

光子晶体及二维光子晶体波导

崔乃迪^{1,2}, 梁静秋^{1,2}, 梁中翥^{1,2}, 周健伟^{1,2}, 寇婕婷^{1,2}, 王维彪^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 光子晶体是一种新兴的光学材料, 其各种优异的光学特性可以用来制作所需要的光子晶体器件。本文介绍了一维、二维、三维光子晶体的结构、特性及其主要的理论研究方法、实验制备方法, 并着重阐述了二维光子晶体波导的特性及其制备方法及国内外研究进展。

关键词: 光子晶体; 波导

中图分类号: O734; TN252

文献标识码: A

Photonic Crystals and 2-D Photonic Crystal Waveguides

CUI Nai-di^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1,2}, LIANG Zhong-zhu^{1,2}, ZHOU Jian-wei^{1,2}, KOU Jie-ting^{1,2}, WANG Wei-biao^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China)

Abstract: Photonic crystal is a kind of novel optical material. Photonic crystal has lots of special characteristics which can be used to fabricate photonic crystal devices. The structure, properties, main fabricated methods, and theory research methods of one dimensional, two dimensional and three dimensional photonic crystals are introduced in this paper. Especially, the characteristics, fabricated methods and research status at home and abroad are described.

Keywords: photonic crystals; waveguides

1 引言

20 世纪, 半导体的发现并应用引发了一场影响

深远的革命, 仅仅几十年的时间, 半导体已经深刻地改变了我们的生活, 我们日常生活中小到电话、电脑、电视机, 大到汽车、飞机、卫星等等都离不开

*国家自然科学基金资助项目 (60877031)

开半导体材料。半导体内部存在周期性势场,电子受到周期性势场的调制发生布拉格散射,形成能带结构,而带与带之间可能存在禁带,落入禁带中的电子则无法继续传播。

1987年,E. Yablonovich 和 S. John 分别提出了光子晶体的概念^[1-2],光子晶体是由不同介电常数的物质在空间周期性排列而形成的人工微结构。当电磁波通过光子晶体时,光子晶体中周期性排布的介电常数会对电磁波进行调制,从而产生光子能带,能带之间可能存在禁带。与半导体对比可以发现,在光子晶体中,周期性分布的介电常数起到了半导体中周期性势场的作用;同时,与电子禁带相对应的,也有光子禁带的存在。因此,有人又把光子晶体称为光半导体。光子晶体可以用于制作光子晶体偏振器件、光子晶体微波天线、光子晶体棱镜、光子晶体光纤、光子晶体波导等^[3-6],在光通信、光电集成等方面具有极其广阔的应用前景。

2 光子晶体

光子晶体按照其周期性排列方式可分为一维、二维和三维光子晶体,它们的介电常数分别在一维、二维和三维空间上周期性排列。其中一维光子晶体就是常见的多层膜结构;二维光子晶体是周期性排列的介质柱或空气孔;三维光子晶体中介电常数则在3个方向具有周期性。在实际应用中,二维光子晶体有着更广泛的前景,更受到人们的重视。

光子晶体具有高低折射率材料交替排列的周期性结构,可以对相应频率的电磁波进行调制,产生光子禁带。如果在3个方向上都存在周期结构,可以产生全方位的光子禁带;在全方位光子禁带中,与该禁带频率相对应的电磁波将被完全禁止传播。光子禁带是光子晶体的主要特性。光子晶体的另一个特性是光子局域,若光子晶体的周期结构被破坏,就会在光子禁带中产生缺陷态,与之频率相对应的光子就被局域在缺陷态中,偏离缺陷态就会被强烈散射。我们可以通过在光子晶体中引入缺陷,制造

缺陷态的方式来制作各种光子晶体功能器件。另外,光子晶体可以抑制自发辐射:若光子禁带频率与光子晶体中原子自发辐射频率相吻合,则该频率光子的态密度为零,自发辐射被抑制。光子禁带和光子局域现象的存在为人为控制光的传播提供了可能。

2.1 光子晶体研究的理论方法

光子晶体理论主要来自于成熟的电磁场和半导体理论。研究光子晶体的方法主要有平面波展开法(Plane wave expansion method, PWM)、时域有限差分法(Finite difference time domain, FDTD)、传输矩阵法(Transfer matrix method, TMN)等。

平面波展开法^[7-9]是光子晶体能带计算中比较完善、也是常用的方法之一,主要思想是将周期性介电常数 ϵ 和电磁场在倒格矢空间做傅里叶展开,将能带问题转化为本征方程问题。应用超原胞理论,平面波展开法可以应用到光子晶体缺陷本征模的计算中。平面波展开法简单、高效、准确,但对计算机要求相对较高,计算比较费时。

时域有限差分法:1966年,Kane S. Yee提出了后来被称为Yee氏网格(图1)的空间离散方式,对电磁场 E, H 分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式,每一个 E 或 H 场分量周围有4个 H 或 E 场分量环绕;应用这种离散方式将含时间变量的Maxwell旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进,求解空间电磁场的值^[10]。任一网格点的

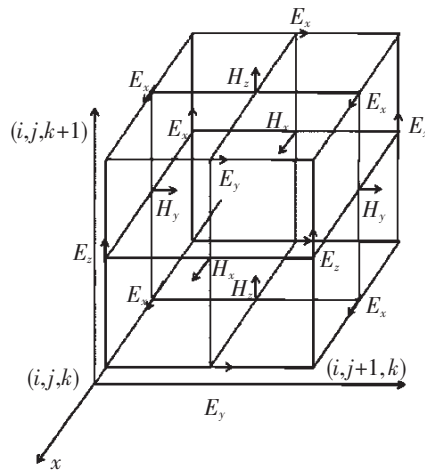


图1 Yee氏网格

电场或磁场只与其上个时间步的值及周围环绕它的磁场或电场分量有关。时域有限差分法源自电磁场的基本方程 Maxwell 方程, 因此, 只要设定相应的空间点及相应的参数, 就可以模拟各种复杂的电磁场问题。而且, 时域有限差分法占用存储空间小, 计算相对快, 适宜并行计算, 是光子晶体理论计算模拟最重要的方法之一。

传输矩阵法是将磁场在实空间的格点位置展开, 将 Maxwell 方程组转化成传输矩阵形式, 同样变成本征值求解问题。传输矩阵表示一层(面)格点的场强与紧邻的另一层(面)格点场强的关系, 它假设在构成的空间中在同一个格点层(面)上有相同的态和相同的频率, 这样可以利用 Maxwell 方程组将场从一个位置外推到整个晶体空间。这种方法对介电常数随频率变化的金属系统特别有效, 而且传输矩阵小, 矩阵元少, 运算量小, 同时在计算传输光谱时也十分方便。但是, 用该方法求解电磁场的分布较为麻烦, 效率不是很高; 因此, 对于光子晶体物理特性的理解没有太大的帮助^[11]。

在实际应用中, 还有如 N 阶法, 散射矩阵法, 多重散射法等, 但应用最多的还是平面波展开法和时域有限差分法。这些方法各有优缺点, 在实际计算中要根据实际情况进行选用。

另外, 光子晶体设计辅助软件也是光子晶体相关研究的主要工具, 例如 Rsoft 公司的 Bandsolve (主要模拟平面波展开法) 和 Fullwave (主要模拟时域有限差分法), Optiwave 公司的 OptiFDTD 等软件。计算机辅助软件的应用可以大大节省理论研究时间, 提高精度, 是光子晶体研究中十分有用的工具。

2.2 光子晶体的制备。

自然界中存在天然的光子晶体蛋白石、海老鼠毛发和蝴蝶翅膀。其斑斓的色彩并不是本身的颜色, 而是不同方向上有不同频率的光被散射。然而, 天然的光子晶体并不具备完整的三维的光子禁带。

用于制备光子晶体的主要材料有 - 族、- 族化合物, 半导体材料及其氧化物, 以及一些有

机材料和金属电介质结构等^[30]。

一维光子晶体相当于多层膜结构, 对于多层膜结构, 已经有较为成熟的薄膜制备工艺, 这里不再介绍。

现阶段研究较多的是二维光子晶体器件的制备, 相对于三维光子晶体, 其制作简单, 可以广泛应用于光通信、信息科学、光电集成等领域。微波、太赫兹波段的二维光子晶体器件可以使用精密机械加工的方法制备。对于通信及红外波段的二维光子晶体器件, 主要采用半导体工艺技术如刻蚀技术、半导体生长技术等方法制备。2002 年, Tetsuya Tada 使用电子回旋加速等离子体刻蚀技术制作了二维介质柱光子晶体波导^[12]。M. T. Todaro 等在 2003 年利用 GaAs/AlGaAs 外延生长光子晶体平板波导^[13]。

微波、太赫兹波段的三维光子晶体依然可以使用精密机械法制备, 世界上第一个具有全方位光子带隙的光子晶体就是由 Yablonovitch 等人于 1991 年使用精密机械钻孔的方法制作的面心立方结构三维光子晶体(图 2)^[14]。但要制作工作波段在红外甚至可见光的三维光子晶体结构, 精密机械方法在尺度及精度上都无法满足要求。于是, 层叠法、自组织法、介质棒堆积法及激光直写、激光全息等^[15-19]方法相继被人们提出并应用在三维光子晶体的制作上。然而, 要制作通信波段甚至可见光波段具有完全禁带的三维光子晶体, 以及在三维光子晶体中引入所需要的缺陷还比较困难。

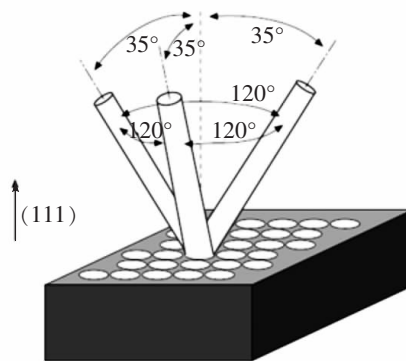


图 2 Yablonovitch 等人制作的三维光子晶体示意图

3 二维光子晶体波导

相对于三维光子晶体器件,从制作难度及实际应用的角度来讲,二维光子晶体更具实用价值。我们可以通过在完整的二维光子晶体中引入缺陷、破坏光子禁带、引入缺陷态,来制作二维光子晶体功能器件。在二维光子晶体中引入点缺陷可以用来制作激光谐振腔^[20],光子晶体激光谐振腔具有很高的态密度和品质因子,且体积比传统的谐振腔小得多,便于制作更小体积的激光器;若引入线缺陷^[12],那么相应频率的电磁波就只能在这个线缺陷中传播,离开线缺陷就会迅速衰减,这样可以通过在二维光子晶体中引入线缺陷来制作光子晶体波导。光子晶体光纤便是成功的例子,如图3(a)。

传统波导利用的是全内反射原理,当波导弯曲较大时,电磁波在其中的传播不再符合全反射原理,以至于弯曲损耗较大。而光子晶体波导采用的是不同方向缺陷模共振匹配原理,因而光子晶体波导不受转角限制,有着极小的弯曲损耗。理论上,当波导弯曲90°时,传统波导会有30%的损失,而光子晶体波导的损耗只有2%^[6]。另外,光子晶体波导的尺度可以做得很小,达到波长量级;因此,光子晶体波导不仅在光通信中有着十分重要的作用,在未来大规模光电集成、光子集成中也将具有极其重要的地位。

然而,由于光子晶体波导的尺寸和电磁波波长在同一量级,因此,要制作可见光波导在工艺上还有很大难度。而通信波段光子晶体波导器件应用广

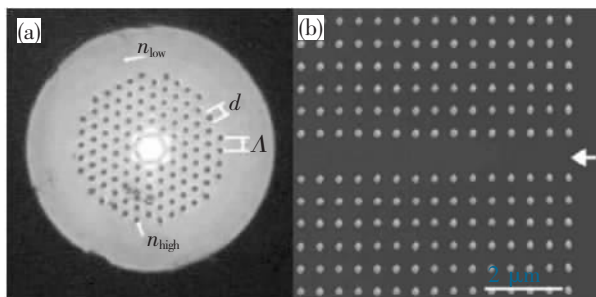


图3 二维光子晶体中的缺陷:(a)引入了点缺陷的光子晶体光纤;(b)引入了线缺陷的光子晶体波导结构。

泛,且工艺相对简单,易于控制,因而制作通信波段光子晶体波导成为光子晶体波导的热点方向。

要制作光子晶体波导器件就要在完美的光子晶体中引入线缺陷,线缺陷可分为介电常数异常型和结构异常型。介电常数异常型线缺陷主要是缺陷位置被替换其他介电常数物质,如将空气孔型光子晶体中的一排或者几排填充,或把介质柱型光子晶体中的一排或者几排替代为其他介质。其中介质柱的缺失也可以认为是被空气替代,故也归为介电常数异常型缺陷。而结构异常型缺陷主要是指介质柱或空气孔截面的变化,如半径或形状的变化。图4是二维三角晶格空气孔型光子晶体波导的波导频带宽度和波导中心频率随半径变化的模拟曲线^[21]。该结构是介电常数为10.5的材料上半径为0.36 μm的三角晶格结构,在TE极化下,半径改变越大,波导频带宽度越宽;而波导中心频率以0.36 μm为分界线,在0.36 μm两侧均随半径增大而向高频移动。故空气孔或介质柱缺失的线缺陷会比半径变化带来更宽的波导频带宽度,同时波导的中心频率也会提高,即晶格常数相同时,中心波长会变大。因此,根据

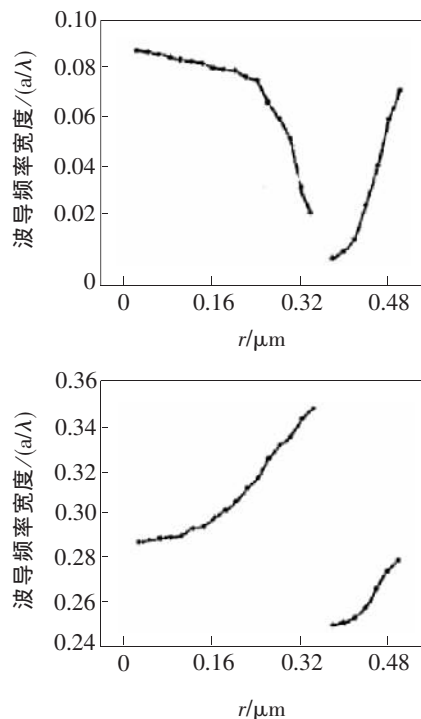


图4 波导频带宽度、中心频率随半径的变化图

实际情况合理地引入缺陷对光子晶体波导的制作有着至关重要的作用。

光子晶体波导按照其传输模式可以分为单模波导和多模波导。为了达到单模传输的目的,采用较多的方法是对已经制作好的二维光子晶体结构引入单排的线缺陷,故也称为 W1 型波导。W1 型波导虽能单模传输,但想把电磁波从光纤引入到波导中比较困难,且 W1 对工艺要求比较高,形貌误差即侧壁粗糙度过大都会造成较大的散射及模式转换。图 5 为日本 Tetsuya Tada 等人在硅基底上刻蚀制作的 W1 型二维正方晶格介质柱波导^[12]。其中图 5(a)是介电常数异常型线缺陷,即单排介质柱缺失。图 5(b)是结构异常型线缺陷,即单排介质柱半径异常(异常介质柱直径为 60 nm)。图 5 中晶格常数 $a=490$ nm,介质柱直径 $D=120$ nm,介质柱高 $h=1\ 200$ nm,中心波长 980 nm。光子晶体波导结构上下分别涂覆银层以达到更好的通光效率。图 5(c)为两种类型波导在

935 nm 波长下的测试图,其中左侧的光斑是激光通过图 5(a)型波导形成的,右侧是激光通过图 5(b)型波导形成的光斑。图 5(d)为该结构波导的透射谱,可见在光子缺陷波长上(935 nm)透射明显。然而,通过波导的强度并不高,这主要是因为波导宽度仅为 1 μm ,衍射明显;另外,使电磁波耦合进 W1 型波导比较困难,会有较大的损耗,这也是 W1 型波导面临的主要问题。

二维光子晶体中引入多排的缺陷,通常可以对二维空气孔中的三排进行填充或对介质柱中的三排缺失,可以制成 W3 型波导。与 W1 型波导相比, W3 型更容易把光耦合进入波导内,且降低了对制作工艺的要求。图 6(a)是中科院物理所韩守振等人在 SOI 上刻蚀制作的 W3 型二维三角晶格空气孔光子晶体波导^[22],并进行了传光效率测试。该波导结构是在二维三角晶格空气孔结构中除去了三排空气孔,为了提高耦合效率,特别制作了引入和引出脊型波

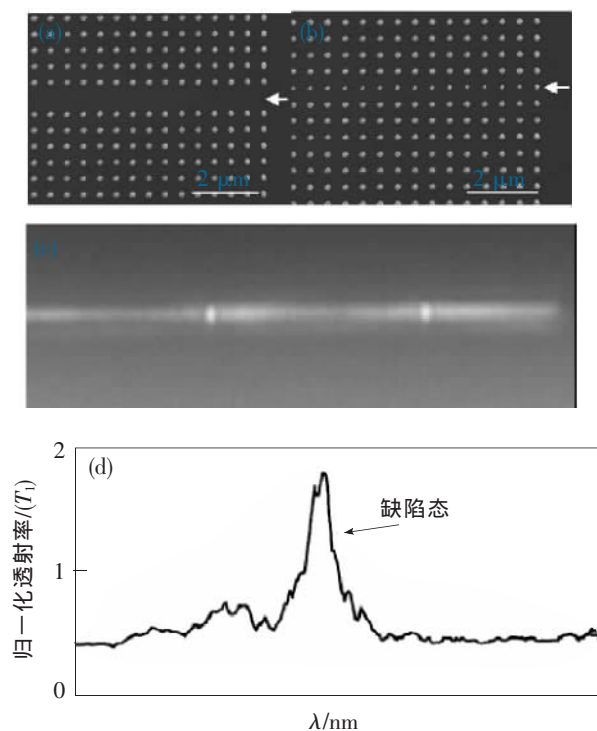


图 5 (a) 和 (b) 分别是介电常数异常型和结构异常型二维波导结构; (c) 中左右两个光斑分别是光通过 A、B 波导后形成的; (d) 为光通过波导的透射谱线。

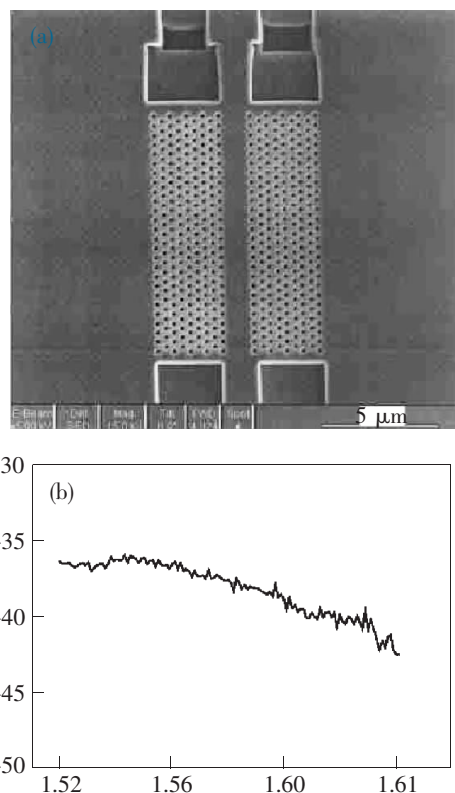


图 6 (a)为制作好的 W3 型光子晶体波导,两端分别制作了脊型波导,以利于光的引入;(b)为该波导的透射谱。

导。晶格常数 $a=420$ nm, 空气孔直径 $D=240$ nm, 通光方向样品总长度为 0.3 mm。图 6(b) 是该波导的透射谱, 由于 W3 型波导并不是单模传输, 所以该波导在 $1\ 520\sim 1\ 640$ nm 都有光出射, 传输性能良好。

二维光子晶体波导按照结构还可以分为直波导、转弯波导、Y 分支波导等, 上述提到的几个例

子都是直波导。图 7 所示为美国 M. H. Shih 等于 2005 年制作的 60° 转角波导^[21], 该波导为在 240 nm 的 InP/InGaAs 薄膜上制作的三角晶格结构, 其晶格常数 $a=420$ nm, 填充率为 0.3 左右, 导带范围是 $1\ 520\sim 1\ 535$ nm。图 7(c) 是测得的传输谱, 经测试, 在 $1\ 520\sim 1\ 535$ nm 范围内可达 95% 的传输效率, 而导带范围外的波长由于和导模失配, 损耗很大。

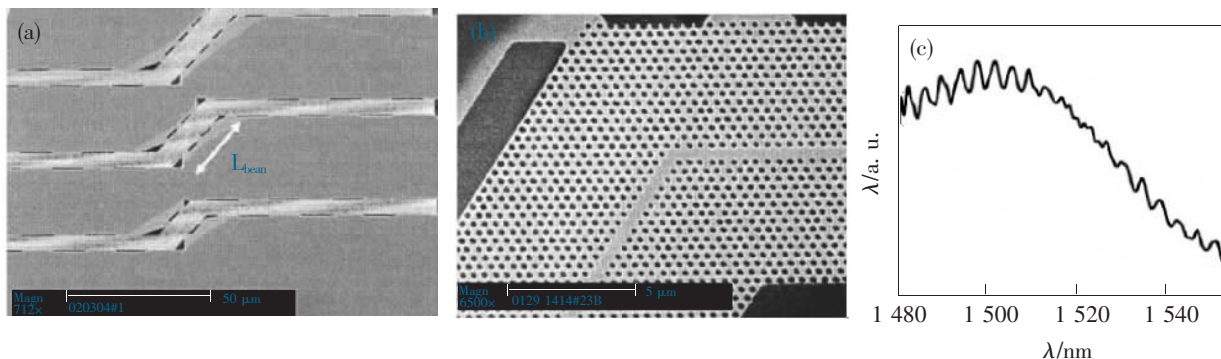


图 7 (a) 制作的双转弯波导; (b) 其放大图; (c) 该波导的透射谱线。

4 二维光子晶体波导的制作

一种材料要用于光子晶体波导的制作, 首先应满足的条件就是要能够形成光子禁带, 这就要求这种材料在目标波段要有较小的吸收和尽量高的折射率 (通常认为两种介质的折射率差 >2 才有可能形成光子禁带)。另外, 所使用的材料要有成熟的加工工艺, 技术上适于制作光子晶体波导器件。基于上述考虑, 可用于制作光子晶体波导的主要材料有 Si、Ge、SiO₂、SOI (Silicon on insulator)、Ⅲ-Ⅴ族化合物 (GaAs 等)^[23-24] 等半导体材料和有机材料, 如 PMMA^[25] 等。其中 Si、SOI 满足产生光子禁带的条件 (Si 在 $1\ 550$ nm 波长吸收较小, 折射率在 3.4 左右), 且半导体工艺成熟, 便于制备光子晶体结构。另外, 硅也是常用半导体材料, 不仅制作工艺方面可以成熟连接, 而且可以集成原有的光电有源器件, 可促进未来集成光学的发展。

光子晶体波导制作过程主要可以分为由掩膜版的制作、掩膜的制作和刻蚀 3 步。

掩膜版的制作可由激光和电子束两种图形描绘

方式配合干法刻蚀制作。其中电子束刻蚀方式成本昂贵, 精度较高; 而激光描绘方式虽然降低了成本, 但精度也随之降低。因此, 应根据实际要求合理选择掩膜版的制造方式, 以达到在保证精度要求的前提下尽量降低成本的目的。

制作掩膜的方法主要有电子束曝光 (Electron beam lithography, EBL) 或深紫外曝光 (Deep UV lithography, DUV) 等方法。电子束的德布罗意波长 <0.01 nm, 故 EBL 衍射效应极小, 具有高分辨率、易于控制以及便于修改等优点。另外, 电子束曝光还可以不使用掩膜版直接在光刻胶上刻蚀出掩膜图形, 降低了成本, 但速度慢, 生产率较低。DUV 主要采用 248 nm 和 193 nm 光刻技术, 其中 193 nm 光刻在国外已经商用化, Intel, IBM, AMD, 台积电等已经具有应用 193 nm 沉浸式光刻生产 45 nm 或 40 nm 工艺的水平, 更高的 32 nm 工艺或许将在明年投产。而国内 193 nm 光刻技术还不成熟, 主要光刻技术仍采用 248 nm 光刻。DUV 相对于 EBL 具有速度快、产量高、便于大规模生产的优点, 但成本较高。

另外,还可以采用纳米压印制作掩膜。纳米压印技术是华裔科学家周郁在 1995 年提出的^[26],在纳米压印技术中,较为昂贵的电子束曝光和干法刻蚀只在模具的制作过程中使用一次,而制作好的压印模具可多次使用,用来复制大量的所需要的纳米微结构,大大降低了整个工艺过程的成本。目前,应用热压印已经可以制作最小尺寸 5 nm、深宽比达 6 的微结构。纳米压印能够满足光子晶体掩膜制作的精度要求,且能够以相对较低的成本实现高精度、高分辨率纳米结构的大规模批量生产^[27],有条件成为 EBL 和 DUV 的替代技术。

光子晶体波导结构成型主要采用反应离子刻蚀 (Reactive ion etching, RIE)、电子回旋共振等离子体刻蚀 (Microwave electron cyclotron resonance, ECR)、感应耦合等离子体刻蚀 (Induction coupling plasma, ICP)、聚焦离子束刻蚀 (Focused ion beam, FIB) 等干法刻蚀工艺^[12,23-25,28,29]。其中 FIB 可以在基底上直接写出所需要的光子晶体波导图形结构,免去了昂贵的掩膜版制作及曝光工艺过程,大大节省成本,但刻蚀速率较慢,生产率低,更适于实验室应用。以上干法刻蚀还可以通过加入化学气体代替反应室中的惰性气体进行化学辅助等离子体刻蚀,提高刻蚀速度和优化方向的选择性。总体来说,干法刻蚀是目前光子晶体波导器件的主要加工工艺,能够满足光子晶体波导器件的工艺要求。但其成本相对昂贵,制作周期长、产率低、不易于大规模生产制备,还主要停留在实验室阶段。

近年来,基于半导体生长法(硅的固-液-气三相生长法,固-液-固生长法)制作介质柱型光子晶体波导的研究也逐渐开展起来。其中硅的固-液-气三相生长法(VLS)是硅的成熟工艺,其主要原理是在硅片上蒸镀一层金属(如金,镍等)用来做催化剂,将蒸镀好催化剂的硅片加热至硅与催化剂金属的共晶温度(363 ℃左右)以形成硅的过饱和液滴,通入硅源气体(如 SiCl_4 、 SiH_4 等),合金液滴中的硅会过饱和而析出,达到硅柱生长的目的。整

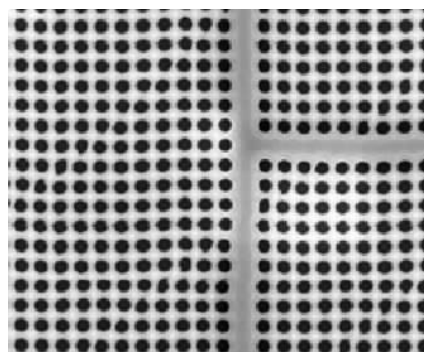


图8 使用 DUV 配合化学辅助离子束刻蚀制作的二维光子晶体波导

个生长过程中硅来源于气体硅源而不是基底硅,生长出的硅柱顶端会残留金滴,根据实际应用可以通过腐蚀去除。图9是俄罗斯科学院 E. I. Givargizov 制作的硅柱阵列^[30],需要说明的是,这并不是光子晶体波导结构,但可以为使用 VLS 法制备二维光子晶体波导提供有益指导。硅的 VLS 法具有工艺成熟、成本低、便于大规模生产等优点,但使用 VLS 法生长的硅柱半径和周期不易控制,容易引入污染,这些问题还尚待解决。目前,半导体生长法制作光子晶体波导器件的工艺还在深入研究和探索中,技术上日趋成熟,必将为光子晶体器件的商业化提供巨大的机遇。

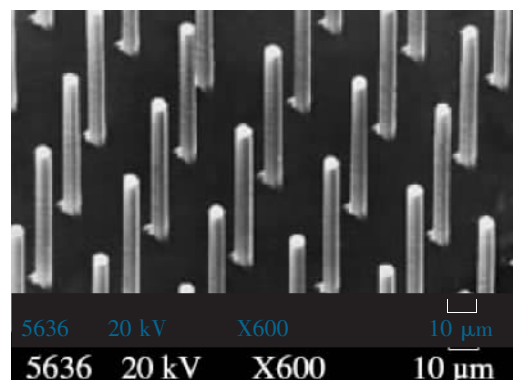


图9 使用固-液-气三相生长法制作的二维介质柱阵列结构

5 总 结

光子晶体是光电集成、光通讯、微波通讯、空间光电技术的一种新概念材料,二维光子晶体波导

更是凭借其优异的光学特性赢得了广泛的关注和研究。目前,已经可以通过 EBL 或 DUV 配合干法刻蚀在实验室制备光子晶体波导器件,其商业化的大

规模生产制备工艺还在发展中。相信随着半导体制备工艺的成熟,光子晶体波导等光子晶体器件必将走进我们的生活,引发一场影响深刻的光子革命。

参考文献

- [1] Yablonovitch E, Bhat R, Harbison J P, *et al.* Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23): 2486–2489.
- [3] Dowling J P, Scalora M, Michael, *et al.* The photonic band edge laser: a new approach to gain enhancement [J]. *Appl. Phys.*, 1994, 75(4): 1896–1899.
- [4] Chen Y B, Cai X B, Zhu Y Y, *et al.* Second harmonic generation in tow dimensional mental photonic band gap materials [J]. *Appl. Phys.*, 2002, 92(6): 2969–2937.
- [5] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 633–636.
- [6] 赵勇, 赵华伟, 张馨元, 等. 慢光产生的新机理及其应用 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 237–245.
- [7] Lidroikis E, Sigalas M M, Soukoulis C M, *et al.* Tight-Binding parameterization for photonic band gap materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81(7): 1405–1408.
- [8] Leung K M, Liu Y F. Full vector wave calculation of photonic band structures in face-centered-cubic dielectric media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65(21): 2646–2649.
- [9] Johnson S G, Joannopoulos J D. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. *Optics Express*, 2001, 8(3): 173–190.
- [10] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.
- [11] Yonekura J, Ikeda M, Baba T. Analysis of finite 2-D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method. [J]. *Lightwave Technol.*, 1999, 17(8): 1500–1508.
- [12] Tada T, Poborchii V V, Kanayama T. Channel waveguides fabricated in 2D photonic crystals of Si nanopillars [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 63(1): 259–265.
- [13] Todaro M T, Stomeo T, Vitale V, *et al.* Nanofabrication of high refractive index contrast two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67–68(1): 670–675.
- [14] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67(17): 2295–2298.
- [15] Deubel M, Freymann G V, Wegener M. Wegener Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications [J]. *Nature Mater.*, 2004, 3(7): 444–447.
- [16] Miklyaev Y V, Meisel D C, Blanco A. Three-dimensional face-centered-cubic photonic crystal templates by laser holography: fabrication, optical characterization and band-structure calculations [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(8): 1284–1286.
- [17] Aoki K, Miyazaki H T, Hirayama H. Three-dimensional photonic crystals for optical wavelengths assembled by micromanipulation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(17): 3122–3124.
- [18] Lin S Y, Fleming J G, Hetherington D L, *et al.* A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelength [J]. *Nature*, 1998, 394: 251–253.

- [19] Lazaro J M, Kuhlmeier B T, Knight J C, *et al.* Ultrasensitive UV-tunable grating in all-solid photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Com.*, 2009, 282(12): 2358-2361.
- [20] 陈松, 王维彪, 梁静秋. 二维点缺陷正方光子晶体的微腔结构 [J]. *发光学报*, 2006, 28(1): 7-12.
- [21] Shih M H, Kim W J, Kuang W, *et al.* Experimental characterization of the reflectance of 60° waveguide bends in photonic crystal waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(19): 191104.
- [22] 韩守振, 田结, 冯帅. 二维平板光子晶体直波导的制备和光传输特性的测量 [J]. *物理学报*, 2005, 54(12): 5659-5662.
- [23] 刘有成, 宁丹, 王瑞庭, 等. Ta₂O₅/SiO₂ 三维光子晶体的制作及光学性能 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1478-1482.
- [24] Sharre J, McNab, Moll N, *et al.* Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2927-2939.
- [25] Huebner U, Boucher R. Fabrication of photonic crystal structures in polymer waveguide material [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83: 1138-1141.
- [26] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(21): 3114-3116.
- [27] Sotomayor C M, Zankovych T S, Seekamp J. Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 23(1-2): 23-31.
- [28] Notomi M, Yamada K, Shinya A, *et al.* Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(25): 253902-1-253902-4.
- [29] 解灵运. 基于 SOI 的二维光子晶体平板波导的研究 [D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2004.
- [30] Givargizov E. Controlled growth of filamentary crystals and fabrication of single-crystal whisker probes [J]. *Crystallography Reports*, 2006, 51(5): 888-894.