

光纤通信波段微光学件的抗反射纳米结构

皮顿^{1,2}, 单子豪^{1,2}, 吴兴坤^{1,2*}

¹浙江大学光电与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 设计了一种光纤通信波段的纳米抗反射结构。采用有限时域差分(FDTD)优化模拟算法,寻找在 1250 nm 到 1650 nm 波长范围内能够显著降低反射率的蛾眼纳米结构。开发了一种多目标优化算法,将宽带反射率在 0°到 30°的入射角范围内进行了优化。对结构中纳米柱的几何排列、半径、高度和周期组成的参数空间进行了完整的搜索。在波长为 1550 nm 时,仿真得到接近零的反射率为 0.012%。对该设计采用了纳米压印进行实验验证,对于最佳设计的样品,在 1550 nm 处测量获得了低至 0.157%的反射率。分析了模拟结果与实验测量之间的差异,并结合反射率对波长的变化进行了分析。

关键词 光学设计; 纳米结构; 抗反射; 微光学件; 光通信

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0622002

Nanostructured Antireflection Micro-Optics in the Optical Fiber Communication Band

Pi Dun^{1,2}, Shan Zihao^{1,2}, Wu Xingkun^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract In this study, we design nanostructured antireflection multiwavelength micro-optics that can be used in fiber-optic communication systems. The finite-difference time-domain method was used to search for a moth-eye nanostructure that exhibited a significantly reduced reflectivity in the wavelength range from 1250 to 1650 nm. Further, a multiobjective optimization algorithm was developed for optimizing the wideband reflectance at an oblique incidence from 0° to 30°; this optimization was implemented for a parameter space in which the geometrical arrangement, radius, height, and period of the nanopillars could be included. Subsequently, at a wavelength of 1550 nm, a near-zero reflectance (0.012%) was obtained via simulation, whereas an experimental value of 0.157% was obtained when the samples fabricated based on the optimal design was used. Furthermore, this discrepancy between the simulated and experimental results was analyzed by considering the change in the reflective index with the wavelength.

Key words optical devices; nanostructure; antireflection; micro-optics; optical communications

OCIS codes 220.4298; 310.6628; 060.4510; 110.4235

1 引 言

为满足快速增长的光学传输能力的需求,作为并行传输介质的光纤带已被广泛用于例如超大规模云服务数据中心的 400 Gb/s 的比特率有源光纤,或超过 1 Tb/s 数据速率的板载光互连高密度光收发器^[1-2]。对应于光纤带在光通信器件中的应用,对耦

合微光学元件提出了新的要求。例如,光纤带耦合于收发芯片的一维或二维微透镜阵列,已经成为光通信界的重要元件^[3]。目前这些微光学件通常由高精度注塑工艺完成其生产。从中长期发展来看,晶圆级光学(WLO)是光纤通信器件的一种极有发展前途的低成本制造工艺,在此方法中,数层光电功能芯片和微透镜晶圆通过间隙片控制相互

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-18; 录用日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61775189)

* E-mail: xingkunwu@zju.edu.cn

间的距离,完成叠合粘接,成为高精度光学对准的多层封装层,然后再被切割成为单个模组^[4-5]。整个流程吸取了半导体制造工艺中的 wafer, wafer bonding 和 die 切割的特点,极大地提高了生产效率。对于 WLO,在晶圆的单面或双面上均采用纳米压印来完成密集高聚物光学元件阵列,从而能够在单个晶圆上以数千个模组为基础实现与光纤带配套模组的大规模生产。而在此压印过程中可以同时完成微透镜阵列上的抗反射(AR)表面结构。通常,在光学表面上的反射会增加损耗,并对光通信系统的误码率(BER)产生不利影响,另外,在耦合面处的反射光沿原光路返回进入前面的光学器件,也会影响这些器件的性能,如对于激光器而言,反射光的进入会导致激光器无法保持良好的单模工作模式。在传统方法中,注塑光学件必须采用多层镀 AR 膜的介质来减少反射率至 0.5% 以下。然而,基于纳米压印法制备晶圆光学器件的过程中,一个非常有吸引力的替代方法是通过在光学表面上添加蛾眼结构来集成 AR 结构层。因此,在微透镜阵列的形成过程中,抗反射结构可以与微透镜等微光学元件同时制备。蛾眼层由许多周期性排列的亚波长突起构成,尺寸为数百纳米,小于光的波长^[6]。亚波长纳米结构等效于介于空气与基底材料的低折射率层,当光入射至该结构上时,它可以相当于一层折射率匹配的优异抗反射涂层^[7]。因为光无法识别其微小结构,且这种蛾眼型结构具有广角、宽光谱、抗反射效果,优于传统的抗反射涂层,故这种抗反射纳米结构在制备过程中具有低成本、高产量^[8]的特点。

对于蛾眼结构,反射系数由纳米柱的周期、高度和半径函数给出^[9]。对蛾眼结构阵列的几何参数进行数值优化是充分利用蛾眼抗反射性能的必要条件。

纳米压印光刻(NIL)通常通过模具将纳米结构转移到基材上。光学微透镜阵列或其他耦合光学结构采用热固化或 UV 固化的光学树脂模制到晶圆上,生成高聚物光学材料,这些材料的特性逐年提升,目前已经生产出耐高温 250° 以上的光学压印材料。此方法产生的 AR 结构层与基底微透镜采用同种材料,不存在镀膜层剥离不可靠的问题。

蛾眼层的一个典型结构是纳米柱,通过安排其横截面的形状和侧壁来获得所需的光学特性^[10-13]。在可见光的光谱段,2011 年 Ho 等^[14]提出了由不规则纳米柱组成的抗反射结构,透射率从 85.5% 提高

到 95.9%。2017 年 Lin 等^[15]提出了纳米球结构以提高 OLED 的输出功率,在同样的输出条件下,所提纳米球结构使工作电压降低了 36%。此外,在柔性基板上的宽带蛾眼 AR 表面也能使其透射率超过 95%^[16-17]。此外,蛾眼 AR 表面具有良好的自清洁、抗污染性能。

本文提出了一种专门针对在 1250~1650 nm 光纤通信波长范围优化的蛾眼抗反射纳米结构。针对纳米柱的不同几何排列,设计并实现了一种搜索算法。利用有限时域差分(FDTD)方法,在搜索过程中扫描了包括纳米柱高度、半径、周期和折射率在内的结构参数,以找到最优值。采用纳米压印工艺制备了最佳纳米结构参数的样品,在实验中,波长范围在 1310~1625 nm 之间时获得了普遍低于 1%,最低达到 0.157% 的反射率。

2 仿真与分析

仿真设计过程中,使用 FDTD 方法来计算抗反射层的透射率和反射率,以找到 1250~1650 nm 光通信波长范围中最优的抗反射纳米结构。

抗反射纳米结构的示意图如图 1 所示,纳米柱以不同的几何形状排列。表示纳米结构的参数分别有纳米柱的周期、高度和半径,如图 1(a) 右上角所示。由于纳米柱光刻加工质量的完成度较高,因此纳米柱常被用作光刻加工的基本检验部分。通常,在纳米柱的检验过程中,需要将理论设计与实验测量进行有效的比较。本研究将入射光以一定的角度辐射到纳米柱层,其反射率由纳米柱的半径、高度、周期和几何排列等参数决定。

我们考虑的是一个多边形的单位单元格,要求其可以平铺平面,因此将几何排列限制为矩形、等腰三角形和六边形。仿真是一个多目标优化的子问题(MOOP),有

$$\min[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)], x \in S, \quad (1)$$

式中: m 为正整数,且 $m > 1$; $f(\cdot)$ 表示标量目标函数; S 为约束集。在此优化过程中,包括三个具体目标:1) 1550 nm 的反射率;2) 在 1250~1650 nm 的带宽上的平均反射率;3) 斜入射角高达 30° 时的反射率。优化算法流程如图 2 所示。用于搜索序列的参数范围包括:纳米柱半径为 200~300 nm,高度为 100~600 nm,周期为 600~900 nm。每个几何排列都需在这个范围内进行扫描,以得出最优结果。

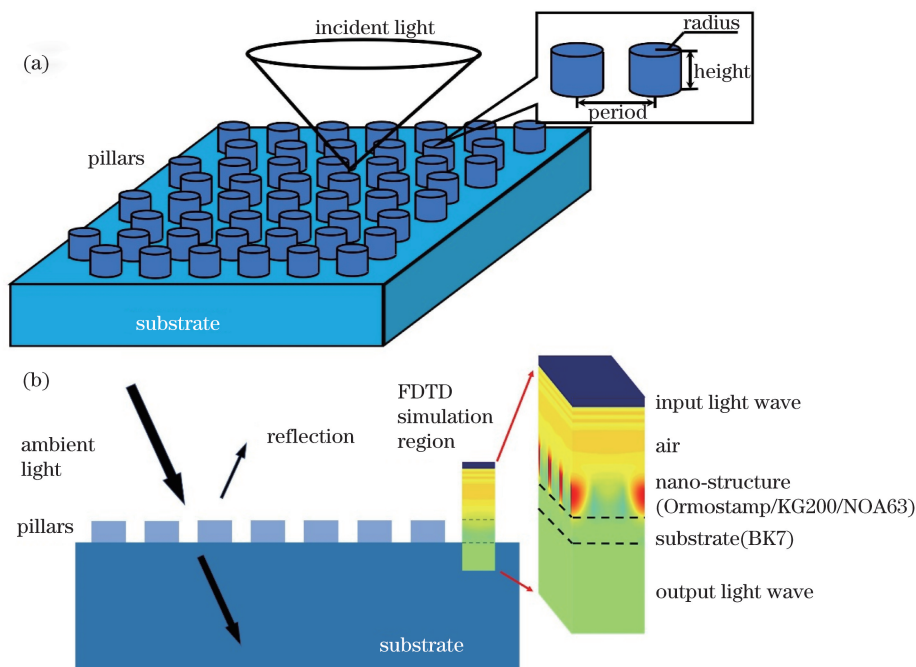


图 1 抗反射层结构示意图。(a)抗反射层纳米柱的分布图;(b) FDTD 模拟设计中的相关结构层, (纳米层材料为 UV 固化光学树脂,基底材料为光学玻璃)

Fig. 1 Schematic of antireflection layer. (a) Distribution of the nanopillars of antireflection layer; (b) antireflection layer in FDTD simulation (material of nano-structure is UV curable optical resin, material of substrate is optical glass)

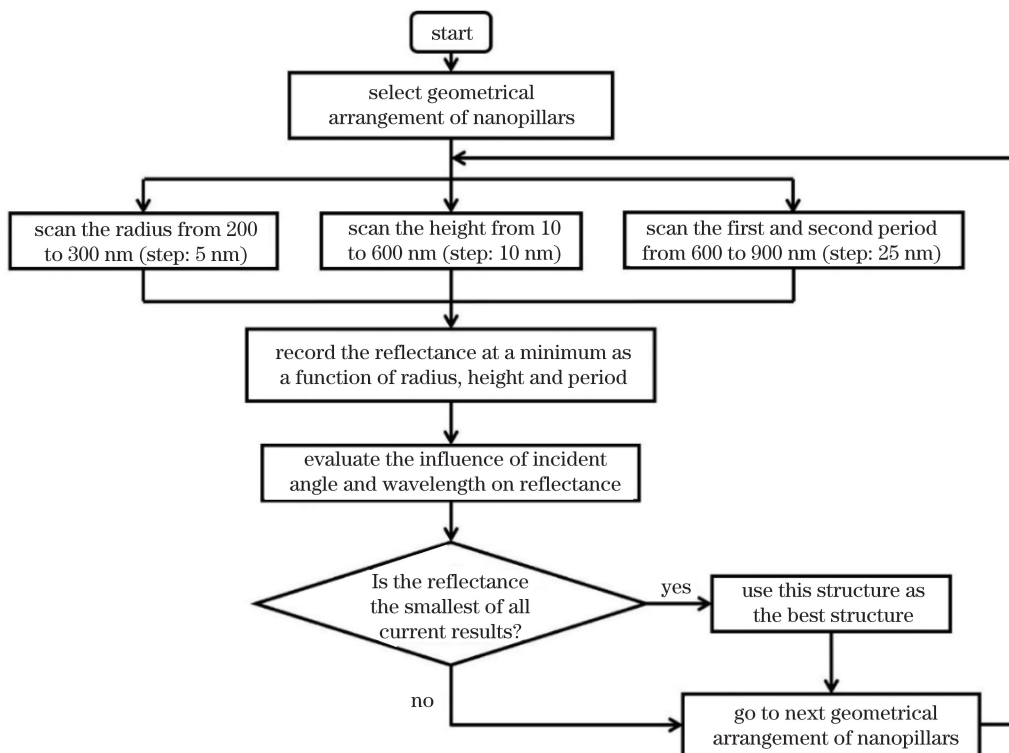


图 2 纳米柱抗反射结构优化算法流程图

Fig. 2 Flowchart of optimization algorithm for nanopillar antireflection structure

分析入射角度对反射率的影响时,首先排除了包含两个不同周期的结构,因其导致了较高的反射率,所以最终备选的结构均为在不同方向上周期相

同的结构;然后,优先选择考虑正入射的情况,因为在光纤通信系统中,光纤入射光的角度被限制在一定范围内,只有正入射的光线可以确保在光纤中传

输。本研究采用 Lumerical 公司的 FDTD Solution 软件设计纳米抗反射结构,关于出射光的研究,在平行于表面的两个方向上使用周期性边界条件,在光的入射和出射方向使用完美匹配层边界(PML)条件。通过 FDTD 仿真得到的实验结果如图 3 所示,3 种几何排列分别为等边三角形、正方形和六边形。图 3(a)~(d)显示了三种排列的数值模拟结果。图 3(a)显示,对于半径为 250, 245, 290 nm 的三角形、方形和六角形结构,最小反射率分别为 0.0287%, 0.0358%, 0.0350%, 其中纳米柱高为 350 nm, 排列周期为 700 nm。对于半径为 250 nm 和排列周期为 700 nm 的情况,图 3(b)显示了反射率随纳米柱高度的变化趋势。三个形状的反射率最小值几乎在同一纳米柱高度的很小范围内发生,三角形、方形和六角形结构的最小反射

率分别为 0.012%, 0.0518%, 0.293%, 柱高分别为 350, 340, 360 nm。反射率与周期(间距)之间的关系如图 3(c) 中所示。对于半径为 250 nm 和柱高为 350 nm 的情况,在周期为 700, 650, 620 nm 时,三角形、方形和六角形结构的最优反射率分别达到 0.0287%, 0.0850%, 0.059%。

采用多目标优化算法进行优化,最终的结果表明,当纳米柱排列为等边三角形时,反射率最小,对应的结构参数为柱半径 250 nm, 高度 350 nm, 周期 700 nm。反射率随入射光的极角 θ 和方位角 φ 变化的变化趋势如图 3(d) 所示。随着极角的增加,反射率上升,斜率约为 $5.67 \times 10^{-3} \% / (^\circ)$; 当方位角变化时,没有发现反射率随方位角变化而变化的情况,仅发现在极角为 30° 时,反射率仍相对较低,为 0.046%。

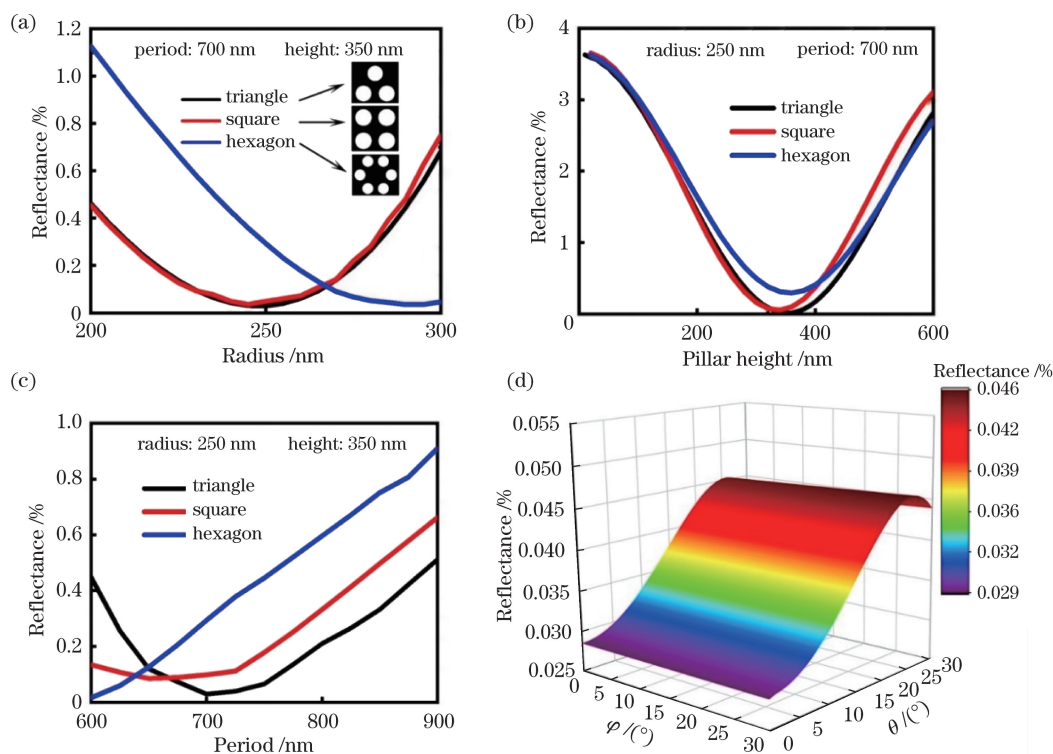


图 3 FDTD 方法仿真实验结果。(a)~(c) 波长为 1550 nm 时,数值模拟获得的反射率依次表示为柱半径、高度和周期为参量的函数;(d) 波长为 1550 nm 时,反射率对应于入射角的极角和方位角的变化情况

Fig. 3 Simulation experiment results of FDTD method. (a)~(c) Numerical simulation of reflectance as a function of pillar radius, height, and period at the wavelength of 1550 nm; (d) angular dependence of reflectance on both polar and azimuth incident angles at the wavelength of 1550 nm

为理解并核实此优化设计方案,在该结构的抗反射特性偏离最优参数的情况下,使用 FDTD 模拟方法对表面纳米结构与入射光波的相互作用进行对比分析。图 4 显示在 1550 nm 入射波条件下,微米尺度的电场振幅在结构面的水平 (x) 和垂直方向 (z) 的空间分布。其中:图 4(a)是纳米柱无纳米抗

反射结构层的情况,平面波入射后,波前遇到折射率突变的平整界面形成整体规则的反射波阵面;而在最优蛾眼纳米柱分布的情况下(图 4(b)),其入射的波前受纳米柱的边界扰动而产生周期性衍射,电磁波在局部发生传播方向的偏折,由于周期性波前振幅的相互叠加,反射波振幅消减,相比纳米柱直径过

小(150 nm)的情况(图 4(c))和纳米柱高度过高(450 nm)的情况(图 4(d)),反射波前的消减仍不是理想的相消干涉。从图中可清晰地看出,最优纳米抗反射结构中纳米柱的顶部区域呈现驻波状

分布的振幅,而纳米柱之间的空气介质空间中,电磁波振幅均具有较高的强度,如同周期性的点状子波源,由此在优化的条件下,可产生反射波的相消作用。

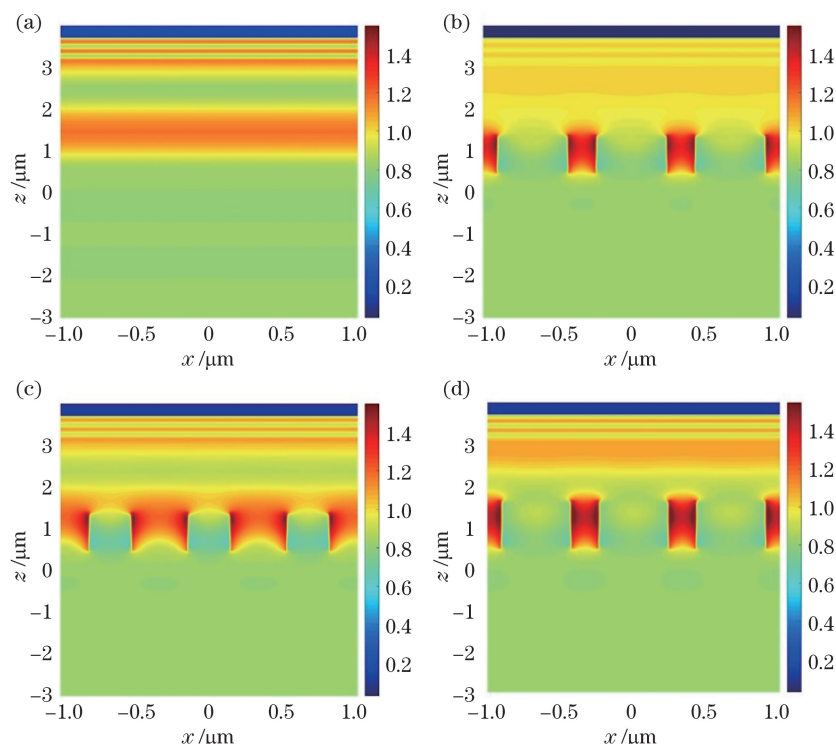


图 4 FDTD 方法计算偏离最优参数结构的对比。(a)无纳米抗反射结构;(b)最优纳米抗反射结构;
(c)纳米柱的直径偏离最优条件(直径为 150 nm)(d)纳米柱的高度偏离最优条件(高度为 450 nm)

Fig. 4 Comparison of optimal parameter structure and other parameter structures. (a) Without antireflection structure;
(b) optimal antireflection structure; (c) diameter of nanopillars deviates from optimal conditions (the diameter is 150 nm); (d) height of nanopillars deviates from optimal conditions (the height is 450 nm)

3 实验验证

在获得该设计方案后,对该参数结构进行了实验验证。图 5 显示了用于样品制造的纳米压印的工艺流程。通过传统的电子束光刻技术制备硅母模:电子束聚焦在硅片表面的光刻胶上,直接画出纳米柱的周期性图案(样品尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)。显影后,对硅晶圆采用离子蚀刻,获得设计深度的纳米柱结构。去除残余光刻胶后,形成硅纳米结构模板。模具使用纳米压印模板胶 Ormostamp[®] (Micro Resist Technology, Germany) 制作柔性印版。选用 0.2 mm 厚度的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜作为印版的基板。将微量 Ormostamp[®] 滴至硅模具后,PET 薄膜缓慢地与 Ormostamp[®] 层的上表面接触,并将 Ormostamp[®] 扩展,覆盖结构区域。在紫外线照射后,Ormostamp[®] 被固化,将此柔性

印版从硅片模具上脱模,采用气相防粘法(F13-TCS, Sigma-Aldrich, USA)对柔性印版在该气氛中进行处理,以便于压印中脱模。使用该印版将抗反射纳米结构转移到玻璃基板上(BK7, Schott, Germany),玻璃基板分别旋涂三种不同的紫外线固化光学树脂:Ormostamp、光纤二次涂层树脂(KG200, PhiChem Corp., Shanghai, China)和 NOA63(Norland Norland Products, USA),这三种光学树脂在 1550 nm 波长下的折射率分别为 1.4930、1.5023 和 1.5097。

图 6(a)和 6(b)显示了玻璃基板上印迹的纳米结构的俯视图和 45° 扫描电镜(SEM)图像。制造纳米柱的半径为 254.5 nm,高度约为 370 nm。图 6(c)和 6(d)在 PET 印迹上显示纳米结构 SEM 图像的俯视图和侧视图。纳米孔结构为均匀的圆形,侧视图测量得到的平均深度为 371 nm。

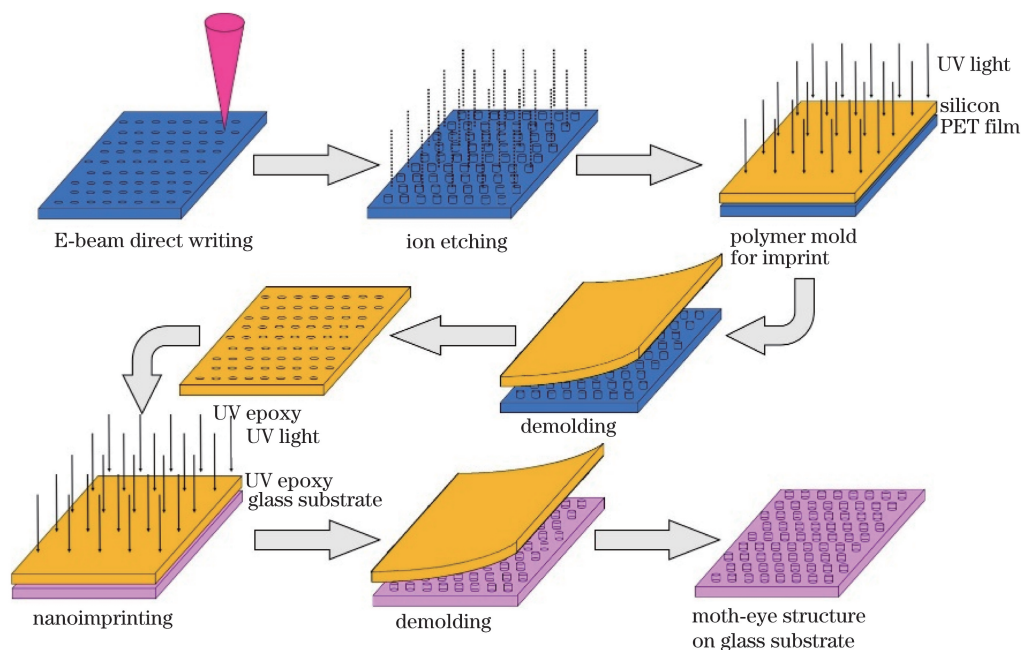


图 5 玻璃基板上纳米柱结构的纳米压印工艺流程,用于抗反射结构的转印

Fig. 5 Fabrication process flowchart of nanopillar structure on glass substrate for antireflection

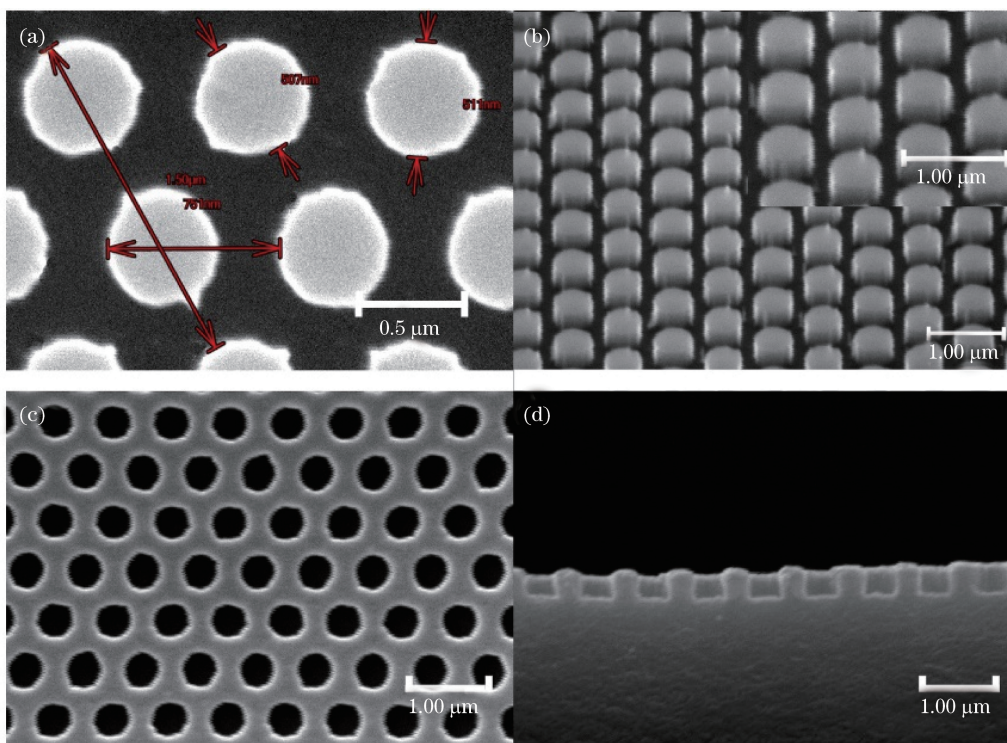


图 6 SEM 图像。(a)纳米结构俯视图;(b)玻璃基板上纳米柱的 45°视图;

(c)(d)用于纳米压印的柔性 PET 印版上纳米孔结构的俯视图和侧视图

Fig. 6 SEM images. (a) Top-view of nanopillars; (b) 45°-view of nanopillars imprinted on the glass substrate;

(c)(d) top-view and side-view of nano-hole structure on PET stamp for nano-imprinting

图 7 显示了将纳米抗反射结构直接压印在光纤 FC/PC 插头上的情况。图中的正方形结构为纳米抗反射层,其使用的材料是光纤二次涂敷 UV 树脂 (polymer 2),压印结构尺寸为 1 mm×1 mm。

最后,利用多波长光纤插入损耗测试系统 (OP940-FTTX, OptoTest Corp. USA)测量了该蛾眼纳米结构的反射率。在波长为 1310, 1490, 1550, 1625 nm 时,测量了纳米结构与其相邻基板间覆盖

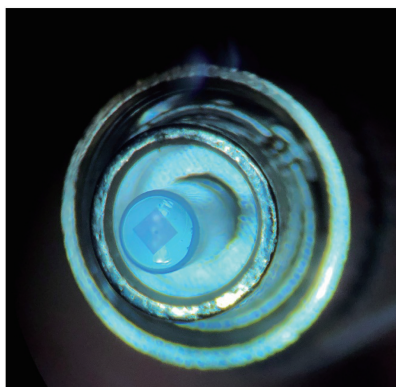


图7 直接压印在光纤 FC/PC 插头表面的
纳米抗反射结构

Fig. 7 Nano antireflection structure directly imprinted on
top surface of an FC/PC plug

同一聚合物层时的插入损耗。通过比较具有和没有纳米结构的区域之间的插入损耗,计算了具有三种不同聚合物的样品的反射率,并与 FDTD 模拟计算的理论反射率作比较,如图 8 所示。使用光纤二次涂敷 UV 树脂(polymer 2)的样品在 1550 nm 时具有 0.157% 的反射率,是实验测得的最低反射率值,而使用 NOA63(polymer 3)的样品在 1490 nm 时得到最小反射率为 0.638%。对于将纳米抗反射结构直接压印在光纤 FC/PC 插头上的情况,在工作波长为 1550 nm 的情况下,添加了纳米抗反射结构后,回损由 -14.9 dBm 降低到 -27.2 dBm,对应的反射率由 3.23% 降低到 0.191%。

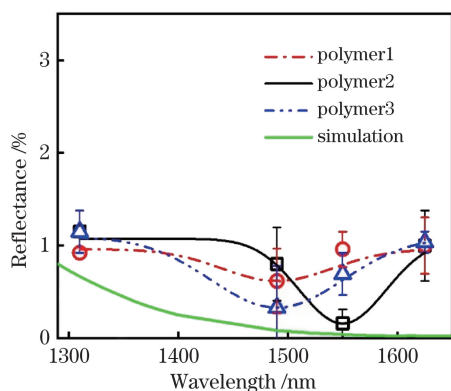


图8 测量反射率与 FDTD 方法计算的反射率比较。样品上印有三种不同的 UV 固化聚合物:Ormostamp® (polymer 1)、二次纤维涂层(polymer 2)和 NOA63 (polymer 3)

Fig. 8 Comparison of measured reflectance with that calculated by FDTD method. The samples were imprinted with three different UV-curable polymers: Ormostamp® (polymer 1), secondary fiber coating (polymer 2) and NOA63 (polymer 3)

4 分析与讨论

数值模拟结果表明,反射率在 1300~1650 nm 之间单调减小,在 1550 nm 时值为 0.039%。实验结果显示三种聚合物材料并没有获得理论计算所预期的宽带抗反射率窗口。更换纳米压印使用的聚合物仅改变波长范围内的最小反射率,而反射谱带宽几乎保持不变。我们认为,主要原因是 UV 固化光学环氧树脂的折射率 n 实质上遵循 Cauchy 公式:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

折射率随波长 λ 下降,其中 A 、 B 、 C 为常数,但在仿真中,折射率被近似为常数。在反射率对折射率变化敏感的波长范围内,不同聚合物的样品之间以及实验测量和理论结果之间也存在差异。同时注意到,在 1310 nm 和 1650 nm 的波长情况下,反射率对于折射率变化的灵敏度较低,这与模拟理论计算不同波长下反射率 R 相对于折射率 n 的百分比变化相符:在 1310 nm 时, $(\Delta R/R)/(\Delta n/n) = 5.6$,而在 1550 nm 时此变化率为 21.4。在后续工作中,将标定后的光学高聚物的折射率输入至 FDTD 优化过程中,将会极大地改善抗反射的带宽。

除宽带光学抗反射特性外,蛾眼纳米结构的另外一个特点是自清洁和抗污染特性。近年来,蛾眼纳米结构在太阳能电池表面和触摸显示屏方面均有应用^[16]。水接触角很大程度上影响了结构的亲水性,可通过测量水滴在结构表面的铺展夹角来直接反映结构表面的亲水性。当水接触角较大时,结构面的表面能低,亲水性差,使得环境中的水汽或含水微粒难以附着在结构表面,大大减少了结构表面的尘埃附着,起到了抗污染的效果^[18]。本研究对优化的纳米柱结构进行了水接触角测量。图 9 显示在有纳米结构的表面,水接触角有明显改善,相对没有纳米结构的表面水接触角 85.9°,有纳米结构表面的水接触角可提高到 111.0°。通常当接触角大于 100° 时,表面防粘抗污染的水平均被视为较优。对微光学表面,表面尘埃的吸附会影响通光效率,此特性将有益于提高通光效率的工作稳定性。

5 结 论

提出了一种光纤通信中使用的抗反射纳米结构。采用基于有限时域差分(FDTD)方法的多目标优化算法寻找波长范围为 1250~1650 nm 时的最佳结构参数。该算法在由纳米柱排列方法、半径、高

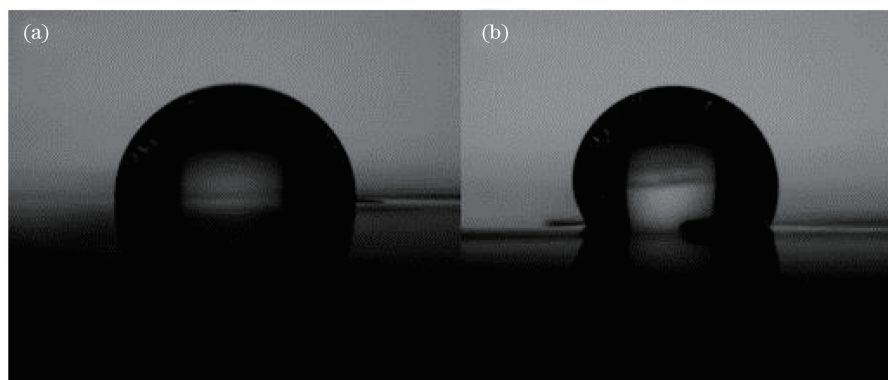


图9 水接触角测量。(a)没有蛾眼纳米结构的表面接触角为 85.9° ;(b)蛾眼纳米结构的表面接触角为 111.0°

Fig. 9 Measurement of water contact angle. (a) Contact angle without moth-eye nanostructure is 85.9° ;
(b) contact angle with moth-eye nanostructure is 111.0°

度、周期等参数组成的参数集范围内进行完整的搜索,获得的最优纳米结构参数为:柱半径为250 nm,高度为350 nm,周期为700 nm,等边三角形排列。然后,按照设计参数制备了一系列光学UV固化聚合物的样品,通过纳米压印工艺将纳米结构转移到玻璃基板上。制备得到的样品通过实验测得的1550 nm波长处最小反射率仅为0.157%。纳米结构抗反射表面可直接集成到注塑模制或纳米压印微光学元件表面上,以显著降低光学表面的反射率,有效提高光纤通讯器件中光传输效率,同时该优化纳米柱结构表面具有较好的自清洁和抗污染能力。借助纳米压印技术,用于抗反射的纳米结构能够集成至晶圆级(WLO)微光学器件的制造工艺中,并且有望在不久的将来成为微光学元件不可分割的功能层。

参 考 文 献

- [1] Dimitrios A, Paraskevas B, Dimitrios K, et al. Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8991: 89910D.
- [2] Wohlfeld D, Lemke F, Froening H, et al. High-density active optical cable: from a new concept to a prototype[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7944: 79440L.
- [3] Luo J W, Liu K, Wei Q, et al. Integrated chip for simultaneous transmission and reception in optical communication links[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806003.
罗俊伟, 刘凯, 位祺, 等. 光通信链路中集成芯片的收发一体工作[J]. 光学学报, 2019, 39(8):0806003.
- [4] Voelkel R, Gong L, Rieck J, et al. Wafer-level micro-optics: trends in manufacturing, testing, packaging, and applications[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8557: 855702.
- [5] Rossi M, Rudmann H, Marty B, et al. Wafer-scale micro-optics replication technology[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5183: 148-154.
- [6] Wilson S J, Hutley M C. The optical properties of "moth eye" antireflection surfaces[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1982, 29(7): 993-1009.
- [7] Guo C C, Ye W M, Yuan X D, et al. Research on reflection characteristics of sub-wavelength gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3272-3276.
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 等. 亚波长光栅反射特性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12):3272-3276.
- [8] Chou S Y. Nanoimprint lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 1996, 14(6): 4129-4133.
- [9] Dong T T, Fu Y G, Chen C, et al. Study on bionic moth-eye antireflective cylindrical microstructure on germanium substrate[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522004.
董亭亭, 付跃刚, 陈驰, 等. 锗衬底表面圆柱形仿生蛾眼抗反射微结构的研制[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522004.
- [10] Chiu C H, Yu P C, Kuo H C, et al. Broadband and omnidirectional antireflection employing disordered GaN nanopillars[J]. Optics Express, 2008, 16(12): 8748-8754.
- [11] Li X C, Li J S, Chen T, et al. Periodically aligned Si nanopillar arrays as efficient antireflection layers for solar cell applications[J]. Nanoscale Research Letters, 2010, 5(11): 1721-1726.
- [12] Ji S, Park J, Lim H. Improved antireflection properties of moth eye mimicking nanopillars on transparent glass: flat antireflection and color tuning[J]. Nanoscale, 2012, 4(15): 4603-4610.

- [13] Sun C H, Jiang P, Jiang B. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 061112.
- [14] Ho Y H, Liu C C, Liu S W, et al. Efficiency enhancement of flexible organic light-emitting devices by using antireflection nanopillars[J]. Optics Express, 2011, 19(S3): A295.
- [15] Lin C R, Liu M C, Chiu Y C, et al. Output power enhancement of white organic light-emitting diodes via a nanopatterned substrate generated by a monolayer of nanospheres[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(9): 093101.
- [16] Tan G J, Lee J H, Lan Y H, et al. Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications[J]. Optica, 2017, 4(7): 678-683.
- [17] Cho B J, Park J S, Hwang J M, et al. Suppression of reflection peaks caused by moth-eye-type nanostructures for antireflection applications studied by using FDTD simulation[J]. Journal of Information Display, 2017, 18(3): 137-144.
- [18] Zhu Z X. Hydrophilicity, wettability and contact angle[J]. Membrane Science and Technology, 2014, 34(2): 1-4.
- 祝振鑫. 膜材料的亲水性、膜表面对水的湿润性和水接触角的关系[J]. 膜科学与技术, 2014, 34(2): 1-4.