

单片集成可调谐半导体激光器研究进展

江 山¹, 谢世钟²

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;
2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要:单片集成可调谐半导体激光器的使用为光纤通信系统和智能光网络带来极大的灵活性、可扩展性以及经济性。文章综述了单片集成可调谐半导体激光器的调谐机制、结构特点以及性能比较, 概要介绍了最新研究进展情况, 分析了相关发展趋势和市场应用前景。

关键词:光子集成光路; 可调谐半导体激光器; 密集波分复用; 智能光网络

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2009)01-0001-04

Progresses on monolithic integrated tunable laser diodes

Jiang Shan¹, Xie Shizhong²

(1. SKL of OCTN, Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074, China;
2. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The deployments of monolithic integrated tunable laser diode bring great flexibility, scalability and cost effectiveness for optical fiber communication systems and agile optical networks. In this paper, different monolithic integrated tunable laser diodes are reviewed with emphasis on the tuning mechanism, device structure and performance comparison. The recent development progresses and future trend are summarized.

Key words: photonic integrated circuit; tunable laser diode; DWDM; agile optical network

1 概 述

在智能光网络中, 光传送网络不仅仅是要解决大容量传输和宽带接入的问题, 更为关键的是实现光层上的智能化和节点的光交换, 从而建立起动态高效、扩展灵活、经济可靠的光网络, 以满足信息传输与交换的要求。可调谐半导体激光器能够根据要求来动态调整输出波长, 在宽带光通信系统和智能光网络中有着重要的应用。它不仅能够为密集波分复用(DWDM)系统中的固定波长激光器提供备份, 还将使自动波长配置、波长转换和波长路由成为可能, 从而进一步实现网络资源的动态分配和优化, 提高带宽利用率, 降低网络建设成本, 缩短业务提供时间, 并且能够进行快速业务恢复、业务提供和业务拓展, 保证整个网络系统的可靠性^[1]。

可调谐半导体激光器的研究从 20 世纪 80 年代开始就很活跃。近几年, 由于国际上众多著名电信器件公司、大学、研究机构的积极参与以及市场需求的驱动, 可调谐半导体激光器的研究开发和商用化进展十分迅速。本文将从调谐机理、器件结构、性能特点等几个方面, 重点介绍单片集成可调谐半导体激光器的研究进展, 分析相关发展趋势和应用前景。

2 不同结构的单片集成可调谐半导体激光器的调谐机理与特点

表征单片集成可调谐半导体激光器性能的主要参数包括: 波长可调谐范围、波长切换速度、输出光功率、光谱线宽、频率调制带宽、器件可靠性、尺寸和制作成本等。为此, 人们发展了基于不同器件结构和调谐机制的单片集成可调谐半导体激光器, 有的采用注入载流子来控制波长, 有的则采用热调谐或机械调谐控制波长。一般来讲, 单片集成可调谐半导体激光器由增益单元、波长调谐单元和相位调节单元等几个部分组成, 通过直接或间接改变激光器谐振腔的光学长度来实现波长调谐, 再通过波长选择单元、相位调节单元进行腔模对准和波长选择输出。不同类型的单片集成可调谐半导体激光器的主要区别在于各不相同的器件结构及其实现方法, 而结构和工艺的不同最终导致了性能上的差异。

2.1 可调谐分布反馈半导体激光器

分布反馈半导体激光器(Distributed Feedback Laser Diode, DFB 激光器)具有优良的动态单纵模特性, 相关制作工艺成熟, 器件性能稳定, 可靠性高, 是目前光纤通信系统最主要的光源, 其工作波长由

收稿日期: 2008-12-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA03 Z427); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2003CB314903)

作者简介: 江山(1968-), 男, 吉林公主岭人, 教授级高工, 硕士, 主要研究方向为通信光电子材料、器件与集成技术。

光栅周期、有效折射率决定。与常规 DFB 激光器不同,可调谐 DFB 激光器还需要在器件上制作微型加热电极,以产生电流驱动的温度变化。由于有效折射率与温度直接相关,最终导致光栅峰值波长的改变,这样利用热调谐原理实现了 DFB 激光器的波长调谐。对典型 InGaAsP/InP 材料的 DFB 激光器而言,热调谐系数约为 0.1 nm/℃ 量级。所以基于热调谐机制的单个可调谐 DFB 激光器的调谐范围一般只有 5 nm 左右,无法满足 DWDM 系统对波长调谐范围的要求^[2]。

2.2 波长可选单片集成 DFB 激光器阵列

波长可选单片集成 DFB 激光器阵列能够有效扩大调谐范围——通过多个热调谐 DFB 激光器的级联或并联来实现宽带波长可调谐,即选择不同波长范围的 DFB 激光器进行粗调,再通过调节温度来实现该范围的波长精调。加拿大 Nortel 公司、美国的 Santur 公司以及日本的 NEC、Fujitsu、NTT 等公司相继推出了这类波长可选单片集成 DFB 激光器阵列。

日本 NEC 公司开发的波长可选择 DFB 激光器阵列由 8 个微阵列 DFB 激光器组成,如图 1 所示。封装好的模块还带有波长锁定器以稳定激光波长。该器件能够覆盖 S、C、L 波段,以 100 GHz 波长间隔实现了 135 个波长选择,边模抑制比大于 42 dB、出纤功率大于 10 mW^[3]。日本 NTT 公司采用类似结构开发了高功率 L 波段可调谐 DFB 激光器阵列,输出功率高达 40 mW,边模抑制比大于 45 dB,波长调谐范围 1 603.17~1 576.61 nm,电流调谐波长切换速度达到毫秒量级,能够实现更快的波长切换速度^[4]。

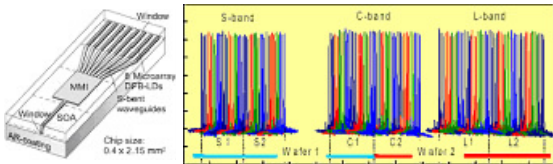


图 1 NEC 波长可选择 DFB 激光器微阵列

美国 Santur 公司的波长可选择 DFB 激光器阵列用微电子机械系统(MEMS)转镜芯片取代多模干涉(MMI)耦合器,如图 2 所示,通过 MEMS 转镜的倾斜调整去选择不同的激光波长输出。相对于损耗较大的 MMI 耦合器,MEMS 转镜的损耗仅仅为 0.3 dB 左右。整体器件通过选择不同的 DFB 激光器工作对波长进行粗调,通过 DFB 激光器的热调谐实现波长细调。该产品在 C 波段实现了 36 nm 可调谐,出纤功率大于 20 mW,边模抑制比高达

50 dB^[5]。2005 年,该公司采用双沟掩埋结构研制了性能更优良的波长可选择 DFB 激光器阵列产品,芯片功率超过 100 mW,耦合出纤功率超过 50mW,波长可调谐范围超过 39 nm,线宽优于 2 MHz,相对强度噪声低于 -155 dB/Hz。由于采用相移结构,边模抑制比达到 60 dB^[6]。

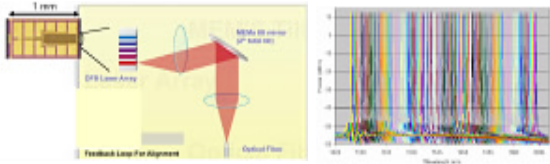


图 2 Santur 公司 MEMS 波长可选择 DFB 激光器阵列

与上述并联式波长可选 DFB 激光器阵列不同,加拿大 Nortel 公司采用了级联式结构,如图 3 所示。该器件实现了 34 nm 连续可调谐、40 个 100 GHz 信道间隔 ITU-T 波长、边模抑制比约为 50 dB、输出功率 0 dBm 左右^[7]。进一步的研究则是报道了通过集成半导体光放大器(SOA),使光纤耦合输出的功率达到 16 dBm;此外,通过对 SOA 施加不同的偏置电流,还能够提供信道均衡、衰减、补偿器件老化等功能。

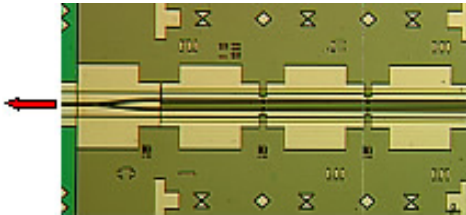


图 3 Nortel 公司级联式 DFB 可调谐激光器

2.3 单片集成多电极分布式布拉格反射式(DBR)激光器

在单片集成可调谐半导体激光器的发展过程中,基于 DBR 激光器的可调谐技术一直受到人们的普遍关注。1991 年以前,主要采用均匀光栅多电极 DBR 技术。该器件一般由 3 个部分组成:有源区、相位区和布拉格光栅区。有时根据需要还可以增加其他功能单元,比如 EA 外调制器、半导体光放大器等。实际制作中,通过选择腐蚀和再生长工艺,将激光器无源波导中的 Bragg 光栅调谐区与有源区分开。其调谐机理与多段 DFB 激光器相类似:控制有源区来改变光增益和光功率,改变 Bragg 光栅区的折射率来调整 Bragg 波长,控制相位区折射率对准腔模,从而达到波长调谐的目的^[8]。一般来讲,采用均匀光栅多电极 DBR 激光器的调谐范围在 10~15 nm,难以与掺铒光纤放大器(EDFA)的增益带宽

相适应。

2.4 单片集成取样光栅 DBR 宽带可调谐激光器

从前面的讨论我们知道,基于常规折射率改变效应来进行波长调谐的半导体激光器的波长连续可调谐范围十分有限, $\Delta\lambda/\lambda = \Gamma\Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$, 这里 Γ 为光场限制因子。在正常情况下,这一限制给出的调谐范围是 10~15 nm。即使加上温度调谐,调谐范围也只能达到 22 nm 左右,而且这时的调谐已经是不连续的。因此,为了实现宽带波长可调谐,需要利用更多的控制条件,一个比较典型的方法是利用折射率差的改变而不是折射率自身的变化。人们从 1991 年开始将非均匀光栅引入 DBR 激光器,包括取样光栅(Sample Grating, SG)^[9]、超结构光栅(Super Structure Grating, SSG)^[10]。图 4 是典型的单片集成 SG-DBR 宽带可调谐激光器示意图。

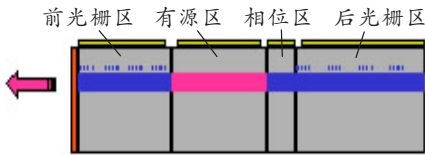


图 4 单片集成 SG-DBR 可调谐激光器示意图

由图 4 可以看到,这类激光器均由 4 段结构组成,从前至后依次为前光栅区、有源区、相位区和后光栅区,SG 具有梳状的反射谱。在前、后光栅区中选用不同的取样周期,则相应的梳状反射谱序列的周期将会错开一定的距离;当两个梳状反射谱序列中的一对谱峰发生重合时,就能够选定单一的输出波长。SG-DBR 激光器采用的是幅度调制的非均匀光栅,而 SSG-DBR 激光器则采用相位调制的啁啾光栅,具有更为平坦的光输出特性。相比较而言,有关 SSG-DBR 宽带可调谐激光器的研究很多,但在实用化和产品化方面则远落后于 SG-DBR 宽带可调谐激光器。

SG-DBR 激光器由于制作工艺兼容性好,比较容易与其他功能单元集成,比如 SOA、EA 调制器等,因此发展十分迅速。美国 UCSB 大学已经在 4 段 SG-DBR 激光器的基础上,单片集成了半导体光放大器和 EA 调制器,能够实现宽带连续可调谐(调谐范围能够覆盖完整的 C 波段或 L 波段)、高速率工作、高输出功率和高可靠性(外推寿命超过 100 年)^[1]。最近该小组又报道了基于 SG-DBR 的 40 Gbit/s 宽带可调谐单片集成收发器^[11]和单片集成 40 Gbit/s 宽带可调谐低电压驱动电吸收调制光发射机^[12]等多功能单片集成光子器件。

2.5 单片集成数字超模 DBR 激光器和宽带可调谐 Y 分支激光器

英国 Bookham 公司推出的数字超模 DBR 激光器产品(Digital Supermode DBR Laser, DS-DBR)如图 5 所示,它由 4 个部分组成,后反射镜为 SG-DBR,而前反射区则由数段周期各异、长度很短(约 20 μm)的光栅组成,每段光栅都由一个接触电极寻址;相邻光栅反射谱的交叠使整个前反射区的光谱响应为一个宽带、无波长选择、反射率较低的反射谱。当前反射区某段光栅上的电极施加电流时,这段光栅的反射峰发生偏移,加强了相邻光栅的反射率,因此前反射区对这个波长的反射提高,大大高于其他波长,于是这个波长就成为激光器的激射波长。当需要另外波长时,则向另外一段光栅施加电流。DS-DBR 通过改变电流注入位置来实现波长选择;此外前反射区只有很短的一段光栅被激发,因此自由载流子吸收损耗也很小。报道的产品有 8 个接触电极 8 段寻址光栅、50 nm 调谐范围、可以覆盖 80 个 ITU-T 波长、边模抑制比大于 50 dB。这种激光器不需要精确控制前反射区电极上的注入电流,5~10 mA 就足够激发所需要的超模,后反射镜最大调谐电流小于 40 mA。最新的研究进展包括:DS-DBR 激光器与 SOA 的单片集成,输出功率大于 13.5 dBm^[13];基于 AlGaInAs/InP 材料的 DS-DBR 激光器在半致冷条件下能够工作在 55 $^{\circ}\text{C}$ ^[14]。

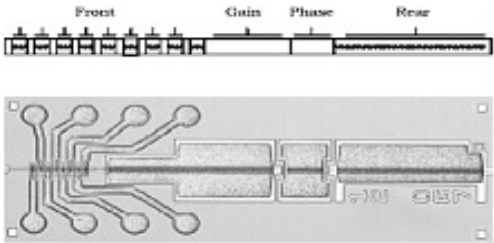


图 5 数字超模 DBR 激光器

单片集成宽带可调谐 Y 分支激光器的工作同样利用了 Vernier 效应,但特殊设计制作了调制光栅,如图 6 所示。这种激光器与 SG-DBR/ SSG-DBR 激光器的不同之处在于单端输出,没有自由载

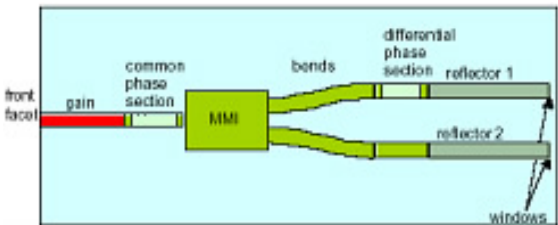


图 6 单片集成宽带可调谐 Y 分支激光器

流子吸收问题,因此输出功率相对稳定。瑞典皇家技术学院和 Syntune 公司联合报道了他们最新研制的单片集成宽带可调谐 Y 分支激光器,输出功率超过 10 dBm,边模抑制比大于 40 dB,调谐范围大于 40 nm,并且直接调制的速率就可以达到 10 Gbit/s^[15]。

2.6 非对称双波导(ATG)宽带可调谐激光器

在众多单片光子集成器件工艺技术当中,非对称光波导(Asymmetric Twin-Waveguide, ATG),由于其可以大幅度减少材料掩埋和生长的次数,保证了器件的可靠性,因此在最近几年倍受人们的关注。ATG 中的有源和无源波导相互分离,通常上面的波导层包括了激光器的有源区或者探测器的吸收区,而下面的波导层为无源波导,通过横向的锥形耦合器来实现上下波导之间光功率低损耗、无反射的垂直耦合。总体来讲,ATG 技术是光子集成器件良好的工艺技术平台,几乎所有的光子集成器件均通过 ATG 技术得以成功制作,比如 1 310 nm EML、高速波导探测器、SOA 与 PIN 探测器集成器件、宽带可调谐半导体激光器、单片集成波长转换器、AWG 与 PIN 阵列集成器件等^[16]。

图 7 是最近报道的一个 ATG 连续可调谐 DBR 激光器。该器件在各层波导的制作上仅使用了一次 GSMBE 外延材料生长,在 DBR 光栅区的制作中使用了近场全息曝光方法,通过多次反应离子刻蚀和湿法腐蚀,在上下波导层形成了所需要的横向锥形耦合器。激光器阈值电流 50 mA,输出功率约 13 mW,波长调谐范围 4.8 nm。尽管目前采用 ATG 技术制作的可调谐 DBR 激光器的性能指标还无法与前面的几种激光器相比,但 ATG 技术简单性的魅力已经充分展现出来^[17]。

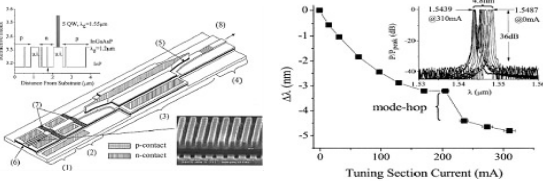


图 7 ATG 连续可调谐 DBR 激光器

3 结束语

智能光网络的快速发展,对用于其中的单片集成可调谐半导体激光器提出了一系列新的要求。单纵模工作要求:边模抑制比高(>30 dB);出纤功率高;强度调制带宽高于 2.5 Gbit/s;调谐范围切换时间约几十 ns。可调谐工作要求:可调谐范围覆盖

EDFA 带宽;波长稳定性好;波长通道数目多;准连续调谐。系统传输要求:整个调谐范围输出功率波动小(<3 dB);可靠性(功率、阈值电流、工作波长)高;动态特性(啁啾、消光比、带宽)波动小。可生产性要求:制作工艺简单、兼容性好、成本低;工作简单(减少控制电路复杂性)。围绕这些要求,人们发展了基于不同调谐机理和器件结构的单片集成可调谐半导体激光器,以期达到性能综合优化的目的。在众多工业企业、研究机构的积极参与下,相关产品实用化的工作快速推进。随着制作工艺的进步,其制作成本和性能也正逐步向固定波长激光器接近。可以预见,单片集成可调谐半导体激光器必然会越来越多地在智能光网络系统中得到广泛应用,发挥至关重要的作用。

从目前的市场应用情况来看,除了 ATG 连续可调谐 DBR 激光器尚处于研究阶段以外,基于上述其他调谐机理和器件结构的单片集成可调谐半导体激光器均有商用化产品。值得指出的是,在众多商用化产品中,波长可选单片集成 DFB 激光器阵列备受青睐,主要原因在于:基于该原理的器件不仅可以实现宽带波长调谐,而且器件制作方法与普通 DFB 激光器制作兼容,工艺成熟,生产效率高,成品率高;并且 DFB 激光器已经反复经过实际应用的考验,因此这类器件在可靠性方面也能够得到充分保证。

参考文献:

[1] Coldren L A. Tunable Semiconductor Lasers: A Tutorial [J]. Journal of Lightwave Technol., 2004, 22 (1): 193-202.

[2] Ishii H. Quasicontinuous wavelength tuning in superstructure-grating (SSG) DBR lasers [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1996, 32(3): 433-441.

[3] Hatakeyama H. Wavelength - selectable microarray light sources for S-, C-, and L-bands WDM applications [A]. OFC2002 [C]. Los Angeles, USA:OSA, 2002. WF2.

[4] Ishii H. High-power (40 mW) L-band tunable DFB laser array module using current tuning [A]. OFC/NFOEC2005 [C]. Los Angeles, USA: OSA, 2005. OTuE1.

[5] Pezeshki B. 12 element multi-wavelength DFB arrays for widely tunable laser modules [A]. OFC2002 [C]. Los Angeles, USA:OSA, 2002. ThGG71.

[6] Zou S. 100 mW phase-shifted 1 550 nm BH DFB arrays with a 10-micron pitch [A]. OFC/NFOEC2005 [C]. Los Angeles, USA:OSA, 2005. JWA28.