



- Выбор диапазон интенсивности (для монохромных изображений) или цвета (для цветных изображений), которые будут идентифицировать объект для расчета
- Выбор необходимых виды измерений (площадь, радиус, средняя интенсивность/плотность каждого объекта и другое).

Вывод результатов возможен в виде статистических данных, гистограммы, поля рассеяния и др.

Для примера был взят один из цветных снимков пленки. Был применен фильтр Local Equalization на выделенном активном участке изображения, для которого проводили измерения. Диапазон интенсивности выбирался автоматически по темным объектам. Данными для счета служили площадь частиц, средний диаметр, максимальный и минимальный радиусы объекта, периметр и другие. Обнаружено более 100 объектов на выделенном участке изображения, средний диаметр частиц равен 270 нм [2].

Полученные при анализе изображения данные согласуются с проведенным ранее эллипсометрическим исследованием пленок. Результаты работы будут использованы для имитационного моделирования фотонного кристалла и устройств на его основе.

### Литература

1. Маркелов М. Методы моделирования самоупорядочивающихся систем // Нанотехнологическое сообщество "Нанометр" ([www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)). Публикации: обзоры 16 июля 2010. С. 2-3,7-9.
2. Синицкий А.С. Синтез и оптические свойства фотонных кристаллов на основе диоксида кремния: доклад. Москва: Изд-во Московского гос. ун-та им. М. В. Ломоносова, 2003.-20 с.

А.И. Замалютдинов, Л.Р. Габдрахманова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

(Институт технической кибернетики и информатики  
Казанский национально исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ)

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. В данном случае моделирование было использовано для создания волновода на основе двумерного фотонного кристалла. Фотонные кристаллы – это композиционные материалы с пространственно-периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах длины волны света и имеющие фотонные запрещенные зоны в спектре оптических со-



стояний. Ширина запрещенной зоны определяет частотный диапазон электромагнитных волн, не распространяющихся в этих средах. Создавая дефекты внутри запрещенной зоны, можно добиться прохождения светового сигнала определенной длины волны. Точечный дефект в фотонном кристалле фактически создает волновод. На данном принципе удержания электромагнитного излучения в точечном дефекте фотонного кристалла созданы проводники оптического излучения, называемые фотонно-кристаллическими волноводами.

Моделирование проводилось в графическом интерфейсе пользователя мощной интерактивной среды программного пакета COMSOL Multiphysics. Результаты численных расчетов методом конечных элементов выводятся на диаграммах, удобных для принятия решений. Благодаря огромным капиталовложениям и широкому спектру современных технологий кремний до сих пор является основным материалом микроэлектроники. Поэтому для моделирования фотонного кристалла использовались следующие композиции: Si-воздух, Si-SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> – воздух. Для них рассматривались две геометрии кристалла: прямая и инверсная. Геометрию прямого фотонного кристалла можно представить в виде квадрата воздуха с массивом цилиндров из Si, стоящих в узлах квадратной сетки. Инверсный кристалл представляет собой полупроводниковый квадрат с системой круглых равноотстоящих отверстий. Эта модель использовалась для имитации микропористого кремния с радиусом пор более 50 нм и шагом периодичности 150 и 250 нм.

В данной работе проведено моделирование световода с целью определения влияния геометрии и показателя преломления материала на длину волны проходящего сигнала. При создании имитационной модели волновода использовались данные, полученные опытным путем, а так же при анализе изображений фотонного кристалла. Результаты моделирования волновода могут дать более полное представление о свойствах фотонных кристаллов.

В ходе работы в лаборатории были получены пленки из упорядоченных микросфер кремнезема на подложках из стекла площадью несколько квадратных сантиметров. Выбор метода синтеза опаловых пленок был остановлен на золь-гель технологии. В полученном золе были исследованы частицы кремнезема турбодиметрическим методом. Результаты показали, что средний радиус микросфер кремнезема равен 135 нм. Проведено эллипсометрическое исследование, в результате которого были получены следующие данные: толщина пленки варьируется от 1000 до 2000 нм, она состоит из полых микросфер диаметром от 250 до 300 нм. Все полученные данные хорошо согласуются между собой. На основе полученных данных проводилось моделирование и исследование фотонного кристалла.

Целью моделирования является изучение распространения TE – волн в фотонном кристалле. В основе математической модели скалярное уравнение для поперечной компоненты поля  $E_z$ , где  $n$  – показатель преломления,  $k_0$  – волновое число свободного пространства. Поскольку нет физических границ, то можно использовать граничное условие рассеяния на всех границах. На границе ввода волны устанавливается амплитуда  $E_z$ , равная 1. Решением является по-



верхностная диаграмма напряженности электрического поля. Волноводный эффект осуществляется благодаря внутреннему отражению от периодической структуры и созданию запрещенной зоны. Однако для различных диапазонов длин волн они могут быть настроены путем изменения только геометрии кристалла без использования других материалов. Было доказано, что путем изменения геометрии волновода можно настроить фотонные запрещенные зоны и дисперсию для различных диапазонов длин волн, тем самым синтезировать волноводные системы с заданными спектральными свойствами.

Рассчитаны полосы спектров частот пропускания для волноводов с заданной геометрией. Результаты расчетов показывают, что с увеличением размера цилиндров, расстояния между ними и шириной канала увеличивается диапазон длин волн, проходящих практически без затухания волны. Диапазон частот пропускания на прямом кристалле зависит от геометрии самого кристалла: увеличение таких параметров, таких как радиус цилиндров, расстояние между ними, ширина канала ведет к увеличению диапазонов длин волн; от угла изгиба волновода частотный спектр не зависит.

### Литература

1. Баженов А.В., Горбунов А.В., Алдушин К.А. оптические свойства тонких пленок из плотноупакованных SiO<sub>2</sub>-сфер: Физика твердого тела, том 44 вып.6, 2002.-1026 с.
2. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 3.— С. 18—25.

А.И. Замалютдинов, Л.Р. Габдрахманова

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

(Институт технической кибернетики и информатики  
Казанский национально исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ)

В настоящее время создано множество видов волноводов на основе фотонных кристаллов. Частным случаем является линейный дефект периодической структуры фотонного кристалла. Дефект обладает собственными оптическими модами, отличными от собственных мод фотонного кристалла (такие моды называются дефектными). Если частота дефектной моды лежит в запрещенной зоне фотонного кристалла, то эта мода концентрируется в узкой области пространства в окрестности дефекта, который в этом случае играет роль волновода.