

ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ: ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ИНДУЦИРОВАННЫЕ РЕШЕТКИ

А. П. СУХОРУКОВ

*Физический факультет, Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова*

apsmsu@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

В обычных природных кристаллах атомы расположены по периодическому закону. Кристаллические решетки можно обнаружить при дискретной дифракции или рассеянии рентгеновских волн, длина волны которых сравнима с периодом межатомного расстояния. При волновом резонансе наблюдаются брэгговское отражение и дифракция по Лауэ. В оптическом диапазоне длин волн эти явления наблюдаются в искусственных фотонных кристаллах, в которых показатель преломления или другие оптические характеристики (диэлектрические и магнитные проницаемости) периодически меняются в одномерном, двумерном или трехмерном пространстве. Одномерные фотонные кристаллы состоят из периодически чередующихся слоев с разными показателями преломления (рис. 1, слева).

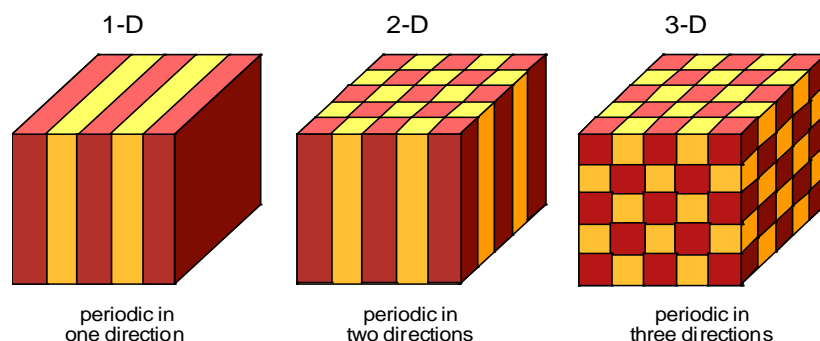


Рис. 1. Структура одно-, дву- и трехмерных фотонных кристаллов (слева направо).

В двумерных кристаллах неоднородности представляют собой набор параллельных стержней или пустот цилиндрической формы (рис. 1, в середине). Трехмерные фотонные кристаллы состоят из кубиков, шариков и т. п. (рис. 1, справа).

Одномерные фотонные кристаллы известны более 100 лет. Они широко используются в качестве просветляющих покрытий и интерференционных фильтров. Около 20 лет назад американский ученый Яблонович обратил внимание на то, что периодические оптические структуры обладают замечательным свойством: наличием запрещенной зоны в дисперсионной характеристике. Он назвал фотонными кристаллами, изготовил и исследовал первые образцы таких сред.

Итак, наиболее важной чертой фотонных кристаллов является наличие частотных полос

непропускания. На краях этих полос групповая скорость стремится к нулю, что можно использовать для замедления волн в сотни раз по сравнению с однородными оптическими средами. Вблизи полос непропускания сильно возрастает и дисперсия групповой скорости, которую можно применять, в частности, для компрессии импульсов.

Расчет дисперсии фотонных кристаллов обычно проводится на основе анализа периодических свойств волн Блоха-Флоке. Запишем волновое уравнение для вектора магнитной напряженности в виде

$$\text{rot} \frac{1}{\varepsilon} \text{rot} \vec{H} = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H} \quad (1)$$

с учетом выполнения условия $\text{div} \vec{H} = 0$. В правой части уравнения (1) стоит собственный оператор, а справа – собственная частота в квадрате. Так как среда обладает периодичностью, то диэлектрическую проницаемость можно записать в общем виде как

$$\varepsilon(x) = \varepsilon(x + a) \quad (2)$$

Согласно теореме Блоха-Флоке решение уравнения (1) с учетом условия (2) можно записать в виде

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \exp(i\omega t - i\vec{k}\vec{r}) \vec{H}_k(\vec{r}) \quad (3)$$

где амплитуда $\vec{H}_k(\vec{r})$ - периодическая функция с периодом решетки фотонного кристалла. Включение малой периодической неоднородности с перепадами диэлектрической проницаемости от ε_1 до ε_2 приводит к появлению щели в дисперсионной кривой (рис. 2).

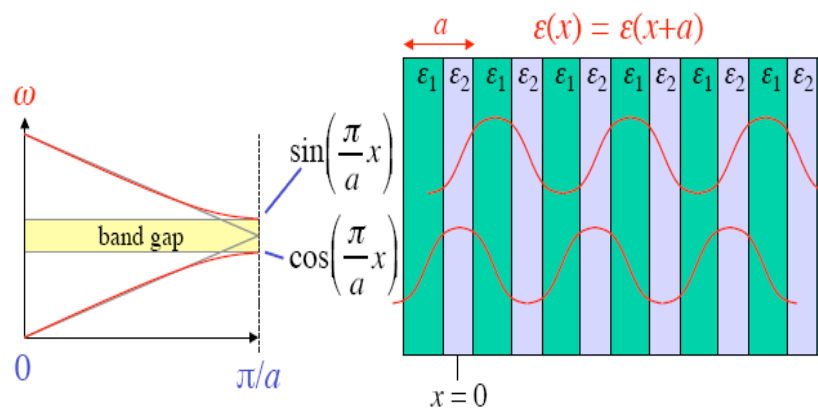


Рис. 2. Дисперсионная кривая одномерного фотонного кристалла (слева) и распределение амплитуды по слоям на верхней и нижней частотах полосы непропускания (справа).

Видно, что на верхней ветви (высокая частота) колебания сосредоточены в слоях с ε_1 , а на нижней ветви – с ε_2 .

Дисперсия двумерных кристаллов имеет более сложный характер (рис. 3).

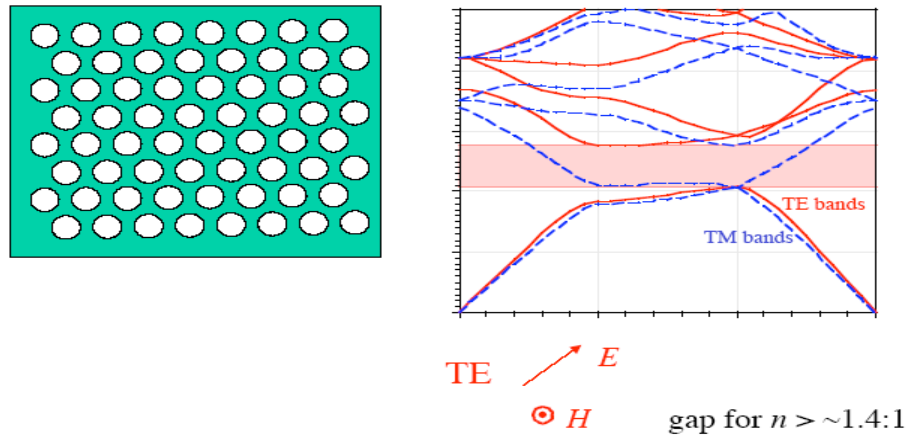


Рис. 3. Дисперсионные кривые (справа) для TE и ТМ мод двумерного фотонного кристалла (слева) при соотношении показателей преломления 1.4:1.

Другой класс периодических структур представляют нелинейные фотонные кристаллы. Здесь особый интерес вызывают кристаллы с периодической модуляцией знака квадратичной восприимчивости. Это достигается периодическим инвертированием соседних доменов, чья толщина равна когерентной длине взаимодействия волн (рис. 4). Ступенчатая компенсация фазовой расстройки, возникающей из-за естественной дисперсии, позволяет сохранить когерентность многочастотных нелинейных процессов. В случае генерации второй гармоники пространственные биения (кривая d) меняются монотонным ростом. Данный эффект называется квазисинхронизмом.

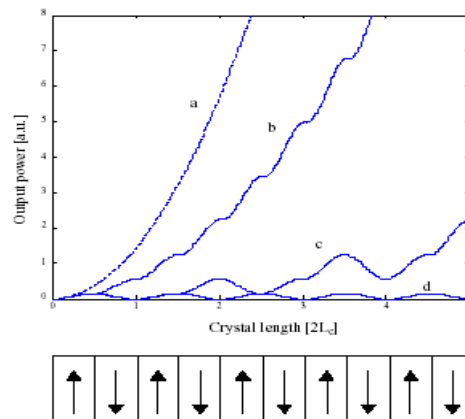


Рис. 4. Зависимость мощности второй гармоники от длины кристалла (верхний рисунок) при фазовом синхронизме (а), при квазисинхронизме первого (b) и третьего (с) порядков, и при отсутствии синхронизма (d). Периодическая переориентация доменов показана на нижнем рисунке.

С помощью квазисинхронизма можно осуществлять наиболее эффективные взаимодействия оптических волн, имеющих максимальную квадратичную восприимчивость. В однородных кристаллах этому процессу препятствует большая расстройка фазовых скоростей, которую нельзя скомпенсировать относительно малой анизотропией. Выполнения синхронизма можно добиваться и в фотонных кристаллах с периодической модуляцией линейного показателя преломления.

Нелинейность среды можно использовать и в других целях - для создания индуцированных периодических решеток. Одномерные структуры возникают в поле двух встречных оптических волн, создающих стоячую волну. Для генерации двумерных индуцированных решеток надо привлекать четыре оптических пучка (рис. 5),

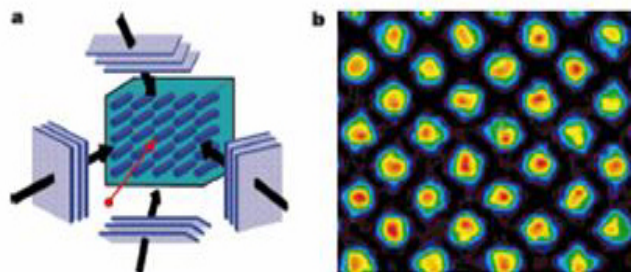


Рис. 5. Создание двумерной решетки в нелинейном фоторефрактивном кристалле. На схеме эксперимента (а) показаны четыре пучка, которые возбуждают матрицу пространственных солитонов (диаметр каждого равен 7 мкм, расстояние между соседними пучками составляет 11 мкм) . Распределение интенсивности в поперечном сечении имеет периодическую структуру.

а для возбуждения трехмерных решеток – шесть пучков, т.е. три пары встречных волн, распространяющихся в перпендикулярных друг к другу плоскостях.

Индукцированные решетки обладают зонами непропускания, как обычные периодические структуры. Их можно перестраивать путем изменения наклона пучков (меняется период решетки) и мощности интерферирующих пучков (меняется глубина модуляции решетки). Индуцированные периодические структуры можно создавать в бозе-эйнштейновском конденсате с помощью встречных лазерных пучков.

Двумерные фотонные кристаллы часто изготавливают из близко расположенных оптических волокон или полых цилиндров – отверстий (рис. 6). В отверстия можно вводить жидкости и газы, обладающие сильными нелинейными свойствами. В отверстия удобно вводить мощное лазерное излучение.

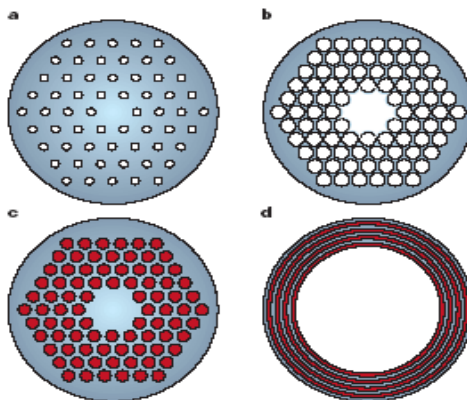


Рис. 6. Различные типы волоконных фотонных кристаллов.

Наличие большой дисперсии и нелинейности в протяженных волоконных фотонных кристаллах приводит к генерации суперконтинуума, который перекрывает несколько октав в оптическом диапазоне частот.

В магнитооптике создаются фотонные кристаллы, структурой которых можно управлять с помощью внешнего магнитного поля.

К фотонным кристаллам примыкают дискретные волноводы. Они состоят из десятков расположенных на подложке планарных волноводов, слабо связанных между собой. В дискретном уравнении Шредингера для медленно-меняющихся амплитуд E_n учитываются взаимодействия только соседних волноводов:

$$i \frac{d E_n}{d z} + \Lambda E_n + C (E_{n-1} + E_{n+1}) = 0, \quad (4)$$

где Λ - линейное волновое число, C - коэффициент связи волноводов, n - номер волновода. Система уравнений аналогичная (4) встречается при описании колебаний в одноатомной однородной цепочке, колебаний связанных маятников и т.д. Из-за поперечной связи в описываемой периодической структуре возникает дискретная дифракция. Так, если возбудить на входе только один центральный волновод с $n = 0$, то энергия будет просачиваться в соседние волноводы по мере распространения волн по бесселевому закону

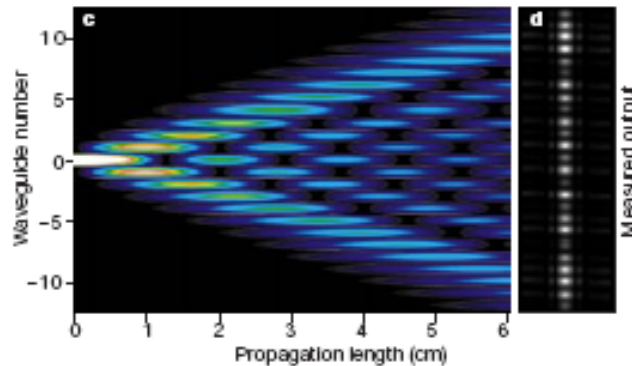


Рис. 7. Иллюстрация дискретной дифракции. Эксперимент проведен с 31 волноводами при начальном возбуждении одного центрального волновода. Распределение амплитуд на выходе описывается формулой (2).

$$E_n(z) = E_0 (i)^n \exp(i \Lambda z) J_n(2Cz). \quad (5)$$

Распределение (5) наблюдалось во многих экспериментах (рис. 7). В нелинейных дискретных волноводах можно возбуждать пространственные солитоны, вихревые волны Блоха и т. д.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы показали на отдельных примерах, что фотонные кристаллы, индуцированные периодические решетки и дискретные волноводы, обладают рядом уникальных свойств. Они находят широкое применение в фотонике, нелинейной оптике, атомной оптике, магнитооптике.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 05-02-17064 и гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» НШ-1949.2003.2.