

Моделирование сопряжения фотонно-кристаллического и ступенчатого волноводов

П.В. Мокшин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
mokshinfabio@gmail.com

Д.Л. Головашкин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева;
Институт систем обработки
изображений – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН
Самара, Россия
golovashkin2010@yandex.ru

В.С. Павельев
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева;
Институт систем обработки
изображений – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН
Самара, Россия
pavelyev10@mail.com

Аннотация — Предлагается фотонно-кристаллическая волноводная структура, предназначенная для диагностики работы элементов интегральной оптики. Рассматривается стыковка упомянутой структуры с планарным ступенчатым кремниевым одномодовым волноводом. Исследуется эффективность такой стыковки, находятся оптимальные параметры топологии согласующего элемента.

Ключевые слова — фотонно-кристаллический волновод, ступенчатый волновод, стыковка волноводов

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические фотонно-кристаллические (ФК) элементы находят применение в самых различных областях: сенсорика, коммуникации, производство вычислений и др. Независимо от предназначения ФК элемента, для его работы необходимы узлы ввода/вывода излучения, характеризующиеся невысокими потерями энергии. Особенно актуальна задача организации ввода/вывода излучения для ФК волноводов.

В [1] представлен обширный (118 источников) обзор работ по данной предметной области, охватывающий различные типы ФК волноводов и устройств ввода/вывода излучения. Являясь подзадачей в рамках упомянутой, стыковка волноводов (в том числе ФК) на протяжении длительного времени занимает внимание исследователей. Так, в [2] предлагается устройство сопряжения двух планарных волноводов в виде ФК линзы, а в [3] такой линзе ставится в соответствие градиентный фокусирующий элемент. Обсуждаемая задача не потеряла научной актуальности и в настоящее время, так и не перейдя в разряд инженерных; например в [4] обсуждается проблема возбуждения поверхностных мод ФК волновода посредством стыковки с другой волноводущей ФК структурой.

Предлагаемое далее исследование посвящено двум различным кремниевым волноводам, с необходимостью стыковки которых авторы столкнулись в своей практической деятельности,

однако не обнаружили аналогов в доступной им литературе.

2. СТЫКОВКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ФК И ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА

Важным этапом, следующим за расчетом и изготовлением элементов интегральной оптики, является контроль их работоспособности. Действительно, существующие технологии изготовления не всегда позволяют добиться идеальных расчетных геометрических параметров элемента, зачастую характеризующегося нанометровыми неоднородностями. В силу этого актуальной представляется задача синтеза диагностических фрагментов, с одной стороны позволяющих достаточно ясно наблюдать со стороны работу элемента (в рассматриваемом случае волновода), а с другой - не исказить результаты этой работы.

Решая данную задачу, авторы рассматривают ФК волновод, далее в тексте именуемый диагностическим. Предполагается, что его использование в качестве фрагмента других волноводов (вставка) не исказит их работу, а высокая интенсивность излучения в интерференционных максимумах в диагностическом фрагменте значительно возрастет, что облегчит детектирование излучения (например, с помощью ближнепольной микроскопии). Для этого исследуем распространение излучения через собственно диагностический волновод, так и его стыковку с другой волноводущей структурой.

В первую очередь исследуем волноводные свойства структуры с линейным дефектом в кристалле, характеризующимся прямоугольной решеткой периода $a = 580$ нм и радиусами цилиндрических (двумерный ФК) кремниевых стержней, расположенных в воздухе, $r_1 = 104,4$ нм. Линейный дефект образуется заменой одного горизонтального ряда цилиндров, проходящего через центр, на другой с увеличенными до $r_2 = 150$ нм радиусами.

Рассматривая в первом эксперименте волноводное распространение в таком кристалле, ограничимся исследованием его фрагмента размером в 40 периодов

по направлению распространения и 21 периодом поперек. Используя для моделирования пакет Ansys Lumerical R1 [5], реализующий FDTD-метод [6], зададим падающую волну как плоскую однородную, характеризующуюся линейной поляризацией электрического поля вдоль кремниевых цилиндров, рассматривая далее результаты исключительно для монохроматического случая с $\lambda = 1,55$ мкм; на рис. 1 падающая волна видна слева от кристалла. Видно, что вне дефекта волна затухает уже к четвертому вертикальному ряду цилиндров, а вдоль него распространяется практически без потерь.

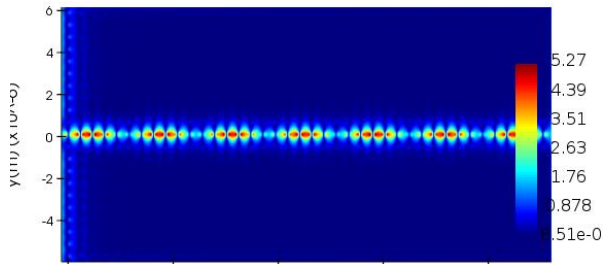


Рис. 1. Дифракционная картина (модуль комплексной амплитуды) внутри диагностического ФК волновода. Излучение распространяется слева направо.

Действительно, энергия волны, достигшей монитора на выходе из волновода, относится к энергии, прошедшей через монитор на входе, как 0,98. Под мониторами здесь понимаются вертикальные отрезки шириной 2 мкм, расположенные поперек волновода; энергия волны, проходящей через эти отрезки, фиксируется и ее значение принимается результатом эксперимента.

На рис. 2 предложен вариант стыковки рассматриваемого диагностического волновода со ступенчатым (изготовлен из кремния, характеризуется прямоугольной формой и шириной в 200 нм), когда левый конец ступенчатого волновода внедряется в диагностический на расстояние d с удалением препятствующих такому внедрению цилиндров дефекта.



Рис. 2. Схема стыковки диагностического и ступенчатого волновода

Варьируя в ходе второй серии экспериментов дистанцию d авторы нашли значение $d = 1,41$ мкм, при котором передача происходила практически без потерь; энергия волны, проходящей через правый край ступенчатого волновода, составляла 0,9972 от энергии, проходящей через середину диагностического. Это же свидетельствует о волноводном распространении без потерь внутри ступенчатого волновода. Рассмотрению подлежали волноводы длиной 15 и 10 мкм соответственно (рис. 3); диагностический волновод, как и в первом эксперименте, возбуждался плоской однородной волной (рис. 3, левый край).

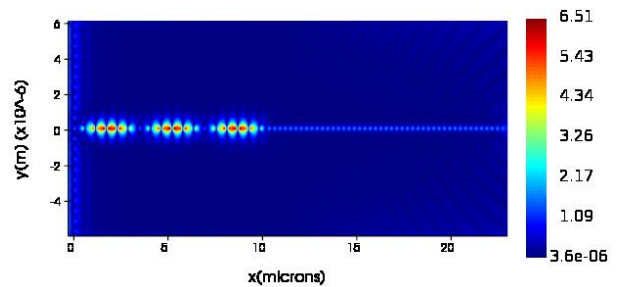


Рис. 3. Дифракционная картина (модуль комплексной амплитуды) при стыковке диагностического и ступенчатого волновода. Излучение распространяется из диагностического в ступенчатый

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая рабочие качества диагностического волновода отметим, что соотношение максимального значения интенсивности распространяющейся в нем волны к максимальному значению интенсивности волны в ступенчатом волноводе составляет 18,48. То есть волну, проходящую по диагностическому волноводу заметить значительно легче. Именно поэтому на рис. 3 приведен модуль комплексной амплитуды, а не квадрат модуля (интенсивность); заметить на аналогичном рисунке интенсивность волны в ступенчатом волноводе рядом с диагностическим было бы крайне сложно при указанной разнице.

Примечательно, что при тех же условиях стыковки (третий эксперимент) и том же расположении мониторов, в обратном направлении прошло лишь 83,27 % энергии, что свидетельствует о необходимости варьирования значения d , либо смены схемы стыковки при обращении волны. Дальнейшие исследования авторы связывают с проведением экспериментов по стыковке других типов волновода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dutta, H. S. Coupling light in photonic crystal waveguides: A review / H. S. Dutta, A. K. Goyal, V. Srivastava, S. Pal // *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. – 2019. – Vol. 20. – P. 41–58.
- [2] Котляр, В.В. Фотонно-кристаллическая линза для сопряжения двух планарных волновода / В.В. Котляр, Я. Р. Триандафилов, А.А. Ковалев, М.И. Котляр, А.В. Волков, Б.О. Володкин, Соيفер Виктор Александрович, Офелон Лим, Краусс Томас Фотонно-кристаллическая линза для сопряжения двух планарных волновода // КО. 2008. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fotonno-kristallicheskaya-linza-dlya-sopryazheniya-dvuh-planarnyh-volnovodov> (дата обращения: 22.06.2023). // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, №4. – С. 326–338.
- [3] Налимов, А.Г. Острая фокусировка света планарной градиентной микролинзой / А.Г. Налимов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, №2. – С. 135–140.
- [4] Yücel, M. B. Coupling of Photonic Crystal Surface Modes / M. B. Yücel // *Advances in Condensed Matter Physics*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–9.
- [5] Ansys Lumerical FDTD [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.ansys.com/products/photonics/fdtd> (28.02.2022).
- [6] Taflove, A. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method / A. Taflove, S. Hagness – Boston: Artech House Publishers, 2005. - 1038 p.