

doi:10.13756/j.gtxyj.2014.05.015

光电器件研究与应用

外腔可调谐激光器调制特性研究

翟宇佳¹, 傅焰峰², 董旭光²

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要:随着 WDM-PON(波分复用-无源光网络)应用中对低成本无色光发射模块需求的日益增长, 基于混合集成的小型化外腔可调谐激光器, 凭借其实现工艺简单、信号质量好和调谐范围宽等优良特性, 受到越来越多的关注。文章在研究分析外腔激光器调制特性的影响因素的基础上, 对特定结构的小型化外腔可调谐激光器进行了实验开发和特性研究, 在激光谐振腔腔长对调制带宽的影响方面得到了一些有价值的结论, 这可为后期器件开发提供理论支持。

关键词:小型无色光发射模块; 外腔可调谐激光器; 调制带宽

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2014)05-0048-04

Research on the modulation characteristics of external cavity tunable lasers

Zhai Yujia¹, Fu Yanfeng², Dong Xuguang²

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: With the daily increasing demands for the applications of low-cost colorless optical transmitter modules in WDM-PON, hybrid integrated miniaturized external cavity tunable lasers are receiving more and more attention for their simple implementation process, high signal quality, wide tuning range and other excellent features. On the basis of investigating and analyzing the factors affecting their modulation characteristics, this paper experimentally develops specifically structured miniaturized external cavity tunable lasers and analyzes their characteristics, obtaining some valuable conclusions concerning the impacts of laser resonator cavity length on modulation bandwidth and provides theoretical support to the device development at the later stages.

Key words: miniaturized colorless optical transmitter module; external cavity tunable laser; modulation bandwidth

0 引 言

外腔可调谐激光器凭借其输出激光线宽窄、宽带可调谐和波长稳定等优良特性, 在光通信领域、探测领域及医疗应用中受到广泛关注^[1]。现有的外腔可调谐激光器实现单模激射, 一般需要 TOF(可调滤波器)来实现模式选择, TOF 大多是无源器件, 而提供腔内增益的是有源器件, 所以基于混合集成的外腔可调谐激光器在耦合效率、散热特性和封装尺寸方面都提出了更高要求。外腔可调谐激光器的窄线宽是因其具有较长的谐振腔腔长, 但较长外腔会影响其频率响应, 进而影响整个发射模块直接调制的最高速率。本文主要分析和研究了外腔可调谐激光器的调制特性的影响因素, 通过模拟和实验, 分析了谐振腔腔长对可调谐激光器调制特性的影响。研究结果表明, 如果实际需要外腔可调谐激光器直接调制 2.5 Gbit/s 的发射信号, 那么谐振腔腔长需控制在 40 mm 以下。

1 外腔可调谐直调激光器

现阶段, 按集成方式可将外腔可调谐激光器分

为混合集成和单片集成两类, 但其原理都可以归结为引入外腔强反馈和模式锁定器件来实现单模激射和模式可调谐。如图 1 所示, 反射面 R_1 和 R_2 组成谐振腔, 增益芯片提供腔内增益, 模式锁定器件实现单模激射, 其中 L_1 为外腔可调谐激光器增益腔腔长, L_2 为外腔可调谐激光器的腔长。基于混合集成的外腔可调谐激光器, 增益芯片一般是三五族元素, 而模式锁定器件一般为硅材料和聚合物^[2], 这种混合集成的结构增加了封装工艺的难度。当对外腔可调谐激光器进行直接调制时, 腔内会产生与稳态时不一样的现象, 如光子对注入电子的响应、张弛振荡和自脉冲等。这些特征会对外腔可调谐激光器^[3]的直接调制产生重要影响。

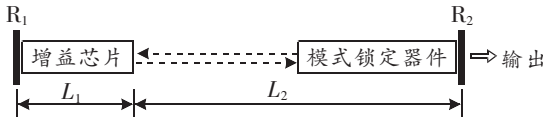


图 1 外腔可调谐激光器结构图

外腔可调谐激光器的直接调制能力需从其建立激光输出的瞬态过程来分析。图 2 为外腔可调谐激光器的瞬态过程, 在初始时刻 $t=0$ 时, 在外腔可调谐激光器上外加大于阈值的电流, 由于要经历无源

腔和有源腔的传输损耗,所以当 $t = t_d$ 时,腔内的载流子才能达到阈值 N_{th} ,在这段时间载流子浓度 < 1 ,所以激射光子很少,激射光强很弱。当相对载流子浓度 > 1 ,受激辐射强度依指数迅速上升,当注入电子速率与电光复合速率达到平衡时,光强最大,这段时间称为开启时间 t_g ,再经历一段张弛振荡时间,最终得到稳定的光强输出。

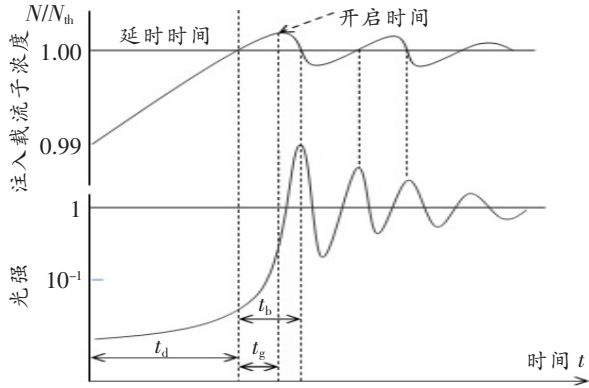


图2 外腔可调谐激光器瞬态模型

由于构成外腔可调谐激光器的无源外腔腔长较长,因此在分析外腔可调谐激光器时,腔内时间延时 t_d 成为限制直调速率的主要因素,而 t_d 主要体现为腔内的光子寿命 τ_p 与电脉冲上升时间 t_r 的影响。本文主要研究外腔可调谐激光器调制特性,故暂不考虑 t_r 。

光子寿命 τ_p 主要由组成谐振腔反射镜的反射系数 R_1 、 R_2 ,腔内损耗 α_i 和谐振腔腔长 L 决定,其数学表达式为

$$\tau_p^{-1} = \frac{c}{n} \left(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad (1)$$

其中, L 、 R_1 、 R_2 和 α_i 是主要影响因素。

直接调制激光器时,半导体激光器的响应带宽 ω_r [4] 为 $\omega_r = \sqrt{AS/\tau_r}$,式中, A 为腔内的微分增益, S 为有源区的光子数密度, τ_r 为谐振腔内的平均光子寿命。

从上述理论推导可得出,在保持 R_1 、 R_2 和 α_i 不变的情况下,只控制外腔可调谐激光器腔长 L ,就能得到谐振腔腔长对可调激光器频率响应的限制,此即谐振腔腔长对外腔可调谐激光器的直接调制的作用机理。

2 模拟外腔激光器的调制特性分析

从光子在谐振腔中的寿命和半导体激光器的响应带宽的计算公式可知,对于某种确定的有源芯片,即谐振腔的面积 A 、有源区的光子数密度 S 已知,其

组成的外腔可调谐激光器的光子寿命 τ_p 和外腔可调谐激光器的响应带宽 ω_r 只与腔内损耗 α_i 、腔长 L 和组成谐振腔的反射镜的反射系数 R_1 、 R_2 相关。增加谐振腔的长度,将明显地增加光子寿命。同时光纤耦合效率也对光子寿命有影响[5],提高耦合效率会增加光子寿命,约束高速直接调制最高速率。但是,提高耦合效率是降低阈值、提高输出效率所必须的,因此不能通过降低耦合效率来提高调制速率。

根据上述光子寿命与响应带宽的计算公式,应用 Matlab 软件对外腔可调谐激光器的谐振腔腔长与光子寿命和响应带宽的关系进行模拟。表1为模拟时设定的外腔可调谐激光器参数。图3的模拟结果表明,光子寿命与外腔腔长呈正相关关系,在设定腔损的条件下,腔长超过 70 mm 时,光子寿命的变化幅度较小。

表1 模拟时设定的外腔可调谐激光器参数

参数名称	数值设定
增益芯片的长度 l_{gain}/mm	0.5
外腔腔长 $l_{external}/\text{mm}$	0~100
内部损耗因子 α_i/m^{-1}	115.4
前反射镜反射率 $R_1(\%)$	85
后反射镜反射率 $R_2(\%)$	50

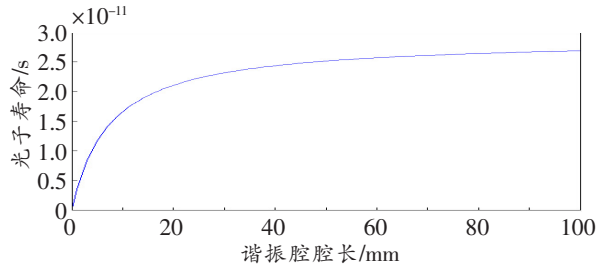


图3 光子寿命与谐振腔腔长的关系

图4为外腔可调谐激光器频率响应随着谐振腔腔长的变化关系曲线。随着外腔可调谐激光器腔长的增加,激光器的频率响应逐渐降低,当谐振腔腔长 > 40 mm时,激光器的频率响应 < 2 GHz。本文模拟时基于腔损比较大的情况,其频率响应较高,但此

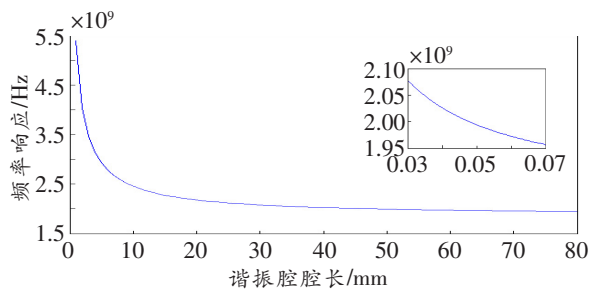


图4 频率响应与腔长的关系曲线

时激光器的输出功率很小,已经接近或小于实际可用的输出功率。本文研究外腔可调谐激光器谐振腔长对激光器频率响应的限制,在实际光发射模块设计中,可对各项参数进行优化修订。

3 实际测量外腔激光器的频率响应

使用 53 和 87 mm 两种腔长的外腔可调谐激光器对上述结论进行了验证,两者的腔内部增益及外部反馈均相同。实验中通过高频探针接触芯片电极直接测量。

研制开发的外腔可调谐激光器的结构如图 5 所示,采用 SOA(半导体光放大器)和模式选择 TOF 方案组成外腔可调谐激光器,SOA 提供内部增益,TOF 提供外腔和模式选择的功能,SOA 一端做 85% 的反射膜,另一端做增透膜,TOF 侧与 SOA 接触端为增透膜,输出端为 50% 的反射膜。利用不同光学长度的 TOF 实现不同腔长的外腔可调谐激光器。



图 5 外腔可调谐激光器的结构图

根据图 6 展开对不同外腔可调谐激光器频率响应的测试。为了进一步分析外腔可调谐激光器的高频响应,本测试实验搭建高频测试平台并使用高频探针为外腔可调谐激光器提供高频信号,直流电源提供外腔可调谐激光器的直流偏置,随后网络分析仪提供的小信号通过偏置网络进行复用,通过高频探针给激光器提供高频电信号,激光器响应激励光信号,并将光信号通过尾纤回传给网络分析仪,最后通过网络分析仪的电光测试数据,绘制并分析外腔可调谐激光器的频率响应强度随频率变化的曲线图。

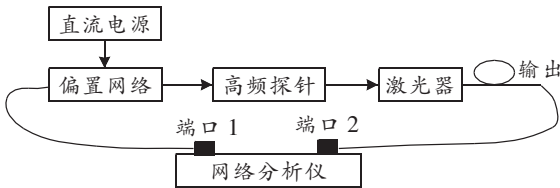


图 6 外腔可调谐激光器的频率响应测试结构图

两种外腔可调谐激光器频率响应的电光分析如图 7 所示,两种外腔可调谐激光器的直流偏置均为 50 mA,使用相同的射频探针,图中 53 mm 腔长的外腔可调谐激光器,其 3 dB 频率响应可以达到 1.14 GHz,87 mm 腔长的外腔可调谐激光器,测量

出其 3 dB 频率响应是 0.657 GHz。由实验结果可知,外腔可调谐激光器谐振腔腔长会影响光子在谐振腔内的寿命,谐振腔腔长与外腔可调谐激光器的光子寿命呈正比,因而会导致其频率响应的降低。

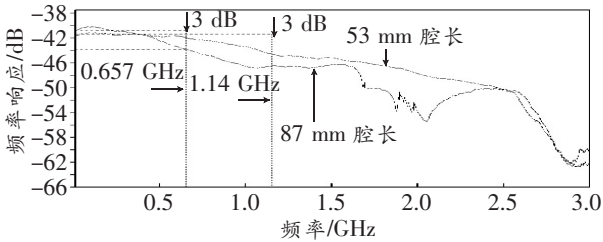


图 7 53 和 87 mm 两种腔长的频率响应

从外腔可调谐激光器的模拟研究可知,谐振腔腔长分别为 53 和 87 mm 时,响应带宽分别为 2 和 1.8 GHz。而实测开发期间响应带宽分别为 1.14 和 0.657 GHz。误差源于外腔可调谐激光器本身实验器件的阻抗误差、半导体内部的掺杂噪声、偏置电流选取和测量仪器的误差。

研究外腔可调谐激光器并最终应用于光发射模块进行信号发射。1.25 Gbit/s 信号直接调制腔长为 87 和 53 mm 的外腔可调谐激光器的眼图如图 8 和 9 所示。

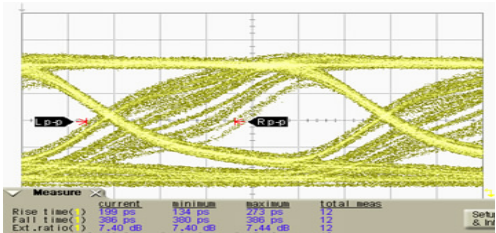


图 8 腔长为 87 mm 时直调 1.25 Gbit/s 信号的接收眼图

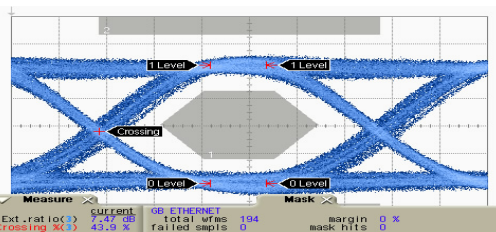


图 9 腔长为 53 mm 时直调 1.25 Gbit/s 信号的接收眼图

测试结果表明,消光比分别为 7.4 和 7.47 dB,从眼图中可知,腔长为 87 mm 的外腔可调谐激光器的上升响应时间较长,测试结果证实与其较长的光子寿命相关。在实际应用中,如需要外腔可调谐激光器直接调制 2.5 Gbit/s 的数字信号,外腔腔长应控制在 40 mm 以内,并且要求相对较高的腔损。

4 结束语

文章研究分析了外腔可调谐激光器直调能力限制因素,研制开发不同谐振腔腔长的外腔可调谐激光器并研究其腔长对其频率响应的作用,为实际 WDM-PON 接入网应用外腔可调谐激光器作为小型化、节能化光发射模块提供理论和实践的支持。在实际应用中,如需发射 2.5 Gbit/s 的数字信号,构成外腔可调谐激光器的腔长应控制在 40 mm 以内,在设计外腔激光器腔长的同时,应考虑对应腔损的优化。当外腔可调谐激光器发射速率为 10 Gbit/s 时,要实现更短的外腔腔长,则需要更小尺寸的分立元件。

(上接第 15 页)

页面给用户,告知服务的生效情况;(8) 业务生效到期后,平台下发业务解除指令,智能网关通过服务推送页面告知用户服务已经到期,临时带宽提速取消。

4 实验和仿真结果

4.1 旁路分析技术仿真

智能网关具备硬件数据转发能力,采用仪表模拟 500 Mbit/s 用户业务流。智能网关未启用 DPI 识别业务时,用户业务流全部通过智能网关。智能网关启用基于旁路分析的 DPI 识别业务时,500 Mbit/s 的数据流只有 1% 的下降。仿真结果表明,采用旁路分析技术对设备性能影响较小,如图 4 所示。

Streams > Detailed Stream Results				
Change Counter Mode: Basic Mode				
Basic Counters Errors Basic Sequencing Advanced Sequencing Histograms				
Name/ID	Tx Port Name	Rx Port Names	Tx Rate (bps)	Rx Rate (bps)
500Mbps 旁路流/65540	Port //2/1	Port //2/2	490,197,000	489,619,256

图 4 启用旁路分析技术用户业务流仿真结果

4.2 QoS 保障仿真

采用仪表分别模拟语音通话(1 Mbit/s)、高清视频(8 Mbit/s)、上网浏览(2 Mbit/s)和高速下载(8 Mbit/s)业务流。上行总带宽限速 10 Mbit/s,在未启用智能网关 QoS 保障时,语音通话、高清视频、上网浏览和高速下载均只有部分业务流通过。启用基于 DPI 的智能网关业务 QoS 保障后,语音通话和高清视频业务流全部通过智能网关,上网浏览业务流部分通过,高速下载业务流不通过,如图 5 所示。仿真结果表明,基于 DPI 的智能网关业务 QoS 保障

参考文献:

[1] Ye C. Tunable external cavity diode lasers [M]. Singapore: World Scientific, 2004:3-5.

[2] Kaminow Ivan, Li Tingye, Willner Alan E. Optical Fiber Telecommunications [M]. Oxford United States: ACADEMIC PRESS, 2013:26-35.

[3] 黄德修. 半导体光电子学 [M]. 成都: 中国电子科技大学出版社, 1989:144-152.

[4] Zhao Tong-gang, Ren Jian-hua, Wen He, et al. High Frequency Modulation Characteristic Analysis of Wavelength [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2005,28(4):786-787.

[5] Qu Rong-hui. High frequency modulation characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. Acta Optica Sinica, 2001,21(11):1360-1363.

能够确保用户高优先级业务流顺畅通过。

Streams > Detailed Stream Results				
Change Result View				
Basic Mode				
Basic Counters Errors Basic Sequencing Advanced Sequencing Histograms				
Name/ID	Tx Port Name	Rx Port Names	Tx Rate (bps)	Rx Rate (bps)
语音通话/65536	Port //2/1	Port //2/2	977,600	976,000
高清视频/65537	Port //2/1	Port //2/2	7,844,792	7,839,992
上网浏览/65538	Port //2/1	Port //2/2	1,961,592	1,261,328
高速下载/65539	Port //2/1	Port //2/2	7,843,184	0

图 5 启用 QoS 保障用户业务流仿真结果

带宽提速方案基于 DPI 的业务发现和流量统计分析,需要电信运营商平台支撑,本文不做实验分析。

5 结束语

基于 DPI 的智能网关业务 QoS 保障和带宽提速方案,业务识别通过 DPI 的旁路识别技术,可以优先保障用户的 OTT、视频和语音业务;在下载、高清视频等高带宽应用导致存在带宽瓶颈时,临时性地提高用户的业务带宽,在技术上是可行的,这些都增强了用户体验,提升了电信运营商运营服务质量,为“宽带中国”保驾护航。

参考文献:

[1] Kumar S, Dharmapurikar S, Yu F, et al. Algorithms to accelerate multiple regular expressions matching for deep packet inspection [C]// SIGCOMM, 2006. Pisa, Italy: the Association for Computing Machinery, 2006: 339-350.

[2] Dharmapurikar Sarang, Krishnamurthy Praveen, Sproull Todd S, et al. Deep Packet Inspection using Parallel Bloom Filters [J]. IEEE Micro, 2004, 24(1): 52-61.