

光子晶体制备技术和应用研究进展

倪培根[†]

(国家自然科学基金委员会数学物理科学部物理科学一处, 北京 100085)

(2009 年 4 月 2 日收到, 2009 年 5 月 11 日收到修改稿)

从光子晶体概念的提出到现在已经过了 20 余年, 光子晶体不仅成为微纳光学和量子光学的重要研究领域, 而且在信息光学以及其他多个学科中得到广泛应用. 本文重点综述了光子晶体的制备工艺, 尤其是二维光子晶体和三维光子晶体的制备工艺进展, 同时也综述了光子晶体的应用研究的进展, 在此基础上, 提出了一些光子晶体研究的展望.

关键词: 光子晶体, 光子带隙, 人工微结构

PACC: 4270Q, 4225B

1. 引 言

自 John 和 Yablonovitch 提出光子晶体的概念以来^[1, 2], 对光子晶体的研究已经开展了 20 余年. 由于光子晶体在集成光电子学、量子光学等领域的重要应用前景, 而得到科研人员愈来愈广泛而深入地研究. 光子晶体是介质的周期排列而构成的一种人工微结构材料, 由于电磁波在其中的传播可以用类似于电子在半导体中传播的能带理论来描述, 故而得光子晶体之名, 以此表明光子之晶体与电子之晶体(半导体)的区别与联系. 光子晶体被认为是控制光子(电磁波)传播的行之有效的工具, 光子晶体的典型特点是具有光子带隙. 当物质的自发辐射频率处在光子带隙内时, 它可以用于抑制光子晶体内的物质的自发辐射. 同时, 当在光子晶体内引入缺陷时, 如果物质的自发辐射频率和缺陷模的频率一致, 又可用于增强物质的自发辐射, 而且这种自发辐射有类似于受激辐射的特性. 光子晶体可以用于制备超高品质因子的微腔, 用于研究腔量子电动力学效应, 是量子通讯和量子信息处理的有力工具. 由于光子晶体诸多的优异特性, 人们对光子晶体的制备工艺做了大量的研究, 提出了光子晶体的各种可能应用, 同时也发现了光子晶体的一些新特性. 本文主要目的是回顾光子晶体的制备工艺的发展和相关的应用研究进展. 在此基础上, 探讨光子晶体制备和应用研

究的可能发展方向. 本文分为三部分内容进行叙述: 光子晶体的制备研究进展; 光子晶体的应用研究进展; 光子晶体制备研究的可能突破和光子晶体应用的关键. 由于光子晶体的研究涉及范围太过广泛, 本文仅限于在光子晶体的制备和一些相关应用的综述上, 光子晶体光纤已自成一个重要应用方向, 其物理机理明确, 技术性强, 所以本文未考虑该方向.

2. 光子晶体的制备工艺

光子晶体具有的巨大应用前景已被人们广泛认识, 所以作为光子晶体得以应用的必要条件——光子晶体的制备工艺得到世界上众多研究人员的深入研究. 从光子晶体的维数来说, 光子晶体的制备可以分为一维光子晶体的制备, 二维光子晶体的制备和三维光子晶体的制备. 由于一维光子晶体的制备可以用非常成熟的各种镀膜工艺来实现, 所以这里我们主要关注二维和三维光子晶体的制备.

2.1. 二维光子晶体的制备进展

在二维光子晶体的制备工艺研究中, 对于微波区的光子晶体, 可以用一根一根的电介质圆柱(直径数个毫米)来构成一个光子晶体, 制备工艺相对比较简单. 但是, 当光波长小到几个微米和亚微米时, 即可见光区和近红外区光子晶体的制备就非常困难. 即使如此, 研究人员充分利用各种纳米制备技术, 尤

[†] E-mail: nipeg@nsfc.gov.cn

其是借鉴成熟的半导体加工工艺技术,制备工作在可见光区和近红外区的光子晶体,比如 Wendt 等人在 1993 年利用电子束直写和反应离子束刻蚀方法在 GaAs 基片上制备了二维 AlGaAs 薄膜(平板)光子晶体^[3].首先他们利用电子束直写的单点曝光技术(single-spot exposure)在电子胶上定义了二维光子晶体结构图形,经过显影,得到在电子胶上的二维图形.然后利用反应离子束刻蚀技术将图形最终转移到 AlGaAs 薄膜上,这种技术的好处是可以大大节省电子束直写系统定义图形的时间,和多点曝光技术(现在通常所用的技术)相比,大约只需要多点曝光技术所使用时间的十分之一的的时间,甚至更少^[4].但是单点曝光技术有一个缺点是不能进行曝光量的修正(proximity effect)如果能够克服这一点,单点曝光技术应该更有前途. Krauss 等人利用多点曝光技术和反应离子束刻蚀技术制备了 GaAs 基光子晶体(如图 1 所示)^[5].之后,大部分光子晶体微腔的制备都是基于相类似的技术^[6-9].除了利用电子束直写方法定义光子晶体,有人也发展了利用深紫外曝光技术来复制二维光子晶体,再利用反应离子束刻蚀技术将图形转移到光子晶体层^[10,11].另外,多光束相干技术也被用来制备二维光子晶体的图形^[12],其制备光路如图 2 所示.

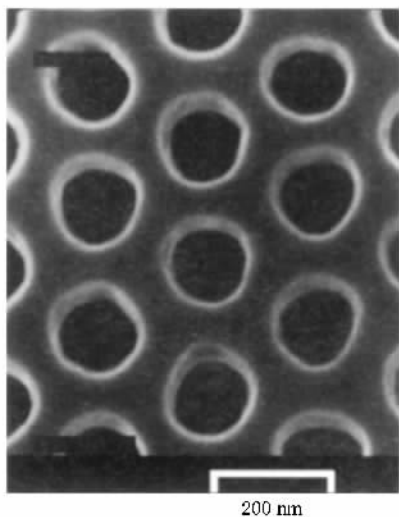
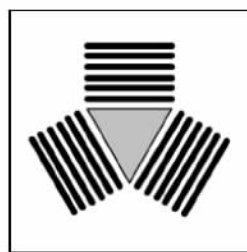
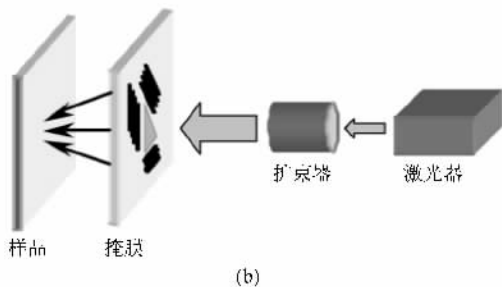


图 1 利用多点曝光技术制备的二维 GaAs 光子晶体

除了利用电子束、深紫外光和多光束相干技术,同时辅以反应离子束刻蚀工艺制备二维光子晶体外,有些科学家也利用电化学方法刻蚀微孔,从而得到二维光子晶体,比如阳极氧化铝通过电化学方法腐蚀而得到大纵横比周期的微孔^[13,14];又如在光照



(a)



(b)

图 2 利用三光束制备而为光子晶体的光路 (a)三个光栅构成的衍射模版 (b)产生三角形图案的光路设置

条件下,在 n 型硅 110 表面通过氟化氢溶液的腐蚀而得到的大纵横比的微孔,所制备的光子晶体微结构如图 3 所示^[15].除了阳极氧化铝方法外,利用液体腐蚀方法通常只能制备孔径比较大的二维光子晶体,该类光子晶体的光子带隙波长基本处在 10—30 μm 区间.

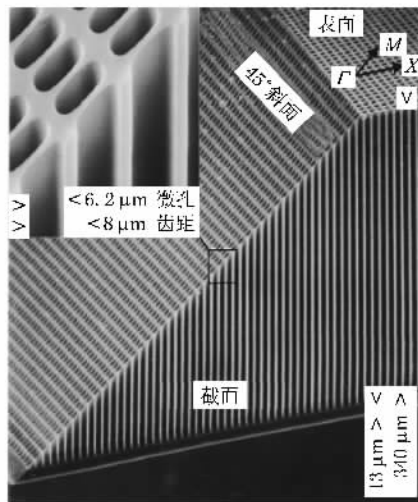


图 3 利用多孔硅制备工艺的二维光子晶体

光子晶体微结构的均匀性直接关系到光子晶体的物理性质,当前制备工艺需要克服的一个重要困难是如何制备出孔径完全一致的光子晶体.微孔的轻微差别,就有可能引起谐振频率的改变,而使器件

的功能失效,尤其是对于密集波分复用器件,其频率间隔是 100 GHz,也就是 0.67 nm 的波长间隔.在一个二维平板 GaAs 光子晶体中,对于去掉一个微孔所形成的微腔,如果要使微腔波长的偏差小于 0.67 nm,那么围绕微腔的微孔的直径偏差应近似小于 $\Delta d = \Delta\lambda/4n \approx 0.05 \text{ nm}^{[16]}$,这对制备工艺来说是一个相当高的要求.如何克服制备工艺上的限制和光子晶体实际应用所需精度的矛盾,将是未来光子晶体能够进一步走向应用的关键.

2.2. 三维光子晶体的制备工艺

具有完全带隙的三维光子晶体可以在空间所有方向上对光子的传播进行调制,所以是光子晶体发展的重中之重,是光子晶体研究中的难点.对原子自发辐射的抑制和制备高 Q 微腔是三维光子晶体发挥其主要性能的关键体现.因而世界上许多研究组致力于三维光子晶体制备方法和工艺的研究.和二维光子晶体的制备比较而言,三维光子晶体的可控制备要困难得多.从光子晶体概念提出以来,广大科研工作者就开始通过自组装等方法进行三维光子晶体的制备,经过 20 多年的努力,三维光子晶体的制备工艺也得到了长足的发展.总的来说,已知的三维光子晶体的主要制备方法有:蘸笔纳米光刻术(dip-pen nanolithography method),胶体微球自组装方法,多光束相干,相位光栅,多光子聚合方法,掠角度沉积技术(glancing angle deposition),自克隆技术(autocloning technology),电子束直写和反应离子束刻蚀的联用等.

微球自组装方法是最早用于制备三维光子晶体的方法.利用单分散的聚苯乙烯或二氧化硅微球在水或酒精等溶液中可以自组装成具有面心立方结构周期排列的胶体光子晶体^[17,18].但是,这种在液体中的胶体光子晶体具有很大的不可控性和不稳定性,很难在实际应用中发挥作用.于是该生长方法得到进一步拓展,发展到微球在重力作用下自然沉积,溶液挥发后,形成固态的三维光子晶体,也称之为 opal^[19-22].随着对胶体光子晶体的研究的深入,人们又提出可以利用液体的表面张力,将波片垂直插入胶体溶液中,通过控制温度、湿度,随着胶体悬浮溶液中溶剂的蒸发,在波片的表面就自然形成了沿(111)方向周期排列的面心立方光子晶体^[23].而 Xia 等人也提出可以通过对溶液施加一定的压力,使胶体溶液中的溶剂在高于外界大气压的压力驱动下沿

样品池底的尺度小于微球的微通道流出,样品池中的微球就形成周期排列的三维光子晶体^[24].当时,所有的三维胶体光子晶体的晶面都是沿(111)方向,而对于(111)方向的晶格结构,可能构成面心立方,也可能构成六角密堆结构,或者是无规密堆结构.在实验中沿(111)方向的面心立方结构是最稳定的,但是在存在外界微扰的情况下,有可能引起面缺陷,引入六角密堆结构或无规密堆结构.为克服这个问题,利用模版法制备晶向为(100)方向的胶体面心立方光子晶体方法被提出^[25].随后, Xia 等人利用这种方法制备出了晶向在(100)方向的光子晶体^[26,27],同时许多研究者提出了不少模版法制备(100)晶向光子晶体的方法^[28-31].进一步, Jin 等人在利用模版法制备了(100)晶向的光子晶体.利用这种方法可以制备出无缺陷和裂缝的(100)晶向的面心光子晶体,但是其结构是非密堆结构^[32].利用纳米微球在溶液中的胶体自组装方法制备光子晶体的时间一般比较长,通常需要多天甚至十多天时间, Meng 等人发展了一种在低真空和红外加热的辅助作用下的胶体自组装方法,这种方法可以大大地缩短晶体生长的时间^[33].微球构成的面心立方结构光子晶体由于折射率不够大,所以不具有完全光子带隙,只有当反演成空气球构成的反结构时,才可能在第 8 和第 9 光子带之间出现光子带隙^[34],相应的反演方法,比如利用化学气相沉积和原子层沉积方法也被成功的发展起来.至今,利用这种方法已成功地制备了工作在近红外区的存在完全光子带隙的三维光子晶体,比如硅基反 opal 光子晶体^[35,36],如图 4 所示.这种微球构成的光子晶体即使反演成空气球形成的光子晶体,其高折射率介质的折射率必须大于 2.9 才能出现完全光子带隙.与此同时,有科学家提出利用 opal 制备微球和圆柱构成的光子晶体^[37],但是制备高质量的具有完全带隙的反演光子晶体并不容易,到目前为止,仍没有能利用这种方法制备出在可见光区具有完全光子带隙的三维光子晶体.为了在三维光子晶体中引入人为的缺陷,利用双光子刻蚀的方法在胶体光子晶体中写入缺陷的方法被提出^[38-40].同时通过不同的途径(双光子激光直写或刻蚀和沉积的过程)已制成面波导、线波导和点缺陷等缺陷.

电子束直写、反应离子束刻蚀、气相沉积、表面抛光和湿法刻蚀的联用,可以用来制备三维光子晶体.利用这种方法可以制备出相应的带有特定缺陷

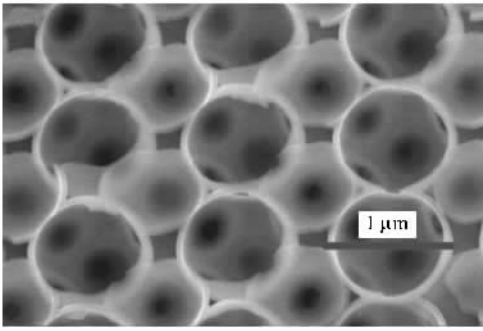


图 4 制备的硅基反 opal 的扫描电镜图

的三维光子晶体. 这种方法最早被用来制备光子带隙在近红外的光子晶体, Lin 小组首先制备了 woodpile 结构的光子晶体^[41], 但是由于这种方法需要及其昂贵的设备, 并且需要多次的电子束直写, 即每一层都需要进行一个循环, 所以加工非常费时, 而且中间的每一步出错都会使以前的努力付之流水, 世界上只有少数几家实验室在从事这方面的研究^[42]. 由于当前制备工艺上的限制, 这种工艺也不容易制备出带隙在可见光区的光子晶体. 虽然如此, Qi 等人进一步提出改进的制备方法, 提高了制备速度和效率^[43], 其制备的光子晶体工艺流程图和制备的光子晶体如图 5 所示.

为了制备三维光子晶体, 科学家也发展了许多新的制备工艺. 多光束相干全息也是一种比较好的制备方法^[44-45], 通过多光束相干可以形成几乎所有的晶格类型, 比如面心立方, 金刚石结构, 体心立方等等, 所有这些晶格都能通过调整各个光束的相位和偏振而得到. 但是受所用的激光束波长的限制, 目前仍然不能制备完全光子带隙在可见光区的三维光子晶体. 由于多个光束的调整非常不方便, 所以有两种相对简便的方法得到了发展: 利用相位光栅或者多面棱镜构造多个光束的相干, 从而减少各个光束之间相对相位和偏振控制的问题^[46-51], 通过相位调制器动态构造多个光束的方法更方便^[52]. 多个光束的相干可以形成周期和准周期结构, 但是如果要有特定的波导, 那么就on得通过直写的方法. 科研工作者也发现多光子聚合过程可以用来在空间某个特定位置引入缺陷, 甚至可以制备光子晶体结构^[53, 54]. 利用多光子聚合效应已在 SU8 光敏胶上定义了搭积木型光子晶体, 并通过反演将其转变成硅基光子晶体, 在 1.5 μm 处出现了完全光子带隙^[55, 56], 其制备的光子晶体如图 6 所示. 进一步, 在无机光敏介质 As₂S₃ 上也制备了搭积木型的光子晶体^[57]. 不仅仅是搭积木型的光子晶体, 利用双光子吸收方法也制备出了螺旋型的光子晶体结构^[58].

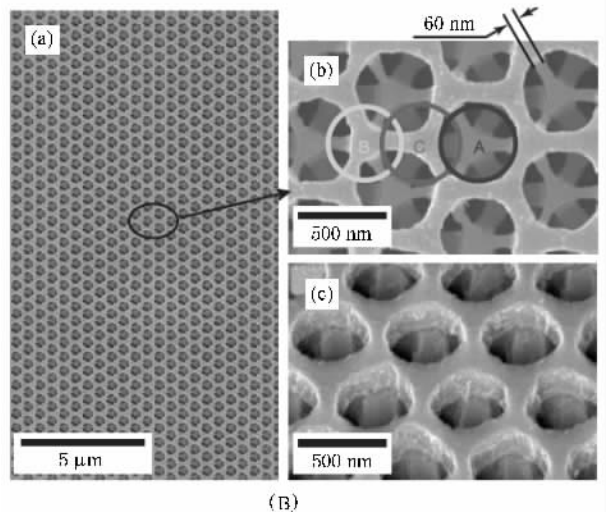
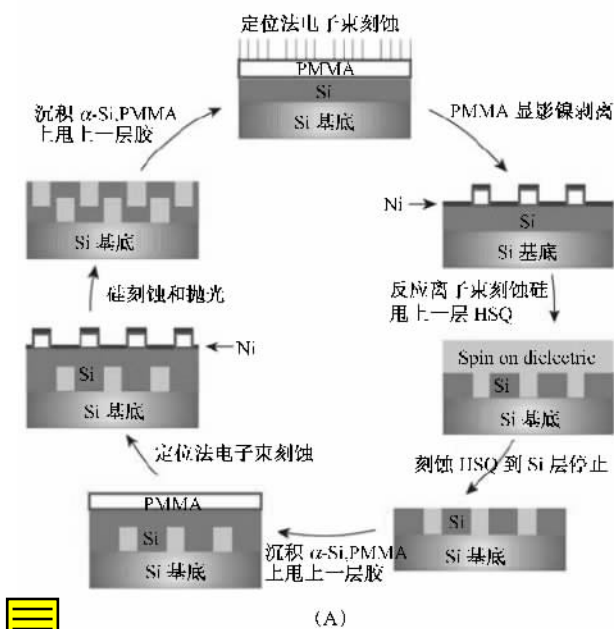


图 5 (A) 一种利用电子束刻蚀制备三维光子晶体的流程图 (B) (a) 制备的光子晶体的扫描电镜图 (b) 和 (c) 是光子晶体的高倍扫描电镜图

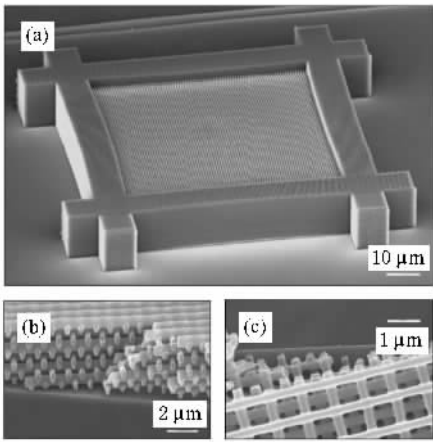


图 6 (a)利用双光子聚合技术所制备的三维光子晶体 (b)和 (c)是光子晶体的某个方向的截面

蘸笔纳米光刻术(dip-pen nanolithography method or ink deposition)也被用来制备搭积木型等三维光子

晶体^[59,60].其原理是利用计算机控制高浓度的聚合(高分子)电解质墨水流过毛细玻璃管喷口(直径 1 μm 或更细),在一个凝结物的存储池里迅速凝固,可以直接刻写任意设计形状和功能的三维周期性微结构,如图 7 所示,这是一搭积木结构的三维光子晶体^[61].

掠角度沉积技术(glancing angle deposition)也可以用来制备三维光子晶体,Kennedy 等用掠射角沉积法获得了螺旋型三维光子晶体^[62].这种沉积技术的原理是利用一个准直的蒸发源与样品表面法向成 80°至近 90°的入射角照射到具有模板的样品上,由于样品表面的图形,使得只有图形中的高点部分能接受沉积源的照射而生长,而照射不到的部分(在阴影里的部分)不能生长,然后再按一定的规律转动 α 和 φ 角(如图 8 所示),就得到相应的周期性螺旋型光子晶体.

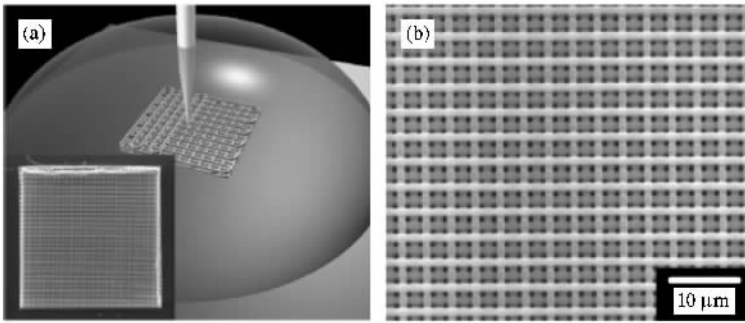


图 7 (a)制备三维光子晶体的实验装置示意图 (b)制备的三维光子晶体的扫描电镜图

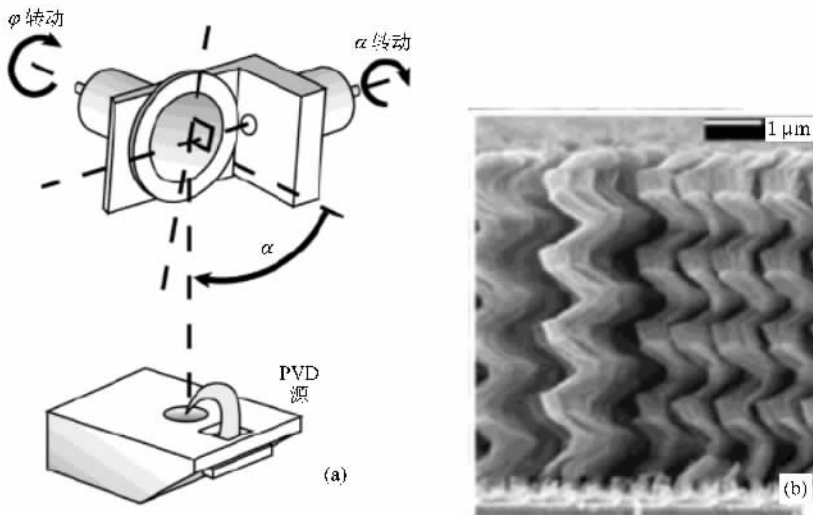


图 8 (a)掠角度沉积技术制备光子晶体的示意图 (b)制备的三维光子晶体的扫描电镜图

自克隆(autocloning)技术是 Kawashima 等采用的一种简单灵活的制备光子晶体的方法^[63,64],该方法是在溅射刻蚀和溅射沉积的基础上实现的.用干法刻蚀制作具有周期性的、成波浪状排列的基底,在适

当的条件下,在基底上堆叠薄膜,并保持薄膜的波浪形状与基底上的相同.当重复堆叠具有不同折射率的两种介质膜,则很容易获得多维周期性结构的光子晶体,如图 9 所示.

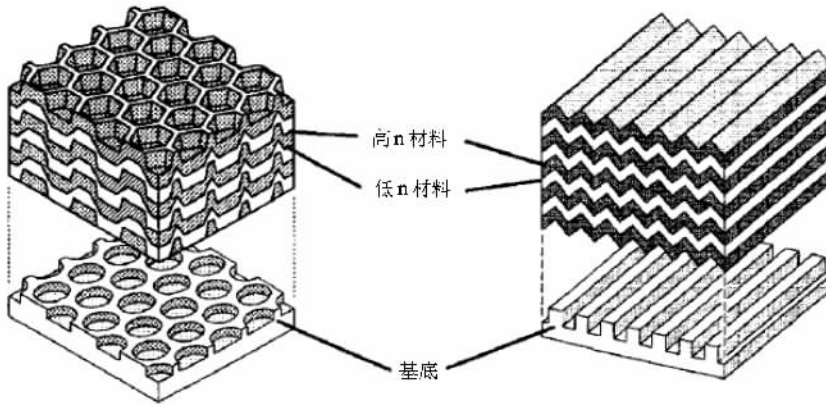


图 9 autocloning 法的制作原理图

从制备的工艺看,制备三维光子晶体的方法有使用“自上而下”的方法,也有用“自下而上”的方法,也有综合利用“自上而下”和“自下而上”相结合的方法.从总体上,多光束相干方法可以用于制备大尺寸的三维光子晶体,但是存在的问题是:由于所用光束的波长的限制,至今只能制备出在近红外区的存在完全光子带隙的光子晶体.而胶体自组合法可以制备任意晶格周期的光子晶体,但是由于这种光子晶体是面心立方结构,所以只有当折射率对比大于 2.9 时才能出现完全光子带隙,因此至今未见在可见光区存在完全光子带隙的光子晶体的报道.在这方面恰好是光子晶体应用的重要区域,所以如果能制备出在可见光区存在完全光子带隙的光子晶体,将会给该领域带来重要突破.

3. 光子晶体的应用

光子晶体概念从提出的那一天就和它巨大的潜在应用联系在一起.光子晶体由于其所特有的光子带隙能够抑制物质的自发辐射,可以用于全反射镜等.而引入的缺陷,可以形成缺陷模,这种缺陷模可以用作微腔、波导、光开关、激光器和探测器等等;同时即使在光子带隙外的区域,光子晶体独特的色散关系也可以应用到不同的领域,比如 superprism; superlens, delay line, collimator 等.总之,光子晶体的应用主要是在集成光电子学中,同时光子晶体也在其他方面有着重要的应用,比如可用于提高发光二极管的

发光效率.具有超高 Q 值的光子晶体微腔在量子点与微腔的相互作用研究中起着重要的作用^[65,66],它可能是量子计算和量子信息处理的载体.下面主要简要介绍光子晶体在集成光电子学上的应用.

当在光子晶体中去掉构成光子晶体的一个“原子”时,也就引入一个点缺陷.引入的点缺陷在光子带隙内引入一个缺陷模,进而构成了一个微腔,它可以用做滤波器和激光谐振腔等.Yablonovitch 提出并演示了这样的三维光子晶体缺陷实验^[67].随后人们发现引入各种各样的缺陷可以构成各种不同的功能器件,比如去掉一行构成光子晶体的“原子”而构成的光波导^[68],这种光波导可以使光转 90° 弯而只有非常小的损耗^[69,70],它可能是下一代集成光子芯片中的主要连接波导.点缺陷和波导的复合而构成的波分复用器件^[71],其中 Fan 等人提出的结构如图 10 所示.在这种结构中,上下载波导中间有两个全同的微腔,并且这两个微腔组合后,构成可以支持两个简并的微腔模,其中一个模式是奇模,而另一个模式是偶模,这样就能将处在微腔谐振频率上的光子从下载波导中耦合到下载波导中,而不干扰其他信号在上传波导中的传输.Noda 等人提出另一种波分复用形式,在平板光子晶体中,可以由微腔将波导中某一频率的光波耦合到波导的上方,而由光纤或透镜接收的^[72].而 Zhang 等人提出利用类似于低频滤波器形式的波分复用器件,可以实现无反射的波分复用器^[73].光束分束器^[74],Mach-Zender 干涉仪等也可以

通过各种波导和点缺陷构成^[75,76]. 光子晶体波导的特殊色散关系也可以用于延迟线(delay line)等^[77,78]. 而共振耦合微腔构成的波导可以形成 90° 或 60° 弯曲而无反射的弯波导^[79,80]. 如果在光子晶体带隙的中间引入一缺陷模(微腔模),即激光模式,这个模的上下都没有光子态存在,所以激发介质只能以这一激光模式产生受激辐射,从而大大提高了激光

器的效率^[81,82]. 总之,利用光子晶体的缺陷可构成的各种集成光学器件的核心元件,波导、微腔、延迟线、干涉仪、分束器和波分复用器等,因此无源光子线路可以在光子晶体上实现. 当在光子晶体中引入有源材料和非线性材料时,就可以构成光子晶体微腔激光器和光子晶体开关^[83-87],光子晶体的这些应用使它成为下一代集成光子光路的主要载体.

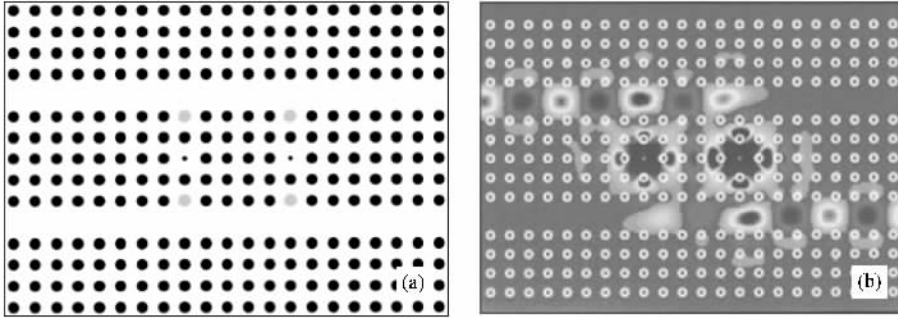


图 10 (a) Fan 等人提出的光子晶体波分复用结构 (b) 特定波长由上波导经微腔完全耦合到下波导,从而完成波分复用作用的电磁波模拟结果

光子晶体中存在的完全光子带隙可以抑制自发辐射,因此,它可以用来调控激发介质的辐射特性,比如利用来提高激光器和发光二极管的出光效率. 对于发光二极管, Fan 等人提出利用二维光子晶体提高发光二极管的发光效率的方法,认为处于二维光子晶体中的激发介质,当辐射光的频率在光子带隙内时,那么沿光子晶体平面的辐射光会被完全抑制,而垂直于光子晶体平面的方向,由于没有光子晶体的能隙的限制,所以大部分的辐射光将沿这一方向辐射,从而直接辐射出二极管. 没有光子晶体的时候,由于激发介质所在区域的折射率稍高于上下层介质的折射率,会在激发介质层形成波导,所以大部分的辐射光会被局限在这一区域,经传播从侧面辐射出去,降低了发光效率. 光子晶体的应用极大地提高发光二极管的出光效率^[88-91].

对光子晶体光子带隙特征的认识使得光子晶体拥有了广泛的潜在应用,而对光子带隙外的光子晶体特殊色散关系的深入认识,使得光子晶体具有更加广阔的用途. 如图 11 所示,对于一个典型的光子晶体的二维光子带结构,科学家从光子带结构中发现,在靠近光子带隙的地方,其中光子带的曲率变化非常快的地方,光子晶体的有效折射率随频率的变化非常快,所以这些地方就可以用作棱镜使用^[92-94]. 这种由光子晶体构成的棱镜由于具有极大

的折射率随频率的变化率,因而称之为超级棱镜. 而对于曲率接近于零靠近带隙的地方,由于折射率无穷大,光子的传输将被无限的延迟,可以用为延迟线或增加太阳能电池的转换效率等^[95]. 另外,在色散空间中,对于二维方形光子晶体而言,当频率处于一定的区间时,沿着某个方向,光子晶体的等频率线和这个方向垂直,这时就产生自准直效应,如图 12 所示. 这种自准直效应可以用于波导和分束器以及弯波导等等,极有可能在集成光路中得到应用^[96-98]. 另外光子晶体中也存在负折射效应,这种负折射效应可以用来成像和做透镜^[99-101],而且可以突破衍射极限. 光子晶体的应用经过近 20 年的理论和实验上的演示,已经有许多的用途,但是光子晶体本身就好像是一座超级宝藏,仍然有待进一步发掘.

除了在光电子学上的应用外,光子晶体也被认为可以提高各种探测器的性能. 由于光子晶体中有很多的纳米空隙,当组成光子晶体的物质对某一种气体敏感时,可以产生折射率的变化. 如果光子晶体中有一个对折射率变化很敏感的微腔,那么任何细微的变化,都可能引起光子晶体微腔的透过率的变化,从而感知周围介质中某种气体含量的变化^[102]. 在这个方面的工作有可能在环境、生物和人体探测器上得到应用.

光子晶体在量子信息处理也存在潜在的应用,

这种作用已发现可以改变量子点的自发辐射寿命，同时将产生 Rabi 劈裂现象，也是研究退相干和量子经典边界的工具^[103]。

4. 光子晶体的展望

经过 20 余年的发展，光子晶体理论的发展已经比较完善，光子晶体器件原理设计等方面已经取得了长足的进展。在光子晶体的制备上，尤其是二维光子晶体的制备上，科学家已经取得了巨大的突破；在三维光子晶体的制备上，也发展了多种制备方法。但是在制备工艺方面，仍然有许多关键性的挑战有待克服。比如，二维光子晶体制备误差的控制，这是光子晶体走向大规模应用的关键，因为对于高 Q 值的微腔，需要使得制备的精度达到亚纳米量级，这需要找到一个可行的解决方法。

对三维光子晶体而言，工作在可见光区具有完全带隙的光子晶体的制备仍然是一个挑战，至今未见报道。三维光子晶体是未来三维集成光子光路的基础，但是如何在三维光子晶体中引入缺陷等功能性模块仍然是一个比较棘手的问题，尤其是要按制备二维光子晶体一样的精度要求。所有这些，都是当前摆在广大科技工作者面前的一个巨大挑战，只有妥善解决，方能使光子晶体在集成光路的应用上得到体现。当然除了在集成光路上的应用、高 Q 微腔等少数问题需要克服之外，光子晶体也已在许多方面即将显现出得到应用的突破，比如光子晶体在光电二极管和太阳能电池等方面的应用。由于不需要很高的制备精度，极有可能在近几年内，采用光子晶体设计的光电二极管和太阳能电池进入市场。同时，利用光子晶体内的多孔特性，可能构成各种传感器，由于空隙内的介质变化，从而引起光学特性的变化，最终制成各种探测器。

光子晶体从诞生之日起，各种新现象、新性质被不断发现，从而衍生出一些新的研究方向。随着对光子晶体的深入研究，也许会进一步发掘出光子晶体可能具有的一些新性质。

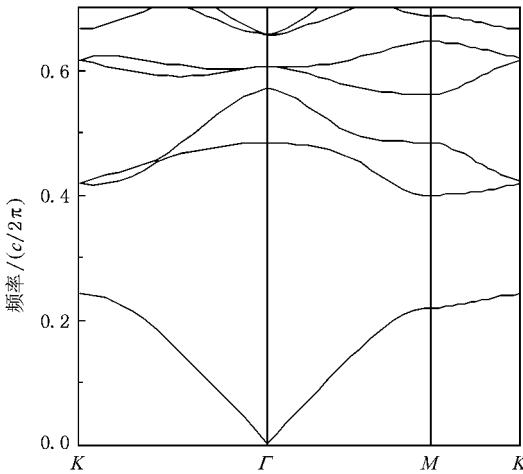


图 11 二维三角形光子晶体(空气圆柱在介电常数为 12.25 的电介质中的排列)的 TE 偏振波光子能带结构,其中空气柱的空空比为 0.55

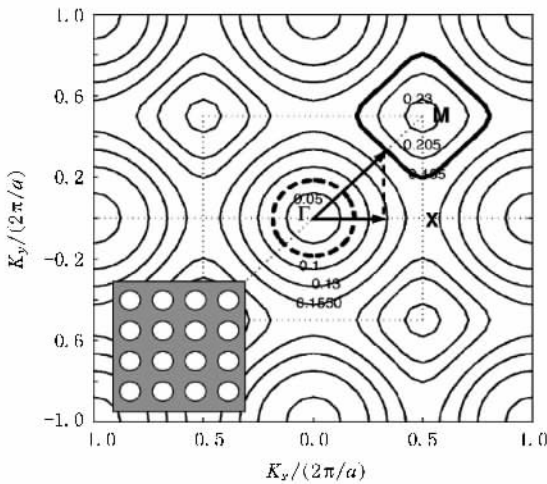


图 12 正方形光子晶体结构中的频率等位线。光子晶体是由空气柱在介电常数为 12 的电介质中排列而成，其中圆柱的半径为晶格常数的 0.35，如图中的插图所示。粗实线是 $f = 0.185(c/a)$ 的等位线，在这个频率附近出现自准直效应。粗虚线处表示的是类似于空气中的等位线

光子晶体的微腔可以做成 Purcell 系数非常大的超高 Q 值微腔，那么如果在光子晶体微腔中存在一个量子点，就有可能出现微腔与量子点的强相互作用。

[1] Yablonovitch E 1987 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 58 2059	[4] Kim S, Chong H, De La Rue R M, Marsh J H, Bryce A C 2003 <i>Nanotechnology</i> 14 1004
[2] John S 1987 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 58 2486	[5] Krauss T F, De La Rue R M, Brand S 1996 <i>Nature</i> 383 699
[3] Wendt J R, Vawter G A, Goulet P L, Brennan T M, Hammons B E 1993 <i>J. Vac. Sci. Technol.</i> 11 2637	[6] Imada M, Noda S, Chutinan A, Tokuda T, Murata M, Sasaki G

- 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 316
- [7] Faraon A , Englund D , Fushman I , Vučković J , Stoltz N , Petroff P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 213110
- [8] Englund D , Faraon A , Fushman I , Stoltz N , Petroff P , Vuković J 2007 *Nature* **450** 857
- [9] Loncar M , Nedeljkovic D , Pearsall T P , Vuckovic J , Scherer A , Kuchinsky S , Allan D C 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1689
- [10] O'Brien D , Settle M D , Karle T , Michaeli A , Salib M , Krauss T F 2007 *Opt. Exp.* **15** 1228
- [11] Bogaerts W W V , Taillaert D , Beekx S , Luyssaert B , Bienstman P , Baets R 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Elect.* **8** 928
- [12] Divliansky I B , Shishido A , Khoo I C , Khoo I C , Mayer T S , Pena D , Nishimura S , Keating C D , Mallouk T E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3392
- [13] Chelnokov A , David S , Wang K , Marty F , Lourtioz J M 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Elect.* **8** 919
- [14] Lee W , Ji R , Gosele U , Nielsch K 2006 *Nature Mater.* **5** 741
- [15] Grüning U , Lehmann V , Engelhardt C M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 3254
- [16] Krauss T F , De La Rue R M 1999 *Prog. Quant. Elect.* **23** 51
- [17] Mei D B , Li H Q , Cheng B Y , Li Z L , Zhang D Z , Dong P 1998 *Phys. Rev. B* **58** 35
- [18] Burns M M , Fournier J M , Golovchenko J A 1990 *Science* **249** 749
- [19] Miguez H , Meseguer F , Lopez C , Mifsud A , Moya JS , Vazquez L 1997 *Langmuir* **13** 6009
- [20] Vlasov Y A , Bo X Z , Strum J C , Norris D J 2001 *Nature* **414** 289
- [21] Kitaev V , Ozin G A 2003 *Adv. Mater.* **15** 75
- [22] Cheng B Y , Ni P G , Jin C J , Li Z L , Zhang D Z 1999 *Opt. Commun.* **170** 41
- [23] Jiang P , Bertone J F , Hwang K S , Colvin V L 1999 *Chem. Mater.* **11** 2132
- [24] Xia Y , Gates B , Yin Y , Lu Y 2000 *Adv. Mater.* **12** 693
- [25] van Blaaderen A , Ruel R , Wiltzius P 1997 *Nature* **385** 321
- [26] Yin Y D , Li Z Y , Xia Y N 2003 *Langmuir* **19** 622
- [27] Yin Y D , Xia Y N 2002 *Adv. Mater.* **14** 605
- [28] Ni P G , Dong P , Cheng B Y , Li X Y , Zhang D Z 2001 *Adv. Mater.* **13** 437
- [29] Lee W , Chan A , Bevan M A , Lewis J A , Braun P V 2004 *Langmuir* **20** 5262
- [30] Ozin G A , Yang S M 2001 *Adv. Funct. Mater.* **11** 95
- [31] Hoogenboom J P , Retif C , de Bres E , van de Boer M , van Langen-Suurling A K , Romijn J , van Blaaderen A 2004 *Nano Lett.* **4** 205
- [32] Jin C , McLachlan M A , McComb D W , De La Rue R M , Johnson N P 2005 *Nano Lett.* **5** 2646
- [33] Zheng Z Y , Gao K Y , Luo Y H , Li D M , Meng Q B , Wang Y R , Zhang D Z 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 9785
- [34] Sozuer H S , Haus J W , Inguva R 1992 *Phys. Rev. B* **45** 13962
- [35] Blanco A , Chomski E , Grabtchak S , Ibisate M , John S , Leonard S W , Lopez C , Meseguer F , Miguez H , Mondia J P , Ozin G A , Toader O , van Driel H M 2000 *Nature* **405** 437
- [36] Vlasov Y A , Bo X Z , Sturm J C , Sturm J C , Norris D J 2001 *Nature* **414** 289
- [37] Fenollosa R , Meseguer F 2003 *Adv. Mater.* **15** 1282
- [38] Tetreault N , Mihi A , Miguez H , Rodriguez I , Ozin G A , Meseguer F , Kitaev V 2004 *Adv. Mater.* **16** 346
- [39] Jun Y , Leatherdale C A , Norris D J 2005 *Adv. Mater.* **17** 1908
- [40] Tetreault N , Mihi A , Miguez H 2004 *Adv. Mater.* **16** 346
- [41] Lin S Y , Fleming J G , Hetherington D L , Smith B K , Biswas R , Ho K M , Sigalas M M , Zubrzycki W , Kurtz S R , Bur J 1998 *Nature* **394** 251
- [42] Noda S , Tomoda K , Yamamoto N , Chutinan A 2000 *Science* **289** 604
- [43] Qi M , Lidorikis E , Rakich P T , Johnson S G , Joannopoulos J D , Ippen E P , Smith H I 2004 *Nature* **429** 538
- [44] Campbell M , Sharp D N , Harrison M T , Denning R G , Turberfield A J 2000 *Nature* **404** 53
- [45] Zhong Y C , Zhu S A , Su H M , Wang H Z , Chen J M , Zeng Z H , Chen Y L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 061103
- [46] Miklyaev Y V , Meisel D C , Blanco A , von Freymann G , Busch K , Koch W , Enkrich C , Deubel M , Wegener M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1284
- [47] Wu L J , Zhong Y C , Chan C T , Wong K S , Wang G P 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241102
- [48] Shoji S , Kawata S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2668
- [49] Jeon S , Park J U , Cirelli R , Yang S , Heitzman C E , Braun P V , Kenis P J A , Rogers J A 2004 *PNAS* **101** 12428
- [50] Poole Z , Xu D , Chen K P , Olvera I , Ohlinger K , Lin Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 251101
- [51] Lin Y , Herman P R , Darnawikarta K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 071117
- [52] Xie X S , Li M , Guo J , Liang B , Wang Z X , Sinitskii A , Xiang Y , Zhou J Y 2007 *Opt. Exp.* **15** 7032
- [53] Jang J H , Ullal C K , Maldovan M , Gorishnyy T , Kooi S , Koh C , Thomas E L 2007 *Adv. Funct. Mater.* **17** 3027
- [54] Scrimgeour J , Sharp D N , Blanford C F , Roche O M , Denning R G , Turberfield A J 2006 *Adv. Mater.* **18** 1557
- [55] Sun H B , Matsuo S , Misawa H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 786
- [56] Deubel M , von Freymann G , Wegener M 2004 *Nature Mater.* **3** 444
- [57] Wong S , Deubel M , Pérez-Willard F , John S , Ozin G A , Wegener M , Freymann G V 2006 *Adv. Mater.* **18** 265
- [58] Seet K K , Mizeikis V , Matsuo S , Juodkazis S , Misawa H 2005 *Adv. Mater.* **17** 541
- [59] Gratson G M , Xu M , Lewis J A 2004 *Nature* **428** 386
- [60] Gratson G M , García-Santamaría F , Lousse V , Xu M , Fan S , Lewis J A , Braun P V 2006 *Adv. Mater.* **18** 461
- [61] Gratson G M , Lewis J A 2005 *Langmuir* **21** 457
- [62] Scott R K , Michael J B , Ovidiu T , John S 2002 *Nano Lett.* **2** 59
- [63] Kawashima T , Sato T , Miura K , Ohtera Y , Ishino N , Kawakami S 2001 *Nano. Lin. Non. Opt.* **560** 115
- [64] Sato T , Miura K , Ishino N , Ohtera Y , Tamamura T 2002 *Opt. Quant. Elec.* **34** 63
- [65] Badolato A , Hennessy K , Atature M , Dreiser J , Hu E , Petroff P M , Imamoglu A 2005 *Science* **305** 1158

- [66] Wang K , Zheng W H , Ren G , Du X Y , Xing M X , Chen L H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1730 (in Chinese) [王 科、郑婉华、任刚、杜晓宇、邢名欣、陈良惠 2008 *物理学报* **57** 1730]
- [67] Yablonoitch E , Gmitter T J , Meade R D , Rappe A M , Brommer K D , Joannopoulos J D 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3380
- [68] Meade R D , Devenyi A , Joannopoulos J D , Alerhand O L , Smith D A , Kash K 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 4753
- [69] Mekis A , Chen J C , Kurland I , Fan S , Villeneuve P R , Joannopoulos J D 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
- [70] Feng L J , Jiang H T , Li H Q , Zhang Y W , Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2102 (in Chinese) [冯立娟、江海涛、李宏强、张治文、陈 鸿 2005 *物理学报* **54** 2102]
- [71] Fan S , Villeneuve P R , Joannopoulos J D , Haus H A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 960
- [72] Imada M , Noda S , Chutinan A , Mochizuki M , Tanaka T 2002 *J. Light. Tech.* **20** 845
- [73] Jin C J , Han S Z , Meng X D , Cheng B Y , Zhang D Z 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 4771
- [74] Fan S H 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 162
- [75] Camargo E A , Chong H M H , Rue D L R M 2004 *Opt. Exp.* **12** 588
- [76] Liu C Y , Chen L W 2004 *Opt. Exp.* **12** 2616
- [77] Liu J , Shi B , Zhao D T , Wang X 2002 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4** 636
- [78] Gersen H , Karle T J , Engelen R J P , Bogaerts W , Korterik J P , Hulst van N F , Krauss T F , Kuipers L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 073903
- [79] Yariv A , Xu Y , Lee R K , Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [80] Jin C , Johnson N P , Chong H M H , Jugessur A , Day S , Gallacher D , Rue D L R M 2005 *Opt. Exp.* **13** 2295
- [81] Painter O , Lee R K , Scherer A , Yariv A , O'Brien J D , Dapkus P D , Kim I 1999 *Science* **284** 1819
- [82] Imada M , Noda S , Chutinan A , Tokuda T , Murata M , Sasaki G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 316
- [83] Meier M , Mekis A , Dodabalapur A , Timko A , Slusher R E , Joannopoulos J D , Nalamasu O 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 7
- [84] Yanik M F , Soljacic S F M , Joannopoulos J D 2003 *Opt. Exp.* **28** 2506
- [85] Mazurenko D A , Kerst R , Dijkhuis J I , Akimov A V , Golubev V G , Kurdyukov D A , Pevtsov A B , Sel'kin A V 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 213903
- [86] Hu X Y , Liu Y H , Tian J , Cheng B Y , Zhang D Z 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 121102
- [87] Camargo E A , Chong H M H , Rue D L R M 2004 *Opt. Exp.* **12** 588
- [88] Fan S , Villeneuve P R , Joannopoulos J D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3294
- [89] Byeon K , Hwang S , Lee H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 091106
- [90] Kim J , Kwon M , Lee K , Park S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181109
- [91] Wierer J J , David J A , Megens M M 2009 *Nature Photonics* **3** 163
- [92] Kosaka H , Kawashima T , Tomita A , Notomi M , Tamamura T , Sato T , Kawakami S 1998 *Phys. Rev. B* **58** 10096
- [93] Baba T , Nakamura M 2002 *IEEE J. Quant. Elect.* **38** 909
- [94] Wu L J , Mazilu M , Karle T , Krauss T F 2002 *IEEE J. Quant. Elect.* **38** 915
- [95] von Freymann G , John S , Wong S , Kitaev V , Ozin G A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 053108
- [96] Yu X F , Fan S H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3251
- [97] Kosaka H , Kawashima T , Tomita A , Notomi M , Tamamura T , Sato T , Kawakami S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1212
- [98] Witzens J , Loncar M , Scherer A 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Elect.* **8** 1246
- [99] Luo C Y , Johnson S G , Joannopoulos J D , Pendry J B 2003 *Phys. Rev. B* **68** 045115
- [100] Zhang X D 2005 *Phys. Rev. B* **71** 165116
- [101] Feng Z F , Zhang X D , Wang Y Q , Li Z Y , Cheng B Y , Zhang D Z 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 247402
- [102] Dorfner D F , Hurlmann T , Zabel T , Frandsen L H , Abstreiter G , Finley J J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 181103
- [103] Yoshie T , Scherer A , Hendrickson , Khitrova J G , Gibbs H M , Rupper G , Ell C , Shchekin O B , Deppe D G 2004 *Nature* **432** 200

Progress in the fabrication and application of photonic crystals

Ni Pei-Gen[†]

(*Department of Physical and Mathematical Sciences, NSFC, Beijing 100085, China*)

(Received 2 April 2009 ; revised manuscript received 11 May 2009)

Abstract

It has been over 20 years since the concept of photonic crystal was proposed. Photonic crystal is now an important part of nano/micro-optics and quantum optics, and is also applied in many fields, such as information optics etc. The paper is focused on the progress in the fabrication of photonic crystals, especially the fabrication of two-dimensional and three-dimensional photonics. Meanwhile, the application of the photonic crystal is also reviewed. Then some perspectives are proposed.

Keywords : photonic crystal, photonic bandgap, artificial structure

PACC : 4270Q, 4225B

[†] E-mail : nipg@nsfc.gov.cn