

07;12

Пространственно-спектральные характеристики двумерных фотонно-волоконных кристаллов

© Л.А. Мельников, Ю.П. Синичкин, Ю.С. Скибина

Саратовский государственный университет
E-mail: SkibinaJS@yandex.ru

Поступило в Редакцию 19 ноября 2001 г.

Проведены исследования спектров пропускания двумерных фотонно-волоконных кристаллов с различной внутренней структурой. Получено, что при облучении структуры спектры проходящего и рассеянного излучения зависят от ее ориентации и от поляризации падающего излучения. Исследован спектральный состав излучения, рассеянного двумерной периодической решеткой под разными углами. Обнаружено явление спектральной фильтрации проходящего через структуру излучения.

1. Введение. В последнее время большое внимание уделяется разработке материалов с контролируемыми оптическими свойствами. Подобные структуры обладают способностью распространять, или наоборот, запрещать распространение света по определенным направлениям. Такими материалами являются „фотонные кристаллы“ — структуры с периодически изменяющейся диэлектрической постоянной, размер структуры сравним с длиной волны света [1].

Фотонный кристалл изготавливают на основе какого-либо прозрачного диэлектрика, в котором упорядоченным образом создано некоторое количество каналов, и, таким образом, свет распространяется через среду, имеющую высокий показатель преломления (диэлектрик) и низкий (каналы). Этот контраст показателей преломления для фотона играет ту же роль, что и периодический потенциал для электрона в полупроводнике [2]. В фотонном кристалле формируются, в полной аналогии с полупроводниками, разрешенные и запрещенные зоны („фотонные зоны“); кристалл будет блокировать свет с длиной волны, соответствующей запрещенной фотонной зоне, тогда как свет с другими длинами волн будет распространяться беспрепятственно [3].

Теория двумерных фотонных кристаллов сейчас еще изучается, но с уверенностью можно сказать, что в стекловоздушной структуре существуют запрещенные зоны [4]. Такой кристалл может быть изготовлен методом перетяжек стеклянных стержней, но получить структуру с идеальной упаковкой затруднительно. Поэтому реально получаемые структуры будут иметь либо дефект упаковки, либо структуру сверхрешеток. Но можно ожидать, что основные характеристики, связанные с периодической структурой, будут такие же, как и в идеальном кристалле.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования спектров пропускания и рассеяния двумерных фотонно-волоконных кристаллов, полученных по этой технологии.

2. Изготовление фотонно-волоконного кристалла. Технология изготовления фотонно-волоконного кристалла основана на следующих процессах [5]. Прецизионные круглые стеклянные капилляры, длиной около метра, укладывают в гексагональную структуру. Полученный пучок капилляров, пропуская через печь, перетягивают специальным вытяжным устройством, получая шестигранные структуры (уменьшенная копия заготовки). Полученные шестигранные структуры собирают в пучок и снова перетягивают, повторяя эту операцию до тех пор, пока не получат заданный шаг (период воздушных каналов) структуры. Если в исходном пучке заменить один из капилляров на такой же по геометрии стержень, то в конечном шестиграннике появится место с нарушением периодичности воздушных каналов. Эта технология позволяет получать фотонно-волоконный кристалл, выполненный из разных типов стекол, разной конфигурации, с разным типом укладки гексагональной, квадратной, треугольной и другой, разной топологии расположения дефектов. Она обеспечивает прецизионное изготовление такого типа наноструктур. Образцы были получены четырьмя перетяжками, гексагонально-уложенных, пакетов капилляров. Размер капилляров составляет 0.2–0.8 μm .

Структуры представляли собой стеклянные цилиндры, вдоль оси которых располагалась регулярная структура воздушных каналов. Регулярная структура технологически изготавливалась из элементов, представляющих собой правильные шестигранники, внутри которых находились несколько десятков воздушных каналов. Общее число воздушных каналов в двумерном фотонном кристалле определялось чис-

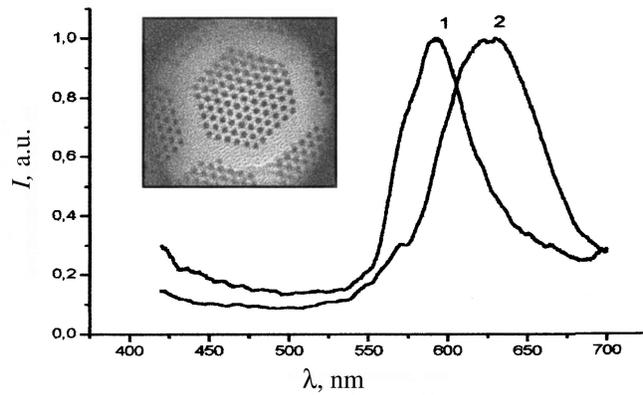


Рис. 1. Спектры рассеянного образцом излучения под разными углами: 1 — 80° , 2 — 120° . 1, 2 — разные ориентации структуры относительно падающего излучения.

лом каналов в элементарном шестиграннике и числом шестигранников, образующих полную структуру.

Образец двумерной структуры представлен на врезке рис. 1. Структуры отличались по общему числу воздушных каналов, по пространственному расположению элементов структуры и по оптическим параметрам двумерной решетки (периоду структуры и соотношению компонентов (воздух/диэлектрик) в сечении структуры).

3. Схема и результаты эксперимента. Исследования велись в видимой области спектра, поэтому в качестве спектрального оборудования использовался компьютеризированный спектральный комплекс на базе монохроматора МДР-23, удовлетворяющий данному условию. Поперечные размеры структур варьировались от 600 до $200 \mu\text{m}$. В зависимости от данного параметра применялись две схемы формирования пучка излучения, падающего в щель монохроматора, первая приведена на рис. 2.

В этой схеме (рис. 2) излучение, прошедшее через структуру, выделялось с помощью щелевой диафрагмы, стоящей непосредственно за структурой. Эта схема применялась при исследовании структур с большим поперечным сечением, при этом размер диафрагмы изменялся,

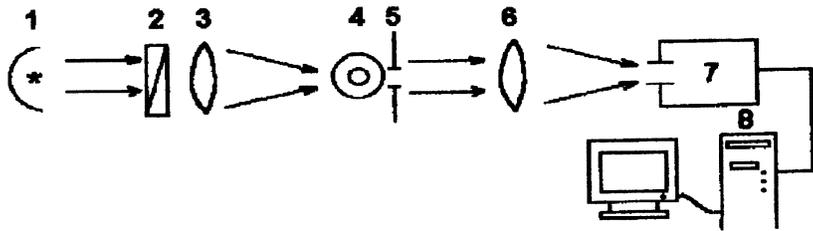


Рис. 2. Экспериментальная схема установки: 1 — галогеновая лампа, 2 — поляризатор, 3, 6 — линза, 4 — исследуемая структура, 5 — щель, 7 — монохроматор, 8 — компьютер.

так что ее ширина соответствовала сечению структуры. Недостатком такой схемы измерений являлось невозможность контроля попадания на щель излучения, прошедшего через структуру.

Этот недостаток отсутствовал во второй схеме измерений, когда в плоскости щели монохроматора с помощью микрообъектива (увеличение $10\times$) формировалось изображение поперечного сечения структуры. Этот выбор был обусловлен следующими причинами. Во-первых, формируемое в плоскости щели монохроматора изображение структуры имело поперечные размеры больше ширины щели монохроматора, при которой возможно было с большой степенью точности проводить запись спектра. Во-вторых, и это самое важное, числовая апертура используемого объектива равнялась 0,2, что позволяло отсекал световые пучки, проходящие через исследуемый образец минуя периодическую структуру.

Такая схема измерений позволяла контролировать попадание на щель монохроматора излучения, прошедшего через периодическую структуру, при этом наличие цветовой окраски средней части изображения структуры свидетельствовало о наличии когерентного рассеяния структурой света видимого диапазона.

Схема второго варианта применялась и при измерении спектров рассеяния образцов. В этом случае изменялся угол освещения образца белым светом, а положение образца и микрообъектива относительно щели монохроматора сохранялись неизменными. Во всех измерениях в качестве источника белого света использовалась галогеновая лампа.

Были получены спектры пропускания образца, измеренные при нормальном падении на образец света различной поляризации, при этом структура ориентировалась относительно падающего излучения гранью или ребром.

Во всех случаях (разная поляризация падающего излучения и разная ориентация кристалла относительно издающего излучения) в коротковолновой области видимого диапазона спектра пропускание образца было значительно меньше. В этой области свет испытывает когерентное рассеяние, результатом которого является угловое перераспределение проходящего через образец излучения, являющегося, в частности, причиной образования запрещенных фотонных зон.

Очевидно, что на спектральный состав прошедшего через образец излучения влияет эффект преломления света на границе воздух/образец, приводящий к тому, что в структуре распространяется не плоская волна, как того требует теория, а волна, сформированная на границе раздела. В результате через структуру проходит излучение, имеющее различное пространственное направление, что может явиться причиной уширения „фотонной запрещенной зоны“, а также частичное пропускание излучения данного диапазона спектра.

С другой стороны, соотношение между периодом структуры (все исследованные структуры имели расстояние a между соседними воздушными каналами в направлении, параллельном грани структуры, порядка $0.2 \mu\text{m}$) и средней длиной волны λ „запрещенной зоны“ хорошо удовлетворяет расчетному: $a/\lambda \cong 0.4$.

Угловое распределение выходящего из образцов излучения носит сложный характер. Оно зависит от ориентации образца относительно падающего на него излучения, а также поляризации зондирующего излучения. Можно отметить основные особенности углового распределения выходящего из образца излучения.

Предварительные исследования рассеянного образцами под разными углами излучения, выполненные на гониометре, одно плечо которого использовалось для освещения образца, а другое — для наблюдения с помощью микроскопа цвета структуры, показали сложный характер изменения цветовой окраски структуры, плавно переходящей из одного диапазона спектра в другой.

Необходимо отметить, что первым очень важным результатом проведенных исследований явился критерий отбора двумерных периодических структур, имеющих запрещенные зоны в видимом диапазоне

света: структура, обладающая запрещенными зонами, соответствующими видимому диапазону спектра, должна при визуальном осмотре в отраженном белом свете приобретать цветовую окраску. Если же образец не приобретает в отраженном свете цветную окраску, то его фотонная запрещенная зона находится в ИК области спектра.

При распространении света в образце под углом относительно плоскости периодической структуры волновой вектор имеет два компонента. Компонент волнового вектора, направленный вдоль элементов структуры, не вносит изменений в спектр пропускания образца, в то время, как компонент волнового вектора, направленный в плоскости периодической структуры, ответствен за формирование запрещенных зон структуры. При этом увеличение угла распространения света относительно плоскости периодической структуры приводит к уменьшению ширины энергетических зон фотонного кристалла и в конечном итоге к исчезновению его зонной структуры. Спектры пропускания, полученные при наклонном падении света на структуру, показали, что наклон образца приводит к уменьшению спектральной области излучения, для которого пропускание образца минимально, а сама область смещается в сторону меньших длин волн.

На фоне такого углового распределения наблюдались области яркой окраски структуры, которая отличалась яркостью и насыщенностью цвета. Соответствующие спектры рассеянного образцом излучения приведены на рис. 1. Спектры измерены при разных углах падения, где наблюдались области яркой окраски структур. Приведенные спектры, полученные при двух произвольных ориентациях структуры относительно падающего излучения (грань, ребро). К сожалению, из-за малых размеров структуры не удалось при измерении спектров определить расположение ее граней.

Видно, что при одной ориентации структуры четко проявляется угловое рассеяние света длинноволнового участка видимого диапазона, при другом — коротковолнового. При этом отмечается повторение спектров при вращении структуры относительно оси на углы, кратные 60° . Диапазон углов, в которых наблюдается достаточно спектрально чистое излучение, различен: излучение со спектральным составом (1) наблюдается в пределах 15° , излучение со спектром (2) — в пределах 5° . Полуширина спектров ($50\text{--}100\text{ nm}$) позволяет говорить об исследуемых структурах как миниатюрных спектральных фильтрах.

4. Заключение. Кратко опишем основные результаты проделанной работы. Разработаны методика измерения спектров рассеяния двумерных периодических структур, позволяющая исследовать спектральный состав излучения, прошедшего через структуру с поперечными размерами до $10 \mu\text{m}$, и методика визуального контроля размеров периодической структуры, обладающей „фотонной запрещенной зоной“ в видимом диапазоне, по цветному окрасу образца в отраженном свете.

Проведены исследования спектров пропускания двумерных периодических структур. Получено, что изменения в спектрах, обусловленные разной поляризацией зондирующего структуру излучения и разной ориентацией структуры относительно падающего на нее излучения. Проведены исследования спектрального состава излучения, рассеянного двумерной периодической решеткой под разными углами. Получено, что при определенной ориентации кристалла относительно падающего излучения возможна угловая спектральная фильтрация проходящего через структуру излучения. Диапазон перестройки (от фиолетового до красного диапазона видимого спектра) и спектральная ширина излучения (50–100 nm) позволяет говорить о возможности применения двумерных периодических структурах в качестве миниатюрных спектральных фильтров.

Список литературы

- [1] Meade R.D., Brommer K.D., Rappe A.M., Joannopoulos J. // I. Opt. Soc. Am. 1993. В. 10. P. 323–332.
- [2] Broeng J., Sondergaard T., Barkou S.E., Barbeito P.M., Bjarklev A. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 1999. V. 1. P. 477–482.
- [3] Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F., Russel P.St.J. // Opt. Mater. 1999. V. 11. P. 143–151.
- [4] Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. // Princeton Press. Princeton, NJ, 1995.
- [5] Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Melnikov L.A., Beloglazov V.I., Skibina Yu.S. // Laser Physics. 2000. V. 10. N 5. P. 723–726.