光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031005

多通道干涉大范围可调谐激光器

王宽宽[1]，陈泉安[2]，蒋　春[2]，陈子枫[1]，陆明之[2]，陆巧银[1]，国伟华[1]*

（1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074；2. 宁波元芯光电子科技有限公司，浙江 宁波 315191）

摘　要： 多通道干涉（MCI）激光器是一种新型单片集成的大范围可调谐半导体激光器。它采用多臂干涉增强而无需光栅的选模方式，具有制作简单和容差大的优势；采用偏置量子阱技术进行有源无源集成，降低了二次外延的难度。为满足光通信不同场景的应用需求，分别设计研制了大范围可调的电调谐和热调谐 MCI 激光器。基于电调谐的 MCI 激光器实现了 48.8 nm 的波长调谐范围，洛伦兹线宽小于 350 kHz。基于热调谐的 MCI 激光器在双工作温度下的波长调谐范围大于 60 nm，总热调谐功率小于 35 mW，整个调谐范围内洛伦兹线宽小于 100 kHz。同时，研究推进了其稳定控制及集成化工作，实现了基于热调谐 MCI 激光器的 nano-ITLA。

关键词： 半导体激光器；可调谐激光器；多通道；集成化；密集波分复用

中图分类号： TN248　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0273－07

Multi-channel Interference Widely-tunable Laser

WANG Kuankuan[1]，CHEN Quanan[2]，JIANG Chun[2]，CHEN Zifeng[1]，

LU Mingzhi[2]，LU Qiaoyin[1]，GUO Weihua[1]

（1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，CHN；

2. Ori-Chip Optoelectronics Technology Co. Ltd.，Ningbo 315191，CHN）

Abstract： Multi-channel interference（MCI）laser is a novel monolithically integrated widely-tunable semiconductor laser. It applies multi-arm interference based mode selection，and achieves wide tuning through either electro-optic effect or thermo-optic effect. It has the advantage of simple fabrication and large fabrication tolerance. The active and passive integration of the MCI laser utilizes the offset quantum well scheme，which reduces the difficulty for regrowth. The wavelength tuning range of the electrically tuned MCI laser is greater than 48 nm，the output power is greater than 20 mW，and the Lorentzian linewidth is less than 350 kHz. The wavelength tuning range of thermally tuned MCI laser is greater than 60 nm，and the Lorentzian linewidth over the entire tuning range is less than 100 kHz at dual temperatures. Meanwhile，the research advances its stability control and integration，and demonstrates nano-ITLA based on thermally-tuned MCI lasers.

Key words： semiconductor laser；tunable laser；multi-channel；integration；DWDM

0　引言

随着光网络和通信系统的发展，可调谐激光器因其波长可调而在光传感、光检测以及光通信等领域得到广泛应用[1-2]。其中，可调谐半导体激光器因其体积小、成本低、易于集成等优势而备受青睐。在密集波分复用（DWDM）系统中，使用它可以降低备用光源的成本，实现更加有效和高效的库存管理[3]；在下一代可重构光网络中，使用它可实现光交叉复用和突发交换等[4]。

经过几十年的研究，可调谐半导体激光器已经

收稿日期：2022－03－10.

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFB2201201）；国家自然科学基金项目（61861136001，61675077，61904064）.

* **通信作者：**国伟华　**E-mail：** guow@hust.edu.cn

发展出了多种结构不同、调谐机理各异的方案[5-8]。但是,其基本结构都是由法布里-珀罗(F-P)腔、相位控制器以及模式选择滤波器组成。波长调谐可以通过调整腔长、相位或者模式的方式实现。可调谐半导体激光器主要分为外腔激光器、异质集成的可调谐半导体激光器、分布式反馈(DFB)激光器阵列以及分布式布拉格反射(DBR)激光器。外腔激光器是将谐振腔从增益芯片扩展到分立的无源器件中,腔长可以做到很长,所以具有窄线宽的优势。但是长腔长也导致了其体积较大、无法与其他功能器件单片集成[9]。常见的方案是采用衍射光栅作为模式选择滤波器,并通过机械的方式来调整不同衍射光栅角度,以实现波长调谐[10-12]。研究外腔激光器最多的公司有 NEC,Inter,Neophotonics 等[13-15]。在相干光通信中,应用最为广泛的是 Neophotonics 公司的基于游标卡尺效应的外腔可调谐激光器,其本征线宽不足 10 kHz。异质集成的可调谐半导体激光器也随着混合技术的发展被广泛关注,目前常见的方案是采用Ⅲ-Ⅴ族材料提供增益、Ⅳ族硅基材料做无源波导,选模通过具有不同自由频谱范围(FSR)的谐振环的游标卡尺效应实现,波长调谐通过热光效应实现[16-18]。虽然其无源部分的硅基波导能极大地降低原来Ⅲ-Ⅴ材料波导的损耗,但是异质集成也增加了器件的制作难度。对于传统的单个 DFB 激光器来说,通过热调谐可以实现 3~5 nm 的调谐范围,这无法满足密集波分复用系统的需求。将多个不同中心波长的 DFB 激光器以并行的方式集成在同一芯片上,可以实现大范围的波长调谐。虽然 DFB 激光器的制作工艺十分成熟,但是要在保证良品率和可靠性的同时,在同一芯片上集成具有多个特定中心波长的激光器很具挑战性。研究 DFB 阵列的主要是日本公司,如 NTT,Furukawa,Fujitsu 等[18-22]。最原始的 DBR 激光器一般包含有源区、相位区和光栅区三部分,其调谐范围受有限的折射率变化的限制,一般在 10 nm 左右[23]。通过改变 DBR 区的布拉格波长可以实现波长的粗调,调节相位区可以实现波长的细调。由于 DBR 类激光采用纵向集成结构和Ⅲ-Ⅴ材料制作,使得它易与半导体光放大器(SOA)等结构单片集成[24-26]。DBR 类激光器因此成为可调谐半导体激光器的主流发展方向以及全光网络的关键光电器件之一。为进一步扩大调谐范围,研究者相继提出了各种光栅改进及结构优化方案,典型的有取样光栅分布式布拉格反射(Sampled Grating Distributed Bragg Reflector,SGDBR)激光器[27]、超结构光栅分布式布拉格反射(Super Structure Grating Distributed Bragg Reflector,SSGDBR)激光器[28]、同轴耦合取样光栅分布式布拉格反射(Grating Assisted Codirectionally Sampled Reflector,GACSR)激光器[29]、调制光栅 Y 分支(Modulated Grating Y-Branch,MGY)激光器[30]以及数字超模分布式布拉格反射(Digital Supermode Distributed Bragg Reflector,DSDBR)激光器[31]等。除了 DSDBR 激光器,改进的 DBR 类激光器主要是基于游标卡尺(Vernier)效应来增大调谐范围的。研究 DBR 类激光器的公司和机构最具代表性的有 Oclaro,Finisar,Lumentum 等。

本文设计并制作了一种单片集成可调谐半导体激光器——多通道干涉(MCI)激光器[32-34]。该激光器的模式选择依赖于多个不同长度的臂干涉增强,通过电光调谐或者热光调谐的方式实现波长调谐。MCI 激光器的优势在于不需要制作光栅,降低了制作工艺的难度和成本;同时每个臂上制作了独立的相位控制区,增大了激光器的制作容差。通过多轮的设计和迭代验证,分别制作了性能优异的电调谐和热调谐 MCI 激光器,并研究了其输出光功率和波长的稳定控制,推进了其集成化工作。下面,将从激光器的调谐机理、器件性能以及稳定控制等方面进行阐述。

1 MCI 激光器的调谐机理

多通道干涉大范围可调谐半导体激光器的结构如图 1 所示。激光器主要由四部分组成:半导体光放大(SOA)区、增益区、公共相位区和多通道干涉区。SOA 区提供外部光放大和光开关功能;增益区提供激射需要的光增益;公共相位区用于调节激光器的纵模位置;多通道干涉区提供光反馈和模式选择。其中多通道干涉区是实现波长调谐的关键部分,主要包含级联的 1×2 多模干涉器(Multi-mode Interferometer,MMI)、八个不同长度的臂以及末端的多模干涉反射镜(Multi-mode Interference Reflector,MIR)。激光器增益区产生的光通过级联的 MMI 后均分为八部分,分别进入八个不同长度的臂中。每个臂上有能独立调节光场相位的臂相位区,在其末端的 MIR 将光全反射回有源区。臂相位的调节可通过电光效应或者热光效应实现。

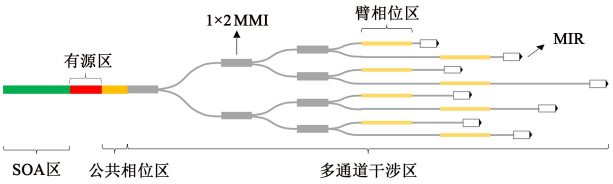


图 1　MCI 激光器结构示意图

MCI 激光器的模式选择是通过八个不同长度的臂干涉增强形成单个反射峰占主导的反射谱实现的。图 2 所示为仿真得到的 MCI 区反射谱，可见激射波长有良好的单模特性，同时对其他模式的抑制效果较好。

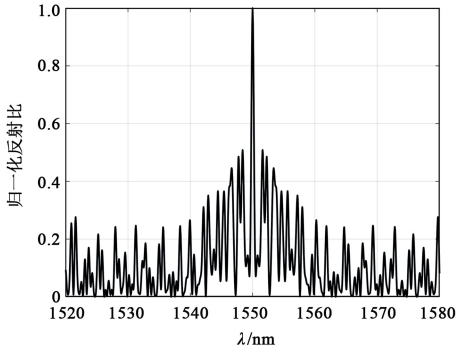


图 2　仿真的 MCI 区反射谱

2　MCI 激光器的器件性能

2.1　基于电调谐的多通道干涉调谐激光器

电调谐的多通道干涉调谐激光器是通过电流注入改变载流子浓度进而改变折射率的方式进行调谐的。为了实现有源无源的集成，激光器采用了偏置量子阱技术[35]，如图 3 所示。激光器有源区包含七个压应变 InGaAsP 量子阱，衬底是 n 型掺杂的 InP，下盖层是 n 型掺杂的 InP，波导层是 300 nm 厚的 1.3 Q 的 InGaAsP，上盖层是 p 型掺杂的 InP，上盖层之上是重掺杂的 InGaAs 欧姆接触层。因为无源部分只需要腐蚀掉量子阱层，同时二次外延只需在整个晶圆上生长 p 型 InP 上包层、p 型 InGaAs 接触层，所以采用偏置量子阱技术可以有效地降低 MCI

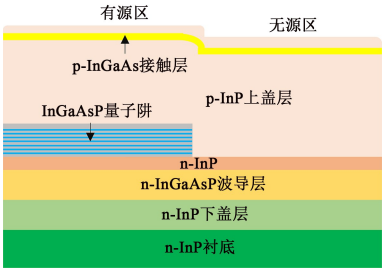


图 3　电调谐 MCI 激光器的偏置量子阱结构截面示意图

激光器的制作难度。

实际制作的电调谐多通道干涉可调激光器显微镜照片如图 4 所示。采用了 16 引脚的蝶形管壳对激光器进行封装。由于管壳引脚数目的限制，蝶形封装未包含波长锁定和功率监测功能。将封装好的器件放置在定制的夹具上，实验测试系统如图 5 所示。激光器的输出光接入级联的分束器中，分别被接入用于记录光谱等信息的光谱仪中、监测波长的波长计中和反馈功率的功率计中，以及用于线宽测试的自零差光相干探测系统中[36]。激光器的工作温度通过半导体制冷器(TEC)进行控制。

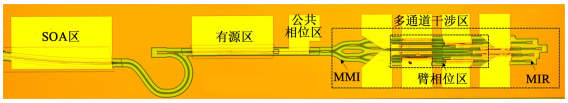


图 4　实际制作的电调谐 MCI 激光器的显微镜照片

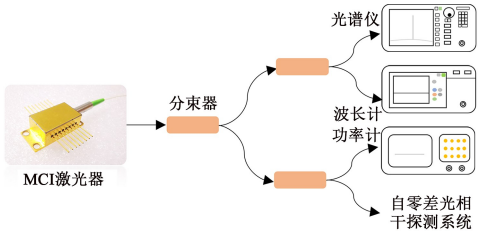


图 5　MCI 激光器的实验测试系统

我们对电调谐 MCI 激光器以 0.4 nm 的波长间隔进行了波长表征。在表征过程中，有源区和 SOA 区注入电流都为 100 mA。测试结果如图 6 所示。MCI 激光器典型的激射谱如图 6(a)所示。边模抑制比(SMSR)达到了 52.44 dB，说明 MCI 激光器具有优异的单模特性，对其他杂散峰的抑制效果较好。图 6(b)所示为不同激射波长的光谱叠加图，标定出的波长为 1 525～1 573.8 nm，调谐范围达到了 48.8 nm。图 6(c)为不同波长对应的 SMSR，在整个调谐范围内均大于 40 dB。图 6(d)所示为调谐范围内几个典型激射波长的光功率-电流(LI)曲线。纵坐标为 SOA 区反偏探测的激光器输出光对应的光电流，其阈值电流在 20 mA 附近，最大不超过 25 mA。图 6(e)所示为不同激射波长下出纤功率随 SOA 电流的变化曲线，可以看到当 SOA 电流达到 200 mA 时出纤功率均大于 20 mW。靠近增益峰值附近波长的出纤功率略高于偏离增益峰值的波长功率。图 6(f)所示为使用自零差光相干探测系统测得的所有激射波长的洛伦兹线宽。在整个调谐范围内洛伦兹线宽最大不超过 350 kHz，并且呈现出洛伦兹线宽随着波长的增大而增大的趋势。这种变化趋势与线

宽增强因子有关。

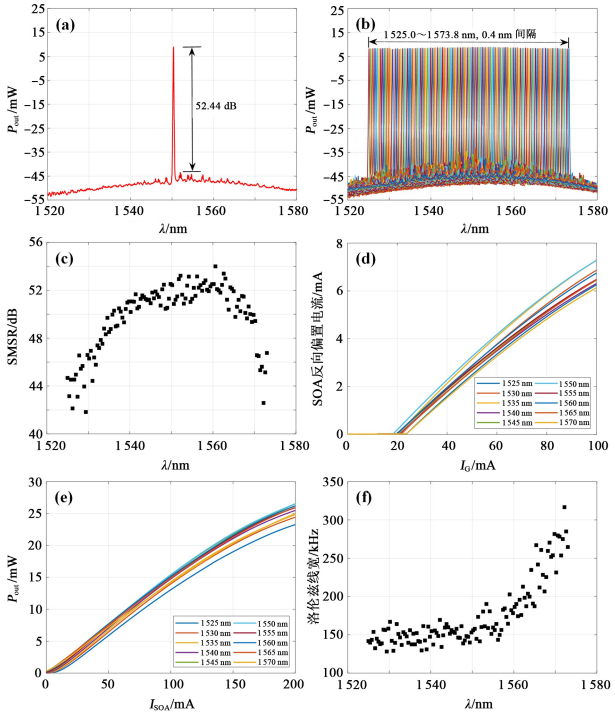


图 6 电调谐 MCI 激光器的测试结果。(a) 激射波长为 1 550.2 nm 处的光谱图;(b) 调谐范围内不同激射波长光谱叠加图;(c) 不同激射波长对应的 SMSR;(d) 不同激射波长对应的 LI 曲线;(e) 不同激射波长的出纤功率与 SOA 电流的功率曲线;(f) 所有标定波长的洛伦兹线宽值

2.2 基于热调谐的多通道干涉调谐激光器

大数据时代对于通信速率和通信容量的要求不断攀升,促使通信技术飞速发展。在相干光通信中,为了提升通信速率常采用高阶调制格式。而高阶调制格式对激光器的相位噪声更加敏感,因此要求激光器的线宽更窄。为了降低 MCI 激光器的线宽,我们主要从两个方面进行了改进:首先,采用 InGaAlAs 量子阱材料代替 InGaAsP 量子阱材料。相较于 InGaAsP,InGaAlAs 量子阱材料拥有更大的导带偏移量,使得它具有更好的温度特性;更高的微分增益,使其具有更低的线宽增强因子;更小的光损耗,有利于增大激光器的输出光功率。所以,在窄线宽 MCI 激光器的设计中我们采用了五层压应变的 InGaAlAs 量子阱。有源无源的集成仍沿用偏置量子阱方案。图 7 所示为热调谐 MCI 激光器的偏置量子阱结构截面示意图。

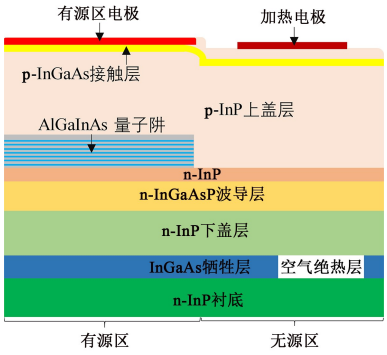
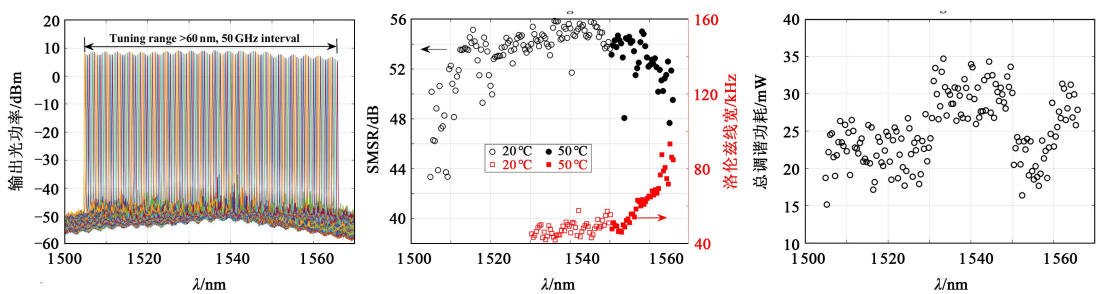


图 7 热调谐 MCI 激光器的偏置量子阱结构截面示意图

其次,采用热调谐代替电调谐。因为电流注入带来的散粒噪声以及自由载流子吸收带来的损耗会极大地展宽激光器的线宽,所以我们采用热光效应代替电光效应进行波长调谐。在各个相位区的波导上制作微型加热器,通过焦耳热改变波导的温度,进而改变相位区的折射率以实现波长控制。采用热调谐最大的问题是加热所需的功耗太大,难以满足小尺寸封装的功耗要求。由于 InP 衬底的热阻很小,很容易将热量导走,极大地降低了热电极的加热效率。为此,我们在公共相位区和臂相位区的波导芯层下方制作了一层空气隔热层,从而避免了波长控制过程中的热功耗过大[37]。

对实际制作的热调谐多通道干涉可调激光器进行了封装,其测试结果如图 8 所示。图 8(a)所示为以 50 GHz 频率间隔标定的不同波长的光谱叠加图,双工作温度下调谐范围超过 60 nm。图8(b)所



(a) 调谐范围内不同激射波长的光谱叠加图 (b) 不同波长对应的 SMSR 以及洛伦兹线宽值 (c) 不同波长的总热调谐功耗

图 8 热调谐 MCI 激光器的实验结果

示为不同波长对应的 SMSR 以及洛伦兹线宽值。在整个调谐范围内 SMSR 均大于 40 dB，靠近增益峰附近波长的 SMSR 高于增益峰两侧的，且长波长侧的 SMSR 明显高于短波长侧的。整个调谐范围内，洛伦兹线宽均小于 100 kHz，其值随着波长的减小而减小。图 8(c)所示为不同波长对应的总热调谐功耗，整个调谐范围内均不超过 35 mW，低于目前已有的其他报道[38-40]。

3　MCI 激光器的控制及集成

3.1　多通道干涉调谐激光器的稳定控制

激光器在长期使用过程中，会因设备老化、环境温度改变等各种因素导致功率波动、频率漂移，久而久之可能会有跳模的风险，甚至无法正常工作。因此需要建立各种反馈回路以便确保激光器的长期稳定性。

首先考虑的是功率的稳定性。当有源区和 SOA 区注入恒定电流时整个调谐范围内的功率分布近似于增益谱形，而非恒定值。而用于输出功率控制的参数主要有有源区和 SOA 区。有源区属于谐振腔内，其注入电流的改变直接改变了腔内的有效折射率，会较大地影响输出波长；而 SOA 区处于谐振腔外，其注入电流的变化对激射波长的影响较小。因此，我们通过反馈控制 SOA 注入电流的方案使得输出功率保持恒定。实验结果如图 9 所示，输出功率恒定在 40 mW，波动控制在±0.01 mW 范围内。

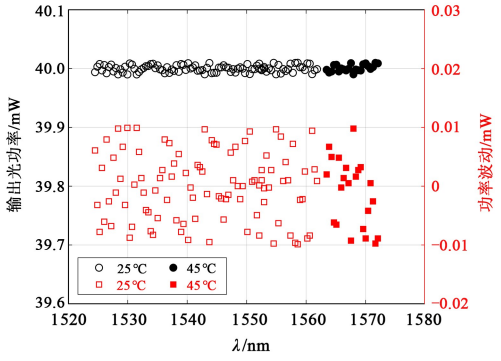


图 9　MCI 激光器的功率稳定控制实验结果

其次考虑的是波长的稳定性。通常情况下，波长漂移可以通过公共相位区精细调节纵模位置来补偿。对于 MCI 激光器，波长调谐是通过公共相位区调整纵模位置以及臂相位区调整反射峰位置来实现的，各个标定波长处于最佳的纵模和反射峰对应位置。若仅考虑纵模锁定波长，调节纵模位置意味着纵模逐渐偏离反射峰，持续调节则发生模式跳变，此时只能实现一个纵模间隔宽度的锁定范围，对干扰因素的抵抗能力较差，难以达到长期稳定的要求。若在调节纵模的同时，通过微调臂相位区锁定相位斜率的方式跟进反射峰位置，保持纵模和反射峰的相对位置始终不变，则可保持更大的模式稳定范围，能承受外界干扰的能力更强，则可满足长期稳定波长的需求。如图 10 所示为未锁定以及同时锁定纵模和反射峰的波长变化结果。激光器的 TEC 初始温度为 20 ℃，以 TEC 温度的升降温模拟外界干扰。未锁定状态下输出波长呈现出约 0.114 nm/℃的温度系数，而锁定状态下输出波长波动在±0.01 nm 范围内，且波长锁定对应的温度稳定范围超过了 4.5 ℃，远大于一个纵模间隔对应的温度稳定范围。

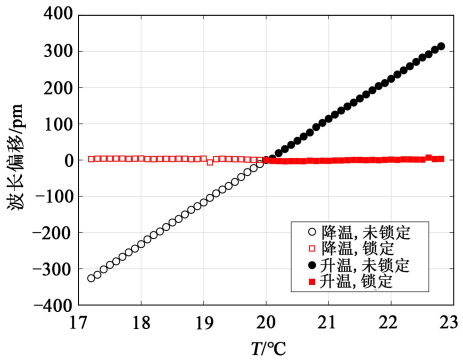


图 10　MCI 激光器的波长锁定实验结果

3.2　多通道干涉调谐激光器的控制电路

鉴于 MCI 激光器控制电流多的结构特点及不同常规的控制算法，走向实用化的关键一步是设计制作出配套的硬件控制电路。而为满足高速并行光互联的需求，应用在相干光通信中的可调激光器的电路控制模块要求小型化、集成化。而纳米超紧凑型的集成调谐激光器模块（Nano Integrable Tunable Laser Assembly，Nano-ITLA）被认为是合适的解决方案。而目前主要生产 Nano-ITLA 的公

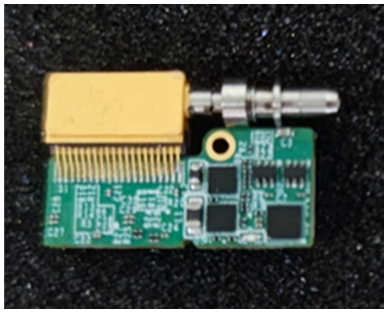


图 11　基于 MCI 激光器的 Nano-ITLA 的实物图

司有 Furukawa 和 Neophotonics。MCI 激光器的硬件控制电路需要具备十路电流控制项、锁定反馈回路控制项以及温度控制项。经过迭代设计，我们验证了 MCI 激光器的所有电控参数，整个模块的面积为 1.56 cm×2.5 cm，如图 11 所示。

4 结论

设计并制作了一种 InP 基的新型单片集成的多通道干涉大范围可调谐半导体激光器，其选模机制是多个不同长度的臂相互干涉。每个臂上独立的相位区可以单独调相，增大了制作容差，且无需光栅的制作步骤大大简化了工艺。通过多轮的迭代优化，制作出的电调谐的 MCI 激光器的调谐范围超过了 48 nm，SMSR 大于 40 dB，阈值电流在 20 mA 左右，出纤功率大于 20 mW，洛伦兹线宽小于 350 kHz。然而，电流注入带来的散粒噪声和自由载流子的损耗影响，使得线宽大大展宽，无法满足长距离相干光通信的应用要求。为实现窄线宽，量子阱采用具有比 InGaAsP 材料更具优势的 InGaAlAs 量子阱材料，同时调谐方式采用热光效应而非电光效应。制作出的热调谐的 MCI 激光器在双温度下调谐范围超过 60 nm，SMSR 大于 40 dB，热调谐功率小于 35 mW，洛伦兹线宽小于 100 kHz。为进一步实现 MCI 激光器的长期稳定性工作与实用化，建立了功率频率锁定的反馈控制回路，将功率波动控制在±0.01 mW 范围内，频率波动锁定在±0.01 nm 范围内。并对 MCI 激光器的配套控制电路做了开发与迭代优化，实现了 MCI 激光器的 Nano-ITLA。这一工作有助于推进大范围可调谐光芯片及其模块的国产化与实用化。

参考文献：

[1] Buus J, Murphy E J. Tunable lasers in optical networks[J]. J. of Lightwave Technol., 2006, 24(1): 5-11.

[2] Coldren L A. Monolithic tunable diode lasers[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 988-999.

[3] Kundrat J, Vojtech J, Sko Da P, et al. YANG/NETCONF ROADM: Evolving open DWDM toward SDN applications[J]. J. of Lightwave Technol., 2018: 3105-3114.

[4] Coldren L A, Fish G A, et al. Tunable semiconductor lasers: A tutorial[J]. J. of Lightwave Technol., 2004, 22(1): 193-202.

[5] Mashanovitch M, Kebort D, Morrison G, et al. Monolithic tunable interferometric transmitter (TunIT) in indium phosphide [J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 6100105.

[6] Yagi H, Kaneko T, Kono N, et al. InP-based monolithically integrated photonic devices for digital coherent transmission [J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(1): 6100411.

[7] Coldren L A. Diode lasers and photonic integrated circuits[J]. Optical Engineering, 1995, 36(2): 616.

[8] Buus J, Amann M, Blumenthal D. Tunable Laser Diodes and Related Optical Sources[M]. New York: Wiley Interscience, 2005.

[9] Ye C. Tunable External Cavity Diode Lasers [M]. New Jersey: World Scientific, 2004.

[10] Godard A, Pauliat G, Roosen G, et al. Side-mode gain in grating-tuned extended-cavity semiconductor lasers: investigation of stable single-mode operation conditions[J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 2002, 38(4): 390-401.

[11] Liu A Q, Zhang X M. A review of MEMS external-cavity tunable lasers[J]. J. of Micromechanics and Microengin., 2007, 17: R1-R13.

[12] Zhang D, Zhao J, Qi Y, et al. Compact MEMS external cavity tunable laser with ultra-narrow linewidth for coherent detection[J]. Opt. Express, 2012, 20(18): 19670-19682.

[13] Merlier J D, Mizutani K, Sudo S, et al. Full C-band external cavity wavelength tunable laser using a liquid-crystal-based tunable mirror[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(3): 681-683.

[14] Mcdonald M E, Aiber A D, Chapman W B, et al. Tunable external cavity laser: US, US6853654 B2[P]. 2002.

[15] Finot M, Mcdonald M, Bettman B, et al. Thermally tuned external cavity laser with micromachined silicon etalons: Design, process and reliability[C]// Proc. 54th. IEEE, Electronic Components and Technol. Conf., 2004.

[16] Brian S, Ji X, Avik D, et al. Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4541-4544.

[17] Guan H, Ari N, Tal G, et al. Widely-tunable, narrow-linewidth Ⅲ-Ⅴ/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication[J]. Opt. Express, 2018, 26(7): 7920.

[18] Fan Y, Oldenbeuving R M, Hoekman M, et al. 290 Hz intrinsic linewidth from an integrated optical chip-based widely tunable InP-Si_3N_4 hybrid laser [C]// Lasers & Electro-optics. IEEE, 2017.

[19] Ishii H, Kasaya K, Oohashi H, et al. Widely wavelength-tunable DFB laser array integrated with funnel combiner[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2007, 13: 1089-1094.

[20] Horikawa K, Yamamoto A, Osada T, et al. Development of ITLA using a full-band tunable laser[J]. Furukawa Review, 2009(35): 1-5.

[21] Bouda M, Matsuda M, Morito K, et al. Compact high-

power wavelength selectable lasers for WDM applications [C]// IEEE Optical Fiber Communication Conf., 2000.

[22] Ishii H, Kasaya K, Oohashi H. Spectral linewidth reduction in widely wavelength tunable DFB laser array[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 514-520.

[23] Roh S D, Swint R B, Coleman J J. Distributed Bragg Reflector Lasers[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[24] Johansson L A, Akulova Y A, Fish G A, et al. Widely tunable EAM-integrated SGDBR laser transmitter for analog applications[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15(9): 1285-1287.

[25] Dong L, Zhao S, Shan J, et al. A theoretical model for sampled grating DBR laser integrated with SOA and MZ modulator[J]. Opt. Express, 2009, 17(19): 16756.

[26] Barton J S, Skogen E J, Masanovic M L, et al. A widely tunable high-speed transmitter using an integrated SGDBR laser-semiconductor optical amplifier and Mach-Zehnder modulator[J]. Sel. Topics in Quantum Electronics IEEE J. of, 2003, 9(5): 1113-1117.

[27] Jayaraman V, Chuang Z M, Coldren L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings [J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1824-1834.

[28] Lee K S. Semiconductor laser with super structure grating distributed Bragg reflector: US, US5497393 A[P]. 1996.

[29] Oberg M, Nilsson S, Streubel K, et al. 74 nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1993, 5(7): 735-737.

[30] 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]// Semiconductor Laser Conf., 2002. IEEE 18th Inter., 2002.

[31] Ward A J, Robbins D J, Busico G, et al. Widely tunable DS-DBR laser with monolithically integrated SOA: design and performance [J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 149-156.

[32] Chen Q, Lu Q, Guo W. Theory and simulation of multi-channel interference (MCI) widely tunable lasers[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 18040-18051.

[33] Chen Q, Xiang M, Wei S, et al. Demonstration of multi-channel interference widely tunable semiconductor laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(24): 2862-2865.

[34] Chen Quanan, Chun, et al. 1×8 MMI based multi-channel interference laser integrated with SOA through a 2-port multimode interference reflector[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19940-19949.

[35] Binetti P R A, Lu M, Norberg E J, et al. Indium phosphide photonic integrated circuits for coherent optical links [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2012, 48(2): 279-291.

[36] Huynh T N, Nguyen L, Barry L P. Phase noise characterization of SGDBR lasers using phase modulation detection method with delayed self-heterodyne measurements [J]. J. of Lightwave Technol., 2013, 31(8): 1300-1308.

[37] Chen Quanan, Chun, et al. Narrow-linewidth thermally tuned multi-channel interference widely tunable semiconductor laser with thermal tuning power below 50 mW [J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 47-52.

[38] Matsui Y, Eriksson U, Wesstrom J O, et al. Narrow linewidth tunable semiconductor laser[C]// 2016 Compound Semiconductor Week (CSW) [Includes 28th Inter. Conf. on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM) & 43rd Inter. Symp. on Compound Semiconductors (ISCS)]. IEEE, 2016.

[39] Eriksson U, Wesstrom J O, Liu Y, et al. High performance narrow linewidth thermally tuned semiconductor laser[C]// IEEE European Conf. on Optical Communication, 2015.

[40] Larson M C. Narrow linewidth tunable DBR lasers [C]// IEEE Semiconductor Laser Conf., 2016.

作者简介：

王宽宽(1995—)，男，安徽省阜阳市人，博士研究生，研究方向为多通道干涉可调谐激光器的表征与控制；

国伟华(1976—)，男，湖北省人，博士，教授，博士生导师，曾在都柏林大学以及加州大学圣巴巴拉分校从事研究工作，研究方向包括大范围调谐激光器与高速干涉型光调制器的单片集成、大范围调谐激光器和光学相控阵列的单片集成；已在国际知名期刊和会议上发表论文 100 多篇。