

多波长激光发射光子集成技术

陈向飞^①, 刘文^②, 安俊明^③, 刘宇^③, 徐坤^④, 王欣^③, 刘建国^③, 纪越峰^④, 祝宁华^{③*}

① 南京大学微结构国家实验室, 南京 210093;

② 武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室(筹), 武汉 430074;

③ 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;

④ 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876

* 联系人, E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

2011-02-24 收稿, 2011-07-15 接受

国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA0103)

摘要 针对光子集成芯片设计和制造中所面临的难点, 对多波长激光发射光子集成芯片中的多波长激光器阵列、单片集成, 芯片模块化耦合封装等核心技术进行了阐述. 利用重构等效啁啾技术, 二次压印模板技术, 大幅度放宽光子集成芯片对制备工艺中的苛刻要求, 降低了芯片制造成本; 通过端对接耦合技术和铟磷基阵列波导光栅技术, 解决了有源无源波导的单片集成问题; 建立了多端口分析模型, 实现了多参量动态特性的测试, 提出了寄生参数补偿的封装技术, 大幅度提升了芯片性能.

关键词

光子集成
激光器
多波长

光子集成(photonic integrated circuits, PIC)是未来实现大容量、低功耗光网络所必须依赖的技术, 并行多波长激光发射光子集成芯片将成为高速率数据传输的核心, 大规模光子集成将在未来担负起与集成电路类似的重任, 因此已成为国内外研究的热点和重点. 从2004年至今, 美国、欧洲和日本都立项开展了与光子集成技术相关的大型研究项目, 其中包括美国的 IRIS, LASOR, 欧洲的 EuroPIC, PLATON, HELIOS 和爱尔兰的 PiFAS 等. 在光传输领域, 目前全球 PIC 技术的先驱—美国 Infinera 公司已经率先推出基于 PIC 的 WDM 传输设备, 并完成了上万套设备的商用应用, 其核心 PIC 芯片实现了超过 50 多个分立功能器件的单片集成.

多波长激光发射光子集成芯片的功能结构如图 1 所示. 集成芯片可以分解为多波长激光器阵列、调制器阵列、监测光功率的光探测器阵列、用作功率均衡的光放大器(SOA)阵列和 WDM 合路器(常用为阵列波导光栅(AWG))五个部分. 尽管各个单元器件技术都已经成熟, 实现了商业化, 但是将具有不同功能

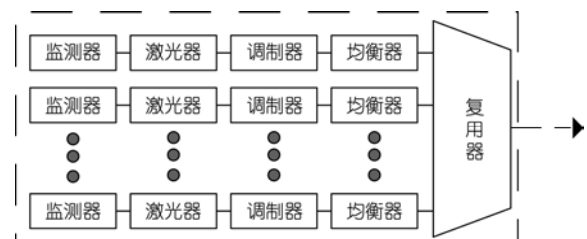


图 1 多波长激光发射光子集成芯片功能结构示意图

结构的光电子器件集成到单一芯片上仍是一项极具挑战性的工作, 面临着许多科学和技术问题, 例如, 不同功能微纳结构制备工艺兼容性、多波长激光发射与 ITU-T 规范波长对准与稳定技术, 芯片内部微波和光波相互作用引发的激光模式串扰问题等.

多波长发射光子集成芯片中光探测器阵列、光放大器 SOA、合路器 AWG 相对比较成熟, 本文不再赘述. 然而多波长激光器阵列与单信道激光器存在很大的区别, 有很多关键问题亟需解决. 例如要实现 100 GHz 的波长间隔, 光栅周期改变量仅为 0.12 nm, 对于这样苛刻的工艺要求, 采用传统的全息曝光技

术, 根本无法实现激射波长的精确控制. 利用高精度电子束曝光逐点写入技术(E-Beam lithography), 虽然可以实现精度 0.1 nm 量级的光栅制备, 但该技术具有写制周期长、成本很高、成品率低、重复性差等缺点, 是实验室常用加工手段, 不适合大规模低成本商业生产^[1]. 第一个推出商用 PIC 芯片的英飞朗公司(Infinera Corporation)利用区域选择性生长(SAG)方法来控制每一个激光器有源层的结构参数, 比如厚度、材料组分等, 成功实现了多波长激光器阵列, 进一步利用微电阻加热调节激光器的温度, 实现了多波长激光器阵列的波长精细对准^[2]. 但该方法的成本很高, 不能满足未来低成本、大批量光子集成芯片生产的需要.

因此, 要从根本上解决多波长激光发射光子集成芯片的核心技术问题, 不能仅仅依靠工艺条件的改善, 必须提出创新性的设计方案, 从而能够利用常规加工工艺, 实现不同能带结构材料外延生长, 实现低成本光子集成芯片批产制造技术. 针对光子集成芯片设计和制造中所面临的关键技术问题, 本文从多波长激光器阵列技术、单片集成技术, 芯片模块化耦合封装技术三方面进行详细阐述.

1 多波长激光器阵列技术

半导体激光器芯片的基本结构是由增益区和相应的光学谐振腔组成, 因此分布反馈(DFB)半导体激光器芯片主要取决于两个因素: 一是激光器芯片的材料特性, 二是激光器的光栅结构. 对多波长激光器阵列而言, 有两个关键问题需要得到解决: 多波长产生机制和高的单模良品率, 而这两点都与光栅结构密切相关. 但是针对同时满足激光器阵列的高性能和低成本大规模制作要求, 国际上还没有一个公认的良好解决方案. 如果要解决这样一个关键难点, 必须采用新的思路, 如采用新的集成工艺或新型功能微结构.

1.1 重构-等效啁啾(REC)光刻技术

重构-等效啁啾(reconstruction-equivalent-chirp, REC)技术可以在现有成熟集成工艺条件下, 实现一种新的功能微结构, 解决多波长产生机制和单模良品率两个关键问题, 同时实现低成本大规模生产, 为多波长激光器阵列提供一个全新的解决方案. REC技术是在研究光纤布拉格光栅新型结构中提出的, 拥

有自主知识产权^[3,4], 已经成功应用于光纤滤波器^[5], 光纤激光器^[6]、OCDMA 编解码器^[7]等重要光纤器件的研制上, 并取得了较好的性能.

REC 技术的核心思想是将原本由 nm 量级的小尺寸结构光栅实现的优良性能“放大”到 μm 量级的大尺寸结构上取样实现, 一般情况下, 其微结构的功能尺度在 1.5 μm 以上, 远远大于采用传统方法所需要的 130 nm(即激光器 DFB 光栅周期的一半)以下的微纳结构. 利用该项技术, 可以在制作普通单个 DFB 激光器的工艺平台上制作高性能低成本的 DFB 激光器阵列, 其制作过程与普通均匀光栅 DFB 半导体激光器基本类似, 唯一的不同是在全息曝光产生均匀光栅的基础上, 利用常规第二次曝光技术形成取样图形. 由于激光器的激射波长取决于取样结构^[8,9], 因此通过设计不同的取样结构即可在第二次曝光的过程中同时实现不同激射波长的激光器. 无论是全息曝光还是第二次普通光刻, 都是相当成熟的生产工艺, 因此可以在常规工艺平台上实现多波长 DFB 半导体激光器阵列的批量生产.

文献[10]对激光器的光谱、功率-电流($P-I$)特性、腔内光场分布等进行了研究, 得到基于 REC 技术的 DFB 激光器与传统激光器有相同的外部光学特征的结论, 并提出 REC 技术可以用于激光器阵列的研制. 基于 REC 技术, 在 2009 年成功实现了单片集成连续 30 波长半导体激光器阵列^[11], 该项实验的成功, 验证了 REC 技术制作激光器阵列的可行性^[12].

在此基础上, 基于 REC 技术的复杂结构激光器的实验也取得较大进展, 成功实现了波纹调制(CPM)激光器和多相移激光器, 这些结构能够有效抑制激光器的烧孔效应^[13-15], 即使在高电流下仍能够保持良好单模工作, 对提高激光器的调制特性有非常明显的改善作用.

图 2 是研制的基于 REC 技术的四分之一波长相移激光器阵列光谱测试结果, 波长数为 6 个, 物理连续, 与前期报道的实验结果相比, 虽然阵列激光器数目少了, 但是单个激光器的性能比较好, 驱动电流为 40 mA, 边模抑制比都超过 36 dB, 符合一般通信要求的大于 35 dB 的标准.

激光器阵列的波长间隔对于 PIC 芯片是一个关键问题, 对于 PIC 芯片在密集波分复用(DWDM)系统中的应用非常重要. 一般来说, 由于加工工艺和材料生长均匀性问题, 波长间隔的控制有明显的误差,

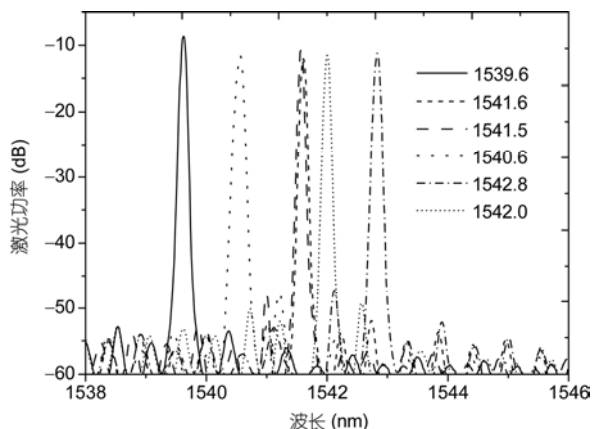


图2 基于REC技术的四分之一波长相移激光器阵列光谱测试图

驱动电流为 40 mA, 阵列激光器数为 6 个

如用高精度电子束曝光技术做出的激光器, 其信道间隔随机误差在 ± 1 nm左右^[16,17], 最大达到 2 nm 以上. 图2所测试的激光器阵列, 设计间隔为 0.4 nm.

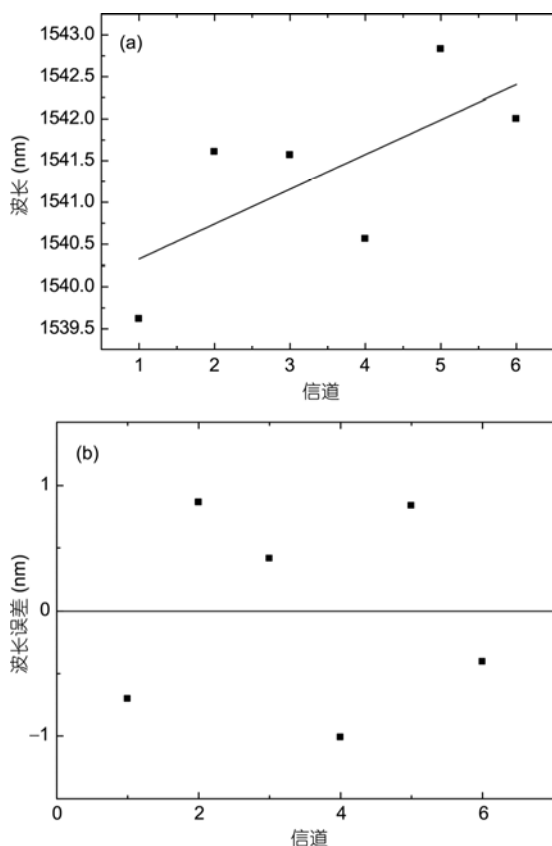


图3 图2所示的激光器阵列中不同信道的激光发射波长
驱动电流都为 40 mA. (a) 激光波长随信道的变化; (b) 激光波长误差

其波长测试结果如图3所示, 测试平均为 0.41 nm 间隔, 最大偏差为 ± 1 nm, 这说明基于 REC 的激光器阵列控制波长的水平目前就可以达到电子束的水平. 实验中采用的形成 REC 图案的光刻掩模板对于激光器波长控制非常重要, 图2实验中所用的光刻掩模板是普通光刻板, 会影响波长的精度. 如果提高工艺水平和采用更为优异的图案掩模板, 预计会获得更好实验结果.

从目前的文献报道, 即使采用高精度的电子束曝光技术, 结合良好的工艺, 波长控制最小偏差也在 ± 1 nm 左右, 能够满足粗分复用的要求, 但无法满足 DWDM 的波长间隔要求. 目前 Infinera 公司解决的方案是采用局部控制温度的方法, 调节激光器波长, 来满足 DWDM 的波长间隔要求.

以上测试和论述表明, 基于 REC 技术做出的激光器阵列, 其性能与采用传统电子束技术相当, 证明 REC 技术能够应用于 PIC 芯片的研制. 此外, REC 技术也可以和其他方法, 提高激光器阵列的性能, 如不对称采样结构^[18]等. 利用这些方案, 将使基于 REC 技术的激光器阵列得到更好的优化, 为大规模低成本的激光器阵列研制奠定坚实的基础.

1.2 纳米压印光刻技术

纳米压印光刻(nanoimprint lithography, NIL)技术是一种全新的纳米图形复制技术, 具有分辨率高、低成本的特点. NIL 的原理如图4所示, 将刻有目标图形的掩模板压印到相应的衬底上——通常是很薄的一层聚合物膜, 实现图形转移, 然后通过热或

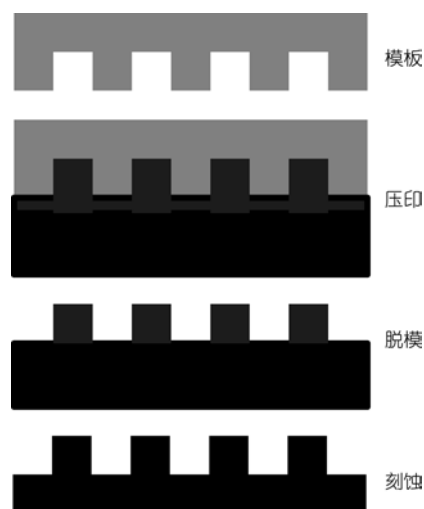


图4 纳米压印技术

者紫外光照的方法使转移的图形固化,以完成微纳加工的光刻步骤.由于纳米压印光刻是通过压印使光刻胶变形,而不是通过曝光改变光刻胶的化学结构,因此,其分辨率不受光的衍射、散射、光刻胶内部光干涉、衬底反射等因素的限制,可突破传统光刻工艺的分辨率极限;并且纳米压印光刻不需要复杂的透镜、曝光光源,可以大批量、可重复、非常均匀地在大面积上制备纳米图形结构.因此,该技术具有低制作成本和高生产效率的优点,非常适合大规模生产^[19~22].

利用纳米压印技术制备多波长激光发射光子集成芯片的核心是高质量压印模版的制备.适合 WDM 技术要求的 DFB 激光器波长间隔只有 0.8 nm (100 GHz),在 C 波段对应的光栅周期大约为 246 nm 左右,两相邻波长之间的光栅周期差只有 0.12 nm,但普通的电子束光刻(EBL)只能保证 8 nm 的最小精度.我们在制版中采用了“增益函数”方法来克服困难,提高质量.即在给定一个波长光栅的尺寸后,设定一个比例系数,后面的光栅依次比前一个光栅增加这个比例系数.另外我们还发展了二次模版技术,即先采用 EBL 直写一个 10 mm × 10 mm 的小石英模板,再利用这个小块作为模板,用 step-flash 的方法通过多次压印,将多块图形转移到 3 英寸的硅片上.我们设计的模板结构如图 5 所示,在每个小单元中,设计了满足 DWDM 需要的 13 个不同波长的光栅,光栅的形貌如图 6 所示.由图中可以看出压印的光栅周期为 240 nm 左右,光栅的相移区非常清晰.在整个 2 英寸的磷化铟(InP)外延片上,光栅分布非常均匀,几乎没有发现压印的缺陷^[23].

我们对制作好的多波长激光发射芯片的性能进行了测试.从 1540 到 1560 nm 波段,每隔 1.6 nm

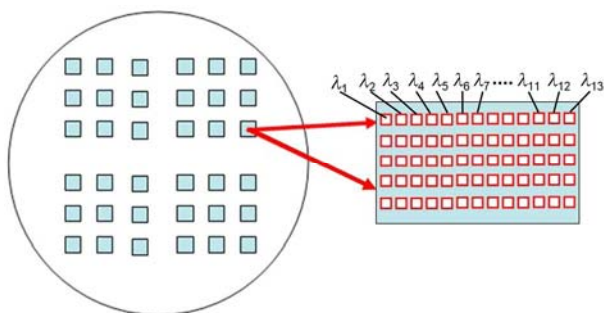


图 5 C 波段 13 波长 DFB 激光器阵列相移光栅母模板设计的结构示意图

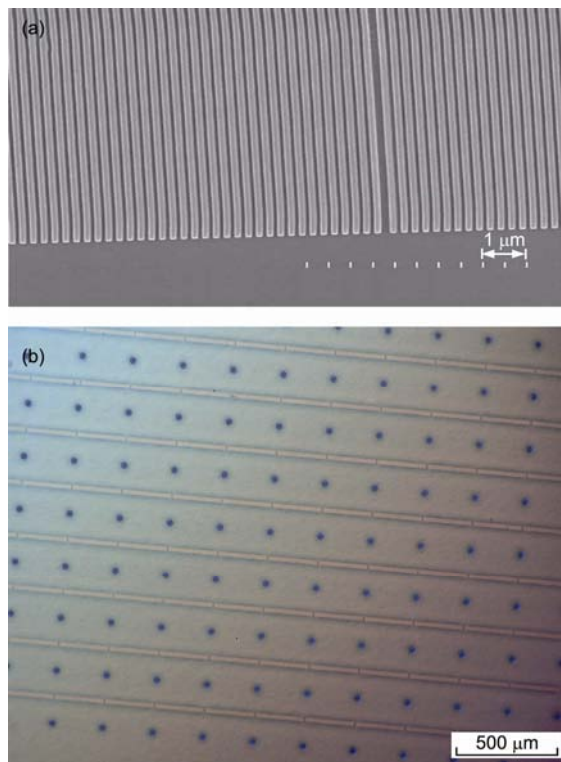


图 6 纳米压印制作的光栅形貌照片

(a) 一个光栅区域的细节放大照片; (b) 大面积的光栅阵列照片

(200 GHz)选取一个激光器管芯探测其输出光谱,如图 7 所示.从光谱图可以看出压印出的激光器波长分布在 C 波段,经过 TEC 控温后可以满足 ITU-T 标准 G.692 对 DWDM 激光器的要求.测量的 SMSR 大于 40 dB, 20 dB 带宽小于 0.2 nm.结果表明用纳米压印技术制作出来的 DFB 激光器性能不逊于用 EBL 制作出的高性能激光器,可以满足 DWDM 系统的要求,

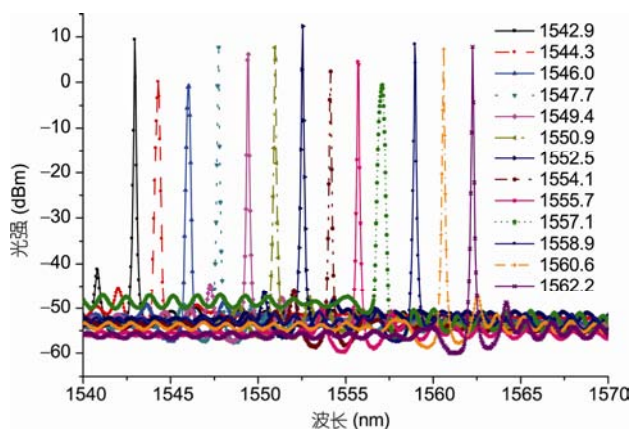


图 7 纳米压印多波长激光发射芯片输出光谱特性

而且还具有低成本,高产出的优点.关于选择 200 GHz 间隔及 TEC 技术来精确控制波长,根据 ITU-T 标准,对于 100 GHz 间隔 DWDM 系统,波长控制精度一般要求在 12.5 GHz 以内,对应的光栅控制精度需要在 ± 0.1 nm. 无论采用电子束曝光技术还是纳米压印技术,目前人们都没有办法实现这样的初始波长精度,即使实现了,意义也不大,因为还有宽工作温度范围的要求.但是把初始波长控制在 ± 100 GHz 范围又是必要的,这是因为采用 TEC 虽然可以精确控制波长,但是它的可调范围是有限的,TEC 如果把芯片的温度加热过高,DFB 激光器工作在高温下,工作寿命会大大缩短.我们参考了国际上正在销售的同类产品指标和设计,初步把纳米压印制版的要求定在了 200 GHz 间隔,已经得到了一个较好的结果.以后待我们工艺技术进一步成熟,我们完全有可能把初始波长控制在 ± 50 GHz 范围之内.

2 单片集成工艺技术

在 PIC 集成中,可重复的、高质量的有源-无源光耦合转换是必不可少的技术,有源波导材料禁带能量应小于或接近传播光子的能量,而无源波导材料禁带能量应远大于传播光子的能量,以保证无源波导小的吸收损耗.在复杂的 InP 基 PIC 光子集成中,需要处理多个波长、多个信号的发射或接收.发射模块要将多个波长信号复用耦合在一根光纤上传输,而接收模块要将多个波长信号解复用后再进行电处理,因此,InP 基 AWG 波分复用器是 InP PIC 光子集成中必不可少的无源器件.

2.1 有源无源多功能微结构对接耦合技术

两种禁带宽度不同、垂直和水平结构不同的材料集成在同一 InP 衬底上实现高效耦合,常用的方法是有源-无源端耦合(Butt-joint),如图 8 所示,有源波导与无源波导在端面处连接,其耦合效率可根据两种



图 8 DFB LD 与无源波导 Butt-joint 耦合结构示意图

波导模场积分确定^[24]. Butt-joint 法优点在于可独立选择有源和无源波导的组份和尺寸,理论上耦合效率可接近 100%,实验报道的 Butt-joint 最大耦合效率超过 90%. 还有一些垂直光栅耦合技术,但简单的制造工艺、较好的容差使得 Butt-joint 更为适用,更具吸引力.

2.2 多波长低损耗合波技术(InP 基 AWG)

为保证 InP 基 AWG 波导偏振无关和小的弯曲半径,一般采用深脊型 InGaAsP/InP 波导结构^[25],制备工艺为依次生长 InP 缓冲层、InGaAsP 芯层和 InP 上包层,然后感应体耦合等离子(ICP)刻蚀,形成深脊型波导,结构如图 9. 波导宽度根据 InGaAsP 禁带宽度及偏振特性决定,小的禁带宽度在满足偏振无关时波导宽度较宽,光刻工艺容差较大,生长上包层为非掺杂或半绝缘 InP,以减小材料吸收损耗.采用深脊型波导制备 InP 基 AWG 弯曲半径只有 250 μm ,有利于减小 InP 基 AWG 尺寸,国际上已实现 40 通道 InP 基 AWG 与 40 个 EML 等 241 个元件的集成^[26]. 图 10 为我们制备的 10 通道、200 GHz InP 基 AWG,其尺寸只有 4 mm $\times$ 4 mm,中心通道插入损耗约 16 dB,串扰小于 -17 dB.

3 测试分析与模块化封装技术

光电子器件内部同时存在光信号和电信号,是一个微波与光波相互交换能量的有机整体.因此,对于激光器集成芯片的测试分析和耦合封装,要将芯片材料、电极结构、封装电路和耦合结构视为一个整体进行综合考虑.

3.1 多信道激光器测试分析

大规模集成条件下,激光器阵列内部会出现不

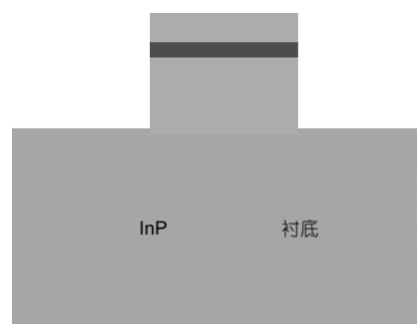


图 9 偏振无关深脊型波导示意图

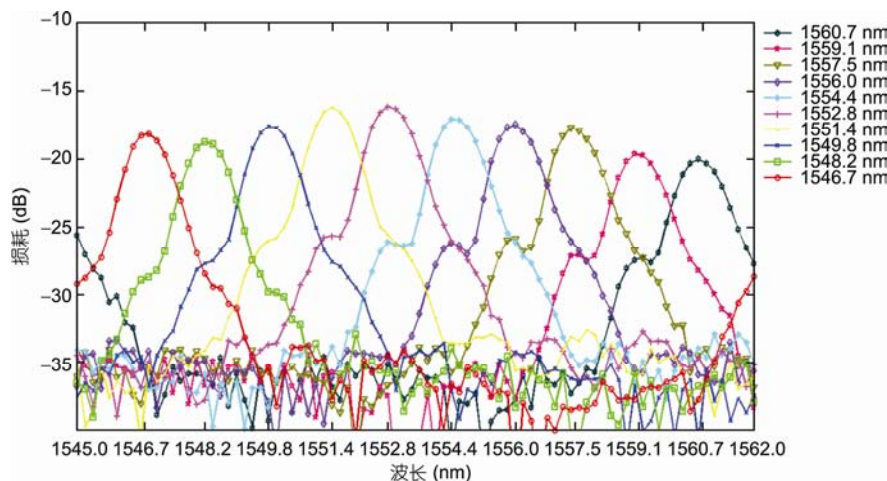


图10 10通道、200 GHz InP基AWG芯片输出谱

同模式的耦合与串扰,多波长并行信号也会受到随之产生的非线性影响,如四波混频等,因此芯片内部特性必然会对系统整体的动态范围、灵敏度、误码率等性能参数产生影响。

提取激光器的本征动态特性参数,建立器件内部光波传输、能量转换的分析模型,是进行多信道激光器测试分析的基础。我们发展了两种提取方法:一是将调制过的激光束注入被测激光器,通过分析得到本征响应^[27];二是基于激光器等效电路模型进行寄生参数的扣除,直接得到本征响应^[28]。

激光器阵列与分立激光器最大的区别在于激光器之间存在非常复杂的微波、光波的相互耦合。利用多端口测试分析方法^[29]和一体化分析模型^[30],结合时域反射法(TDR)进行信号完整性分析,为搞清楚阵列集成芯片内部的模式耦合串扰和交叉调制等特性及其影响提供了有效的检测手段。

3.2 低反射光耦合

光耦合系统所产生的光反射会影响激光器输出波长的稳定性,并且产生微波附加调制。因此在提高光耦合效率的同时,还要尽量降低外部光反射^[31]。目前组合透镜和光纤微透镜应用最广泛^[32],前者具有大的偏移容差,光学对准更加容易,同时在两透镜之间加入光隔离器可降低光反射;后者在光纤端面加工平面或透镜,具有结构紧凑、工艺相对简单、成本低等优点。我们采用倾斜7°的光波导输出结构,配合镀膜透镜、隔离器和锥形光纤,发展了一种高效率低反射的光耦合技术^[33]。

3.3 模块化封装

集成光发射模块的高频特性不仅取决于激光器或调制器芯片的本征响应,也会受到芯片电极和模块封装寄生参数的影响。电吸收调制器一般采用P、N共面电极^[34],具有良好导热性能的氮化铝(AlN)材料载体上制备与之对应的焊盘电极,通过倒装焊或金属热键合工艺,可以避免使用多根金丝,实现调制信号的低损耗传输。封装寄生参数主要来源于电连接用金丝引入的电感和焊盘带来的电容,我们对其进行优化设计,实现了芯片寄生参数的补偿^[35]。

4 结论

本文对多波长激光发射光子集成芯片技术进行了概述,并简要介绍关于多波长激光发射和有源无源多功能结构单片集成等具有我国自主知识产权的核心技术。例如采用等效重构啁啾技术和纳米压印二次模板技术,通过创新性的设计能够大幅度放宽光子集成芯片对制备工艺中的苛刻要求,利用全息曝光等半导体激光器常规制备工艺技术,就可以完成多波长激光器阵列芯片的制备,降低芯片制造成本,为未来的大规模产业化提供有力的技术支撑;通过端对接耦合技术,解决了有源无源波导的单片集成问题;建立了多端口分析模型,基于多波长激光发射光子集成芯片的动态特性的测试分析和实验验证,实现芯片材料生长、器件制备和耦合封装的优化设计和系统功能验证。虽然这些核心技术还处在发展和完善的过程中,但是初步实验已经证明,这些技术具有其独特的技术优势和应用价值。这些技术的相互

支撑和结合,必将会在短时间内形成整套高速光子集成芯片的批量生产技术,为我国以多波长激光发射芯片为代表的光子集成芯片技术的研究与应用,打下了坚实的基础。

参考文献

- 1 Ishii H, Kasaya K, Oohashi H, et al. Widely wavelength-tunable DFB laser array integrated with funnel combiner. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13: 1089–1094
- 2 Kish J, Fred A J, Charles H W, et al. Method of operating an array of laser sources integrated in a monolithic chip or in a photonic integrated circuit(PIC). US Patent, US7079720B2, 2002-07-18
- 3 Chen X F, Luo Y, Fan C C, et al. Analytical expression of sampled Bragg gratings with chirp in the sampling period and its application in dispersion management design in a WDM system. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, 12: 1013–1015
- 4 戴一堂, 陈向飞, 夏历, 等. 一种实现具有任意目标响应的光纤光栅. 中国发明专利: CN1560656, 2005-01-05
- 5 Dai Y T, Chen X F, Xia L, et al. Sampled Bragg grating with desired response in one channel by use of a reconstruction algorithm and equivalent chirp. *Opt Lett*, 2004, 29: 1333–1335
- 6 Jiang D J, Chen X F, Dai Y T, et al. A novel distributed feedback fiber laser based on equivalent phase shift. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16: 2598–2600
- 7 Dai Y T, Chen X F, Sun J, et al. High-performance, high-chip-count optical code division multiple access encoders-decoders based on a reconstruction-equivalent-chirp technique. *Opt Lett*, 2006, 31: 1618–1620
- 8 陈向飞. 基于重构-等效啁啾技术制备半导体激光器的方法及装置. 中国发明专利: CN101034788, 2007-09-12
- 9 Dai Y T, Chen X F. DFB semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology. *Opt Express*, 2007, 15: 2348–2353
- 10 Dai Y T, Yao J P. Numerical study of a DFB semiconductor laser and laser array with chirped structure based on the equivalent chirp technology. *IEEE J Quantum Electron*, 2008, 44: 938–945
- 11 Li J S, Wang H, Chen X F, et al. Experimental demonstration of distributed feedback semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology. *Opt Express*, 2009, 17: 5240–5245
- 12 Li J S, Chen X F, Zhou N, et al. Monolithically integrated 30-wavelength DFB laser array. In: He J J, Duan G H, Koyama F, et al., eds. *Proceedings of SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics*, SPIE 7631 763104, 2009 Nov 25–29, Shanghai
- 13 Li S M, Shi Y C, Li J S, et al. Experimental demonstration of the corrugation pitch modulated DFB semiconductor laser based on the reconstruction-equivalent-chirp technology. In: Koyama F, Chuang S L, Duan G H, et al., eds. *Proceedings of SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics*, SPIE 7987, 798704, 2010 Dec 9–12, Shanghai
- 14 施跃春, 涂兴华, 李思敏, 等. 基于重构-等效啁啾技术的三相移和双周期调制的分布反馈半导体激光器的数值研究. *科学通报*, 2010, 55: 1944–1950
- 15 Shi Y C, Li S M, Lu L L, et al. Multiple phase shifts DFB semiconductor laser based on reconstruction equivalent chirp technology. In: Zhu N H, Li J, Amzajerian F, et al., eds. *Proceedings of SPIE 7844 784418*, 2010 Nov 18–20, Beijing
- 16 Huang Y D, Sato K, Okuda T, et al. Low-chirp and external optical feedback resistant characteristics in $\lambda/8$ phase-shifted distributed-feedback laser diodes under direct modulation. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38: 1479–1484
- 17 Li J S, Cheng Y, Yin Z W, et al. A Multiexposure technology for sampled Bragg gratings and its applications in dual-wavelength lasing generation and OCDMA en/decoding. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2009, 21: 1639–1641
- 18 Zhou Y T, Shi Y C, Li S M, et al. Asymmetrical sampling structure to improve the single-longitudinal-mode property based on reconstruction-equivalent-chirp technology. *Opt Lett*, 2010, 35: 3123–3125
- 19 Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J, et al. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymer. *Appl Phys Lett*, 1995, 67: 3114–3116
- 20 Chou S Y, Krauss P R, Zhang W, et al. Sub-10nm imprint lithography and applications. *J Vac Sci Technol B*, 1997, 15: 2897–2904
- 21 Hong P S, Lee H H. Pattern uniformity control in room-temperature imprint lithography. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 2441–2443
- 22 Hua F, Gaur A, Sun Y, et al. Processing dependent behavior of soft imprint lithography on the 1-10-nm scale. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2006, 5: 301–308
- 23 刘文, 王定理, 周宁, 等. 纳米压印用二次压印模板的制作方法及其二次压印模板. 中国发明专利: CN101446759, 2009-06-03
- 24 Koch T L, Koren U. Semiconductor photonic integrated circuits. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27: 641–653
- 25 Yuzo J. Semiconductor arrayed waveguide gratings for photonic integrated devices. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2002, 8: 1102–1114
- 26 Welch D F, Kish F A, Nagarajan R. The realization of large-scale photonic integrated circuits and the associated impact on fiber-optic communication systems. *J Lightwave Technol*, 2006, 24: 4674–4683
- 27 Zhu N H, Chen C, Pun E Y B, et al. Extraction of intrinsic response from S-parameters of laser diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17: 744–746

- 28 Zhang S J, Zhu N H, Liu Y, et al. Potential frequency bandwidth estimation of TO packaging techniques for photodiode modules. *Opt Quantum Electron*, 2006, 38: 675–682
- 29 Zhang Y, Silvonen K, Zhu N H. Measurement of a reciprocal four-port transmission line structure using the 16-term error model. *Microw Opt Technol Lett*, 2007, 49: 1511–1515
- 30 Zhu N H, Hou G H, Huang H P, et al. Electrical and optical coupling in an electro-absorption modulator integrated with a DFB laser. *IEEE J Quantum Electron*, 2007, 43: 535–544
- 31 Gnitabourk Y. Effect of relatively strong light injection on the chirp-to-power ratio and 3-dB bandwidth of directly modulated semiconductor lasers. *J Lightwave Technol*, 1996, 14: 2367–2373
- 32 Nakagawa G, Kai Y, Yoshida S, et al. Novel optical coupling technique for enhancing the performance of integrated 8-input/1-output SOA gate-switch module. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 4989–4994
- 33 王欣, 谢亮, 袁海庆, 等. 半导体激光器蝶型封装器件. 中国发明专利: CN1937336, 2007-03-28
- 34 Tsuzuki K, Kawaguchi Y, Kondo S, et al. Four-channel arrayed polarization independent EA modulator with an IPF carrier operating at 10 Gb/s. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, 12: 281–283
- 35 Zhu N H, Liu Y, Zhang S J, et al. Bonding-wire compensation effect on the packaging parasitics of optoelectronic devices. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, 48: 76–79