

法布里-珀罗干涉仪外腔半导体激光器的 选模和锁模特性研究

徐建华 张位在 干福熹

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了法布里-珀罗干涉仪用作半导体激光器外腔的选模原理和选模及锁模实验。通过压电陶瓷调节 F-P 干涉仪的间距, 实现了半导体激光器本身的静态及动态单纵模运转, 在调制频率为 656 MHz 的情况下, 获得了近变换极限的外腔锁模高斯形超短脉冲, 脉宽为 13 ps, 时间带宽乘积为 0.46。最后讨论了 F-P 干涉仪对半导体激光器的模式特性的影响。

关键词 法布里-珀罗(F-P)干涉仪, 选模, 锁模

1 引 言

半导体激光超短脉冲在信息光电子学领域具有广泛的应用^[1]。例如, 它在光电子器件的瞬态特性及光纤传输特性测量方面起着重要的作用; 特别是在最近发展起来的电光取样系统^[2], 超高速数字通信^[3]或时分复用系统^[4]以及前景极其诱人的光孤子通信系统等方面, 半导体激光超短脉冲具有无可比拟的优点。然而, 由于光纤材料的色散作用, 通常这些系统都要求相干性好的光脉冲即半导体激光器本身的动态单模脉冲。产生这样的半导体激光超短脉冲一般有两种方法。一种是直接调制动态单模半导体激光器(如 DFB, DBR), 比较简单, 即所谓的增益开关法。可以产生不同重复频率的单模脉冲, 较适合于光纤通信系统。然而, 用这种方法产生的光脉冲宽度相对较宽^[5], 一般在 20~30 ps 左右, 并且常常伴有不同程度的频率啁啾^[6], 这严重影响了光纤通信的距离和容量, 因此为了补偿脉冲的啁啾进而达到压缩脉冲的目的, 通常采用光纤压缩^[7]、光栅对压缩^[8]和 G-T 干涉仪压缩^[9]等方法。另一种是锁模方式, 对于主动锁模半导体激光器而言, 其本身的激光振荡往往有几个纵模, 因此常常要求反射镜或选模器件(如光栅、标准具等)作外腔, 选出单一子腔模(实际上是一组外腔纵模群); 如增益带宽能被有效利用的话, 则可产生亚 ps 量级的光脉冲^[10]。已有研究表明, 对于超长距离的光孤子通信, 锁模脉冲比增益开关脉冲优越^[11]。日本 NTT 公司采用增益开关 DFB 激光器产生高重复频率的超短脉冲, 用窄带 F-P 滤波器消啁啾, 其插入损耗达 10 dB, 因此需要光纤放大器进行放大到光孤子传输所需的水平; 美国贝尔实验室则采用光栅外腔锁模半导体激光器作为孤子源, 同时腔内插入 F-P 标准具消啁啾, 得到变换极限光孤子脉冲, 但其缺点在于结构过于复杂。相比较而言,

本文直接采用 F-P 干涉仪作外腔,结构简单紧凑,更接近实用化;只需通过压电陶瓷调节 F-P 干涉仪的间距,就可实现半导体激光器本身的静态及动态单纵模运转,在调制频率为 656 MHz 的情况下,获得了近变换极限的外腔纵模群的锁模高斯形超短脉冲,脉宽为 13 ps,时间带宽乘积为 0.46。

2 F-P 干涉仪的选模原理

F-P 干涉仪是由两相距为 l , 而且相互平行的部分透射反射镜组成。一般距离 l 是远大于其波长的, 两反射镜之间的介质折射率为 n 。如图 1(a) 所示^[12], 一频率为 ω , 振幅为 a_1 的波由左方入射到反射镜 G 上, 部分透射波幅度为 jt_1a_1 , 而反射波幅度为 $-r_1a_1$ 。透射部分继续入射在第二个反射镜 G' 上, 当它到达第二个反射镜时将有相位 $n\omega l/(\cos\theta \cdot C) \equiv \delta/2$ 。在第二个反射镜处, 又有 $-r_2(jt_1)e^{-j\delta/2}a_1$ 部分被反射和 $(jt_2) \cdot (jt_1)e^{-j\delta/2}a_1$ 部分被透射。反射部分会回到反射镜 G 处, 同时产生另一附加的 $\delta/2$ 相位, 然后再有 $r_2r_1(jt_1)e^{-j\delta}a_1$ 部分被反射。这个由反射镜 G 反射回去的部分将经历初始透射波 $(jt_1)a_1$ 所经历的同样过程。此过程每一次重复相当于乘以因子 $r_1r_2e^{-j\delta}$, 其中的 r_1, r_2 分别是反射镜 G, G' 的振幅反射率, $t_1^2 = 1 - r_1^2, t_2^2 = 1 - r_2^2$ 。则 F-P 干涉仪的功率反射率 ρ 为

$$\rho = 1 - \frac{t_1^2 t_2^2}{(1 - r_1 r_2)^2 + 4r_1 r_2 \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

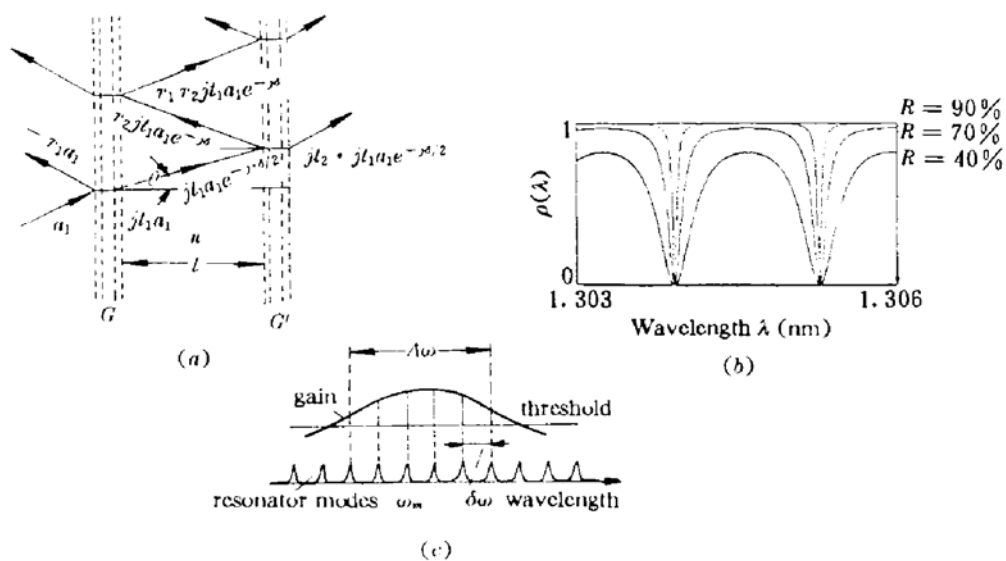


Fig. 1

(a) the diagram of a F-P interferometer; (b) the reflection characteristics of a F-P interferometer;

(c) the lasing modes of a semiconductor laser

当两个反射镜的反射率相同, 之间介质为空气, 入射光垂直入射时, 即 $r_1^2 = r_2^2 = R, \theta = 0, n = 1, \delta/2 = 2\pi l/\lambda$, 得到与频率有关的反射功率, 图 1(b) 为 F-P 干涉仪随不同波长的功率反射特性。峰值位于 $\lambda_m = 4l/(2m + 1)$, 透射峰(反射率最低点)位于 $\lambda_m' = 2l/m$, 两者之间的间距为 $\Delta\lambda = 2l/(2m^2 + m)$, 其中 m 为大于零的整数, 则

$$\rho(\lambda) = 1 - \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4r_1 r_2 \sin^2(2\pi l/\lambda)} \quad (2)$$

因此,可以知道,F-P干涉仪的间距决定了反射峰值波长和透射峰值波长的位置及两者之间的间距 $\Delta\lambda$,在本文中即为半导体激光器本身的模间距 $\Delta\lambda$ 。

图 1(c) 为半导体激光器的激光振荡模式示意图,对于普通半导体激光器来说,阈值以上一般有几个激光模式振荡输出,而每一个模式中又包含一组外腔纵模群,由上可知,我们可以选择调节 F-P 干涉仪间隔,使半导体激光器腔内的某个模式 ω_0 (或 λ_0)落在图 1(b) 的反射峰内,以降低其损耗从而提高这个模式的净增益,同时使其他临近模式处于反射峰外,抑制其振荡;这样对于均匀展宽的半导体激光介质而言,由于增益饱和作用,其他模式将被抑制,半导体激光器将单纵模运转;另外由于外腔的作用,这个子腔模实际上是一组外腔纵模群,因此同时又有可能是将这一组纵模群进行锁定,获得锁模超短脉冲。

一般来说,对于腔长为 300 μm 左右,1.3 μm 波段的半导体激光器,其模式间隔约 0.8 nm。假设取中心波长 λ_m 为 1.3 μm ,模间距 $\Delta\lambda$ 为 0.8 nm,则由联立方程组

$$\lambda_m = 4l/(2m + 1) \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = 2l/(2m^2 + m) \quad (4)$$

可以得到,F-P干涉仪间距 l 为 0.6 mm 左右。即对于 1.3 μm 波段的半导体激光器,当 F-P 干涉仪的间距为 0.6 mm 左右时,可能选出单一子腔模,具体数值对于不同的半导体激光器略有差别。

3 选模及锁模实验

1.3 μm F-P 干涉仪外腔半导体激光器选模及主动锁模实验装置如图 2 所示,图中 F-P 干涉仪的两块平面反射镜在 1.3 μm 波段的反射率均为 75%,并且后反射镜固定在压电陶瓷上,使之通过驱动电源控制压电陶瓷以微调 F-P 干涉仪

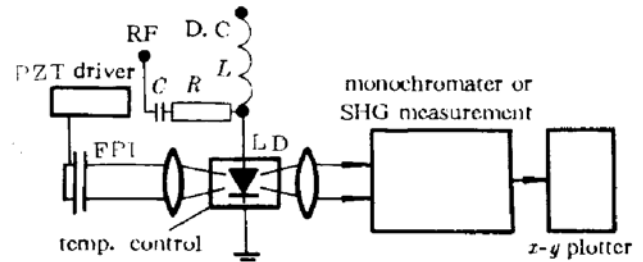


Fig. 2 The experimental setup

间距,激光输出由另一端用显微物镜耦合输出。实验所用激光器为本所光电子学研究室自行研制的 1.3 μm InGaAsP DCPBH 结构半导体激光器,激光器的端面未镀增透膜,其环境温度由温控仪控制,阈值电流为 52 mA,外腔光路由准直透镜调节,外腔长度约为 23 cm;加 F-P 干涉仪外腔后阈值电流为 45 mA,降低 13.5%。射频调制信号由 XB-10A 型标准信号发生器产生,在 325~1300 MHz 范围连续可调,通过 50 Ω 阻抗的微带匹配线注入到激光器中。利用二次谐波自相关测量装置测量脉冲宽度,通过单色仪测量半导体激光器的静态光谱和脉冲的动态时间平均光谱。

图 3(a) 为半导体激光器件本身的典型静态光谱,偏置电流为 54 mA。可以看出,在阈值以上一般有几个激光模式在振荡输出,其模间距约为 0.7 nm,根据上述 F-P 干涉仪选模原理分析,我们选择了其中的一个较强纵模,其中心波长值为 1304.6 nm,由上述方程组联立可知 F-P 干涉仪间隔为 631.7 μm 左右,通过压电陶瓷微调,图 3(b) 为 F-P 干涉仪选出的外腔半导体激光器的静态光谱,直流偏置为 46.5 mA,此时只有中心波长为 1304.6 nm 的激光模式振荡,其他子腔模被抑制。在动态情况下,所加的直流偏置仍为 46.5 mA,正弦交流脉冲的调制频率为 656 MHz,只是动态情况下,光谱略有展宽,约为 0.2 nm,如图 3(c) 所示。为便于比较说明,图 4 给出了半导体激光器本身的增益开关脉冲时间平均光谱,此时直流偏置为 50 mA,调制频

率也为 656 MHz。

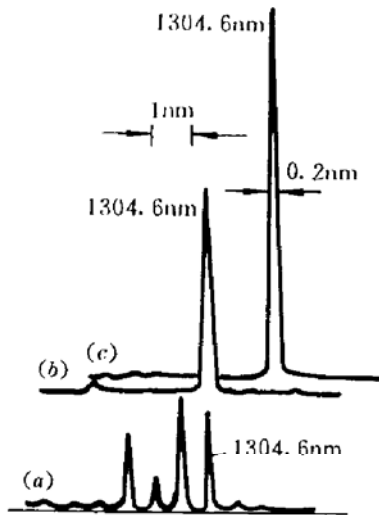


Fig. 3

(a) a typical spectrum of the free-running laser diode; (b) a typical spectrum of the laser diode with a F-P interferometer cavity; (c) a typical spectrum of the mode-locked laser diode with a F-P interferometer cavity

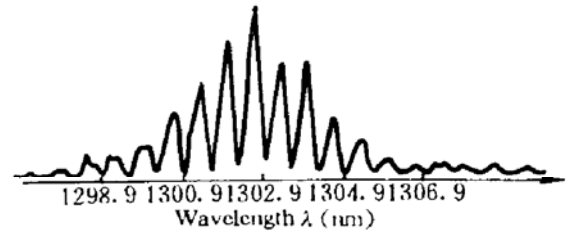


Fig. 4 The time-averaged spectrum of the gain-switched laser diode

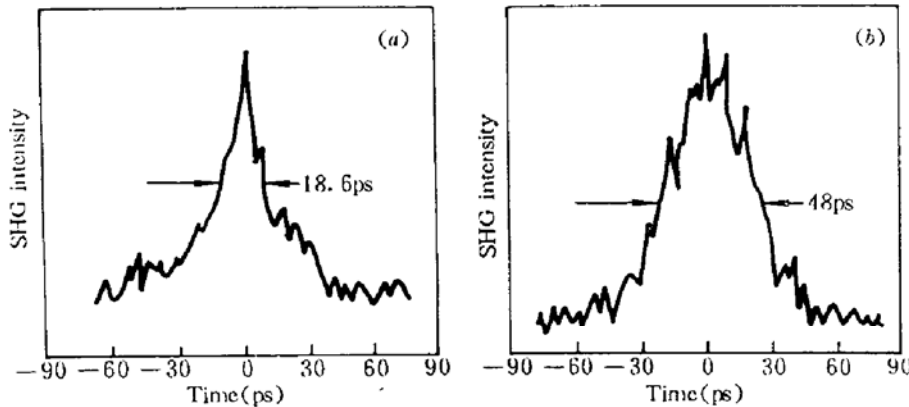


Fig. 5 The SHG traces of mode-locking (a) and non-mode-locking (b) pulses

由于 F-P 干涉仪与激光器构成了一个外腔,因而我们通过 F-P 干涉仪选出的单一子腔模实际上包含了一组外腔模。这样,在半导体激光器保持单一子腔模运转的情况下,我们仔细调节交流脉冲信号的频率、功率及直流偏置等,获得了外腔锁模超短脉冲。图 5 (a), (b) 分别是外腔锁模脉冲和器件本身的增益开关脉冲的二次谐波自相关曲线,经拟合近似为高斯波形,由此得到超短脉冲脉宽分别为 13 ps 和 34 ps,在锁模情况下,时间带宽乘积约为 0.46,接近高斯形变换极限 0.44;在图 5 (b) 中,由于半导体激光器本身的多纵模振荡(图 4),其自相关曲线出现了模式之间的干涉小尖峰,曲线底部毛刺为噪声;而在图 5 (a) 中,由于只有单一的子腔模振荡,并且这一子腔模中包含的外腔纵模群被锁定,使自相关曲线顶部光滑,没有干涉尖峰,底部出现的毛刺是记录时噪声影响所致。实验中,调制频率为 656 MHz,直流偏置分别为 46.5 mA、50 mA,当调制频率偏差大于 ± 5 MHz 时,激光输出不再是单一子腔模运转,而且不再为外腔锁模状态,略小于普通锁模实验的最大失谐频率^[13]。

4 讨 论

从图 1 (b) 可以看出,对于不同反射率的反射镜构成的 F-P 干涉仪,其对不同激光模式的最大反射率有所不同,引起模式之间的增益差值有很大的差别。反射率较低的干涉仪(如 40%),不同模式之间的增益差不大,因此选模效果不好;而反射率很高的干涉仪(90%),虽然反射特性曲线变化大,原理上可以非常好地选出单纵模,但由于反射峰较平坦,透射峰尖锐[图 1 (b)],对于半导体激光器的不同模式,很难调节干涉仪的间隔使得 λ_0 处于反射峰内,而同时使其他模式处在反射率最低点,因此也不容易选出单纵模;解决这一问题有两个方面:一是选择反射率不太高的反射镜(本文为 75%),在提供了选出单纵模所必需的增益差的前提下,降低技术上的调节难度;二是对激光器的解理端面镀增透膜,以提高 λ_0 与其他模式之间的增益差,从而选出单纵模。

由公式(2)知道,反射峰的位置和各个透射峰(反射率最低点)之间的间隔与干涉仪的间距有关,干涉仪间距的微小变化将引起反射峰的移动和透射峰间隔的变化,从而破坏激光器的单纵模运转,图 6 为干涉仪间距变化引起的多纵模振荡,此时偏置电流为 49 mA,而且由于干涉仪对不同波长的反射率不一样,即提供的净增益不同,导致有的模式增强,而有的模式反而被抑制;因此,必须严格控制 F-P 干涉仪的间距。

总之,本文直接采用 F-P 干涉仪作外腔,结构简单紧凑,只需通过压电陶瓷调节 F-P 干涉仪的间距,在激光器端面未镀增透膜的情况下,实现了半导体激光器本身的静态及动态单纵模运转,在调制频率为 656 MHz 的情况下,获得了近变换极限的外腔锁模高斯形超短脉冲,脉宽为 13 ps,时间带宽乘积为 0.46。

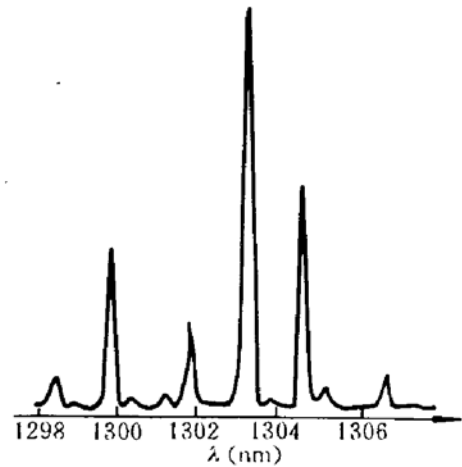


Fig. 6 A typical spectrum of multi-mode oscillation by changing the interval of a F-P interferometer

致谢 本文作者对实验室主任方祖捷研究员和丁浩副研究员在实验中提供的帮助和有益的讨论深表感谢。

参 考 文 献

- 1 张位在. 半导体激光超短脉冲技术及应用. 光子学报, 1992, 21(5): 81~91
- 2 J. M. Wisenfeld, A. J. Taylor, R. S. Tucker et. al.. Electro-optic sampling using injection lasers. *Proc. SPIE*, 1987, 795: 339~344
- 3 Rodney. S. Tucker, Gadi Eisensten, Steven K. Korotky. Optical time-division multiplexing for very high bit-rate transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1988, 6(11): 1737~1749
- 4 A. Takada, M. Saruwatari. 100 Gbit/s optical signal generation by time-division multiplication of modulated and compressed pulses from gain-switched DFB laser diode. *Electr. Lett.*, 1988, 24(23): 1406~1408
- 5 Noriaki Onodera, Hiromasa Ito, Humio Inaba. Generation and control of bandwidth-timited single mode picosecond optical pulses by strong RF modulation of a distributed feedback InGaAsP diode laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985, QE-21(6): 568~575
- 6 T. L. Koch, J. E. Bowers. Nature of wavelength chirping in directly modulated semiconductor laser. *Electr. Lett.*, 1984, 20(25/26): 1038~1040

- 7 Liu Haifeng, Yoh Ogawa, Saeko Oshiba. Generation of an extremely short single mode pulse (~ 2 ps) by fiber compression of a gain-switched pulse from a $1.3 \mu\text{m}$ distributed feedback laser diode. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59** (11) : 1284~1286
- 8 M. Kuznetsov, J. M. Wiesenfeld, L. R. Radzihovsky. Compression of picosecond pulses from diode laser using a modified grating pair compressor. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(3) : 180~182
- 9 徐建华, 张位在, 刘枝伍 等. $1.3 \mu\text{m}$ DFB 半导体激光超短脉冲的产生及其压缩. *光学学报*, 1994, **14** (4) : 360~363
- 10 J. E. Bowers, P. A. Morton, A. Mar *et. al.*. Actively mode-locked semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1989, **QE-25**(6) : 1426~1439
- 11 L. F. Mollenauer, B. M. Nyman, M. J. Neubelt *et. al.*. Demonstration of soliton transmission at 2.4 Gbit/s over 12000 km. *Electr. Lett.*, 1991, **27**(2) : 178~179
- 12 赫尔曼·A·豪斯 著, 陈东培 译. 光电子学中的波和场. 上海: 上海翻译出版公司出版, 1991. 66
- 13 J. P. van der Ziel. Active mode locking of double heterostructure lasers in an external cavity. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(7) : 4435~4446

Study on Mode Selection and Mode-locking of Diode Lasers with an External Fabry-Perot Interferometric Cavity

Xu Jianhua Zhang Weizai Gan Fuxi

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia of Sinica, Shanghai 201800)

Abstract The mode-selecting principle of a F-P interferometer and experiments of mode selection and mode-locking of a laser diode with an external F-P interferometric cavity are demonstrated and reported for the first time. The static and dynamic single internal-mode operation is realized by using a PZT to adjust the interval of the F-P interferometer. The nearly transform-limited Gaussian pulses with a repetition rate of 656 MHz and pulse width of 13 ps have been obtained. The time-bandwidth product is 0.46. At last the effect of a F-P interferometer on the lasing mode of diode lasers is discussed.

Key words Fabry-Perot interferometer, mode selection, mode-locking