

激光器驱动和激光器之间的高速连接

程 木 吴重庆 王 丹 盛积业 刘 华

(北京交通大学光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘要 光纤接入网以其高速度、大容量、低功耗等优点,成为接入网的重要发展方向,低成本的高速光发射机成为光纤接入的一个关键。相对于外调制激光器,直接调制激光器因为调制简单、成本低,成为光发射机的首选方案。激光器和激光器驱动之间高速的连接,是实现直接调制光发射机的关键技术之一。理论分析了激光器驱动器输出的偏置电流和调制电流之间的关系,得出了实现偏置电流和调制电流稳定的条件。分析了激光器和激光器驱动之间高速连接存在的问题,选择电容耦合的方式,利用高速印刷线路板(PCB)布线技术,实现了 2.5 Gb/s 的直接调制激光器的研制。

关键词 光通信; 直接调制激光器; 寄生参量; 传输线

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1168

High-Speed Interfacing between Laser and Laser Driver

Cheng Mu Wu Chongqing Wang Dan Sheng Jiye Liu Hua

(Institute of Optical Information Science and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The design of interface between the laser diode and its driver is important issue for high-speed fiber optic communications design. But the high speed interfacing between laser and the laser driver has few studies. The interface problem between the laser and the laser driver is reviewed. And then, the equivalent lumped parameter circuit models of the laser driver and the laser diode is demonstrated. Based on the theory above, the stability condition of the bias current and the modulation current is presented. At last, the directly modulated laser of 2.5 Gb/s is demonstrated in experiment.

Key words optical communications; directly modulated lasers; parasitic parameter; transmission line

1 引 言

随着全球范围内通信业务的迅猛增长,网络的速度必然要向更高速度、更远距离、更低功耗方向发展。光纤接入网以其高速度、大容量、低功耗等优点,成为接入网的重要发展方向。但是,光纤接入的成本成为影响其广泛应用的重要原因,因此低成本的高速光发射机成为光纤接入的一个关键。相对于外调制激光器,直接调制激光器因为调制简单、成本低而成为光发射机的首选方案^[1,2]。随着半导体激光器制造工艺的发展,利用光谱滤波和电色散补偿技术,使激光器的动态谱线变窄,色散减少^[3,4],应用于

直接调制激光器的调制速率可以达到 40 Gb/s。MAXIN, ANALOG DEVICE 以及 TEXAS 等芯片厂商,都能够生产速率为 10 Gb/s 的激光器驱动芯片。因此,激光器和激光器驱动之间高速的连接,成为实现直接调制光发射机的关键技术之一,但是关于这方面的研究报道还很少。激光器驱动芯片和激光器的互联是一件困难而又繁琐的事情。相对于外调制的激光器,高速直接调制的激光器主要受限于两方面的困难:一方面,由于元件的封装,以及焊接产生的寄生效应,很难控制;另一方面,光子的产生和载流子的复合的相互作用,会导致光子电子共振。

收稿日期: 2008-08-15; **收到修改稿日期**: 2008-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(60577020,60672004)和国家 863 计划(2007AA01Z270)资助课题。

作者简介: 程 木(1977—),男,博士研究生,主要从事光分组交换和光缓存等方面的研究。E-mail:chengmu@sina.com

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、全光网络和全光信号处理等方面的研究。E-mail:cqwu@bjtu.edu.cn(通信联系人)

激光器驱动的基本功能是为激光二极管(LD)提供合适的偏置电流和调制电流,使直流偏置电流略大于激光器的阈值电流,激光器工作在线性区。调制电流是脉冲电流,随着输入电压波形的变化而变化。其内部主要是一个用恒流源耦合的差动放大电路。这种结构的差动电路和通常的差动放大电路不一样,通常工作在放大区而不是工作在开关状态,这样可以减少由开关状态(饱和状态与深度截止状态)到放大状态的转换时间,使高速驱动芯片能够快速切换。但是这种设计所带来的问题是差动电路内部的两只晶体管不能完全地断开,从而形成了较大的直流基座。在调整恒流源的电流时,调制部分和直流基座同时变化,不能单独调整,从而给设计和使用带来了困难。过去,我们实现了 622 Mb/s 和 2.5 Gb/s 的直接调制激光器驱动和激光器的硬件上的连接^[5,6]。本文通过理论分析,得到了偏置电流和调制电流变化的关系,得出了实现偏置电流和调制电流稳定的条件。提出了 2.5 Gb/s 的直接调制激光器驱动的实现方案,实现了 2.5 Gb/s 的法布里-珀罗(F-P)腔激光器和激光器驱动之间的高速连接。

2 原 理

2.1 激光器和激光器驱动的电学分析

半导体光放大器本身是一个半导体二极管,同时具有阻性和容性,其集总参数模型如图 1 所示,其中的电阻 R ,电容 C 包含由于激光器封装引起的电容、电阻。高速激光器驱动模型如图 2 所示,脉冲信号通过管脚 Data in 进入驱动器内部的判决器(Decision device, DD),当脉冲为“1”时,晶体管 A 导通,同时晶体管 B 截止;当脉冲为“0”时,晶体管 B 导通,同时晶体管 A 截止。为了加快开关速度,晶体管 A, B 通常工作在放大区,这样两只晶体管不能完全地断开,从而形成了较大的直流基座,在调整调制电流时,调制电流和直流基座会同时变化。另外,

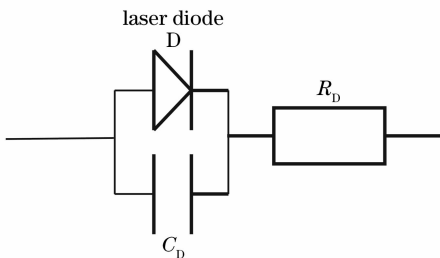


图 1 半导体激光器的集总参数电路模型

Fig. 1 Equivalent lumped parameter circuit model of the laser diode

为了保证始终有恒定的电流 I_{mod} 流过芯片中的恒流源,使驱动器稳定地工作,对于高速差分的驱动器,保持两个差分输出端的平衡是很重要的。负载阻抗的幅值和相位都要平衡。为了保持平衡的负载阻抗,每一个输出端要驱动阻值相同的负载。正输出端驱动传输线,此传输线负载端接阻值是 25Ω 的匹配电阻和激光器二极管到电源 V_{CC} ;负输出端通过 25Ω 的电阻连接到 V_{CC} 。

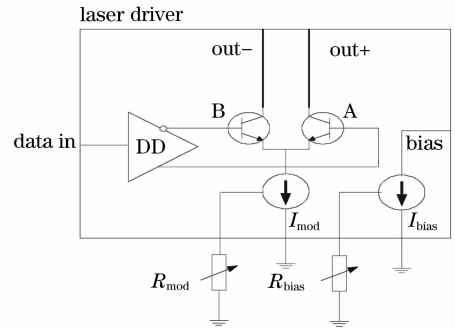


图 2 激光器驱动的集总参数电路模型

Fig. 2 Equivalent lumped parameter circuit model of the laser driver

激光器驱动和激光器之间的电气连接^[7]有两种,通常称为直接耦合和电容耦合。直接耦合方式是激光二极管直接处于差动放大器的一个差动臂上;电容耦合则是在激光器与驱动器之间增加了一个耦合电容 C 。两种耦合方式各有优缺点。直接耦合,因为使用了更少的元件,杂散电容、电感小,因此适应较宽的调制频率范围,且易于匹配;而且直流基座可以成为调制电流的一部分,供电回路少,因此功耗低。但是由于直流基座的存在,限制了调制电流的范围。而电容耦合的调制电流与偏置电流可以分别调整,可以输出较大的调制电流。但是电容耦合的缺点是增加了附加的离散元件,包括耦合电容、电感,这些元件使信号波形劣化,所以合理地选择这些元件的参数成为电容耦合成功的关键。电感上拉是最常见的电容耦合匹配方式,其工作状态如图 3 所示。经过推导,可以得到两个上拉电感 L_1, L_2 , 调制电流 I_{mod} , 偏置电流 I_{bias} , 激光器电阻 R_D , 两端电压 V_D 之间的关系为:

$$\frac{1}{2}(L_2 - L_1) \frac{dI_{\text{mod}}}{dt} = 2(V_D - I_{\text{bias}}R_D), \quad (1)$$

从(1)式可以得出,通过激光器的偏置电流和调制电流之间互相影响。当电感 L_1, L_2 相等时,调制电流的变化对偏置电流的影响最小;同样,当偏置电流为恒值 V_D/R_D 时,偏置电流对调制电流的影响最小。

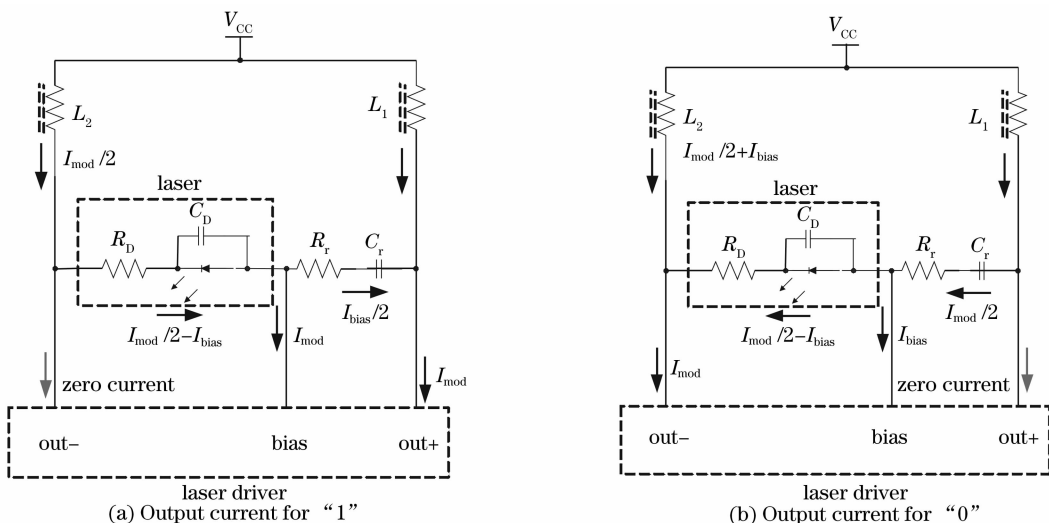


图 3 电感上拉的集总参数电路模型

Fig. 3 Current in the lumped-parameter circuit of inductive pull-up

如果激光器驱动和激光器之间的距离大于几毫米,它们之间的连接要用控制阻抗的微带线传输线(如图 4 所示)。微带线经常在印刷线路板(PCB)中使用。其特性阻抗值估算式为

$$Z_0 \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \cdot \ln \left[\frac{5.98H}{0.8W + T} \right], \quad (2)$$

(2)式中, W 为顶层导体的宽度, T 为顶层导体的厚度, H 为电介质的厚度, ϵ_r 为电介质常数。对常用的FR4材料的PCB板, $\epsilon_r = 4.7$ 。一般布线层铜膜的厚度为1.9 mil(1 mil=0.0254 mm),电解质的厚度可以根据需要定做,要得到阻抗为50 Ω的传输线,线宽和夹层电介质厚度成简单的线性关系(如图 5 所示)。

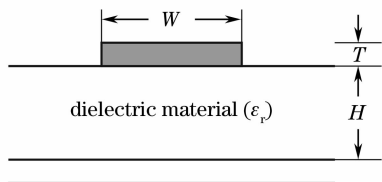


图 4 微带线的横截面图

Fig. 4 Cross section of microstrip line

为了减少高频噪声,要在激光器的正负输出端提供良好的从 V_{CC} 到地的退耦。一般要在激光器驱动的正输出端增加退耦电容,为合适的传输线工作提供回路电流(该电流沿着传输线的映射);同理,在激光器的负输出端增加退耦电容为负输出端提供回路电流。这些退耦元件一般使用小封装的贴片电容(0603封装或0402封装),对高频的退耦性能比较好。为了减少两个激光器输出端之间的传输时延,必须保持激光器驱动和激光器之间的连接尽量短。这

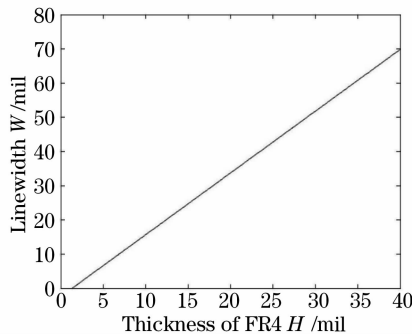


图 5 微带线的宽度和 PCB 板厚的关系

Fig. 5 Relation between the line width and the thickness of PCB

是因为传输时延能够转化为两个差分输出端的不平衡的相位端接。提高这方面的一条途径是选择物理尺寸小的端接电阻,以便于保持退耦电容尽可能地靠近传输线接地。印刷电路板上的非传输线部分如驱动器的输出管脚和激光器的管脚,也应该尽量短。

2.2 2.5 GHz 激光器驱动信号源的实现原理

2.5 GHz 激光器驱动由 4 个部分组成:可编程门阵列(FPGA)单元、高速并串转化单元、激光器驱动单元以及温度、光控单元(图 6 所示)。其工作原理为:FPGA 芯片产生 16 位并行的 155.52 Mb/s 数据和一路 155.52 Mb/s 的同步时钟。16 路并行的数据经过并串转化单元,变成 2.5 Gb/s 的串行数据和 2.5 Gb/s 的串行时钟。38.88 MHz 的晶振产生晶体管-晶体管逻辑(TTL)电平的时钟信号,经过电平转换芯片变为一对低压差分信号(LVDS)电平的差分信号输出给并串转化芯片,并串变换芯片将此输入时钟锁相后变为 155.52 MHz 的工作时

钟,在此工作时钟的控制下将接收来的 16 路 LVDS 并行数据转换成一路低电压正射报耦合逻辑 (LVPECL) 电平的 2.5 Gb/s 的串行数据输出,同时输出一路 LVPECL 电平的 2.5 GHz 的时钟。高速

2.5 Gb/s 数据和 2.5 GHz 的时钟通过激光器驱动器芯片驱动激光器。为了保持激光器稳定地工作,对激光器还要设计温度控制单元和光控单元。

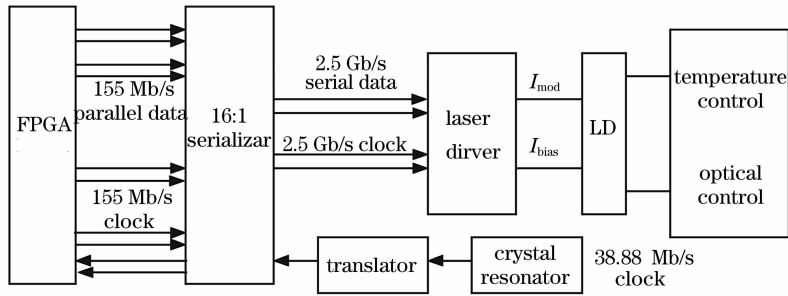


图 6 2.5 GHz 激光器驱动的硬件结构图

Fig. 6 Hardware structure of 2.5 GHz laser driver

当系统工作在 50 MHz 时,将产生传输线效应和信号的完整性问题。通常约定如果传播延时大于 $1/2$ 数字信号驱动端的上升时间,则认为此类信号是高速信号并产生传输线效应。这是因为,信号的传递发生在信号状态改变的瞬间(如上升或下降时间),如果传输时间小于 $1/2$ 的上升或下降时间,那么来自接收端的反射信号将在信号改变状态之前到达驱动端,如果反射信号很强,叠加的波形就有可能改变逻辑状态(如图 7 所示)。对于高速的信号,在传输线中传播时,会引起下面几方面的信号改变。

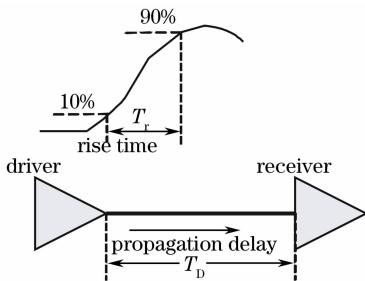


图 7 传输线的定义

Fig. 7 Definition of the transmission line

振铃:传输线的阻抗不匹配时,信号的输出会产生振铃现象。当信号到达负载时,产生了反射。在驱动端,完整的电平转移将发生在反射脉冲到来之前,这时反射脉冲无法被吸收,从而引起信号在驱动端与负载端之间多次反射,在信号线上就表现为信号的振荡,这就是振铃。保持传输线阻抗匹配,减少信号的反射,是消除振铃的主要方法。

地弹:当数字逻辑输出由高电压变为低电压时,器件的管脚就会放电,产生开关电流,这就是电路的开关动作。当大量的开关动作同时由逻辑高变为逻辑低时,由于地线通过电流的能力不够,大量的开关

电流就会引起逻辑地电压发生波动,称之为地弹现象。数字电路造成的地弹噪声和电源扰动,如果耦合到模拟电路中,就会影响模拟电路的工作性能。由于相当多的干扰源是通过电源和地总线产生的,其中地线引起的噪声干扰最大,所以在 PCB 设计时,对地和电源的设计就显得尤为重要。一般来说,同一块 PCB 板上的模拟地和数字地应该独立设计,以便于减少地弹对信号的影响。一般情况下,使用双列直插(DIP)、引脚网格阵列(PGA)等封装的器件驱动较大的容性负载时,容易产生地弹现象。基于这样的考虑,在高速 PCB 设计时,一般选择贴片封装的元件,避免使用插针封装的元件。同时,在高速走线上以及时钟走线上尽量避免过孔的应用。

串扰:串扰是指由于两条或多条信号之间的耦合,信号线之间因互感和互容而引起噪声。容性耦合引发耦合电流,而感性耦合引发耦合电压。在低速电路中,电流沿着阻抗最低的路径流动。高速电路中,电流则沿感抗最小的路径流动。而感抗最低的回路,就是信号线在地层上的投影。在数字电路设计中,通常感性串扰要比容性串扰大,所以重点考虑导体间的互感问题。为了减少串扰,高速电路板一般采用多层电路板,中间的至少一层作为地层,这样来减少电流的回路路径,减少信号线之间因互感和互容引起的噪声。

3 实 验

实验中, FPGA 芯片选择 Altera 公司的 Cyclone 系列型号为 EP1C12Q240C8 的芯片,此款芯片具有高速 I/O 接口,支持高速 LVDS 差分输入和输出,具有优化的 IP 解决方案,数据速率可以达

到 640 Mb/s。并串转化芯片选择的是 MAX 公司的 MAX3890 芯片。该芯片的主要功能有:实现 16 路速率为 155.52 Mb/s 并行数据向 2.5 Gb/s 的转化,适用于 ATM,SDH/SONET。供电电压为 3.3 V,输入并行数据为 LVDS 电平数据,输入的参考时钟频率可以从以下数值中选择:155.52 MHz, 77.76 MHz, 51.84 MHz,或 38.88 MHz,LVPECL 电平的 2.5 Gb/s 的数据和 2.5 GHz 时钟的输出。电平转化芯片选择 MAX9376 芯片,该芯片有两个电平转换器,一个是可以把任意电平信号转化为 LVPECL 电平信号;另一个电平转换器,可以实现任何电平的信号转化为 LVDS 电平。其最高的速率可达 2 Gb/s。信号通过该芯片,会产生 421 ps 的时延,另外最多有 30 ps 的脉冲抖动。对于 2.5 Gb/s 速率直接耦合的激光器驱动芯片,选择美信公司的 MAX3867。该芯片支持 Fabry-Pérot 激光器,分布式反馈激光器(DFB)和垂直腔表面发射激光器(VCSEL);支持速率为 50 Mb/s~2.5 Gb/s 的 LVPECL 电平数据速率输出,LVPECL 的输出有足够的电流驱动 50 Ω 的传输线。它还支持多元协议(MSA)模块,由于具有消光比和平均功率自动双环路控制功能,所以不需要对激光器老化和退化补偿所需的温度校准。为了有足够的驱动能力,其供给电压为 5 V。另外,因为在直接耦合时,没有足够的余量,所以实验中采取电容耦合的方式,耦合电容值为 0.056 μ F。

图 8 所示为并串转化芯片 MAX3890 输出的 LVPECL 电平的 2.5 Gb/s 差分信号波形图。图 9 为 F-P 腔激光器输出的 2.5 Gb/s 光信号的眼图。该眼图显示,尽管信号的开度能满足要求,但是信号的波形有比较大的上冲和下冲,这是由于激光器驱动和激光器之间的连接,依然存在着难以控制的寄

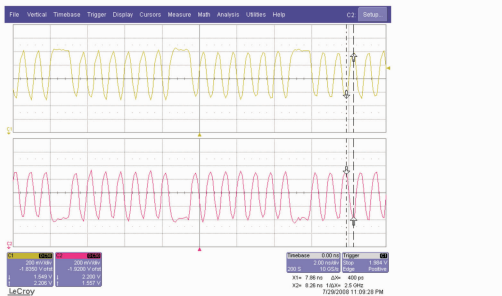


图 8 MAX3890 输出的 2.5 Gb/s 差分信号波形图
Fig. 8 Waveform of the 2.5 Gb/s differential signal from MAX3890

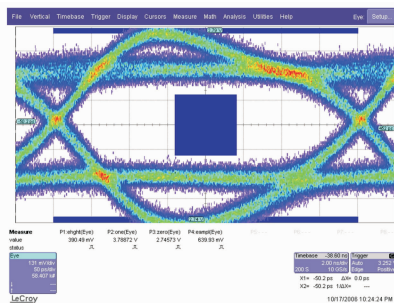


图 9 2.5 Gb/s 光信号的眼图

Fig. 9 Eye diagram of the 2.5 Gb/s optical signal
生电感和寄生电容。进一步改善信号的质量,是下一步需要做的。

4 结 论

分析了激光器驱动和激光器之间高速连接的原理,得出激光器驱动输出的偏置电流和调制电流之间的互相影响,不能独立调节,通过理论分析,得出使激光器偏置电流和调制电流稳定工作的条件。最后,提出了一种实现直接调制的 2.5 Gb/s 的信号源的实现方法,并利用高速 PCB 布线技术,实现了 2.5 Gb/s 的直接调制激光器的研制。

参 考 文 献

- 1 Yasuhiro Matsui, Daniel Mahgerefteh, Xueyan Zheng *et al.*. Chirp-managed directly modulated laser (CML) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 385~387
- 2 B. J. Flanigan, I. E. Carroll. High speed direct modulation of diode lasers: towards terabit communications [J]. *IEEE Colloquium on Towards Terabit Transmission*, 1995: 1/1~1/6
- 3 I. Papagiannakis, C. Xia, D. Klonidis *et al.*. Study of the electronic dispersion compensation for 2.5 and 10 Gb/s transient and adiabatic chirped directly modulated lasers[J]. *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2007, **16**: 59~63
- 4 G. L. Lippi, N. Dokhaney, X. Hachair *et al.*. High speed direct modulation of semiconductor lasers [C]. *SPIE*, 2002, **4871**: 103~114
- 5 Sheng Jiye, Sheng Xinzhi, Wu Chongqing *et al.*. 622 Mb/s optical add module in O-RPR network [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(6): 41~43
盛积业,盛新志,吴重庆等. O-RPR 网络中 622 Mb/s 光上路源的研制[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(6): 41~43
- 6 Wang Dan, Wu Chongqing, Mu Cheng *et al.*. Development of 2.5 Gb/s poisson distribution data flow generator[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(3): 62~64
王丹,吴重庆,程木等. 2.5 Gb/s 泊松分布数据流发生器的研制[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(3): 62~64
- 7 MAXIM high-frequency/fiber communications group, interfacing maxim laser drivers with laser diodes[J]. *Lightwave Magazine*, 2000