

文章编号: 0258-7025(2005)04-0445-04

新型密集波分复用精确波长激光器

柯昌剑, 刘德明, 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 报道了一种新型外腔精确波长激光器。该器件由透镜光纤、单端增透的激光二极管(LD)芯片、准直透镜、窄带滤光片和高反镜依次级联而成,使用窄带滤光片作为选频和波长锁定元件。推导了该激光器的外腔等效反射率,简要分析了静态相关特性,给出了初步实验结果:窄带滤光片的插入损耗为 0.5 dB,自由光谱范围大于 40 nm,谱线宽度小于 1.7 nm。外腔激光器在较大的注入电流范围内实现了稳定的单纵模输出,阈值电流为 25 mA,边模抑制比高达 40 dB,输出波长符合国际电信联盟(ITU-T)建议的波长标称值。该器件具有制作简单、成本低廉等优点,特别适用于基于波分多址(WDMA)技术的以太网无源光网络(EPON)系统。

关键词 激光技术;精确波长激光器;以太网无源光网络;波分多址;窄带滤光片;密集波分复用

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

A Novel Dense Wavelength Division Multiplexing Laser Diode with Specific Wavelength

KE Chang-jian, LIU De-ming, HUANG De-xiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A novel external cavity laser with specific wavelength utilizing narrow-band-pass filter as wavelength selective component is presented. It consists of lensed fiber, semiconductor laser diode chip, collimating lens, narrow-band-pass filter, and high reflectivity planar reflector in series. Static characteristics of the laser are analyzed. All the calculations are based on the rate equation and the effective reflection coefficients of the compound cavity of the external cavity laser. Experimental result shows that the narrow-band-pass filter has the specifications with insertion loss about 0.5 dB, free spectral range more than 40 nm and -3 dB bandwidth less than 1.7 nm. Good single mode operation of the external cavity laser over wide injected current range is obtained with threshold current about 25 mA, side mode suppression ratio (SMSR) better than 40 dB. And the oscillation frequency of the laser can be emitted precisely according to the ITU-T wavelength nominal value. For the excellent performance of this laser, it can be really used as promising light source for Ethernet passive optical network (EPON) based wavelength division multiple access (WDMA).

Key words laser technique; specific wavelength laser diode; Ethernet passive optical network; wavelength division multiple access; narrow-band-pass filter; dense wavelength division multiplexing

1 引 言

随着信息业务的迅速发展,宽带接入的需求日益增长。以太网与无源光网络技术结合的产物——“以太网无源光网络(EPON)”越来越显示出强大的生命力。在现有的以太网无源光网络系统中,下行信号传

输采用广播方式,上行信号传输则分为时分多址(TDMA)和波分多址(WDMA)两种。时分多址方式受突发式光发送模块性能的影响,实际应用时不能很好地满足人们期望的宽带接入需求。而波分多址方式采用波长作为接入网用户标识,利用波分复用技术

收稿日期:2004-01-05;收到修改稿日期:2004-07-14

基金项目:国家 863 计划(2002AA312130 和 2003AA312060)资助项目。

作者简介:柯昌剑,(1977—),男,湖北武汉人,华中科技大学光电子工程系博士研究生,讲师,主要从事高速光通信中关键光电子器件和光纤传感中关键技术的研究与开发。E-mail:cjke@mail.hust.edu.cn

实现接入用户的宽带信号传送,可以避免时分多址中光网络单元(ONU)测距、突发式光发送模块设计、快速比特同步等诸多技术难点,同时在传输带宽、网络管理以及系统性能升级方面都有着明显的优势,是以太网无源光网络技术的发展方向^[1]。

采用波分多址技术时,在光网络单元光发送模块的设计中需要使用密集波分复用(DWDM)精确波长激光器。常见的精确波长激光器主要是分布反馈式(DFB)半导体激光器。由于分布反馈式激光器容易受到温度、注入电流等因素影响而产生激光波长的漂移,实际应用时必须制作精确的控制装置将激光器的工作波长锁定在国际电信联盟(ITU-T)建议的标称值上,从而导致系统成本的增加。

采用光纤光栅作为选频元件的精确波长激光器,其选频元件的折射率温度稳定性优于半导体材料,并且反射波长不会随着注入电流的变化而改变,所以该类激光器具有较低的啁啾和良好的单纵模特性^[2]。但是光纤光栅容易受到应力和温度的影响,反射波长的温度稳定性仍然不够理想^[3],实用时也需要使用相关装置或者特殊的封装形式来保证激光波长的稳定工作。

本文采用窄带滤光片作为选频元件的精确波长激光器相比于光纤光栅型器件,具有良好的波长温度稳定性,能够实现精确波长自锁定,尤其适合于以太网无源光网络中波分多址技术应用的需要。

2 理论设计

窄带滤光片型精确波长密集波分复用激光器的基本结构如图 1 所示,由压应变量子阱法布里-珀罗激光器芯片、准直透镜、密集波分复用窄带滤光片和反射镜依次级联而成。激光二极管(LD)芯片的一个端面上镀有高效增透膜,另一个端面为自然解理面且与反射镜构成外腔精确波长激光器谐振腔的两个腔面。由激光二极管芯片增透面输出的放大自发辐射

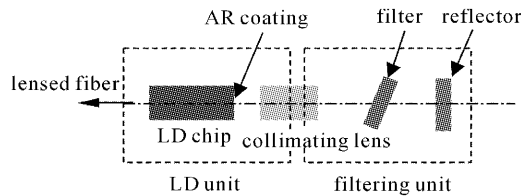


图 1 窄带滤光片精确波长 DWDM 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of specific wavelength DWDM laser diode utilizing narrow-band filter

(ASE)光通过窄带滤光片选频后,在谐振腔中振荡,形成精确波长光激射。所使用的密集波分复用窄带滤光片具有透射中心波长可调节、温度稳定性好(漂移小于 $0.002 \text{ nm}/^\circ\text{C}$)等优点,可以实现激光器的精确波长输出和自锁定工作,因而无需另加温度控制装置,系统应用成本也得以降低。

类相比于光纤光栅外腔激光器的有关理论,在外腔强反馈的工作条件下,窄带滤光片型精确波长激光器中外腔的等效振幅反射率 r_{eff} 可表示为

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 + r_3 \exp(i2\beta_2 l_2)}{1 + r_2 r_3 \exp(i2\beta_2 l_2)}, \quad (1)$$

其中 r_2 为激光二极管芯片增透面的振幅反射率, r_3 为滤波单元(由密集波分复用窄带滤光片和反射镜构成)的振幅反射率, β_2 为外腔中的传播常数, l_2 为外腔的长度, r_3 可表示为

$$r_3 = \eta_t f r_m, \quad (2)$$

其中 η_t 为使用准直透镜时增益单元(即激光二极管芯片)与滤波单元之间的耦合效率, f 为窄带滤光片的振幅透过率函数, r_m 为反射镜的振幅反射率。

激光二极管芯片出射高斯光束在垂直于结平面和平行于结平面方向上的振幅具有相似的表达式^[4]。但是由于有源区横截面几何尺寸在两个方向上的差异,出射高斯光束经过准直透镜后在这两个方向上会具有不同的束腰位置和瑞利区长度。因此设计时应使激光二极管芯片从增透面出射的光束经准直透镜准直后在两个正交方向上的束腰都与滤波单元中高反镜的反射面重合,并且具有相近的瑞利区长度。这样才能有效地减小激光器的腔内损耗,降低阈值电流,增强工作的稳定性。

根据速率方程计算可以得到窄带滤光片型精确波长激光器的阈值电流表达式^[5]

$$I_{\text{th}} = e l_1 w d \frac{N_0 \Gamma a \tau_s + \alpha + \frac{1}{l_1} \ln\left(\frac{1}{r_1 |r_{\text{eff}}|}\right)}{N_0 \Gamma a \tau_s}, \quad (3)$$

其中 e 为电子电量, l_1, w, d 分别为激光二极管有源区的长度、宽度和厚度, N_0 为透明载流子浓度, Γ 为光场限制因子, a 为 $g-N$ 曲线的梯度常数, τ_s 为自发辐射载流子寿命, α 为吸收系数, r_1 为激光二极管芯片自然解理面的振幅反射率。从(3)式可以看出,激光器的阈值电流随着增益单元与滤波单元耦合效率的增加呈下降趋势;提高滤波单元的反射率会使激光器的阈值电流变小,但是也会降低激光器的输出效率^[6]。因此必须对滤波单元的参数进行合理的设计和选择:既使激光器的阈值和工作电流较低,同时又要保证较高的输出效率。

边模抑制比是衡量单纵模激光器特性的一个重要参数。当增益单元中激光二极管芯片的增益峰和滤波单元中窄带滤光片的透射峰比较接近,滤波单元的等效反射率取为 60%~70% 时,激光器的边模抑制比特性最佳^[6]。否则,滤波单元的等效反射率应随其差值的变大而相应增加。

对于确定类型的管芯和一定的输出功率,器件最高调制速率反比于光子寿命的平方根。如果要求器件能够在 1 GHz 以上的调制速率下工作,外腔的等效长度应该小于 40 mm^[7]。虽然增益单元与滤波单元耦合效率、滤波单元等效反射率和激光二极管芯片后腔面反射率的增大将减小光子损耗,延长光子寿命,但它们对调制速率的影响相对较小。因此要在降低阈值、提高效率的前提下获得较高的调制速率,应在尽可能提高增益单元与滤波单元耦合效率、合理选择滤波单元反射率的同时,着重设计外腔的长度,以达到所期望的调制速率。

3 实验结果

实验中使用的激光二极管芯片,采用工作波长在 1550 nm 附近的法布里-珀罗激光器经单腔面增透而得到,“后”端面的反射率约为 32%，“前”端面的反射率在 1×10^{-3} 以下,有源区长度为 300 μm 。注入电流 45 mA 时,增益峰值波长约为 1530 nm。准直透镜采用 SLW-1.8 型自聚焦透镜,数值孔径 $\text{NA}=0.46$ 。反射镜在波长 1550 nm 处的反射率为 99.9%,反射带宽大于 80 nm。密集波分复用窄带滤光片采用具有低热膨胀系数和良好温度稳定性的熔融石英材料经光学精细加工制得,滤光片的两个通光面均镀有高反膜以形成固体法布里-珀罗腔。实验中滤波单元等效反射率约为 70%,满足外腔强反馈工作条件。激光器的输出采用研磨制备的锥状透镜光纤与激光二极管管芯耦合来实现,耦合效率约为 30%。激光器在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下无制冷工作。

图 2 所示为密集波分复用窄带滤光片的透射光谱,其透射峰值波长为 1531 nm, -3 dB 带宽 1.7 nm,插入损耗 0.5 dB,自由光谱范围(FSR)大于 40 nm。

图 3 所示为密集波分复用窄带滤光片透射波长随入射角度的变化关系。随着滤光片入射角度的增加,透射波长将向短波方向移动。因此可以通过改变滤光片的入射角度来实现腔内谐振频率的调节,从而改变激光器的激射波长,使其符合国际电信联盟建议的波长标称值。

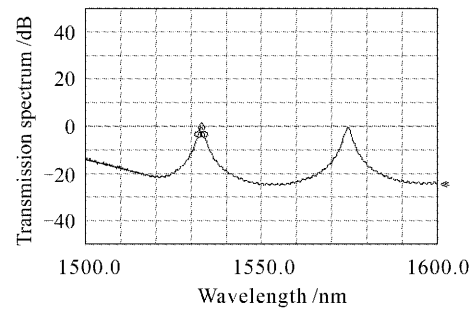


图 2 窄带滤光片的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectrum of narrow-band-pass filter

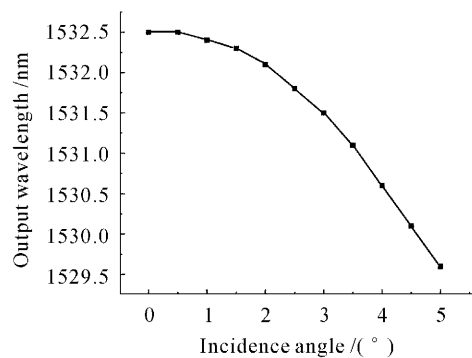


图 3 窄带滤光片透射波长随入射角度的变化关系

Fig. 3 Transmission wavelength of narrow-band-pass filter versus incidence angle

图 4 给出了精确波长激光器的输出光谱特性。通过调节滤光片的角度,激光器精确地工作在国际电信联盟建议的 100 GHz 密集波分复用系统标称波长值上(C 带,57 号通道,1531.90 nm)。同时还可以观察到,激光器激射波长主峰左右各约 40 nm 处均存在一个较小的次峰,它与滤光片透射光谱的自由光谱范围是一一对应的,因此有力地证明了激光器的激射波长主要是由滤光片来选取和决定的。

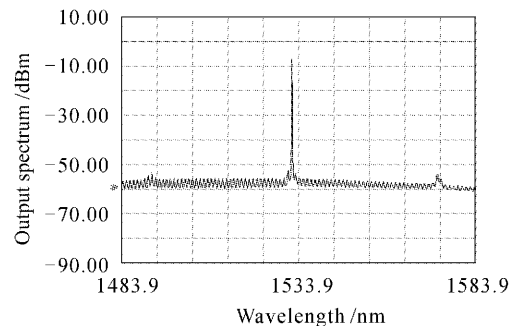


图 4 注入电流为 45 mA 时激光器的输出光谱特性

Fig. 4 Characteristic of output spectrum when injected current is equal to 45 mA

图5所示为激光器输出光谱的精细结构。从该图可以得出,在输出光谱的主峰两侧有很多微小的周

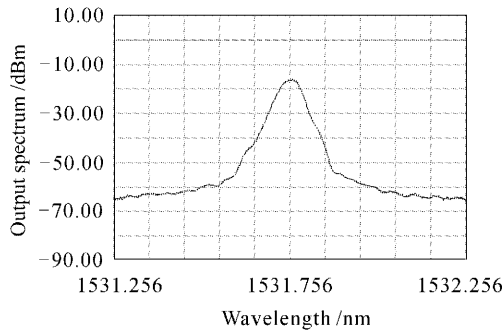


图5 激光器输出光谱的精细结构

Fig. 5 Fine structure of output spectrum

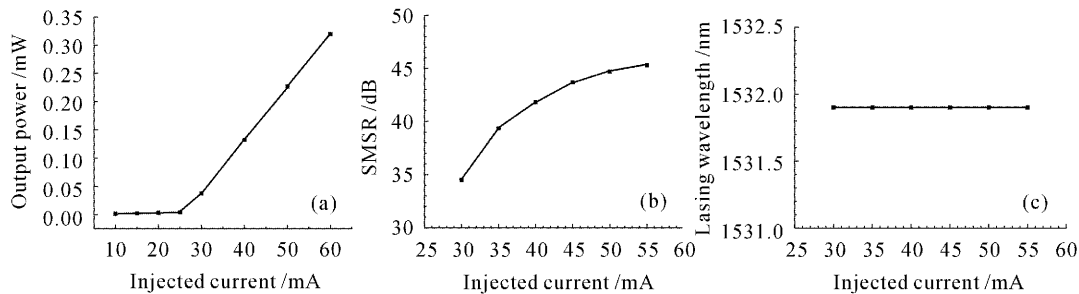


图6 输出功率(a),边模抑制比(b)和激光波长(c)随注入电流的变化关系

Fig. 6 Output power (a), SMSR (b) and lasing wavelength (c) versus injected current

4 结 论

报道了采用窄带滤光片作为选频和波长锁定元件的精确波长密集波分复用激光器理论设计和实验结果。该激光器具有输出光谱边模抑制比高、波长稳定性好、结构简单、成本低廉等优点,适合在波分多址以太网无源光网络系统中应用。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongqiao, Ke Changjian, Huang Dexiu. Analysis and realization of key technology in EPON based WDM [J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(2):39~40
王红桥,柯昌剑,黄德修. 基于 WDM 方式的 EPON 关键技术分析与实现[J]. *光通信技术*, 2004, **28**(2):39~40
- 2 F. N. Timofeev, P. Bayvei, J. E. Midwinter *et al.*. Dense WDM transmission in standard fibre using directly-modulated fibre grating lasers at 2.6 Gbit/s [C]. *Proc. ECOC*, 1997, (448):1~4

期性起伏,其间隔约为 0.04 nm。据此推断在外腔强反馈工作条件下,激光器激射波长的精细模式间隔约为 0.04 nm,谐振腔等效长度约为 20 mm,因此适合于 1.0 Gbit/s 及以下的调制速率。

图 6(a)给出了激光器的功率-电流特性曲线。通过优化设计,该激光器的阈值电流约为 25 mA,斜率效率 0.01 mW/mA。

图 6(b)为边模抑制比(SMSR)随注入电流的变化关系,图 6(c)为激射波长随注入电流的变化关系。随着注入电流的增加,边模抑制比明显改善,而激射波长却不发生变化。这说明采用窄带滤光片作为激光器的选频元件,具有很好的波长-电流稳定性。

- 3 Toshio Takagi, Takashi Kato, Goro Sasaki *et al.*. Fiber-grating external-cavity laser diode module for 2.5 Gb/s dense WDM transmission [C]. *Proc. ECOC*, 1998, 81~82
- 4 Kyung S. Lee, Frank S. Barnes. Microlenses on the end of single-mode optical fibers for laser applications [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(19):3134~3139
- 5 K. Kallimani, M. J. O'Mahony. Calculation of optical power emitted from a fibre grating laser [J]. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 1998, **145**(6):319~324
- 6 Luo Ying, Cao Gendi, Geng Jianxi *et al.*. Longitudinal mode characteristics of an external-cavity semiconductor laser with fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3):357~362
罗颖,曹根娣,耿健新等. 光纤光栅外腔半导体激光器纵模特性研究 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(3):357~362
- 7 Qu Ronghui, Geng Jianxin, Zhang Weizai *et al.*. Characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser under high frequency modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11):1360~1363
瞿荣辉,耿健新,张位在等. 光纤光栅外腔半导体激光器的高频调制特性 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(11):1360~1363