

低成本可调谐半导体激光器研究进展

赵佳生¹, 夏谄民², 李乔力¹, 陈琪², 王中文², 孟剑俊², 何建军^{1,2*}¹杭州兰特普光电子技术有限公司, 浙江 杭州 310058;²浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310012

摘要 随着网络带宽需求呈爆发式增长, 波分复用技术从主干网下沉到城域网和终端用户侧的接入网, 作为波分网络核心器件的低成本可调谐半导体激光器日益受到关注。本文回顾了可调谐半导体激光器的发展历程, 分类阐述了不同方案可调谐半导体激光器的工作原理和性能, 评析了典型商用可调谐光模块的优缺点, 并重点介绍了低成本 V 型腔可调谐激光器的研究和产业化应用进展。

关键词 激光器; 半导体激光器; 可调谐激光器; V 型腔激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1714003

Research Progress in Low-Cost Tunable Semiconductor Lasers

Zhao Jiasheng¹, Xia Yimin², Li Qiaoli¹, Chen Qi², Wang Zhongwen², Meng Jianjun²,
He Jianjun^{1,2*}¹Lightip Technologies Co., Ltd., Hangzhou 310058, Zhejiang, China;²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310012, Zhejiang, China

Abstract As the demand for network bandwidth is growing explosively, the deployment of the wavelength division multiplexing technology is extending from the backbone network to the metropolitan area network and the access networks. Low-cost tunable semiconductor lasers, which are the core components of wavelength division networks, are attracting increasing attention. This paper reviews the development of semiconductor tunable lasers, describes the working principles and performance of various tunable lasers, and analyzes the advantages and disadvantages of typical commercial tunable optical modules. The research and industrial application progress of low-cost tunable V-cavity lasers are mainly introduced.

Key words lasers; semiconductor lasers; tunable lasers; V-cavity lasers

1 引言

1962年, Hall等^[1]成功制备出砷化镓半导体激光器, 成为半导体激光器元年。1966年高锟开创性地提出光纤的基本原理^[2], 分析利用玻璃制作光学纤维的可行性。通过减少玻璃中的杂质, 能够高效、低损地传输信息。1970年美国康宁突破性地将高锟光纤理论变为现实, 成功制备出世界上第一个光纤, 该光纤的损耗低于 20 dB/km。光通信时代就此拉开序幕, 光通信中的主要光源——半导体激光器也得到迅猛发展, GaAs、InP、GaN 等 III-V 族化合物直接带隙半导体材料以高量子效率在半导体激光器中得到广泛应用,

并发展出具有高功率、脉冲、窄线宽、可调谐等多种特性的半导体激光器^[3-4]。其中可调谐半导体激光器在光通信、激光雷达、传感检测等方面获得了广泛应用。第五代移动通信(5G)、互联网、万物互联(IOT)、增强现实(IR)、虚拟现实(VR)、短视频等技术发展迅猛, 随之而来的是网络带宽需求呈爆发式增长。波分复用(WDM)系统以其资源利用率高、网络建设成本低、可透明传输、便于维护等优点, 成为现代通信网络建设的重要方案。中国联通、中国移动、中国电信分别提出密集波分复用(DWDM)、等波分复用(MWDM)、细波分复用(LWDM)的网络建设方案。WDM技术已经从主干网下沉到城域网和终端用户侧的接入网。WDM

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-07-22; 录用日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61960206001)

通信作者: *jjhe@zju.edu.cn

技术支持 5G、数据中心海量带宽的承载,实现波分复用无源光网络(WDM-PON)、5G 基站、企业专线等宽带接入。可调谐激光器的成本成为波分传输系统大量部署、扩容的最大制约因素。

本文主要介绍可调半导体激光器的基本原理,回顾可调半导体激光器的发展历程,分类阐述不同类型可调谐半导体激光器的工作原理,并分析主流商用可调谐半导体激光器的优缺点。特别介绍了新型 V 型腔宽带可调谐半导体激光器、低成本智能可调光模块及其面向 DWDM 网络应用的进展。

2 传统可调谐半导体激光器

可调谐半导体激光器采用热调谐、电调谐、机械调谐等方式调节腔长、光栅反射谱、相位等变量,以实现波长调谐。目前,可调谐半导体激光器衍生出多种光调谐激光器方案,主要包括外腔可调谐激光器、分布反馈(DFB)阵列可调谐激光器、分布反射(DBR)可调谐激光器、单片集成微环可调谐激光器、V 型腔可调谐激光器等。

2.1 外腔激光器

外腔激光器的选模器件主要有衍射光栅、标准具、

Si 基微环等类型。基于光栅的外腔激光器一般通过微机电系统(MEMS)进行旋转调谐,根据旋转光栅和旋转反射镜,其可以分为 Littrow 结构和 Littman-Metcalf 结构两种方式^[3-5]。

如图 1(a)所示,Littrow 结构中激光器发出的光经过透镜准直后入射到衍射光栅,经衍射光栅选模后,将 1 级衍射光反馈回激光器有源层形成激光谐振,0 级衍射光通过激光器输出。Littrow 结构通过旋转光栅改变衍射角度实现波长调谐。如图 1(b)所示,在 Littrow 结构中加入全反射镜,即可得到 Littman-Metcalf 结构。该结构中光栅位置为固定状态,通过旋转全反射镜来改变衍射波长实现调谐。Littrow 结构外腔激光器与 Littman-Metcalf 结构外腔激光器相比,无需反射镜、结构相对简单、体积小,但是输出光位置会随光栅旋转而发生变化,或者在增益芯片端通过部分反射面输出。Littman-Metcalf 结构外腔激光器相比 Littrow 外腔激光器相对复杂,体积也较大,但是其发射激光通过两次反射,分辨率比 Littrow 结构更高,能够获得更窄的线宽。此外,Littman-Metcalf 结构外腔激光器无需旋转光栅,输出激光位置固定,因而更易于集成化封装。

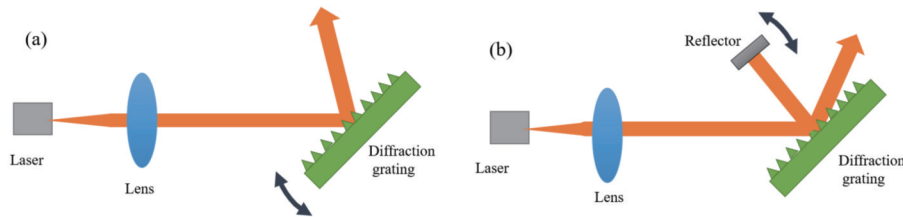


图 1 典型的外腔激光器^[3-5]。(a) Littrow 结构;(b) Littman-Metcalf 结构

Fig. 1 Typical external cavity lasers^[3-5]. (a) Littrow structure; (b) Littman-Metcalf structure

Ionon 公司研制出基于 Littman-Metcalf 结构的衍射光栅的外腔可调谐激光器^[6-7],该激光器基于 MEMS 旋转反射镜调节输出波长,反射镜绕虚拟圆心旋转,在改变波长的同时不改变反射光的方向,实现输出光位

置固定,如图 2(a)所示。Ionon 公司将外腔可调谐激光器集成封装在 14 引脚的蝶形管壳中,如图 2(b)所示,实现了调谐范围为 40 nm、边模抑制比达到 55 dB、线宽为 2 MHz、输出功率达到 7 dBm 的激光输出。

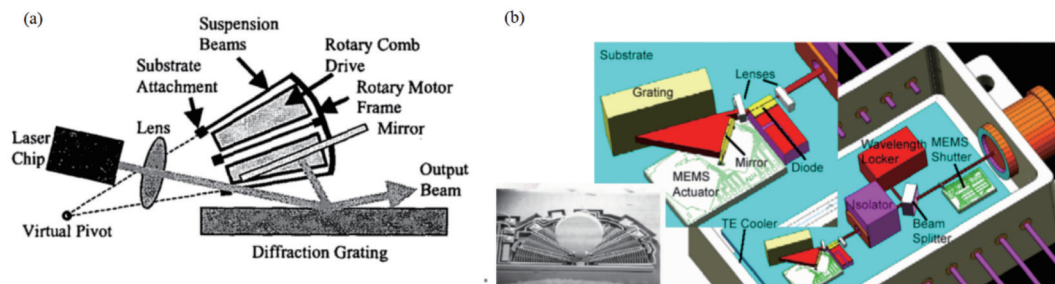


图 2 Ionon 公司外腔可调谐激光器^[6-7]。(a)原理图;(b)蝶形封装器件图

Fig. 2 Ionon's external cavity tunable laser^[6-7]. (a) Schematic; (b) butterfly package device diagram

Intel 公司开发了基于热调标准具的外腔可调谐激光器^[8]。图 3 为 Intel 热调标准具外腔可调谐激光器结构图。该方案采用了 Si 热调标准具,两个标准具的腔长稍有差异。两个标准具对应两组谐振纵模,只有两个标准具的公共谐振波长对应激光波长才能激射。激

光器工作时通过温度调节 Si 标准具来改变两个标准具谐振峰的位置,从而使激光器输出波长可调谐。Intel 公司研制的外腔可调谐激光器实现了 191.7~196.2 THz 的宽带调谐,边模抑制比超过 50 dB,输出功率可达 13 dBm,日常稳定性在 ± 100 MHz 之内,稳

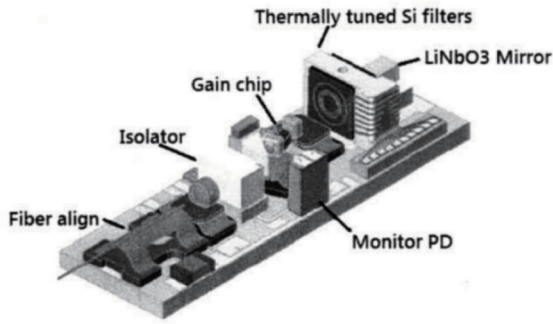


图 3 Intel 热调标准具外腔可调谐激光器^[8]

Fig. 3 Intel's tunable external cavity laser employing thermally tuned etalons^[8]

定性较好。

NEC 公司的调谐方案中引入了液晶反射镜,提出了基于单个标准具和液晶反射镜的外腔可调谐激光器^[9],如图 4 所示。该激光器主要由增益区、相位调节区、50 GHz 标准具和液晶可调反射镜组成。当激光器腔对应的纵模与标准具周期性透射峰重合时,激光器完成激射。工作时,通过调节液晶反射镜来改变外腔激光器的腔长,使激光器腔长对应的纵模与标准具不同位置的透射峰重合,从而输出不同波长的激光。外腔激光器的相位区通过施加电流进行微调,以实现激光器腔纵模与标准具透射峰精确对准。NEC 公司液晶型外腔可调谐激光器实现了 89 通道、50 GHz 间隔、35 nm 范围的调谐,输出功率达到 14.7 dBm,边模抑制比(SMSR)大于 50 dB,线宽为 700 kHz。该激光器可实现紧凑型封装,图 5 为 NEC 基于标准具和液晶反射镜的外腔可调谐激光器蝶形封装图^[10-11]。

得益于硅光技术的快速发展,硅基波导外腔可调谐激光器受到持续关注^[12-14]。图 6 所示为 NEC 研制的基于氮氧化硅微环的外腔可调谐激光器^[15-16]。用于外腔反馈的氮氧化硅芯片集成了双微环波导,两个微环谐振腔长度稍有差异,可通过游标效应调节波长。氮

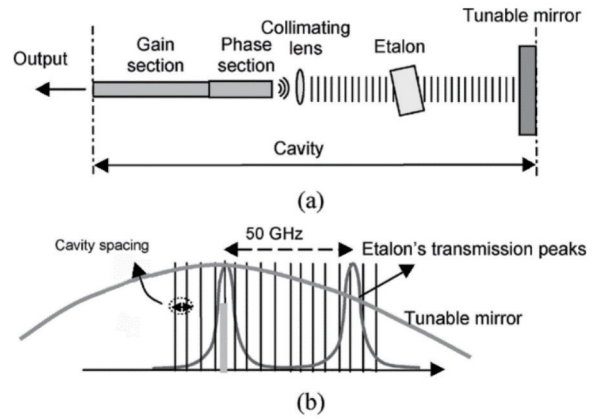


图 4 NEC 基于标准具和液晶反射镜的外腔可调谐激光器^[9]。(a) 结构原理图; (b) 调谐原理图

Fig. 4 NEC's external cavity tunable lasers based on etalon and liquid crystal mirror^[9]. (a) Structure schematic; (b) tuning schematic

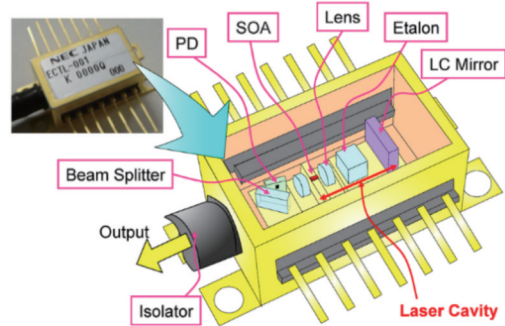


图 5 NEC 公司研制的液晶型外腔可调谐激光器^[10-11]

Fig. 5 NEC's liquid crystal external cavity tunable laser^[10-11]

氧化硅芯片右侧镀高反膜,左侧镀抗反膜并与半导体放大器(SOA)芯片直接耦合;SOA 芯片的左侧镀低反射膜并作为输出端。该激光器实现了 45~160 nm 宽带调谐,间隔为 50 GHz,边模抑制比大于 45 dB,输出功率为 29 dBm。

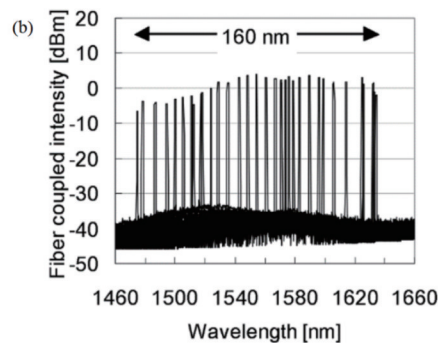
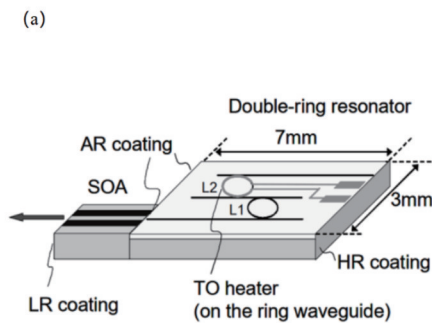


图 6 NEC 研制的氮氧化硅外腔激光器^[15-16]。(a) 结构图; (b) 调谐光谱

Fig. 6 NEC's silicon oxynitride external cavity lasers^[15-16]. (a) Structure diagram; (b) tuning spectrum

同时 NEC 公司也开发了基于 3 个微环的可调谐激光器,如图 7 所示,实现了 96 nm 宽带调谐,边模抑制比达到 50 dB,输出功率大于 13 dBm^[17]。

国内上海交通大学也报道了大范围调谐硅基外腔激光器^[18-19],该激光器采用 III-V 族化合物光接收次模块(ROSA)和低损耗氮化硅外腔芯片混合集成。其中

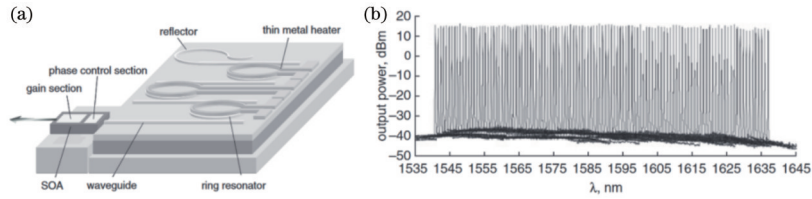


图 7 NEC 研制的三微环外腔可调谐激光器^[17]。(a) 结构图; (b) 调谐光谱

Fig. 7 External cavity tunable lasers developed by NEC with three microrings^[17]. (a) Structure diagram; (b) tuning spectrum diagram

氮化硅外腔芯片集成了模斑转化器及 3 个调谐微环, 实现了 170 nm 宽带调谐, 边模抑制比大于 64 dB, 线宽

小于 2.8 kHz, 输出功率为 14 dBm。该芯片的尺寸为 2.4 mm × 1.7 mm, 可实现蝶形封装, 如图 8 所示。

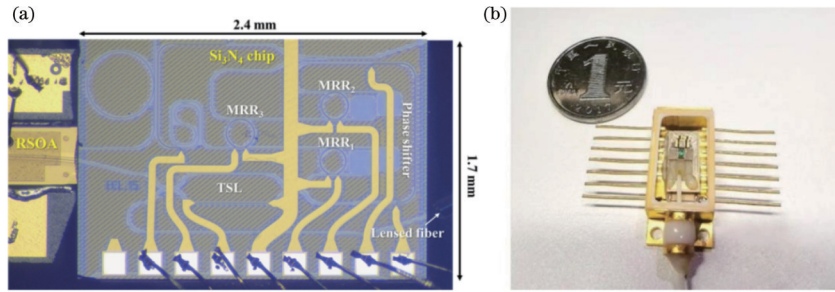


图 8 上海交通大学研制的混合集成外腔激光器^[18-19]。(a) 芯片结构; (b) 蝶形封装

Fig. 8 Hybrid integrated external cavity lasers produced by Shanghai Jiao Tong University^[18-19]. (a) Chip structure; (b) butterfly package

外腔激光器具有腔长长、线宽窄、调谐范围宽、功率大、边模抑制比高等优点, 适合于长距离相干通信。但是外腔激光器分立元件多、体积大、封装难度大、成本高, 基于机械调谐和热调谐的方案调节速度较慢, 导致应用范围受到影响。

2.2 DFB 阵列激光器

DFB 激光器具有波长稳定性好、可靠性强、成本低等特点, 在现代通信网络中海量应用。由于 DFB 结构和材料温度特性的限制, 单个 DFB 激光器也只能通

过温度调谐 3~4 nm 的范围, 很难获得宽调谐激光输出。2002 年 Santur 公司^[20-21] 将 12 通道 DFB 激光器阵列芯片组合到一起, 如图 9 所示。通过 MEMS 反射镜旋转特定角度来完成特定的 DFB 激光器与输出光纤的耦合。该结构中 MEMS 具有较高的调节精度, 且没有使用多通道耦合器, 故腔损耗较小。Santur 公司研制的可调谐激光器实现了 50 GHz 间隔、84 信道、33 nm 带宽的调谐输出, 边模抑制比大于 43 dB, 输出功率达到 13 dBm。

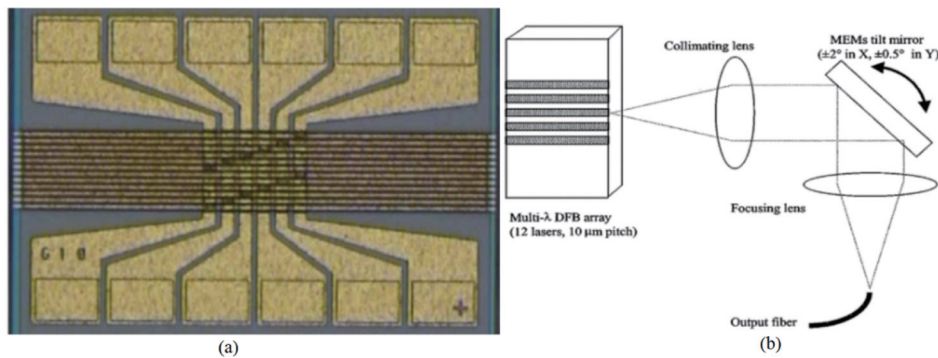


图 9 Santur 公司的可调谐激光器^[12]。(a) 芯片; (b) 封装结构示意图

Fig. 9 Santur's tunable laser^[12]. (a) Chip; (b) schematic of package structure

2003 年 NEC 利用片上多模干涉耦合器将 DFB 阵列激光器耦合到同一波导, 并集成了半导体放大器以提高输出功率^[22]。NEC 用 6 个 8 路 DFB 阵列激光器覆盖了 S 波段、C 波段和 L 波段。

图 10 为 NEC 8 路 DFB 阵列激光器结构图, 芯片尺寸为 0.4 mm × 2.15 mm。8 个 DFB 激光器分别通过 8 个弯曲波导合成到一个 8 × 1 多模干涉 (MMI) 合

束器中, MMI 合束器输出光通过 SOA 放大后输出。为了抑制端面反射, SOA 波导输出端与芯片端面呈一定角度并镀上抗反膜。

如图 11 所示, 该器件合成了 6 个 8 路 DFB 阵列激光器, 每个 DFB 激光器的光栅周期稍有差异, 导致激光器发射波长有 3~4 nm 的差异, 正好对应单个 DFB 激光器的调谐范围。通过此方案实现了 100 GHz 间

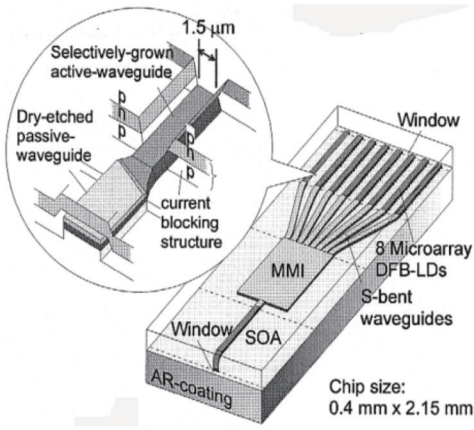


图 10 NEC 8 路阵列激光器^[22]

Fig. 10 NEC's 8-channel array lasers^[22]

隔、135 nm 调谐带宽的激光输出,覆盖了 S、C、L 3 个

波段,边模抑制比大于 42 dB,输出功率大于 10 dBm。S1、S2、C1 这 3 个 8 路 DFB 阵列激光器在同一个晶片上制作;C2、L1、L2 在另外一个晶片上制作。

日本 NTT 公司用类似 MMI 耦合方案,单片集成了 12 个 DFB 激光器,实现了调谐带宽为 40 nm、输出功率为 13 dBm、边模抑制比大于 50 dB 的激光输出,通过增加激光器腔长,整个调谐范围内线宽小于 580 kHz^[23]。虽然基于 MMI 的 DFB 阵列激光器实现了单片集成,但是多个 DFB 激光器的 MMI 耦合损耗较大,加拿大 Nortel 公司采用 2×3 的级联式结构^[11],如图 12 所示,降低了耦合损耗。

在国内研究方面,南京大学利用重构等效啁啾(REC)技术精确控制每个 DFB 激光器的波长间隔,开发了 2×4 级联式 DFB 激光器阵列。该激光器实现了 32 通道 100 GHz 激光输出,边模抑制比约为 40 dB,并具有单模特性好、波长精度高的优点^[11,24-25]。

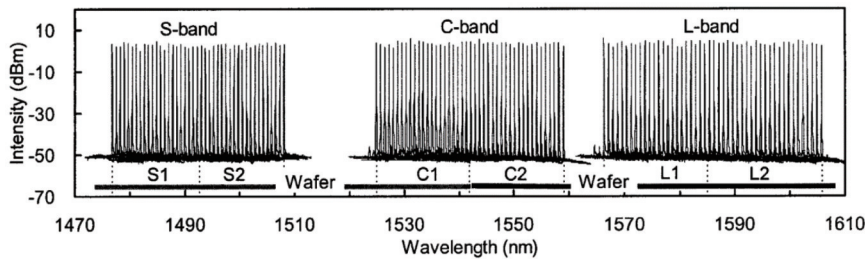


图 11 NEC 6 个 8 路 DFB 阵列激光器调谐光谱^[22]

Fig. 11 Tuning spectra of 6 pieces of 8-channel DFB array lasers produced by NEC^[22]

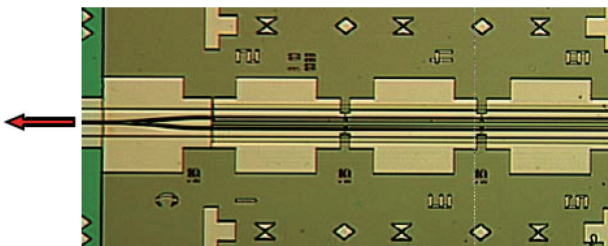


图 12 加拿大 Nortel 公司级联式 DFB 可调谐激光器^[11]

Fig. 12 Cascade DFB tunable lasers from Nortel, Canada^[11]

DFB 阵列可调谐激光器采用成熟的 DFB 激光器组合,具有稳定性较好、调谐原理简单且易于定标的特点,但是芯片良品率随集成 DFB 激光器数量增加呈指数下降。MMI 和级联结构方案的耦合损耗大、输出功率较低;机械旋转方案的耦合损耗小、输出功率高,但是制作成本高、长期稳定性差。

2.3 可调谐 VCSEL

垂直腔表面发射激光器(VCSEL)最早由德国 Ulm 大学开发^[26-27]。VCSEL 的光学腔反射面由外延生长的 DBR 光栅制作而成,出光方向垂直于层状结构。VCSEL 一般采用 GaAs 材料体系,工作波长主要集中在 750~1000 nm,能够通过热效应调谐波长,在 80° 范围内可以实现 4.8 nm 连续调谐,输出功率大于 -3 dBm,边模抑制比大于 30 dB^[28]。Bandwidth 公司和 Coretek 公司提出了基于 MEMS 的可调谐

VCSEL^[29-30],主要方法是将 DBR 反射镜安装在一个 MEMS 机械臂上,给 MEMS 机械臂施加不同的电压时,会产生不同大小的静电力(图 13)。机械臂上的 DBR 反射镜随静电力变化上下移动,改变 VCSEL 的腔长,从而实现波长调谐。Coretek 公司采用光泵浦和大带宽介质反射镜^[31],调谐范围可以覆盖整个 C 波段;通过多次收购整合,Coretek 公司相关技术归于 Lumentum 公司。

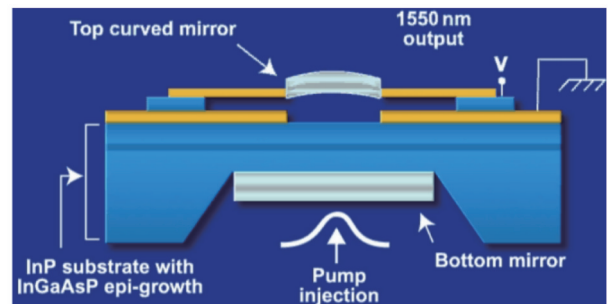


图 13 可调谐 VCSEL 结构原理图^[6]

Fig. 13 Schematic of tunable VCSEL structure^[6]

VCSEL 垂直出光方便大规模片上自动化测试,无需解理,可以在晶圆状态下判断芯片良率,节约成本。普通 VCSEL 具有低功耗、低成本、高调制速率等优势,目前已经在短距通信中大量应用,如数据中心大量使用 850 nm VCSEL 激光器。但是,可调谐 VCSEL

由于功率低、长波单模 VCSEL 制作困难、良率低,难以在城域密集波分系统中应用。

2.4 可调谐 DBR 激光器

采样光栅分布反射(SG-DBR)可调谐激光器最早由美国加州大学提出,并被 JDSU(现 Lumentum)成功商用^[6,32-33]。典型的 SG-DBR 包含前向光栅、增益区、相位区、后向光栅,如图 14 所示。前向采样 DBR 光栅的反射波长间隔和后向采样 DBR 光栅的周期性反射波长间隔略有不同,通过调节前向或者后向光栅反射峰的位置,就可以通过游标效应在整个 C 波段内完成宽带调

谐激光输出。SG-DBR 激光器同样在相位区注入电流,精确调整谐振峰与前向光栅和后向光栅反射峰对准。为了提高 SG-DBR 激光器的输出功率,通常还会单片集成半导体放大器。由于 SG-DBR 激光器的谐振腔较长,难以通过直接调制获得高比特率的光信号输出,因此在通信应用中常会在激光器输出口集成电吸收(EA)或者马赫-曾德尔(M-Z)调制器。集成 SOA 的 SG-DBR 可调谐激光器可以覆盖 C 波段、L 波段或者 C+L 波段,调谐范围超过 40 nm,输出功率可达 13 dBm,边模抑制比大于 40 dB,线宽小于 2.5 MHz。

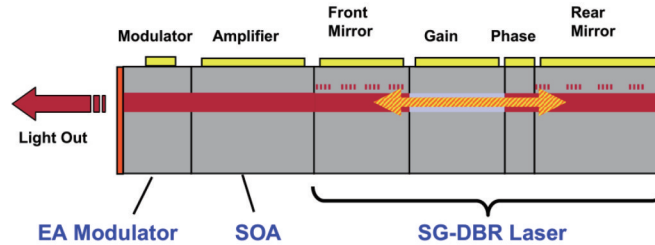


图 14 典型 SG-DBR 结构原理图^[6]

Fig. 14 Schematic of typical SG-DBR structure^[6]

数字超模分布反射(DS-DBR)激光器^[34]的基本原理和 SG-DBR 激光器相似,都包含前向光栅、增益区、相位区、后向光栅;不同的是,DS-DBR 激光器采用前向啁啾光栅和后向采样光栅组合选模来取代 SG-DBR 中的两个采样光栅。图 15 所示为 DS-DBR 激光器芯片及其前向、后向光栅反射谱。通过给前向光栅的不同电极加电,可以实现前向光栅的反射谱在增益谱内大范围移动。后向采样光栅反射谱为一系列周期性反

射峰,通过与前向光栅组合实现激光输出。集成 SOA 的 DS-DBR 激光器输出功率大于 13 dBm,线宽为 0.5 MHz,调谐范围为 47 nm。尽管 DS-DBR 激光器的调节电极多、需要额外 SOA 提高输出功率、封装难度较大、调谐较为复杂,Bookham (Oclaro)公司还是实现了 DS-DBR 激光器商用。目前 JDSU 的 SG-DBR 可调谐激光器和 Oclaro 的 DS-DBR 可调谐激光器的相关技术都归于 Lumentum。

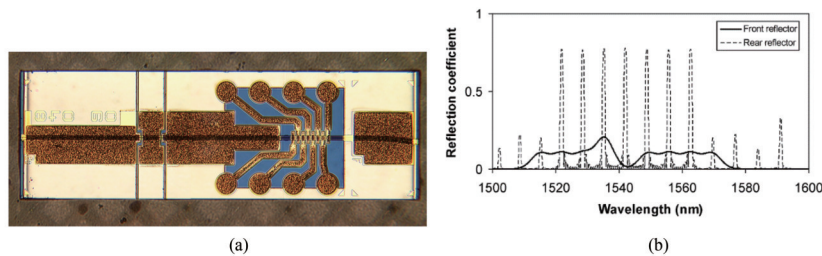


图 15 DS-DBR 激光器^[34]。(a)芯片;(b)前向、后向光栅反射谱

Fig. 15 DS-DBR lasers^[34]. (a) Chip; (b) reflection spectra from forward and backward grating

NTT 公司提出一种超结构光栅 DBR(SSG-DBR)激光器,利用超结构光栅对采样光栅进行相位和啁啾处理,可得到比采样光栅更平坦、更宽的反射谱,因此获得的调谐范围也更大,超过 100 nm^[35-37]。但是,超结构光栅的工艺难度较大,未能大范围推广使用。

另外一款商用比较成功的激光器为瑞典皇家理工学院研制的光栅 Y 分支(MG-Y)激光器^[38-39]。如图 16 所示, MG-Y 激光器包含增益区、相位区、多模干涉 Y 分支、两分支处的反射光栅。反射光栅可以是采样光栅、超结构光栅等周期性反射光栅。工作过程中,给两个光栅分别注入不同的电流,两个光栅分别产生间距不等的反射谱,当反射峰重合时完成波长激射。当改

变注入电流时,可以通过游标效应调节输出波长,通过调节相位区电流实现反射波长的精确对准。MG-Y 激光器的调谐范围可以覆盖 C 波段(约 50 nm),在 150 mA 增益电流下,其输出功率大于 14 dBm。与 SG-DBR 激光器不同, MG-Y 激光器利用两组反射峰的叠加效果而非相乘效果实现激光激射。MG-Y 激光器已在 Finisar(被 II-IV 收购)公司进一步改进和批量商用。在此推动下, MG-Y 相关设计理论、封装也受到国外研究机构的关注^[40-41]。

国内模块提供商海信于 2013 年收购了美国 Multiplex 公司,获得了 DBR 激光器的芯片制造技术,发现 DBR 激光器的结构采用经典的三段式。如图 17

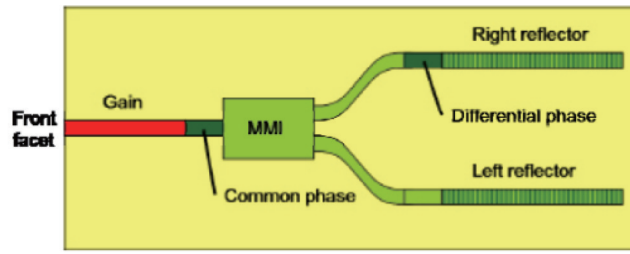


图 16 MG-Y 激光器原理图^[38-39]
Fig. 16 Schematic of MG-Y lasers^[38-39]

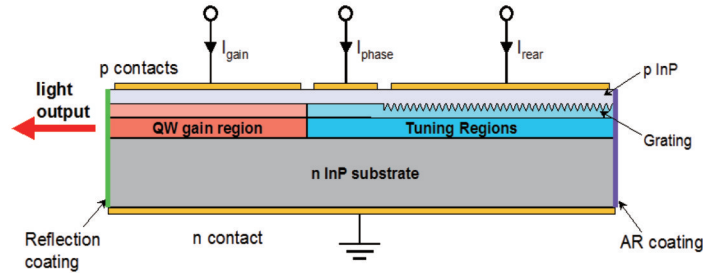


图 17 三段式 DBR 激光器结构原理图^[12]
Fig. 17 Schematic of structure of three section DBR lasers^[12]

所示,所述三段式 DBR 激光器包含增益区、相位区、后向光栅。该设计通过改变注入电流来调控 DBR 光栅的反射波长,不包含拓展调谐范围的游标效应等机制,调谐范围一般限制在 5~10 nm^[42-43]。

2020 年,中国科学院半导体研究所通过组合两个可调谐 DBR 激光器,实现了 C 波段 20 nm 宽带调谐,在调谐范围内实现 10 Gbit/s、30 km 无误码传输^[44]。2021 年,华中科技大学在提升可调谐 DBR 激光器带宽方面取得了较大进展——分析了非对称、非线性增益对可调谐三段式 DBR 激光器带宽的影响,通过降低相位电流、增加非线性增益、提高载流子和光子共振频率(CPR),将 DBR 激光器 3 dB 带宽提升到 27 GHz,但此方案会降低激光器的边模抑制比,只适用于短距离传输^[45]。2022 年,华中科技大学通过在布拉格光栅中央

加入均匀波导,在光栅反射谱中央形成 V 型凹陷,通过光光共振效应(PPR)提高可调谐 DBR 激光器的带宽,实现了 7 nm 调谐范围、40 GHz 频率的直接调制高速信号输出^[46]。

2.5 微环单片集成可调谐激光器

微环谐振腔透射谱平坦^[47],可以实现大范围的波长调谐,但是单个微环激光器要实现单纵模工作,谐振腔不能过短。日本 NTT 实验室通过单片集成两个微环来构建无光栅结构的可调谐激光器,如图 18 所示,通过两个微环谐振腔的游标效应实现激光器单纵模输出,通过 7 mA 电流就可以实现全 C 波段 50 nm 宽带调谐,但是边缘通道的边模抑制比较低,光纤耦合输出功率小于 0 dBm^[48]。基于微环的可调谐激光器的调谐范围大、线宽窄,但微环制作精度要求高、集成方案较为复杂。

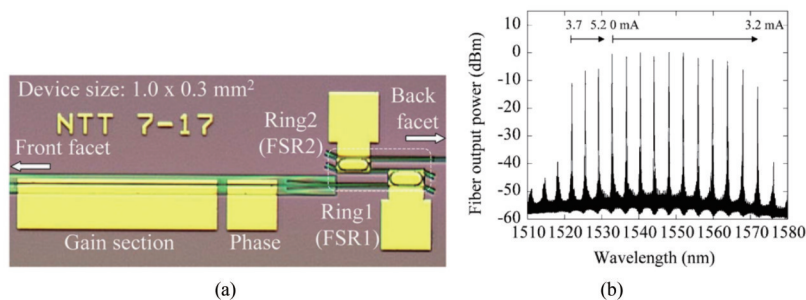


图 18 NTT 单片集成微环可调谐激光器^[48]。(a) 芯片;(b) 调谐光谱
Fig. 18 NTT's monolithic integrated microring tunable lasers^[48]. (a) Chip; (b) tuning spectrum

2.6 刻蚀槽可调谐激光器

贝尔实验室开发了基于单刻蚀槽的耦合腔可调谐激光器,但实验中获得的边模抑制比太低,难以获得广

泛应用^[49-50]。采用多刻蚀槽方案(图 19),可调谐激光器输出的边模抑制比超过 30 dB,得到显著改善,调谐范围接近 30 nm,最大输出功率大于 14 dBm^[51-52]。

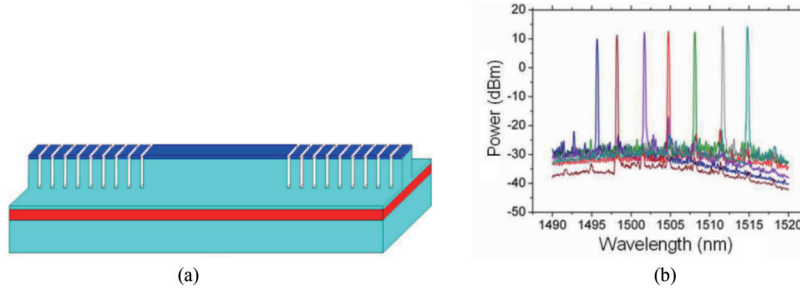


图 19 多刻蚀槽激光器^[51-52]。(a)原理图;(b)输出光谱

Fig. 19 Multi-etched groove lasers^[51-52]. (a) Schematic; (b) output spectra

中国科学院半导体研究所利用多个不同周期、不同发射倾斜角的刻蚀槽可调谐激光器构成阵列可调谐激光器,并将其作为激光雷达的发射光源,在实验中搭建了 11 通道的可调谐激光器阵列,发射倾角范围为 $20.25^\circ \sim 66.6^\circ$, 600 mA 电流下输出功率为 11 dBm^[53]。此外,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所搭建了 1060 nm 波段的刻蚀槽可调谐激光器,通过调节电流和温度,实现了 20 nm 宽带调谐,边模抑制比大于 30 dB,最大输出功率为 20 dBm^[54]。

刻蚀槽可调谐激光器方案具有无需制作光栅,结构和工艺简单的特点,但是刻蚀槽可调谐激光器结构对刻蚀槽的精度比较敏感,难以精确控制,输出激光的边模抑制比低,易出现由相位失配导致的多模问题。

3 新型 V 型腔可调谐半导体激光器

随着带宽需求的增加,波分网络下沉到城域网和终端用户侧的接入网,亟需降低可调谐激光器成本以完成大规模铺设。浙江大学的何建军教授课题组提出基于半波耦合的低成本 V 型腔可调谐激光器^[55-56]。V

型腔可调谐激光器可消除由传统光栅固定特征波长带来的波长调谐范围的限制,无需多次外延生长和光栅刻蚀等复杂制作工艺,从而降低成本;通过采用固定波长间隔的数字式切换,只需使用单电极进行波长控制,从而简化相应驱动电路并增强可靠性。V 型腔可调谐激光器具有单电极波长控制、与国际电信联盟 (ITU) 波长标准网格相匹配的数字式波长切换、简单可靠的控制电路、高切换速度、尺寸小、无需光栅、制作简单等优点,且采用与普通法布里-珀罗激光器相同的制作工艺,因此工艺成熟、成本低廉,非常适合用于 DWDM 波分网络的大规模部署。

3.1 新型 V 型腔可调谐激光器原理

图 20 为集成 MZI 的 V 型腔可调谐激光器原理图。V 型腔可调谐激光器包含两个由深刻蚀槽限定的谐振腔,两个谐振腔的长度略有不同,呈 V 型排布,其中固定增益腔的谐振频率间隔可表示为

$$\Delta f = \frac{c}{2n_g L}, \quad (1)$$

式中: c 为光速; n_g 为固定增益腔波导的有效群折射率; L 为固定增益腔的长度。

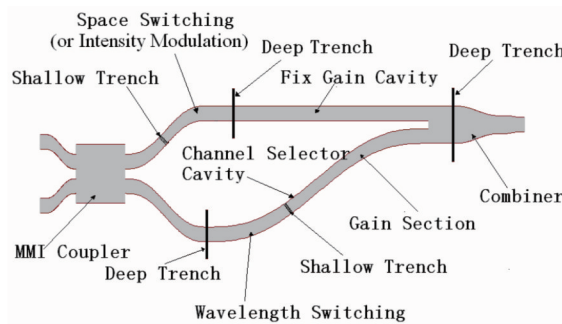


图 20 集成 MZI 的 V 型腔可调谐激光器原理图^[55]

Fig. 20 Schematic of the tunable V-cavity laser with integrated MZI^[55]

同理,通道选择腔的谐振频率间隔可表示为

$$\Delta f' = \frac{c}{2n_g' L'} = \frac{c}{2(n_a L_a + n_b L_b)}, \quad (2)$$

式中: L_a 、 L_b 分别为增益区和波长选择区的长度; n_a 、 n_b 分别为增益区和波长选择区对应的群折射率; L' 为通道选择腔的长度; n_g' 为通道选择腔的平均有效折射率。通道选择腔的频率间隔 $\Delta f'$ 与固定增益腔的谐振

频率间隔 Δf 相近,以保证增益谱范围内只有一个通道选择腔与固定增益腔重合的共振峰。两个相邻对准共振峰之间的频率间隔可表示为

$$\Delta f_c = \frac{\Delta f \Delta f'}{|\Delta f - \Delta f'|}, \quad (3)$$

式中: Δf_c 为 V 型腔激光器的自由光谱范围。 Δf_c 比增益谱宽度略大,以保证激光器单纵模输出,如图 21 所

示。波长选择腔可以通过热效应和载流子注入效应来改变折射率,从而改变 $\Delta f'$ 。当波长选择腔的谐振峰变化 $|\Delta f - \Delta f'|$ 时,激光器输出频率变化为 Δf ,因此

激光器频率变化是由折射率导致的波长选择腔频率变化的 $\Delta f / |\Delta f - \Delta f'|$ 倍,这也就是通常所说的游标效应。

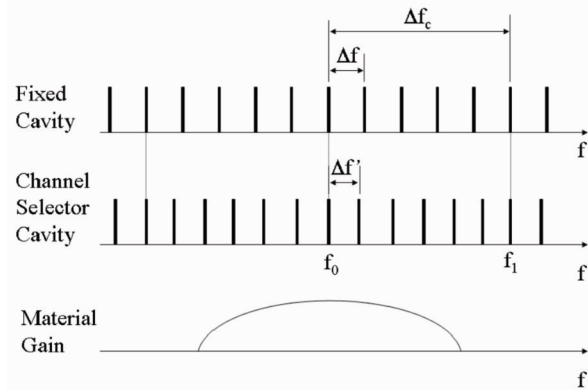


图 21 V 型腔可调谐激光器的调谐原理^[55]

Fig. 21 Tuning principle of the tunable V-cavity laser^[55]

图 22 为基于反射型 2×2 耦合器的 V 型腔可调谐激光器对称展开图。定义固定增益腔的输入、输出电场为 E_1 和 E_1' , 通道选择腔的输入、输出电场为 E_2 和 E_2' , W_c 为耦合器在宽度方向的间隙, L_c 为耦合器长度, 则有

$$E_1' = r_1 r_2 \left\{ C_{11} E_1 \exp[(g + ik)L] + C_{21} E_2 \exp[(g' + ik')L'] \right\} \exp[(g + ik)L], \quad (4)$$

$$E_2' = r_1 r_2 \left\{ C_{12} E_1 \exp[(g + ik)L] + C_{22} E_2 \exp[(g' + ik')L'] \right\} \exp[(g' + ik')L'], \quad (5)$$

式中: r_1, r_2 分别为耦合器端和 V 型开口端深刻蚀槽的反射率; C_{11} 和 C_{22} 分别为固定增益腔和通道选择腔的自耦合系数; C_{12} 和 C_{21} 分别为固定增益腔和通道选择腔的交叉耦合系数。根据激光振荡阈值条件, 考虑对称结构, 合理认为自耦合系数为正实数, 交叉耦合系数与自耦系数存在相对相位差 ϕ , 因此耦合区域光输出可以表示为

$$P_1 = \frac{1}{2} \left[|C_{11}|^2 + |C_{21}|^2 + 2|C_{11}||C_{21}|\cos(\phi + \phi) \right], \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \left[|C_{12}|^2 + |C_{22}|^2 + 2|C_{12}||C_{22}|\cos(\phi - \phi) \right], \quad (7)$$

式中: ϕ 为耦合器端两个波导输入光场的相位差。

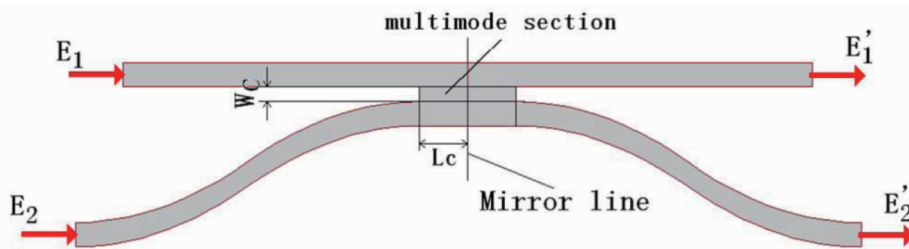


图 22 基于反射型 2×2 耦合器的 V 型腔可调谐激光器对称展开原理图^[55]

Fig. 22 Schematic of symmetrical expansion of the tunable V-cavity laser based on reflective 2×2 coupler^[55]

传统耦合器的自耦系数与交叉耦合系数的相位差为 90° , 此时随着耦合器两个波导输入端相位差的变化, 输出端能量互补, 不存在与相位(波长)相关的损耗, 如图 23(a) 所示。V 型腔可调谐激光器耦合器的自耦系数与交叉耦合系数的相位差为 180° , 此时输出端能量不存在互补关系, 但存在与相位(波长)相关的损耗, 如图 23(b) 所示。V 型腔可调谐激光器利用该机制进行选模, 实现高边模抑制比的激光输出。

3.2 新型 V 型腔可调谐激光器进展

2011 年浙江大学成功设计和制作出基于半波耦合的 V 型腔可调谐激光器, 如图 24 所示。V 型腔可调

谐激光器包含固定增益腔和通道选择腔, 两个腔的长度稍有差异。他们利用新型复合腔的匹配共振特性和 Vernier 游标原理实现 26 通道、100 GHz 间隔的宽带调谐^[56]。

2013 年浙江大学通过组合不同温度的调谐曲线, 扩展了 V 型腔可调谐激光器的调谐范围, 在 1550 nm 波段实现了 50 通道 100 GHz 间隔调谐, 边模抑制比达到了 38 dB, 如图 25 所示^[57]。

2014 年荷兰 COBRA 基于 3×3 耦合器研制了 V 型腔可调谐激光器, 优化了输入端光场的耦合。该激光器通过选择耦合单元复传输系数来增强模式选择效

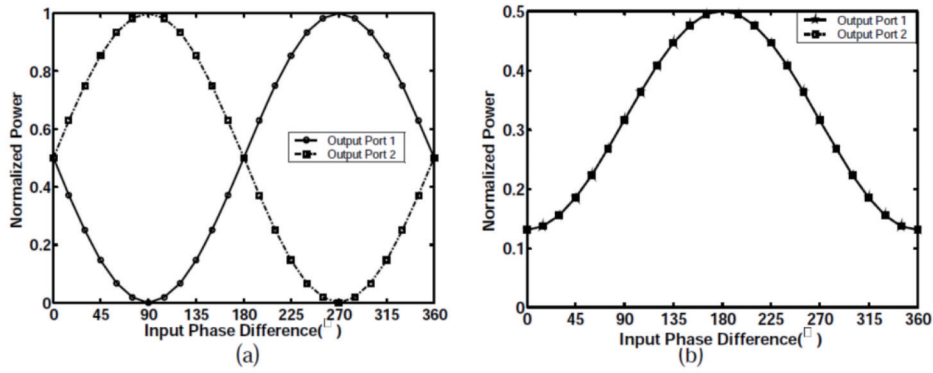


图 23 输出光场随输入相位差的变化^[55]。(a)耦合相位差为 90°; (b)耦合相位差为 180°

Fig. 23 Change of output light field with input phase difference^[55]. (a) Coupling phase difference is 90°; (b) coupling phase difference is 180°

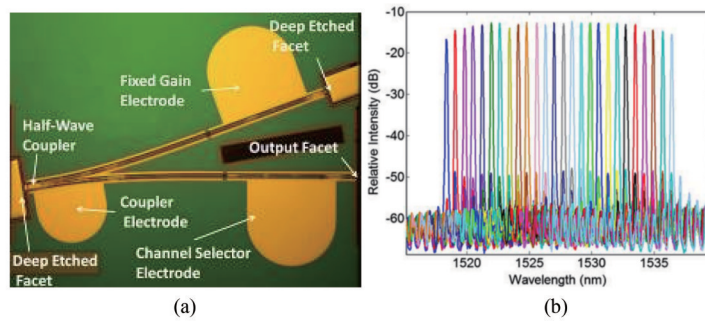


图 24 半波耦合 V 型腔可调谐激光器^[56]。(a)芯片结构; (b)调谐光谱

Fig. 24 Half-wave coupled V-cavity tunable laser^[56]. (a) Chip structure; (b) tuning spectra

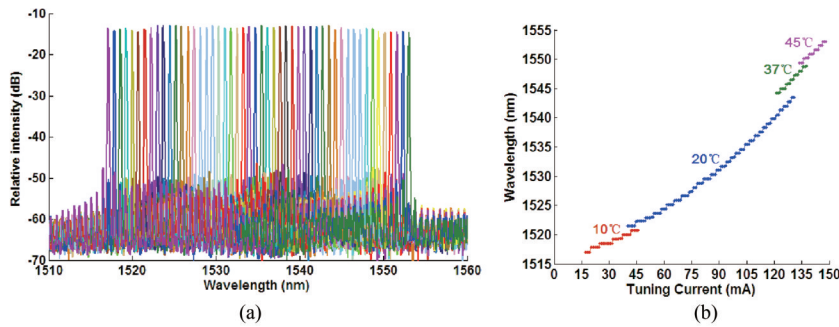


图 25 V 型腔可调谐激光器^[57]。(a)调谐光谱; (b) 4 个不同温度下调谐曲线

Fig. 25 Tunable V-cavity laser^[57]. (a) Tuning spectra; (b) tuning curves at four different temperatures

果,调谐范围可达 6.5 nm,边模抑制比达到 40 dB^[58], 如图 26 所示。

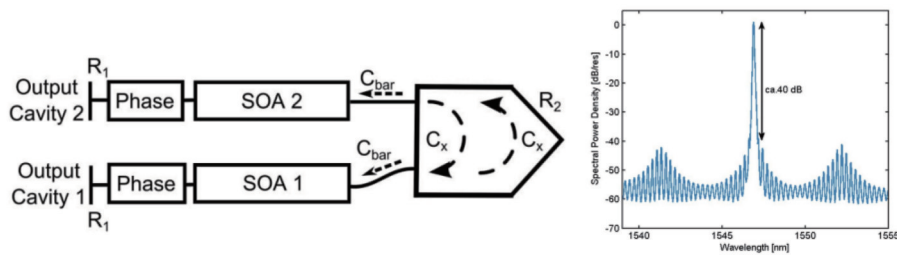


图 26 COBRA V 型腔可调谐激光器原理图和典型输出光谱^[58]

Fig. 26 Schematic and typical output spectrum of COBRA's tunable V-cavity laser^[58]

除了 C 波段外,对其他波段的 V 型腔可调谐激光器的研究同样取得了突破。浙江大学与美国加州大学圣塔芭芭拉分校合作,采用 InAs/GaAs 量子点开发了

O 波段可调谐激光器,实现了 27 通道、间隔为 0.2 nm、边模抑制比达到 35 dB、线宽为 716 kHz 的激光输出,并在片上测试了 8 Gbit/s 直调眼图^[59],如图 27 所示。

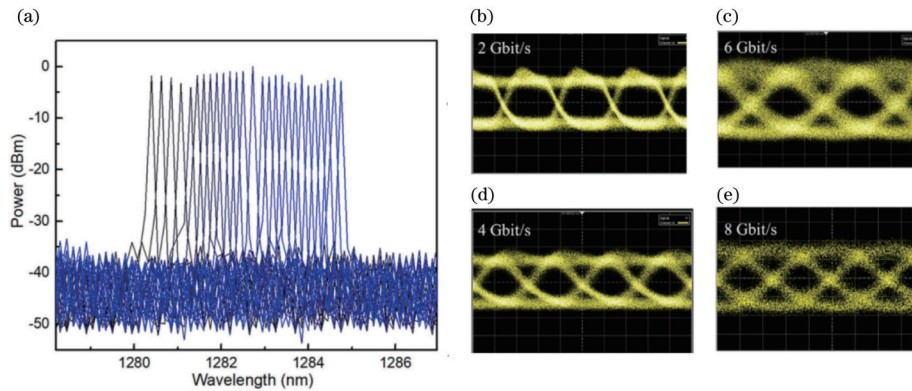


图 27 O 波段可调谐激光器^[59]。(a)调谐光谱;(b)直接调制 2 Gbit/s 眼图;(c) 6 Gbit/s 眼图;(d) 4 Gbit/s 眼图;(e) 8 Gbit/s 眼图
Fig. 27 O-band tunable lasers^[59]. (a) Tuning spectra; (b) direct modulation 2 Gbit/s eye diagram; (c) 6 Gbit/s eye diagram; (d) 4 Gbit/s eye diagram; (e) 8 Gbit/s eye diagram

2019 年美国惠普实验室也开展了 O 波段 V 型腔可调谐激光器的研究,在 $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.13}\text{As}$ 多量子阱的平台上实现了 O 波段 38 nm 的 V 型腔可调谐激光

器^[60],该激光器的边模抑制比大于 35 dB,输出功率约为 5 dBm,直接调制 3 dB 带宽达到 14 GHz,如图 28 所示。

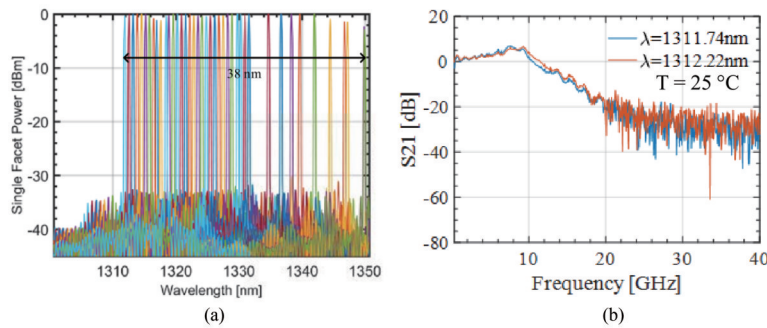


图 28 惠普 O 波段 V 型腔可调谐激光器^[60]。(a)调谐光谱;(b) 3 dB 带宽
Fig. 28 HP's O-band tunable V-cavity laser^[60]. (a) Tuning spectra; (b) 3 dB bandwidth

V 型腔可调谐激光器在中红外波段同样取得了突破。2020 年,浙江大学与美国 Oklahoma 大学合作,采用 InAs/GaSb/AlSb 材料完成了 $3\ \mu\text{m}$ 中红外 V 型腔可调谐激光器开发^[61]。该激光器的边模抑制比大于 28 dB,调谐范围为 53 nm,如图 29 所示。通过组合两段不同温度的调谐曲线可以实现 60 nm 范围的 54 通道调谐。

2022 年浙江大学利用聚合镜像多模干涉耦合器进一步改进了半波耦合 V 型腔可调谐激光器^[62]。图 30(a)所示为 16×16 MMI V 型腔可调谐激光器;图 30(b)为 16×16 MMI 扫描电子显微镜(SEM)图像。改进的半波耦合 V 型腔可调谐激光器可实现单电极 38 通道(100 GHz 和 150 GHz)调谐;通过组合不同温度下的两个单电极调谐可实现 52 通道 70 nm(1515~1585 nm)宽带调谐,边模抑制比达到 45 dB^[62],如图 31 所示。

为了实现高速数据传输,目前 V 型腔可调谐激光器已完成与 EA 调制器和 M-Z 调制器的单片集成。集

成 EA 的 V 型腔可调谐激光器已实现产业化,在下一节中阐述。图 32(a)所示为单片集成 M-Z 的 V 型腔可调谐激光器芯片;图 32(b)所示为单片集成 M-Z 的 V 型腔可调谐激光器 64 通道调谐光谱;图 32(c)所示为集成 M-Z 调制器的电光响应曲线。M-Z 集成 V 型腔可调谐激光器实现了 64 通道(1513~1565 nm)宽带调谐,3 dB 带宽达到 14.2 GHz^[63]。

3.3 V 型腔可调谐激光器产业化进展

V 型腔可调谐激光器的结构简单、制作成本低、调谐范围宽,目前在产业化方面也取得了重要进展。2017 年杭州兰特普实现了 93 信道、50 GHz 间隔的全 C 波段可调谐光模块,采用直接调制方式,在 2.5 Gbit/s 速率下可在单模光纤中传输 50 km 以上,在 8.5 Gbit/s 速率下可传输 10 km^[64]。杭州兰特普在第 42 届美国光纤通讯展览会及研讨会(OFC 2017)上发布演示了波长自适应可调谐光模块,在 2020 年深圳光博会(CIOE)上演示了基于可调谐激光器的分布式光交换系统。

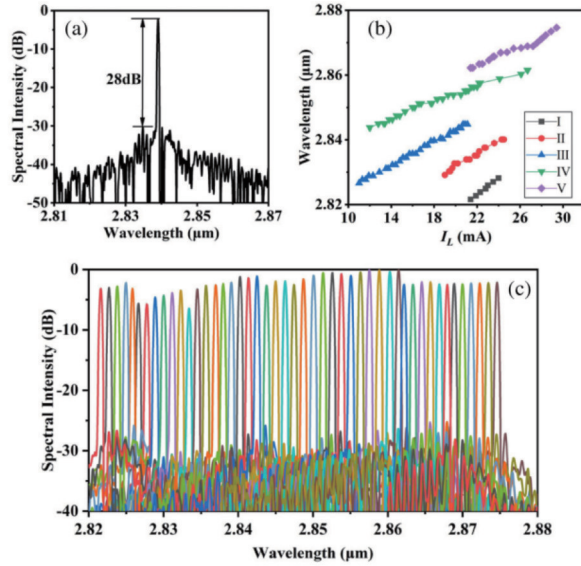


图 29 中红外 V 型腔可调谐激光器^[61]。(a)典型光谱图;(b)不同电流和温度下的调谐曲线;(c) 53 nm 范围的 47 通道调谐光谱
 Fig. 29 Mid-infrared tunable V-cavity laser^[61]. (a) Typical spectrum; (b) tuning curves at different currents and temperatures; (c) 47-channel tuning spectra in the range of 53 nm

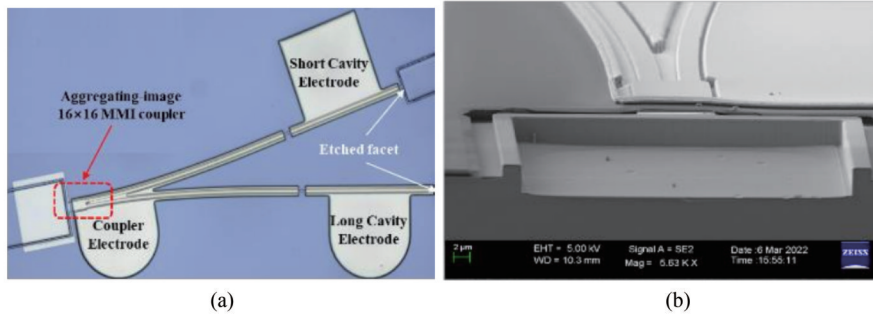


图 30 16×16 MMI^[62]。(a) V 型腔可调谐激光器;(b) SEM 图像
 Fig. 30 16×16 MMI^[62]. (a) Tunable V-cavity lasers; (b) SEM image

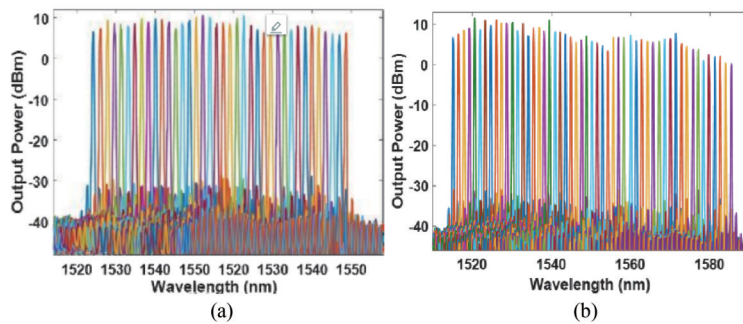


图 31 16×16 MMI 耦合器 V 型腔激光器^[62]。(a)单温度单电极调谐光谱;(b)组合两个温度的单电极调谐光谱
 Fig. 31 16×16 MMI coupler V-cavity laser^[62]. (a) Tuning spectra under single-temperature and single-electrode; (b) single-electrode tuning spectra combining two temperatures

杭州兰特普已推出 10 Gbit/s 的 DML 和 EML SFP 器件和模块产品。10 Gbit/s 直调可调谐激光器由于存在 1550 nm 波段色散问题,目前不支持长距离传输;10 Gbit/s EML 激光器啁啾较小,可支持 50 km 长距离传输^[65]。图 33(a)所示为 41 nm 宽带可调 EML 光谱;图 33(b)为 10 Gbit/s 直调光模块典型眼图;图

33 (c)为 10 Gbit/s EML 光模块典型眼图。图 34 所示为 V 型腔可调谐激光器在 1546.92~1587.88 nm 工作时的背靠背(BTB)、25 km、50 km 误码率曲线,50 km 传输时灵敏度小于 -22 dBm。

2022 年杭州兰特普通过进一步优化 EA 芯片结构和器件封装设计,推出了 25 Gbit/s 32 信道可调 EML

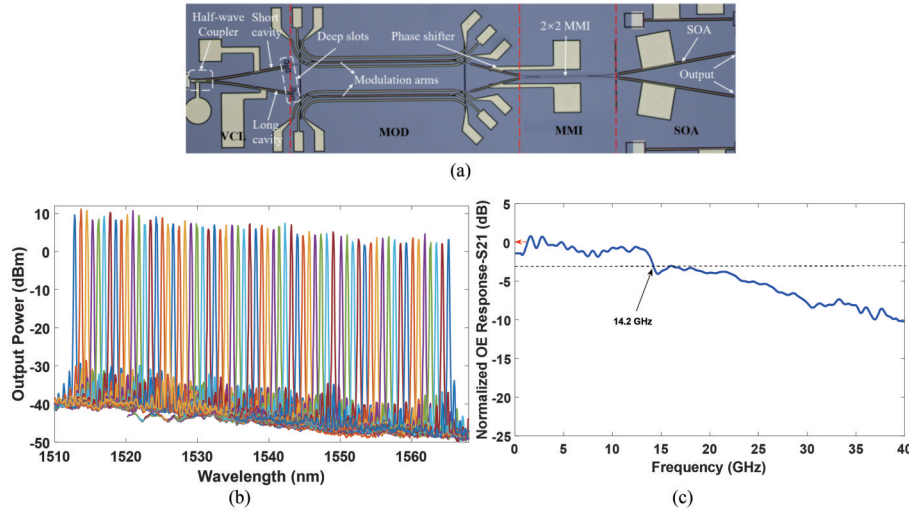


图 32 单片集成 M-Z 调制器的 V 型腔可调谐激光器^[63]。(a) 芯片；(b) 64 通道调谐光谱；(c) 集成 M-Z 调制器的电光响应曲线
Fig. 32 Tunable V-cavity laser with monolithic integrated M-Z modulator^[63]. (a) Chip; (b) 64-channel tuning spectra; (c) electro-optical response curve of integrated M-Z modulator

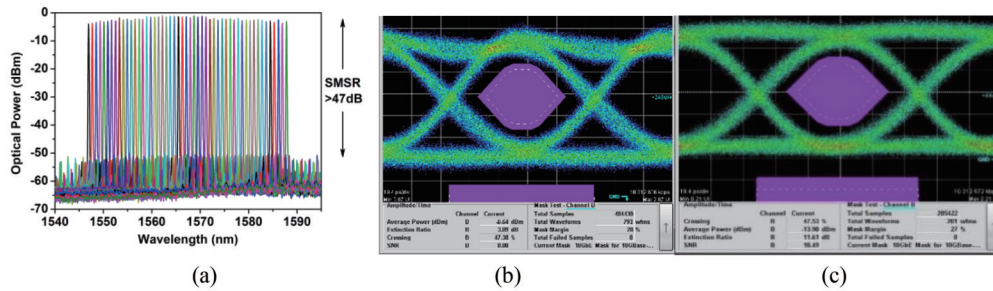


图 33 10 Gbit/s 光模块^[65]。(a) 41 nm 宽带可调光谱；(b) 典型直调眼图；(c) 典型电吸收眼图
Fig. 33 10 Gbit/s optical module^[65]. (a) 41 nm broadband tuning spectra; (b) typical eye diagram of direct modulation; (c) typical eye diagram of electro-absorption

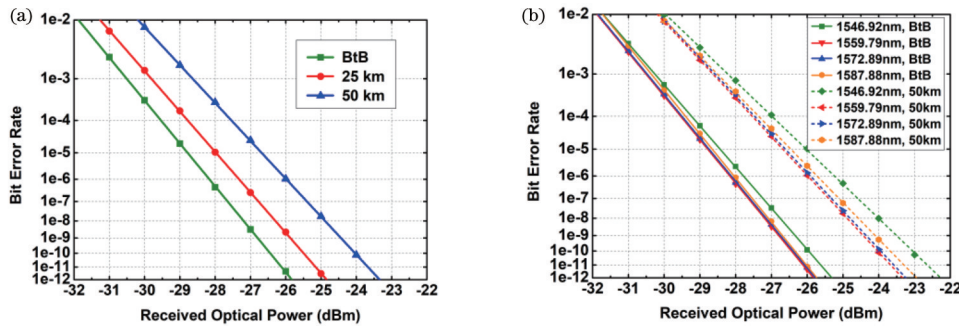


图 34 V 型腔可调谐激光器不同波长、不同距离的误码率曲线^[65]。(a) 波长为 1559.79 nm 时的误码率曲线；(b) 不同波长时的误码率曲线
Fig. 34 Bit error rate curves of tunable V-cavity lasers at different wavelengths and distances^[65]. (a) Bit error rate curves at wavelength of 1559.79 nm; (b) bit error rate curves at different wavelengths

器件和模块样品。图 35(a)所示为杭州兰特普设计制作的单片集成 25 Gbit/s 可调谐 EML 芯片；图 35(b)所示为小型化 Box 封装 25 Gbit/s 可调谐电吸收激光器 (EML) 器件；图 35(c)所示为 25 Gbit/s 可调谐 EML 模块，满足小形式封装 (SFF) 协议标准；图 35(d)所示为 25 Gbit/s 可调 EML 模块 32 通道光谱，边模抑制比大于 40 dB；图 35(e)所示为 25 Gbit/s 可调 EML 模块

典型眼图，眼白 (margin) 达到 30%~40%，命中率 (hit ratio) 为 5×10^{-5} (眼图模板为 100 GbE LR4 Tx Mask)。

产品化的 V 型腔可调谐激光器具有边模抑制比高、稳定性好等优点。通过芯片和模块老化后，杭州兰特普研制的可调谐光模块展现出较好的长期稳定性。图 36 所示为 V 型腔可调谐激光器模块在 5000 h 内频

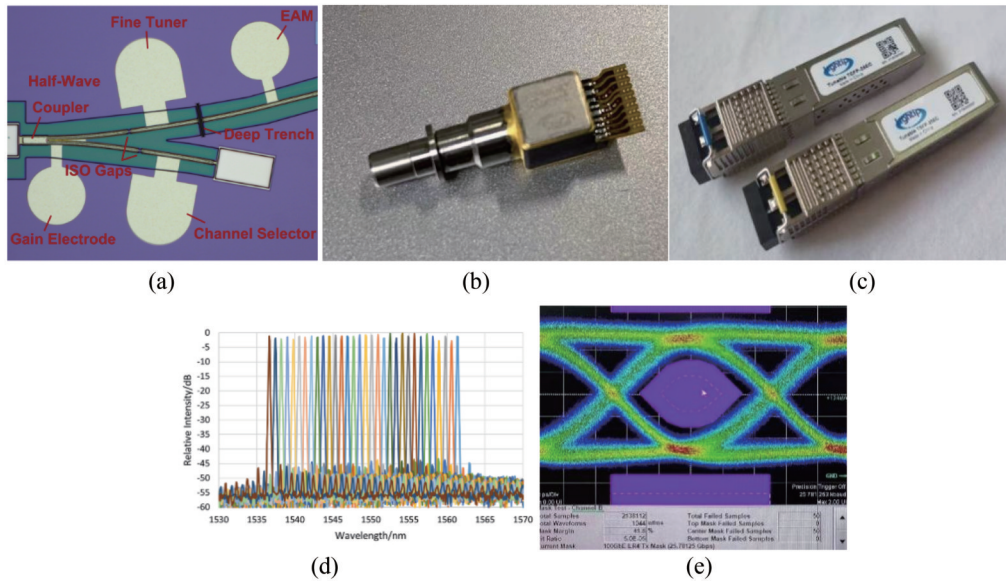


图 35 25 Gbit/s 可调 EML 激光器^[65]。(a) 芯片; (b) 器件; (c) 模块; (d) 32 通道光谱; (e) 典型眼图
Fig. 35 25 Gbit/s tunable EML lasers^[65]. (a) Chip; (b) device; (c) module; (d) 32-channel spectra; (e) typical eye diagram

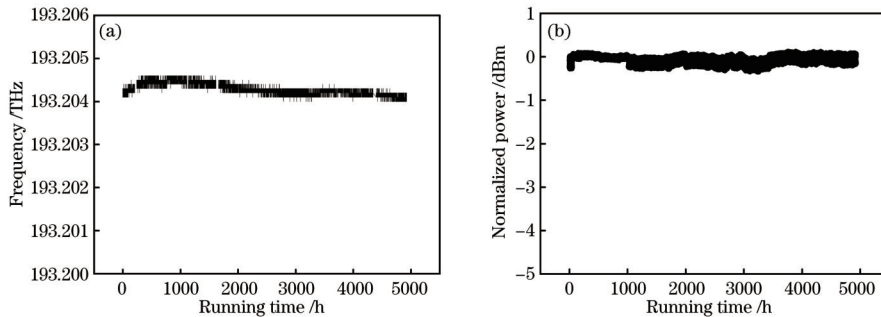


图 36 V 型腔可调谐激光器在 5000 h 内的频率稳定性和功率稳定性。(a) 频率稳定性; (b) 功率稳定性
Fig. 36 Frequency stability and power stability of tunable V-cavity laser within 5000 h. (a) Frequency stability; (b) power stability

率和功率稳定性测试结果。可以看到,可调谐激光器在 5000 h 内的频率波动在 0.5 GHz 内,功率波动小于 0.5 dB,具有较好的稳定性。

随着 5G 技术的快速发展,在 5G 前传使用 WDM 来节省光纤、利用调顶技术来管理远端光模块已经成为运营商的共识。中国联通提出的 G.698.4(原 G.metro)是具有端口无关功能的多信道单纤双向

DWDM 应用技术标准,其架构如图 37 所示^[66]。G.698.4 使用原骨干网 DWDM 的 C 波段,容量达到双向 40 信道,解决了部分前传场景中光纤短缺的问题;采用可调谐光模块可以减少备件的种类和数量,降低总的部署成本;应用低比特调顶技术,可使模块波长自动适配到合/分波器(OD/OM)定义的链路波长。

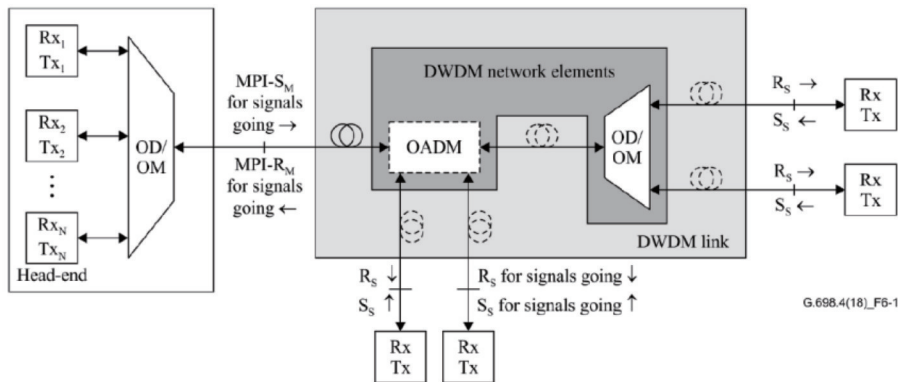


图 37 G.698.4 网络架构^[66]
Fig. 37 G.698.4 network architecture^[66]

杭州兰特普研制的智能可调光模块采用的调顶速率为 50 kHz, 调制幅度小于 8%, 并利用曼彻斯特编码和汉明码纠错功能, 可以在 -5 dBm ~ -25 dBm 接收功率范围内无错误运行, 符合中国联通的 G.metro 标准^[53]。目前, 基于低比特调顶技术的智能可调光模块支持在无人工参与下实现头端设备(HEE)光模块和尾端设备(TEE)光模块的波长配对; 支持在无人工参与下自动感知当前 DWDM 网络光复用器/解复用器的端口, 实现自动互联; 支持模块的远程管理。基于此功能, 杭州兰特普研制的 10~25 Gbit/s 智能可调光模块特别适合部署在光纤资源紧缺、数据吞吐需求量大和需求多功能远程监控的边缘计算网络、5G 前传网络

及企业专线等场景, 能够实现快速部署、简化运维、降低综合成本。

1) 波长自动配对

图 38 为波长自动配对原理图。可调光模块完成上电和光纤连接后, 先通过光模块 Inter-Integrated Circuit(I²C)接口向 HEE 光模块写入 HEE 光模块目标波长, 此时 HEE 光模块波长切换到目标波长; 再向 HEE 光模块写入 TEE 光模块目标波长, HEE 光模块会将 TEE 光模块目标波长通过低比特调顶信号发送给 TEE 光模块。TEE 光模块收到包含 TEE 光模块目标波长的低比特指令后, 将波长切换到指定波长, 此时完成一组光模块的波长配对。

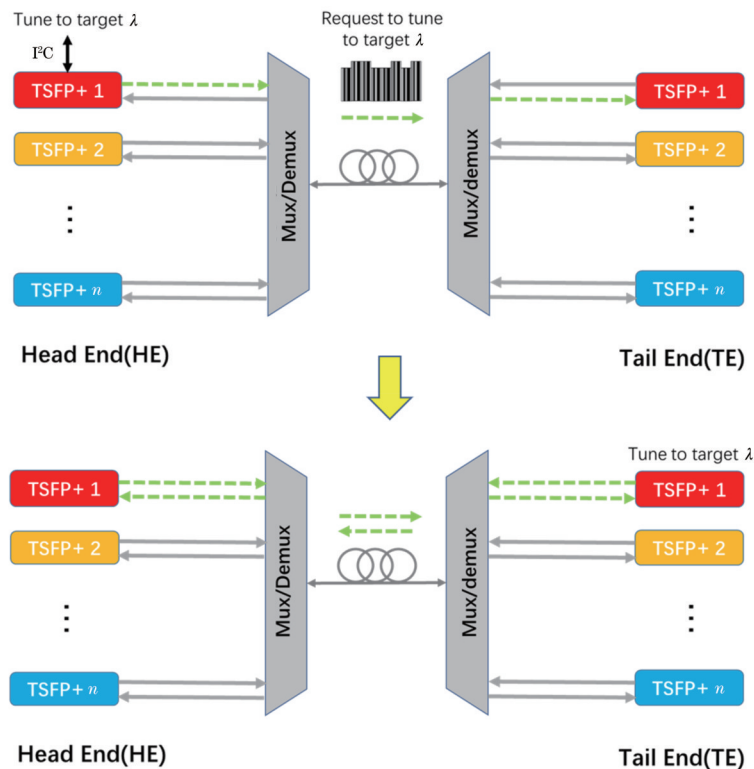


图 38 波长自动配对原理图

Fig. 38 Schematic of automatic wavelength pairing

2) 端口自动感知

可调光模块完成上电和光纤连接后, 启动 HEE 光模块的端口感知功能, 利用低比特调顶技术和反馈技术, 使得光模块根据链路全自动完成波长配对。通过端口感知技术, 将可调谐光模块连接到 DWDM 光复用器/解复用器上的任何光纤端口, 技术人员无需手动设置波长便可完成模块部署, 显著降低了 DWDM 网络部署的复杂性, 提高了部署的效率。

3) 模块远程维护和管理

智能可调光模块完成波长配对或端口感知后, 进入正常工作状态——传输常规高速业务时, 局端主机可通过通用的光模块 I²C 接口控制局端 HEE 光模块的低比特调顶信号来管理远程 TEE 光模块。HEE 光模块通过低比特调顶信号可以获得 TEE 光模块的厂商信息、序列号、波长范围、模块温度、发射光功率、接收

光功率等信息, 并控制 TEE 光模块环回、时钟恢复(CDR)旁路等; 可以对远端 TEE 光模块工作状态进行监控、预警, 同时还能提供远程在线升级功能, 大幅度提高运维水平、降低人工维护成本。

光交换是光通信网络、数据中心光互连和超级计算机系统的核心技术。目前的光交换系统主要基于光电光转换或波长选择开关(WSS), 受制于国际巨头垄断的电交换芯片和 WSS, 面向大规模光交换的需求, 杭州兰特普提出基于低成本 V 型腔可调谐激光器和循环寻址 AWGR 创新型架构的分布式光交换系统并完成了分布式光交换演示系统的搭建, 如图 39 所示。分布式光交换系统包含多个节点, 节点间通过光纤互连。每个节点包含 32 个 25 Gbit/s 的 EML 可调光模块和 32×32 循环寻址 AWGR 路由器, 单个节点最大可支持 800 Gbit/s 的光交换, 网络节点数及交换数据总容

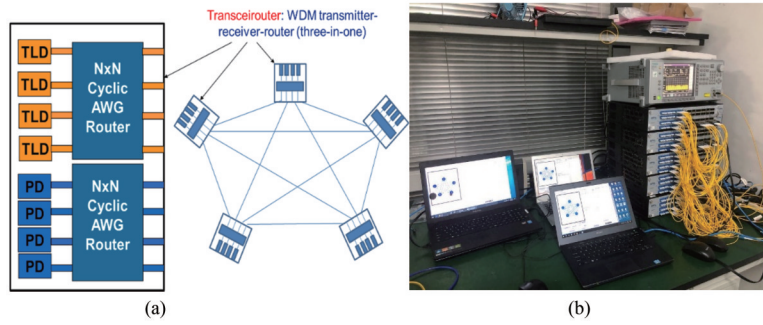


图 39 分布式光收发交换系统。(a)原理图;(b)演示系统

Fig. 39 Distributed optical transceiver switching system. (a) Schematic; (b) demonstration system

量随中间节点数的增加呈指数上升,理论上没有上限。该系统将波长路由赋能于网络收发节点,可以根据网络需求变化动态调度带宽资源,消除中央集中式的光交换和需要顶级半导体工艺的超大容量电交换芯片。杭州兰特普开发的分布式交换系统避免了光电、电光转换,降低了链路中光模块数量、功耗和时延,实现可无限扩展、高灵活性、高保护性、智能化动态自适应的全光交换网络。

4 商用可调半导体激光器对比

表 1 所示为主要商用可调谐激光器的对比。外腔

激光器的调谐范围大、线宽窄,但是分立元件多、体积大,难以小型化封装,主要应用于实验室;商用阵列DFB激光器MMI耦合输出损耗大、成品率低、成本较高;SG-DBR激光器、MG-Y激光器、DS-DBR激光器都需要制作光栅,尺寸大、成本高,特别是DS-DBR的调谐电极数量较多,封装难度大;三段式DBR激光器去掉了前向光栅,成本居中,但牺牲了调谐范围;VCL激光器具有无需光栅、无需多次外延生长、尺寸小、调节范围大、成本低等优点,非常符合网络带宽需求增加,DWDM系统下沉后对可调谐激光器低成本的要求。

表 1 主要商用可调谐半导体激光器对比

Table 1 Comparison of main commercial tunable semiconductor lasers

Tuning technology (Manufacturer)	Need Grating	Multiple epitaxial growth	Size	Number of tuning electrodes	Number of channels(100 GHz spacing)	Line width	Tuning speed	Output power	SMSR / dB	Cost
External cavity laser	—	—	Big	1	Large number	Hundreds kHz	Slow	High	>50	High
DFB array (NEC)	Yes	Yes	Big	1	40	MHz order	Fast	Medium	40	High
SG-DBR(Lumentum)	Yes	Yes	Big	3	40-48	MHz order	Fast	Medium	40	High
MG-Y (Finisar)	Yes	Yes	Big	3	40-48	MHz order	Fast	Medium	40	High
DS-DBR (Oclaro)	Yes	Yes	Big	>10	40-48	MHz order	Fast	Medium	40	High
Three section DBR (Hisense)	Yes	Yes	Medium	2	8-12	MHz order	Fast	Medium	40	Medium
VCL (Lightip)	No	No	Small	1	16-48	MHz order	Medium	Medium	40	Low

5 总结与展望

本文回顾了可调谐激光器的发展历程,分类阐述了不同方案可调谐激光器的工作原理,并分析了主流商用可调谐激光器的优缺点,特别介绍了国内外V型腔宽带可调谐激光器的研究进展。V型腔可调谐激光器的调谐范围已达到70 nm,边模抑制比达到45 dB;实现了V型腔可调谐激光器与EA和M-Z的单片集成;激光器波段从C波段扩展到O波段和中红外波段。V型

腔可调谐激光器已实现产业化,10 Gbit/s EML可调模块可以实现50 km无误码传输;25 Gbit/s可调模块眼白达到30%以上(@ 5×10^{-5} 命中率),满足25 Gbit/s传输要求。杭州兰特普10~25 Gbit/s智能可调模块具备低比特率调顶功能,可以实现波长自动配置、网络端口自动感知、远程模块维护和管理等。同时基于低成本V型腔可调光模块和循环寻址AWGR模块,杭州兰特普提出了全新架构的分布式光收发交换系统,并完成演示系统搭建。V型腔可调谐激光器具有尺寸小、

调节范围大、成本低等优点,在未来 DWDM 网络和数据中心分布式光交换等领域有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. *Physical Review Letters*, 1962, 9(9): 366-368.
- [2] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [3] Dupuis R. An introduction to the development of the semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(6): 651-657.
- [4] Hawthorn C J, Weber K P, Scholten R E. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(12): 4477-4479.
- [5] van Nguyen D, Cadatal-Raduban M, van Pham D, et al. Tunable dual wavelength and narrow linewidth laser using a single solid-state gain medium in a double Littman resonator[J]. *Optics Communications*, 2021, 496: 127131.
- [6] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, et al. Tunable semiconductor lasers: a tutorial[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 193-202.
- [7] Berger J D, Zhang Y W, Grade J D, et al. Widely tunable external cavity diode laser using a MEMS electrostatic rotary actuator[C]//*Proceedings of 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551)*, September 30-October 4, 2001, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2001: 198-199.
- [8] Finot M, McDonald M, Bettman B, et al. Thermally tuned external cavity laser with micromachined silicon etalons: design, process and reliability[C]//*2004 54th Electronic Components and Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37546)*, June 4, 2004, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2004: 818-823.
- [9] de Merlier J, Mizutani K, Sudo S, et al. Full C-band external cavity wavelength tunable laser using a liquid-crystal-based tunable mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 681-683.
- [10] Mizutani K, de Merlier J, Sudo S, et al. Liquid crystal mirror-based wavelength-tunable laser module with asynchronous mode cavity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(12): 1299-1301.
- [11] 低成本可调谐激光器芯片技术现状与产业链发展研究[R]. 深圳:下一代光传输网络论坛, 2020-01-08. Research on status of low-cost tunable laser chip technology and its industrial chain[R]. Shenzhen: Next Generation of Optical Transport Network Forum, January 8, 2020.
- [12] Komljenovic T, Srinivasan S, Norberg E, et al. Widely tunable narrow-linewidth monolithically integrated external-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 214-222.
- [13] Tang R, Kita T, Yamada H. Narrow-spectral-linewidth silicon photonic wavelength-tunable laser with highly asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1504-1507.
- [14] Verdier A, de Valicourt G, Brenot R, et al. Ultrawideband wavelength-tunable hybrid external-cavity lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 37-43.
- [15] Yamazaki H, Ishizaka M, Takahashi S, et al. Widely tunable laser consisting of a silica waveguide double ring resonator connected directly to a semiconductor optical amplifier[C]//*European Conference on Optical Communications*, September 4-9, 2004. Sweden. New York: IEEE Press, 2004.
- [16] Yamazaki H, Takahashi M, Suzuki K, et al. A widely tunable laser using silica-waveguide ring resonators[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6014: 50-58.
- [17] Deki Y, Hatanaka T, Takahashi M, et al. Wide-wavelength tunable lasers with 100 GHz FSR ring resonators[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(4): 225-226.
- [18] Guo Y Y, Li X H, Xu W H, et al. A hybrid-integrated external cavity laser with ultra-wide wavelength tuning range and high side-mode suppression[C]//*2022 Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, March 6-10, 2022, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [19] Guo Y Y, Zhou L J, Zhou G Q, et al. Hybrid external cavity laser with a 160-nm tuning range[C]//*2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [20] Pezeshki B, Vail E, Kubicky J, et al. 20-mW widely tunable laser module using DFB array and MEMS selection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(10): 1457-1459.
- [21] Wilde J P, Yoffe G W, Kahn J M. Frequency noise characterization of a widely tunable narrow-linewidth DFB laser array source[C]//*2009 National Fiber Optic Engineers Conference*, March 22-26, 2009, San Diego, California, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2009: JWA33.
- [22] Hatakeyama H, Naniwae K, Kudo K, et al. Wavelength-selectable microarray light sources for S-, C-, and L-bands WDM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(7): 903-905.
- [23] Ishii H, Kasaya K, Oohashi H. Spectral linewidth reduction in widely wavelength tunable DFB laser array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 514-520.
- [24] Lu J, Liu S P, Tang Q, et al. Multi-wavelength distributed feedback laser array with very high wavelength-spacing precision[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5136-5139.
- [25] Li J S, Tang S, Wang J, et al. An eight-wavelength BH DFB laser array with equivalent phase shifts for WDM

- systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1593-1596.
- [26] Grabherr M, Jager R, Michalzik R, et al. Efficient single-mode oxide-confined GaAs VCSEL's emitting in the 850-nm wavelength regime[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(10): 1304-1306.
- [27] Weigl B, Grabherr M, Michalzik R, et al. High-power single-mode selectively oxidized vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(8): 971-973.
- [28] Grabherr M, Wiedenmann D, Jaeger R, et al. Fabrication and performance of tunable single-mode VCSELs emitting in the 750- to 1000-nm range[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5737: 120-128.
- [29] Knopp K J, Vakhshoori D, Wang P D, et al. High power MEMS tunable vertical cavity surface emitting laser[C]//2001 Digest of LEOS Summer Topical Meetings, July 30-August 1, 2001, Copper Mountain, CO, USA. New York: IEEE Press, 2001.
- [30] Chang-Hasnain C J. Tunable VCSEL[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 978-987.
- [31] Huang M C Y, Cheng K B, Zhou Y, et al. Monolithic integrated piezoelectric MEMS-tunable VCSEL[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(2): 374-380.
- [32] Mason B, Fish G A, DenBaars S P, et al. Ridge waveguide sampled grating DBR lasers with 22-nm quasi-continuous tuning range[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9): 1211-1213.
- [33] Jayaraman V, Chuang Z M, Coldren L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1824-1834.
- [34] Ward A J, Robbins D J, Busico G, et al. Widely tunable DS-DBR laser with monolithically integrated SOA: design and performance[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 149-156.
- [35] Ishii H, Tohmori Y, Yoshikuni Y, et al. Multiple-phase shift super structure grating DBR lasers for broad wavelength tuning[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(6): 613-615.
- [36] Tohmori Y, Yoshikuni Y, Ishii H, et al. Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1817-1823.
- [37] Oberg M, Rigole P J, Nilsson S, et al. Complete single mode wavelength coverage over 40 nm with a super structure grating DBR laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(9): 1892-1898.
- [38] Wesstrom J O, Hammerfeldt S, Buus J, et al. Design of a widely tunable modulated grating Y-branch laser using the additive Vernier effect for improved super-mode selection[C]//IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference, September 29-October 3, 2002, Garmisch, Germany. New York: IEEE Press, 2002: 99-100.
- [39] Wesstrom J O, Sarlet G, Hammerfeldt S, et al. State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers[C]//Optical Fiber Communication Conference, February 23-27, 2004, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 389.
- [40] Bustillos-Barcaya M C, Rinalde G F, Bulus-Rossini L A, et al. Y-branch tunable laser design: modeling, control and experimental validation[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107040.
- [41] Bustillos Barcaya M C, Rinalde G F. Embedded tunable laser control for WDM optical communications systems [J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(2): 241-248.
- [42] Kobayashi K, Mito I. Single frequency and tunable laser diodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(11): 1623-1633.
- [43] Coldren L, Corzine S. Continuously-tunable single-frequency semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(6): 903-908.
- [44] Zhou D B, Liang S, He Y M, et al. Two 10 Gb/s directly modulated DBR lasers covering 20 nm wavelength range[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126236.
- [45] Liu Y, Chen D, Yu Y L. Improving modulation bandwidth of tunable three sections distributed Bragg reflector lasers by using asymmetric nonlinear gain: design and simulation[J]. Optics Communications, 2021, 479: 126439.
- [46] Liu Y, Chen D, Duan F, et al. Enhanced direct modulation bandwidth in a tunable DBR laser with an equivalent phase shift grating[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107830.
- [47] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 47-73.
- [48] Segawa T, Matsuo S, Kakitsuka T, et al. Full C-band tuning operation of semiconductor double-ring resonator-coupled laser with low tuning current[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(17): 1322-1324.
- [49] Coldren L A, Furuya K, Miller B I, et al. Etched mirror and groove-coupled GaInAsP/InP laser devices for integrated optics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1679-1688.
- [50] Coldren L A, Miller B I, Iga K, et al. Monolithic two-section GaInAsP/InP active-optical-resonator devices formed by reactive ion etching[J]. Applied Physics Letters, 1981, 38(5): 315-317.
- [51] Byrne D C, Engelstaedter J P, Guo W H, et al. Discretely tunable semiconductor lasers suitable for photonic integration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 482-487.
- [52] Wang Y, Yang Y G, He J J. Single-electrode controlled four-section coupled-cavity tunable laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(14): 1340-1343.
- [53] Su Y M, Bi Y, Wang P F, et al. Emitting direction tunable slotted laser array for Lidar applications[J]. Optics Communications, 2020, 462: 125277.

- [54] Zhou Y L, Zhang X, Zhang J W, et al. A novel method for widely tunable semiconductor lasers: temperature-induced gain spectrum shift between adjacent grating reflection peaks[J]. *Journal of Luminescence*, 2022, 248: 118998.
- [55] He J J, Liu D K. Wavelength switchable semiconductor laser using half-wave V-coupled cavities[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 3896-3911.
- [56] Jin J L, Wang L, Yu T T, et al. Widely wavelength switchable V-coupled-cavity semiconductor laser with ~ 40 dB side-mode suppression ratio[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4230-4232.
- [57] Zhang S, Meng J J, Guo S L, et al. Simple and compact V-cavity semiconductor laser with 50×100 GHz wavelength tuning[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13564-13571.
- [58] D'Agostino D, Lenstra D, Ambrosius H P M M, et al. Coupled cavity laser based on anti-resonant imaging via multimode interference[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 653-656.
- [59] Wan Y T, Zhang S, Norman J C, et al. directly modulated single-mode tunable quantum dot lasers at $1.3 \mu\text{m}$ [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(3): 1900348.
- [60] Cheung S. High-speed, directly-modulated widely tunable 1310 nm coupled cavity laser via multimode interference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 2133-2139.
- [61] Yang H T, Yang R Q, Gong J L, et al. Mid-infrared widely tunable single-mode interband cascade lasers based on V-coupled cavities[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2700-2703.
- [62] Chen Q, Wang Z W, Zhao J S, et al. Improved half-wave coupled V-cavity laser using aggregating-image multimode interference coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 6638307.
- [63] Chen Q, Wang Z W, Zhao J S, et al. Tunable V-cavity laser monolithically integrated with traveling wave Mach-Zehnder modulator[J/OL]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022[2022-08-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9855490>.
- [64] Meng J J, Xiong X H, Xing H B, et al. Full C-band tunable V-cavity-laser based TOSA and SFP transceiver modules[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(12): 1035-1038.
- [65] Zhang S, Xia Y M, Meng J J, et al. Widely tunable electro-absorption modulated V-cavity laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 2950608.
- [66] ITU-T SG 15. International standard: ITU-T G.698.4 [S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2018.

约稿专家简介:



何建军(1964—),博士,博士生导师,教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,OSA & SPIE Fellow。1984年毕业于浙江大学光学仪器工程学系,1989年于法国国家通信研究中心完成博士论文,获巴黎第六大学博士学位。1989年赴加拿大做博士后研究,1994年加入加拿大国家科学研究院任研究员,从事半导体光电子集成芯片的研究,曾获得加拿大国家科学院杰出成就奖。2006年回国任浙江大学光电学院教授,2013年创建杭州兰特普光电子技术有限公司。在集成光电子芯片、半导体激光器等方面发表了300余篇论文,获得20余项美国发明专利、70余项中国发明专利。曾担任亚洲光通信和光电子会议(ACP 2011 & ACP 2018)大会主席,亚太激光和光电会议(CLEO-PR)指导委员会(Steering Committee)成员, *Optics Letters* 专题编辑(Topical Editor)。E-mail:jj.he@zju.edu.cn。