

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Ж.О. Домбровская, Г.В. Белокопытов, А.Н. Боголюбов
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
dombrovskaya@mail.physics.msu.ru

Оптическими свойствами фотонных кристаллов (ФК) можно управлять, изменяя физические параметры материалов и геометрические размеры структурных элементов, из которых они образованы.

Для численного расчета свойств ФК была создана программа, реализованная на основе метода конечных разностей во временной области (FDTD – Finite Difference Time Domain) [1]. Достоинством данного подхода является возможность определения спектральных характеристик (коэффициенты прохождения и отражения) в широком диапазоне частот. Для этого следует решать нестационарную задачу прохождения широкополосного электромагнитного импульса через структуру ФК. Частотные спектры определяются с помощью преобразования Фурье после получения массивов значений напряженностей электромагнитного поля в точках, расположенных до и после объекта.

Метод FDTD использует дискретизацию уравнений Максвелла по конечно-разностной схеме [2]. Сетка вводится таким образом, чтобы изменение напряженности электрического поля E во времени, как и в уравнениях Максвелла, зависело от его значения на предыдущем шаге и от пространственного изменения магнитного поля H . Аналогично, изменение поля H зависит от распределения в пространстве поля E . Вычисления полей производятся в каждой точке моделируемой расчетной области и ограничены количеством доступной компьютеру оперативной памяти. С другой стороны, наличие границ у модели приводит к образованию паразитного переотражения волн.

Для численного моделирования ухода волны на бесконечность в данной работе были использованы поглощающие граничные условия в виде комбинации идеально согласованного слоя (PML – Perfectly Matched Layer) [3] и условия Мура первого порядка [4], причем второе из них накладывалось на падающее излучение. Сочетание этих условий является необходимым в случае задания падающего импульса в виде плоской волны. Для ее моделирования используется техника разделения вычислительной области на область полного и рассеянного полей (TF/SF – Total-field/Scattered-field) [5]. PML, находящийся в области рассеянного поля, не может поглотить падающее излучение (см. рис. 1).

Возбуждение поля осуществлялось током в виде функции Габора:

$$j(t) = \sin(2\pi f_0 t) \exp\left\{-\left(\frac{t-t_c}{\sigma}\right)^2\right\},$$

где $t_c = 2\sigma$, $\sigma = \frac{2\sqrt{6}}{\pi}(f_{\max} - f_{\min})$. Падающая волна имела плоский фронт и представляла собой гармоническую функцию с несущей частотой $f_0 = (f_{\min} + f_{\max})/2$ оптического сигнала, модулированную гауссовым профилем в направлении распространения. Частоты f_{\min} и f_{\max} задавались в относительных единицах (c/a) , где a – период решетки ФК.

Используя вышеописанную программу, исследовалось прохождение импульса в диапазоне частот от $f_{\min} = 0.2$ до $f_{\max} = 0.7$ через двумерный конечный ФК, расположенный в неограниченной внешней среде. ФК представляет собой матрицу размером 20×20 мкм из SiO_2 , в которой имеется 20 периодов по 20 квадратных отверстий со стороной $h = 0.4$ мкм, заполненных $\text{Ag}_{6.0}\text{In}_{4.5}\text{Sb}_{60.8}\text{Te}_{28.7}$ (AIST).

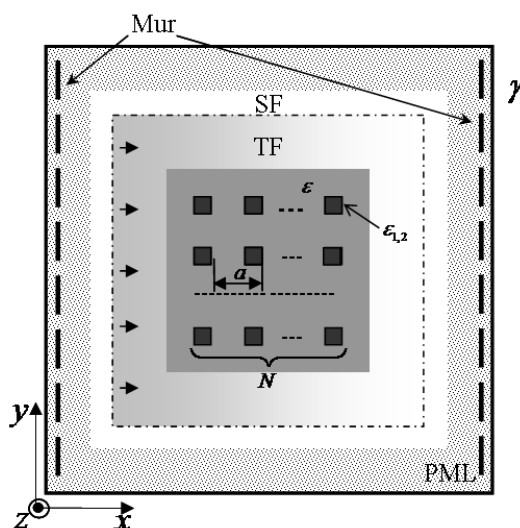


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области и структуры фотонного кристалла

Материал AIST вызывает повышенный интерес в связи с его успешным применением в оптических дисках различного формата (CD-RW, DVD-RW, Blu-Ray) [6]. Принцип перезаписи данных в таких устройствах основан на резком изменении оптических и электрических свойств материала при фазовом переходе из аморфного в кристаллическое состояние и обратно. Зависимость коэффициента отражения от длины волны является нелинейной и различается при комнатной и высоких температурах [7]. В проведенном демонстрационном расчете дисперсия среды не учитывалась, усредненные значения диэлектрической проницаемости при комнатной температуре и при 450°C взяты равными $\varepsilon_1 = (5.483)^2$ и $\varepsilon_2 = (5.189)^2$, соответственно. Диэлектрическая проницаемость диоксида кремния со-

ставляет $\varepsilon = (1.53)^2$. Отметим, что ФК на основе AIST обладает большим контрастом и имеет высокий коэффициент отражения и характерные запрещенные зоны даже при малом количестве периодов.

Результаты расчетов коэффициента прохождения для ТЕ поляризации при комнатной температуре и при 450°C представлены на рисунке (см. рис. 2). На графиках показаны вторая, третья и четвертая запрещенной зоны, для которых хорошо видно смещение центральной частоты и уменьшение ширины вследствие зависимости диэлектрической проницаемости при росте температуры.

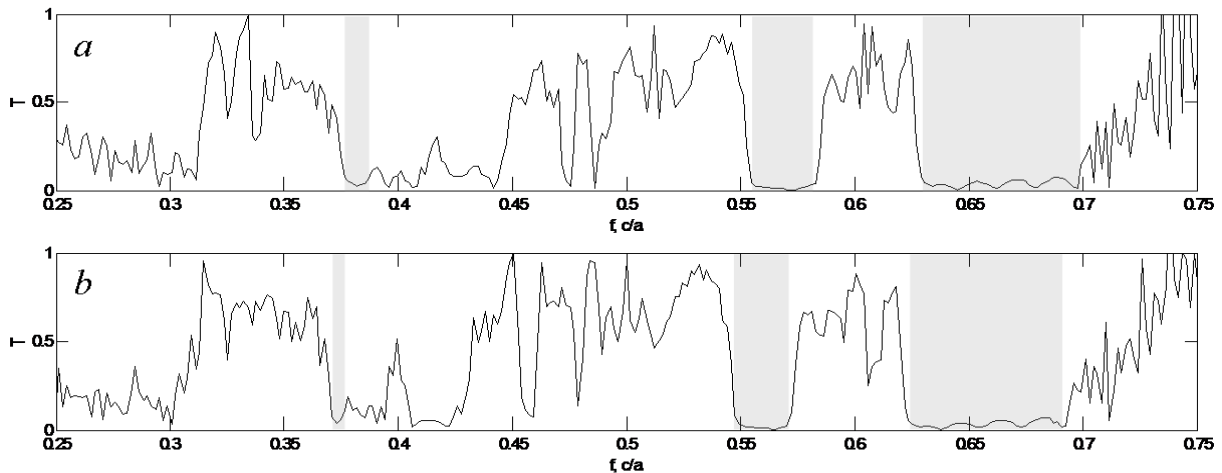


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения T от нормированной частоты f при комнатной температуре (а) и при 450°C (b) для ТЕ поляризации. Серым цветом закрашены запрещенные зоны

Перестройка ФК при его нагревании может быть использована для управления его спектральными характеристиками. Результаты расчетов позволяют делать выводы о перспективности использования для этих целей структур, содержащих AIST.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sullivan D.M Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method. New York, NY: IEEE Press, 2000.
2. Yee K.S. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1966. V. 14. P. 302.
3. Berenger J.P. // J. Computational Physics. 1996. V. 127. P. 363.
4. Mur G. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1981. V. 23. P. 377.
5. Taflove A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: the finite difference time-domain method. Norwood, MA: Artech House, 2000.
6. Neale R // Electronic Engineering. 2001. April. P. 61.
7. Kuwahara M., Suzuki O., Tsutsumi K., et al // Japanese Journal of Applied Physics. 2009. No 48. 05EC02.