

文章编号: 1001-3806(2016)02-0280-04

光通信系统中新型可调谐半导体激光器的设计

胡积宝, 李谋平

(安庆师范学院 物理与电气工程学院, 安庆 246011)

摘要: 为了适应当前光通信系统对波长可调谐激光器的需求, 提出用游标效应来实现波长可调谐的激光器, 设计了一种功率稳定且频率可调的三段式开槽法布里-珀罗结构可调谐半导体激光器, 给出了系统结构的设计原理, 并进行了理论分析和实验验证。取得了三段式开槽法布里-珀罗结构可调谐半导体激光器激光谱叠加图数据, 利用光纤延迟自外差法测量激光器线宽, 对比了3种不同激光器的线宽测量曲线。结果表明, 基于游标效应设计的新型开槽法布里-珀罗可调谐半导体激光器波长调谐机制简单方便, 且具有很好的单模性和信道切换能力。该研究在未来的光通信领域中具有一定的应用价值和实际意义。

关键词: 激光器; 可调谐; 游标效应; 开槽法布里-珀罗结构

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.027

Design of novel tunable semiconductor lasers in optical fiber communication systems

HU Jibao, LI Mouping

(School of Physics and Electronic Engineering, Anqing Teachers College, Anqing 246011, China)

Abstract: In order to reach demands of tunable lasers in the current optical fiber communication systems, a design concept for wavelength tunable lasers was proposed based on vernier effect. A three-section slotted Fabry-Perot tunable semiconductor laser with stable power and adjustable frequency was designed and its design principle of system structure was given. After theoretical analysis and experimental verification, the lasing spectrum overlay data of the three-section slotted Fabry-Perot tunable semiconductor laser was obtained. Its laser line width was measured by using fiber delay self-heterodyne method. Measurement curves of line widths of three different lasers were compared. The results show that the slotted Fabry-Perot tunable semiconductor laser based on vernier effect is simple and convenient. It has good single-mode performance and channel switching capability. In the future, it has some value and practical significance in the field of optical communication.

Key words: lasers; tunable; cursor effects; slotted Fabry-Perot structure

引言

窄线、窄带宽和广泛可调谐激光源在光通信的应用中具有巨大潜力, 在多级调制格式的相干检测中, 低相位噪声的窄线宽激光作为本地振荡器具有重要的应用价值^[1]。波长可调谐半导体激光器是全光网络的关键器件之一^[2], 它具有结构紧凑、大输出功率范围、优良光谱特性和高光效率的特性^[3], 能够降低密集波分复用系统在光源配置与维护上的成本, 实现了波长资源的充分利用, 能够提高系统性能、降低管理复杂度、提高网络系统的性价比^[4]。为了满足上述应用需求, 已有许多方法可以获得可调谐和超窄线宽激

光^[5]。比如, 典型的布喇格光栅型可调谐半导体激光器具有调谐范围宽、边模抑制比高和波长切换快等优点, 但这类器件的制作工艺较为复杂, 涉及有源/无源波导集成、二次外延生长等技术^[6]。近年来, 基于开槽法布里-珀罗 (slotted Fabry-Perot, SF-P) 结构的激光器引起了研究人员的极大关注^[7]。这种器件的制作过程简单, 只需要普通的晶片以及一次外延生长和普通光刻工艺就可以完成器件的制作, 并可以基于这种结构开发出新的、低成本、性能较好的可调谐半导体激光器^[8], 还可通过刻蚀槽将光源与其它光电子器件集成^[9], 因此, 研究可用于光线通信系统的可调谐激光器, 在实际应用中具有重要的意义。

1 游标效应原理

对于依靠载流子注入效应调谐波长的器件来说, 比如波长可调谐激光器, 主要依靠改变注入电流实现波长调谐的效果^[10]。热效应会影响材料的折射率变

基金项目: 安庆师范学院青年基金资助项目 (KJ201212)

作者简介: 胡积宝 (1979-), 男, 副教授, 主要研究方向为光网络、信息处理。

E-mail: hjb179@163.com

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-01-06

化,腔体载流子注入效应与器件热效应对折射率变化的影响效果是相反的,在实际调谐中,这两种效应会相互出现竞争且会互相伴随同时发生^[11];一般来说,当输入电流比较大的时候,器件热效应将占据主导优势,腔体载流子注入效应则比较微弱,当电流较小时,两种效应的作用的结果刚好相反^[12]。

已知单段 F-P 谐振腔的反射谱是周期性梳状反射谱的满足以下方程式^[13]:

$$\Delta f = c/2n_g L \quad (1)$$

式中, Δf 为反射谱周期间隔, c 为真空中光速, n_g 是光纤的群折射率, L 为腔长。对于两段具有不同长度,分别为 L_1 和 L_2 、且 L_1 大于 L_2 的 F-P 谐振腔(R_1 和 R_2)而言,梳状反射谱分别为 Δf_1 和 Δf_2 , 然后调节 L_1 和 L_2 , 使得它们的反射频率同为 f_0 并在腔内形成谐振, 该反射频率 f_0 具有类似梳状谱的周期性, 称为自由光谱范围(free spectra range, FSR) (Δf_{FSR})^[14], 可以用下式表示:

$$\Delta f_{FSR} = \frac{\Delta f_1 \Delta f_2}{|\Delta f_1 - \Delta f_2|} \quad (2)$$

理论上,为实现谐振峰的单模性,在增益窗口下,当 Δf_{FSR} 大于材料增益时,整个腔体内有且仅有光频 f_0 能够同时满足两个谐振腔的谐振条件。当 Δf_1 和 Δf_2 接近时, Δf_{FSR} 范围较大,因此即使 Δf_{FSR} 小于材料增益,可以改变材料增益的形状来获得具有最大增益的光频率 f_0 , 该频率在模式竞争中优势很大,进而可以实现单模输出^[15]。这个设计原理和游标卡尺测量类似,故而称之为游标效应,如图 1 所示。

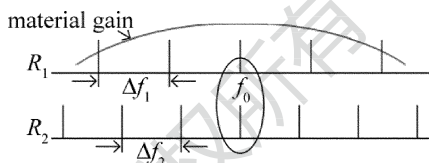


Fig. 1 Reflectance spectrum diagram of each segment of multi-section laser

利用游标效应可以实现波长调谐,频率间隔分别为 Δf_1 和 Δf_2 , 对应波长 $\Delta \lambda_1$ 和 $\Delta \lambda_2$, 谐振输出频率 f_0 对应波长 λ_0 。由于载流子的注入效应会导致反射谱的变化,因此可以在保持 R_1 的注入电流不变情况下,改变 R_2 的注入电流,使其载流子浓度变化,进而获得需要的反射谱。同样,在不考虑热效应的情况下,增加 R_2 的注入电流,短腔 L_2 内的载流子浓度变高,产生的效果相反,从而可以使用游标效应实现所需要的波长的调谐。

2 系统结构设计

根据上述游标效应可以得到多个等间隔的离散信道波长,而信道间隔可以表示为:

$$\Delta f = c/2n_g L_1 \quad (3)$$

从(3)式可知,当注入电流保持不变时, Δf 的大小由腔体长度 L 决定,可用下式来表示信道间隔之间的关系:

$$L_2 = L_1 \cdot \left(1 - \frac{x}{100}\right), (x \in [1, 100]) \quad (4)$$

式中, x 为 $[1, 100]$ 范围内的自然数,调谐短腔 R_2 可以获得的信道数为 $(100/x - 1)$ 个,调谐长腔 R_1 可以获得的信道数为 $(100/x)$ 个,最终能够获得的信道数 m 如下式所示:

$$m = \Delta \lambda_1 / (\Delta \lambda_1 - \Delta \lambda_2) - 1 \quad (5)$$

因此,系统的可调谐范围为 $m \cdot \Delta f$ 。在光通信应用中,通常按照国际电信联盟远程通信标准化组织标准规定的信道波长作为设计参考,比如在 1550nm 波段,100GHz 的间隔大约为 0.8nm,因此一般使用频率单位 GHz 来表示。由游标效应设计的新型 SF-P 可调谐半导体激光器的结构示意图如图 2 所示。

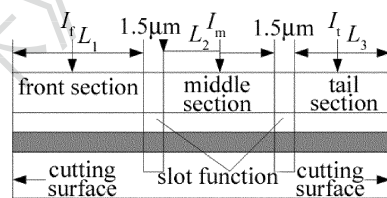


Fig. 2 Structure diagram of a three-section SF-P tunable diode laser

在图 2 中,可调谐半导体激光器一共有 3 段,分为前部、中部和尾部 3 段波导(波导宽度分别为 L_1, L_2, L_3),并分别被前部、中部和后部电极覆盖。 I_1, I_m 和 I_t 分别为前部、中部和尾部 3 段波导的注入电流。每段波导之间由刻蚀深度穿过量子阱层的深刻蚀槽间隔开来,深刻蚀槽宽度为 $1.5 \mu\text{m}$,在靠近前部的出射端有一个深刻蚀面作为反射面,靠近尾部的出射端有一个深刻蚀槽将器件与中部波导分隔开。这个深刻蚀槽在激光器谐振腔中作为反射镜面,并且帮助激光耦合入尾部波导,在尾部波导后面可以连接调制器、光电探测器等器件,并可实现光器件的集成,本设计中并没有为激光器集成任何器件,后续研究可以对光器件的集成进行进一步的探索。通过遗传算法优化后,设定前部波导宽度为 $227 \mu\text{m}$,中部波导宽为 $200 \mu\text{m}$,尾部波导的宽为 $147 \mu\text{m}$,总的宽度为 $574 \mu\text{m}$,其梳状反射谱的频率间隔恰好为 100GHz,因此理论上在不考虑热效应的前提下,可以获得 8 个信道。

3 仿真分析

对于调谐激光器而言,注入电流引起的载流子注入效应和热效应的影响结果是相反的,而且腔体的长度不同,影响的效果也不同。测试过程中,腔体较短

时,热效应驱使出射波长向短波长方向偏移,而载流子注入效应驱使出射波长向长波长方面偏移;腔体较长时,这两种效应导致的结果刚好相反。由于输出的波长与调谐电流成正比,因此一般来说载流子注入效应占据主导地位。长腔的注入电流固定时,调谐短腔体的注入电流,当短腔注入电流小于 60mA 的时候,载流子注入效应占据主导地位,输出的波长与输入电流成正比;短腔注入电流大于 60mA 且小于 90mA 的时候,信道调谐情况没有出现,输出的波长基本恒定不变,热效应与载流子注入效应平分秋色,二者是相互竞争的关系;而当短腔注入电流大于 90mA 的时候,热效应占据主导地位,随着电流的增加,输出的波长反而开始减小。

一般而言,采用较大的注入电流或者温度控制模块即可很容易实现热效应占据主导的调谐功能,热效应调谐的速度比较低,为毫秒量级,而载流子注入效应占主导时,调谐的速度可以达到纳秒级,这个与载流子的寿命限制有关。热效应调谐一般对整个芯片起作用,载流子注入效应只对电路注入部分起作用,适当地利用热效应调谐可以驱使量子阱的增益谱向长波长方面偏移,并一定程度地增加调谐信道,但是热效应的效果一般比较小。仿真结果表明,基于游标效应设计的新型 SF-P 可调谐半导体激光器具有非常好的调谐性能,输出功率相对而言比较均匀,仿真实验中测试了 8 个 100GHz 的符合国际电信联盟远程通信标准化组织的标准通信信道,仿真结果与忽略热效应情况下得到的理论结果完全相符,仿真结果如图 3 所示。

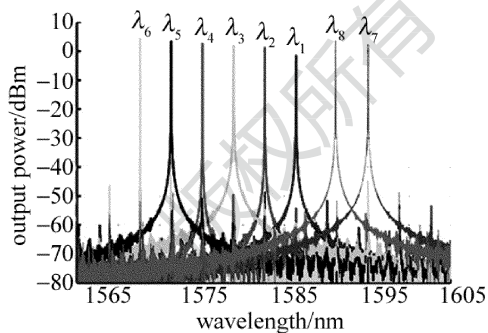


Fig. 3 Lasing spectrum overlay map of a three-section SF-P tunable semiconductor laser

随着温度的升高,激光器的阈值会慢慢增加,对三段式 SF-P 可调谐半导体激光器仿真测试表明,温度为 15℃ 时,激光器阈值电流 $I \approx 60\text{mA}$; 温度升高到 17℃ 后,激光器阈值电流稍微有些增高,但是变化趋势平缓;而温度升高到 26℃ 后,激光器的阈值电流提高到了 70mA 附近,这个结果说明了热效应调谐的速度比较低,与理论分析相符合。

在实验测试时采用光纤延迟自外差法进行激光器线宽测量,如图 4 所示。待测激光器通过隔离器经过耦合器 1 分为两路,其中一路经过一段光纤延迟线与耦合器 2 相连,而另一路则直接与输入耦合器 2,这两路光耦合后通过光电探测器进行光电转换为电信号,该电信号输入频谱分析仪后可得到待测激光器线宽的测量值。在实验测试中,隔离器的作用是防止系统中的反射光对于激光器造成扰动而影响测量结果。

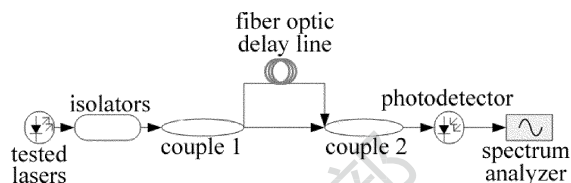


Fig. 4 Schematics of laser linewidth measurement with fiber delayed self heterodyne method

当环境温度为 26℃ 时,实验测试了封装好的设计的三段式激光器,测量输出功率大约为 2mW。为了对比测量效果,采用了两个商用激光器进行了对比测试:阿尔卡特公司的分布反馈式激光器 Alcatel 1905 (标定线宽为 3MHz ~ 5MHz,输出功率为 5.5mW) 和安捷伦公司的外腔式可调谐激光器 Agilent 81600B (标定线宽为 120kHz,输出功率为 1.7mW)。测量结果如图 5 所示,从图 5 中可以明显看出,Alcatel 1905 与设计的三段式激光器的线宽远远小于 Agilent 81600B 的线宽,Agilent 81600B 激光器的线宽测量得到的结果大约为 2.6MHz,而本文中设计的三段式激光器的测量曲线与 Alcatel 1905 与几乎重合,大约都处在 100kHz。

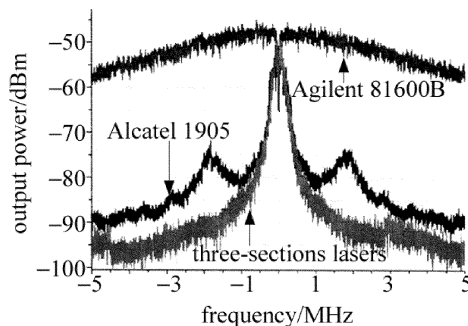


Fig. 5 Comparison of laser linewidth measurement curves for three kinds of lasers

在后续的实验测试中,测量了以深刻蚀面作为反射面的 F-P 激光器的阈值(腔体长度保持不变),激光器的阈值电流大约为 57mA,这个结果同样与理论分析的结果非常接近,说明深刻蚀槽结构所引入的损耗非常小,且在可以忽略的范围内。测试分析表明,基于游标效应设计的新型 SF-P 可调谐半导体激光器对于工作温度敏感性较高。

4 小 结

通过对一种可用于光线通信系统的波长可调谐激光器的具体介绍,提出并设计了一种具有功率稳定、并且波长可调谐激光光源实现方法。基于游标效应设计的新型 SF-P 可调谐半导体激光器波长调谐机制简单方便,而且具有很好的单模性和信道切换能力,因此在未来的光通信领域中,特别是在相干通信领域和波分复用领域中,可以得到很好的应用前景,并且这个设计的思路对可调谐激光器的优化设计具有一定的指导意义,使波长可调谐激光光源满足光通信领域日益增长的需要。

参 考 文 献

- [1] HAO X Q, CHEN G X. Development and application of tunable semiconductor laser [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(11):4-7 (in Chinese).
- [2] TOBING L Y M, LIM D C S, DUMON P, *et al.* Finesse enhancement in silicon-on-insulator two-ring resonator system [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10):101122.
- [3] WU T F, LIANG Z G, YAN J H, *et al.* The progress on distance measuring technique with a femtosecond optical frequency comb [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, 31(5):41-44 (in Chinese).
- [4] YING D Q. Resonator fiber optic gyro based on digital triangle wave phase modulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 13-15 (in Chinese).
- [5] BOECK R, JAEGER N A F, ROUGER N, *et al.* Series-coupled silicon racetrack resonators and the Vernier effect: theory and measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24):25151-25157.
- [6] SUN R Y, LIU J, TAN F Zh, *et al.* All-fiber amplification and application of 100ps laser pulse [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):417-420 (in Chinese).
- [7] JIN L, LI M Y, HE J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect [J]. *Optics Communications*, 2010, 284(1):156-159.
- [8] DENG Z F, WANG Y X, QIU Q, *et al.* Study on high-range frequency tuning technology for nonplanar ring laser [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3):281-283 (in Chinese).
- [9] ZHAO Y, MA K Zh, YANG D Ch, *et al.* Research of vernier effect of ring resonator in sensor fields [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3):293-296 (in Chinese).
- [10] LÜ X Q, CHEN S W, ZHANG J Y, *et al.* Tuning properties of external cavity violet semiconductor laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(7):074204.
- [11] RAO Z M, WANG X B, XIAO X B, *et al.* Third-harmonic generation in AgGaSe₂ crystals based on CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):503-505 (in Chinese).
- [12] YU H. Study on measure of femtosecond laser pulse width [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5):679-681 (in Chinese).
- [13] LIU X Sh, WANG Zh Y, YAN X, *et al.* 56J high energy lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2):145-147 (in Chinese).
- [14] ZHU R, ZHOU J, LIU J Q, *et al.* Solid-state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11):1102011 (in Chinese).
- [15] LU Y Zh, WANG X B, MIAO L, *et al.* Third-harmonic and fourth-harmonic generations of CO₂ laser radiation in a GaSe crystal [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(14):3622-3625.