

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.02.009

光电器件研究与应用

田琦,韩宇,张瑞罡,等.高速直接调制半导体激光器研究进展[J].光通信研究,2023(2):55-62.

Tian Q, Han Y, Zhang R G, et al. Research Progress on High-speed Directly Modulated Semiconductor Lasers[J]. Study on Optical Communications, 2023(2):55-62.

高速直接调制半导体激光器研究进展

田琦^{a,b}, 韩宇^{a,b}, 张瑞罡^{a,b}, 张敏明^{a,b,c}

(华中科技大学 a. 光学与电子信息学院; b. 下一代互联网接入系统国家工程实验室;

c. 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

摘要:直接调制半导体激光器因其具有高速传输、高可靠和低成本等特点,成为应用在第五代移动通信技术(5G)前传和数据中心中的高性价比光源。高速直接调制半导体激光器性能提升已有许多研究,文章分别从无制冷宽温工作高速半导体激光器研究和超高速半导体激光器方面对高速直接调制半导体激光器的基本理论和发展历程进行了综述,分析各自的优缺点,并介绍了研发团队在这些方面取得的部分进展。

关键词:直接调制半导体激光器;宽温;超高速;分布式反馈激光器;失谐加载;光子光子谐振

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2023)02-0055-08

Research Progress on High-speed Directly Modulated Semiconductor Lasers

TIAN Qi^{a,b}, HAN Yu^{a,b}, ZHANG Rui-gang^{a,b}, ZHANG Min-ming^{a,b,c}

(a. School of Optical and Electronic Information;

b. National Engineering Research Center for Next Generation Internet Access System;

c. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: High speed directly modulated semiconductor laser offers high speed transmission rate with high reliability and low cost, making it a cost-effective light source choice for 5th Generation Mobile Communication Technology (5G) fronthaul and data center applications. There have been many researches on the performance improvement of high-speed directly modulated semiconductor lasers. This paper reviews the development of high-speed semiconductor lasers from the aspects of uncooled wide-temperature operation research and ultra-high-speed bandwidth improvement. We also briefly introduce our work in this area.

Key words: directly modulated semiconductor laser; wide-temperature operation; ultra-high speed; distributed feedback laser; detuning load; photon-photon resonance

0 引言

在过去的几十年里,随着智能手持终端设备、超高清视频电视、大数据存储、云计算和虚拟现实等新业务和新设备的出现,光接入网的研究已从100 Mbit/s容量阶段演进到数百 Gbit/s的容量阶段,第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)前传和数据中心等光纤传输系统在信息通信能力和链路距离方面取得了巨大的进步^[1],半导体激光器是光纤通信系统的重要核心组成部分,为支持高速传输,其在带宽、功耗和无制冷等方面得到了迅猛的发展^[2]。光通信用高速半导体激光器主要有两种:外调制半导体激光器(External Modulation Laser, EML)和直接调

制半导体激光器(Direct Modulation Laser, DML),这两种激光器的应用场景区别主要在传输距离上,EML主要用于传输距离 >10 km的应用场景,DML有好的单模性且低成本,但其也伴随着啁啾,被广泛应用于短程通信(传输距离 ≤ 10 km)^[2-5]。本文主要对应用在5G前传和数据中心(100 m \leq 通信距离 ≤ 10 km)等短程传输光纤通信系统中的半导体激光器进行综述,即高速DML。

本文主要介绍两个方面的研究:第一是DML中分布式反馈半导体(Distributed Feedback Laser, DFB)激光器的相关研究,面对5G前传等应用需求,无制冷宽温高速DFB激光器成为研究的重点,本文将对DFB激光器已有的理论及成果进行回顾;第二是超高速DML,随着对信息接入量需求的提

收稿日期:2022-05-17; 修回日期:2022-06-03; 纸质出版日期:2023-04-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2201500)

作者简介:田琦(1998-),男,山东淄博人。博士,主要研究方向为新型光通信器件。

通信作者:张敏明,教授。E-mail:mmz@hust.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

升,超高速 DML(≥ 50 GHz)逐渐成为研究重点。

1 高速 DML 理论

想要实现用于光传输的 DML,其发光材料需满足两个条件:(1)具有直接的能带结构,以有效地产生激光;(2)允许将带隙能量调整到所需的发射波长。对于 5G 前传和数据中心等需要的波长范围(O 波段),选择的材料是 III-V 半导体磷化铟(InP)和相关的四元化合物 InGaAsP 和 InGaAlAs,因为 InP 的优点是直接带隙材料,通过替换一部分(III)和/或(V)元素,通常在一定范围内可调节任何与 InP 晶格匹配的三元和四元组成,从而调整激光波长^[6]。利用成熟的外延技术可将这种复合物作为晶体层沉积到 InP 衬底晶片上,晶格匹配可保证较高的生长质量。

DML 也需要波导结构来对腔内光场施加横向和纵向的约束,目前最常用的波导结构是脊波导(Ridge Waveguide, RWG)结构和掩埋异质(Buried-heterostructure, BH)波导结构^[3,6-7]。这两种结构的简要示意图如图 1 所示^[6]。对 RWG 结构而言,纵向上是通过有源层(Active layer)的高折射率和包层的低折射率形成折射率波导结构,从而将光场在纵向上限制在有源层内;横向上,通过刻蚀上包层到刻蚀停止层,形成一个宽度大约为 $2\ \mu\text{m}$,深度大约为 $2\ \mu\text{m}$ 的脊,由于空气的折射率低,在横向上等效折射率的低-高-低可以将光场限制在图 1(a)虚线圆圈内。对 BH 波导结构而言,纵向上与 RWG 结构类似,横向上, BH 波导结构通过在有源区周围沉积反向 PN 结(PN junction)来减小有源区体积,有源区的折射率比 InP 的折射率更大,因此横向上形成低-高-低的折射率结构,将光场限制在图 1(b)所示虚线圆圈内。两种结构的区别主要体现在有源区的体积和工艺上, BH 波导结构的有源区体积更小,可能达到的带宽较高,但同时 BH 波导结构需要较为复杂的工艺,需要刻蚀加二次外延生长,还会对有源区进行刻蚀,可能带来可靠性等一系列问题^[3,6]。相对的, RWG 结构只需要简单的刻蚀,无需二次外延,工艺简单且稳定,但其带宽可能会受限。

商用 DML 需要具有良好的单模性。DFB 激光器因其通过刻蚀周期光栅而具有良好的单模性,这一点与常规的法布里-珀罗(Fabry - Pérot Interferometer, FP)激光器不同。目前常用的是均匀光栅和 $\lambda/4$ 相移光栅(λ 为波长,此光栅在激光腔内相

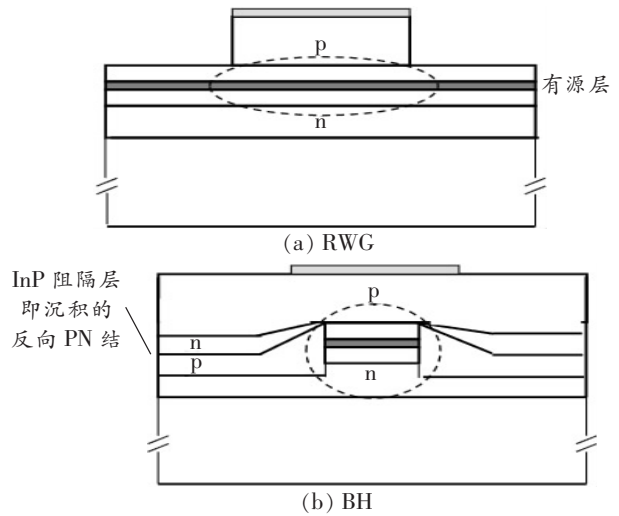


图 1 RWG 结构和 BH 波导结构的示意图^[6]

Figure 1 Schematic diagrams of the RWG structure and the BH waveguide structure

移区可实现两倍相移),均匀光栅若腔两端对称,DFB 激光器会双纵模出射,一般采用一端高反,一端增透的方式提高单模抑制比;更有效的方法是采用 $\lambda/4$ 相移光栅,在总光栅中间引入一段相移区,可大幅提高单模抑制比^[6]。

DML 的高速性能是最重要的性能指标之一,其小信号调制响应表达式为^[6]

$$R(f) = \frac{f_r^4}{(f^2 - f_r^2)^2 + f^2 \Gamma^2 / (2\pi)^2} \cdot \frac{1}{1 + (2\pi R_{ld} C_{ld} f)^2}, \quad (1)$$

式中: $R(f)$ 为 DML 在某个调制频率 f 下的归一化响应,即为此时的平均输出光功率与不加小信号时的平均输出光功率的比值; f_r 为激光器本身的弛豫振荡频率; Γ 为阻尼系数; R_{ld} 和 C_{ld} 分别为激光器寄生电阻和电容。令 $R(f) = 1/2$, 可得到 DFB 激光器的 3 dB 带宽 $f_{3\text{dB}}$, 其可用来衡量 DML 的高速调制能力。显然 $f_{3\text{dB}}$ 与 f_r 、 Γ 、 $R_{ld}C_{ld}$ 均有关系, 每个参数限制的 3 dB 带宽为^[6]

$$\begin{cases} f_{f_r}^{3\text{dB}} \approx 1.55 f_r \\ f_{RC}^{3\text{dB}} = \frac{1}{2\pi R_{ld} C_{ld}} \\ f_{\Gamma}^{3\text{dB}} = \frac{2\sqrt{2} f_r^2}{\Gamma} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $f_{f_r}^{3\text{dB}}$ 、 $f_{RC}^{3\text{dB}}$ 和 $f_{\Gamma}^{3\text{dB}}$ 分别为弛豫振荡频率限制带宽、电学寄生常数限制带宽及阻尼限制带宽。由式(2)可知,提高 f_r 可显著提高 DML 的带宽,在超高速 DML 中,小的电学寄生常数也是优化的重要手段,目前宽温超高速 DML 的优化目标主要还是

达到较高的 f_r , 可表示为^[6]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{v_g \frac{dg}{dN} (1 - \epsilon S) \eta_i \frac{\xi}{eV} (I - I_{th})}, \quad (3)$$

式中: v_g 为激光介质中光的群速度; $\frac{dg}{dN}$ 为激光介质的微分增益, 其中, g 为激光介质增益, N 为激光介质中载流子密度; ϵ 为增益饱和系数; S 为腔内光子密度; η_i 为内量子效率; ξ 为光学限制因子; e 为电子电荷量; V 为有源区体积; I 为激光器的注入电流; I_{th} 为阈值电流。

提高 f_r 有两种重要方法, 一是提高微分增益, 从而提高光学限制因子; 二是减小模体积, 降低激光器的阈值。BH 波导结构的有源区体积小, 因此 BH 波导结构类型的 DML 带宽较高。本文将在第 2 和第 3 节分别介绍无制冷宽温高速 (10 ~ 50 GHz) DFB 激光器及超高速 DML (≥ 50 GHz) 的相关代表性研究工作。

2 无制冷宽温高速 DFB 激光器的研究

业界无制冷宽温高速 DFB 激光器的代表成果如表 1 所示。如第 1 节所述, 提高 DFB 激光器带宽最直接的方法是提高微分增益或减小有源区体积, 相关学者基于此进行了大量的研究。在 20 世纪 90 年代, 基于 InGaAsP 的多量子阱 (Multiple-Quantum-Well, MQW) 有源层结构已被广泛采用, 该结构可提供较大的微分增益, 且 InGaAsP 可以与 InP 晶格匹配, 通过对 MQW 有源层结构进行掺杂和应变等方面的优化, 常温下 DFB 激光器的带宽甚至可达 30 GHz^[8-9], 然而在宽温温度范围内, 特别是高温时, DFB 激光器中非辐射复合的增加和载流子的扩散会使得带宽显著下降^[7,10], 21 世纪之前, DFB 激

光器在 $-40 \sim 85$ °C 下只能支持 10 Gbit/s 的传输^[11-14]。为了进一步提高 DFB 激光器的带宽, 特别是高温下的带宽, 含 Al 的 InGaAlAs 材料逐步替代 InGaAsP 材料, 因为含铝的有源材料对电子的束缚更强, 因此在高温下会有更高的微分增益^[15-17]。得益于 90 年代使用金属有机化学气相沉积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 在高质量 InGaAlAs 晶体生长条件方面的技术突破^[18], DFB 激光器能够在超过 85 °C 的工作条件下进行 10 Gbit/s 传输^[19], 进一步地, DFB 激光器支持 10 Gbit/s 传输的最高工作温度可以扩展到 115 °C (@12.5 Gbit/s)^[20] 和 120 °C (@10 Gbit/s)^[21]。随后, 为进一步提高 DFB 激光器的带宽以应对 5G 前传和数据中心的应用场景, 研究者开始研究合适的结构来减小模体积, 最直接的方法是减小腔长。2009 年, 在 200 和 160 μm 腔长的 RWG 型 DFB 激光器中, 分别获得了 85 和 95 °C 下清晰的 25 Gbit/s 眼图^[22-24], 采用更短的 100 μm 腔长时, RWG 型 DFB 激光器速率在 65 °C 下可以达到 40 Gbit/s^[25-26]。BH 波导结构也可以显著地减小有源区体积, 且因为反向 PN 结良好的电隔离性质, 可得到较低的激光寄生常数: 早在 2008 年, 就出现了 75 °C 下调制速率达 40 Gbit/s 的 DFB 激光器, 此激光器腔长为 150 μm , 采用了 BH 波导结构来减小模体积^[27]。为了将调制带宽拓展到 40 Gbit/s, 采用 100 μm 腔长的 BH 波导型 DFB 激光器可在 85 °C 下得到清晰的 40 Gbit/s 眼图^[28-30], 还有使用 120 μm 腔长的 BH 波导型 DFB 激光器报道, 可演示工作温度高达 80 °C 的 50 Gbit/s 非归零编码 (No Return Zero, NRZ) 信号调制^[31]。

表 1 宽温高速 DFB 激光器的代表成果

Table 1 Representative achievements of wide temperature and high speed DFB lasers

编号	年份	结构特点	性能表现	参考文献编号
1	1999	RWG, InGaAsP 材料, 280 μm 腔长	10.0 Gbit/s@70 °C	[12]
2	2002	RWG, InGaAsP 材料, 300 μm 腔长	10.0 Gbit/s@85 °C	[14]
3	2000	RWG, InGaAlAs 材料	10.0 Gbit/s@85 °C	[19]
4	2003	RWG, InGaAlAs 材料, 200 μm 腔长	12.5 Gbit/s@115 °C	[20]
5	2004	RWG, InGaAlAs 材料, 250 μm 腔长	10.0 Gbit/s@120 °C	[21]
6	2009	RWG, InGaAlAs 材料, 160 μm 腔长	25.0 Gbit/s@95 °C	[22]
7	2009	RWG, InGaAlAs 材料, 200 μm 腔长	25.0 Gbit/s@85 °C	[24]
8	2006	RWG, InGaAlAs 材料, 100 μm 腔长	40.0 Gbit/s@65 °C	[26]
9	2008	BH 波导, InGaAlAs 材料, 150 μm 腔长	40.0 Gbit/s@75 °C	[28]
10	2009	BH 波导, InGaAlAs 材料, 100 μm 腔长	40.0 Gbit/s@85 °C	[29,30]
11	2015	BH 波导, InGaAlAs 材料, 120 μm 腔长	50.0 Gbit/s@85 °C	[31]
12	2022	新型沟中沟 RWG, InGaAlAs 材料	高温下同一注入电流带宽 比常温 RWG 提高 3.7 GHz	[36]

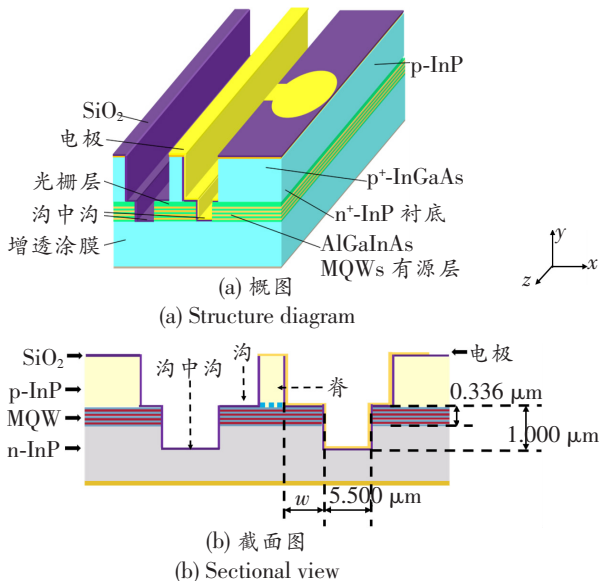
总体而言, BH 波导型 DFB 激光器的高速性能比 RWG 型 DFB 激光器的好, 其具有更高的调制带宽, 阈值电流更低, 然而, BH 波导结构需要对靠近光场区域的有源层刻蚀, 然后二次外延生长, 不仅工艺复杂, 刻蚀过程中引入的缺陷和含铝材料的氧化会降低器件的可靠性^[3,6], 也有报道可以通过清洗截面来降低缺陷对器件可靠性的影响^[32], 然而, 此方法成本高且 BH 波导结构的可靠性仍未得到根本性解决。对 RWG 结构 DFB 激光器而言, 其制作过程只需要简单的刻蚀, 成本低, 可靠性高, 但 RWG 结构的激光器在高温下带宽劣化严重, 高温下带宽会降低 6~10 GHz^[33-35]。

由于高温下的带宽劣化, 常规 RWG 结构可能无法满足 5G 前传等应用场景的需求, 基于此问题, 本文提出了一种新型沟中沟脊波导结构^[36], 其示意图如图 2 所示, 只需在脊波导的基础上, 在脊波导两侧对称地进行简单的刻蚀, 刻穿有源层, 由于刻蚀截面距离光场区域较远, 不会影响器件的可靠性。此结构可显著提高 DFB 激光器在常温及高温下的带宽。另外, 有报道称, 将苯并环丁烯 (Benzocyclobutene, BCB) 盖在 DFB 激光器上也可显著提高

带宽^[37-38], 我们下一步的工作是在沟中沟脊波导激光器上盖 BCB, 预计将会进一步提高激光器带宽。

3 超高速 DML 研究

超高速 DML 的主要相关研究如表 2 所示。如第 1 节所述, DFB 激光器的带宽受到本身弛豫振荡频率的限制, 在第 2 节回顾宽温高速 DFB 激光器发展历程时, 许多学者在提高弛豫振荡频率方面已做了大量工作, 但激光器本身的带宽会被限制在 50 GHz 左右, 如何进一步提高激光器的带宽以面对更高传输速率的需求成为了研究的重点, 目前主要是提高激光器在常温下的带宽。新原理的引入为激光器带宽的提高提供了可能, 最主流的包括失谐加载效应和光子-光子谐振 (Photon-photon Resonance, PPR) 效应。能利用失谐加载效应的 DML 需要在激光器的一侧有分布反馈反射镜 (Distributed Feedback Reflector, DBR), DBR 是在无源波导上刻蚀光栅形成的, 与 DFB 激光器类似, DBR 具有包络型的反射谱, 能将激光器静态时的激射波长设置在 DBR 反射峰值波长的长波长处, 由于激光器中啁啾的存在, 加载高频信号时, 激射波长蓝移, 使得反射率提高, 腔内损耗减小, 半导体激光器在高频下的微分增益提高, 因此弛豫振荡频率提高, 激光器带宽得到显著提高^[39-41]。目前已报导的可以利用失谐加载效应提高带宽的 DML 包括 DBR 激光器和分布反馈 (Distributed Feedback, DR): DBR 激光器是由一个 FP 腔和一个 DBR 构成, FP 腔是有源部分, 提供增益, DBR 部分负责选模。DR 激光器由 DFB 激光器和 DBR 集成在一起形成, DFB 激光器部分是有源的, DBR 部分是无源的。PPR 效应是通过在半导体激光器引入适当反馈, 可在腔内产生边模, 频率与主模相近, 当调制信号的调制频率等于两个模式频率差时, 可共振放大边模, 加快消耗载流子, 光子密度增大, 响应提高, 即在高频引入一个响应峰, 形成“双峰相应”, 扩大调制带宽^[42-43]。PPR 效应可以使 DML 的带宽突破弛豫振荡频率的限制, 是大幅提高 DML 带宽的重要手段, 目前能利用 PPR 效应的 DML 是带有外腔反馈的激光器, 即在 FP 或 DFB 激光器外集成一个外腔, 用来提供延时光反馈。



注: p-InP 为 p 掺杂磷化铟; p⁺-InGaAs 为 p 掺杂铟镓砷;
n⁺-InP 为 n 掺杂磷化铟; AlGaInAs 为铝镓铟砷。

图 2 新型沟中沟脊波导激光器结构示意图^[36]

Figure 2 Schematic diagram of the laser with groove-in-trench ridge waveguide structure

表2 超高速激光器的代表成果

Table 2 Representative achievements of ultra-high-speed lasers

编号	年份	结构特点	性能表现	参考文献编号
1	2007	RWG, 250 μm DFB 激光器+300 μm 无源反馈波导	29 GHz@40 mA	[44]
2	2011	RWG, 150 μm DFB 激光器+200 μm 无源反馈波导	37 GHz@70 mA	[45]
3	2012	BH 波导, 200 μm DFB 激光器+200 μm 无源反馈波导	34 GHz@60 mA	[46]
4	2015	RWG, 220 μm DFB 激光器+330 μm 无源波导(相位调整)+340 μm 有源反馈波导(强度调整)	双峰响应, 带宽>30 GHz	[49]
5	2016	RWG, 375 μm DFB 激光器+220 μm 有源反馈波导	59 GHz	[50]
6	1997	RWG, 200 μm FP 腔+300 μm DBR	31 GHz@130 mA	[53]
7	2005	RWG, 450 μm FP 腔+500 μm DBR+500 μm 无源波导(调整相位)	37 GHz@172 mA	[54]
8	2017	RWG, 50 μm DFB 激光器+200 μm DBR, 同时利用失谐加载效应和 PPR 双峰响应	55 GHz@36.2 mA	[55]
9	2020	BH 波导, 80 μm DFB 激光器+120 μm 无源波导, 无源波导末端 3% 反射率	65 GHz	[57]
10	2020	BH 波导, 80 μm DFB 激光器+120 μm 无源波导, 无源波导末端 3% 反射率	75 GHz@65 mA	[58,59]
11	2021	BH 波导, 同时集成两种不同耦合系数的 DBR, 提高调整自由度	65 GHz	[59]
12	2021	BH 波导, 在 DBR 上设置两个电极 分别加电, 提高调整自由度	65 GHz	[59]
13	2021	BH 波导, 80 μm DFB 激光器+60 μm DBR, 薄膜电阻减小寄生常数	108 GHz@27 mA	[60]

2007年,有学者在DFB激光器后集成了一段无源波导,即在DFB后集成一个无源反馈外腔,提出了无源反馈激光器(Passive Feedback Laser, PFL)的概念,首次明确展示具有PPR谐振峰响应曲线并成功将40 mA下的调制带宽提高到了29 GHz^[44]。此后,PFL的带宽不断提高,通过优化设计可使得带宽分别达到37 GHz@70 mA^[45]和34 GHz@60 mA^[46]。除了PFL之外,早在2003年,就有在DFB激光器后分别集成一段有源波导提供强反馈和无源波导调整反馈相位,提出有源反馈激光器(Amplified Feedback Laser, AFL)的概念,但最初并没有用于调制带宽的提高^[47-48],由于AFL可以分别调整外腔反馈光的强度和相位,理论上会更容易观察到双峰响应,然而由于集成了两个外腔,工艺较为复杂,直到2015年,才有报导AFL成功观察到双峰响应^[49];2016年,AFL的带宽拓展到59 GHz,此AFL包含375 μm 长的DFB激光器和220 μm 长的有源反馈波导^[50]。除PFL和AFL之外,前文所述的含有DBR的DML也可以观察到PPR效应带来的双峰响应,因为DBR也可以认为是一个外腔,会引入光反馈^[41,51-54],因此,DBR和DR激光器可同时利用失谐加载效应和PPR效应提高带宽;早在1997年,就有相关研究,200 μm 长

的FP腔加300 μm 长的DBR可将调制带宽拓宽到31 GHz@130 mA^[53];2005年,在DBR激光器外集成相位调制区,可将带宽拓展到37 GHz@172 mA。为进一步拓展带宽,有学者发现将DFB激光器与DBR集成在一起的DR激光器带宽更高,通过分别调节注入DFB和DBR部分的电流,可同时失谐加载效应和PPR效应提高带宽效果最大化,可将带宽拓展到超过50 GHz;在2017年,DR激光器的带宽可以达到55 GHz@36.2 mA^[55];随后优化了DR激光器的工艺,采用同一有源层的方法,在大大减小工艺难度的情况下使激光器的带宽达到24 GHz@60 mA^[56]。PFL和AFL等外腔反馈激光器都是在DFB激光器的高反端集成反馈外腔,DFB激光器的出射端还是增透,只能利用PPR效应提高带宽,提升有限。然而,DFB+R方案的提出又使得激光器的带宽突破了60 GHz,即在DFB激光器出射端集成一无源波导,DFB激光器另一端高反,集成的无源波导末端具有一定反射率(3%~8%),此结构可将失谐加载效应最大化,因为DFB+R激光器具有更陡的反射包络,会提供更大的微分增益差,得到尽可能大的弛豫振荡频率,利用此方法,激光器的带宽可分别达到65^[57]和75 GHz@65 mA^[58]。2021年,提出DFB+R结构的同一课题组同时提出了双耦

合系数 DBR 激光器和双电极接触 DR 激光器,两种结构的原理都是提高了反馈调整自由度,可以使激光器的反射包络更陡,利用失谐加载效应和 PPR 效应,两种结构的 DML 带宽均可达到 65 GHz^[59]。同年,利用薄膜大幅减小寄生常数,结合超短腔、BH 波导结构、失谐加载效应和 PPR 效应,已有报道半导体激光器的带宽可超过 100 GHz 达到 108 GHz@27 mA^[60]。

尽管在目前已有的报道中,半导体激光器的带宽可以非常高,但是利用 PPR 效应和失谐加载效应需要的条件极其苛刻,温度的轻微变化可能使得半导体激光器带宽骤降,目前无法商用。

4 结束语

本文针对 DML 的发展状况,分别介绍了宽温高速 DFB 激光器和超高速 DML 的研究,其中宽温高速 DFB 激光器面向 5G 前传等应用需求,发展较为成熟,目前正向着低成本、高可靠性发展。而面对越来越大的信息需求,超高速 DML 逐渐成为研究重点,虽然采用新的理论和方法,目前半导体激光器的带宽甚至可以超过 100 GHz 达到 108 GHz@27 mA,但由于工作条件较为苛刻,尚未达到商用标准,下一步的目标将是提高超高速 DML 的温度稳定性等。从目前的发展需求来看,我们认为稳定的超高速 DML 将会有广阔的研究前景和应用前景。

参考文献:

[1] Keiser G. Optical Fiber Communications, 2nd ed[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1991.

[2] Zhu N H, Shi Z, Zhang Z K, et al. Directly Modulated Semiconductor Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 24(1):1-19.

[3] Matsuo S, Kakitsuka T. Low-operating-energy Directly Modulated Lasers for Short-distance Optical Interconnects [J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(3):567-643.

[4] Tang J M, Shore K A. 30 Gb/s Signal Transmission over 40-km Directly Modulated DFB-laser-based Single-mode-fiber Links without Optical Amplification and Dispersion Compensation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(6):2318-2327.

[5] Morton P A, Shtengel G E, Tzeng L D, et al. 38.5 km Error Free Transmission at 10 Gbit/s in Standard Fibre Using a Low Chirp, Spectrally Filtered, Directly Modulated 1.55 μm DFB Laser[J]. Electronics Letters, 1997, 33(4):310-311.

[6] Venghaus, Herbert & Grote, Norbert. Fibre Optic Communication Key Devices; Key Devices[M]. Ber-

lin, German:Springer, 2017.

[7] Coldren L A, Corzine S W, Mashanovitch M L. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits [M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012.

[8] Ralston J D, Weisser S, Esquivias I, et al. Control of Differential Gain, Nonlinear Gain, and Damping Factor for High-speed Application of GaAs-based MQW Lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6):1648-1659.

[9] Matsui Y, Murai H, Arahira S, et al. 30 GHz Bandwidth 1.55- μm Strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW Laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(1):25-27.

[10] Casey Jr H C. Temperature Dependence of the Threshold Current Density in InP-Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.6}P_{0.4} ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) Double Heterostructure Lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(7):1959-1964.

[11] Hong J, Blaauw C, Moore R, et al. Strongly Gain-coupled (SGC) Coolerless (-40-+85 $^{\circ}\text{C}$) MQW DFB Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 442-448.

[12] Massara A B, Williams K A, White I H, et al. Ridge Waveguide InGaAsP Lasers with Uncooled 10 Gbit/s Operation at 70 $^{\circ}\text{C}$ [J]. Electronics Letters, 1999, 35(19):1646-1647.

[13] White J K, Blaauw C, Firth P, et al. 85 $^{\circ}\text{C}$ Investigation of Uncooled 10-Gb/s Directly Modulated InGaAsP RWG GC-DFB Lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8):773-775.

[14] Bang D, Shim J, Kang J, et al. High-temperature and High-speed Operation of a 1.3- μm Uncooled InGaAsP-InP DFB Laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(9):1240-1242.

[15] Van de Walle C G. Band Lineups and Deformation Potentials in the Model-solid Theory[J]. Physical Review B, 1989, 39(3):1871.

[16] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band Parameters for III - V Compound Semiconductors and Their Alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(11):5815-5875.

[17] Kobayashi W, Fujiwara N, Tadokoro T, et al. Uncooled Operation of 10-/40-Gbit/s 1.55- μm Electroabsorption Modulator Integrated with Distributed Feedback Laser[J]. NTT Technical Review, 2010, 8(8): 1-8.

[18] Tsuchiya T, Takemoto D, Taike A, et al. Large Number of Periods in Highly Strained InGaAlAs/InGaAlAs MQW Structures Grown by Metalorganic Vapor-phase Epitaxy[C]//Eleventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM99). Davos, Switzerland (Cat. No. 99CH36362); IEEE, 1999:47-50.

[19] Aoki M. 85 $^{\circ}\text{C}$ -10 Gbit/s Operation of 1.3 μm InGaAlAs MQW-DFB Laser[C]//26th European Conference on Optical Communication 2000. Munich, Ger-

- many: IEEE, 2000:123–124.
- [20] Nakahara K, Tsuchiya T, Tanaka S, et al. 115 °C, 12.5-Gb/s Direct Modulation of 1.3- μm InGaAlAs-MQW RWG DFB Laser with Notch-free Grating Structure for Datacom Applications [C]//Optical Fiber Communication Conference, Atlanta, Georgia, United States: Optica Publishing Group, 2003:PD40.
- [21] Takagi K, Shirai S, Tatsuoka Y, et al. 120 °C 10-Gb/s Uncooled Direct Modulated 1.3- μm AlGaInAs MQW DFB Laser Diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11):2415–2417.
- [22] Fukamachi T, Shiota T, Kitatani K, et al. 95 °C Uncooled and High Power 25-Gbps Direct Modulation of InGaAlAs Ridge Waveguide DFB Laser[C]//35th European Conference on Optical Communication, Vienna, Austria: IEEE, 2009:1–2.
- [23] Fukamachi T, Adachi K, Shinoda K, et al. Recent Progress in 1.3- μm Uncooled InGaAlAs Directly Modulated Lasers[C]//22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference, Kyoto, Japan: IEEE, 2010: 189–190.
- [24] Tadokoro T, Yamanaka T, Kano F, et al. Operation of a 25-Gbps Direct Modulation Ridge Waveguide MQW-DFB Laser up to 85 °C[C]//Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, United State:Optical Society of America, 2009:OThT3.
- [25] Nakahara K, Tsuchiya T, Kitatani T, et al. High Extinction Ratio Operation at 40-Gb/s Direct Modulation in 1.3- μm InGaAlAs-MQW RWG DFB Lasers[C]//Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California, United States:Optical Society of America, 2006: OWC5.
- [26] Nakahara K, Tsuchiya T, Kitatani T, et al. 40-Gb/s Direct Modulation with High Extinction Ratio Operation of 1.3- μm InGaAlAs Multiquantum Well Ridge Waveguide Distributed Feedback Lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19):1436–1438.
- [27] Otsubo K, Matsuda M, Takada K, et al. Uncooled 25 Gbit/s Direct Modulation of Semi-insulating Buried-heterostructure 1.3 μm AlGaInAs Quantum-well DFB Lasers[J]. Electronics Letters, 2008, 44(10):631–633.
- [28] Yamamoto T, Uetake A, Otsubo K, et al. Uncooled 40-Gbps Direct Modulation of 1.3- μm -wavelength AlGaInAs Distributed Reflector Lasers with Semi-insulating Buried-heterostructure[C]//22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference, Kyoto, Japan: IEEE, 2010: 193–194.
- [29] Otsubo K, Matsuda M, Takada K, et al. 40-Gb/s Direct Modulation of 1.3- μm Semi-insulating Buried-heterostructure AlGaInAs MQW DFB Lasers[C]//2008 IEEE 21st International Semiconductor Laser Conference, Sorrento, Italy:IEEE, 2008:19–20.
- [30] Otsubo K, Matsuda M, Okumura S, et al. Low-driving-current High-speed Direct Modulation up to 40 Gb/s Using 1.3- μm Semi-insulating Buried-heterostructure AlGaInAs-MQW Distributed Reflector (DR) Lasers[C]//Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, United State: Optical Society of America, 2009:OThT6.
- [31] Nakahara K, Wakayama Y, Kitatani T, et al. Direct Modulation at 56 and 50 Gb/s of 1.3- μm InGaAlAs Ridge-Shaped-BH DFB Lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 27(5):534–536.
- [32] Sato H. Highly Reliable 1.3 μm InGaAlAs Buriedheterostructure Laser Fabricated with in-situ Cleaning[J]. Electronics Letters, 2004, 40(11):1.
- [33] Paoletti R, Agresti M, Bertone D, et al. Uncooled 20 Gbit/s Direct Modulation of High Yield, Highly Reliable 1300 nm InGaAlAs Ridge DFB Lasers[C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication, San Diego, California, United State:IEEE, 2009:1–3.
- [34] Fukamachi T, Adachi K, Shinoda K, et al. Wide Temperature Range Operation of 25-Gb/s 1.3- μm InGaAlAs Directly Modulated Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(5):1138–1145.
- [35] Sasada N, Nakajima T, Sekino Y, et al. Wide-temperature-range (25 – 80 °C) 53-Gbaud PAM4 (106-Gb/s) Operation of 1.3- μm Directly Modulated DFB Lasers for 10-km Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7):1686–1689.
- [36] Han Y, Tian Q, Yang S, et al. Direct Modulation Bandwidth Enhancement of Uncooled DFB Laser Operating over a Wide Temperature Range based on Groove-in-trench Waveguide Structure [J]. Optics Express, 2022, 30(9):15757–15765.
- [37] Yagi H, Koyama K, Onishi Y, et al. 26 Gbit/s Direct Modulation of AlGaInAs/InP Lasers with Ridge-waveguide Structure Buried by Benzocyclobutene Polymer[C]//2009 IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials, Newport Beach, California, United State:IEEE, 2009:371–374.
- [38] Kobayashi W, Ito T, Yamanaka T, et al. 50-Gb/s Direct Modulation of a 1.3- μm InGaAlAs-based DFB Laser with a Ridge Waveguide Structure[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4):1–8.
- [39] Vahala K, Yariv A. Detuned Loading in Coupled Cavity Semiconductor Lasers—Effect on Quantum Noise and Dynamics [J]. Applied Physics Letters, 1984, 45(5):501–503.
- [40] Chaciński M, Schatz R. Impact of Losses in the Bragg Section on the Dynamics of Detuned Loaded DBR Lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(9):1360–1367.
- [41] Feiste U. Optimization of Modulation Bandwidth in DBR Lasers with Detuned Bragg Reflectors[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(12):2371–

- 2379.
- [42] Huang J, Li C, Lu R, et al. Beyond the 100 Gbaud Directly Modulated Laser for Short Reach Applications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(4):041306.
- [43] Chang F. *Datacenter Connectivity Technologies: Principles and Practice*[M]. Gistrup, Denmark: Stylus Publishing, LLC, 2019.
- [44] Radziunas M, Glitzky A, Bandelow U, et al. Improving the Modulation Bandwidth in Semiconductor Lasers by Passive Feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(1):136–142.
- [45] Troppe U, Kreissl J, Moehrle M, et al. 40 Gbit/s Directly Modulated Lasers: Physics and Application [C]//*Novel In-Plane Semiconductor Lasers X*. International Society for Optics and Photonics. San Francisco, California, United States: SPIE, 2011, 7953:98–107.
- [46] Kreissl J, Vercesi V, Troppe U, et al. Up to 40 Gbit/s Directly Modulated Laser Operating at Low Driving Current: Buried-heterostructure Passive Feedback Laser (BH-PFL)[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 24(5):362–364.
- [47] Brox O, Bauer S, Radziunas M, et al. High-frequency Pulsations in DFB Lasers with Amplified Feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11):1381–1387.
- [48] Bauer S, Brox O, Kreissl J, et al. Nonlinear Dynamics of Semiconductor Lasers with Active Optical Feedback [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(1):016206.
- [49] Yu L, Guo L, Lu D, et al. Modulated Bandwidth Enhancement in an Amplified Feedback Laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(5):49–53.
- [50] Mieda S, Yokota N, Kobayashi W, et al. Ultra-wide-bandwidth Optically Controlled DFB Laser with External Cavity[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(6):1–7.
- [51] Bardella P, Montrosset I. A New Design Procedure for DBR Lasers Exploiting the Photon - photon Resonance to Achieve Extended Modulation Bandwidth[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4):1502408–1502408.
- [52] Morthier G, Schatz R, Kjebon O. Extended Modulation Bandwidth of DBR and External Cavity Lasers by Utilizing a Cavity Resonance for Equalization[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(12):1468–1475.
- [53] Kjebon O, Schatz R, Lourdudoss S, et al. Two-section InGaAsP DBR-lasers at 1.55 μm Wavelength with 31 GHz Direct Modulation Bandwidth[C]//1997 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. Cape Cod, MA, USA: IEEE, 1997:665–668.
- [54] Reithmaier J P, Kaiser W, Bach L, et al. Modulation Speed Enhancement by Coupling to Higher Order Resonances: a Road Towards 40 GHz Bandwidth Lasers on InP[C]//International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. Glasgow, UK: IEEE, 2005:118–123.
- [55] Matsui Y, Schatz R, Pham T, et al. 55 GHz Bandwidth Distributed Reflector Laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3):397–403.
- [56] Liu G, Zhao G, Sun J, et al. Experimental Demonstration of DFB Lasers with Active Distributed Reflector[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23):29784–29795.
- [57] Che D, Matsui Y, Chen X, et al. 400-Gb/s Direct Modulation Using a DFB + R Laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12):3337–3339.
- [58] Matsui Y, Schatz R, Che D, et al. Isolator-free > 67-GHz Bandwidth DFB + R laser with Suppressed Chirp[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California, United States: Optical Society of America, 2020:Th4A. 1.
- [59] Matsui Y, Schatz R, Che D, et al. Low-chirp Isolator-free 65-GHz-bandwidth Directly Modulated Lasers[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1):59–63.
- [60] Yamaoka S, Diamantopoulos N P, Nishi H, et al. Directly Modulated Membrane Lasers with 108 GHz Bandwidth on a High-thermal-conductivity Silicon Carbide Substrate[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1):28–35.