

外调制激光器输出功率高精度控制技术研究

张晓青^{1,2} 张春熹¹ 胡姝玲¹ 欧攀¹ 胡汉伟¹

(¹ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083; ² 北京机械工业学院电子信息工程系, 北京 100085)

摘要 为了研究高速 1550 nm 微波光纤链路的高精度外调制特性, 针对多量子阱分布反馈激光器的物理模型讨论了输出功率、阈值电流与温度的依赖关系, 建立了相应的恒温恒功率控制电路, 使激光器输出功率稳定在 ± 0.005 dB 以内, 调制输出 3 dB 谱宽为 0.5 nm, 边模平坦, 边模抑制比大于 30 dB。另外设计了自动增益控制电路和附加相位调制电路, 对外调制阶段的光功率进行控制。实验结果表明, 采用 1550 nm 激光器及上述控制电路构成相应的外调制微波光纤链路系统, 可有效地提高光发射模块输出光功率的稳定性, 克服了直接调制带来的光谱展宽和消光比不稳定的缺点, 实现了微波信号的高线性低失真传输。

关键词 微波光子学; 外调制; 功率控制; 阈值电流

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0079

Research on High Precision Output Power Control Technology of External Modulated Laser Diode

Zhang Xiaoqing^{1,2} Zhang Chunxi¹ Hu Shuling¹ Ou Pan¹ Hu Hanwei¹

¹ School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

² Department of Electronic Information Engineering, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China

Abstract To study high precision external modulation characteristics of high speed 1550 nm microwave fiber link, the relation of output power, threshold current and temperature is discussed based on the physical model of multiple quantum well-distributed feedback (MQW-DFB) laser diode (LD). A corresponding power and temperature control circuit is set up to ensure the output optical power fluctuation within ± 0.005 dB and the modulated output with 0.5 nm of 3 dB spectrum width. Its side modes are planar and the side mode suppression ratio is more than 30 dB. In addition, the automatic gain control circuit and accessional phase modulation circuit are designed in order to control light power on the stage of external modulation. Experimental results shows that the external modulation microwave fiber link system composed 1550 nm MQW-DFB laser diode and corresponding driving circuits can effectively improve output light power stability of light emitting module. It overcomes the disadvantages of light spectrum expansion and unstable optical extinction ratio due to direct modulation and realizes fiber transmission of microwave signal with high linearity and low distortion.

Key words microwave photonics; external modulation; power control; threshold current

1 引言

目前, 基于 Gb/s 传输链路的高速光通信技术发展迅速, 其光传输设备有着良好的应用前景。外调制技术利用电信号调制半导体激光器的输出光,

其调制不在光源上, 而在光源的输出通路上完成, 使激光器始终处于稳定的直流工作状态下, 其工作波长扰动小。外调制多采用多量子阱分布反馈 (Multiple quantum well-distributed feedback,

基金项目: 航空科学基金(2007ZC51043)资助课题。

作者简介: 张晓青(1967—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事微波光子学及信号处理方面的研究。

E-mail: zxqbim@163.com

导师简介: 张春熹(1965—), 男, 博士后, 教授, 主要从事光纤陀螺及先进信号处理等方面的研究。

E-mail: zchunxi@hotmail.com

MQW-DFB)激光器,可提供大功率光输出, $P-I$ 曲线线性好,内部相对强度噪声(Relative intensity noise, RIN)小^[1]。随着入纤光功率的增加,接收机接收到光信号的光信噪比随之增大,与此同时光纤链路中光信号传输过程中的非线性现象也不断增强。因此,在进行系统实验时,适当地选择光源的输出光功率,使系统达到最佳的入纤光功率。激光器是光通信系统中发射端的关键器件,但由于其固有的非线性,不可避免地会给传输系统引入非线性失真^[2],因此,研究激光器本身参量及其输出的各项指标,对于研究整个光传输系统的特性指标是非常必要的。

2 多量子阱分布反馈激光器 $P-I$ 特性的理论研究

MQW-DFB 激光器具有量子阱的有源区和布拉格光栅,由内藏光栅来实现光的分布反馈,谐振腔本身具有选择模式的能力,图 1 是 MQW-DFB 激光器结构示意图。MQW-DFB 激光器的波长较长,谱宽较窄,光纤的本征衰减系数小,使得实际链路距离可长达 70~100 km。采用波长为 1550 nm 的 MQW-DFB 激光器时,光纤衰减仅有 0.2~0.25 dB/km。

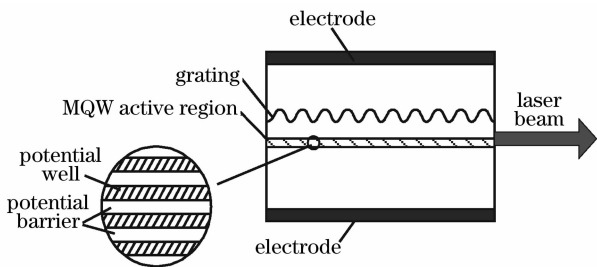


图 1 MQW-DFB 激光器物理结构示意图

Fig. 1 Configuration scheme of MQW-DFB laser diode

MQW-DFB 激光器在布拉格波长上存在着一个损耗最低的模式,从原理上讲是单一波长激射的,决定了它在单色性和稳定性方面优于一般的激光器。其中输出功率动态非线性失真主要是由激光器的空间烧孔效应引起,使得谐振腔内部的反射率不均匀,从而导致光强的不均匀和载流子的不均匀。由于载流子未被完全引入,使输出光功率与注入电流不能成正比而呈现非线性。MQW-DFB 激光器在 1550 nm 主波长模式下谱宽很窄,有明显的边模,但反馈功能可以有效抑制这些边模,使其不超过 30 dB;具有较宽的调制带宽,较小的频率和强度噪声,较小的线宽和较好的边模抑制比。由于 MQW-DFB 激光器有重叠的增益和光栅区,因而会

有啁啾存在,当驱动电流改变时,输出光的频率和功率都会同时改变。啁啾会使得激光器的输出谱线展宽,通过光纤传输会使色散加重,系统出现失真。

量子阱激光器的阈值电流 I_{th} 可用下式表示:

$$I_{th} = eWL N_w L_w (Bn_{th}^2 + Cn_{th}^3) / \eta, \quad (1)$$

式中 W 为有源层宽度; L 为谐振腔长度; N_w 为阱数; L_w 为量子阱层厚度; B 为发光的最大耦合常量; C 为俄歇最大复合常量; η 为内量子效率; n_{th} 为阈值载流子密度。一般情况下,光通信用半导体激光器的许多特性都和温度有关^[3],其中温度 T 与阈值电流 I_{th} 的关系为

$$I_{th} \propto \exp(T/T_0), \quad (2)$$

式中 T_0 为特征温度,没有实际物理意义,其值表示了阈值电流温度特性。因为阈值电流和输出功率有着直接的关系,可测出系统中所用激光器的输出功率、阈值电流和温度之间的关系曲线如图 2 所示。

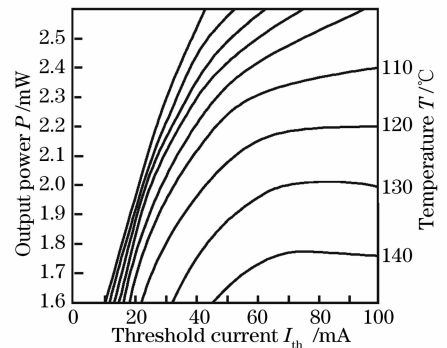


图 2 输出功率、阈值电流和温度之间的关系

Fig. 2 Relation of output power, threshold current and temperature

从图 2 中可以看出,阈值电流随温度的升高而升高,于是整个激光器的特性曲线基本上随温度的变化而平移;如果激光器工作在恒定的电流下,激光器的功率随温度的升高而下降,且输出功率的变化很大。

3 输出功率高精度线性控制方法

MQW-DFB 激光器对温度的变化很敏感,驱动其工作时应有相应的控制电路^[4~6]。其作用就是消除温度变化和器件老化的影响,稳定输出光信号。另外,恒功率电路控制的主要目的也是为了控制激光器的输出功率。

3.1 温度控制电路

由于阈值电流 I_{th} 容易受温度的影响,而阈值电流 I_{th} 的增加或斜率的减小将导致光功率的减小。为此,温度最好稳定在 25 °C。

该控制电路是一个负反馈控制回路，主要由五个部分组成：电压基准电路、温度测量电路、减法器电路、比例积分微分（Proportion integration differentiation, PID）控制电路和热电致冷器（Thermoelectric coolers, TEC）驱动电路，图 3 为其系统数学模型。由热敏电阻从半导体激光器内部感应到激光器的温度变化，然后转化为电信号作为负反馈信号，再与预置温度信号在减法器中做减法运算产生差值，将此差值送到 PID 控制电路中进行处理，输出信号作为 TEC 驱动电路的驱动信号来控制 TEC 驱动电流的大小和方向，从而完成 TEC 的加热或制冷。

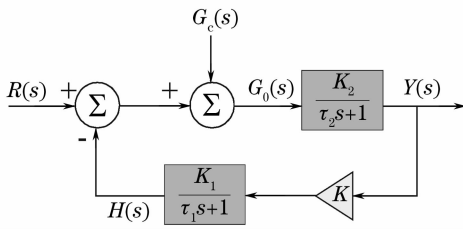


图 3 恒温控制电路系统数学模型

Fig. 3 Maths model of constant temperature control system

图 4 是恒温控制电路仿真结果，系统输入信号设为幅值为 1v 的阶跃信号，调节时间设为 0.25 s，TEC 的瞬态阶跃响应在极短的时间内（约 2 s）趋于稳定，系统的超调量不大于 10%。这表明半导体热电制冷器的工作性能稳定，可以很好地进行制冷和加热控制，符合设计要求。

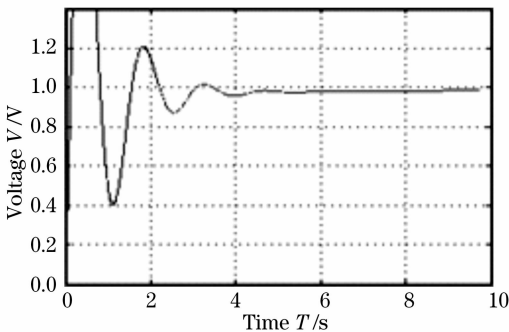


图 4 温度控制系统阶跃响应过程

Fig. 4 Step response of temperature control system

3.2 功率控制电路

阈值电流的增加将引起光功率的减小，为了补偿光功率的减小，需要增加偏置电流，偏置电流的变化需要硬件控制。由于 MQW-DFB 激光器存在啁啾，当驱动电流改变时，输出光的频率和功率都会同时改变。啁啾会令激光器的输出谱线展宽，使得

光纤传输的色散特性加重，系统性能受到影响。

对于激光器而言，光功率 $P = \alpha I_0$ ，其中 α 是转换系数， I_0 是工作电流。对于光电检测二极管 (PD) 而言，光生电流 $I_p = \beta P$ ，其中 β 是光电转换系数。恒功率反馈系数推导框图如图 5 所示。

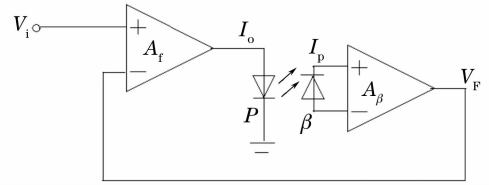


图 5 恒功率反馈系数推导框图

Fig. 5 Deduction scheme of constant power feedback coefficient

恒功率电路由封装在激光发射模块内的 PIN 二极管、外围检测电路和激光二极管偏流调整电路组成。PIN 光电检测二极管探测激光器背向输出的光功率的变化，通过外围检测比较电路，分析激光器的发射功率比标准大或是小，然后通过调整其偏置电流，维持光功率保持在设计值。在图 6 中，采用信号发生器输出频率为 20 Hz，幅值为 0.8 A 的缓慢的正弦波形代替光电流信号的变化值。下方曲线代表信号发生器输出电压信号的缓慢变化值，上方曲线代表激光器的电流值。由输出波形可知当光电流变化升高时，流过激光器的工作电流缓慢减小；当光电流变化减小时，流过激光器的工作电流缓慢升高，从而保证了半导体激光器工作电流的稳定，符合设计要求。

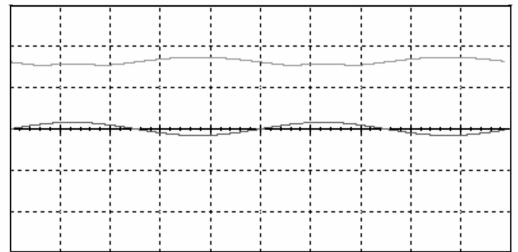


图 6 恒功率控制电路输入输出仿真测试

Fig. 6 Input and output simulink measurement of constant power control circuit

系统光源的输出功率是可以调谐的，调制器的插损是一个定值，不随信号的改变而发生变化，因此，通过调谐光源的偏置电流来改变激光器的输出功率，可以达到改变光纤传输系统入纤光功率的目的。

4 系统实验结果

本系统采用世维通公司波长为 1550 nm 的

InGaAsP/InP MQW-DFB 激光器组件,其内部集成了激光二极管(LD)、光电二极管(PD)、热敏电阻(Temperature sensor)和半导体制冷器(TEC),工作原理如图7所示。外调制器同为世维通公司10G产品。光路中增加了偏振控制器以保证外调制的正常输出特性,另外设计了预失真补偿电路以补偿外调制器的非线性失真^[7]。外调制具有能提高输出光功率、本征消除偶次谐波的明显优点,缺点是调制输

出特性为余弦波,因此系统中预失真补偿电路是必不可少的。自动增益控制(AGC)的作用是稳定加在激光器上射频(RF)信号电平,以稳定设计的调制深度来降低非线性失真指标。受激布里渊散射(Stimulated Brillium scating,SBS)抑制电路可在外调制器加上另一个高频信号,使1550nm的激光引入附加相位调制,降低光谱能量密度,从而提高SBS阈值。

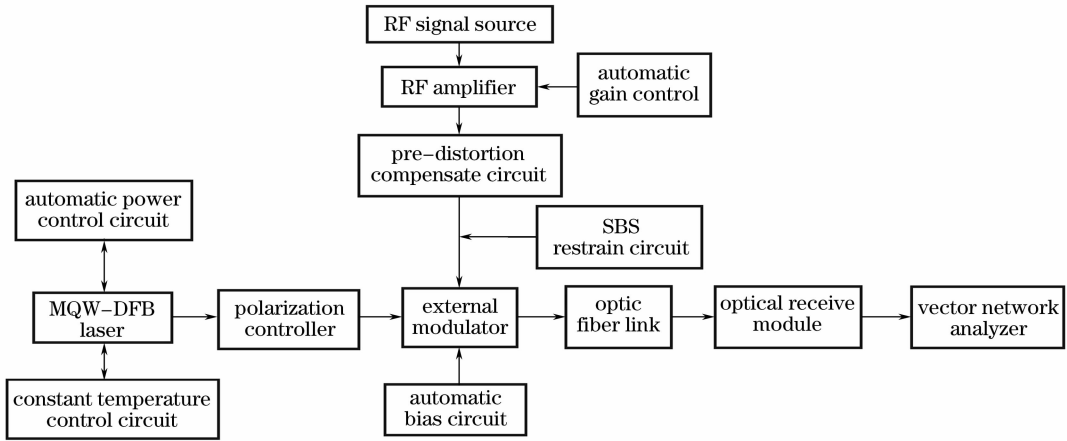


图7 高速外调制光纤传输系统组成框图

Fig. 7 Flow chart of high speed external modulation fiber transmission system

实验中,采用高性能的1550 nm InGaAsP/InP MQW-DFB 激光器作为系统的光源,得到了良好的调制传输效果。MQW-DFB 激光器经外调制后的光谱如图8所示。中心波长为1550 nm,输出功率为

6 dBm,谱宽为0.5 nm,边模抑制比大于30 dB,具有良好的单模特性。调制后的发送端光谱的中心波长仍为1550 nm,谱宽为0.5 nm,输出功率为1 dBm。经调制后光信号光谱主模的形状没有发生变化,调制器插入损耗不到5 dB,引起峰值功率有所下降。边模在很大程度上受到了衰减,边模抑制比有所增加。光信号的谱线良好与LiNbO₃电光调制器优良的性能有很大的关系,对于高速光信号的调制,LiNbO₃电光调制有着其它调制器无法比拟的优势^[8]。

实验结果表明,光信号经系统传输后其主模的光谱形状并没有发生变化,只是由于光信号在光纤中的传输损耗使得其峰值功率下降为-15.9 dBm。接收端的电信号没有产生畸变(图9)。说明系统中

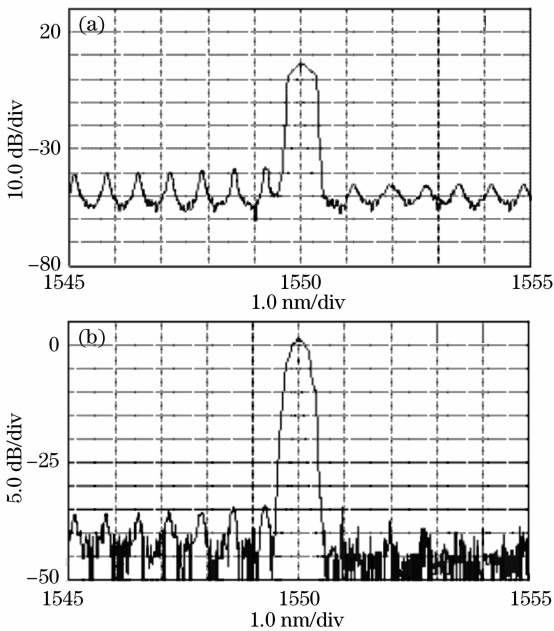


图8 激光器外调制前(a),后(b)的输出光谱

Fig. 8 Output optical spectra before (a) and after (b) modulation

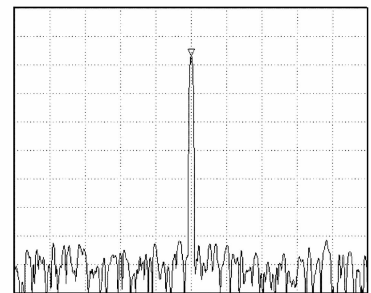


图9 光接收端解调出的电信号

Fig. 9 Electrical signal demodulated at optical receiver

的调制器和光源的性能优良,适合用于高速光纤传输系统中,系统有着良好的传输性能,色散及非线性效应等的影响并不十分严重,没有使传输的信号产生畸变。多量子阱 DFB 激光器具有稳定的激光输出,中心波长没有产生严重的漂移。

由于光调制器的作用,经调制后的光信号功率有较大衰减,必要时采用光纤放大器对传输的光信号进行放大,然后在光纤链路中进行远距离传输^[9,10]。

5 结 论

在高速(Gb/s)1550nm 光纤传输系统中,直接调制激光器会产生寄生调频,调制输出光谱发生展宽恶化,而使用 MQW-DFB 激光器进行外调制,在高速调制下仍呈现出单频、窄线宽、无频移、无跳模等特性,具有高速率、大光功率和无光频率跳变啁啾现象等优点。采用本文设计的高精度控制系统驱动激光器,激光器输出功率稳定在 0.005 dB 以内,配合性能优良的高速光调制器,输出的光功率由于插损略有降低,但仍稳定在 0.01 dB 以内,可用于实际的 10 Gb/s 光通信系统中。

参 考 文 献

- 1 Liu Haitao, Chen Jianping, Chen Xiangfei *et al.*. Fabrication of distributed feedback bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 873~876
刘海涛,陈建平,陈向飞等. 低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 873~876
- 2 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang *et al.*. Characteristic mode analysis of distributed feedback fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1358~1362

- 徐团伟,李 芳,刘育梁等. 分布反馈光纤激光器模式特性分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1358~1362
- 3 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Design on high frequency amplitude modulation of laser diode [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(11): 1174~1177
贾方秀,丁振良,袁 峰. 半导体激光器高频调制技术[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(11): 1174~1177
- 4 Yang Jianliang, Zha Kaide. Two signal phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV transmission system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(8): 724~728
杨建良,查开德. 光纤 AM-CATV 外调制传输系统中双频调相抑制 SBS 的理论分析[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 724~728
- 5 Chen Fushen, Li Qicong. Integrated electrooptic M-Z modulator with ridge structure in X-cut LiNbO₃[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(3): 209~212
陈福深,李其聪. X 切 LiNbO₃ 脊形结构集成电光 M-Z 型调制器[J]. *中国激光*, 2002, **29**(3): 209~212
- 6 Roselli, V. Borgioni, F. Zepparelli *et al.*. Analog laser predistortion for multiservice radio over fiber systems[J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(5): 1211~1223
- 7 Song Zhe, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Effect of the polarization direction of incident light on electro-optic modulator for light propagating near the optic axis in LiNbO₃[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 319~322
宋 哲,刘立人,周 煜等. 入射光偏振方向对 LiNbO₃ 晶体近光轴电光调制的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 319~322
- 8 Guo Yubin, Huo Jiayu, Jin Jiangtao *et al.*. 10 Gbit/s fiber-optic transmission system using a LiNbO₃ external modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 22~26
郭玉彬,霍佳雨,靳江涛等. LiNbO₃ 外调制器的 10 Gbit/s 光纤传输系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1): 22~26
- 9 Liu Fangnan, Sun Lijun, Bai Yaochen. Design and implementation of optical modem[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(9): 874~878
刘方楠,孙力军,白瑶晨. 光调制解调器的设计与实现[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(9): 874~878
- 10 Adil Karim, Jason Devenport. Noise figure reduction in externally modulated analog fiber-optic links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5): 312~314