

硫系玻璃光子晶体光波导的制备研究进展

王贤旺 张巍* 章亮 李军建 徐铁峰

(宁波大学信息科学与工程学院 红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要 光子晶体是一种介质常数周期性变化的人工介质材料,具有光子带隙和光子局域两个主要特征。光子晶体光波导是利用光子带隙特性传输光信息的光学器件。与传统的条形光波导相比,它最大的优势是在大的拐角处具有很低的传输损耗(如在 60° 弯曲时传输损耗可以降低到5%),因此非常适合用于集成光学。从硫系玻璃材料的特征入手,详细介绍了聚焦离子束和电子束曝光这两种光子晶体光波导常用的制备方法,通过这两种方法制备出来的光子晶体光波导都具有较高的表面平整度和较低的传输损耗。对两种方法的制备工艺和特点进行了比较。最后简单介绍了硫系光子晶体光波导的应用,并对硫系光子晶体光波导的发展前景做了展望。

关键词 材料;硫系玻璃;光子晶体波导;制备;光子晶体带隙

中图分类号 O734; TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.120001

Research Progress of Fabrication of Chalcogenide Glass Photonic Crystal Waveguide

Wang Xianwang Zhang Wei Zhang Liang Li Junjian Xu Tiefeng

(Laboratory of Infrared Materials and Devices, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract Photonic crystal is an artificial dielectric material whose dielectric constant changes periodically. It has two important features: photonic band gap and photon localization. Photonic crystal waveguide transmits light signal using photonic band gap. Compared with conventional strip waveguide, the most significant advantage of photonic crystal waveguide is that there is very little transmission loss at the corner (the loss can be decreased to about 5% at the corner of 60°). Therefore, photonic crystal waveguide has important applications in the field of integrated optics. In this paper, we start with the features of chalcogenide glass, and introduce two types of methods in fabricating photonic crystal waveguides of chalcogenide glass. Through these two fabrication methods, photonic crystal waveguides can be obtained with both high quality of surfaces and low transmission loss. The differences between the two methods are also compared and the applications of the photonic crystal waveguide based on chalcogenide glass are introduced. Finally, the prospects of the photonic crystal waveguide based on chalcogenide glass are put forward.

Key words materials; chalcogenide glass; photonic crystal waveguide; fabrication; photonic crystal bandgap

OCIS codes 160.5293; 220.4241; 130.5296; 310.6860

1 引言

材料是当今世界文明发展的三大支柱(材料、信息、能源)之一,在社会发展的同时,人们一直在努力探索新材料的制备和应用。近几年来,人们对器件的要求越来越苛刻,高速、小型化、集成化成为新型材料所必备的特征。电子作为信息的载体,已成熟应用于信息传输、处理等方面。但是随着电路的电功率变大,半导体

收稿日期: 2013-06-05; **收到修改稿日期**: 2013-07-08; **网络出版日期**: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(61107047)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 王贤旺(1988—),男,硕士研究生,主要从事硫系光子晶体波导的制备和损耗等方面的研究。

E-mail: wangxianwangyi@163.com

导师简介: 徐铁峰(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术、特种玻璃光纤、红外光学材料和红外信息系统等方面的研究。E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: zhangwei3@nbu.edu.cn

器件的能力将达到极限,电子产品必然会遇到瓶颈,因此光子代替电子作为信息的载体是必然的发展趋势。现阶段光信息处理的核心仍然离不开微电子技术,光电信号转换能力的滞后和电子线路速度的限制已经成为信息传输容量的瓶颈,当务之急是要开发新型光器件以推动光信息处理进入全光时代^[1-6]。与电子相比较,光子具有弱相互作用力、高信息容量和高传输速率等特征,这些优点使得以光子为信息载体的器件更易于集成化。光子晶体是按晶体的对称性制备的周期性介电结构^[7]。光子晶体具有光子局域和光子带隙两个典型特征。光子晶体带隙又分为完全光子带隙和不完全光子带隙:完全光子带隙是指在所有空间方向都不能传输光信号,而且每个方向上的带隙都有重叠;不完全光子带隙是在相应的空间各个方向的带隙不能完全重叠,或者只在特定的方向才有带隙。光子晶体光波导是在光子晶体中引入线缺陷,光子晶体光波导的原理就是利用光子晶体线缺陷来实现的,当频率落在光子晶体带隙范围内时,光信号只能沿着线缺陷传播,如果偏离线缺陷,光信号就会被迅速衰减掉,这就是与传统光波导传光原理的不同之处。光子晶体光波导具有比传统光波导更高的传输效率,这是它最大的特点和优势^[8]。本文首先介绍了硫系玻璃材料的一些基本性质,然后重点介绍硫系玻璃材料光子晶体光波导的两种制备方法并对其进行了简单的比较,最后介绍硫系光子晶体光波导的一些简单应用并对其前景进行展望。

2 硫系玻璃材料的特征

硫系玻璃是硫族元素(S, Se, Te)与其他金属或者非金属元素形成的非晶体材料的总称。与氧化物玻璃相比较,硫系玻璃具有较大的质量和较弱的键强^[1],所以具有较长的透红外截止波长(大于 10 μm),是一种很好的远红外光学材料,可以应用在夜视、化学传感器、辐射温度计和 CO_2 激光能量传输等领域。

硫系玻璃在红外区有很高的透射率,但是其光谱性能随成分的变化而不同。硫化物玻璃在可见光区有部分透射率,硒碲化合物则在可见光区没有透过,而仅在近红外和中红外区有透过。但是硫系玻璃光纤的透射率不高,主要是因为有较大的本征吸收。宽的光谱范围使硫系薄膜光波导能更好地应用在生物医学传感和中红外激光传输上。在折射率方面,各种含 As, Ge, Si 等元素的硫系玻璃在 3~5 μm 波段和 8~12 μm 波段的折射率有一定的变化规律,当 As_2S_3 (硫化砷玻璃在 3 μm 的折射率为 2.395) 被 As_2Se_3 或者 As_2Te_3 代替时,其折射率有明显增加,色散曲线明显比氧化物玻璃的平坦^[9]。在非线性特性上,硫系玻璃具有很高的非线性特性,导致了硫系波导对光场有很好的模式限制作用,对光学器件的集成有很大帮助。在光敏感性上,硫系玻璃具有很好的光敏感性的原因是由于硫族有两个没有成键的孤电子对,当有光照射时会发生光诱导反应,产生结构缺陷,利用硫系玻璃的敏感性可以制备集成布拉格光栅和光波导^[1]等。

3 硫系光子晶体光波导的制备

光子晶体结构需要在硫系玻璃材料上刻蚀出周期排列的孔洞,常用的刻蚀方法有飞秒激光脉冲打孔、Ar 离子研磨、等离子刻蚀、聚焦离子束(FIB)刻蚀、湿法刻蚀等。这里重点介绍两种常用的硫系光子晶体光波导的制备方法。

3.1 聚焦离子束刻蚀

聚焦离子束刻蚀是一种常用的制备亚微米结构的技术。离子束不仅和电子束一样,都是带电的物质,而且便于控制,同时离子还具有元素的性质,可以和靶物质相互作用产生一些有应用价值的物理化学反应。聚焦离子束技术是在电场和磁场的作用下,将离子束聚焦到亚微米甚至纳米量级,通过偏转系统和加速系统控制离子束,实现微细图形的检测分析和纳米结构的无掩模加工。自从聚焦离子束于 1973 年首次用于制作微细结构以来,它已成为半导体制作工艺中的一个可靠工具。但是,那时的离子是由常规的等离子体源产生的,束流密度低,刻蚀速率较慢。1978 年美国加州休斯敦研究所建立了第一台装有高亮度的液态金属离子源的 FIB 系统,此后 FIB 技术取得长足的进步。FIB 技术的主要优点在于:离子束可在几平方微米到 1 mm^2 的区域内进行数字光栅扫描,可以 1) 通过微通道板或通道电子倍增器收集二次带电离子来采集图像,2) 通过高能或化学增强溅射来去除不想要的材料,3) 沉积金属、碳或类电解质薄膜的亚微米图形。FIB 技术已在掩模修复、电路修正、失效分析、透射电子显微镜(TEM)试样准备和三维结构直写等方面得到应用^[10]。

聚焦离子束的刻蚀原理主要是利用高能聚焦离子束轰击样品,使样品中的原子从表面溅射出来,用物理的方法进行刻蚀加工。它以直写的方式将设计好的图形刻蚀在需要加工的区域,与湿法腐蚀等方法比较,不需要复杂的掩模和图形转移等步骤,避免了图形转移过程中的失真现象;此外,它对多元合金材料系不同组分的材料的刻蚀速率比较接近,对多层结构材料系在纵深方向可得到光滑的刻蚀界面,这点也非常不同于湿法腐蚀和其他干刻技术;特别是当采用较小的离子束流时,可以使 FIB 加工的线宽减小到几十纳米,同时保持很好的深度比。据有关文献报道,利用聚焦离子束制造出来的光子晶体光波导的最低损耗可以降低到约 $3.5 \text{ dB/cm}^{[11]}$ 。

实验中我们选择 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 组分的硫系薄膜作为光子晶体光波导膜层,厚度为 400 nm ,通过磁控溅射方法将其制备在 SiO_2 的隔离层上,基底为硅。设计的光子晶体周期为 550 nm ,孔半径为 200 nm ,孔的深度 400 nm ,晶格排列为三角形晶格。最后制作所得的线缺陷光子晶体光波导如图 1 所示。

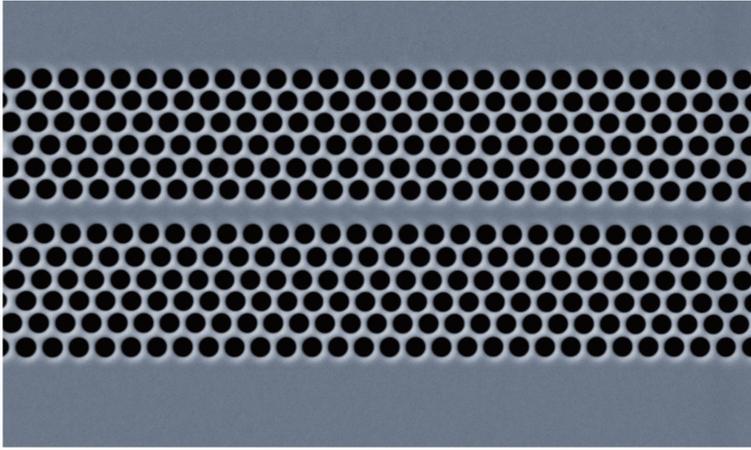


图 1 聚焦离子束刻蚀的光子晶体光波导

Fig. 1 Photonic crystal waveguides fabricated by focused ion beam etching

3.2 电子束曝光刻蚀

除了聚焦离子束曝光以外,还可以采用电子束曝光技术(EBL)来制备光子晶体光波导,据有关文献报道,在绝缘硅(SOI)基底上用电子束曝光方法制作出来的光子晶体光波导的损耗低于 $4 \text{ dB/cm}^{[12]}$ 。电子束曝光是利用某些高分子聚合物对电子敏感而形成曝光的,是光刻技术的延伸,是四十多年来发展起来的一门新技术。它结合了电子光学、物理学、精密机械、计算机科学、自动控制学等高新技术,推动了微细加工技术的发展。电子束曝光的分辨率可以达到纳米级。20 世纪 90 年代以来,美、日等国的一些研究部门采用电子束曝光技术相继研制成功 $0.1 \mu\text{m}$ 的互补金属氧化特半导体(CMOS)器件和 $0.05 \mu\text{m}$ 高电子迁移率晶体管(HEMT)器件。而且,电子束曝光很可能在新一代量子效应研究中起到至关重要的作用^[13]。电子束曝光的主要优点在于:1)采用高亮度和高稳定性的热电场发射型(TFE)电子枪;2)出色的电子束偏转控制技术;3)采用场尺寸调制技术,电子束定位分辨率可达 0.0012 nm ,采用轴对称图像书写技术,图形偏转角分辨率可达 0.01 mrad 。其主要工艺流程图^[14-20]如图 2 所示。

由流程图可知,整个工艺主要包括 12 步:清洗,烘干,添加增粘剂,涂光刻胶,前烘,光刻,显影,检查,后烘,刻蚀,移除光刻胶,检查。在整个工艺流程里最主要的两个关键步骤是光刻和刻蚀。

3.2.1 光刻技术

光刻技术就是在需要刻蚀的表面涂抹光刻胶,干燥后把图形底片覆盖其上,在光源照射下,受光照部分可用显影液洗掉胶膜。光刻主要有紫外线光刻、电子束光刻、离子束光刻等,这里主要对电子束光刻进行介绍。

与紫外线光刻相比较,电子束光刻用电子束来曝光硅片^[21-27]。这种光刻技术将电子束加速并碰撞涂有光刻胶的硅片,电子束撞击的位置和角度由曝光机控制。通过这种方式,就可以只在硅片光刻胶层上需要的位置进行曝光。通过控制曝光的位置,可以在光刻胶层绘制图形。当前的电子束光刻技术可以绘制可以小于 10 nm 的图形。

为了准确地曝光所需要的图像,电子束光刻需要将曝光的图形划分为一个个小的写场区域。写场区域是比较小的正方形的曝光区域,在写场区域内的图形又被按网格划分为一个个的子写场区域。

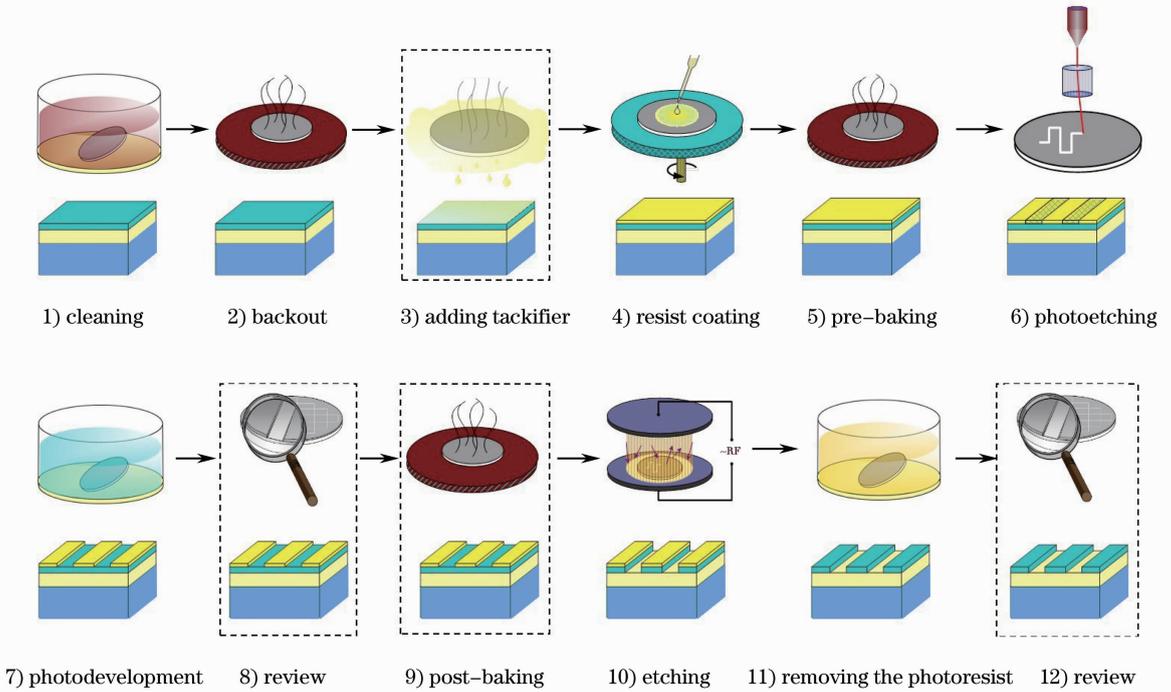


图 2 绝缘硅上电子束曝光刻蚀光波导的标准工艺流程

Fig. 2 Standard process of electron beam lithography etching optical waveguide on silicon

3.2.2 刻蚀技术

刻蚀是将光刻胶上的图形从光刻胶上转移到基片上^[28-32]。刻蚀可以分为干刻蚀和湿刻蚀两种。干刻蚀又可以分为聚焦离子束刻蚀、反应离子束刻蚀、感应耦合等离子体刻蚀等。这里主要介绍反应离子束刻蚀。

典型的反应离子束刻蚀系统是一个圆柱形的真空腔,在腔的底部有一个电学性质与周围隔离的底盘。把需要刻蚀的硅片放在底盘的上面,气体从腔顶部的小孔注入,然后从腔底部的真空泵系统排出。进入腔内的气体在腔内强电压的作用下会呈现出离子态,不断与底盘上的硅片表面发生化学反应,从而达到腐蚀的作用。可以通过调节气体注入和排出的速率以及腔内气体的压强,使化学反应持续进行。

首先设计好光子晶体波导的图案,其中包括光子晶体波导的周期 550 nm,孔的半径 200 nm,孔的深度 300 nm,晶格结构为三角形。接着对硅基进行清洗、烘干、添加增粘剂、涂光刻胶和前烘。之后制作掩模板,利用电子束曝光把掩模板上的图案曝光到光刻胶上,再对其进行显影,使光刻胶变得更加坚硬,最后利用反应离子束刻蚀技术将光刻胶上的图案刻蚀在晶片上。结果如图 3 所示。

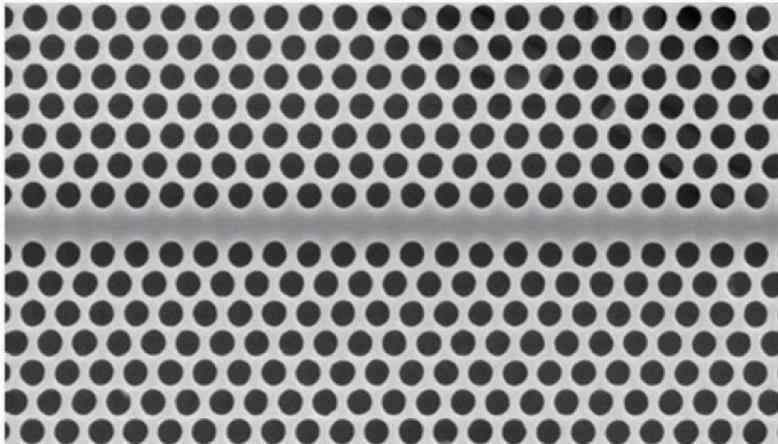


图 3 电子束曝光刻蚀的光子晶体波导

Fig. 3 Photonic crystal waveguide fabricated by electron beam lithography etching

3.3 两种方法的比较

从上面的介绍可以看出,这两种方法各有其优缺点。从制作工艺上来看,电子束曝光明显要比聚焦离子束的工艺复杂些,电子束曝光需要首先制作掩模板,而聚焦离子束工艺则不需要;从制作成本和制作速率角度来看,电子束曝光设备比聚焦离子束的成本高些,但聚焦离子束刻蚀的时间更长,所以聚焦离子束方法适合小尺寸器件的制备^[8];从性能上看,电子束曝光的分辨率很高,工艺容限大,而且生效效率高,但是由于电子束光刻胶膜内的散射,使得实际曝光剂量会受到临近图案曝光剂量的影响(临近效应),这样可能会导致显影后图形畸形。在实际应用过程中,可以根据实验条件和所制备样品的参数选择合适的方法进行制备。

4 硫系玻璃光子晶体光波导的应用

与传统介质光波导相比较,光子晶体光波导最大的优势在于它在曲率较大处的辐射损失比较小。当光通过直角传统介质光波导时,即使其介电常数差较大,由于其曲率半径超过了光波波长,所以在转弯处将会有很大的光功率损耗。但是二维直角光子晶体波导具有很低的损耗,如果光的传输模式频率正好位于光子晶体带隙内,光可以在其内进行几乎无损耗的传输。所以我们可以利用硫系玻璃光子晶体光波导来制作光分离器,把一束光分成多路来传播,而且还可以很好地控制光的传播方向。与传统的光分离器相比,当二维点阵结构的光子晶体引入两个或者两个以上的线缺陷时,可以将入射光导入不同的缺陷光路中,并且这种光子晶体光波导不受弯曲角度的限制,很容易实现 60° 、 90° 、 120° 等任意弯曲角度的器件。硫系玻璃光子晶体光波导还可以用于制作光逻辑非门,这种逻辑非门不需要非线性材料和光放大器,而且体积非常小,可以工作在高达2.155 Gb/s的比特率上,这是其他电光逻辑门所无法比拟的。除此之外,根据硫系波导光子晶体波导的慢光效应还可以制造光子晶体光波导生物传感器和高灵敏度的气体传感器,这种传感器的灵敏度可达293 nm/RIU(RIU即折射率单位),可广泛用于生物化学和生物医学传感和诊断。综上所述,硫系光子晶体光波导在非线性光信息处理、传感器、中远红外激光传输等领域都具有广阔的应用前景^[1]。

5 结束语

光子晶体光波导的发展历史已经超过20年,但是目前光子晶体光波导的研究中仍然存在诸多问题,例如理论损耗与实际损耗相差甚远,制造技术不够成熟^[8](包括三维光子晶体波导的制造和材料的选择问题)。硫系玻璃材料除了具有较宽的透射光谱,还有较大的三阶非线性系数和较小的双光子吸收,这些特性使得基于硫系玻璃材料的光子晶体波导器件除了可以应用于光通信领域之外,还在生物医学传感和中红外激光传输等方面具有很大的应用价值。相信随着理论研究的深入和实验工艺的进一步完善,硫系玻璃光子晶体光波导在制备、性能优化及应用等方面都会有很大的进展^[1]。

参 考 文 献

- 1 Chen Yu, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.*. Research progress of chalcogenide glass waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 111301.
陈 昱, 沈 祥, 徐铁峰, 等. 硫系玻璃光波导研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 111301.
- 2 Jiang Zhonghong, Liu Yuehui, Dai Shixun. *New Optical Functional Glass* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. 245-246.
姜中宏, 刘粤惠, 戴世勋. *新型光功能玻璃*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 245-246.
- 3 Chen Fang, Liu Ruipeng, Qi Zhimei. Design, fabrication and characterization of LiNbO₃-based integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0513001.
陈 方, 刘瑞鹏, 祁志美. 铌酸锂基集成光波导马赫曾德尔干涉仪的设计、制备及其特性的初步测试[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0513001.
- 4 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0813001.
高 原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0813001.
- 5 Shen Liangbiao, Xu Qingbo, Jian Mingming, *et al.*. Development of planar waveguides for optical sensing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(5): 24-30.
沈亮标, 徐清波, 剪明明, 等. 平面波导光传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(5): 24-30.

- 6 Song Muping, Zou Lianggang. Chromatic dispersion monitoring based on four-wave mixing in silicon optical waveguides [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 181–185.
宋牟平, 邹良港. 基于硅光波导四波混频的色散监测技术[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 181–185.
- 7 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun, *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505003.
高永锋, 周明, 周骏, 等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505003.
- 8 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qiuhua, *et al.*. Research progress of two-dimensionnal photonic crystal waveguides [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030008.
章亮, 张巍, 聂秋华, 等. 二维光子晶体波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030008.
- 9 A Zakery, S R Elliott. Optical properties and applications of chalcogenide glasses; a review [J]. J Non-Cryst Solids, 2003, 330(1-3): 1–12.
- 10 Liu Ming, Xie Changqing, Wang Congshun. Microfabrication Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 50–65.
刘明, 谢常青, 王丛舜. 微细加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 50–65.
- 11 Zhou Changzhu, Liu Yazhao, Li Zhiyuan. Waveguide bend of 90° in two-dimensional triangular lattice silicon photonic crystal slabs [J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(8): 084203.
- 12 A Di Falco, M Massari, M G Scullion, *et al.*. Propagation losses of slotted photonic crystal waveguides [J]. IEEE Photon Journal, 2012, 4(5): 1536–1541.
- 13 Liu Ming, Chen Baoqin, Liang Junhou. Electron beam lithography: an overview [J]. Microelectronics, 2000, 30(2): 117–120.
刘明, 陈宝钦, 梁俊厚. 电子束曝光技术发展动态[J]. 微电子学, 2000, 30(2): 117–120.
- 14 A R Liu, R Jones, L Liao, *et al.*. A high-speed silicon modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. Nature, 2004, 427(6975): 615–618.
- 15 F Xia, L Sekaric, Y Vlasov. Ultracompact optical buffers on a silicon chip [J]. Nature Photon, 2007, 1(1): 65–67.
- 16 G K Celler, S Cristoloveanu. Frontiers of silicon-on-insulator [J]. J Appl Phys, 2003, 93(9): 4955–4987.
- 17 S McNab, N Moll, Y Vlasov. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides [J]. Opt Express, 2003, 11(22): 2927–2939.
- 18 Y Taur, D A Buchanan, W Chen, *et al.*. CMOS scaling into the nanometer regime [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(4): 486–504.
- 19 T Tsuchizawa, K Yamada, H Fukuda, *et al.*. Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2005, 11(1): 232–240.
- 20 W Bogaerts, R Baets, P Dumon, *et al.*. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology [J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(1): 401–412.
- 21 W Chen, H Ahmed. Fabrication of 5~7 nm wide etched lines in silicon using 100 keV electron-beam lithography and polymethylmethacrylate resist [J]. Appl Phys Lett, 1993, 62(13): 1499–1501.
- 22 J Fujita, Y Ohnishi, Y Ochiai, *et al.*. Ultrahigh resolution of calixare negative resist in electron beam lithography [J]. Appl Phys Lett, 1996, 68(9): 1297–1299.
- 23 L R Harriott. Scattering with angular limitation projection electron beam lithography for suboptical lithography [J]. J Vac Sci Technol B, 1997, 15(6): 2130–2135.
- 24 J I Martin, J Nogues, K Liu, *et al.*. Ordered magnetic nanostructures: fabrication and properties [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 256(1-3): 449–501.
- 25 S A Rishton, D P Kern. Piont exposure distribution measurements for proximity correction in electron-beam lithography on a sub-100 nm scale [J]. J Vac Sci Technol B, 1987, 5(1): 135–141.
- 26 G M Wallraff, W D Hinsberg. Lithographic imaging techniques for the formation of nanoscopic features [J]. Chem Rev, 1999, 99(7): 1801–1822.
- 27 Y N Xia, J A Rogers, K E Paul, *et al.*. Unconventional methods for fabricating and patterning nanostructures [J]. Chem Rev, 1999, 99(7): 1823–1848.
- 28 M S Abrahams, C J Buiocchi. Etching of dislocation on low-index faces of gas [J]. J Appl Phys, 1965, 36(9): 2855–2857.
- 29 K E Bean. Anisotropic etching of silicon [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1978, 25(10): 1185–1193.
- 30 J W Coburn, H F Winters. Plasma-etching; discussion of mechanisms [J]. J Vac Sci Technol, 1979, 16(2): 391–403.
- 31 C J Mogab, A C Admas, D J Flamm. Plasma etching of Si and SiO₂: the effects of oxygen additions to CF₄ plasmas [J]. J Appl Phys, 1987, 49(7): 3796–3803.
- 32 H Seidel, L Csepregi, A Heuberger, *et al.*. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline-solutions orientation dependence and behavior of passivation layers [J]. J Electrochem Soc, 1990, 137(11): 3612–3626.