

# 光子晶体简介

黄声野

## 1. 光子晶体的概念

E. Yablonovitch 和 S.John 在 1987 年分别独立地提出了光子晶体的概念。光子晶体是介电常数在空间呈周期性排列形成的人工结构。所谓晶体就是指这种“周期性”而言的。根据“周期性”的维数，光子晶体也分为一维，二维和三维的。图 1 是不同维数光子晶体的模型和实例。光子晶体里重复结构（或称晶胞）的单元尺度是光波长量级。通过巧妙的安排和设计，光子晶体可以控制光子流。

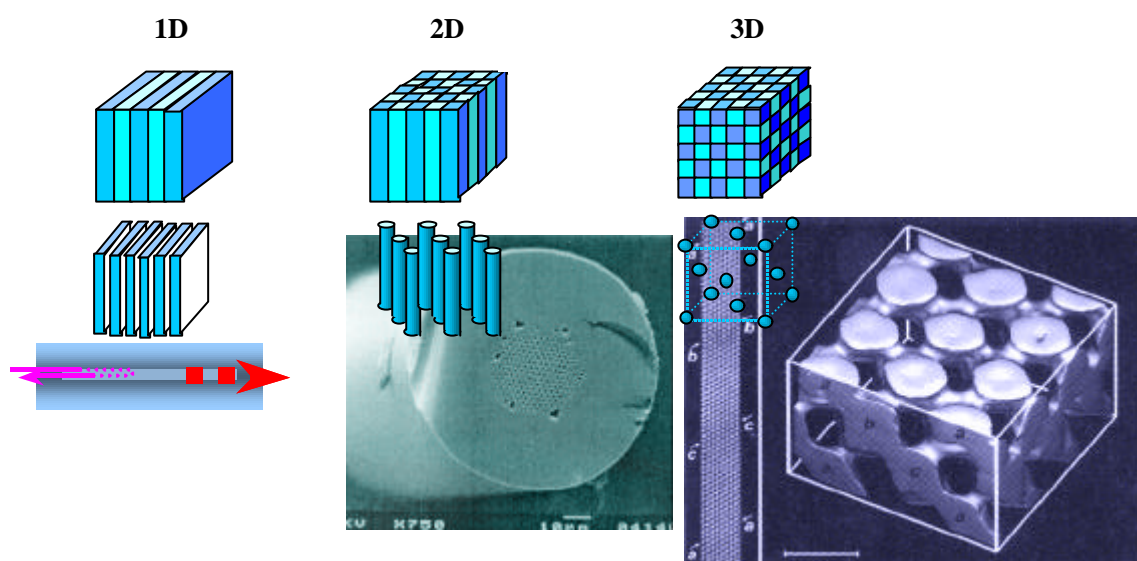


图 1 1D,2D,3D 光子晶体

## 2. 光子晶体的带隙结构

与普通晶体一样，光子晶体的周期排列具有能带结构，光子能带之间可能存在光子带隙（或光子禁带）。光子带隙（或禁带）是指一个频率范围，在这个频率范围里的电磁波不能在这个光子晶体里传播。而频率位于能带里的电磁波则能在光子晶体里几乎无损地传播。带隙的宽度和位置与光子晶体的介电常数比值，周期排列的尺寸及排列规则都有关系。

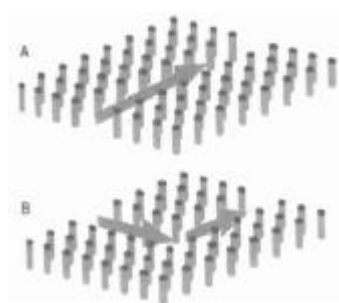


图 2. 电介质棒组成的二维光子晶体

就像半导体中原子点阵可以控制电子传播一样，光子晶体中不同介电常数的

排列可以控制一定频率的光的传播。如果介电常数的差异足够大，在电介质的交界面上发生布拉格散射，产生能量的禁带。在三维严格的光子晶体中，禁带内的电磁波无法向任一个方向传播。如果晶体中出现缺陷，在某个位置上电介质排列的周期性被打破了，那么光波就可以从这个缺陷射出。如果这种缺陷是如图 2 中所示的线缺陷，那么光就沿着缺陷构成的通道传播，从而实现光的传播方向的控制，甚至可以让光转过很锐的弯。

从波动方程的角度来说，由 MAXWELL 方程的出发，在  $\epsilon$  为常数的自由空间或均匀介质里，有我们熟悉的波动方程：

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \omega^2 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

但是在光子晶体里，由于  $\epsilon$  不再是一个常数，而是一个周期函数，波动方程就变为：

$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})] = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

光子晶体的结构特性都包含在函数  $\epsilon(\mathbf{r})$  里。使方程 (2) 有解的  $\omega$  将构成能隙，而使方程 (2) 无解的所有  $\omega$  则构成带隙。

图 3 是介质棒呈等边三角形排列的二维光子晶体的带隙结构，水平坐标表示入射光波的波矢，垂直坐标表示频率。从图中可以看到，在 0.4-0.6 之间有一段频率范围里，不存在任何波矢的光波，这说明在这个光子晶体里，存在这样一个

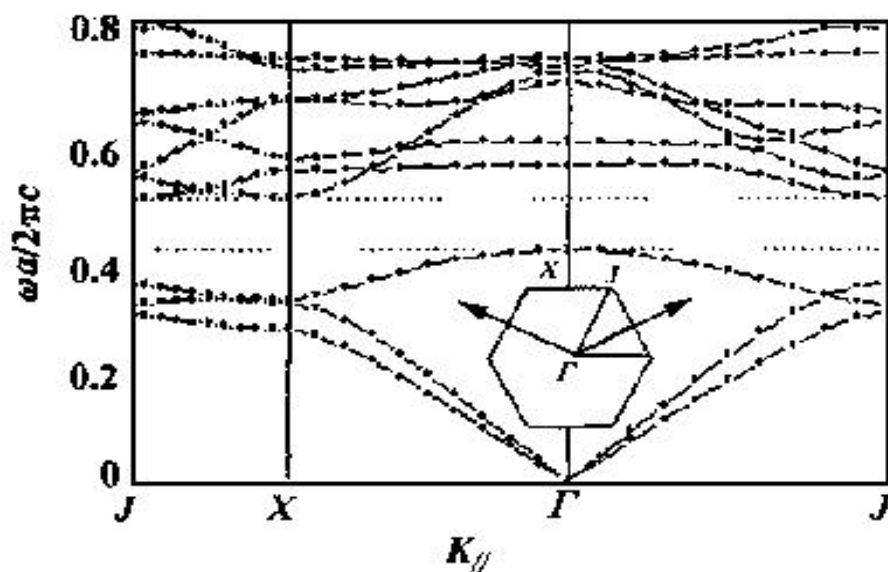


图 3. 等边三角形光子晶体在  $f=0.78$ ，介电常数比为 13 时的带隙结构图

光子带隙（禁带）。

### 3. 光子晶体的应用

光子晶体的光子带隙的存在使它具有很重要的应用背景，可以制作全新原理或以前所不能制作的高性能器件。

#### （1）高性能反射镜（控制光子流动的晶体）

频率落在光子带隙中的光子或电磁波不能在光子晶体中转播，因此选择没有吸收的介电材料制成的光子晶体可以反射从任何方向入射的光，反射率几乎为100%。而传统的金属反射镜虽然在较大的波段内可以反射光，但在红外波段有较大的吸收。如果把这种光子晶体反射镜用作平面天线的衬底，可以解决衬底透射的问题。

#### （2）光子晶体波导

传统的介电波导可以支持直线传播光，但在拐角处会损失能量。而光子晶体波导不仅对直线路径，而且对转角都有很高的效率。这对于光学器件的集成非常有意义。

#### （3）光子晶体微腔

在光子晶体中引入缺陷可能在光子带隙中出现缺陷态，这种缺陷态具有很大的态密度和品质因子。这种光子晶体制成的微腔比传统的微腔优异得多。用它制作微腔激光器，体积可以非常小。

#### （4）光子晶体光纤

在传统的光纤中，光在中心的氧化硅核传播。通常采取掺杂的办法提高其折射系数以增加传输效率，但不用的掺杂物只能对一种频率的光有效。英国 Bath 大学的研究人员用几百个传统氧化硅棒和氧化硅毛细管一次绑在一起组成六角阵列，在 2000 度高温下烧结后制成了二维光子晶体的光纤。在光纤的中心可以人为地引入空气孔作为导光通道，也可以用固体硅作为导光介质。光子晶体光纤在两个方面明显优于传统的光纤，一是它在很宽的频率范围内支持单模运行，二是可以传输更大功率。

#### （5）光子晶体超棱镜

常规的棱镜难以分开波长相近的光，而用光子晶体制成的超棱镜分光的能力比常规棱镜大 100 到 1000 倍，而体积只有常规的百分之一大小。这对光通信

中的信息处理有很重要的意义。

#### (6) 光子晶体偏振器

用二维光子晶体制作的偏振器具有传统的偏振没有的优点：工作频率范围大，体积小，易于集成，很容易在硅片上集成或在硅基上制成。

光子晶体还有许多其它应用背景，如无阈值激光器，光开关，光放大，滤波器等新型器件。随着对光子晶体的许多新的物理现象的深入了解和光子晶体制作技术的改进，光子晶体更过的通途将会被发现。