

激光器中 F-P 标准具的研究

薛峻文 裴雪丹 苏秉华 孙 鲁 赵慧元

(北京理工大学珠海学院, 广东 珠海 519085)

摘要 导出了构成 F-P 标准具的两个表面具有不同反射率,同时包含吸收损耗在内的 F-P 标准具透射率一般表达式。当两个表面具有相同反射率同时忽略吸收损耗时,该一般表达式就过渡到通常文献或书籍中的表达式。而当两个表面具有不同反射率同时忽略吸收时,发现这种情况下的最大透射率不再是 100%,而是有了一定的反射,同时两个表面的反射率相差越大,这种影响越明显。

关键词 激光器;F-P 标准具;多光束干涉;谐振腔;纵模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.031402

Study of F-P Etalon Using in Lasers

Xue Junwen Pei Xuedan Su Binghua Sun Lu Zhao Huiyuan

(Zhuhai Campus, Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Guangdong 519085, China)

Abstract The general transmission formula of F-P etalon including different reflectivity and absorption is derived. When the reflectivities of the two surfaces are the same and the absorption is ignored, the general formula will become the common formula in the documents or books. When the reflectivities are different and the absorption is ignored, the maximum transmission is not 100%, but there is a certain reflectivity. Moreover if the difference between the reflectivities of the two surfaces is bigger, the effect becomes more obvious.

Key words lasers; F-P etalon; multi-beam interference; resonator; longitudinal mode

OCIS codes 140.3410; 140.4780

1 引言

激光器中的 F-P 谐振腔的物理实质是多光束干涉,是 F-P 标准具的一个特殊的应用。F-P 标准具与激光器有着千丝万缕的联系。如激光的产生^[1],激光选频率^[2],激光选谱线^[3],激光频率观察用到的标准具和扫描干涉仪^[4],激光的频率稳定时的参考腔^[5],外腔谐振倍频的纵模匹配^[6]和反馈稳定^[7],连续激光运转时的功率稳定性问题中的标准具效应^[8],调 Q 激光器中的寄生振荡效应^[9],锁模激光器运转时各纵模相位锁定的多光束干涉^[1]等都与 F-P 标准具相联系。

对于无源 F-P 标准具构成的谐振腔,F-P 谐振腔的纵向长度、腔镜的曲率半径确定了激光的横模结构,而 F-P 谐振腔的纵向长度、腔镜的反射率确定了激光器的纵模结构。对于有源 F-P 标准具构成谐振腔,光谱范围为激光工作物质的连续荧光光谱,经过 F-P 标准具的频率梳后,在激光阈值之上的光谱形成自由振荡的分立激光频率,即纵模。如果激光的增益谱线本身很窄及在均匀加宽工作物质中,那么自由振荡激光输出的是很少的几个纵模甚至是单个纵模。但如果激光的增益谱线很宽或是激光有几个增益谱线同时经过 F-P 标准具,其结果是输出的激光线宽很宽或是多个较窄的线宽。一方面可以直接使用这种激光器,另外可以通过腔内再放一个或多个 F-P 标准具,或光栅、棱镜、双折射滤光片等,进行第二次或第三次甚至更多次的选频或选谱线,使激光器输出单个频率或单个谱线或是进行调谐。

本文推导了在构成 F-P 标准具的两个表面具有不同反射率,同时包含吸收损耗在内的 F-P 标准具透射

收稿日期: 2011-10-10; 收到修改稿日期: 2011-10-18; 网络出版日期: 2011-12-31

基金项目: 北京理工大学珠海学院青年教师科研发展基金(ky-2010-0016)资助课题。

作者简介: 薛峻文(1978—),男,博士,讲师,主要从事新型激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: xuejunwen001@126.com

率一般表达式。有了这个一般表达式之后,可以方便地分情况进行分析讨论,得出一些重要的结论来指导实践。

2 F-P 标准具的透射率一般表达式

标准具基本原理是多光束干涉^[10]。下面分析两表面具有不同反射率,同时将镜面或材料的吸收损耗考虑进去的一般情况下的 F-P 标准具,如图 1 所示。

设 F-P 标准具的折射率为 n , 两边的折射率相同都为 n_1 , E 为入射光的振幅, R_1 、 R_2 为光束在第一、二个表面的强度反射率, r_1 、 r'_1 、 r_2 、 r'_2 分别为光束在第一、二个表面由外到内和由内到外的振幅反射率, t_1 、 t'_1 、 t_2 、 t'_2 分别为光束在第一、二个表面由外到内和由内到外的振幅透射率。 r_i 、 r'_i ($i = 1, 2$) 和 t_i 、 t'_i ($i = 1, 2$) 满足关系式:

$$r_1 = -r'_1, r_1^2 + t_1 t'_1 = 1, r_2 = -r'_2, r_2^2 + t_2 t'_2 = 1, R_1 = r_1^2, R_2 = r_2^2. \quad (1)$$

假设 θ 为光束在 F-P 标准具内的折射角, d 为 F-P 标准具的厚度, λ 为入射单色光的波长, 则邻近光束 F-P 标准具内往返引起的相位差为

$$\delta = \frac{2nd \cos \theta}{\lambda} 2\pi. \quad (2)$$

透射光束为

$$\begin{aligned} E'_1 &= Et_1 t'_2, \\ E'_2 &= Et_1 t'_2 r'_1 r'_2 \exp(i\delta), \\ E'_3 &= Et_1 t'_2 r_1'^2 r_2'^2 \exp(i2\delta), \\ E'_4 &= Et_1 t'_2 r_1'^3 r_2'^3 \exp(i3\delta), \\ &\vdots \\ E'_N &= Et_1 t'_2 r_1'^{N-1} r_2'^{N-1} \exp[i(N-1)\delta], \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

N 条光线多光束干涉的总振幅透射系数为

$$t_N = t_1 t'_2 \frac{1 - (r_1' r_2')^N \exp(iN\delta)}{1 - r_1' r_2' \exp(i\delta)}. \quad (4)$$

相应的总强度透射系数为

$$T_N = t_N t_N^*. \quad (5)$$

无穷多条光线干涉的总振幅透射系数为

$$t_\infty = \frac{t_1 t'_2}{1 - r_1' r_2' \exp(i\delta)} = \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} \exp(i\delta)}. \quad (6)$$

相应的总强度透射系数为

$$T_\infty = t_\infty t_\infty^* = \frac{(t_1 t'_2)^2}{[1 - r_1' r_2' \exp(i\delta)][1 - r_1' r_2' \exp(-i\delta)]} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\delta/2)}. \quad (7)$$

若考虑 A_1 、 A_2 为包含腔镜及材料各种损耗在内的吸收系数(往往是金属膜引起的), 则考虑吸收后的总强度透射率为^[11]

$$T_\infty = \frac{(1-A_1-R_1)(1-A_2-R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\delta/2)}. \quad (8)$$

相应的总强度反射系数为

$$F_\infty = 1 - T_\infty. \quad (9)$$

3 F-P 标准具参数与激光谐振腔参数的对比分析

利用(8)式,分情况可以讨论很多有意义的结果。首先考虑两表面反射率相同且没有吸收的情况,在这

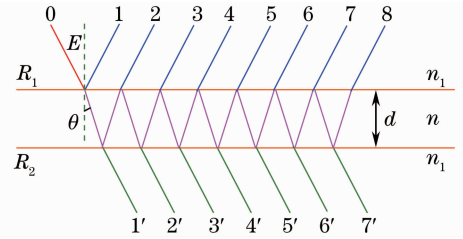


图 1 F-P 标准具结构示意图

Fig. 1 Setup of F-P etalon

种情况下定义一些基本的概念。总强度透射率与相位差的关系曲线如图 2 所示。

两个相邻的峰值之间定义为自由光谱区 FSR, 则 FSR 值为

$$W_{\text{FSR}} = \frac{c}{2nd}, \quad (10)$$

式中 c 是真空中光速。

当 F-P 标准具用作激光器的谐振腔时, 自由光谱区对应于纵模间隔。则纵模间隔 $\Delta\nu_q$ 为

$$\Delta\nu_q = W_{\text{FSR}} = \frac{c}{2 \sum n_i d_i}, \quad (11)$$

式中 n_i 是光在第 i 段介质中的折射率, d_i 是光在第 i 段介质中经过的几何距离。对于简单的两镜激光谐振腔, 如果它的纵向是由多种介质构成, 并且某段存在了双折射材料, 如 II 类腔内倍频晶体 KTP, 那么腔内将有两套纵模, 并且它们之间进行耦合, 是引起激光功率的不稳定的原因之一^[12]。

从邻近光束在 F-P 标准具内往返引起的相位差(2)式可以看出, 当分子中 $2nd\cos\theta$ 改变一个波长, 那么自由光谱区将移动一个周期。而对于激光腔内选频的应用, 选定标准具后, 需要通过调节其倾斜角度来使激光器达到选频的功能, 同时功率尽可能最大。对于一批加工出来的标准具, 其厚度控制在波长上的误差比较困难, 因此工程应用中往往是从一批的标准具中进行遴选。

自由光谱区与透射率曲线的半峰全宽(FWHM)之比定义为精细度, 同时精细度 F 又为反射率的函数:

$$F = \frac{W_{\text{FSR}}}{f_{\text{FWHM}}} = \frac{\pi(R_1 R_2)^{1/4}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}. \quad (12)$$

精细度的物理意义为干涉条纹的锐利程度。在激光器中体现为单个纵模的线宽。对于由一个腔镜为全反射, 另一个腔镜为部分反射构成的激光谐振腔, 如果实现了基频的单频运转, 那么由部分反射镜构成的输出腔镜, 其反射率越高, 则单频的线宽就越窄, 当然此时要平衡激光器的输出功率与输出镜反射率之间的关系。

影响精细度的因素除了腔镜的反射率外, 还有面型质量和两腔镜表面的平行度, 整体精细度可表示为^[11]:

$$\frac{1}{F_{\text{all}}^2} = \frac{1}{F_{\text{R}}^2} + \frac{1}{F_{\text{P}}^2}, \quad (13)$$

式中 F_{all} 为标准具的整体精细度, F_{R} 为由反射率确定的精细度, F_{P} 为面型质量和两腔镜表面的平行度确定的精细度。

通过整体精细度表达式(13), 在工程上可以指导 F-P 标准具加工要求, 而对激光器的谐振腔镜, 也要尽可能保证腔镜基片及镀膜后的整体精细度。

4 F-P 标准具的透射率分析

考虑吸收为零, 两镜面反射率相同取为 $R_1 = R_2 = 0.90$, 强度透射率随相位变化如图 2 所示。这种对称结构当满足谐振时, 人们可以获得全透和零反的结果。

其他条件同上, 但两镜面的反射率不同, 取 $R_1 = 0.90, R_2 = 0.50$ 和 $R_1 = 0.80, R_2 = 0.50$ 的情况, 强度透射率随相位变化如图 3 所示。可以看出, 在这种不对称结构中, 当谐振时人们不能获得全透和零反的结果, 同时随着两者反射率差距越大, 这种不对称带来的影响就越大。因此使用镀膜 F-P 标准具在腔内选频或选谱线时要

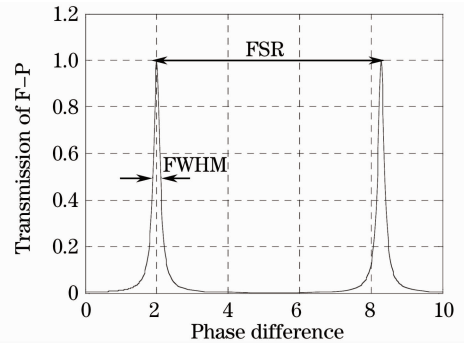


图 2 F-P 标准具的透射率与相位差的关系
Fig. 2 Transmission of F-P etalon versus phase-difference

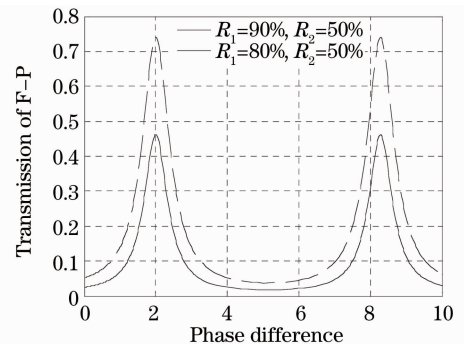


图 3 F-P 标准具的透射率与相位差的关系
Fig. 3 Transmission of a F-P cavity versus phase-difference

特别注意这种不对称性引起的损耗。

当考虑吸收时,上面的情况将更加复杂,但考虑对称损耗 $A_1 = A_2 = 0.05$ 和对称反射率 $R_1 = R_2 = 0.80$ 和 $R_1 = R_2 = 0.90$ 的情况,如图4所示。这种情况下人们同样不能获得全透和零反的结果,并且吸收损耗对高反射率的F-P标准具的影响更大。

当然考虑不同的吸收和不同的强度反射率等情况的组合时及其他参数,可以类似地得到更多的结果来指导实践,这里不再一一列出。

5 结 论

本文导出了构成F-P标准具的两个表面具有不同反射率,同时包含吸收损耗在内的F-P标准具透射率一般表达式。根据表达式,可以方便地分情况进行分析讨论。如当两个表面具有相同反射率,同时忽略吸收损耗后,该一般表达式就过渡到通常文献或书籍中的表达式。而当两个表面具有不同反射率,同时忽略吸收后,发现这种情况下的最大透射率不再是100%,而是有了一定的反射,并且反射率差别越大,这种影响越明显。这一发现对于腔内使用镀膜的F-P标准具选频具有一定的指导意义,即在选用此类器件时,要尽可能的保证两个表面的镀膜反射率一致。另外分析了F-P标准具厚度对于选频带来的影响,得出在工程中使用F-P标准具时要在一批中进行遴选的结论。

参 考 文 献

- 1 Anthony E. Siegman. Lasers. [M]. Palo Alto; University Science Books, 1986. 457~472
- 2 H. G. Danielmeyer. Stabilized efficient single-frequency Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electr.*, 1970, **QE-6**(2): 101~104
- 3 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power single-frequency operation, at 1064 nm and 1061.4 nm of a Nd:YAG ring laser end-pumped by a beam-shaped diode bar[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(1-2): 89~92
- 4 R. L. Fork, D. R. Herriott, H. Kogelnik. A scanning spherical mirror interferometer of spectral analysis of laser radiation[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(12): 1471~1484
- 5 Fagang Zhao, Qing Pan, Kunchi Peng. Improving frequency stability of laser by means of temperature-controlled Farby-Perot cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 334~336
- 6 A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic. Resonant optical second harmonic generation and mixing[J]. *IEEE J. Quantum Electr.*, 1966, **QE-2**(6): 109~124
- 7 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phy. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 8 Chen Yungfu, Huang Tingming, Wang Chiluen *et al.*. Compact and efficient 3.2-W diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5727~5730
- 9 Gilles Feugnet, Claude Bussac, Christian Larat *et al.*. High efficiency intracavity doubled diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[C]. *SPIE*, 1996, **2698**: 105~114
- 10 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics; Electromagnetic Theory of Propagation, Interface and Oiffraction of Light [M]. Cambridge University Press, 1999. 359~380
- 11 <http://www.casix.com/download/>
- 12 Xue Qinghua, Zheng Quan, Ye Ziqing *et al.*. Analysis of Eigenstates on LD-pumped Nd:YVO₄/KTP intracavity-doubled green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 877~880
- 薛庆华, 郑 权, 叶子青 等. LD抽运腔内倍频 Nd:YVO₄/KTP绿光激光器的本征态分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 877~880

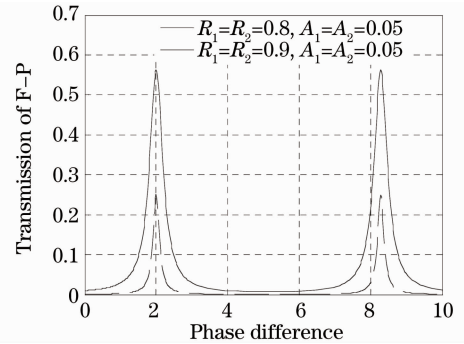


图4 F-P标准具的透射率与相位差的关系
Fig. 4 Transmission of a F-P cavity versus phase-difference