

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ (Photonic Crystals)

*«Ах ты, радуга-дуга,
Ты высока и туга!
Не дай дождичка,
Дай нам ведрышко...»*

Русский фольклор



Все эти объекты широко известны благодаря необычной игре света

Что общего между пером павлина, крылом экзотической бабочки и драгоценным камнем опалом? Правильно, все они необычно переливаются на свету, давая возможность наблюдать причудливые краски и удивительные цветовые переходы. Впрочем, сходство между этими предметами гораздо более глубокое, чем это может показаться на первый взгляд. Если мы посмотрим на каждый из них при большом увеличении, то увидим, что их поверхность имеет строго упорядоченную структуру. Таким образом, необычная игра света имеет дифракционную природу, а перечисленные предметы являются ни чем иным, как «собратьями» известной каждому со школьной скамьи дифракционной решетки. Впрочем, в последнее время подобные объекты начинают привлекать внимание ученых не только с эстетической точки зрения. Упорядоченные структуры, период которых сопоставим с длинами волн света видимого

или ближнего инфракрасного диапазонов, даже получили от физиков особое название – фотонные кристаллы (рис. 1).

Термин «фотонный кристалл» может поставить неподготовленного читателя в тупик. Действительно, все знают, что атомные кристаллы состоят из атомов, ионные кристаллы – из ионов, молекулярные – из молекул... Быть может, фотонные кристаллы образованы остановленными и упакованными в периодическую структуру фотонами? Но это невозможно, ведь фотоны не имеют массы покоя, стоит «остановить» фотон, и он исчезнет! На самом деле, фотонные кристаллы создают вовсе не из фотонов, а из вполне привычных материалов – полимеров, оксидов, полупроводников, металлов и др., а само название указывает лишь на то, что поведение фотонов в таких средах весьма необычно.

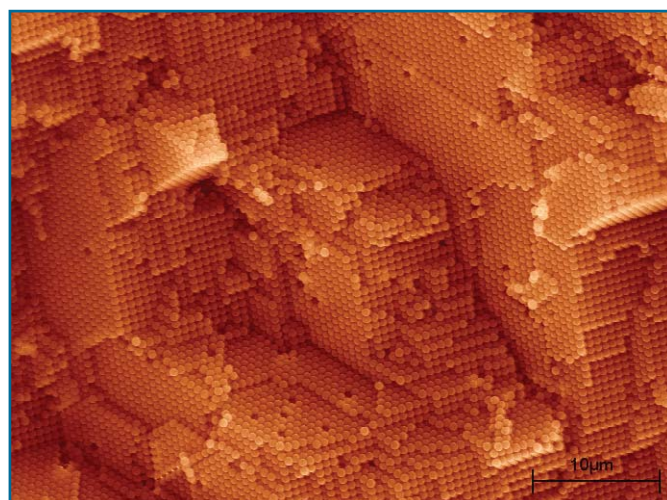


Рис. 1. Фотонный кристалл, аналогичный природному опалу, – образец состоит из упорядоченных сферических частиц размером около 650 нм (ФНМ МГУ им. М.В. Ломоносова)

Итак, фотонный кристалл – это оптическая среда, в которой происходит периодическое изменение коэффициента преломления на масштабе, сопоставимом с длиной волны света видимого или ближнего инфракрасного диапазонов. При этом различают одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы в зависимости от того, наблюдается ли указанная периодичность в одном, двух или трех измерениях соответственно. Согласно этому определению, в качестве одномерного фотонного кристалла вполне можно рассматривать уже упомянутую дифракционную решетку. Напомним, обычная дифракционная решетка – это полированная металлическая пластина, на которой нарезаны параллельные эквидистантные канавки. Хорошо известно, что одномерная периодичность дифракционной решетки позволяет ей эффективно отражать свет некоторой длины волны, падающий на решетку под определенным углом. Если же мы создадим фотонный кристалл с трехмерной периодической структурой, то возможна ситуация, при которой свет некоторой длины волны отражался бы от такого объекта при любом угле падения. Таким образом, мы получаем некоторую оптическую среду, в которую фотон не может попасть извне. Впрочем, еще более интересно представить ситуацию, когда фотон той же длины волны каким-либо образом «родился» внутри фотонного кристалла. В этом случае, по причине дифракции, фотон не может покинуть фотонный кристалл и оказывается... «заморожен»! Так значит, исходная мысль об остановленных фотонах все-таки имеет под собой основание, если речь идет о фотонных кристаллах, неслучайно их иногда называют «ловушками для света»!

На самом деле фотонные кристаллы – это не просто необычные оптические среды, представляющие сугубо научный интерес. Напротив, исследователи полагают, что уникальное поведение фотонов в фотонных кристаллах позволит создать на основе последних самые разнообразные оптические устройства, которые произведут настоящую революцию в оптоэлектронике. Уже сейчас предложены пути использования фотонных кристаллов для создания высокоэффективных светодиодов и лазеров, новых оптоволокон-

ных волноводов, оптических переключателей и фильтров, а в перспективе – сверхбыстрых фотонных компьютеров, в которых все логические операции будут производиться не с электронами, а фотонами (см. *Квантовые компьютеры*). Создание большинства из упомянутых устройств упирается в технологию формирования фотонных кристаллов, ведь в отличие от простейших одномерных дифракционных решеток, синтезировать структуры с двух- и тем более трехмерной периодичностью непросто.

Один из возможных подходов к созданию фотонных кристаллов ученые «подсмотрели» у природы. Так, уже упомянутые природные минералы опалы образуются в недрах Земли из субмикронных (диаметр < 1000 нм), близких по размеру сферических частиц оксида кремния. Именно упорядоченное расположение таких микрошариков приводит к существованию в структуре опала периодичности во всех направлениях, и как следствие – необычной игре света вследствие дифракции. В последнее время химики научились синтезировать фотонные кристаллы, аналогичные природным опалам, в лабораторных условиях. Синтетические опалы характеризуются даже более высоким качеством структуры по сравнению с природными аналогами и успешно используются во многих физических экспериментах.

Если пустоты, существующие в *самоорганизованном массиве* сферических коллоидных частиц, заполнить металлом, оксидом или другим материалом, а сами сферы потом удалить (см. *Наносферная литография*), то получится так называемый обращенный фотонный кристалл, представляющий собой пористый материал с высокоупорядоченной системой микропор. При этом размер контактирующих наночастиц, образующих такой каркас, примерно в три раза меньше размера исходных микросфер, т.е. принадлежит нанодиапазону.

Активная работа по синтезу фотонных кристаллов (не только идентичных опалам) проводится по всему миру, и универсальная технология их производства, по-видимому, станет делом ближайшего будущего.

Литература:

1. Inoue K., Ohtaka K. Photonic Crystals: Physics, fabrication and applications, Springer Series in Optical Sciences, 2004. 320 p.
2. Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals. Princeton University Press, 1995.