

Рассеяние цилиндрической волны массивом круговых цилиндров

А.С. Берёза¹, А.Е. Чернявский^{1,2}, С.В. Перминов³, Д.А. Шапиро^{1,*}

¹Институт автоматики и электрометрии, Сибирское отделение РАН

²Новосибирский государственный университет

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова

*E-mail: shapiro@iae.nsk.su

DOI:10.31868/RFL.2024.141-142

Субволновые решетки (СВР) – это дифракционные решетки с периодом, меньшим длины волны излучения. СВР используются в оптических фильтрах, сенсорах, спектральных устройствах и метаматериалах, играя ключевую роль в микроэлектронике, фотонике и улучшении солнечных панелей [1]. Для расчета дальнего поля СВР можно заменить усредненным однородным слоем диэлектрика или металла, иногда с анизотропным тензором диэлектрической проницаемости [2]. Решетки из элементов с круговым сечением исследованы в целом ряде работ, см., например, [3]. Изучалось и ближнее поле [4,5], тем не менее, распределение интенсивности при рассеянии волны бесконечным периодическим массивом до сих пор изучено недостаточно подробно. Цель настоящей работы – исследование ближнего поля при рассеянии плоской р-волны на бесконечной периодической СВР круговых цилиндров с помощью разложения на цилиндрические волны (РЦВ) и анализ строгих уравнений связанных волн для расчета интенсивности.

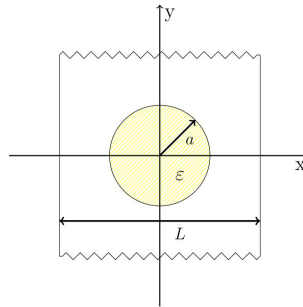


Рис. 1: Геометрия элементарной ячейки: сечение в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра.

Кроме граничных условий непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного поля для нормального падения р-волны наложим условие периодичности на границах элементарной ячейки (рис. 1). Решение уравнения Гельмгольца разложим в ряд Фурье по азимутальному углу. Применяя теорему сложения для цилиндрических функций, получим разложение рассеянного поля вне цилиндров

$$u(\mathbf{r}) = \sum_l b_l \left(H_l(kr) e^{il\varphi} + \sum_m J_m(kr) e^{im\varphi} F_{ml} \right),$$
$$F_{ml} = \sum_{n \neq 0} H_{(m-l)\sigma}(knL), \quad (1)$$

где u – z-компонента магнитного поля, J_m , H_l – функции Бесселя и Ганкеля первого рода, $k = \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве, ω – частота, c – скорость света, $\sigma = \text{sign}(n)$. Сеточная сумма F_{ml} учитывает, как цилиндрические волны,

возникающие при рассеянии падающей плоской волны, повторно рассеиваются на элементах решетки. Коэффициенты разложения b_l находятся из системы

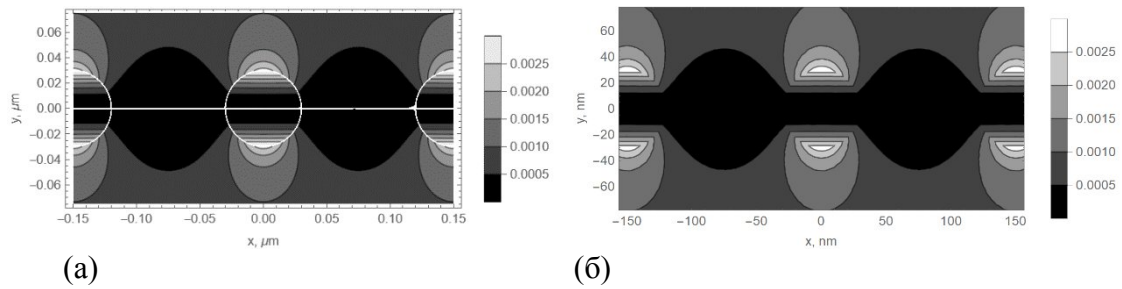


Рис. 2: Распределение интенсивности рассеянного магнитного поля при $a = 0.03$, $L = 0.15$, $\epsilon = 2.25$: РЦВ (а), расчет в среде COMSOL (б).

уравнений

$$b_m + C_m \sum_l F_{ml} b_l + C_m = 0, \quad C_m = \frac{J_m L'_m - L_m J'_m \sqrt{\epsilon}}{H_m L'_m - L_m H'_m \sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где штрих означает производную по аргументу, $J_m \equiv J_m(ka)$, $H_m \equiv H_m(ka)$, $L_m \equiv J_m(ka\sqrt{\epsilon})$, C_m – вспомогательные константы, которые в пределе разреженной решетки $2a \ll L$ переходят в коэффициенты рассеяния поля на одиночном цилиндре. Показано, что при $ka \ll 1$ преобладает дипольное рассеяние $m = \pm 1$, а остальные коэффициенты малы.

На рисунке 2(а) представлено распределение интенсивности магнитного поля р-волны, полученное с использованием формулы (1) и коэффициентов, вычисленных из системы уравнений (2). Распределение характеризуется следующими отличительными особенностями: пики интенсивности расположены в верхней и нижней части цилиндров, узкая впадина наблюдается вблизи прямой, соединяющей центры сечений. Впадина становится шире между соседними цилиндрами, особенно при уменьшении геометрического коэффициента заполнения решетки.

Выполнено сравнение с другими расчетами. Обнаружено, что решение, основанное на РЦВ, качественно соответствует результатам, полученным методом конечных элементов, рис. 2(б), теорией возмущений [6] и двумерным приближением точечных диполей [7]. Таким образом, РЦВ является мощным методом для анализа рассеяния волн в системах с цилиндрической симметрией, предлагая подробную информацию о ближнем поле и анализ мод.

Работа поддержана РНФ, грант № 24-22-00087.

Литература

- [1] G. Fanchini et al, *ECS Transactions*, **113**,15 (2024).
- [2] L. Frumin et al, *Sensors*, **22**, 449 (2022).
- [3] V. Twersky, *IRE Trans. on antennas and propagation*, **10**, 737 (1962).
- [4] J. Schaefer et al, *J. Quant. Spectr. Radiat. Transf.*, **113**, 2113 (2012).
- [5] S. Belan and S. Vergeles, *Optical Materials Express*, **5**, 130 (2015).
- [6] A. Chernyavsky et al, *Photonics*, **10**, 1332 (2023).
- [7] S. V. Perminov et al, *Opt. Lett.*, **44**, 3238 (2019).