

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.874.6

DOI: 10.17223/00213411/68/10/8

Об особенностях поля на ребре в многосекторных структурах с проводящими гранями*

В.В. Фисанов^{1,2}, А.С. Запасной¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Исследуется явление особенности поля на общем ребре многосекторных структур электромагнитных метаматериалов при наличии клина с идеально проводящими гранями. Закономерности формирования показателя особенности изучаются применительно к трех- и четырехсекторным структурам, диэлектрические или магнитные проницаемости которых имеют положительные, отрицательные или нулевые значения. Предложен критерий возникновения значения гиперсингулярности, не совместимого с условием Мейкснера на ребре.

Ключевые слова: электромагнитные метаматериалы, ребро, клин, показатель особенности поля.

Введение

В теории дифракции электромагнитных волн доказываем, что единственность решения уравнений Максвелла гарантируется выполнением всех граничных условий и условия на бесконечности, если присутствует неограниченная область пространства. Однако при наличии резких нерегулярностей у граничных поверхностей типа острых углов, ребер или вершин требуется выполнение дополнительного условия, известного как «условие на ребре» [1]. Впервые оно было сформулировано Дж. Мейкснером применительно к тонким проводящим экранам. Вблизи края идеально проводящей поверхности напряженность перпендикулярных к ребру компонент электромагнитного поля, как правило, велика и неограниченно нарастает с уменьшением расстояния до этой неоднородности. Порядок роста должен быть таким, чтобы плотность электромагнитной энергии в области пространства, окружающей край, была интегрируемой [2]. Иными словами, энергия поля должна быть конечной в любом конечном объеме, в котором не содержится источники поля. Радиальное поведение поля в окрестности ребра есть $\sim r^t = r^{-1+\tau}$, где r – расстояние в цилиндрической системе координат с центром на ребре. Согласно Мейкснеру, степенной показатель должен быть $t > -1$, т.е. $\tau > 0$ (или $\text{Re } \tau > 0$ для комплексных значений τ , имея в виду, что $|r^{\text{Re } \tau + i \text{Im } \tau}| = r^{\text{Re } \tau}$). Значение $\text{Re } \tau = 0$ не соответствует условию Мейкснера и иногда называется гиперсингулярностью, поэтому модельные структуры, где оно возникает, следует признать электродинамически некорректными. Для тонких идеально проводящих экранов типа полуплоскости было получено значение показателя особенности $\tau = 1/2$ [2], а для идеально проводящего клина, ограничивающего однородное пространство с угловым размером Ψ , – значение $\tau = \tau_0 = \pi/\Psi$ [3]. Дальнейшее усложнение реберных структур производится посредством добавления одной [4] или нескольких [5] границ раздела между угловыми секторами диэлектрических (или магнитных) сред с общим ребром, что приводит к трансцендентным дисперсионным уравнениям относительно показателя особенности τ . Они содержат тригонометрические функции и в общем случае произвольного кусочно-однородного заполнения клиновидной области не имеют аналитического решения.

Знание величины показателя τ является полезным для создания эффективных алгоритмов численного расчета электромагнитного поля в сложнопостроенных структурах с ребром, позволяет оценить опасность электрического пробоя, а также является критерием физической реализуемости электродинамических моделей с острым краем. Современная актуализация тематики реберной

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).