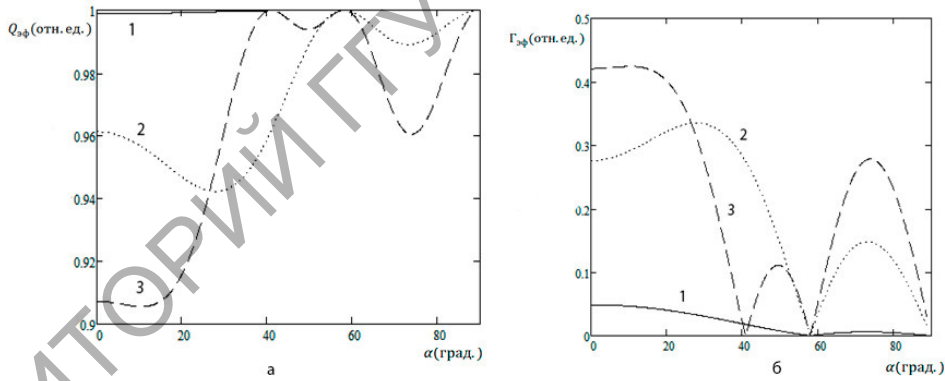


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов прохождения и отражения (а) и прохождения (б) от угла падения при параллельной поляризации для различной толщины слоя (в длинах волн) 1 – $H=0.01$, 2 – $H=0.25$, 3 – $H=0.5$

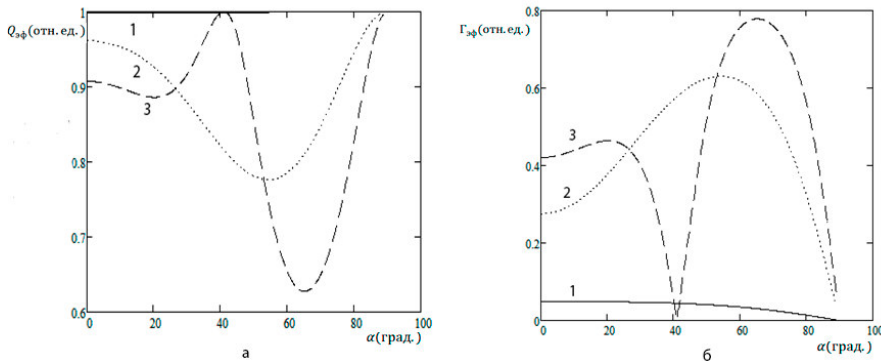


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) угла падения при перпендикулярной поляризации для различной толщины слоя (в длинах волн) 1 – $H=0.01$, 2 – $H=0.25$, 3 – $H=0.5$

Поглощение волны не учитывалось. Расчеты показывают, что для тонкого слоя отражение и поглощения имеют иной характер, чем для плоской бесконечной поверхности или для тонкого слоя при некогерентном освещении. Основное различие – стремление коэффициента отражения к нулю, а не к единице при скользющем падении.

Для толстого слоя характер отражения и прохождения меняется (рисунки 4, 5).

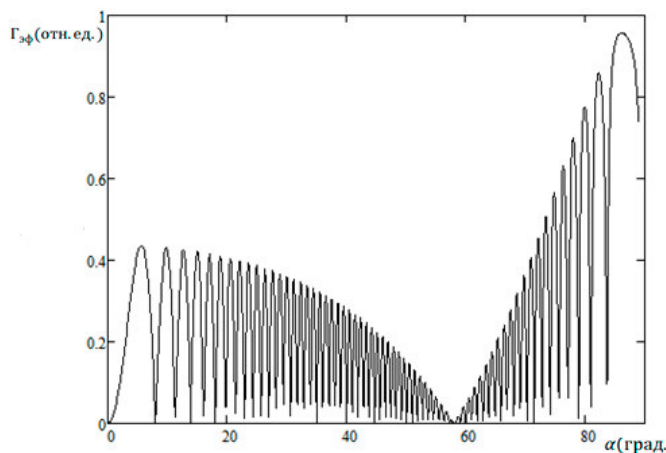


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента отражения от угла падения при параллельной поляризации, $H=20\lambda$

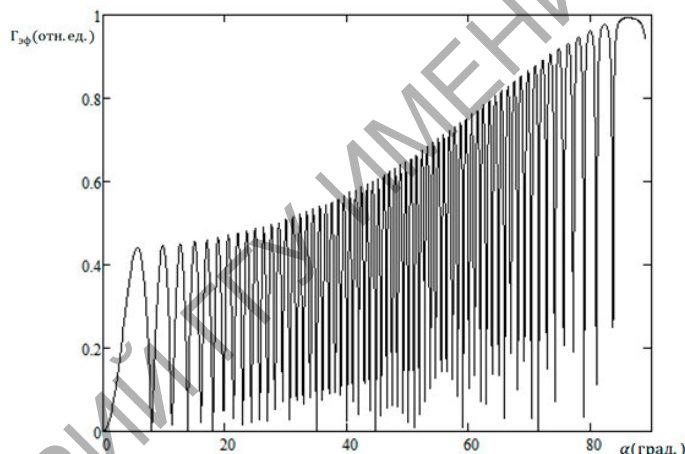


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента отражения от угла падения при перпендикулярной поляризации, $H=20\lambda$

Угловая зависимость коэффициентов приобретает быстропеременный осциллирующий характер, причем огибающая соответствует ходу аналогичных зависимостей при некогерентном освещении. Для поляризации в плоскости падения отражение отсутствует в окрестности угла Брюстера, однако точное значение угла полной поляризации определяется толщиной слоя, равно, как и значение коэффициента отражения в данной точке. Интересной особенностью тонкоплёночных структур с толщиной слоя на порядки меньшей длины волны излучения является стремление к нулю коэффициента отражения при любом угле падения. Практически в данном случае речь идет о слое нулевой толщины, для которого волны, отраженные от передней и задней поверхностей слоя оказываются в противофазе, аналогично полуволновой пластинке. В оптике практическая реализация такого слоя не представляется возможной ввиду малости длины волны, однако в радиодиапазоне – это обычная ситуация. При скользющем падении ($\alpha \sim \pi/2$) в малой окрестности коэффициент отражения стремится к нулю для обеих поляризаций.

Полученные выражения позволили аналогичным образом получить зависимость коэффициента отражения от металлической поверхности, покрытой слоем диэлектрика. Поскольку, в соответствии с законом сохранения при отсутствии диссипации коэффициент отражения автоматически становится равным единице, то расчет проводился с учетом поглощения внутри слоя.

$$\Gamma_{\text{эф}} = -R_{12} - \frac{t_{12}t_{21}\gamma e^{i\Phi}}{1 + R_{12}e^{i\Phi}}, \quad (3)$$

где γ – коэффициент отражения от металлической поверхности. Расчетные кривые для ТЕ- и ТМ-волн представлены на рисунке 6.

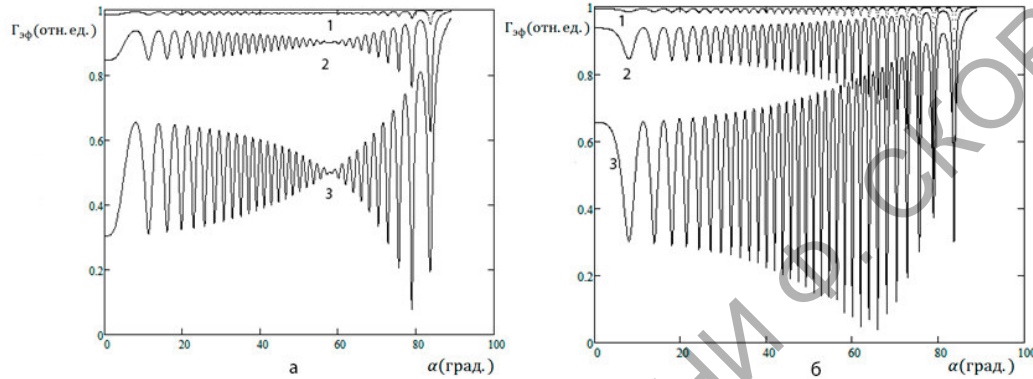


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента отражения от угла падения при параллельной (а) и перпендикулярной (б) поляризации металлической пластинкой,

$$1 - \gamma = 0.99, 2 - \gamma = 0.9, 3 - \gamma = 0.5, \lambda = 1, N=10$$

Коэффициент отражения для толстого слоя имеет характерный осциллирующий вид, причем его значение с увеличением угла падения, и стремится к единице, в отличие от прозрачного слоя.

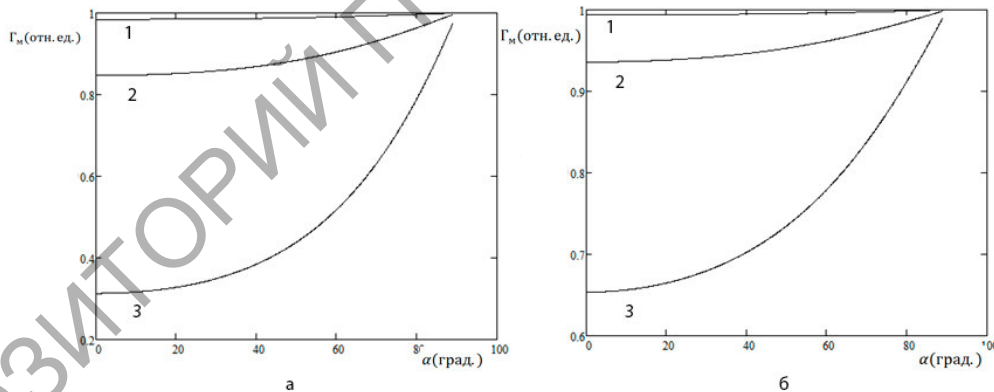


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента отражения от угла падения при параллельной (а) и перпендикулярной (б) поляризации с металлической пластинкой,

$$1 - \gamma = 0.99, 2 - \gamma = 0.9, 3 - \gamma = 0.5, \lambda = 1, N=0.01$$

Практически важный для технического применения случай тонкой пленки представлен на рисунке 7. Видно, что коэффициент отражения от металло- диэлектрической структуры значительно превышает коэффициент отражения от свободной металлической поверхности в случае перпендикулярной поляризации даже при нормальном падении (ТЕ-мода). Для ТМ-моды такое не наблюдается, однако при наклонном падении коэффициент отражения возрастает для обеих мод и стремится к единице при скользющем падении.