

引用格式: LIU Jun-cheng, SUN Tian-yu, JIA Hui-min, *et al.* Process Research of Optical Inverted Cone for Interlayer Coupling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1223003

刘俊成, 孙天玉, 贾慧民, 等. 用于层间耦合的绝热光学倒锥工艺研究[J]. *光子学报*, 2019, **48**(12): 1223003

# 用于层间耦合的绝热光学倒锥工艺研究

刘俊成<sup>1,2</sup>, 孙天玉<sup>2</sup>, 贾慧民<sup>1</sup>, 王筱<sup>1,2</sup>, 唐吉龙<sup>1</sup>, 房丹<sup>1</sup>, 方铨<sup>1</sup>,  
王登魁<sup>1</sup>, 张宝顺<sup>2</sup>, 魏志鹏<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 理学院 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123)

**摘 要:** 针对光学倒锥窄尖的制备工艺困难的问题, 通过特殊设计掩膜版, 利用步进式光刻机, 经过一次步进, 对光刻胶进行两次连续的图案化处理, 突破紫外光刻机的分辨率极限, 制备出尖端接近 50 nm 的倒锥结构图案. 再对光刻胶进行回流处理, 解决其分层的问题, 保证了结构侧壁的光滑度及尖端的完整性. 在深硅刻蚀工艺中, 通过对刻蚀中各气体组分进行调整, 改善了锥形结构表面形貌, 使结构的均匀性和完整性得到提升. 最终得到了适用于层间耦合的尖端接近 50 nm 的光学倒锥.

**关键词:** 光学倒锥; 层间耦合; 步进式光刻; 光刻胶回流; 刻蚀工艺

**中图分类号:** TN256, TN252, TN366      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3788/gzxb20194812.1223003

## Process Research of Optical Inverted Cone for Interlayer Coupling

LIU Jun-cheng<sup>1,2</sup>, SUN Tian-yu<sup>2</sup>, JIA Hui-min<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1,2</sup>, TANG Ji-long<sup>1</sup>,  
FANG Dan<sup>1</sup>, FANG Xuan<sup>1</sup>, WANG Deng-kui<sup>1</sup>, ZHANG Bao-shun<sup>2</sup>, WEI Zhi-peng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in the preparation process of the optical inverted cone narrow tip, through a special design mask, the photoresist was subjected to two consecutive patterning processes by one stepping using a stepper. Breaking through the resolution limit of the UV lithography machine, an inverted cone structure pattern with a tip close to 50 nm was prepared. The photoresist was reflowed to solve the problem of layering, which ensures the smoothness of the sidewall of the structure and the integrity of the tip. In the deep silicon etching process, by adjusting the gas components in the etching, the surface morphology of the tapered structure is improved, and the uniformity and integrity of the structure are improved. Finally, an optical inverted cone with a tip close to 50 nm suitable for interlayer coupling is obtained.

**Key words:** Optical inverted taper; Interlayer coupling; Step lithography; Photoresist reflow; Etching process

**OCIS Codes:** 230.3120; 230.7370; 060.1810; 130.3120; 220.4241

## 0 引言

硅材料在室温条件下对光具有高的折射率( $n=3.42$ ), 以硅材料制备的线波导对光有很强的限制作用,

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos.61574022, 61674021, 11674038, 61704011), 高功率半导体激光器国家重点实验室基础, 长春理工大学创新基金资助项目和技术(Nos.XJJLG-2016-11, XJJLG-2016-14, XQNJJ-2018-18), NANOX 基金会(No.18JG01)

**第一作者:** 刘俊成(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子器件及工艺研究. Email: jcliu2018@sinano.ac.cn

**导师(通讯作者):** 贾慧民(1986—), 男, 实验师, 博士, 主要研究方向为半导体光电子材料与器件研究. Email: huiminjia01@163.com

**收稿日期:** 2019-05-17; **录用日期:** 2019-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

使得集成光路的密度得以增加,同时,硅材料具备成熟的制备工艺.因此,硅基集成光路拥有广泛的应用前景.当线波导直接与外部光学元件连接时,线波导与外部元件之间存在有效折射率失配的问题,导致光耦合效率较低.倒锥形绝热耦合器是解决这种光耦合效率较低问题的一种有效手段.这种耦合器要求倒锥的尖端小于 100 nm,绝热条件即可实现高效的耦合.MCNAB S J 等<sup>[1]</sup>在 2003 年,TSUCHIZAWA T 等<sup>[2]</sup>在 2005 年均成功使用电子束光刻(Electron Beam Lithography,EBL)制备出窄尖端宽度的倒锥结构.但电子束光刻存在成本高、制作周期长和不能满足大规模生产的缺点,严重限制了这种窄尖端宽度倒锥结构的实际应用,因此,如何利用传统光刻的微制造技术制备出这种窄尖端倒锥结构对推动其实际应用具有重要意义.由于传统紫外光刻的分辨率限制,采用传统光刻技术制备 100 nm 的尖端结构具有很大的挑战性.2012 年,TAKEI R 等<sup>[3]</sup>提出了一种使用 i-line 步进式光刻机经过两次对光刻胶进行图案化的方式,得到了尖端宽度远小于 100 nm 的锥形结构,经过测试得出传输损耗仅为 0.55 dB.2015 年,MAEGAMI Y 等<sup>[4]</sup>提出了在 Si 线波导和 SiON 二次波导之间插入 SiO<sub>2</sub> 间隔物的锥形结构模斑尺寸转换器(Spot-Size Converters,SSC),通过 SSC 实现了 TE 模式 1.45 dB 和 TM 模式 1.50 dB 的低损耗,以及光纤到芯片耦合的偏振相关.

III/V 材料在硅材料上的集成一直以来都是一个活跃的研究领域,因为它可以将低损耗的硅无源器件与直接带隙的有源器件(如激光器、探测器和光放大器)相结合,并异质集成和兼容了有源无源芯片本身的材料的优势发挥器件性能的最大化.研究表明,异质集成有源器件的性能相比单独的有源器件性能更为优异,因此该技术是解决目前微波光子瓶颈的关键技术.为了将光有效的耦合到波导并传播到光电探测器,2012 年,WANG Qian 等<sup>[5]</sup>提出并设计了一种新型 Si/III-V 异质集成结构,通过将 III-V 半导体层直接键合到绝缘衬底上的硅(Silicon-On-Insulator,SOI)层并被蚀刻以形成多个不同的锥形结构,在 100 nm 厚的有源区中实现了约 24% 的光限制,进而实现有效的光放大/吸收.2013 年,KURCZVEIL G 等<sup>[6]</sup>设计了两种混合硅锥形结构并研究了其光学特性,通过晶圆键合的方法将硅波导与 III/V 波导连接,通过这两种结构成功将光学模式从硅波导转换为混合硅-III/V 波导,并测得两种锥形的损耗测量仅为每锥度 0.2~0.5 dB.2016 年,KO Y H 等<sup>[7]</sup>实现了一种与横向双锥结构集成的波导光电探测器,该器件采用横向锥形结构,使锥形的有效折射率逐渐变化,实现了 0.3 dB 的低偏振相关损耗和 0.7 A/W 的高响应度.因此,开展硅基绝热光学倒锥对 III/V 材料在硅材料上的集成具有重要意义和广泛的应用前景.

本文介绍了一种利用步进式光刻机曝光原理,借助回流、干法刻蚀手段,突破光刻机的光刻分辨率极限(500 nm),制备出满足绝热条件、侧壁形貌平整、尖端接近 50 nm 的短长度光学倒锥结构.

## 1 层间耦合绝热光学锥理论

光从一个波导向另一个波导传递时,若要得到 100% 的功率传输,需要完美的光模式匹配,这便要求两个波导的有效折射率相同,且耦合长度恰好等于完成 100% 功率传输的距离,但实际上耦合长度难以准确确定,而倒锥形绝热耦合器可以很好地解决该问题.倒锥形绝热耦合器无需定义精确功率传输长度,只需要足够的长度来保证绝热条件<sup>[8-11]</sup>.

### 1.1 光模式匹配原理

对于由两种不同材料组成的传统定向耦合器,由于不同材料的有效折射率不同而导致两个波导的折射率不匹配,因此需要精确设计两个波导的尺寸,从而达到波导之间折射率匹配的目的.但在实际生产中,尺寸稍有变化就会导致折射率匹配无法实现.倒锥形具有较小的线性斜率可使波导宽度缓慢减小,以确保光学模式的绝热演变,随着波导宽度的减小,有效折射率会减小<sup>[12-15]</sup>.

当在波导 1 中引入一个锥形结构,随着波导宽度的减小有效折射率  $n_1$  随之减小,并与波导 2 的有效折射率  $n_2$  在某一点处相等,如图 1 所示.整个过

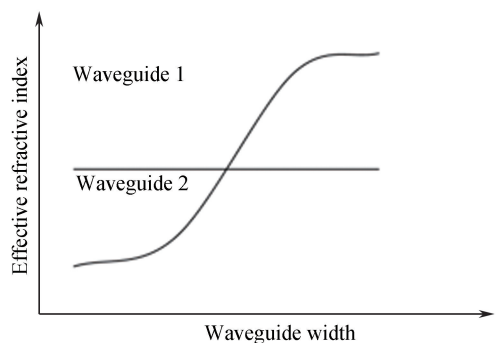


图 1 有效折射率随波导宽度变化  
Fig.1 Effective refractive index varies with waveguide width

程分为三个阶段,第一阶段,波导 1 的有效折射率  $n_1$  远大于波导 2 的有效折射率  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ),不发生光的传递;第二阶段,波导 1 与波导 2 的有效折射率大小接近 ( $n_1 \approx n_2$ ),发生光功率传递,光从一个波导传递到另一个波导;第三阶段,随着波导 1 的宽度继续减小,有效折射率  $n_1$  也随之降低,此时波导 1 的有效折射率  $n_1$  远小于波导 2 的有效折射率  $n_2$  ( $n_1 < n_2$ ),光不会再发生传递.因此,整个过程中光仅在两波导有效折射率相等时,由波导 1 传递到波导 2,并且一直被限制在波导 2 中而不会再传递回去.

## 1.2 光学绝热条件

满足绝热条件的锥形结构可以改变光学模式的尺寸和形状,使两个具有不同横截面的波导之间实现高效率的耦合.绝热条件要求锥形横截面的尺寸非常缓慢地增加/减小,因此绝热锥形通常都有较长的长度,而较长的锥形会降低设备密度并导致更多的传输损耗.为了实现光子芯片低损耗、高密度的集成,有效地压缩光学倒锥的长度十分关键.

实现短长度的绝热锥形需要满足条件<sup>[16]</sup>

$$\theta = \alpha \frac{\lambda_0}{2Wn_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中, $\alpha$  为引入的一个常数, $\theta$  为锥形尖端的半角 ( $\theta < 90^\circ$ ), $\lambda_0$  为真空中的波长, $n_{\text{eff}}$  为模式的有效指数, $W$  为锥形的宽度.当  $1 \leq \alpha \leq 1.4$  时,锥形可以实现 98% 以上的高透射率.并且当锥形的宽度  $W$  固定,随着  $\alpha$  的增大,锥形的半角  $\theta$  也会增大,因此锥形的长度会随之逐渐减小.

用于层间耦合的光学倒锥不但需要满足绝热条件,尖端的宽度同样也需要注意.在两层结构中存在过渡损耗和交叉串扰,低的过渡损耗需要两个波导彼此接近,而低的交叉串扰则需要两个波导尽量远离,因此难以选择适当的层间距离.但拥有窄尖端的光学倒锥可以有效地避免串扰,从而有效降低层间距离,因此更适合当前高度集成化的要求.此外窄尖端的光学倒锥还可以有效减少回波的产生,提供高效、偏振不敏感和宽带宽的光学耦合.

基于上述理论,倒锥形绝热耦合器可以简单而又高效地实现层间耦合.因此对于尖端小于 100 nm,横截面尺寸为  $4 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$  的锥形,其长度为 50  $\mu\text{m}$  时,即可满足绝热条件.

## 2 实验方案

本实验中选用步进式 I7 光刻机进行最小线宽接近 50 nm 的倒锥结构的光刻,光刻后采用深硅干法刻蚀对 SOI 片进行刻蚀制备出倒锥结构,这种制备方法具有成本低、制作周期短、可大规模制备等优势,对窄尖端倒锥结构的应用有推动作用.

选用 S1805 型光刻胶以旋涂的方式作为掩膜层.由于所制备的锥形尖端宽度接近 50 nm,而常见的 AZ 系列光刻胶最小厚度均在 1  $\mu\text{m}$  以上,过大的纵横比会对后续工艺产生不利影响.而 S1805 型光刻胶在经过前烘后最低厚度可以达到 500 nm 以下,适合于本实验.

本实验利用步进式 I7 光刻机的步进功能通过两次对光刻胶进行图案化得到所需锥形.首先对掩膜版进行对准,将掩膜版固定在掩膜台上,掩膜台带动掩膜版进行移动,通过同轴对位系统与掩膜版上的标记信号,掩膜版的中心与投影镜头中心同轴对准,并且之后掩膜版不再移动.其次将旋涂好光刻胶的 SOI 片送入光刻设备,样品会低速旋转,通过机械和激光来定位样品中心及切边的位置,再送入到样品台,使样品与投影镜头中心同轴对准.经过光刻板与样品分别对准后,开始进行曝光实验,步骤如下:1) 设定如图 2(c) 长度为  $2L$  的第一次曝光区域;2) 设定步长为  $L$  的步进距离,在第一次曝光完成后,样品台由激光引导带动 SOI 片向右位移距离  $L$ ,此时区域①中的四边形图案就可以精确地套在区域②中的图案上,如图 2(d);3) 进行第二次曝光,除去区域②图案上覆盖在四边形区域的光刻胶,得到所需锥形结构,如图 2(e).通过这种步进的方法,样品在第一次曝光结束后无需退出仪器,而是直接通过激光的引导进行第二次曝光,避免了一般套刻工艺中样品两次进出仪器,以及套刻标记对准时的误差.对光刻后的 SOI 片进行回流处理,回流可以改善光刻胶表面侧壁的平整性,以保证光刻胶上的图形转移到 SOI 片上时,也可以得到一个侧壁较为光滑的锥形.最后采用深硅刻蚀完成图形的转移,气体选择为  $\text{SF}_6$ 、 $\text{C}_4\text{F}_8$ 、 $\text{O}_2$ .

为探究分析倒锥结构的制备结果,利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对锥形结构进行观察并对刻蚀结果进行分析.

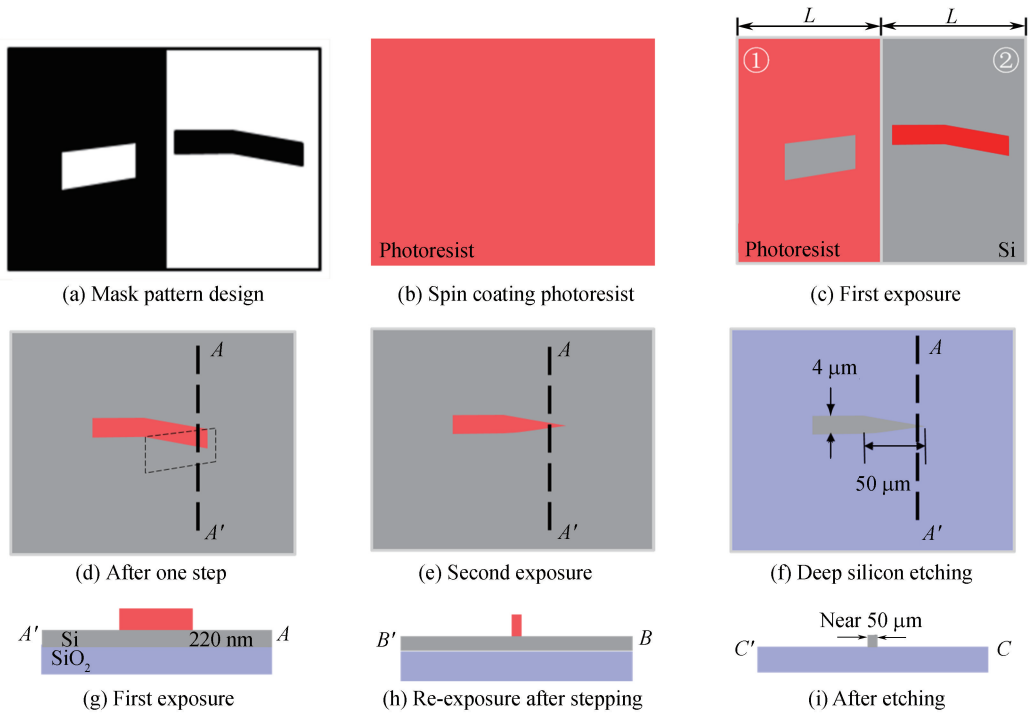


图2 掩膜版图案设计及实验流程示意[图(g)~(i)对应于图(d)~(f)侧视图(仅显示尖端变化)]

Fig.2 Schematic pattern and experimental flow diagram

[Fig.(g)~(i)corresponds to Fig.(d)~(f)side view (only shows tip changes)]

### 3 结果与分析

#### 3.1 光学倒锥的侧壁形貌研究

在光子学中平滑的侧壁通常被用于低损耗波导中.在光刻工艺后,光刻胶侧壁的不平滑会对下一步的刻蚀工艺带来不利影响<sup>[17-19]</sup>.通过短时间热回流处理的方法,可以实现平滑的侧壁.光刻胶回流处理是针对粘弹性材料的粘度随时间-温度而改变的特性所提出的处理方法,该过程可理解为光刻胶的蠕变过程,蠕变由能量的不平衡而驱动.重力和光刻胶表面张力,导致了尖角、不平整的产生,热回流处理打破了光刻胶内部最初的能量平衡状态,迫使其发生蠕变来消除尖角,使其表面变得更加圆润从而达到降低表面粗糙度的作用.在经过回流处理后,光刻胶不均匀处将会变得平整.但过度的回流会导致光刻胶结构变形,因此设置合理的回流温度和时间极为重要.通过设计不同回流温度和时间 的 4 组实验,对回流时间与温度对光刻胶的不平整以及分层的影响进行研究,所设计 4 组实验参数如表 1.

表 1 所选实验参数

Table 1 Selected experimental parameters

Group	Time/s	Temperature/°C
①	0	0
②	60	100
③	60	160
④	105	160

不同回流温度和回流时间对光刻胶几何形状的影响,可以通过分层现象的缓解程度以及边缘平滑度的变化来判断.通过 SEM 对样品进行观察,图 3(a)为未进行回流处理.这是由于在步进曝光过程中,重力及光刻胶的粘稠度会对图形产生一定的影响,并且在显影过程中光刻胶接触显影液后其表面变得湿润,致使其边缘处发生分层和不平整现象.

图 3(b)显示了回流时间为 60 s、回流温度为 100 °C 制备样品,与图 3(a)对比,可以看出短时间、低温(60 s、100 °C)处理对光刻胶的分层现象几乎没有改善,这是由于较低的温度不足以抵消光刻胶(粘弹性材

料)表面张力,以至于光刻胶的蠕变现象不明显,光刻胶形貌并未发生明显的改变.图 3(c)是使用回流时间为 60 s、回流温度为 160 °C 进行的实验,与图 3(b)相比,经过相同的时间,使用高温(160 °C)进行回流会使分层的层数明显减少,其原因在于相同的时间内,较高的回流温度使光刻胶拥有更高的流动性,光刻胶的表面张力减小,导致光刻胶与 SOI 的接触角变小,使得光刻胶分层现象得到缓解.图 3(d)是使用回流时间为 105 s、回流温度为 160 °C 进行的实验,与图 3(c)相比,在相同的高温(160 °C)下,经过较长的回流时间(105 s)后,分层显现完全消失并且光刻胶的边缘相较之前也更为平整.虽然在合适的温度下,光刻胶的形貌开始发生变化,但光刻胶的蠕变是一种动态过程,因此需要足够的回流时间,使回流处理引起的接触角逐渐减小至最佳形状.

从图 3 可以看出,光刻胶从初始形态回流到最终形态的整个动态变化过程中,其变化幅度是由温度和时间控制的.只有达到一定的温度,光刻胶的形貌才会开始发生改变;而足够的时间才能保证其持续变化直至所需的最终形态.

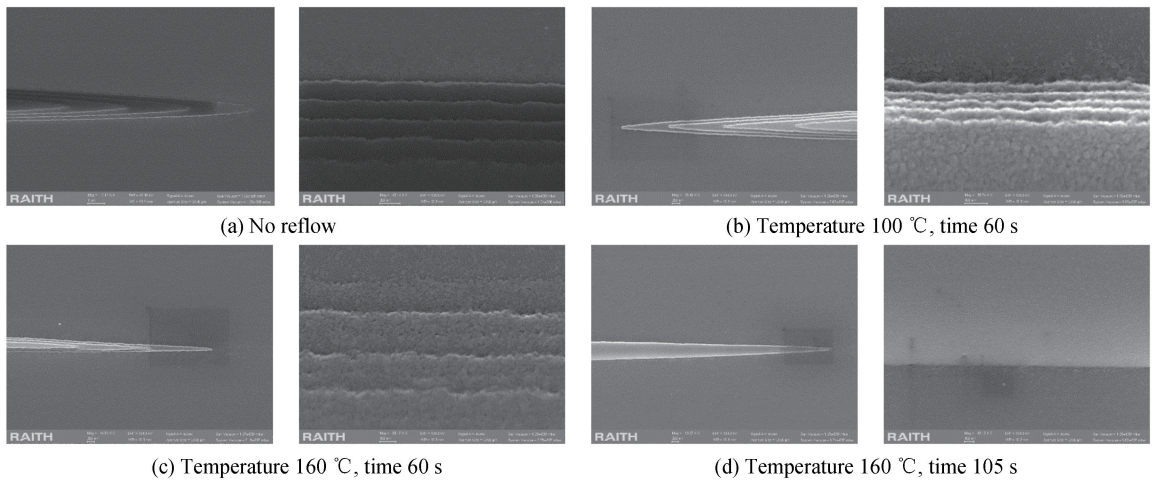


图 3 不同回流温度、回流时间对光刻胶的影响(每组显示锥形尖端部和末尾部的分层现象)  
Fig.3 Effect of different reflow temperatures and reflow times on the photoresist  
(Each group shows the stratification of the tapered tip and tail)

### 3.2 光学倒锥尖端宽度

对经回流处理的样品采用深硅刻蚀,将光刻胶上图案转移到 SOI 片上.深硅刻蚀具有污染小、刻蚀损伤小、精度高、均匀性好、陡直度好、刻蚀断面轮廓可控性高和刻蚀表面平整光滑等优势.其基本原理是,在真空低气压下,ICP 射频电源产生的射频输出到环形耦合线圈,以一定比例的混合刻蚀气体经耦合辉光放电产生高密度的等离子体;在下电极的 RF 射频作用下,这些等离子体对基片表面进行轰击,使基片图形区域的半导体材料的化学键被打断,并与刻蚀气体生成挥发性物质,以气体形式脱离基片,从真空管路被抽走<sup>[20-23]</sup>.

为实现较好平整度的光学倒锥结构的制备,刻蚀气体选择  $\text{SF}_6$ 、 $\text{C}_4\text{F}_8$ 、 $\text{O}_2$ .刻蚀气体中  $\text{SF}_6$  是主要的刻蚀气体, $\text{C}_4\text{F}_8$  可以在 SOI 片表面产生保护层,有效降低刻蚀侧壁的粗糙度  $\text{O}_2$  为辅助刻蚀气体,对图案化效果、刻蚀选择比会产生影响.

SEM 测试结果如图 4.图 4(a)为锥形区域,由插图可知刻蚀后锥形侧壁较为平整,可以用于光学倒锥结构实现较低的传输损耗.图 4(b)为尖端部分的放大图,尖端部分宽度测量接近 50 nm,并且尖端部分形貌较好,没有明显变形、扭曲现象,对有效减少回波、串扰的产生起到关键作用.图 4(c)为锥形后部 4  $\mu\text{m}$  宽平行波导区域,测量刻蚀的结果与实验设计的大小基本一致,锥形尖端形貌平整、结构完整.所制备的锥形结构可以很好地契合层间耦合的要求.

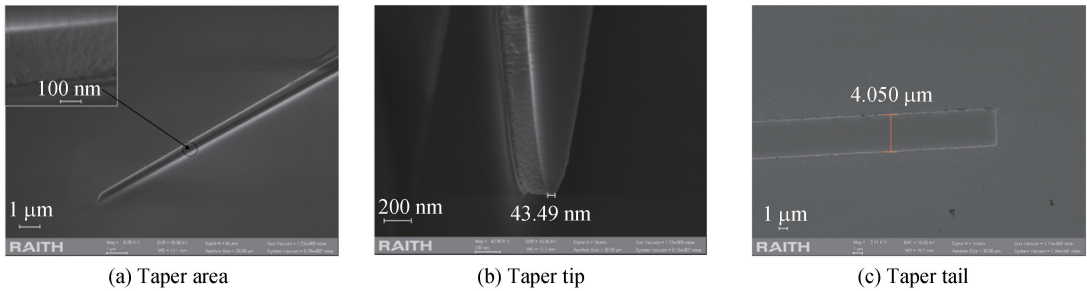


图4 绝热锥形 SEM 图像  
Fig.4 Adiabaticcone SEM image

## 4 结论

窄尖端的光学倒锥可有效地降低过渡损耗和交叉串扰带来的损耗,并提供高效、偏振不敏感和宽带宽的光学耦合,但光学倒锥窄尖对制备工艺是一个极大的挑战.本文中使⽤步进式光刻机,通过两次对同一光刻胶进行图案化处理,突破其 500 nm 的分辨率极限,得到了接近 50 nm 的超窄尖端.在进行 SEM 观察时,发现光刻胶发生分层以及形貌不平整现象,采用 160 °C 持续 105 s 的热回流处理手段,成功解决了该问题,并使锥形平整性得到了改善.在深硅刻蚀过程中,通过对不同气体流量调控,选定合适的刻蚀选择比,使刻蚀结果实现了较好的平整性和均匀性,制备出了尖端接近 50 nm 的短长度绝热光学倒锥.该研究解决了传统电子束光刻的制作周期长、成本高、不易大量生产等问题,为更高效地实现层间耦合奠定基础.

## 参考文献

- [1] MCNAB S J, MOLL N, VLASOV Y A. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(22): 2927-2939.
- [2] TSUCHIZAWA T, YAMADA K, FUKUDA H, *et al.* Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(1): 232-240.
- [3] TAKEI R, OMODA E, SUZUKI M, *et al.* Ultranarrow silicon inverse taper waveguide fabricated with double-patterning photolithography for low-loss spot-size converter[J]. *Applied Physics Express*, 2012, **5**(5): 052202.
- [4] MAEGAMI Y, TAKEI R, OMODA E, *et al.* Spot-size converter with a SiO<sub>2</sub> spacer layer between tapered Si and SiON waveguides for fiber-to-chip coupling[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16): 21287-21295.
- [5] WANG Qian, NG D K T, WANG Ya-dong, *et al.* Heterogeneous Si/III-V integration and the optical vertical interconnect access[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(15): 16745-16756.
- [6] KURCZVEIL G, PINTUS P, HECK M J R, *et al.* Characterization of insertion loss and back reflection in passive hybrid silicon tapers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, **5**(2): 6600410.
- [7] KO Y H, CHOE J S, HAN W S, *et al.* Low polarization dependent loss of InP-based waveguide photodetector integrated with spot-size converter for 100Gb/s coherent receiver [C]. *Optical Components and Materials XIII*, International Society for Optics and Photonics, 2016, **9744**: 16.
- [8] SUN Xian-kai, HIS CHUN L, YARIV A. Adiabaticity criterion and the shortest adiabatic mode transformer in a coupled-waveguide system[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 280-282.
- [9] TSENG Shuo-yen. Counteradiabatic mode-evolution based coupled-waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(18): 21224-21235.
- [10] SHANG K, PATHAK S, GUAN B, *et al.* Low-loss compact multilayer silicon nitride platform for 3D photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16): 21334-21342.
- [11] YARIV A, SUN Xian-kai. Supermode Si/III-V hybrid lasers, optical amplifiers and modulators; A proposal and analysis[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9147-9151.
- [12] SACHER W D, MIKKELSEN J C, DUMAIS P, *et al.* Tri-layer silicon nitride-on-silicon photonic platform for ultra-low-loss crossings and interlayer transitions[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(25): 30862-30875.
- [13] SUN Xian-kai, YARIV A. Engineering supermode silicon/III-V hybrid waveguides for laser oscillation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, **25**(6): 923-926.
- [14] DANGEL R, LA PORTA A, JUBIN D, *et al.* Polymer waveguides enabling scalable low-loss adiabatic optical coupling for silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, **24**(4): 1-11.
- [15] HOFRICHTER J, CZORNOMAZ L, HORST F, *et al.* A mode-engineered hybrid III-V-on-silicon photodetector[C]. 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), IEEE, 2015, **7341915**: 1-3.
- [16] FU Yun-fei, YE Tong, TANG Wei-jie, *et al.* Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper[J]. *Photonics*

- Research, 2014, **2**(3): A41-A44.
- [17] PORKOLAB G A, APIRATIKUL P, WANG Bo-han, *et al.* Low propagation loss AlGaAs waveguides fabricated with plasma-assisted photoresist reflow[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7733-7743.
- [18] KIRCHNER R, GUZENKO VA, VARTIAINEN I, *et al.* ZEP520A—A resist for electron-beam grayscale lithography and thermal reflow[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, **153**: 71-76.
- [19] KIRCHNER R, SCHLEUNITZ A, SCHIFT H. Energy-based thermal reflow simulation for 3D polymer shape prediction using Surface Evolver[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, **24**(5): 055010.
- [20] VLASOV Y A, MCNAB S J. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(8): 1622-1631.
- [21] BELLEGARDE C, PARGON E, SCIANCALEPORE C, *et al.* Improvement of sidewall roughness of submicron SOI waveguides by hydrogen plasma and annealing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(7): 591-594.
- [22] BELLEGARDE C, PARGON E, SCIANCALEPORE C, *et al.* Improvement of sidewall roughness of sub-micron silicon-on-insulator waveguides for low-loss on-chip links[C]. Silicon Photonics XII, International Society for Optics and Photonics, 2017, **10108**: 16.
- [23] PORKOLAB G A, APIRATIKUL P, WANG Bo-han, *et al.* Low propagation loss AlGaAs waveguides fabricated with plasma-assisted photoresist reflow[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7733-7743.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos.61574022, 61674021, 11674038, 61704011), the Foundation of State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, the Innovation Foundation of Changchun University of Science and Technology (Nos.XJJLG-2016-11, XJJLG-2016-14, XQNJJ-2018-18), the Foundation of NANOX (No.18JG01).