

# 基于纳米压印技术分布反馈激光器阵列的 ONU 光源研究

陈 鑫<sup>1</sup> 赵建宜<sup>1,2\*</sup> 周 宁<sup>2</sup> 曹明德<sup>2</sup> 黄晓东<sup>2</sup> 刘 文<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 华中科技大学光学与电子信息学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

<sup>2</sup> 光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074; <sup>3</sup> 中国科学技术大学先进技术研究院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 利用纳米压印工艺及对接生长工艺制作了基于分布反馈(DFB)激光器阵列的适用于波分复用光无源网络(WDM-PON)光网络单元(ONU)的低成本光源芯片。器件使用单片集成多模干涉器进行合波输出。测试结果显示,器件平均阈值小于 10 mA,边模抑制比大于 40 dB,波长调谐范围大于 10 nm,出光功率大于 0.2 mW。

**关键词** 光学制造;纳米压印;半导体激光器;单片光子集成

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1113001

## Research of Distributed Feedback Laser Array Using as ONU Light Sources Based on Nanoimprint Lithography

Chen Xin<sup>1</sup> Zhao Jianyi<sup>1,2</sup> Zhou Ning<sup>2</sup> Cao Mingde<sup>2</sup> Huang Xiaodong<sup>2</sup> Liu Wen<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>3</sup> Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Low cost optical network unit (ONU) light sources based on tunable distributed feedback (DFB) laser array using for wavelength division multiplexing-passive optical network (WDM-PON) are fabricated by nanoimprint lithography (NIL) and butt-joint regrowth (BJR). The multi-mode interference coupler (MMI) is used as output device for the monolithic integrated device. The tested results indicate that, the threshold current is less than 10 mA, side mode suppression ratio (SMSR) is higher than 40 dB, tunable range is wider than 10 nm and output power is larger than 0.2 mW.

**Key words** optical fabrication; nanoimprint; semiconductor lasers; monolithic photonic integration

**OCIS codes** 130.3120; 130.5990; 050.2770; 060.1810

## 1 引 言

随着互联网的快速发展,人们对接入带宽的需求越来越大。传统的电信号接入的方式已经渐渐不能满足人们日益增长的带宽需求。光纤通信具备通

信容量大、质量高、性能稳定、防电磁干扰等诸多优点,已经在长途骨干网中取得了不可撼动的地位。随着通信技术的发展以及人类社会的进步,光纤通信也随着互联网的发展逐步进入接入网领域。目前

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-24

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603)、国家 863 计划(2011AA010304, 2011AA010306)、武汉市晨光计划(20130701040100330)

作者简介: 陈 鑫(1987—),女,博士研究生,主要从事光电子器件设计与制造方面的研究。

E-mail: xin.chen2@accelink.com

导师简介: 刘 文(1960—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事光通信系统及器件方面的研究。

E-mail: liuwen.316@163.com

\* 通信联系人。E-mail: Jianyi.zhao@accelink.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

接入网的无源光网络(PON)技术主要分为两大类:基于时分复用无源光网络(TDM-PON)和基于波分复用无源光网络(WDM-PON),其中,TDM-PON的带宽为用户共享,实质上限制了每个用户的可用带宽。而WDM-PON技术,结合了WDM技术和PON拓扑结构的优点,实际是虚拟的点对点的通信,用户带宽独立,是一种高性能的接入方式。因此可以说WDM-PON是满足传输网络带宽需求急剧增加的最佳解决方案<sup>[1]</sup>。

光网络单元(ONU)是WDM-PON的主要组成部分之一,从系统结构、成本、维护和器件管理等方面综合考虑,WDM-PON系统内的ONU应避免使用固定波长或波长选择性光源。目前,WDM-PON中实现ONU波长灵活匹配的方法主要有两种:1)实现光源“无色化”,即无色ONU;2)采用可调谐激光器。其中无色ONU包括基于宽谱光源的频谱分割技术<sup>[2]</sup>和无光源方案<sup>[3]</sup>,这是一种ONU与波长无关的方案。而另外一种基于可调谐激光器的ONU<sup>[4]</sup>,是根据需要为ONU动态分配波长,使得各ONU能够共享波长的方案,网络具有可重构性。目前无论是基于DFB阵列激光器型的可调谐激光器还是基于取样光栅的分布布拉格反射型(SGDBR)可调激光器都存在加工复杂,价格昂贵的问题,这极大的阻碍了WDM-PON系统的推广。

分布式反馈(DFB)激光器阵列在WDM-PON系统中具备十分特殊的地位,因为它不仅可以用作ONU单元的可调谐激光器光源亦可以作为光纤线路局端(OLT)的多频激光器光源。因此以DFB激光器阵列为突破口,可以同时解决WDM-PON系统局端与客户端光源,有效的降低研发难度,优化研发路线降低研发与生产成本。目前有多种方式制作DFB激光器阵列,以布拉格光栅公式中有效折射率与光栅周期这两个重要参数为区分可以将这些方式分作两类。直接改变光栅周期,包括多次双光束曝光法和电子束直写法等。其中多次曝光法工艺繁琐复杂,成品率相当低。电子束直写法功能强大,但是加工速率慢、价格昂贵、设备维护成本高。改变波导有效折射率包括直接改变激光器波导宽度<sup>[5]</sup>,使用选择区域生长技术改变波导厚度及组分进而改变材料折射率<sup>[6]</sup>。改变激光器波导宽度工艺简单,但是适用的范围有限,波导太宽器件阈值过高并可能产生多横模,波导太窄串联电阻过高,热效应明显,器件难以做到特性一致。选择区域生长法,涉及外延生长环节,制作难度高,工艺重复性不佳。

纳米压印技术是在1995年由美籍华裔科学家史蒂夫周首先提出的<sup>[7]</sup>,之后被广泛地运用于光电子器件的制作尤其是微纳结构的制作中。已经成功制作出光栅<sup>[8]</sup>、微环<sup>[9]</sup>、光子晶体<sup>[10]</sup>等诸多典型光子器件。纳米压印结合了电子束曝光与全息曝光两者共同的优势,具备加工精度高、加工速率快、成本低廉等优势。虽然用于压印的模板依然是主要依靠电子束曝光加工,但是模板可以重复使用,亦可以通过模板加工模板,因此十分适合大规模量产,成为光电子微纳加工领域十分具有潜力的手段。

本文主要围绕器件结构设计、有源波导与无源波导的对接耦合、光栅的压印制作等关键工艺进行了分析介绍。基于本课题组前期研制成功的多通道DFB激光器阵列<sup>[11]</sup>,利用对接生长技术低成本、大批量地实现了DFB激光器阵列与多模干涉器的单片集成,用作WDM-PON系统ONU端的可调谐光源。

## 2 器件设计

不同于OLT端的多频激光器,ONU端的DFB阵列型可调激光器只需要在某一时刻开启一个激光器,通过温控的方式,将激光器波长调谐到需要的波长上。因此控制难度相比于OLT端器件要简单方便的多,这也符合ONU端器件对芯片的要求。虽然依靠热效应的波长调谐速率相比于电调谐要慢很多,但是由于应用环境的不同,这个缺点在PON网络中并不严重。制作的芯片结构示意图如图1所示。

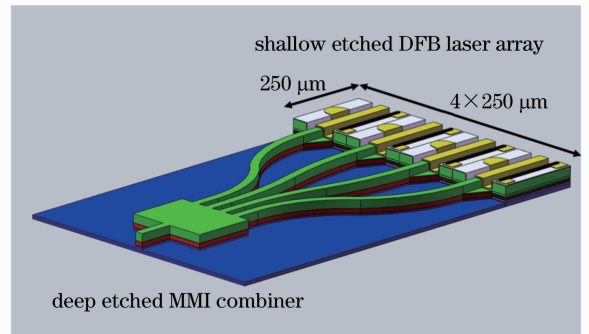


图1 集成器件原理图

Fig. 1 Schematic structure of the integrated device

可调激光器含有一个四通道DFB阵列激光器。为了提高芯片的单模成品率,采用 $\lambda/4$ 相移的光栅结构,光栅周期分别是239、239.5、240、240.5 nm。激光器腔长250 μm,相邻通道激光器间隔250 μm。在这里横向间距采用250 μm的主要原因是为了兼容前期用于制作分立DFB激光器阵列的纳米压印

模板。事实上在 ONU 端可调器件中,激光器横向间隔可以大幅度缩小至  $10\sim 20\ \mu\text{m}$ ,极大的减小器件尺寸。四通道 DFB 激光器阵列相邻通道波长间隔约 200 GHz,兼顾芯片总的波长覆盖范围与单颗芯片的热调谐范围,避免芯片工作在过高的温度点上。虽然掩埋异质节激光器阈值更小,芯片特性更好,但是加工难度也更大。相比而言浅脊波导激光器加工难度低,器件特性也很优异,能够满足单片集成器件的要求。因此本文中所采取的的激光器是使用浅脊型波导设计制作的,脊波导宽度为  $2.0\ \mu\text{m}$ 。

无源波导部分采用多模干涉结构(MMI)进行合波。MMI 具备结构简单、制作简便、低通道数时损耗低等优势,十分适合多通道 DFB 激光器的合波。在已报道的各种 DFB 阵列型可调激光器中,MMI 器件都是标准配置。为进一步减小器件尺寸,在无源波导区域采用如图 1 所示的深刻蚀脊型波导结构,相比于激光器部分的浅脊波导,深刻蚀波导对光场限制作用更强,波导允许的弯曲半径更小,更适合小型化器件芯片的制作。利用光束传播方法(BPM)仿真计算 MMI 的尺寸,经过优化得到,MMI 的 S-band 波导长  $1350\ \mu\text{m}$ ,合波部分宽  $20\ \mu\text{m}$ ,长度为  $270\ \mu\text{m}$ 。

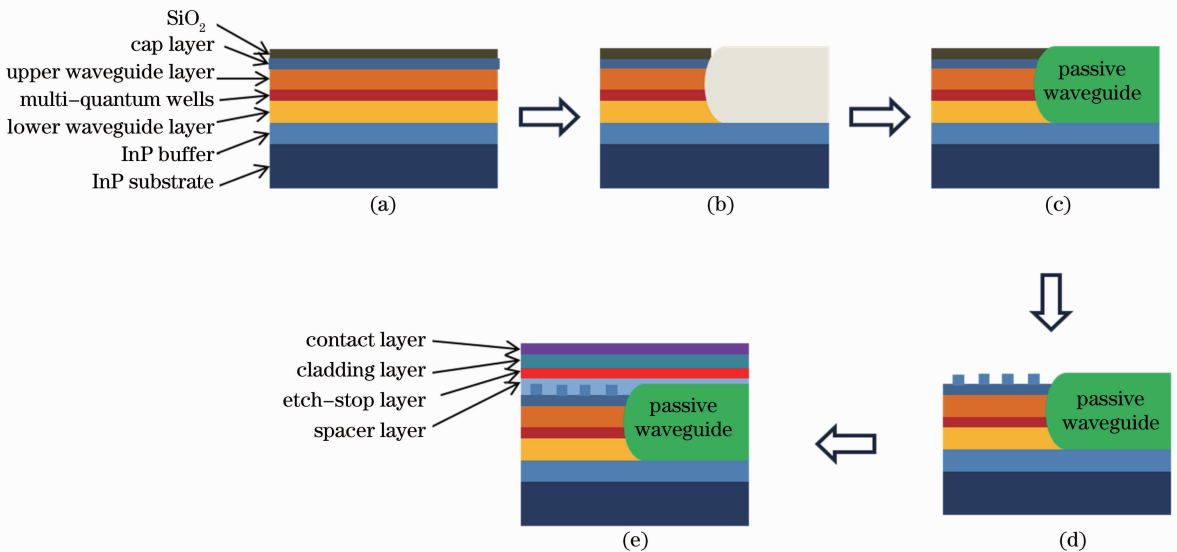


图 2 对接流程图

Fig. 2 Flow diagram of butt-joint growth

图 3 显示了完成对接外延生长的材料的荧光谱(PL)。可以看出在有源波导区域,PL 峰值为  $1.54\ \mu\text{m}$ ,非常适合激光器的制作。而在无源波导区域 PL 峰值为  $1.24\ \mu\text{m}$ ,能够有效的避免激光器出射光在无源波导区域的带间吸收。在有源无源波导交界面处,可以明显的观察到两个 PL 峰值,分别

### 3 器件的制作和关键工艺

器件制作流程如下:采用金属气相外延设备(MOVPE)在 InP 衬底上依次外延生长  $500\ \text{nm}$  厚的 InP 缓冲层, $100\ \text{nm}$  厚  $\text{In}_{0.755}\text{Ga}_{0.242}\text{As}_{0.525}\text{P}_{0.475}$  下波导层,6 个压应变  $\text{In}_{0.811}\text{Ga}_{0.189}\text{As}_{0.778}\text{P}_{0.222}$  量子阱,6 个  $\text{In}_{0.745}\text{Ga}_{0.255}\text{As}_{0.553}\text{P}_{0.447}$  垒层, $100\ \text{nm}$  厚  $\text{In}_{0.784}\text{Ga}_{0.216}\text{As}_{0.469}\text{P}_{0.531}$  上波导层以及  $20\ \text{nm}$  厚 InP 盖层。在一次外延片上,利用刻蚀分出有源区和无源区,通过对接生长技术耦合有源区和无源区;利用纳米压印技术在有源区上制作分布反馈光栅;掩埋光栅,利用自对准光刻技术制作无源波导和有源波导,和相应的后续工艺进行集成器件的制作。

#### 3.1 有源区和无源区的耦合

完成一次外延片的制作以后,需要采用对接生长技术进行有源无源材料的单片集成,如图 2 所示。在一次外延片上使用等离子增强气相沉淀(PECVD)技术沉积  $300\ \text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$ 。使用光刻技术定义无源波导区域,刻蚀该区域直至 InP 缓冲层[图 2(b)]。清洗基片,再次使用 MOVPE 设备在无源波导区域生长  $400\ \text{nm}$  厚 InGaAsP 无源波导芯层[图 2(c)]。

对应于有源区域及无源区域。相比于大面积均匀材料区域的 PL,交界面处 PL 半峰全宽没有明显展宽,说明对接面处材料质量良好。

#### 3.2 光栅制作

待完成材料生长以后,使用纳米压印技术在完成的外延材料上进行分布反馈光栅的制作[图 2(d)]。

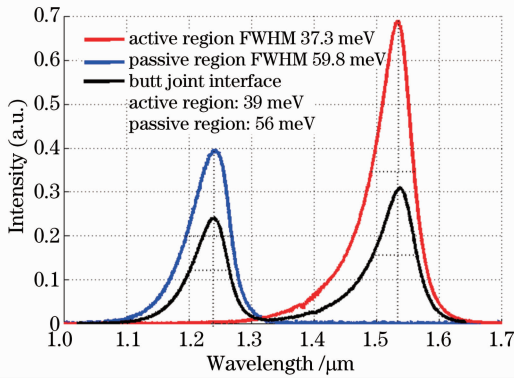


图 3 有源/无源区的荧光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectra of the active/passive region

在这里采用的是软模版热辅助紫外(UV)压印技术。传统的硬压印技术直接用硬质模板压印衬底容易因为杂质而损坏图形,严重时甚至会损坏模版及衬底。而软模版压印利用有机高分子聚合物作为中间介质转移图形避免了硬质的模版与衬底的直接接触,可以有效地提高压印质量,避免模版及衬底的损伤。具体的工艺过程如图 4 所示。

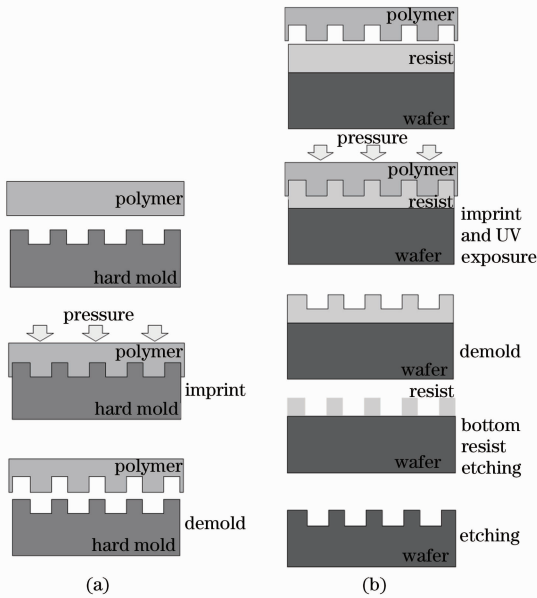


图 4 纳米压印流程。(a)软模板制作;(b)光栅压印  
Fig. 4 Nanoimprint process. (a) Fabrication of soft stamp; (b) grating fabrication

首先使用硬质模版通过热压印技术将图形转移到高分子聚合物软模板上。热压印温度为 120 °C,高于软模版的玻璃化转换温度,压印压强为 1.5 MPa,如图 4(a)所示。然后以转移了图形的软模板作为正式的压印模版。压印前,需要仔细清洗外延片,旋涂 190 nm STU-220 nm 压印胶。旋涂的压印胶厚度需要略大于模版图形深度。将软模版代

替硬质母模版压印至衬底上,将图形转移至压印胶中,如图 4(b)所示。压印温度为 70 °C,大于压印胶的玻璃化温度,小于软模版的玻璃化温度,压强为 1.5 MPa。由于纳米压印模板由电子束加工,因此可以轻易进行复杂光栅结构的制作。而对于纳米压印工艺本身来说模板图形的复杂度对其是透明的。由图 5(b)可以看出,压印制作的光栅形貌良好, $\lambda/4$ 相移区明显。

### 3.3 有源波导和无源波导制作

完成光栅制作以后,再次采用 MOVPE 对整个基片进行掩埋覆盖[图 2(e)],生长的材料包含 50 nm 厚 InP 间隔层,20 nm 厚刻蚀阻挡层  $\text{In}_{0.892}\text{Ga}_{0.108}\text{As}_{0.236}\text{P}_{0.764}$ ,1500 nm 厚 InP 包层及 200 nm 厚 InGaAs 接触层。完成的材料扫描电子显微镜(SEM)照片如图 5(a)所示。从图 5 中可以看出,有源无源波导材料界面质量良好[图 5(a)],有源区域掩埋光栅图形清晰[图 5(c)]。

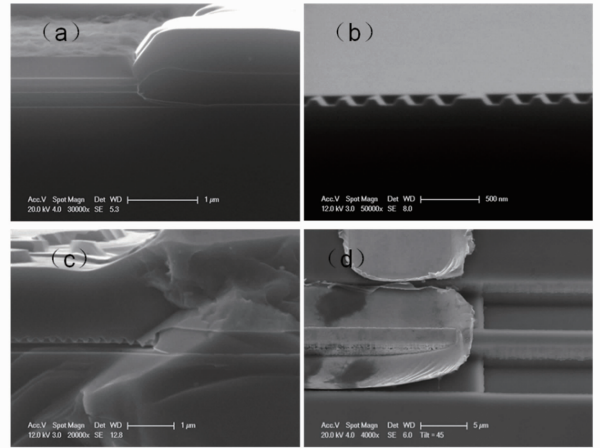


图 5 (a)对接界面;(b)压印制得的光栅;(c)掩埋光栅;  
(d)有源/无源区的浅/深刻蚀波导

Fig. 5 (a) Butt-joint interface; (b) grating fabricated by nanoimprint lithography; (c) burying grating; (d) shallow/deep etching waveguide in active/passive region

完成了材料准备以后,接下来通过一系列的光刻和刻蚀分别在有源区定义浅刻蚀的激光器波导,在无源区定义深刻蚀的 MMI 波导。在整个外延片上利用 PECVD 沉积  $\text{SiO}_2$ ,用自对准光刻技术,同时制作出激光器和 MMI 波导的  $\text{SiO}_2$  硬掩模。通过两次 InP 干法刻蚀,制作出 DFB 激光器的浅刻蚀波导和 MMI 的深刻蚀波导[图 5(d)]。完成波导刻蚀以后,生长  $\text{SiO}_2$  保护层保护无源波导区域并同时兼做电流阻挡层。使用光刻技术在激光器电极区域开窗,使用溅射技术及剥离工艺制作金属电极,减薄芯

片至 100  $\mu\text{m}$  后在背面溅射金属电极。完成全部芯片工艺以后将芯片解离成条状,在激光器端面及 MMI

端面分别镀上增透膜,再次解离最终完成颗粒芯片的制作。最终完成的器件显微镜照片如图 6 所示。

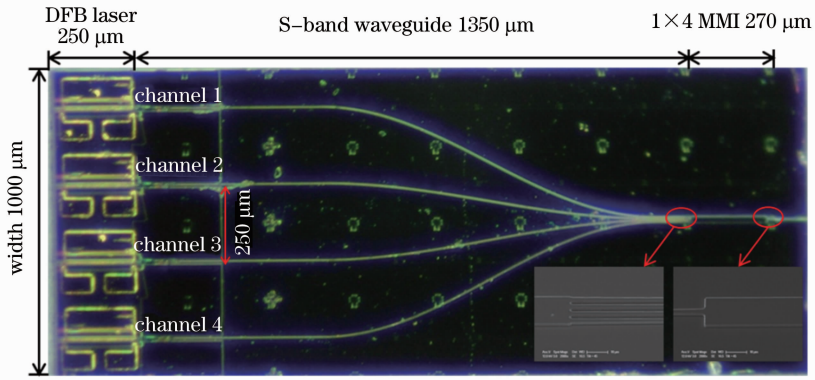


图 6 制得的集成器件实物图

Fig. 6 Optical microscope the fabricated integrated device

#### 4 芯片性能测试与分析

首先测试了器件的  $P-I$  曲线。由于 DFB 激光器采用  $\lambda/4$  相移结构光栅及双面增透膜结构,因此理论上从 DFB 激光器两侧の出光强度相等。所以可以通过同时测量 DFB 激光器侧  $P-I$  曲线[图 7(a)]及 MMI 侧  $P-I$  曲线[图 7(b)]的方式对器件特性进行表征。激光器阈值小于 10 mA,说明集成器件中激光器质

量良好和普通分立器件特性相似没有因为工艺问题出现退化。可以看出,从 MMI 端口出光功率较小,在假定激光器两个端面出光功率相同的情况下计算无源波导的损耗约为 13 dB,包括 MMI 固有损耗 6.5 dB,波导的传输损耗 2 dB~4 dB<sup>[12]</sup>,在无源和有源界面反射带来损耗约为 3 dB。

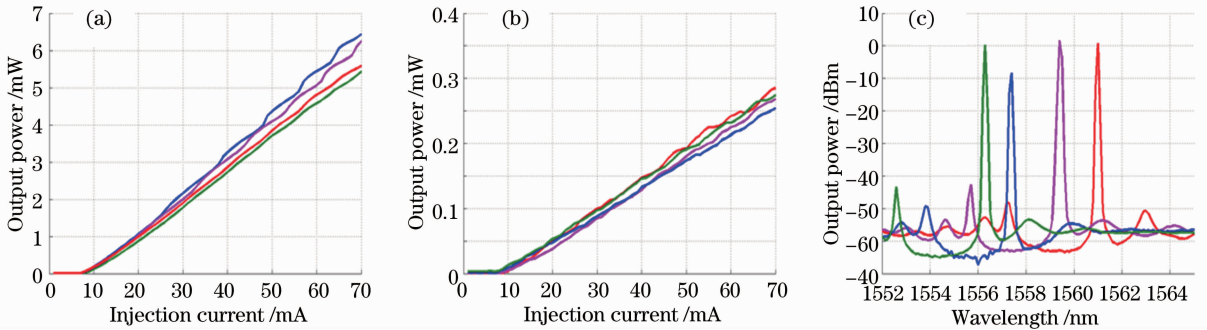


图 7 (a) DFB 端出光; (b) MMI 端出光; (c)集成器件激光光谱

Fig. 7 (a) DFB facet outputs; (b) MMI facet outputs; (c) lasing spectra of integrated device

接着对器件光谱进行了测试,为保证器件在高温工作时特性不劣化,测试条件为在 55  $^{\circ}\text{C}$  条件下,注入电流 70 mA。结果显示激光器激光光谱边模抑制比大于 40 dB,呈现良好的单模特性,通道间隔约为 1.6 nm,符合设计预期[图 7(c)]。不过从光谱以及  $P-I$  曲线中都可以明显地观察到与分立  $\lambda/4$  相移 DFB 激光器不一致的现象,这主要表现在两方面: $P-I$  曲线存在扭折;激光器出射光谱中激光模不是处于布拉格阻带正中。经过分析,认为这个主要是由于在制作过程中,无源波导区域与有源波导区域的界面处存在较为强烈的反射。该反射使 DFB

激光器偏离了双面镀增透膜的理想工作状态,因此使器件光谱质量出现下降。这从另一个方面也说明器件实际损耗应该是小于 13 dB 的,无源波导本身的器件质量要好于前述分析。

对于用作 ONU 端的可调谐激光器而言,最重要的指标就是器件的调谐范围及调谐特性。对此进行了测试,测试过程中,依次点亮 DFB 激光器阵列中的各个激光器,调整 TEC 控温温度进行热调谐,调谐范围为 25  $^{\circ}\text{C}$ ~55  $^{\circ}\text{C}$ ,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出在 25  $^{\circ}\text{C}$ ~55  $^{\circ}\text{C}$  的工作范围内,激光器能够实现 2.7 nm 左右的调谐范围,热调

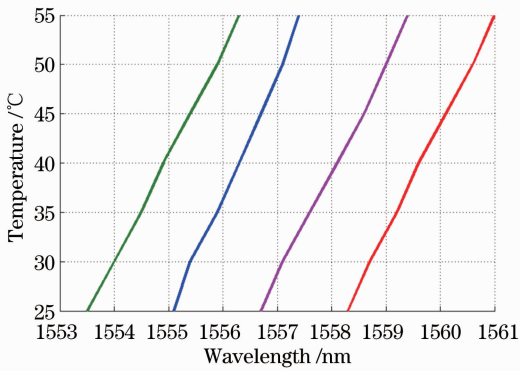


图 8 阵列激光器的调谐特性

Fig. 8 Tuning characteristics of laser array

谐效率约为  $0.09 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。因此 DFB 激光器阵列  $1.6 \text{ nm}$  的通道间隔足够器件实现准连续调谐。最终整个芯片在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内实现了约  $7.5 \text{ nm}$  的准连续调谐,在  $100 \text{ GHz}$  通道间隔的 WDM-PON 标准下,可以覆盖约 8 个通道。

综合上述测试结果,从原理上验证了使用纳米压印技术及对接生长技术制作低成本 DFB 激光器阵列型可调谐激光器的可行性<sup>[13]</sup>。使用纳米压印技术可以大批量地制作低成本的阵列激光器,这在以前是难以实现的。而基于体材料的对接生长技术,虽然涉及材料的二次外延,但是相比于基于量子阱结构的选择区域外延生长及量子阱混杂技术其成品率及性能都要好很多。因此结合上述两种技术,可以有效地解决目前基于 DFB 阵列型的可调谐激光器中多波长阵列激光器及有源无源材料单片集成这两大关键性问题,大幅度地提高芯片产量以及质量,降低芯片成本,推动 WDM-PON 技术的发展。在下一步工作中,为解决器件出光功率过小的问题,将在 MMI 波导输出端集成半导体光放大器对耦合输出光进行放大提高器件整体的出光功率,并且进一步增加 DFB 激光器数量至  $8\sim 12$  只,并适当地增加相邻 DFB 激光器之间的波长间隔,以完全覆盖 WDM-PON 中对 ONU 单元调谐范围的要求。同时大幅度减小相邻 DFB 激光器之间的物理间距,提高器件集成密度,增加单片晶圆的产量,进一步降低芯片成本。

## 5 结 论

利用纳米压印技术和对接生长技术制作了用作 WDM-PON 的 ONU 光源,纳米压印技术能够低成本、高可靠性地批量制作阵列激光器,基于体材料的对接耦合技术有效地单片集成有源无源材料,其中

多模干涉耦合器作为该集成器件的合波输出器件。测试结果显示,器件平均阈值小于  $10 \text{ mA}$ ,边模抑制比大于  $40 \text{ dB}$ ,波长调谐范围大于  $10 \text{ nm}$ ,出光功率大于  $0.2 \text{ mW}$ 。从原理上验证了使用纳米压印技术及对接生长技术制作低成本 DFB 激光器阵列型可调谐激光器 ONU 的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke, *et al.*. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access [J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(11): 737–758.
- 2 D J Shin, Y C Keh, J W Kwon, *et al.*. C/S-band WDM-PON employing colorless bidirectional transceivers and SOA-based broadband light sources [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005. PDP36.
- 3 G Cincotti, N Kataoka, N Wada, *et al.*. Sourceless colorless OCDMA-PONs [C]. Optoelectronics and Communication Conference, 2009. 1–2.
- 4 D Lavery, R Maher, D S Millar, *et al.*. Demonstration of  $10 \text{ Gbit/s}$  colorless coherent PON incorporating tunable DS-DBR lasers and low-complexity parallel DSP [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012. PDP5B.10.
- 5 Ma Li, Zhu Hongliang, Liang Song, *et al.*. A  $1.55\text{-}\mu\text{m}$  laser array monolithically integrated with an MMI combiner [J]. Chinese J Semiconductor, 2013, 34(4): 044007.
- 6 Zhang Can, Zhu Hongliang, Liang Song, *et al.*. Monolithically integrated 4-channel-selectable light sources fabricated by the SAG technology [J]. IEEE Photon Journal, 2013, 5(4): 400407.
- 7 S Y Chou, P R Krauss, P J Renstrom. Imprint of sub- $25 \text{ nm}$  vias and trenches in polymers [J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(21): 3114–3116.
- 8 S-W Ahn, K-D Lee, J-S Kim, *et al.*. Fabrication of a  $50 \text{ nm}$  half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography [J]. Nanotechnology, 2005, 16(9): 1874–1877.
- 9 U Plachetka, N Koo, T Wahibrink, *et al.*. Fabrication of photonic ring resonator device in silicon waveguide technology using soft UV-nanoimprint lithography [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(7): 490–492.
- 10 H Schift, S Park, B Jung, *et al.*. Fabrication of polymer photonic crystals using nanoimprint lithography [J]. Nanotechnology, 2005, 16(5): 261–265.
- 11 Zhao Jianyi, Chen Xin, Zhou Ning, *et al.*. Experimental demonstration of a 16-channel DFB laser array based on nanoimprint technology [J]. Semicond Sci Technol, 2013, 28(5): 055015.
- 12 Zhao Jianyi, Chen Xin, Qian Kun, *et al.*. Design and fabrication of  $16 \text{ channel} \times 200 \text{ GHz}$  InP based AWG [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0605002.  
赵建宜, 陈鑫, 钱坤, 等. InP 基 16 通道  $\times 200 \text{ GHz}$  阵列波导光栅的设计和制备 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0605002.
- 13 Zhao Jianyi, Chen Xin, Zhou Ning, *et al.*. Reliability study of DFB laser fabricated by nanoimprint technology [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206003.  
赵建宜, 陈鑫, 周宁, 等. 纳米压印工艺制作 DFB 激光器的可靠性研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206003.

栏目编辑: 史 敏