

光子晶体研究进展

赵 辉 张其锦^{*}

(中国科学技术大学高分子科学与工程系, 合肥 230026)

摘要: 光子晶体是最近 10 余年间提出的新概念和新材料。本文简述了光子晶体的主要特性, 重点阐述了光子晶体的制作方法, 特别是高分子材料制作光子晶体的几种新方法。

关键词: 光子晶体; 周期性结构; 介电材料; 光子禁带

1 光子晶体概述

过去的—个世纪被称为“电的世纪”, 电进入了我们生活的每一个角落。在电子信息领域人们为了获得更小的电路体积和更高的信息交换速度进行了不断的研究。但线路越细电阻就越大, 能量散失就越多, 而更高的速度则对信号同步的准确性要求更高。在电子线路已经发展到极限的今天, 科学家们把目光对准了光。他们希望能用光子来取代电子作为信息的载体, 进一步推动人类文明的发展。

光相对于电来说有许多优势^[1], 首先, 光在介电材料中的传播速度可以达到 10^8 m/s 数量级, 而电在金属中的传播速度只有 $10^4 \sim 10^5$ m/s 数量级, 光传播要快得多。其次, 光做载体每秒可携带的数据量比电要多得多。再次, 介电材料的带宽远远大于金属。光纤系统的带宽可以达到 10^{12} Hz 数量级, 而金属导线的带宽只有 10^5 Hz 数量级。还有很重要的一点就是, 光子没有强的相互作用, 这可以使传播时的能量损耗大大降低。

现在人们用来传输光信号的光纤一般是利用全反射的原理, 光在高介电材料中传输, 在高-低介电材料的交界面上反射。因为在这种模式下, 界面相对于光波来说必须是光滑的。因此这就限制了这类光学元件不能做得太小, 而且光路的转角不能太大。

在 1987 年, Yablonovitch^[2] 首先提出了光子晶体(Photonic Crystal)的概念。这引入了另一种完全不同的控制光线的机制。光子晶体是一种介电常数周期性变化排布的材料, 就象半导体中原子点阵可以控制电子传播一样, 光子晶体也可以控制一定频率的光的传播。在半导体中, 当电子在晶体中扩散时, 原子点阵形成了一种周期性的势场。点阵的空间排布和势场的强度导致了类布拉格散射。于是就会出现一个能量的禁带, 在这个禁带中的电子在任何方向上均不能传播。在光子晶体中, 介电常数不同的材料代替了原子, 也形成了一种周期性的“势场”。如果介电常数的差异足够大的话, 在电介质的交界面上也会发生布拉格散射, 同样会有能量的禁带出现。在完整的三维光子晶体中, 光就不能向任一方向传播。而当完整晶体上出现了一个缺陷的时候, 光就可以从缺陷处射出, 如果该缺陷是一个线缺陷的话, 光就会沿着线缺陷的走向行进。这样就可以做到控制光波的方向。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50025309);

作者简介: 赵辉(1975—), 男, 祖籍湖南湘乡, 1998 年毕业于中国科学技术大学高分子化学专业, 1999 年考入中国科学技术大学高分子科学与工程系攻读硕士研究生, 主要研究课题为含稀土纳米粒子的制作与表征;

^{*} 联系人。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

向。同时也可以让光波转过很尖锐的弯。由于有光子禁带,转弯时几乎没有能量损失,唯一损耗的光是从入射口逸出的一小部分。

制作光子晶体的难度在于制作足够小的格子结构。要控制光线,格子的大小必须与光的波长处于同一量级。也就是说,对红外波来说(波长 $1.5\mu\text{m}$ 左右),它所对应的光子晶格的格子间隔大概要在 $0.5\mu\text{m}$ 左右,这比人的头发还要小 100 倍。科学家们经过几年的努力,已经制作成功了一些光子晶体。以无机材料为主,近两年也出现了一些有机和高分子材料制作的光子晶体。

2 无机光子晶体的制作

最早的光子晶体大都为无机材料。这是因为无机材料与空气的折射率差值较大,因此获得的禁带也较宽,同时无机材料对工艺的控制也更加成熟一些。

Sandia National Laboratories 的 Shawn-Yu Lin 所领导的小组用的是氧化铝棒来制作光子晶体^[3]。他们用直径 $0.20a$ (a 是晶格常数) 氧化铝棒(介电常数 $\epsilon=8.9$) 排列成正方形的阵列,棒间距离为 1.27mm (晶格常数 $a=1.27\text{mm}$)。如此构成了一个二维光子晶体(图 1)。它有一个从 $0.32c/a$ (76GHz) 到 $0.44c/a$ (105GHz) 的很大的禁带(c 是光速)(图 2)。他们从中间去掉了一些氧化铝棒,形成了一个线缺陷。如果使这个缺陷的路线成一个直角,而后从一个口入射电磁波,在另一个口检测,则可发现出射电磁波比入射电磁波都有轻微的减少($<25\%$),但在 $f_1\approx 87\text{GHz}$ 和 $f_2\approx 101\text{GHz}$ 这两个频率的偏转效率几乎是 100% ,说明这两种波可以无损耗的转过 90° 的尖锐的角(图 3)。

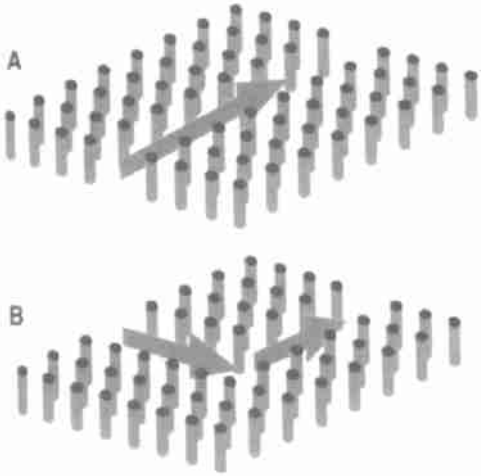


图 1 氧化铝棒组成的阵列

Shawn-Yu Lin 等还用更细的氧化铝棒做成更小的光子晶体,他们做成晶格常数为 $0.59\mu\text{m}$ 的方

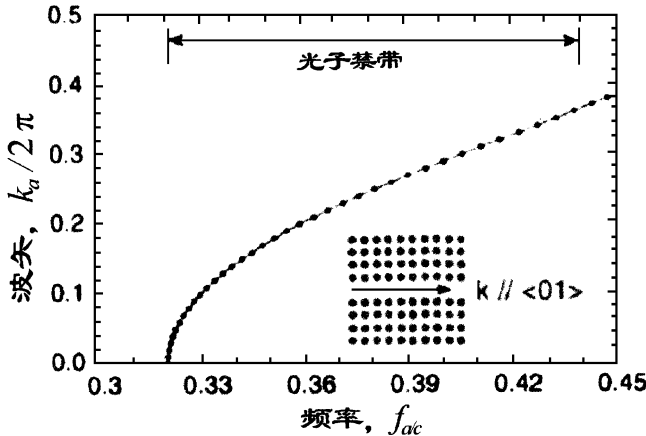


图 2 Shawn-Yu Lin 光子晶体的光子禁带

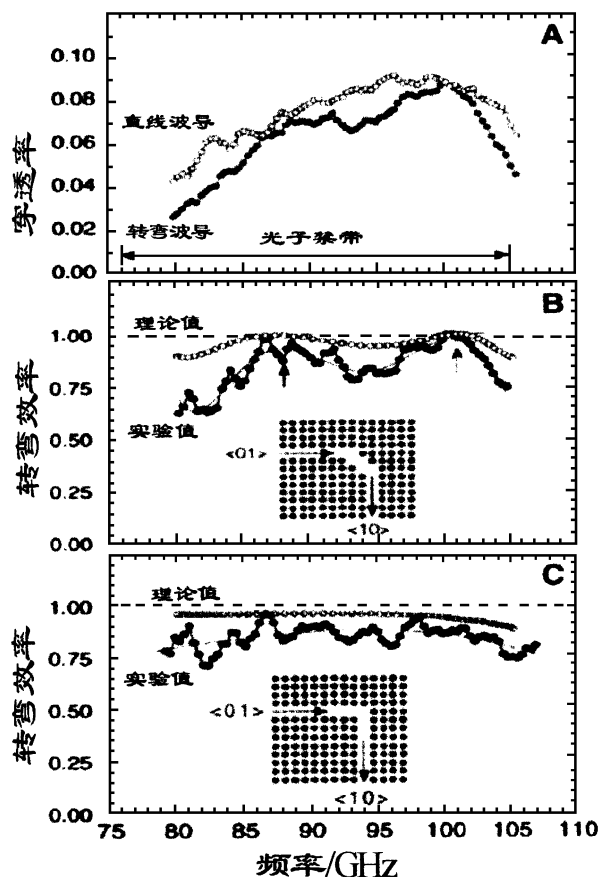


图3 Shawm-Yu Lin 光子晶体的性质

(A) 二维光子晶体中直线波导传输率(空心圆)和转弯波导传输率(实心圆);87GHz和101GHz处转弯几乎无损失;(B)和(C)为两种转弯效率的理论值和计算值,(B)和(C)中的细线为多项式拟合后得到的曲线。

阵。该光子晶体的禁带在红外区,以 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 为中心,禁带宽度为 430nm。他们现在正在制作三维的光子晶体,就是将目前得到的二维光子晶体按照一定的角度堆砌起来,希望能得到控制可见光波的光子晶体,因此要做成更小尺寸的棒的阵列。他们先将硅薄膜上选择性的用蚀刻法使之变成硅柱阵列,再将另一层硅柱阵列以适当的角度摞在上面。如此堆积 5~6 层,形成一个蜂窝状的结构。现在,这个结构还不能很好的控制光线,还在继续改进中。

在英国,另一个工作组在 Knight 的领导下用另一种方法作光子晶体^[4]。他们先将几百个硅棒和中空的硅管,用手将它们堆在一起排成六角形的阵列,再将之加热至 2000℃ 左右。这样就形成了中间留有空气孔洞和六角形结构(图 4)。和他们以前的工作^[3]不同的是,这次六角形的正中心也有一个空气的孔洞。在原来中心不带空气孔洞的光纤中,它的工作模式是传统的全反射式的,中间的硅是高介电材料,但在这种中间带孔洞的材料中,中间的空气是低介电材料。这就决定了它不可能是全反射机理,而是一种二维的光子晶体。它改变了以往认为只有折射率相差很大的材料才能制作光子晶体的法则(硅的折射率 $n = 1.5$)。这种光子晶体的禁带只在入射光接近平行于纤维时才起作用,而且不能引导光波转过一个

尖锐的角。但它最突出的一个特点是,它能传送高强度的光。普通光纤只能传送几百瓦特,能量再高的话,光纤就会改变自身的性质,从而干扰光束。但这种中空的光子晶体就避免了这个问题,因为光是在空气中传播的,不会被硅所吸收。所以它可以传送高达几百千瓦的能量。

3 有机(高分子)光子晶体的制作

利用高分子材料来制作光子晶体的报道目前还不多,这可能是由于光子晶体对结构的有序性要求比较高,而一般方法制成的聚合物材料都难以达到这个要求。

双光子聚合是方法之一。双光子聚合是最近几年才发展起来的聚合方法,它是利用双光子吸收过程引发的光聚合反应。双光子吸收过程^[6]指在一定条件下,分子在初级光化学过程中,可以吸收两个光子而跃迁到相应的激发态。这可以在两种情况下实现:(1)两次吸收,即以高强度光源照射体系,使之产生高浓度的电子激发态分子或中间态粒子,如果这些激发态分子具有较长的寿命,就能够接着吸收第二个光子,从而跃迁到更高的激发态,这又称为两步激发;(2)一次吸收,当用

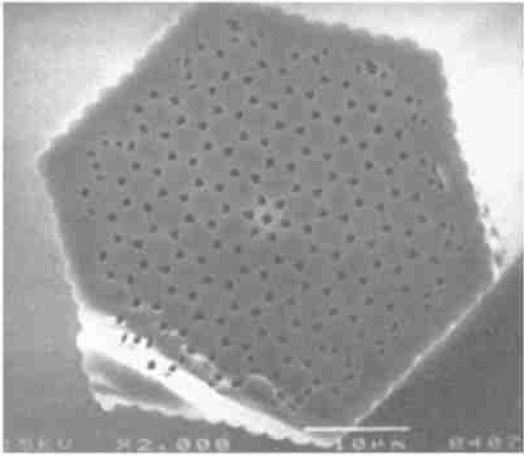


图 4 可输送高能量的硅制光子晶体

次吸收则不同, 由于要求同时吸收两个光子, 在单束激光经过的光路上的分子, 虽然可以吸收光子, 但却因能量不足而不会被激发, 而这时如果有另一束激光照射, 在两束光线交汇的地方的分子就会由于双光吸收过程而被激发。

这就给三维空间的精确定位聚合提供了条件。科学家可以控制在三维空间中任意一点引发聚合, 而对其他地方没有影响。但真正使用双光子光聚合反应来制作三维有序结构还是最近的事。这个领域的突破在于找到了一些有较大双光子吸收截面的分子^[7,8], 当这些分子作光聚合引发剂的时候, 就可以达到记录信息所要求的敏感度。在 Moscow 大学的工作组中^[9], 他们使用了 Ti:Sapphire 激光器产生的 150fs 的 820nm 的激光。使用 Methacrylate oligocarbonate α, ω -bis(methacryloyloxyethyleneoxy carbonyloxyethylene) oxy 1 (OKM-2) 做单体。用一台计算机来控制激光头的焦点, 控制光聚合物的生成, 做出空间三维有序结构(图 6)。在激光的输出功率是 20mW 的情况下, 使一块 1.4×1.4 mm 的地区聚合约需 10ms。

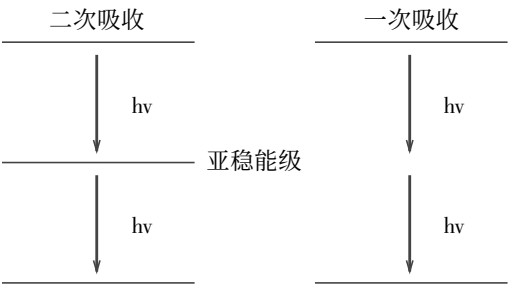


图 5 二次吸收与一次吸收最大的区别就是能发生两次吸收的分子, 两个能级中间有一个亚稳能级, 亚稳激发态可以有一定的存活时间。一次吸收就必须同时吸收两个光子。

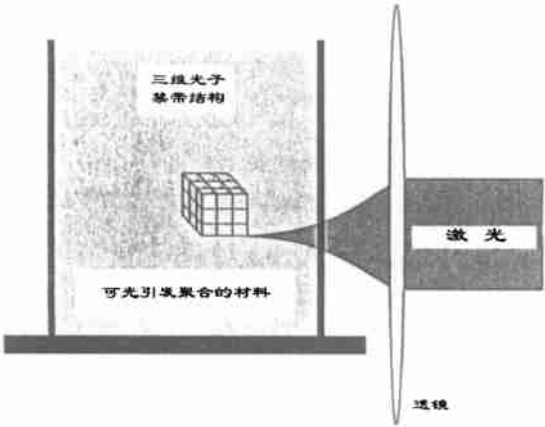


图 6 利用双光子聚合制作光子晶体

另一种方法叫做全息印刷法。这是利用一块感光性树脂, 以四束非共面激光(four non-coplanar laser beam)形成的三维干涉图案照在感光性树脂上, 照射强烈的地方树脂就变得不可溶, 未被照射

地方的树脂可以被溶解掉,从而留下了一个由聚合物和空气构成的三维周期性结构(图7)。英国 Oxford 大学的 Compbell, Sharp 等人^[10]用的是环氧型感光性树脂 Epon-SU8 和波长为 355nm 的 Nd: YAG 激光,最终制得的光子晶体约有 10 ~ 60 μ m 厚,有 14 ~ 80 层,聚合物的折射率 $n \approx 1.6$ 。这种方法相对来说是一种比较迅速,同时又比较便宜的方法,它还可以通过调整干涉图案来改变该微结构的光学性质。

还有一种方法是胶体粒子法,这种方法的研究一直没有停止^[11~14],现在做单分散胶体球的技术已经比较成熟了,胶体粒子的直径从几纳米到几百微米都可以控制。以前用胶体粒子制作三维有序结构的方法都需要很高的技巧。例如沉积法^[15]就很难控制沉积区域的尺寸和层的数目。如果粒子的直径小于 500nm 的话,完成沉淀经常需要几周乃至几个月。静电法^[16,17]对实验条件,象粒子表面的电量密度和电解质分子在分散介质中的集中度,要求的就比较严格。而且由于有静电排斥作用,这种方法制作出的产物一般堆积密度都小于 50%。而理论计算表明,低堆积密度很难形成完整的禁带。

最近,University of Washington 的夏幼南教授领导的工作小组提出了一种简单而又方便方法将胶体球堆积成有序结构^[18]。他们在两层玻璃中间用感光性树脂做成了一个围栏,在一端的树脂上开一些小的孔道,孔道的直径小于胶体粒子的直径,这样胶体粒子就不能够从这里出去而溶剂分子可以。在上面的玻璃上,他们开了一个 3mm 左右的洞,而后在上面装上一个玻璃管。将大约 0.05%(wt)的单分散胶体粒子溶液从玻璃管中倒入(图8)。由于有上面的压力存在,溶剂会从感光性树脂的孔道之中流出而胶体粒子则会在底部沉积下来,形成立方密堆积的结构(图9)。这样制得的结构堆积密度约为 74%。

这种方法主要的优点是:它相对来说比较快,一般制作出一块 1cm² 的光子晶体只要 48h;它可控制的胶体粒子大小范围宽,从 50nm 到 50 μ m 都适用;可以控制堆积层数;对各种胶体粒子都适用,不管它们的化学构成和表面性质如何。

高分子材料制作的光子晶体有一个通病,就是折射率差不够大,导致光子禁带宽度较窄或禁带不完全。夏幼南教授在上面的胶体粒子法的基础上进行了一些改进^[19],来解决这个问题。他先在聚苯乙烯球外面包裹了一层有机染料(Oil Blue N),有机染料的折射率是随频率变化的,它可用下式表示

$$n = 1 + \frac{q_e^2}{2\epsilon_0 m} \sum_k \frac{N_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + i\gamma_k \omega}$$

式中 q_e — 电子电量; m — 电子质量; N_k — 单位体积内的电子密度; ω_k — 染料分子的第 k 级共鸣频率; γ_k — 由光学吸收造成的第 k 级衰减系数; i — 虚根。

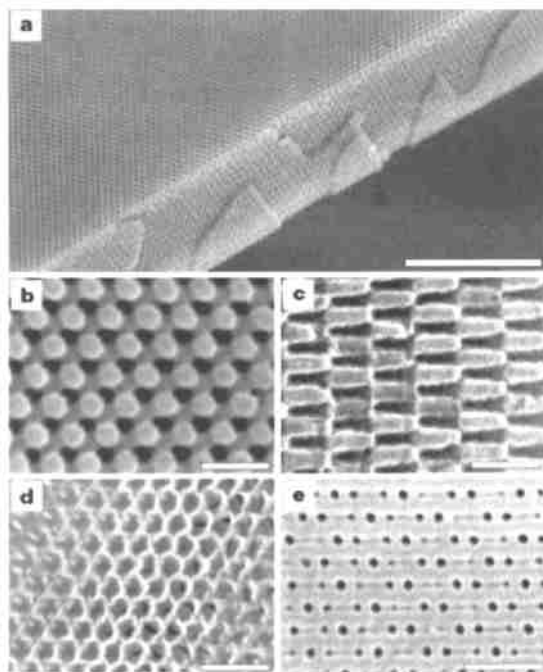


图7 全息印刷法制得的光子晶体 SEM 照片

从上式可以看出, 在频率 ω 达到任意一个共鸣频率时, 折射率都会显著增大, 从而使禁带宽度大大增加。

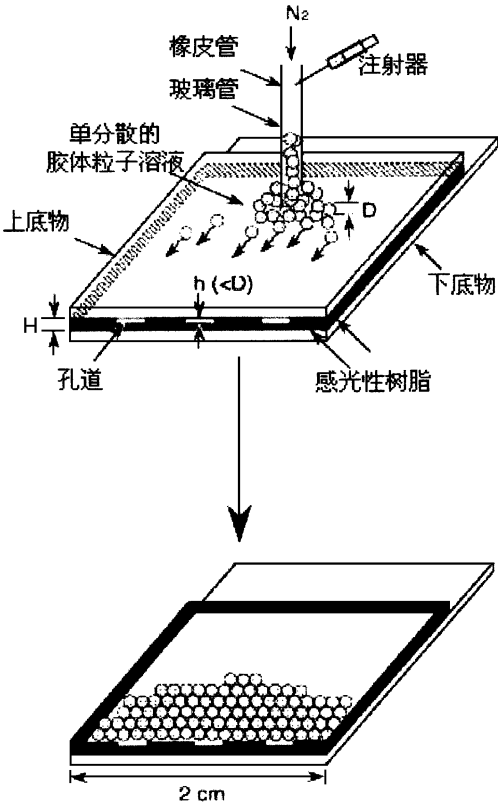


图 8 一种新的胶体粒子法制作光子晶体的方法示意图

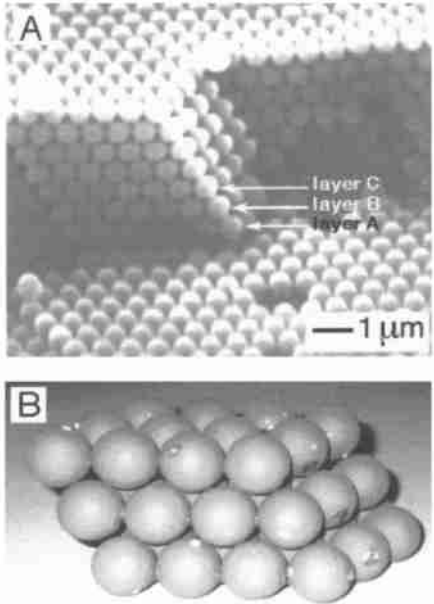


图 9 (A) 聚苯乙烯胶粒堆积成的光子晶体结构图中可看出明显呈现立方密堆积结构。(B) 立方密堆积的硬球模型照片, 可与(A) 参照。

4 展望

由于光子晶体的优良性能, 近几年关于它的研究非常之多。但由于现在的制作技术只能制作出小尺寸的光子晶体, 而且制作时间比较长。所以最近一段光子晶体的应用都在一些小尺寸的应用, 比如光子晶体二极管^[20]、光开关、光子晶体谐振腔^[21]等。如果能够再缩短制作周期, 制作出更大尺寸的光子晶体, 并且提高光子晶体高低介质的介电常数(折射率)之比, 光子晶体将在不久的将来取代大多数传统光学器件而引起的光学、光电子学、信息科学中的一场革命。

参考文献:

[1] Joannopoulos J D, Pierre R, Villeneuve & Shanhui Fan. Nature, 1997, 386; 143 ~ 149.
[2] Yablonovitch E. Phys Rev Lett, 1987, 58; 2059 ~ 2062.
[3] Lin S Y, Chow E, Hietala V, Villeneuve P R, Joannopoulos J D. Science, 1998, 282; 274 ~ 276.
[4] Knight J C, Broeng J, Birks T A, Russell P St J. Science, 1998, 282; 1476 ~ 1478.
[5] Knight J C, Birks T A, Russell P St J. Optics Lett, 1996, 21, 1547 ~ 1549.

(下转第 73 页)

heat resistance, radiation resistance, etc.. In this article, the preparation of polyimide fibers by wet spinning technology including one-step and two-step process and fusible-spinning technology and the properties of the fibers are reviewed.

Key words: Polyimide; High performance fibers; High strength; High modulus; Spinning technology

(上接第 65 页)

- [6] 南京大学化学系等编. 物理化学词典, 北京: 科学出版社, 1988, 407.
- [7] Albota M, Beljonne D, Bredas J L, et al. Science, 1998, 281: 1653 ~ 1656.
- [8] Cumpston B H, Ananthavel S P, Barlow S, et al. Nature, 1999, 398: 51 ~ 54.
- [9] Borisov R A, Donjkin G N, et al. Laser Phys, 1998, 8: 1105 ~ 1108.
- [10] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G. & Turberfield A J. Nature, 2000, 404: 53 ~ 56.
- [11] Tarhan I I, Watson G H, Lett, 1996, 76: 315 ~ 318.
- [12] Miguez H, Meseguer F, et al. Adv Mater, 1998, 10: 480 ~ 483.
- [13] Vos W L, Sprik R, Van Blaaderen A, Imhof A, et al. Phys Rev B, 1996, 53: 16231 ~ 16235.
- [14] Flaugh P L, O' Donnell S E, Asher S A. Appl Spectrosc, 1984, 38: 847 ~ 850.
- [15] Miguez H, Meseguer G, et al. Langmuir, 1997, 13: 6009 ~ 6011.
- [16] Murray C A, Grier D G. Amer Scientist, 1995, 83: 238 ~ 245.
- [17] Van Blaaderen A, Ruel R, Wiltzius P. Nature, 1997, 385: 321 ~ 324.
- [18] Xia Y, Gates B, Park S H. J Lightwave Tech, 1999, 17: 1956 ~ 1962.
- [19] Park S H, Gates B, Xia Y. Adv Mater, 1999, 11: 462 ~ 466.
- [20] Hirayama H, Hamano T, Aoyagi Y. Appl Phys Lett, 1996, 69: 791 ~ 793.
- [21] Meade R D, Devenyi A, Joannopoulos J D. J Appl Phys, 1994, 75: 4753 ~ 4755.

The Research Progress of Photonic Crystals

ZHAO Hui, ZHANG Qi-jin

(Department of polymer Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Photonic crystal is a new concept and a class of new material noticed in recent decade. A brief description of unique features of photonic crystal is given in this paper. The fabrication of photonic crystals are described, especially the polymer photonic crystals.

Key words: Photonic crystal; Periodic structure; Dielectric material; Photonic band gap