



# 基于REC技术的可调谐半导体激光器

## Tunable Semiconductor Laser Based on Reconstruction-Equivalent-Chirp Technique

**摘要:** 重构-等效啁啾(REC)技术可以灵活、等效地实现各种复杂结构的光栅和对等效光栅布拉格波长的高精度调控。基于REC技术,分别实现了宽波段、窄线宽、低切换时间的3类半导体可调谐激光器。借助高精度波长调控的优势,制备的3类可调谐半导体激光器均实现了良好的性能。

**关键词:** 半导体激光器;可调谐激光器;REC技术

**Abstract:** Reconstruction-equivalent-chirp (REC) technique can flexibly and equivalently implement various gratings with complex structures and achieve high-precision control of the grating period. Based on the REC technique, three types of tunable semiconductor lasers are realized with wide-band tuning range, narrow linewidth and low switching time, respectively. With the advantages of high-precision control of the grating period, these tunable semiconductor lasers we prepared have achieved good performance.

**Keywords:** semiconductor laser; tunable laser; REC technique

陈向飞/CHEN Xiangfei

肖如磊/XIAO Rulei

陆骏/LU Jun

(南京大学,中国 南京 210000)

(Nanjing University, Nanjing 210000, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200415.1902.002.html>

网络出版日期: 2020-04-16

收稿日期: 2020-02-17

半导体激光器具有体积小、功耗低、可靠性高、适合大规模量产等诸多优势,正在逐步成为光子技术中最重要的光源之一。可调谐半导体激光器由于波长灵活可调的特性而得到广泛应用,例如:使用波分复用的光接入网或相干光通信网,需要可调谐激光器来实现灵活的波长配置;光学相干断层扫描成像、光频域反射计或激光气体传感等系统,需要可调谐激光器实现波长扫描来进行相关检测。

可调谐半导体激光器的实现难度主要体现在以下几个方面。首先,可调谐半导体激光器需要实现单波长激光,这意味着它需要具有更精细的波长选择功能的谐振腔,以实现在纵向和横向的单模工作。其次,它的

谐振腔需要具备灵活可调的功能,同时在谐振腔调节的过程中依然保持单模的工作状态。最后,相比于光泵浦的激发方式,虽然电泵浦的半导体激光器仅注入电流就可实现发光,具有易配置、易使用等特点,但是电泵浦结构需要高效率的电致发光,而这对材料的设计与生长都提出了更高的要求。

### 1 可调谐半导体激光器主要技术

最近几十年,研究者通过构建不同类型的谐振腔调谐方式,实现了多种可调谐半导体激光器。根据谐振腔的集成方式,可调谐半导体激光器可分为分立外腔结构和单片集成腔体结构两大类。其中,分立外腔结构是指将半导体增益结构与外部谐振腔通过空间光学耦合在一起,并通过对外部谐振腔的调节来实现对激光波长的调谐。这里的外部谐振腔通

常包括衍射光栅<sup>[1]</sup>、集成化波导谐振腔结构<sup>[2]</sup>等。单片集成谐振腔结构类型主要包括分布反馈结构<sup>[3]</sup>、分布布拉格反射结构<sup>[4]</sup>、V型腔结构<sup>[5]</sup>、多通道干涉结构<sup>[6]</sup>、集成微电子机械系统<sup>[7]</sup>等。

(1) 分立外腔结构可调谐半导体激光器。

最早期的可调谐半导体激光器就是通过分立外腔结构实现的,即通过透镜光学耦合结合衍射光栅来进行波长选择,并通过改变光栅的衍射角度来选择不同的激光波长<sup>[1]</sup>。如图1(a)所示,在半导体增益结构的一个解理面上镀上抗反射膜,将一个固定的反射型衍射光栅作为色散元件,通过压电陶瓷控制镜面围绕一个虚支点旋转,使不同波长的1级衍射光在激光光源和外腔镜之间形成振荡,同时使0级衍射光为输出光。外腔镜在改变位置的同时仍能满足相应波

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2018YFE0201200、2017YFA0206401、2018YFA0704402、2018YFB2201801)、国家自然科学基金(61975065)

长的相位匹配条件,并使其形成谐振输出,从而实现波长的连续调谐。

随着近年来微加工工艺水平的快速提高,以及硅基、氮化硅基、聚合物基等集成化波导体系的迅速发展,研究者们提出了基于这些材料体系的可调谐振腔结构。通过将谐振腔结构与半导体光放大器芯片的耦合,可以实现波长可调谐激光器。如图1(b)所示,首先在半导体光放大器芯片的一个解理面上镀了抗反射膜,同时两个不同半径的微环波导被耦合在一起,并与半导体放大器芯片进行耦合。然后,在这两个微环波导上分别集成一个薄膜电阻加热器<sup>[2]</sup>,通过改变两个薄膜电阻加热器的电流,即可实现两个微环波导透射谱的偏移。由于这两个微环波导的透射谱具有不同的平均自由程,因此通过透射峰的错位就可以实现宽带的波长调谐范围。该结构在硅、氧化硅、氮化硅或聚合物波导上都可以实现,其调谐范围主要受限于半导体材料的增益谱宽。

由于聚合物具有较大的热光系数或电光系数,改变温度或电压可以对其折射率进行很大的改变,因此在聚合物波导中也可以直接使用布拉格光栅作为外腔来实现宽带可调。如图1(c)所示,通过对-10~70℃聚合物温度的调节可以实现25nm的波长调谐范围<sup>[8]</sup>。

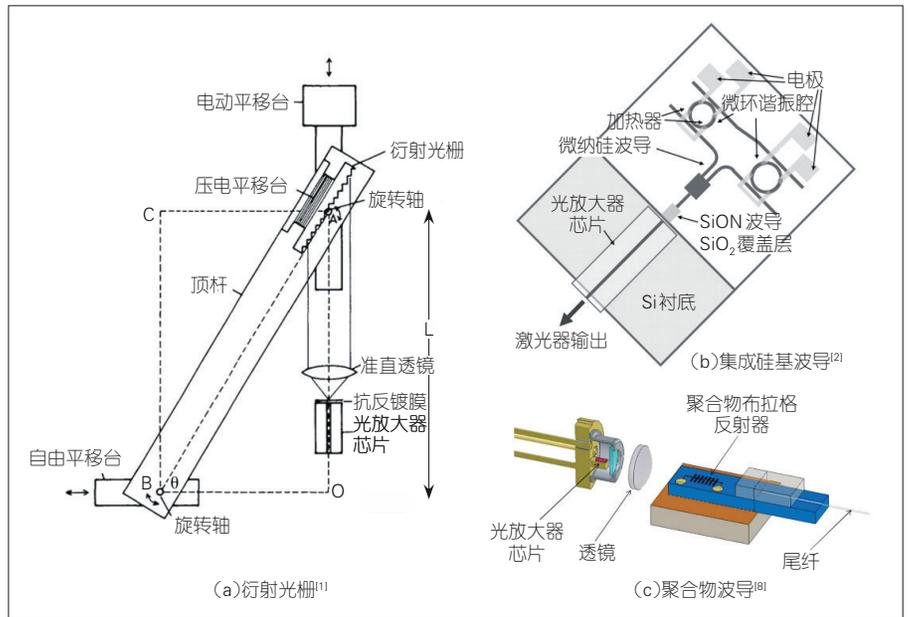
(2) 谐振腔单片集成可调谐激光器。

分布反馈结构(DFB)是指其布拉格光栅谐振腔正好与增益材料在位置上重合。基于DFB结构可以实现良好的单波长激光激射。虽然该激光具有高边模抑制比、高输出功率、良好的直接调制效果等,并已成为目前光通信网络中最常用的光源,但是DFB结构谐振腔难以实现大范

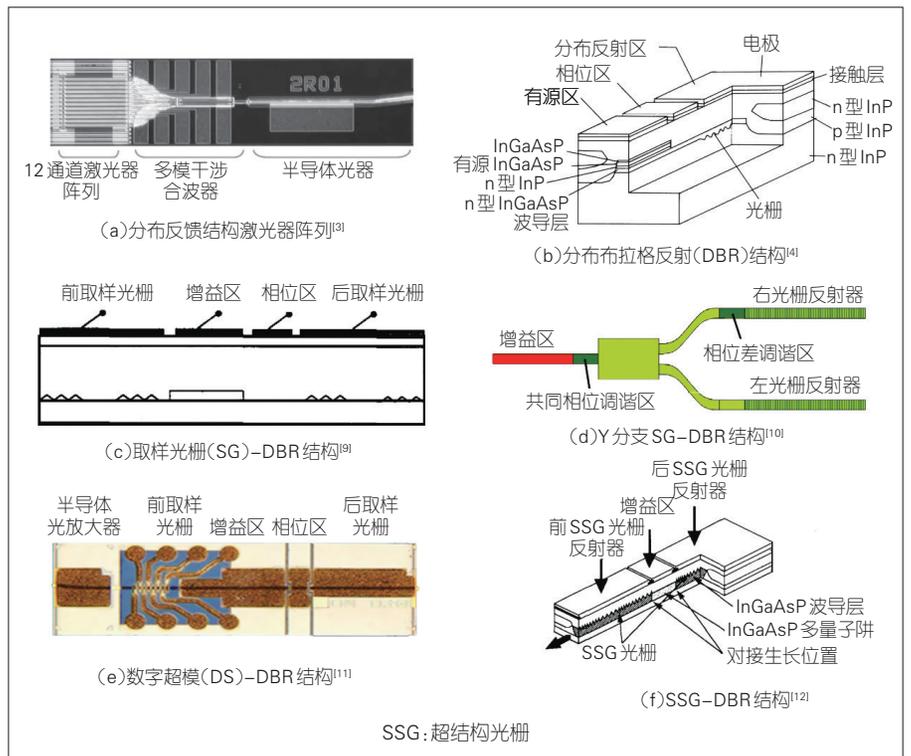
围可调谐功能。为实现基于DFB结构的宽波段可调谐激光器,一种常用方法是集成多波长DFB激光器阵列,即先通过选择阵列中对应波长的激光光源并使其发生激射,再配合上温度调谐装置,最终得到想要的光输

出。如图2(a)所示,通过集成12个不同波长的DFB激光器和1个多模干涉合波结构,结合温度调谐的功能可以实现40nm的波长调谐范围<sup>[3]</sup>。

分布布拉格反射(DBR)结构,是指在激光器有源区的外部集成无源



▲图1 3种外部谐振腔结构



▲图2 几种单片集成谐振腔结构类型

的布拉格光栅反射器,通过改变该光栅结构处的电流调节其布拉格波长,从而改变激光器的输出波长,如图2(b)所示。为获取更良好的单纵模工作特性,通常会在波导中设立一个相位调节区<sup>[4]</sup>,但仅通过改变无源光栅波长的调谐范围比较有限(通常都小于10 nm)。为增加调谐范围,很多研究者会利用取样光栅结构的宽带梳状谱,即通过改变两个不同周期梳状谱的对齐位置,来实现宽波段的波长可调。图2(c)中<sup>[9]</sup>是最早提出的基于取样光栅的DBR结构(SG-DBR),之后通过改变光栅的精细结构或波导的耦合方式,衍生出了多种类似结构,包括图2(d)所示的Y分支波导SG-DBR<sup>[10]</sup>、图2(e)所示的DS-DBR<sup>[11]</sup>和图2(f)所示的SSG-DBR结构<sup>[12]</sup>,这几类结构都可以实现大于35 nm的宽波段调谐范围。

除了基于光栅结构的谐振腔结构,也有研究人员提出基于其他结构的谐振腔。例如,一种基于多通道干涉器的谐振腔结构<sup>[6]</sup>,通过改变不同反射臂的相位差实现波长的选择和大于50 nm的准连续波长调谐。此外,还有一种V型谐振腔结构<sup>[5]</sup>被提出,其原理为构建两个不同自由程的法布里-珀罗谐振腔产生的梳状谱,即通过调节相位来选择重合的波长进行激励。该谐振腔结构可以实现40 nm的调谐范围。另外,随着近年来微电子机械系统的成熟发展,在垂直面反射半导体激光器中引入压电材料,通过对外部反射镜的微机械调节,同样可以实现宽带的波长调谐<sup>[7]</sup>。

## 2 重构-等效啁啾技术(REC)技术

REC技术最早是在光纤光栅的

相关研究中被提出,并从2007年开始被用于半导体激光器的制备中。相较主流的加工技术而言,REC技术是一种全新的加工技术<sup>[13-14]</sup>。在通信半导体激光器中,精度最高、加工难度最大的部分是波导光栅(其最小尺寸达到0.1 μm),而激光器的波长等主要性能都是由光栅直接决定的。目前主流的加工技术有两种:一种是电子束曝光,即利用聚焦的电子束进行扫描式的曝光形成图案,如图3(a)所示,该技术的优点在于技术灵活、可制作任意复杂图形,缺点在于设备成本高、制备时间长、周期很难控制;另一种是全息曝光,即利用两束光的干涉形成的均匀明暗条纹,从而曝光形成光栅,如图3(b)所示,其优点在于设备便宜、制备时间短、光栅的均匀性非常好,缺点在于结构单一、只能制作均匀光栅、无法满足高端器件的要求。REC技术是基于全息曝光后再加一次普通光刻,能等效实现复杂光栅结构,如图3(c)所示,在具有电子束曝光技术的技术灵活性的同时,还拥有全息曝光方法低成本、制备快和光栅均匀性好的优点。例如,基于REC技术可以实现等效的λ/4相移光栅。具有该光栅的DFB激光器有优异的动态单模特性,能很好地满足可调谐激光器在工作过程中保

持单模的需求。

REC技术是基于取样光栅结构实现的。取样光栅折射率形貌 $\Delta n_s(z)$ 在数学上可以描述为公式(1):

$$\Delta n_s(z) = \frac{1}{2} s(z) \Delta n \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda_0}\right) + c.c. \quad (1)$$

其中, $s(z)$ 表示取样结构, $\Lambda_0$ 表示种子光栅的周期, $z$ 是光栅的轴向坐标, $j$ 是虚数单位, $c.c.$ 表示共轭, $\Delta n$ 是种子光栅的折射率调制幅度。将均匀取样结构展开为傅里叶级数,如公式(2)所示:

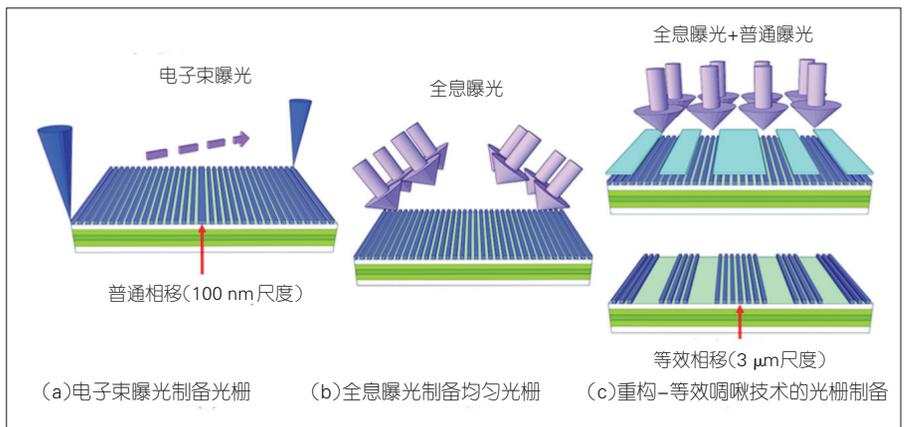
$$s(z) = \sum_m F_m \exp\left(j \frac{2m\pi z}{P}\right) \quad (2)$$

其中, $m$ 是傅里叶级次, $F_m$ 是第 $m$ 级的傅里叶系数。取样光栅可以进一步表述为:

$$\Delta n_s(z) = \sum_m \frac{1}{2} \Delta n F_m \exp\left(j \frac{2m\pi z}{P} + j \frac{2\pi z}{\Lambda_0}\right) + c.c. \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,取样光栅是很多级次的傅里叶子光栅的线性叠加。每个级次的子光栅都有特定的光栅周期、初相位以及光栅强度。

如果取样光栅的初相位发生变



▲图3 3种光栅制备技术

化,即 $\Delta z$ 发生变化,那么公式(3)可以表示为:

$$\Delta n_s(z) = \Delta n \sum_m \frac{1}{2} F_m \exp \left[ j \left( 2\pi \frac{z}{\Lambda_0} + 2\pi m \frac{z}{P} \right) \right] \exp \left( -j 2\pi m \frac{\Delta z}{P} \right) + c.c. \quad (4)$$

可以看出, $\Delta z$ 能够改变傅里叶子光栅的初相位。对于第 $m$ 级而言,相关变量为 $\varphi = -2\pi m \frac{\Delta z}{P}$ 。 $\Delta z$ 与初相位呈线性关系。同理,如果改变取样周期 $P$ ,同样可以改变傅里叶子光栅,也就是说可以改变DFB激光器的激励波长。因为取样周期 $P$ 和傅里叶子光栅周期 $\Lambda_m$ 有直接的关系,其具体关系根据公式(3)可以得到:

$$\frac{1}{\Lambda_m} = \frac{m}{P} + \frac{1}{\Lambda_0} \quad (5)$$

以-1级子光栅为例,-1级子光栅DFB激光器的波长可表示为:

$$\lambda_{-1} = 2n_{eff}\Lambda_{-1} = 2n_{eff} \frac{P\Lambda_0}{P - \Lambda_0} \quad (6)$$

而-1级子光栅的波长误差与制造工艺中取样光栅的误差关系为:

$$\Delta\lambda_{-1} = -2n_{eff} \cdot \frac{\Lambda_0^2}{P^2} \cdot \Delta P \quad (7)$$

在通常情况下,由于取样光栅周期 $P$ 为微米量级,种子光栅周期 $\Lambda_0$ 为几百纳米,因此利用REC技术,DFB激光器的波长精度可以比传统工艺提高约两个数量级<sup>[15]</sup>。在实际应用中,除了具有加工简单、快速等特点外,REC技术最大的优势在于能够实现对光栅结构的精准控制。 $\lambda/4$ 相移结构在REC技术中的尺度为 $3 \mu\text{m}$ 左右,而在常规结构中只有 $100 \text{ nm}$ 的尺度。基于REC技术高精度的波长控制能力,我们制备了目前报道数最多

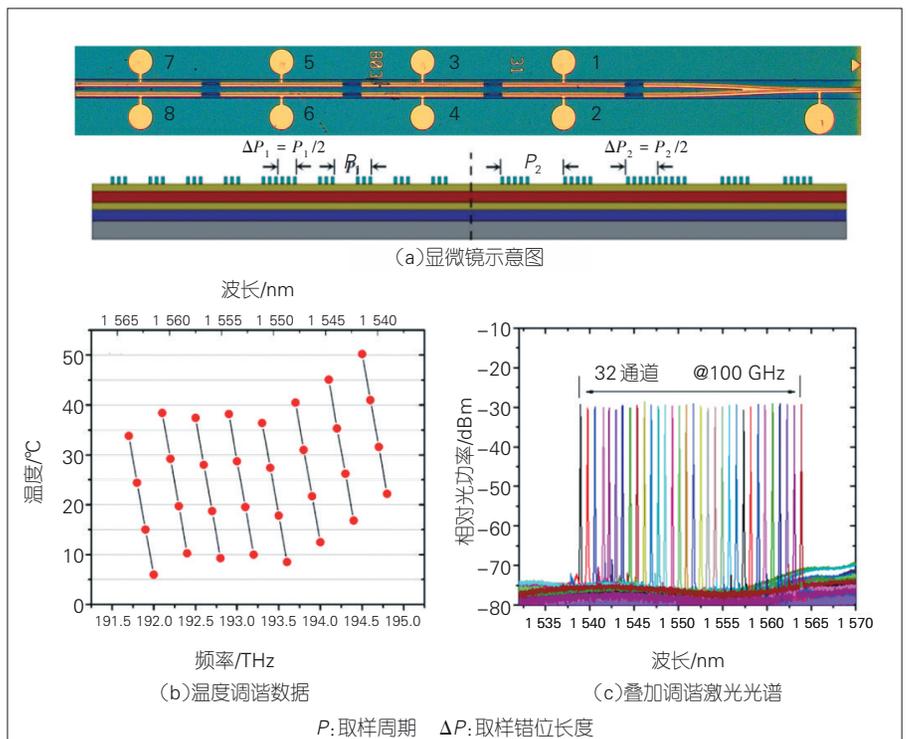
的60波长激光器阵列,并得到非常均匀的波长分布特性,83%的波长偏长在 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 范围内<sup>[16]</sup>。也正是基于高精度的波长控制能力,我们将REC技术应用与可调谐半导体激光器中,使其在宽波段、窄线宽、快速切换可调谐激光器方面具有特定的性能优势。

### 3 基于REC技术的宽波段可调谐激光器

与文献[3]类似,基于REC技术的宽波段可调谐激光器也是通过集成多波长DFB激光器阵列的方式来实现。与之不同的是,基于REC技术的多波长激光器阵列具有高精度波长控制的优势,因而可以实现更低的激光器阵列波长间隔,从而大幅降低温度调谐范围,提高激光器整体的良品率。与文献[3]中的并联结构相比,DFB激光器的并联结构由于不同的激光器光栅之间没有相互干扰,可

以得到更优的单模特性。然而,并联结构的合波器会带来较大的损耗,并且该损耗会随着激光器数目的增加而增加。虽然DFB激光器的串联结构可以减少合波器的使用,但是串联结构对光栅周期精度提出了更高的要求。尤其是在相邻激光器波长间隔小的情况下,如果光栅周期的误差过大,则会引起激光器之间较大的串扰。正是因为REC技术具有很高的光栅周期精度控制,我们目前研究的基于REC技术的宽波段可调谐激光器会使用到串联结构。该结构主要包括串联和串并联两种类型。

如图4(a)所示,我们实现了一个串并联结构的可调谐激光器,其中有2根平行的波导通过1个Y分支合波器进行合波,每根波导上集成了4个不同波长的DFB激光器,一共集成了8个均匀波长间隔的DFB激光器<sup>[17]</sup>。激光器芯片采用传统的两步金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺制作,使用脊波导结构,在两端镀膜反



▲ 图4 2x4串并联可调谐激光器的结构及性能

射膜。其中,相邻2个波长的激光器被分别设计在2根不同波导上,这样可以有效降低光栅串扰。如图4(b)所示,通过选择激射的激光器进行大致调谐,改变芯片温度进行精细调谐,可以实现32通道100 GHz间隔的调谐范围。其中,每个激光器负责4个通道,整体的波长调谐温度范围为45℃,边模抑制比均大于40 dB。同样地,基于REC技术对波长的高精度控制,我们还实现了激光器芯片的串联结构<sup>[18]</sup>,如图5所示。我们得到了32通道50 GHz间隔的波长调谐范围,并使该结构保持了良好的单模特性,不同波长的边模抑制比均大于40 dB。

#### 4 基于REC技术的窄线宽可调谐激光器阵列

窄线宽可调谐激光器被广泛应用于相干光通信、水听器、雷达等领域。根据半导体激光器线宽理论的研究报道,半导体激光器线宽的表达式如公式(8)所示。其中, $v_g$ 是材料中光的群速度, $h$ 是普朗克常量, $\nu$ 是光频率, $g$ 是阈值增益, $n_{sp}$ 是自发辐射因子, $\alpha_m$ 是谐振腔损耗, $P_0$ 是光功率, $\alpha$ 是线宽展宽因子。可以看出,决定半导体激光器线宽的因素主要在两个方面:一是构成激光器的材料特性,因为材料特性直接影响激光器的阈值增益 $g$ 和线宽展宽因子 $\alpha$ ;二是因为激光器的结构特征,激光器的结构特征会影响谐振腔损耗 $\alpha_m$ 、阈值增益 $g$ 等。

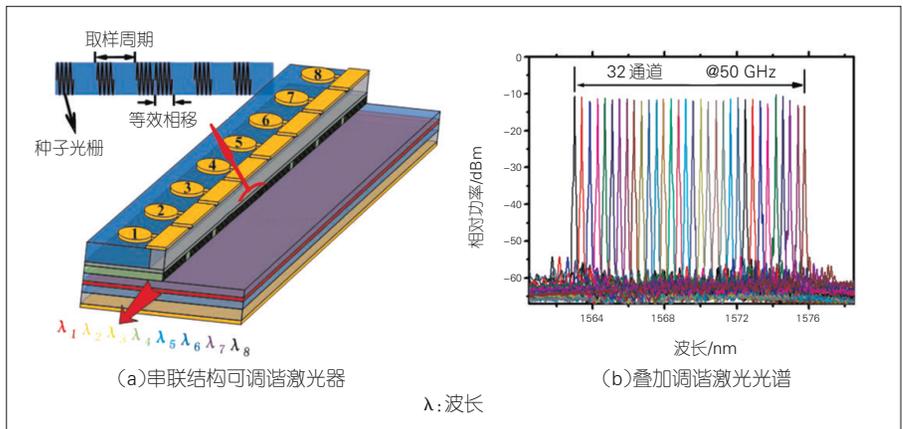
$$\Delta\nu = \frac{v_g^2 h \nu g n_{sp} \alpha_m}{8\pi P_0} (1 + \alpha^2), \quad (8)$$

$$\alpha_m \approx 2\pi^2 / (\kappa^2 L^3). \quad (9)$$

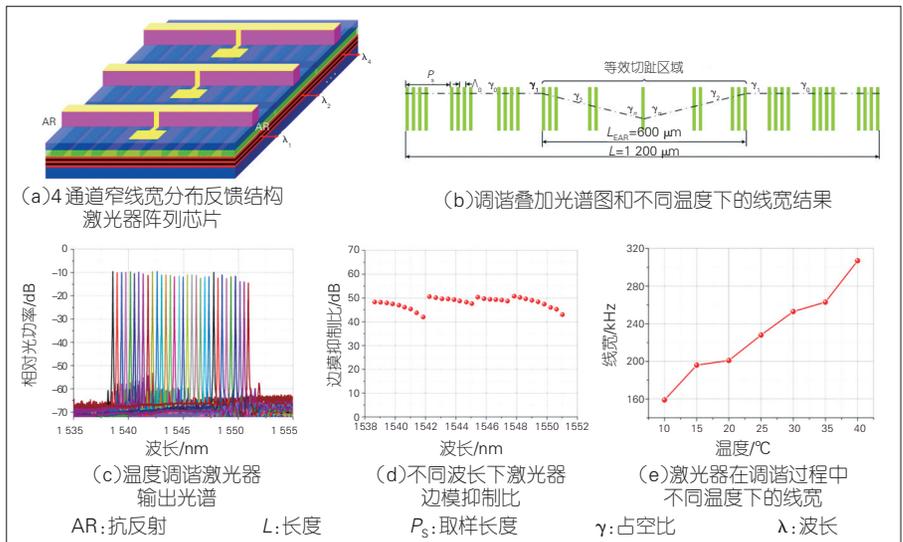
对于DFB激光器而言,其谐振腔损耗满足公式(9)。可以看出,提高

DFB激光器光栅强度,增大DFB激光器的腔长,能够降低DFB激光器的腔内损耗,从而降低DFB激光器的线宽。但是提高 $\kappa$ 和 $L$ 又会加剧激光器的空间烧孔效应,并降低DFB激光器在大电流注入时的单模特性,使激光器线宽展宽。因此,需要对DFB激光器的光栅结构进行优化以获得窄线宽输出。传统可调谐窄线宽DFB激光器芯片的腔长一般较长,且波导光栅均为具有特殊相移结构的光栅,其制作过程复杂、制造成本较高。基于REC技术正好可以利用低成本的加工方法实现复杂、高精度的光栅结构,十分适合制备可调谐窄线宽激光器芯片。

我们基于REC技术设计了4通道窄线宽DFB激光器阵列<sup>[19]</sup>,并通过改变温度实现了波长调谐。图6(a)是4通道DFB激光器阵列芯片结构示意图,其中,芯片腔长为1200 μm,4个DFB激光器波长间隔3.2 nm。DFB激光器芯片的光栅是利用REC技术设计的等效内切趾光栅结构,如图6(b)所示。该光栅结构能够有效降低激光器腔内空间烧孔效应,利于激光器线宽的压窄。且该区域位于芯片中间,切趾区域长度为600 μm。等效切趾采用的是改变采样光栅占空比的方式实现的,其占空比的类型为线性,切趾区域两端占空比最大为0.5,切趾区域中心占空比最小为0.3。



▲图5 串联结构可调谐激光器结构及其性能



▲图6 4通道窄线宽分布反馈结构激光器阵列结构及其性能

图6(c)和(d)分别展示了在激光器注入电流为100 mA时,通过温度调谐测得的激光器输出光谱以及不同波长下激光器边模抑制比。通过将激光器的工作温度从10℃调谐到40℃,可得到32通道间隔50 GHz的波长可调谐输出,其波长调谐范围是1 538.58~1 550.92 nm。在调谐过程中激光器的边模抑制比均大于42 dB,保持了较好的单模特性。通过自外差法,我们测得激光器在调谐过程中不同温度下的线宽,具体如图6(e)所示。由测试结果可以看出,低温下激光器线宽更窄。在芯片温度由10℃升高到40℃的过程中,激光器线宽由160 kHz升高到307 kHz,同时保持了窄线宽输出。

的时间在纳秒量级,因此波长调谐的方式也可以达到纳秒量级。虽然这种调谐方式速度快,但对于激光器波长的精准性要求却很高;因此,在设计每个DFB激光器的光栅结构时,可采用能够实现波长间隔精准控制的REC集成激光器阵列技术。激光器芯片的设计思路是设计多波长串并联的DFB半导体激光器芯片。如图7(a)所示,该激光光源将 $m \times n$ 个DFB激光器单片集成在一个芯片上,并通过可编程逻辑控制器(PLC)合束器耦合在同一根光纤内输出。激光器的个数即为光源输出通道数,决定了光源的波长调谐范围。基于串并联DFB激光器阵列芯片,我们开发了8

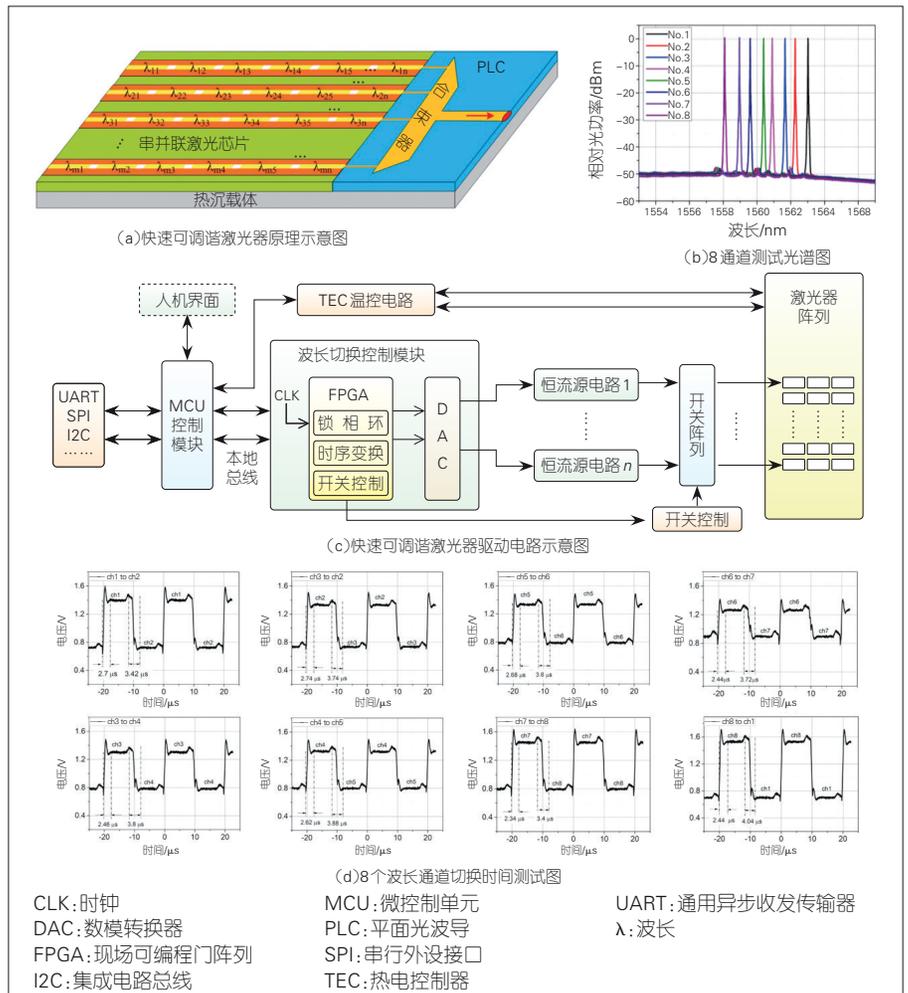
通道快速可调谐激光器模块。8通道激光器光谱如图7(b)所示。由测试结果可以看出,各通道具有较好的单模特性。

对于快速可调谐激光器,驱动控制电路是其关键部分。驱动控制电路的作用包括温度控制、激光器工作电流驱动、波长切换、工作参数通信控制。基于REC技术激光器阵列的快速可调谐激光光源系统及电路实现结构如图7(c)所示。其中,微控制单元(MCU)控制模块提供人机交互接口,或与其他系统互连的控制接口。通过这些接口,MCU模块负责传递各路激光器的波长切换控制、激光工作电流及工作温度等参数,并对信

### 5 基于REC技术的快速可调谐激光器

不断增长的数据通信迫切需要大型、低时延交换节点来提供高速、大容量、有效的数据交换功能。光交换技术是打破信息交换瓶颈的关键技术。光交换技术有多种方案能够实现,其中一种是基于快速可调谐激光器利用源端波长切换实现的光信息交换<sup>[20]</sup>。基于可调谐激光光源和阵列波导光栅路由器的组合的方案,可以形成灵活、大容量的光交换能力。这不仅能够提供大端口数,还可以实现低阻塞和低时延的快速路由;但该方案最大的难题在于很难实现低成本的稳定、快速可调谐激光光源。

要实现半导体激光器的波长调谐,一般采用改变温度或无源区电流的方式,但是这两种方案都存在激光器调谐稳定时间较长的问题。目前最快的调谐方式是对激光器阵列进行开关切换,以实现固定多波长通道之间的快速切换。由于激光器点亮



▲图7 快速可调谐激光器结构及其性能

息进行识别和格式变换,将其转换成波长切换模块、驱动电流模块及热电控制器(TEC)模块所需的数字及模拟控制信号。波长切换控制模块是以现场可编程门阵列(FPGA)为核心实现的。由于快速可调谐激光器波长调谐/切换时间一般在微秒量级甚至是数十纳秒量级,因此波长切换的控制信号须提供比调谐时间更快的上升/下降沿,而且要保持多路控制信号的严格同步。图7(d)是不同通道间波长切换时间测量结果,可以看出,激光器波长调谐时间为4  $\mu\text{s}$ 左右。

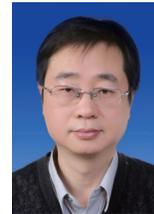
## 6 结束语

总体来看,可调谐半导体激光器由于体积小、适合大规模生产和易于集成等优点,有望被大量应用于包括光通信、光传感和光计算等诸多领域。目前也有许多其他不同实现方法,比如外腔激光光源、DFB激光光源、DBR激光光源以及垂直腔面发射激光器(VCSEL)等。不同实现方案具有各自的优缺点,可以分别适用于不同的场合。基于自主发明的REC技术,我们以一种低成本的加工方案实现了精准的布拉格光栅制作。基于该精准的光栅,可以实现面向相控阵雷达和相干光通信的窄线宽可调谐激光器、面向光交换激光器雷达的快速可调谐激光器和面向5G前传波分复用无源光网络(WDM-PON)的宽波段可调谐激光器。

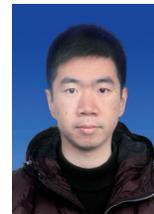
### 参考文献

- [1] FAVRE F, LE GUEN D, SIMON J C, et al. External-cavity semiconductor laser with 15 nm continuous tuning range [J]. Electronics letters, 1986, 22(15): 795. DOI: 10.1049/el:19860545
- [2] FUJIOKA N, CHU T, ISHIZAKA M. Compact and low power consumption hybrid integrated wavelength tunable laser module using silicon waveguide resonators [J]. Journal of lightwave technology, 2010, 28(21): 3115-3120. DOI:10.1109/jlt.2010.2073445
- [3] ISHII H, KASAYA K, OOHASHI H, et al. Widely wavelength-tunable DFB laser array integrated with funnel combiner [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2007, 13(5): 1089-1094. DOI: 10.1109/jlt.2010.2073445
- [4] KOTAKI Y, MATSUDA M, ISHIKAWA H, et al. Tunable DBR laser with wide tuning range [J]. Electronics letters, 1988, 24(8): 503. DOI: 10.1049/el:19880342
- [5] ZHANG S, MENG J, GUO S, et al. Simple and compact V-cavity semiconductor laser with  $50 \times 100$  GHz wavelength tuning [J]. Optics express, 2013, 21(11): 13564. DOI: 10.1364/oe.21.013564
- [6] CHEN Q, MA X, SUN W, et al. Demonstration of multi-channel interference widely tunable semiconductor laser [J]. IEEE photonics technology letters, 2016, 28(24): 2862-2865. DOI: 10.1109/pt.2016.2624308
- [7] HUANG M C Y, CHENG K B, ZHOU Y, et al. Demonstration of piezoelectric actuated GaAs-based MEMS tunable VCSEL [J]. IEEE photonics technology letters, 2006, 18(10): 1197-1199. DOI:10.1109/pt.2006.873923
- [8] NOH Y-O, LEE H-J, JU J J, et al. Continuously tunable compact lasers based on thermo-optic polymer waveguides with Bragg gratings [J]. Optics express, 2008, 16(22): 18194. DOI:10.1364/oe.16.018194
- [9] 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. DOI:10.1109/3.234440
- [10] WESSTRÖM 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. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2004: 389-391.
- [11] 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. DOI:10.1109/jstqe.2004.841698
- [12] 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. DOI:10.1109/3.234439
- [13] DAI Y, CHEN X, JIANG D, et al. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. IEEE photonics technology letters, 2004, 16(10): 2284-2286. DOI:10.1109/pt.2004.834530
- [14] DAI Y, CHEN X. DFB semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology [J]. Optics express, 2007, 15(5): 2348-2353. DOI:10.1364/oe.15.002348
- [15] SHI Y, LI S, LI L, et al. Study of the multi-wavelength DFB semiconductor laser array based on the reconstruction-equivalent-chirp technique [J]. Journal of lightwave technology, 2013, 31(20): 3243-3250. DOI: 10.1109/jlt.2013.2280715
- [16] SHI Y, LI S, CHEN X, et al. High channel count and high precision channel spacing multi-wavelength laser array for future PICs [J]. Scientific reports, 2014, 4: 7377. DOI: 10.1038/srep07377
- [17] ZHENG J, SHI Y, ZHANG Y, et al. Monolithically integrated four-channel DFB semiconductor laser array with an equivalent-distributed coupling coefficient [J]. IEEE photonics journal, 2015, 7(3): 1-9. DOI: 10.1109/jphot.2015.2420621
- [18] LI L, TANG S, LU J, et al. Study of cascaded tunable DFB semiconductor laser with wide tuning range and high single mode yield based on equivalent phase shift technique [J]. Optics communications, 2015, 352: 70-76. DOI:10.1109/jphot.2015.2420621
- [19] ZHANG Y, ZHENG J, ZHANG F, et al. Study on DFB semiconductor laser array integrated with grating reflector based on reconstruction-equivalent-chirp technique [J]. Optics express, 2015, 23(3): 2889. DOI: 10.1364/oe.23.002889
- [20] GRIPP J, DUELK M, SIMSARIAN J, et al. Demonstration of a 1.2 Tbit/s optical packet switch fabric ( $32 \times 40$  Gbit/s) based on 40 Gbit/s burst-mode clock-data-recovery, fast tunable lasers, and a high-performance  $N \times N$  AWG [C]//Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551). Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2001, 6: 58-59. DOI: 10.1109/ecoc.2001.989048

### 作者简介



陈向飞, 南京大学教授; 主要研究领域为光通信、光子集成技术、半导体激光器、微波光子学等; 先后主持和参加“863”项目、国家重点研发计划等10余项, 获2018年国家科技发明二等奖; 已发表论文200余篇, 获授权发明专利10余项。



肖如磊, 南京大学副研究员; 主要研究领域为可调谐半导体激光器、光子集成芯片等; 已发表论文20余篇, 获授权发明专利5项。



陆骏, 南京大学副研究员; 主要研究新型可调谐半导体激光器的设计和制作、多波长阵列激光器的芯片设计和制作工艺, 以及有源/无源集成技术; 已发表论文10余篇。