

# 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展

范杰\*, 龚春阳, 杨晶晶, 邹永刚, 马晓辉

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 与传统的法布里-珀罗(F-P)腔半导体激光器相比,采用分布布拉格反射器(DBR)光栅的边发射半导体激光器在窄线宽、输出波长稳定等方面展示出了优异的特性,其在激光通信、光互联及非线性频率转换等领域有着巨大的应用需求。通过合理设计 DBR 光栅及器件结构,DBR 半导体激光器可以实现激光窄线宽、双波长输出以及波长可调谐等性能。基于内置 DBR 光栅结构,DBR 锥形半导体激光器可以同时兼具高功率、窄线宽及高光束质量等特性。针对这几类激光器,阐述了其结构设计、制作工艺及其性能优势,总结了国内外最新研究进展与发展现状,并对 DBR 半导体激光器的研究工作和发展趋势做出了进一步的讨论和展望。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 分布布拉格反射器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060003

## Research Progress of Distributed Bragg Reflector Semiconductor Lasers

Fan Jie\*, Gong Chunyang, Yang Jingjing, Zou Yonggang, Ma Xiaohui

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science  
and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Compared with traditional Fabry-Perot (F-P) cavity semiconductor lasers, the edge-emitting semiconductor lasers with distributed Bragg reflector (DBR) gratings exhibit excellent characteristics in terms of narrow linewidth and stable output wavelength. They have huge application requirements in the fields of laser communication, optical interconnection and nonlinear frequency conversion. The DBR semiconductor laser can achieve laser narrow linewidth, dual wavelength output and wavelength tunability by properly designing the DBR grating and device structure. The DBR tapered semiconductor laser can simultaneously combine high power, narrow linewidth and high beam quality owing to the built-in DBR grating structure. In this paper, the structural design, fabrication process and performance advantages of these types of lasers are discussed, and the present situation of research and development at home and abroad are summarized. Based on this, the research work and development trend of DBR semiconductor lasers are further discussed and prospected.

**Key words** lasers; semiconductor laser; distributed Bragg reflector

**OCIS codes** 140.5960; 230.1480; 140.3490

## 1 引言

自 GaAs 同质结激光二极管问世以来,半导体激光器逐渐展现出独特的魅力。半导体激光器已被广泛应用于军事、激光医疗、工业加工等领域<sup>[1-3]</sup>。随着半导体激光器应用范围的不断拓展,不同应用

领域分别对半导体激光器提出了独特的性能要求。如在激光通信、光互联、非线性频率转换等领域,要求半导体激光器具有窄线宽、波长稳定等特性<sup>[4-5]</sup>;为了使通信系统具有高效率,往往需要半导体激光器具有可调谐特性<sup>[6]</sup>,这种可调谐的半导体激光器还是波分复用系统<sup>[7-8]</sup>、光谱学<sup>[9]</sup>等领域的重要光

收稿日期: 2018-08-23; 修回日期: 2018-09-22; 录用日期: 2018-10-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(21707010)、吉林省科技发展计划(20180519018JH)、吉林省优秀青年基金(20180520194JH)

\* E-mail: fanjie@cust.edu.cn

源;在光信号处理、光载微波、拉曼光谱测试和光遥感等领域<sup>[10-11]</sup>,要求半导体激光器可以实现双波长输出。

传统的 Fabry-Pérot(F-P)腔半导体激光器在窄线宽、波长稳定、波长可调谐以及双波长输出等方面,无法满足特定领域对激光光源的要求。采用外腔结构对半导体激光器进行光束整形<sup>[12-13]</sup>是获得窄线宽激光的有效方法之一,但是其复杂的光学系统增加了激光系统的体积与质量,并增大了激光系统的装调难度及制造成本。因此,布拉格光栅被作为选频元件引入到半导体激光器的内部结构中,以实现窄线宽、波长稳定的半导体激光输出。同时,利用内置布拉格光栅还可以实现半导体激光器的波长可调谐及双波长输出。依据内置布拉格光栅的工作原理,半导体激光器分为分布反馈半导体激光器(DFB-LD)和分布布拉格反射器半导体激光器(DBR-LD)。Nakamura等<sup>[14]</sup>用光泵 GaAs 周期光栅表面实现了第一个 DFB-LD,布拉格光栅开始应用于光电子器件领域。Reinhart等<sup>[15]</sup>利用 GaAs 衬底成功制备了单模激射的 DBR-LD。除了输出光功率以外,DFB-LD 和 DBR-LD 的其他性能指标均优于 F-P 腔半导体激光器。内置布拉格光栅已被广泛应用于各类高性能半导体激光器中。

DFB-LD 是将布拉格光栅置于谐振腔中,利用光栅结构的周期性微扰实现光学反馈和波长选择,这种结构输出激光的单纵模特性稳定<sup>[16]</sup>。DBR-LD 则是通过在谐振腔的一端或两端制作布拉格光栅结构,形成的 DBR 光栅兼具谐振腔反射镜和模式选择作用<sup>[17]</sup>,此时 DBR 光栅部分达不到有源增益的效果。DBR-LD 的单纵模工作稳定性稍差于 DFB-LD,但光栅区与增益区的分离使得空间烧孔效应对 DBR-LD 的影响较小。此外,DBR-LD 可以通过采用表面光栅避免复杂的二次外延<sup>[18]</sup>,降低器件的制作难度及制造成本。

目前,利用电子束光刻制作 DBR 光栅的工艺精度已小于 10 nm<sup>[19]</sup>,并且通过电感耦合等离子体刻蚀技术可以针对小尺寸图形实现高质量刻蚀,如对 InP 材料中直径为 200 nm 的孔,蚀刻深度高达 3.5 μm,对于 40 nm 的槽,蚀刻深度可达 1.8 μm<sup>[20]</sup>。DBR-LD 已实现了兆赫兹级线宽、瓦级输出功率的近衍射极限发光<sup>[21]</sup>。本文通过梳理近年来相关的文献报道,分别综述了波长稳定窄线宽 DBR-LD、双波长 DBR-LD 和波长可调谐 DBR-LD 的研究进展及主要应用情况,并分析了 DBR-LD 的发展前景。

## 2 基本原理

布拉格光栅是一种具有干涉和衍射混合特性的光学元件,可以对入射光波进行空间周期性调制。将布拉格光栅刻蚀在半导体激光器件的一端形成 DBR 光栅,可以起到反射器的作用。典型 DBR-LD 的结构如图 1 所示。

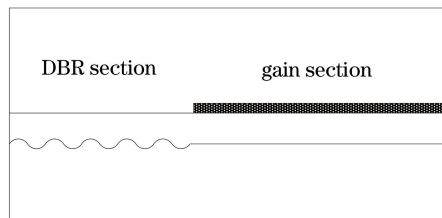


图 1 典型 DBR-LD 的结构

Fig. 1 Structure of typical DBR-LD

布拉格光栅是由高、低折射率的材料周期排列而成,利用不同材料之间的折射率差异,可以实现特定波长光波的反馈。DBR 光栅反射光谱如图 2 所示。由图 2 可知:DBR-LD 的谐振腔与 F-P 腔有相同之处,DBR 光栅起到了反射器的作用,相当于 F-P 腔的一个端面反射镜;不同之处在于 DBR 光栅具有强烈的波长选择性。来自谐振腔不同纵向模式的光波通过 DBR 光栅时,可以使满足布拉格条件的光反射回谐振腔参与谐振,从而实现压窄激光线宽、稳定波长的目的。满足布拉格条件时波长与布拉格光栅周期的关系为

$$\Lambda = \frac{m\lambda_B}{2n_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中: $\Lambda$  为布拉格光栅的周期; $\lambda_B$  为布拉格波长; $m$  为光栅阶数; $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率。DBR 光栅的反射率和反射带宽与光栅材料的层数、占空比、光栅刻蚀深度以及光栅材料之间的折射率差等参数有关。

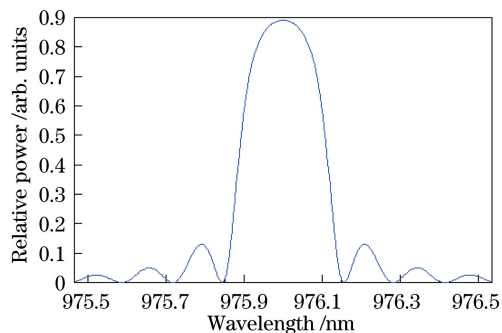


图 2 DBR 光栅反射光谱

Fig. 2 Reflectance spectrum of DBR grating

DBR-LD 的 DBR 光栅区通常是无源区,当 DBR 光栅区域施加注入电流时,可以通过调节注入光栅区的载流子浓度改变其有效折射率,使激光器的波长可调谐。通过载流子注入来改变光栅材料的折射率的物理过程包括能带填充效应、能带收缩效应和自由载流子等离子体效应。对于通过无源区载流子注入实现折射率改变的过程,自由载流子等离子体效应是改变折射率的主要原因,其原理是自由载流子吸收一个光子并跃迁到带内能量更高的状态。对于无掺杂的调谐区材料,电子浓度  $N$  和空穴浓度  $P$  相等,禁带宽度大于入射光能量,载流子注入对于折射率实部的改变  $\Delta n'$  可表示为<sup>[22-23]</sup>

$$\Delta n' = -\underbrace{\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 n \epsilon_0} \left( \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right)}_{\beta_{pl}} N = \beta_{pl} N, \quad (2)$$

式中: $e$  为元电荷; $\lambda$  为光子波长; $c$  为真空中的光速; $n$  为材料的有效折射率; $\epsilon_0$  为材料的介电常数; $m_e$  和  $m_h$  分别为注入电子和空穴的有效质量; $\beta_{pl}$  为负数,表示折射率随着载流子的注入减小。除实部变化外,载流子的注入会改变折射率的虚部,即材料的损耗  $\alpha_{pl}$ ,可表示为<sup>[23]</sup>

$$\alpha_{pl} = -2k_0 \Delta n'' = \underbrace{\frac{e^3 \lambda^3}{4\pi^2 c^3 n \epsilon_0} \left( \frac{1}{m_e \mu_e} + \frac{1}{m_h \mu_h} \right)}_{k_{pl}} N = k_{pl} N, \quad (3)$$

式中: $k_0$  为波数; $\Delta n''$  为折射率虚部的改变; $\mu_e$  和  $\mu_h$  分别表示电子和空穴的迁移率; $k_{pl}$  为正数。

### 3 研究进展

#### 3.1 窄线宽 DBR-LD

DBR-LD 可以实现单纵模、窄线宽和工作波长稳定的激光输出,极大地增加了激光系统运用的灵活性,在抽运源、激光医疗、相干激光通信等领域有广阔的应用前景。

1064 nm 窄线宽、高效的半导体激光器有望取代已经用于自由空间相干光通信的固体激光器。Spießberger 等<sup>[24]</sup> 的研究表明,电流波动、机械振动和热噪声是影响窄线宽激光器光谱线宽的主要因素,并基于三量子阱结构研制了 1064 nm 单纵模 DBR-LD。当温度为 25 °C 时,1064 nm 单纵模 DBR-LD 的线宽特性如图 3 所示。可以看出,该半导体激光器单纵模是利用有效反射系数为 60% 的 6 阶表面 DBR 光栅实现的。经测试,激光器的输出激光波长为 1056 nm,半峰全宽 (FWHM) 只有

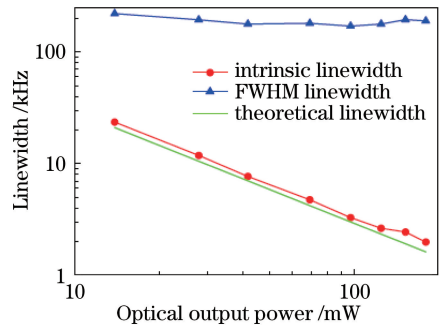


图 3 1064 nm 单纵模 DBR-LD 的线宽特性<sup>[24]</sup>  
Fig. 3 Linewidth characteristics of single longitudinal mode DBR-LD at 1064 nm<sup>[24]</sup>

180 kHz,且半峰全宽几乎与输出功率无关。

在高精密激光计量学、拉曼光谱和全息摄影等应用中,需要 635 nm 波段的激光源,并且要求输出激光在毫瓦功率范围内具有窄线宽和良好的光束质量。Feise 等<sup>[25]</sup> 研制了 635 nm DBR-LD,其外延结构示意图如图 4 所示,图中  $O$  表示光栅刻槽宽度。实验采用标准  $i$  线步进光刻和  $\text{BCl}_3\text{-Ar}$  等离子体干法刻蚀制作了 10 阶表面 DBR 光栅,随着刻蚀图形由浅入深,占空比由 0.5 增大至 1,波导中占空比的增大确保了 DBR 光栅的高反射率。在 0.3 A 的驱动电流下,该 DBR-LD 的连续光输出功率达到 96 mW,电光转换效率为 14%,在 635.3 nm 处以单纵模发射,边模抑制比 (SMSR) 为 18 dB。

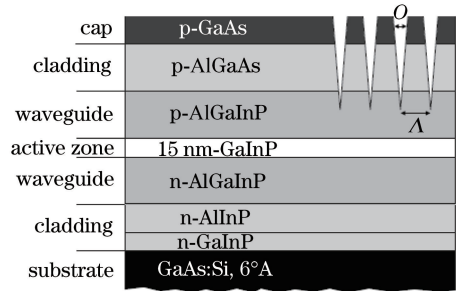


图 4 635 nm DBR-LD 外延结构示意图<sup>[25]</sup>  
Fig. 4 Schematic of epitaxial structure of 635 nm DBR-LD<sup>[25]</sup>

Blume 等<sup>[26]</sup> 研制了具有更高相干长度的 DBR-LD,获得了接近于 He-Ne 激光器的 633 nm 发射波长。器件的连续光输出功率达 24 mW 以上, SMSR 大于 25 dB,线宽小于 1 MHz。同时,Feise 等<sup>[27]</sup> 通过优化器件的外延结构,进一步将器件的光谱线宽减小至 0.4~0.5 MHz,并获得了大于 10 mW 的输出功率和 633 nm 的发射波长。

由(1)式可知,DBR 光栅的周期与光栅阶数成正比,高阶 DBR 光栅的周期较大,极大地降低了其

工艺复杂度。但是,对 DBR 光栅而言,在占空比、刻蚀深度、光栅长度和光栅材料等条件一致的情况下,光栅反射率随着光栅阶数的增大而减小,低阶 DBR 光栅可以获得更好的器件性能。

Paschke 等<sup>[28]</sup>通过电子束光刻和反应离子刻蚀技术,分别制作了 DBR 光栅周期为 528 nm 和 529 nm 的 DBR-LD,这 2 个 DBR-LD 的 DBR 光栅区长度均为 1 mm,光栅阶数为 3 阶。这 2 个 DBR-LD 的激射波长分别为 1174.7 nm 和 1174.9 nm,表明激射波长随着光栅周期的改变发生漂移,这对光栅的制作工艺精度提出了一定要求。这 2 个器件的输出功率都大于 150 mW,且均具有单纵模发射特性,SMSR 大于 30 dB。

Virtanen 等<sup>[29]</sup>采用  $\text{In}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}_{0.005}\text{As}_{0.995}$  作为量子阱材料实现了功率达 500 mW、线宽小于 250 kHz 的 DBR-LD,器件激射波长为 1180 nm,可用于非线性频率转换等领域;其反射光谱宽度相对狭窄,且反射峰对应的波长与脊型波导有源区增益峰值对应的波长保持一致。DBR 激光器的三维结构示意图如图 5 所示。设计后的 3 阶 DBR 光栅长为 2 mm、占空比为 0.5,具有梯形齿结构,并通过纳米压印光刻技术和电感耦合离子体刻蚀技术制作出形貌良好的表面光栅。器件在 0.5 W 的高输出功率下寿命可达 2000 h 以上<sup>[30]</sup>。

为了使光栅在所需波长处获得足够的反射率,光栅需刻蚀至波导区附近,这对 DBR 光栅的刻蚀技术提出了较高的要求。为了简化光栅的深刻蚀工艺,多阶电子束光刻光限制光栅应运而生。Paoletti 等<sup>[31]</sup>利用多阶电子束光刻技术研制了 DBR 高功率

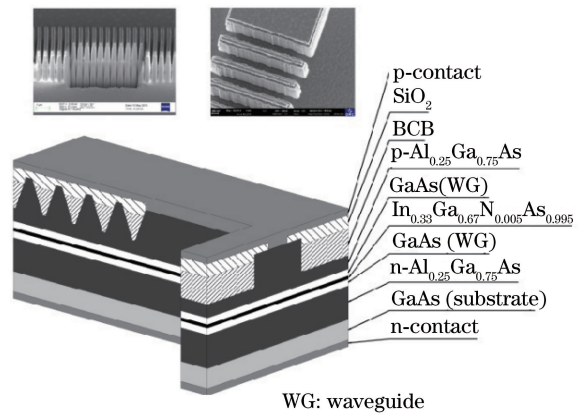


图 5 DBR 激光器的三维结构示意图<sup>[29]</sup>

Fig. 5 3D structural diagram of DBR laser<sup>[29]</sup>

半导体激光器,激射波长为 920 nm。可提供高反射和光学限制的 DBR 光栅如图 6 所示。可以看出,光栅侧面部分的占空比较小、光栅阶数较高,这部分区域的有效折射率实际上小于中心区域的有效折射率;这种结构的光栅可以实现光学侧向约束,既可以提供高反射率,又可以提供必要的光学限制。该激光器工作在 920 nm 波长处,发射功率高达 10 W,光谱线宽为 0.5 nm,转换效率高达 90%。

具有低阶光栅的 DBR-LD 需要借助电子束光刻、全息光刻、纳米压印等技术制作所需的光栅结构,这些工艺相对复杂,成本较高;而具有刻槽结构的半导体激光器同样可以获得单模激光输出。尽管与低阶 DBR 光栅相比,刻槽结构所能提供的反射率较小,但是其较大的结构尺寸显著地降低了曝光刻蚀工艺的难度。与此同时,通过增大刻槽深度,优化刻槽位置及数量,刻槽结构可以为半导体激光器提供必要的反射率,并获得高 SMSR 的激光器。

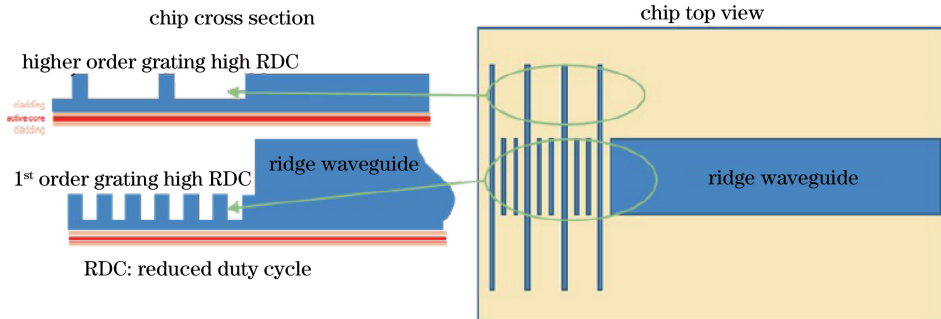
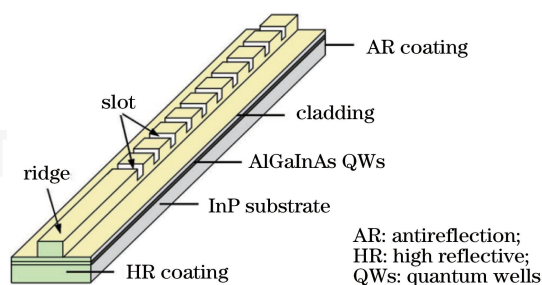
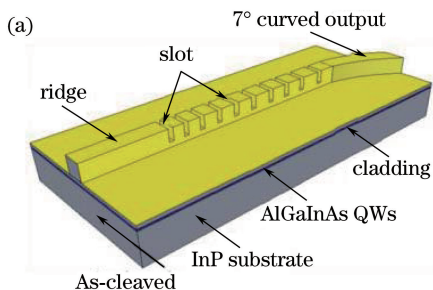
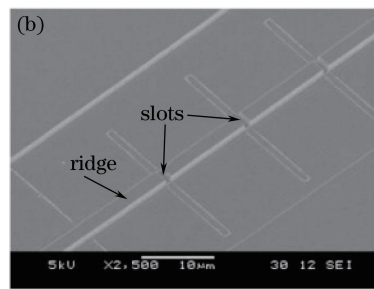


图 6 可提供高反射和光学限制的 DBR 光栅<sup>[31]</sup>

Fig. 6 DBR grating used for providing both high-reflection and optical confinement<sup>[31]</sup>

Lu 等<sup>[32]</sup>提出了一种刻槽单模半导体激光器。该激光器的有源层采用五量子阱结构,输出激光波长在 1545 nm 附近。刻槽单模激光器的三维结构示意图如图 7 所示。可以看出,激光器一侧有多个

均匀分布的刻槽结构作为有源 DBR。刻槽结构的狭缝宽度为 1.1  $\mu\text{m}$ ,狭缝深度为 1.35  $\mu\text{m}$ ,共 24 对,使其成为一个 37 阶表面 DBR 光栅。刻槽结构是通过标准光刻的方法刻蚀获得,成本优势明显。这一

图7 刻槽单模激光器的三维结构示意图<sup>[32]</sup>Fig. 7 3D structural diagram of grooved single-mode laser<sup>[32]</sup>图8 弯曲脊波导刻槽激光器<sup>[33]</sup>。(a)三维结构示意图;(b)刻蚀槽的电子显微镜图像Fig. 8 Ridge-curved waveguide grooved laser<sup>[33]</sup>. (a) 3D structural diagram; (b) SEM image of etched groove

利用 DBR 光栅既可以实现窄线宽激光,也可以实现激光器的波长稳定。这种具有窄线宽、波长稳定的半导体激光器被广泛应用于工业加工领域,是直接用于工业加工的光纤激光器的抽运源。Fricke 等<sup>[34]</sup>提出了基于 GaAs 基的 980 nm DBR-LD,这种波长稳定的激光器可以作为光纤激光器的抽运源。器件采用 6 阶表面 DBR 光栅来实现波长的稳定,获得了 14.3 W 的输出功率、50% 的转换效率和  $0.074 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$  的波长温度漂移系数。Paoletti 等<sup>[31]</sup>研究表明,当偏差电流为 2~14 A 时,F-P 腔激光器的波长偏移大于 10 nm,而 DBR 激光器的波长偏移仅约 2 nm。

目前,窄线宽 DBR-LD 的研究侧重于 DBR 光栅参数的设计及光栅制作的工艺精度。随着光栅光刻技术水平的稳步提升,多种新的光刻技术开始涌现,如全息光刻技术、纳米压印技术、电子束直写技术、表面等离子体加强光刻技术等,这些高精度的光栅制造技术极大地推动了 DBR-LD 的发展进程。早期,为了使光栅获得较高的反射特性,大多采用低阶光栅,其工艺难度较大。随着高阶光栅在器件中的逐步应用,这种高阶光栅可以实现良好的反射特性,同时在制作工艺上也相对容易,其中具有更高阶的光栅可以采用标准光刻,极大地降低了光栅的刻蚀难度。未来为了使窄线宽 DBR-LD 具有更高的窄谱特性,高性能的光栅必不可少。然而,常用的电

刻槽单模半导体激光器具有 13 mA 的阈值电流,可提供高达 47 dB 的 SMSR,转换效率约 90%。

Abdullaev 等<sup>[33]</sup>基于刻槽结构研制了弯曲脊波导单模激光器,其结构如图 8 所示。这种结构的激光器易于与光放大器等器件集成。刻槽深度为  $1.35 \mu\text{m}$ ,周期为  $8.96 \mu\text{m}$ ,刻槽宽度为  $1.1 \mu\text{m}$ 。激光器保持单模稳定的工作,SMSR 达到 48 dB。在室温下,激光器的光谱线宽为 720 kHz,并且在  $10 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  时线宽约为 1 MHz。

子束光刻、全息光刻等,因精度、成本、技术水平限制等不能被直接用于工业化批量生产。因此,提升光刻与刻蚀工艺水平,同时探索具有更高精确度、更好均匀性且低成本、高效率的光栅制备技术,是实现 DBR-LD 器件稳定、高效工作的关键。

### 3.2 双波长 DBR-LD

双波长 DBR-LD 在非线形差频、拉曼光谱测试、光载微波等领域中具有潜在应用,近年来成为了研究热点。目前,可以通过共振耦合腔、双谐振腔以及 Y 分支双波导等结构实现 DBR-LD 双波长激光的激励。

共振耦合腔是基于 F-P 谐振条件和布拉格反射条件来工作的,其工作原理如图 9 所示<sup>[35]</sup>。通过合理地设计 DBR 光栅结构,可实现 2 个波长激光的激励。与波长稳定窄线宽 DBR-LD 相同,共振耦合腔 DBR-LD 也是通过 DBR 光栅作为反射镜来实现模式选择。不同之处在于,波长稳定窄线宽 DBR-LD 为了获得尽可能窄的光谱宽度,实现单模激励,需要 DBR 光栅具有较窄的反射谱宽度;而在共振耦合腔 DBR-LD 中,为了实现双波长的激励,DBR 光栅的反射谱宽度需要覆盖 2 个经过谐振选模后的激励波长。

Chen 等<sup>[35]</sup>基于共振耦合腔的原理研制了双波长 DBR-LD。双波长 DBR-LD 的结构图如图 10 所示。可以看出,器件由 DBR 光栅、无源相位和有源增益 3 部分组成。激光器有源层采用多量子阱结

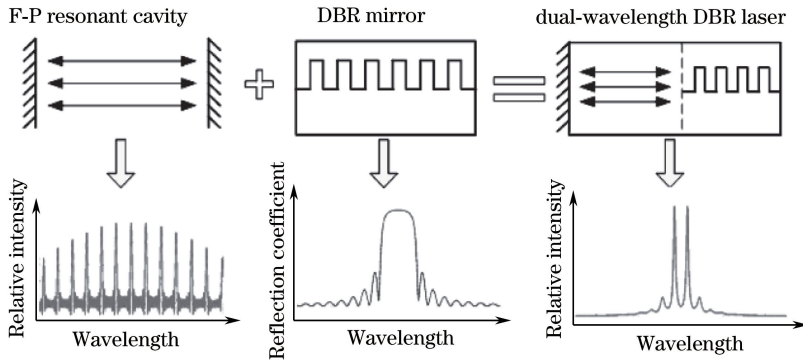


图 9 共振耦合腔工作原理图<sup>[35]</sup>

Fig. 9 Working principle of resonant coupling cavity<sup>[35]</sup>

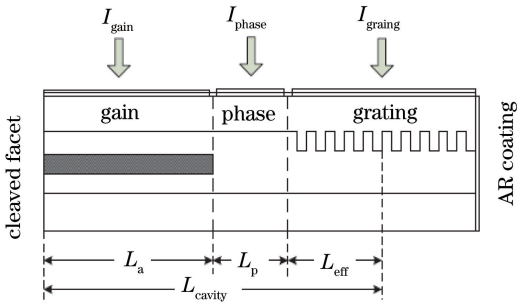


图 10 双波长 DBR-LD 的结构图<sup>[35]</sup>

Fig. 10 Structural diagram of dual-wavelength DBR-LD<sup>[35]</sup>

构,在器件的制造过程中使用量子阱混杂技术对除有源增益以外的区域进行处理,使其他区域的发光峰值实现从 1547.5 nm 到 1445 nm 的蓝移;通过全息曝光和反应离子刻蚀形成 DBR 光栅。室温下,当

有源增益部分和 DBR 光栅部分的电流  $I$  分别为 100 mA 和 18.1 mA 时,器件在 1534 nm 处实现了双波长激光,模式间距为 0.596 nm,2 个波长的峰值功率差为 0.22 dB·m。

太赫兹技术在材料检测、医学诊断和安全检查等领域中具有广阔的应用前景。贾鹏等<sup>[36]</sup>应太赫兹波产生的需要提出了双波长高阶光栅 DBR-LD。对高阶 DBR 光栅进行了优化设计,得到反射率相近的双波长反射光谱,并采用标准光刻制备一组周期为 9.5  $\mu\text{m}$ ,槽宽度为 1.36  $\mu\text{m}$  的光栅结构。双波长高阶 DBR-LD 器件结构如图 11 所示。该激光器实现了波长间隔大于 0.58 nm 的双波长激光,短波长 SMSR 大于 35 dB,长波长 SMSR 为 39 dB,光谱线宽均为 0.04 nm,可基于光混频产生太赫兹波。

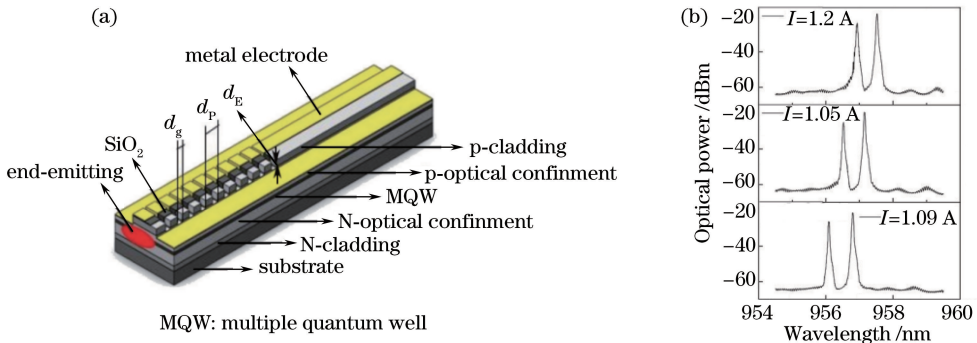


图 11 双波长高阶 DBR-LD<sup>[36]</sup>。(a)结构图;(b)不同注入电流下的光谱图

Fig. 11 Dual-wavelength high-order DBR-LD<sup>[36]</sup>. (a) Structural diagram; (b) spectra at different injection currents

在同一器件上采用双谐振腔结构是实现双波长激光激光的有效途径。Yu 等<sup>[37]</sup>提出了具有两种腔模式的双波长 DBR-LD。双模 DBR-LD 的结构图如图 12 所示。可以看出,器件包括增益 1 部分、相位部分、DBR 光栅部分和增益 2 部分。增益 2 部分作为反馈腔,提供光学反馈;通过调控注入增益 2 部分的电流可以获得所需的反馈强度。当增益 1 部分

的电流大于阈值时,器件工作在单模状态,通过调整增益 2 部分的电流可以获得双模激光。两种模式之间的强度差小于 1 dB,当调节注入 DBR 光栅部分的电流时,双模式的波长可以同步调谐,调谐范围大于 3 nm,这将使全光通信网络中的时钟恢复更加实用。

通过共振耦合腔 DBR-LD 实现双波长激光,具有结构简单、制作方便的优点;采用双谐振腔结构的

双波长激光器具有更好的模式特性;双波长半导体激光也可以通过 Y 分支双波导结构实现,这种结构具有 2 个独立的激光腔,腔体通过 Y 分支耦合器连接。与双 DBR 脊波导阵列相比,Y 分支双波导 DBR-LD 可以在器件前端面上同一位置实现双波长激光的输出,具有输出稳定的特点。

Maiwald 等<sup>[38]</sup>成功研制了 671 nm 双波长单片 Y 分支 DBR 激光器。Y 分支双波长激光器结构图如图 13 所示。2 个 DBR 采用 10 阶表面光栅,器件同时发射波长约为 670.5 nm 和 671.0 nm 的激光,并采用 i 线步进光刻对光栅进行制作,两激光腔的输出功率可达 110 mW。

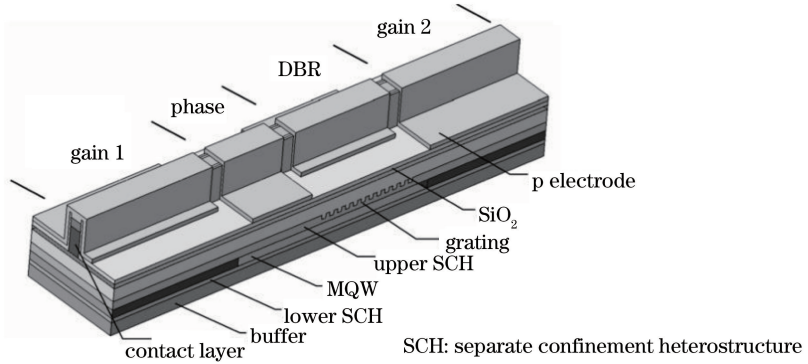


图 12 双模 DBR-LD 的结构图<sup>[37]</sup>

Fig. 12 Structural diagram of dual-mode DBR-LD<sup>[37]</sup>

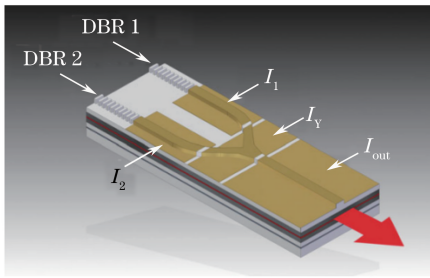


图 13 Y 分支双波长激光器结构图<sup>[38]</sup>

Fig. 13 Structural diagram of Y-branched dual-wavelength laser<sup>[38]</sup>

品安全控制、医疗诊断和有毒成分现场检测等领域。Maiwald 等<sup>[39]</sup>针对 SERDS 研制了发射波长为 785 nm 的双波长 Y 分支 DBR-LD。器件的光输出功率均达到了 140 mW,双发射波长分别为 784.50 nm 和 785.12 nm;装置提供单模操作,光谱宽度约为 30 pm。Sumpf 等<sup>[40]</sup>提出了单臂的输出功率高达 215 mW 的 785 nm Y 分支脊波导激光器,实现了单片线宽窄至 20 pm、SMSR 大于 50 dB 的双波长激光激射,双波长恒定间距为 0.65 nm,使得这些器件非常适合拉曼实验和 SERDS 系统。

双波长激光可用于移频激发差分拉曼光谱 (SERDS) 系统,并使拉曼光谱技术更好地应用于食

同时,Sumpf 等<sup>[41]</sup>对比研究了双 DBR-LD 微型阵列和 Y 分支 DBR-LD,其结构如图 14 所示。2 种结构器件的输出功率均可达 215 mW,实现 785 nm

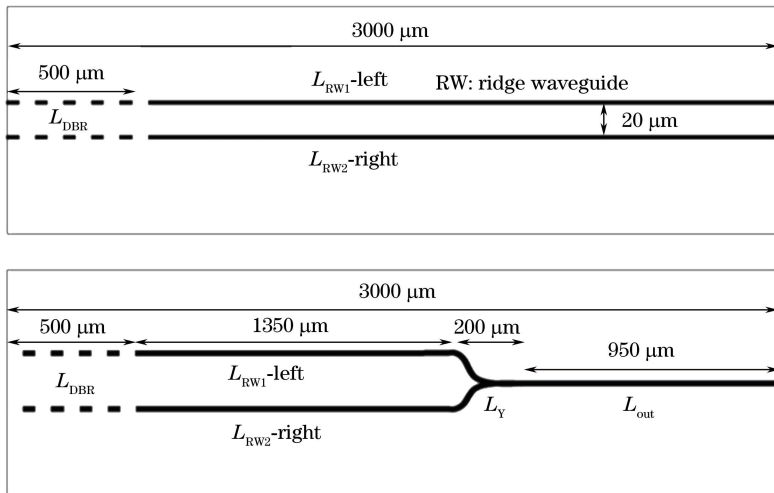


图 14 2 种不同类型的双波长二极管激光器<sup>[41]</sup>。(a)具有 2 个 DBR-RW-LD 的微型阵列;(b) Y 分支 DBR 激光器

Fig. 14 Two different types of dual-wavelength diode lasers<sup>[41]</sup>. (a) Two DBR-RW-LD mini-array; (b) Y-branched DBR laser

的双波长激光。Y分支部分的附加空间滤波效应使得Y分支结构的器件单模特性优于微型阵列结构。Y分支DBR-LD的光谱发射宽度较窄,即使在高功率下也可以保持0.15 nm的窄线宽。另外,由于Y分支激光器的2个不同波长激光在同一位置输出,因此,该激光器更适用于具有不同组成成分样品的研究。

利用电阻加热器加热DBR光栅部分,可以在调谐器件输出激光波长的同时,扩展双波长的光谱间隔。这样的半导体激光器件可以调整拉曼测量的激发波长,从而选择最适用于SERDS的光谱间隔。Sumpf等<sup>[42]</sup>提出了单片双波长Y分支DBR-LD。通过在一侧DBR光栅上使用电阻加热器调整双波长激光的光谱间隔,实现覆盖范围为高达2.0 nm的光谱。

随着半导体激光技术的快速发展,双波长及多波长半导体激光器成为了热门的研究课题。双波长激光器由早期通过2个DBR-LD微型阵列实现双波长激光,逐渐发展为可以在同一器件、同一位置实现双波长激光发射。采用共振耦合腔结构具有结构简单、制作方便等优点,但双波长激光器件性能受光栅制作精度影响较大;采用Y分支双波导的结构虽然结构复杂、制作相对困难,但其具有输出模式特性稳定的特点,同时利用在单侧DBR光栅使用电阻加热器的方法可以实现双波长间隔的调谐。因此,具有良好模式特性,且输出稳定的双波长半导体激光器将是非线性频率转换、光载微波等领域的重要光源,这种具有双波长间距可调的激光器在拉曼光谱测试领域也具有重要的意义。

### 3.3 波长可调谐DBR-LD

波长可调谐激光器主要应用于波分复用系统、光通信系统以及光谱学等领域,而波长可调谐半导体激光器是全光网络的关键器件之一。DBR-LD是目前应用较为广泛的可调谐激光器,具有激光器波长选择更加精确,调节速度快等特点。

典型的波长可调谐DBR-LD采用两段式结构,即增益区和DBR光栅区。在激光器工作时,通过改变光栅区的注入电流或温度可以调控光栅材料的载流子浓度,进而改变光栅的有效折射率,实现DBR-LD发射波长的调谐。

波长可调谐DBR半导体激光器的波长调谐范围与光栅材料具有直接的关系。为了避免在高注入电流时无源部分产生的光辐射影响激光器的输出特性,光栅部分的光辐射波长与器件激光波长需要相

距至少10 nm。但由于DBR光栅的反射光谱依赖于有效折射率,因此,增益区材料和DBR光栅区材料的带隙差异不可太大<sup>[43]</sup>。Yu等<sup>[44]</sup>研制了一种宽调谐范围、高调制带宽两段式DBR-LD,其结构如图15所示。器件工作中心波长为1530 nm。在有源区与DBR光栅之间采用InGaAsP材料,激光器获得了13.88 nm的波长调谐范围,连续信道为19个。在室温下,激光器在连续10个信道内获得了大于13 GHz的均匀调制带宽。

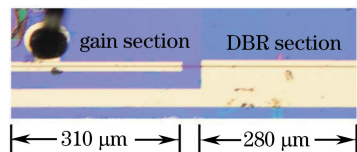


图15 可调谐DBR-LD结构图<sup>[44]</sup>

Fig. 15 Structural diagram of tunable DBR-LD<sup>[44]</sup>

影响波长可调谐DBR-LD调谐性能的一个关键因素是增益区和DBR光栅区之间的对接角。对接接口的大反射可能导致波长随着DBR电流产生不规则漂移。为了获得较小的对接接口反射率,同时令激光在增益区和DBR光栅区之间保持良好的传输,需要优化对接角度。Han等<sup>[45]</sup>设计了V型对接接口的波长可调谐DBR-LD。增益区和DBR光栅区对接截面如图16所示。这种V型对接接口可以避免波长调谐过程中的不规则模式跳变。器件采用多量子阱结构作为有源区,并通过全息光刻和干法刻蚀制作DBR光栅。通过调节DBR光栅部分的注入电流,激光器获得了13.8 nm的波长调谐范围。与此同时,通过调节DBR光栅的温度,可以进一步将波长调谐范围扩大到17.6 nm,调谐范围内覆盖有间距为0.8 nm的23个通道,单个通道的SMSR大于35 dB。

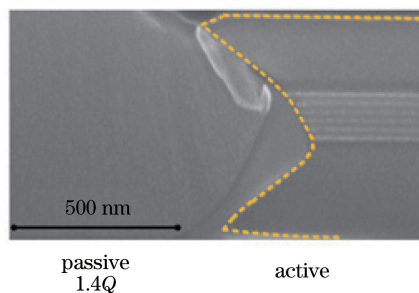


图16 增益区和DBR光栅区对接截面<sup>[45]</sup>

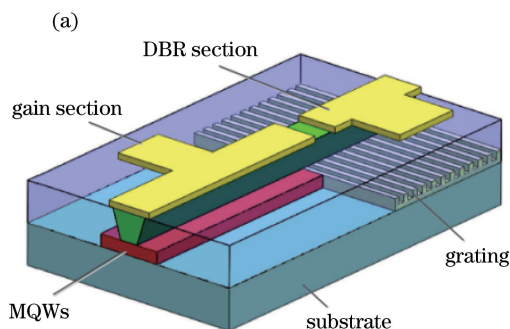
Fig. 16 Butt-joint interface between gain section and DBR grating section<sup>[45]</sup>

Yu等<sup>[46]</sup>研制了一种自注入式DBR可调窄线宽激光器。该激光器波长调谐范围为13 nm,获得



18 个信道光谱的输出, 单个信道的 SMSR 大于 38 dB, 谱线线宽小于 10 kHz。

在波长可调谐 DBR-LD 的增益部分和 DBR 部分之间制作电气隔离, 可以有效地防止二者之间的电流互扰。通过选择性刻蚀隔离区域中的 p 型掺杂材料, 可以实现超过 2 k $\Omega$  的隔离电阻。与 He<sup>+</sup> 离子注入制作电隔离相比, 这种刻蚀方法使可调谐激



光器的制造工艺简化, 降低了制造成本。Zhou 等<sup>[47]</sup>采用电隔离的方法制作了直接调制波长可调谐 DBR-LD。两段式 DBR-LD 如图 17 所示。当 DBR 光栅电流从 0 mA 增大到 60 mA 时, 激光器的工作波长从 1601 nm 蓝移至 1589 nm, 并可以获得 13 个信道的光谱, 所有波长信道的 SMSR 均大于 40 dB。

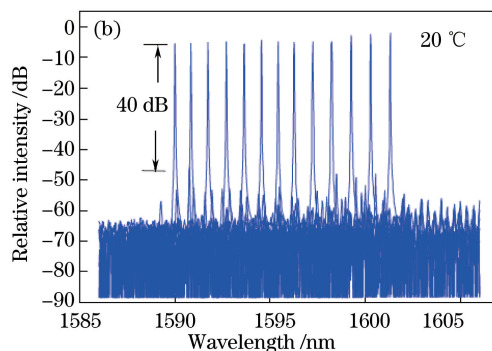


图 17 两段式 DBR-LD<sup>[47]</sup>。(a)原理图;(b)只调谐 DBR 电流时测量得到的 13 通道波长的光谱

Fig. 17 Two-stage DBR-LD<sup>[47]</sup>. (a) Schematic; (b) spectrum of 13-channel wavelength measured when only DBR current is tuned

由于两段式 DBR-LD 具有无法连续调谐输出激光波长的缺陷, 因此在器件中引入相位区, 可以调谐纵模模谱, 实现激光器的连续调谐。Liu 等<sup>[48]</sup>研制了 3 段式结构的波长可调谐 DBR-LD, 工作波长为 1060 nm。该激光器在增益区和 DBR 光栅之间增加了相位区域, 在借助 DBR 光栅区工作温度调谐激光器工作波长时, 可以通过改变相位区域的电流对工作波长进行微调, 实现激光器工作波长的连续可调谐。激光器在 1.25 A 连续电流的驱动下, 获得了高达 686 mW 单模输出功率, 光谱线宽小于 0.15 nm, 温度漂移系数为 0.076 nm $\cdot$ °C<sup>-1</sup>。

波长可调谐 DBR-LD 具有结构简单、制作工艺难度较小等优点, 但是其最大调谐范围为十几纳米。近年来, 取样光栅 (SG) 具有独特的反射谱特性而被人们关注, SG 有多个反射峰, 可以提供梳状的反射光谱, 且各反射峰间隔稳定、单一反射峰线宽窄。SG 是对均匀光栅按照一定的规律在空间上进行采样得到的。SG 的结构示意图如图 18 所示, 其中  $\Delta_A$  为 SG 的取样周期;  $\Delta_B$  为取样长度; 取样长度与取样周期的比定义为采样率, 即  $R = \Delta_B / \Delta_A$ 。根据 SG 的反射谱特性, 可将其应用于 DBR-LD 中, 制成多波长可调谐激光器 (SG-DBR-LD)。SG-DBR-LD 具有几十纳米的波长调谐范围<sup>[49]</sup>, 在密集波分复用系统中有广阔的应用前景。通过对 SG 的结构进行改

进, 超结构光栅 DBR (SSG-DBR) 激光器的调谐范围能达到上百纳米<sup>[50]</sup>。

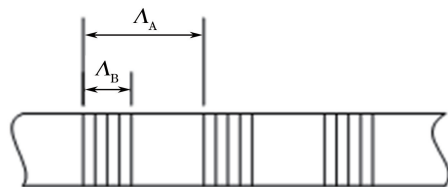


图 18 SG 的结构分布图

Fig. 18 Structural distribution of SG

随着宽调谐的 SG-DBR-LD 研制成功, 具有梳状滤波功能的 SG 也随之诞生<sup>[51]</sup>。Lee 等<sup>[52]</sup>将 SG 应用到半导体激光器中发现, 激光器可以在超过 4 GHz 的频率上进行调制, 且动态的 SMSR 仍大于 40 dB。Simsarian 等<sup>[53]</sup>在小于 5 ns 的时间内实现了 64 通道的 SG-DBR-LD 的所有通道组合之间的快速波长切换。激光器设计为具有低调谐电流和有效的热量提取, 减少了寄生热效应。Tawfieq 等<sup>[54]</sup>提出了 976 nm 宽带可调谐 SG-DBR-LD。该激光器获得了最小为 17 nm 的波长调谐范围, 在整个调谐范围内的阈值电流变化仅为 2.5 mA, 并且可以在不调整相位区的情况下实现单模工作。德国 FEH (Ferdinand-Braun-Institut) 研究所的 Brox 等<sup>[55]</sup>提出了在 970 nm 附近发射的单孔宽调谐半导体激光器。采用 SG-DBR 光栅作为波长选择反射镜, 通过热诱导

波长控制实现了在 970 nm 附近的 20.7 nm 准连续调谐,纵模间距为 2.3 nm,其 SMSR 大于 40 dB。当工作电流为 180 mA 时,激光器输出功率大于 30 mW。

普通的 SG 不能提供足够多的反射峰和平坦的反射谱包络。Ishii 等<sup>[56]</sup>设计了一种超结构光栅(SSG),用于改善 SG-DBR-LD 中 SG 反射谱性能,并实现了具有 68%~98% 高反射性和强烈波长选择性的多周期峰。虽然 SSG 可以提供均匀的反射谱包络,但是大的载流子吸收可能导致激光器输出功率降低。Gotoda 等<sup>[57]</sup>设计了一种带有前 SG-DBR 和后 SSG-DBR 的新型波长可调谐半导体激光器,该激光器在激光波长和高输出功率方面具有卓越的可控性。器件实现了 30 nm 的调谐范围,每个波长通道的光输出功率均匀性良好,所有波长的 SMSR 均大于 40 dB。Guo 等<sup>[58]</sup>将 SSG 应用到了量子级联半导体激光器中,激光发射波长从 4.58  $\mu\text{m}$  调谐到 4.77  $\mu\text{m}$ ,且具有 30 nm 的超模间距。

Chen 等<sup>[59]</sup>提出了线性结构 SG 的宽带可调谐半导体激光器。线性结构的 SG 如图 19 所示,其取样周期( $P$ )保持一致,取样的各光栅周期( $\Lambda_1$ 、 $\Lambda_2$ 、 $\Lambda_3$ 、 $\dots$ )呈线性变化,这种结构可以实现宽波长的覆盖范围。激光器包括 4 个部分:前后 2 个反射峰间距分别为 3.8 nm 和 4.2 nm 的 SG 区、1 个有源区和 1 个相位区。通过调谐前后 2 个 SG 区的注入电流,激光器获得了从 1530 nm 到 1570 nm 的波长调谐范围,同时每个纵向模式的中心保持高 SMSR。

表 1 国内外可调谐 DBR-LD 的研究成果

Table 1 Research results of tunable DBR-LD at home and abroad

Years	Unit	Laser characteristics	Tuning method	Tuning range /nm	Tuning speed
2012 <sup>[48]</sup>	Corning Incorporated	1060 nm	current injection in grating region and phase region	—	9 nm·W <sup>-1</sup>
2014 <sup>[45]</sup>	Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences	1530 nm	combining current injection and thermal tuning in grating region	17.6	0.086 nm·mA <sup>-1</sup> 0.076 nm·°C <sup>-1</sup>
2015 <sup>[59]</sup>	Nanjing University	1551.8 nm	current injection into SG-DBR grating region	40	—
2016 <sup>[58]</sup>	National Taiwan University	4.7 $\mu\text{m}$	current injection into rear SG-DBR grating region	190	—
2017 <sup>[47]</sup>	Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences	1450 nm	current tuning for DBR grating regions	12	0.2 nm·mA <sup>-1</sup>
2017 <sup>[55]</sup>	German FBH Institute	970 nm	current tuning of rear SG-DBR grating region	20.7	—

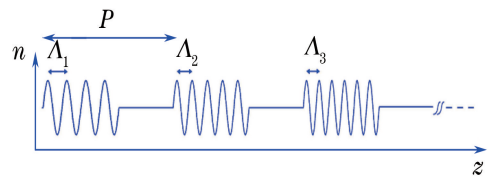


图 19 具有线性结构的 SG<sup>[59]</sup>

Fig. 19 SG with linear structure<sup>[59]</sup>

波分复用系统、光通信系统的不断发展引起了人们对可调谐半导体激光器的关注,而可调谐 DBR-LD 具有调谐速度快、波长选择精确等特点,在可调谐半导体激光器中占领重要地位。传统的可调谐 DBR-LD 是两段式结构,通过在 DBR 光栅区域注入电流,改变光栅区的有效折射率,从而实现波长的调谐。但为了使激光器连续调谐更加精确,通常在光栅区和增益区之间引入相位区,通过在相位区注入电流可以实现波长的微调。随着光栅区域注入电流的增大,材料折射率变化会逐渐饱和,因而电流调谐时 DBR-LD 的调谐范围被限制在 10 nm 左右,利用光栅区电流调谐和热调谐相结合的方法波长调谐范围可达 20 nm 以上。为了获得较大的波长调谐范围,在 DBR-LD 上增设了非均匀光栅结构,可以通过较小的折射率变化获得较大的调谐范围,典型的有 SG-DBR、SSG-DBR 等。国内外可调谐 DBR-LD 的研究成果见表 1。从表 1 可以看出,采用新型光栅结构的可调谐 DBR-LD 在波长调谐范围方面具有较大优势。

### 3.4 DBR 锥形 LD

将 DBR 光栅应用于锥形半导体激光器中,使 DBR 光栅置于脊波导后方,可以为锥形放大区提供单模种子光,实现激光器高输出功率、窄线宽的激光特性。这种 DBR 锥形半导体激光器被广泛应用于激光医疗、自由空间光通信、直接材料加工等领域。

Aho 等<sup>[60]</sup>研究表明, DBR-LD 和 DBR 锥形 LD 室温下的输出功率分别为 655 mW 和 4.04 W,锥形结构可以有效提升器件的输出功率。室温下, DBR-LD 输出激光的线宽为 50 pm, DBR 锥形 LD 输出激光的线宽为 270 pm。在腔面镀制减反射膜的条件下, DBR 锥形 LD 的线宽进一步减小至 70 pm,可与 DBR-LD 相媲美。

用于 DNA 测序、皮肤治疗等医疗领域的 598 nm 激光可通过二次谐波产生。Paschke 等<sup>[61]</sup>研制了近 1180 nm 发射的高辐射单纵模 DBR 锥形 LD,获得了用于二次谐波的抽运源。采用电子束光刻和反应离子刻蚀制作出 1 mm 长的 3 阶表面布拉格光栅。内含 DBR 光栅锥形 LD 结构的功率电压电流  $P-U-I$  曲线如图 20 所示,激光器获得的最大功率为 2.2 W,光谱线宽小于 10 pm。

Müller 等<sup>[62]</sup>研制了发射波长为 1030 nm 的 DBR 锥形 LD。器件由非对称 4.8  $\mu\text{m}$  宽超大型腔内以及三量子阱组成,利用电子束光刻在器件上制作了 3 阶 DBR 光栅并实现了器件波长的稳定。在 15  $^{\circ}\text{C}$  的热沉温度下,激光器获得了 12.7 W 的光输出功率,电光效率大于 40%,在整个功率范围内光谱线宽为

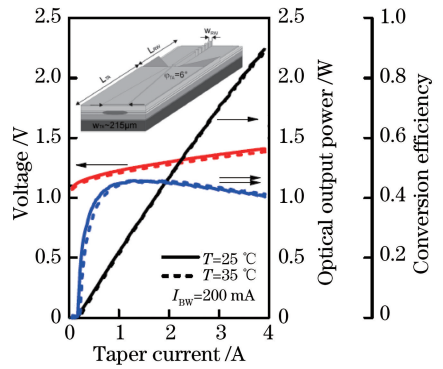


图 20 内含 DBR 光栅锥形 LD 结构的  $P-U-I$  曲线<sup>[61]</sup>

Fig. 20  $P-U-I$  curve when DBR grating tapered LD structure is included<sup>[61]</sup>

0.02 nm。当光输出功率为 10.5 W 时,测量的中心光斑功率为 8.1 W,近衍射极限光束质量因子为 1.1。该激光器适用于对线宽、光束质量以及光输出功率具有一定要求的非线性频率转换等领域。

在前期研究的基础上, Müller 等<sup>[63]</sup>提出了具有更大功率的 1030 nm DBR 锥形 LD。器件利用电子束光刻制作了 7 阶光栅,其最大的衍射效率为 95%。在 15  $^{\circ}\text{C}$  下,获得了光输出功率高达 16 W、光谱线宽为 22 pm 的激光,器件的最大电光效率为 57%。同时, Müller 等<sup>[64]</sup>研制了带有锥形光栅的高效率 DBR 锥形 LD,其横向布局如图 21 所示。器件获得的最高输出功率和电光效率分别为 14 W 和 50%,中心光斑功率最高为 10.5 W,相当于发射光输出功率的 75%。在光输出功率为 14 W 的条件下,光谱线宽为 22 pm。

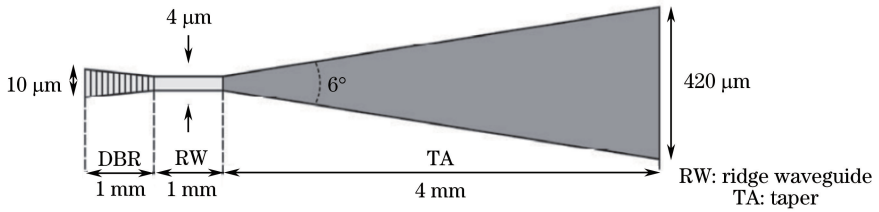


图 21 带有锥形光栅的 DBR 锥形 LD 的横向布局图<sup>[64]</sup>

Fig. 21 Lateral layout of DBR tapered LD with tapered grating<sup>[64]</sup>

Müller 等<sup>[65]</sup>研究了不同光栅布局的 DBR 锥形 LD,并对其波长稳定性和横向空间模式滤波性能进行了比较。DBR 锥形激光器的 3 种横向布局如图 22 所示。这 3 种结构的激光器均获得了约为 1027.5 nm 的工作波长,测量到的光谱线宽小于 22 pm,并且具有高达 15 W 的光输出功率。在这 3 种结构中,布局 1 结构在脊形注入电流密度为 50  $\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$  时,能获得最高的光输出功率;布局 2 结构只有在更高的脊形注入电流密度下才能获得较

高中心光斑功率;布局 3 结构最高可以获得 10.5 W 的中心光斑功率,且随着脊形注入电流密度的变化,中心光斑功率的偏差小于 1 W。对比发现,采用锥形光栅结构的激光器波长稳定性较好,通过布局优化有助于提高 DBR 锥形 LD 的性能。

为了使窄线宽 DBR-LD 具有高光束质量、高功率输出等特性,通常在 DBR-LD 的光输出端加入一个锥形光放大器,其通过增益引导机制对单模种子光进行放大,不会产生高阶模激射,从而达到高功

率、高光束质量的目的。这种兼具高功率和高光束质量的半导体激光器可广泛用作抽运固体激光器和光纤激光器的抽运源,且在工业加工领域有着广阔的应用前景。经过不断的研究和探索,具有锥形结构的光栅被引入到激光器中,锥形光栅对器件内部

高阶侧模抑制效果更好,并且可以提供大于一倍的衍射效率。但是这种具有锥形光栅结构的器件结构较为复杂,制作过程中增加了光栅制备的工艺难度。因此,针对该种器件结构的制备工艺进行优化设计显得尤为重要。

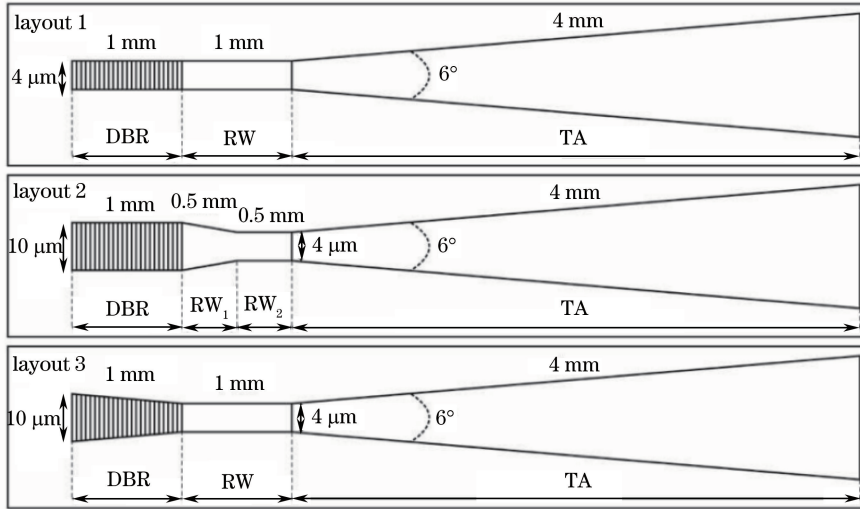


图 22 DBR 锥形激光器的 3 种横向布局<sup>[65]</sup>

Fig. 22 Three lateral layouts of DBR tapered lasers<sup>[65]</sup>

## 4 结束语

目前, DBR 边发射半导体激光器的相关理论、器件设计和工艺等方面的研究已经取得了极大的进展, 各类 DBR-LD 都以其独特的优势在不同领域得到了应用。

对于波长稳定、窄线宽 DBR-LD, 侧重优化 DBR 光栅带来器件性能的提高, 其主要应用是作为高性能激光源以及用来获得倍频激光器, 有望在相干光通信、光谱学等领域中发挥重大作用。双波长半导体激光器除了关注窄线宽激光输出之外, 主要研究双波长激光的产生及其特性的提升, 用于光信号处理及拉曼光谱测试。波长可调谐 DBR-LD 的研究主要是用于波分复用系统、光通信系统等, 随着器件结构的不断优化, 波长调谐范围的扩大有望令波长可调谐 DBR-LD 在密集波分复用系统大显身手。DBR 锥形 LD 具有高功率、窄线宽和高光束质量的特性, 在激光医疗和直接材料加工等方面发挥着举足轻重的作用。

DBR-LD 的发展趋势之一是通过器件结构的设计, 优化器件制作工艺, 提高现有器件的性能, 更好地服务于各种应用领域。从未来全光网络的角度上看, 具有 SG-DBR、SSG-DBR 结构的可调谐激光器具有调谐范围广、调谐精度高等特点, 是最有前途的

可调谐激光器之一。目前各种应用领域普遍要求半导体激光器同时具有高功率、窄线宽及高的光束质量, 这些需求使得 DBR 锥形半导体激光器成为近几年研究的热点。

## 参 考 文 献

- [1] Li M Y, He J. Development situations of high power semiconductor laser for military applications in advanced countries [J]. *Semiconductor Technology*, 2015, 40(5): 321-327.  
李明月, 何君. 国外军用大功率半导体激光器的发展现状 [J]. *半导体技术*, 2015, 40(5): 321-327.
- [2] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19.  
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- [3] Zhang J, Chen Y Y, Qin L, *et al.* Advances in high power high beam quality diode lasers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32): 3719-3728.  
张俊, 陈泳屹, 秦莉, 等. 高功率、高光束质量半导体激光器研究进展 [J]. *科学通报*, 2017, 62(32): 3719-3728.
- [4] Kong Y X, Ke X Z, Yang Y. Bit error rate of laser linewidth in spatial coherent optical communication link [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55

- (4): 040603.  
孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040603.
- [5] Ma J Q. Influence of pump laser line width in frequency conversion [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.  
马俊青. 激光器线宽对频率转换的影响[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] Gao P. Tunable semiconductor lasers for optical communication systems [J]. Wireless Internet Technology, 2014(7): 37.  
高萍. 用于光通信系统的可调谐半导体激光器[J]. 无线互联科技, 2014(7): 37.
- [7] Pachnicke S, Zhu J N, Lawin M, *et al.* Tunable WDM-PON system with centralized wavelength control[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 812-818.
- [8] Wagner C, Eiselt M H, Lawin M, *et al.* Impairment analysis of WDM-PON based on low-cost tunable lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5300-5307.
- [9] Diba A S, Xie F, Gross B, *et al.* Application of a broadly tunable SG-DBR QCL for multi-species trace gas spectroscopy[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27123-27133.
- [10] Sumpf B, Kabitzke J, Fricke J, *et al.* Dual-wavelength diode laser with electrically adjustable wavelength distance at 785 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3694-3697.
- [11] Maiwald M, Fricke J, Ginolas A, *et al.* Monolithic Y-branch dual wavelength DBR diode laser at 671 nm for shifted excitation Raman difference spectroscopy [C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2013: 1.
- [12] Li B, Tu P, Xu Y Y, *et al.* Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 nm band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031404.  
李斌, 涂斌, 徐勇跃, 等. 405 nm 波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031404.
- [13] Xiang J F, Wang L G, Li L, *et al.* Automatic frequency stabilization system of external cavity diode laser based on digital signal processing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0914002.
- 项静峰, 王利国, 李琳, 等. 基于 DSP 技术的外腔半导体激光器自动稳频系统[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0914002.
- [14] Nakamura M, Yariv A, Yen H W, *et al.* Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback [J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(10): 515-516.
- [15] Reinhart F K, Logan R A, Shank C V. GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As injection lasers with distributed Bragg reflectors[J]. Applied Physics Letters, 1975, 27(1): 45-48.
- [16] Shi J X, Qin L, Ye S J, *et al.* A 927 nm distributed feedback laser with surface second-order metal grating [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(10): 1488-1491.  
仕均秀, 秦莉, 叶淑娟, 等. 具有表面二阶金属光栅的 927 nm 分布反馈半导体激光器的研制 [J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(10): 1488-1491.
- [17] Jia B S, Wang H, Li A M, *et al.* Narrow linewidth 1064 nm distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0501006.  
贾宝山, 王皓, 李爱民, 等. 窄线宽 1064 nm 分布布拉格反射半导体激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0501006.
- [18] Du J Y, Li H, Qu Y, *et al.* Design of distributed Bragg grating in 1064 nm narrow linewidth DBR lasers [C] // 2015 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), July 16-18, 2015, Changchun, China. New York: IEEE, 2015: 348-350.
- [19] Hu C, Wang X P, You C, *et al.* Application of high resolution electron beam lithography technology in micro- and nano-fabrication [J]. Electronics & Packaging, 2017, 17(5): 28-32, 36.  
胡超, 王兴平, 尤春, 等. 高精度电子束光刻技术在微纳加工中的应用 [J]. 电子与封装, 2017, 17(5): 28-32, 36.
- [20] Cui K Y, Li Y Z, Feng X, *et al.* Fabrication of high-aspect-ratio double-slot photonic crystal waveguide in InP heterostructure by inductively coupled plasma etching using ultra-low pressure[J]. AIP Advances, 2013, 3(2): 022122.
- [21] Hou L P, Haji M, Dylewicz R, *et al.* Monolithic 45-GHz mode-locked surface-etched DBR laser using quantum-well intermixing technology [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(14): 1039-

- 1041.
- [22] Guziy O, Grzanka S, Leszczyński M, *et al.* Electronic tuning of integrated blue-violet GaN tunable coupled-cavity laser [J]. *AIP Advances*, 2012, 2(3): 032130.
- [23] Buus J, Amann M C, Blumenthal D J. Tunable laser diodes and related optical sources [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2005: 221-245.
- [24] Spießberger S, Schiemangk M, Wicht A, *et al.* DBR laser diodes emitting near 1064 nm with a narrow intrinsic linewidth of 2 kHz [J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(4): 813-818.
- [25] Feise D, John W, Bugge F, *et al.* 96 mW longitudinal single mode red-emitting distributed Bragg reflector ridge waveguide laser with tenth order surface gratings [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1532-1534.
- [26] Blume G, Schiemangk M, Pohl J, *et al.* Narrow linewidth of 633-nm DBR ridge-waveguide lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 550-552.
- [27] Feise D, Blume G, Pohl J, *et al.* Sub-MHz linewidth of 633 nm diode lasers with internal surface DBR gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8640: 86400A.
- [28] Paschke K, Bugge F, Blume G, *et al.* Watt-level continuous-wave diode lasers at 1180 nm with InGaAs quantum wells [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8965: 896509.
- [29] Virtanen H, Aho A T, Viheriälä J, *et al.* Spectral characteristics of narrow-linewidth high-power 1180 nm DBR laser with surface gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 114-117.
- [30] Viheriälä J, Aho A T, Virtanen H, *et al.* 1180 nm GaInNAs quantum well based high power DBR laser diodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 100860K.
- [31] Paoletti R, Codato S, Coriasso C, *et al.* Wavelength stabilized DBR high power diode laser using EBL optical confining grating technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10514: 105140V.
- [32] Lu Q Y, Guo W H, Byrne D, *et al.* Design of slotted single-mode lasers suitable for photonic integration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 787-789.
- [33] Abdullaev A, Lu Q Y, Guo W H, *et al.* Linewidth characterization of integrable slotted single-mode lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2225-2228.
- [34] Fricke J, Bugge F, Ginolas A, *et al.* High-power 980-nm broad-area lasers spectrally stabilized by surface Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(5): 284-286.
- [35] Chen C, Zhao L J, Qiu J F, *et al.* Dual-wavelength distributed Bragg reflector semiconductor laser based on a composite resonant cavity [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(9): 094208.
- [36] Jia P, Liu X L, Chen Y Y, *et al.* Study of dual-wavelength distributed Bragg reflection semiconductor laser with high order Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0802007.
- 贾鹏, 刘晓莉, 陈泳屹, 等. 双波长高阶光栅分布布拉格反射半导体激光器的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802007.
- [37] Yu L Q, Zhao L J, Lu D, *et al.* A novel four-section DBR tunable laser with dual-wavelength lasing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8552: 85520T.
- [38] Maiwald M, Fricke J, Ginolas A, *et al.* Dual-wavelength monolithic Y-branch distributed Bragg reflection diode laser at 671 nm suitable for shifted excitation Raman difference spectroscopy [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(4): L30-L33.
- [39] Maiwald M, Eppich B, Fricke J, *et al.* Dual-wavelength Y-branch distributed Bragg reflector diode laser at 785 nanometers for shifted excitation Raman difference spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2014, 68(8): 838-843.
- [40] Sumpf B, Maiwald M, Klehr A, *et al.* 785-nm dual wavelength DBR diode lasers and MOPA systems with output powers up to 750 mW [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9382: 93821B.
- [41] Sumpf B, Maiwald M, Müller A, *et al.* Comparison of two concepts for dual-wavelength DBR ridge waveguide diode lasers at 785 nm suitable for shifted excitation Raman difference spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(2): 261-269.
- [42] Sumpf B, Kabitzke J, Fricke J, *et al.* 785 nm dual-wavelength Y-branch DBR-RW diode laser with electrically adjustable wavelength distance between 0 nm and 2 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10123: 101230T.
- [43] Kyritsis G, Zakhleniuk N. Self-consistent simulation model and enhancement of wavelength tuning of InGaAsP/InP multisection DBR laser diodes [J].

- IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 1053311.
- [44] Yu L Q, Wang H T, Lu D, *et al.* A widely tunable directly modulated DBR laser with high linearity[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1501308.
- [45] Han L S, Liang S, Zhang C, *et al.* Fabrication of widely tunable ridge waveguide DBR lasers for WDM-PON[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 091402.
- [46] Yu L Q, Lu D, Pan B W, *et al.* Widely tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 50-53.
- [47] Zhou D B, Liang S, Han L S, *et al.* Widely tunable two-section directly modulated DBR lasers for TWDM-PON system [J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(3): 034204.
- [48] Li J, Kuksenkov D V, Liu W, *et al.* Wavelength tunable high-power single-mode 1060-nm DBR lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8277: 82771L.
- [49] Coldren L A. Monolithic tunable diode lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 988-999.
- [50] Ishii H, Tanobe H, Kano F, *et al.* Broad-range wavelength coverage (62.4 nm) with superstructure-grating DBR laser[J]. Electronics Letters, 1996, 32(5): 454-455.
- [51] Jayaraman V, Mathur A, Coldren L A, *et al.* Extended tuning range in sampled grating DBR lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(5): 489-491.
- [52] Lee S L, Tauber D A, Jayaraman V, *et al.* Dynamic responses of widely tunable sampled grating DBR lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1597-1599.
- [53] Simsarian J E, Larson M C, Garrett H E, *et al.* Less than 5-ns wavelength switching with an SG-DBR laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1/2/3/4): 565-567.
- [54] Tawfiq M, Wenzel H, Brox O, *et al.* Concept and numerical simulations of a widely tunable GaAs-based sampled-grating diode laser emitting at 976 nm [J]. IET Optoelectronics, 2017, 11(2): 73-78.
- [55] Brox O, Tawfiq M, Della Casa P, *et al.* Realisation of a widely tunable sampled grating DBR laser emitting around 970 nm [J]. Electronics Letters, 2017, 53(11): 749-750.
- [56] Ishii H, Tohmori Y, Tamamura T, *et al.* Superstructure-grating (SSG) for broadly tunable DBR lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(4): 393-395.
- [57] Gotoda M, Nishimura T, Tokuda Y. Widely tunable SOA-integrated DBR laser with combination of sampled-grating and superstructure grating[C]//19th International Semiconductor Laser Conference, September 21-25, 2004, Matsue-shi, Japan. New York: IEEE, 2004: 147-148.
- [58] Guo D K, Li J Y, Cheng L W, *et al.* Widely tunable monolithic mid-infrared quantum cascade lasers using super-structure grating reflectors [J]. Photonics, 2016, 3(25): 3020025.
- [59] Chen T, Qian Y J, Shi Y C, *et al.* Widely tunable semiconductor laser based on step-chirped sampled Bragg grating[C]//14th International Conference on Optical Communications and Networks, July 3-5, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [60] Aho A T, Viheriälä J, Korpjarvi V M, *et al.* High-power 1180-nm GaInNAs DBR laser diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2023-2026.
- [61] Paschke K, Bugge F, Blume G, *et al.* High-power diode lasers at 1178 nm with high beam quality and narrow spectra [J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 100-102.
- [62] Müller A, Fricke J, Bugge F, *et al.* DBR tapered diode laser at 1030 nm with nearly diffraction-limited narrowband emission and 12.7 W of optical output power [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9796: 97671I.
- [63] Müller A, Zink C, Fricke J, *et al.* 1030 nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10123: 101231B.
- [64] Müller A, Zink C, Ginolas A, *et al.* 10.5 W central lobe output power obtained with an efficient 1030 nm DBR tapered diode laser[C]//2017 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), October 11-12, 2017, Coventry, UK. New York: IEEE, 2017: 61-62.
- [65] Müller A, Zink C, Fricke J, *et al.* Comparison for 1030 nm DBR tapered diode lasers with 10 W central lobe output power and different grating layouts for wavelength stabilization and lateral spatial mode filtering [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10553: 105531G.