

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

О. А. Паушкина, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская (Могилев, Беларусь)

Интенсивные исследования фотонно-кристаллических волокон (ФКВ), образованных воздушными каналами в диэлектрической среде, вызваны уникальными свойствами таких направляющих структур, привлекательными для ряда телекоммуникационных и сенсорных приложений. Для оптимального проектирования ФКВ необходимы эффективные методы расчета как зонной структуры двумерного фотонного кристалла (ФК) так и полей мод, локализованных в окрестности дефекта данного кристалла (сердцевины волокна), поскольку, как известно, ФКВ эффективно каналируют энергию электромагнитного излучения только при том условии, что постоянные распространения их мод находятся в запрещенной зоне фотонного кристалла, формирующего оболочку волокна.

В докладе представлены алгоритмы решения соответствующих задач на собственные функции и собственные значения для уравнений Максвелла и результаты их применения этих алгоритмов к конкретным структурам.

Для отыскания запрещенных зон ФК система уравнения Максвелла сводится к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, записанной относительно фурье-образов четырех компонент электромагнитного поля в области ФК. Система решается методом редукции. С применением теоремы Флоке расчет запрещенных зон ФК сводится к отысканию условий, при которых в спектре характеристических показателей отсутствуют вещественные числа. Вычисление характеристического уравнения осуществляется путем численного построения фундаментальной системы решений редуцированной дифференциальной системы. В общем случае оно осуществляется численным интегрированием $8m + 4$ однотипных задач Коши в пределах одного периода ФК, где m - порядок редукции. При наличии у ФК осей симметрии объем вычислений может быть уменьшен вдвое. Предлагаемый

подход имеет существенные преимущества перед известными методами плоских волн мультиполей. Он применим в случае, когда воздушные каналы, образующие ФК, имеют произвольную форму поперечного сечения, не требует численного вычисления решеточных сумм цилиндрических функций, и в нем отсутствуют проблемы, связанные с учетом дисперсии материала волокна.

Исследование задачи на собственные значения по расчету модовых характеристик ФКВ осложняется тем обстоятельством, что моды реальных ФКВ, имеющих оболочку конечных размеров, являются принципиально вытекающими (их поля не убывают на бесконечности). Эта особенность затрудняет применение разностных и вариационных методов. В настоящей работе для решения данной задачи применен метод интегральных уравнений. Эти уравнения формулируются относительно поперечных компонент магнитного поля, причем их ядра отличны от нуля только в областях воздушных каналов, формирующих ФК. Построение поля моды в этих областях осуществляется с применением циркулярного фурье-анализа и сводится к численному интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно фурье-образов указанных компонент. Соответствующие расчеты эквивалентны построению собственных функций для цилиндра с неоднородным заполнением (в частном случае однородных каналов кругового сечения эти функции совпадают с функциями Бесселя). В результате применения теоремы Грина и теоремы сложения Графа интегральные уравнения сводятся к бесконечной однородной алгебраической системе относительно амплитуд названных функций. Практическое решение этой системы осуществляется методом редукции.

Описанные подходы применены к моделированию свойств ФКВ с полостью сердцевинной, обладающих гексагональной симметрией, перспективных для передачи мощного лазерного излучения и нелинейно-оптических приложений (например, анализа состава газовых смесей методом вынужденного комбинационного рассеяния). Корректность расчетов подтверждена исследованием внутренней сходимости алгоритмов, сопоставлением полученных результатов с данными других работ и корреляцией результатов обоих описанных выше методов. В частности, расчеты показали, что при условии попадания постоянной распространения моды ФКВ в запрещенную зону фотонного кристалла коэффициент затухания вытекающей моды монотонно убывает при увеличении диаметра оболочки волокна и не убывает при нарушении этого условия. Впервые исследованы капиллярные ФКВ с полостью сердцевинной. Установлено, что межкапиллярные воздушные каналы существенно улучшают характеристики волокна. Они позволяют более чем в два раза уменьшить (по сравнению с известными структурами) отношение диаметра сердцевины капилляров к периоду ФК, что кардинально облегчает изготовление ФКВ для сенсорных и иных приложений. Выполнены расчеты сенсоров давления и адсорбционных слоев. Исследованы также ФКВ с эллиптической формой образующих воздушных каналов. В этих волокнах обнаружена существенная анизотропия в коэффициентах затухания основных мод ортогональной поляризации, что открывает возможность создания квазиодномодовых однополяризационных ФКВ.