

## 二维各向异性光子晶体完全带隙的增宽<sup>\*</sup>

李志远 顾本源 杨国桢

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘要** 介绍了光子晶体能带设计的一种新机制,利用各向异性材料制作二维光子晶体,可以大大提高光子晶体的完全带隙宽度。

**关键词** 二维光子晶体,完全带隙,各向异性材料

### GENERATION OF LARGE ABSOLUTE BAND GAPS IN 2D ANISOTROPIC PHOTONIC CRYSTALS

Li Zhiyuan Gu Benyuan Yang Guozhen

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** A novel mechanism is introduced in the design of photonic crystals. Absolute photonic band gaps can be substantially improved in two dimensional photonic crystals by introducing anisotropy into the material dielectricity.

**Key words** two dimensional photonic crystals, absolute photonic band gaps, anisotropic materials

光子晶体概念的提出<sup>[1,2]</sup>,对光电子学的理论和应用产生了巨大的影响,使得制作完全带隙的光子晶体成为众多科技人员孜孜不倦追求的目标<sup>[3]</sup>. 简单地说,光子晶体是电介质材料周期性排列形成的人工微结构. 在普通半导体里,原子的周期性排列使电子形成能带和能隙,同样地,光子晶体由于周期性,也将产生光子能带和光子带隙. 在光子带隙内,不存在任何电磁波传播的模式,这将显著地改变光与物质相互作用的方式,其中最引人注目的是抑制原子分子的自发辐射以及半导体中电子-空穴对的复合. 当原子分子的激发态能量位于光子带隙内时,它们将不能跃迁回基态. 这种特殊性质能显著提高半导体激光器、发光二极管、太阳能电池等的效率,因而将对现代光电子产业产生巨大而深远的影响. 此外,由于它能够有效地控制光子的状态,将在未来的全光集成回路里充

当关键角色<sup>[3]</sup>.

在光电子学领域里最具应用潜力的是可见光和红外波段的三维完全带隙的光子晶体,但是利用今天的微细加工技术制作这种精细结构,仍然困难重重. 二维光子晶体的制作则容易得多,它也有一些应用,诸如激光二极管里的反馈镜等. 光子晶体优异的光电子学特性,其根源在于它具有一个完全的光子带隙. 可以说,带隙越宽,晶体性能越好. 对于二维的光子晶体,当电磁波垂直于晶体柱体轴向传播时,电磁场可分解为  $E$ - 和  $H$ - 两种本征偏振模式的线性叠加,它们的电场矢量分别平行和垂直于柱体的轴向. 只当两种模式的光子能带都具有带隙,而且彼此重叠时,二维光子晶体才具有完全带

\* 国家自然科学基金资助项目

1998 - 09 - 15 收到初稿,1998 - 10 - 06 修回

隙.

设计光子晶体带隙通常的做法是降低晶体原子构型的对称性. 在二维情况下, 在晶体元胞里引入两个圆柱体, 通过调节两个柱体尺寸的比例, 可以较好地设计出完全带隙的光子晶体.

我们选择了另外一条途径, 利用材料介电函数的各向异性来降低晶体结构的对称性, 发现这种各向异性能改善三维光子晶体的带隙结构<sup>[4]</sup>. 紧接着, 我们将这个概念应用到二维光子晶体完全带隙的设计, 发现了改善完全带隙的一种十分有效的新机制<sup>[5]</sup>. 下面我们将简要地介绍这种机制.

我们的出发点很简单. 某种结构的光子晶体, 当晶格类型、原子的占空比, 以及原子的构型等参数确定时, 光子晶体的能带结构将取决于折射率反差. 通过改变折射率反差, 可以调节光子能隙的位置和带隙的宽度. 因此, 如果我们在特定的晶体里, 使  $E$ - 和  $H$ - 偏振模式的电磁波能够独立地选择不同的折射率反差, 那么两者光子带隙的相对位置就能够自由地调节, 使得它们达到最佳的重叠. 这样, 我们就能够获

得最宽的完全带隙. 能够实现这个目标的一个方法就是采用各向异性的介质材料. 最简单的是采用单轴晶体, 它有两个不同的主折射率, 即正常折射率  $n_o$  和异常折射率  $n_e$ . 当单轴晶体的异常轴沿着光子晶体柱体延伸方向时, 两个模式的电磁波感受到的折射率不同.  $E$ - 偏振模式的折射率为  $n_e$ , 而  $H$ - 偏振模式的折射率为  $n_o$ .

以介质圆柱体在空气中排成三角晶格的二维光子晶体为例. 能带计算表明,  $E$ - 和  $H$ - 偏振模式各自具有光子带隙, 分别为  $E1-2$  和  $E3-4$  两个带隙, 和  $H1-2$  带隙. 图 1 所示为  $E$ - 和  $H$ - 偏振模式的能隙位置随圆柱折射率变化的关系, 圆柱的占空比  $f = 0.4$ . 显然, 在任何折射率下,  $H1-2$  带隙位于  $E1-2$  带隙和  $E3-4$  带隙之间, 光子晶体都没有完全带隙.

当晶体由各向异性材料的介质柱构成时, 情况就不同了. 如果把  $H1-2$  带隙向上移动, 使之与  $E3-4$  带隙重叠, 或者将它向下移动, 使之与  $E1-2$  带隙重叠, 就能产生一个完全的带隙. 由于光子能带的偏离在一定程度上反比

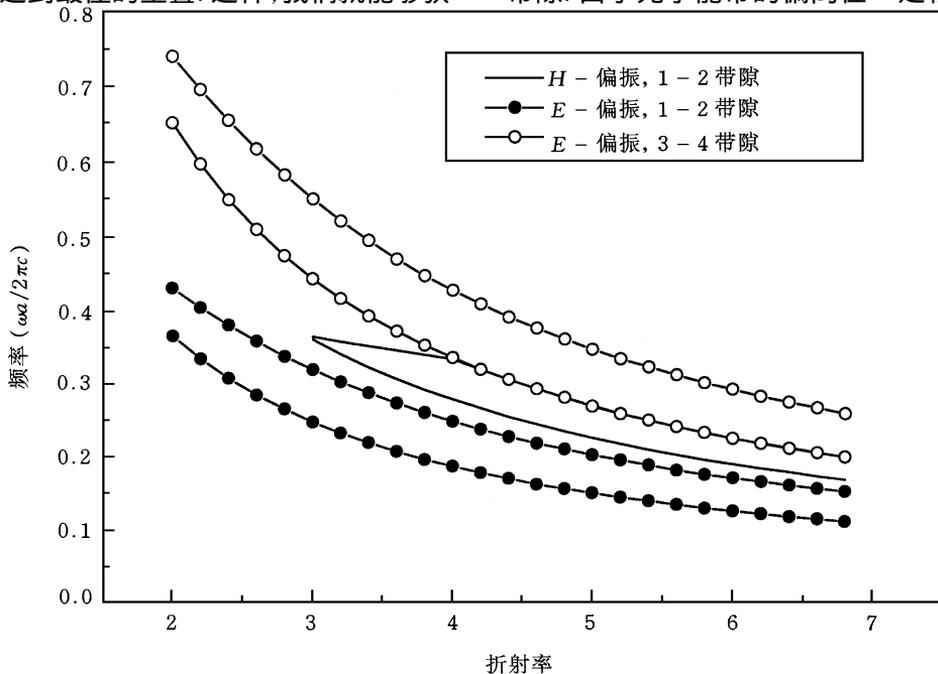


图 1 空气中的介质圆柱构成的二维光子晶体, 在三角晶格结构里, 其光子带隙位置随圆柱折射率变化的关系

于折射率反差,因此,在前一种情况下, $H$ -偏振模式的折射率要小于 $E$ -偏振模式的折射率,即 $n_e > n_o$ ,为正单轴晶体.在后一种情况下,则必须选择负单轴晶体,使 $n_e < n_o$ .假如各向异性足够强烈,两个模式的带隙可以完全重叠,产生最大的完全带隙.另外,为实现带隙的完全重叠,正单轴晶体所需的各向异性比负单轴晶体的小,实验上较为容易实现.

上述的设计思想同样地适用于其他晶格类型和原子构型的二维光子晶体.当二维光子晶体是由均匀介质背景中的空气圆柱构成时,在正方晶格结构里,利用各向异性材料,能够使完全带隙的宽度增加到各向同性晶体的2—3倍.

上述的机制物理原理很简单,但非常有效,可以说开辟了设计二维光子晶体能带结构的一

条新途径.论文投稿到物理学权威杂志《Phys. Rev. Lett.》后,两位审稿人均给予了很好的评价,认为作者在光子晶体的重要研究领域内,首次发现并清晰地描述了一种崭新的设计方法.论文在不到3个半月的时间内,就在《Phys. Rev. Lett.》上发表了.

### 参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett., 1987, 58:2059—2062
- [2] John S. Phys. Rev. Lett., 1987, 58:2486—2489
- [3] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Nature, 1997, 386:143—149
- [4] Li Z Y, Wang J, Gu B Y. Phys. Rev. B, 1998, 58:3721—3729
- [5] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z. Phys. Rev. Lett., 1998, 81:2574—2577

## 发光不衰减的多孔硅\*

李新建 张裕恒

(中国科学技术大学结构分析开放研究实验室 合肥 230026)

**摘 要** 用一种新的方法制备出了具有不衰减的光致发光特性的多孔硅.如此制备的多孔硅新鲜样品,其发光峰位强度比普通多孔硅高2—2.5倍.将样品在室温下暴露于空气中,其发光强度在前4个月中单调增加,然后达到饱和.在随后的8个月中,没有观察到发光衰减,发光峰位也没有发生变化.这种发光稳定性被归因于多孔硅表面所形成的稳定的Fe-Si键.文章探讨了发光不衰减、峰位不蓝移的机理,并为多孔硅发光的量子限域模型提供了强有力的证据.

**关键词** 多孔硅,光致发光,量子限域模型

## NONDEGRADING PHOTOLUMINESCENCE IN POROUS SILICON

Li Xinjian Zhang Yuheng

(Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** Porous silicon (PS) with nondegrading photoluminescence (PL) has been prepared by a novel method. For freshly prepared samples, the PL peak intensity is 2—2.5 times stronger than that of normal PS. Upon exposure to ambient air, the PL intensity increases during the first four months and then saturates. No PL degradation is observed after eight months, and the peak position remains unchanged. This PL stability is attributed to the formation of stable Fe-Si bonds on the PS surface.

\* 国家自然科学基金资助项目

1998-10-05 收到初稿, 1998-11-23 修回