

法布里-珀罗腔压缩啁啾光脉冲的最佳调谐*

蒋泽明 吴 芳 黄肇明

(上海大学嘉定校区电子工程系, 上海 201800)

摘 要 法布里-珀罗腔对啁啾光脉冲的压缩存在滤波和色散(谱相位均衡)双重机制; 后者根据腔体谐振波长与光载波中心波长之差可呈现为正常或反常色散。证明了最佳调谐区为一系列间隔约几纳米的不连续区。首次解释了 M. Nakazawa 等人的实验结果。

关键词 法布里-珀罗腔的最佳调谐, 啁啾光脉冲。

增益开关半导体激光器等法产生的激光超短脉冲带有强列的红移啁啾, 时间带宽积可高达十至几十。法布里-珀罗腔是消啁啾压缩脉宽的常用器件, 其窄带滤波特性可截取动态扩展光谱的窄段, 被认为是压缩脉宽的主要机制^[1, 2], 然而单纯滤波无法解释近年发表的实验和数值模拟结果^[1, 2]; 如输出脉冲形态的不对称, 中心频率的偏畸等。尤其不能解释 Nakazawa 等人报道的法布里-珀罗腔输出脉宽随腔的谐振频率(调谐在信号谱的不同位置)而变, 有时呈压缩有时呈显扩展现象。

1 输入输出光场与法布里-珀罗腔的数学模型

设输入光脉冲 $x_{in}(t)$ 有高斯型复包络 $X(t)$, 光载波角频率 ω_0 , 即 $x_{in} = X(t) \exp(j\omega_0 t)$, 且

$$X(t) = E_0 \exp[-(t/\tau)^2 + j\alpha t^2] \quad (1)$$

式中 E_0 为光场幅度, τ 为 $1/e$ 半宽, $\alpha < 0$ 为调频系数(红移啁啾), τ 与可测量的光功率波形半高全宽度量 Δt_0 有关系, $\Delta t_0 = (2 \ln 2)^{1/2} \tau$, (1) 式的频谱为,

$$X_{in}(\omega) = G \exp[-(\omega/B)^2 + j\gamma \omega^2] \quad (2)$$

式中复幅度常数 G , 光场角频谱 $1/e$ 半宽 B , 及谱的二次方相移常数 γ 均由光脉冲参数 E_0 , τ , α 唯一确定, 且

$$B = 2(1 + \alpha^2 \tau^2)^{1/2} / \tau, \quad \gamma = -\alpha \tau^4 / [4(1 + \alpha^2 \tau^4)] \quad (3)$$

反之, 也可由谱参数求脉冲参数

$$\tau = 2(1 + \gamma^2 B^4)^{1/2} / B, \quad \alpha = -\gamma B^4 / [4(1 + \gamma^2 B^4)] \quad (4)$$

注意有,

$$-\gamma B^2 = \alpha \tau^2 \quad (5)$$

设波束正入射, 则法布里-珀罗腔的传递函数可由多光束干涉原理得

* 上海市自然科学基金资助项目, 国家自然科学基金资助项目。

$$T(\omega) = (1 - R) / [1 - R \exp(-j\delta)], \quad \delta = 2H\omega/c = 4\pi H/\lambda \quad (6)$$

式中 R, H 分别为法布里-珀罗镜面功率反射率及前后端面间距。 $T(\omega)$ 可写为

$$T(\omega) = A(\omega) \exp[-j\mathcal{Q}(\omega)] \quad (7)$$

$$A(\omega) = (1 - R) / (1 + R^2 - 2R \cos \delta)^{1/2}, \quad \mathcal{Q}(\omega) = \arctg [R \sin \delta / (1 - R \cos \delta)] \quad (8)$$

式中 $A(\omega)$ 为法布里-珀罗腔的滤波特性, $\mathcal{Q}(\omega)$ 即腔的谱均衡特性, 可围绕 ω 展成

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{Q}(\omega) &= \mathcal{Q}(\omega_0) + \mathcal{Q}'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \mathcal{Q}''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2/2 + \mathcal{Q}'''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3/6 \\ \mathcal{Q}'(\omega_0) &= (4H^2/c^2) [4R(1 - R^2) \sin \delta_0] / (1 + R^2 - 2R \cos \delta_0), \quad \delta_0 = 4\pi H/\lambda_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

为克服积分困难, 设 $A(\omega) \approx \exp[-(\omega/B_F)^2]$, 先取 $\mathcal{Q}(\omega) \approx D(\omega - \omega_0)^2$, $D \approx \mathcal{Q}''(\omega_0)/2$, 则法布里-珀罗输出也为高斯频谱, 但谱宽因滤波由 $B \rightarrow B_1$, 位相因均衡 $\mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{Y}_1$; B_F, D 分别为法布里-珀罗腔的带宽及色散 (GVD)。 $B_1^{-2} = B^{-2} + B_F^{-2}$, $\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y} - D$, 可得脉宽 τ_1 及啁啾 α_1 为

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \tau(B/B_1) [(1 + \mathcal{Y}_1^2 B_1^4) / (1 + \mathcal{Y}^2 B^4)]^{1/2} \\ \alpha_1 &= \alpha(\mathcal{Y}_1/\mathcal{Y}) (B_1/B)^4 [(1 + \mathcal{Y}^2 B^4) / (1 + \mathcal{Y}_1^2 B_1^4)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2 滤波和色散所起的作用

分析(10)式可见:

1) 设法布里-珀罗腔调谐在无色散的 $D = 0$ 处, 此时腔仅有滤波作用。输出脉冲的 $\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y}$, 啁啾 α_1 随 B_1 单调减小但不可能达到零, 脉宽随带宽减小而减小(图1)。最小脉宽的条件可由 $\partial\tau_1/\partial B_1 = 0$ 解得为:

$$B_1^2 \mathcal{Y} = 1, \quad B_{1 \min} = \mathcal{Y}^{-1/2} \quad (11)$$

$$\tau_{\min} = \tau(B/B_1) [2 / (1 + (B/B_1)^4)]^{1/2} \approx \sqrt{2} (B_1/B) \tau \quad (12)$$

但因 B_1 由腔反射率确定, \mathcal{Y} 由光源动态谱确定, 测量时两者均不可调, 故(12)式是达不到的, 即使达到, 时间带宽积也仅为 $2\sqrt{2} \ln 2/\pi \approx 0.62$ 。

2) 法布里-珀罗腔输出的最小脉宽与零啁啾发生在 $D = \mathcal{Y}$ 处, 即色散与谱位相完全均衡时, 此时 $\alpha_1 = \mathcal{Y}_1 = 0$, 时间带宽积已达变换极限, 理论上脉宽压缩为原来的 $(B/B_1) / (1 + \mathcal{Y}^2 B^4)^{1/2}$ 。因 $B_1 \ll B$, 腔的窄带特性将导致比纯色散器件(如光纤)的脉宽压缩能力差^[3], 即最小脉宽为纯色散器件的 B/B_1 。

3) 法布里-珀罗腔色散的影响还表现在(9)式的 $\mathcal{Q}(\omega)$ 项, 它表示脉冲波形的三阶矩, 即偏畸度。

3 法布里-珀罗腔压缩的最佳工作状态

最佳压缩要求 $D = \mathcal{Y}$ 成立。因 $\alpha < 0$, 故 $D > 0$ 为基本条件(正常色散) $\sin(4\pi H/\lambda_0) > 0$, 将 H 代换为腔体中心谐振波长 λ_0 , $H = n_c \lambda_0/2$, 整数 n_c 为自由谐振区的最低阶, 即 H 对半谐振波长的倍数, 于是:

$$D \approx \sin(2\pi n_c \lambda_0/\lambda_0) \quad (13)$$

显然 $\lambda = \lambda_0(D = 0)$ 不利于压缩。当 $k/n_c \leq \lambda/\lambda_0 \leq (k + 0.5)/n_c$, ($k = n_c, n_c \pm 1, \dots$) 时, $D > 0$ (正常色散) 可压, 最佳压缩条件为(图2, 竖直线)

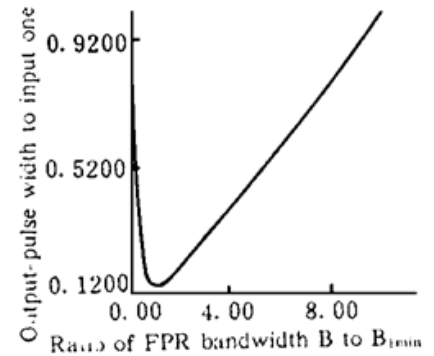


Fig. 1 The pulse-width of FPR output as a function of bandwidth B_1 of the FPR for zero-dispersion cases ($B = 10, r = r_1 = 1$)

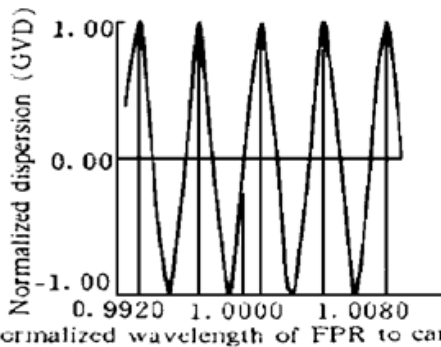


Fig. 2 The dispersion of FPR as a function of tuning frequency f_c . Vertical long lines showed the optimal tuning positions

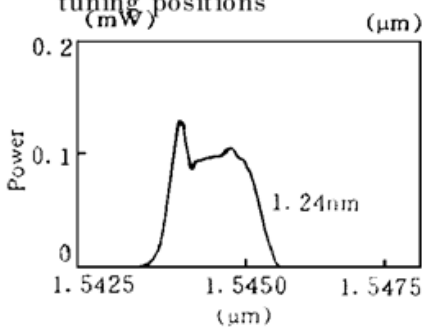


Fig. 3 Wave-spectrum^[2] for the real red-shift chirping pulse used for experiment at Fig. 4

$$\lambda/\lambda_0 = 1 + (4N + 1)\sigma, \quad \sigma = 1/(4n_c),$$

$$(N = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (14)$$

每一可压缩区跨度为 $2\sigma\lambda_0$ 。以文献[2]的参数为例(信号波谱见图3), 谱范围为 $1.5436 \sim 1.5455 \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.5445 \mu\text{m}$, $H \approx 200 \mu\text{m}$, $n_c = 260$, $\sigma \approx 9.6 \times 10^{-4}$, $2\sigma\lambda_0 \approx 2.968 \text{ nm}$ 的实验表明跨度超过约 3 nm 出现脉冲展宽如图4所示^[2], 是由于进入 $D < 0$ 的反常色散区, 可压缩区内不同的 D 值导致压缩脉宽有差异。

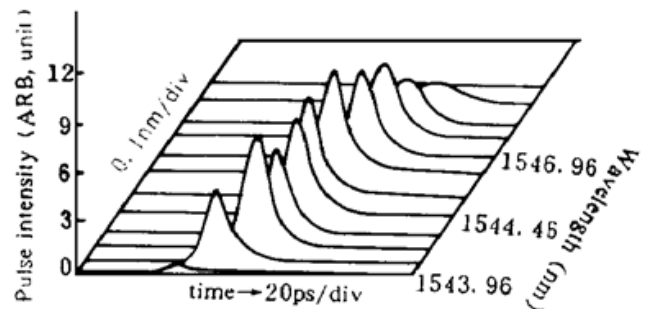


Fig. 4 How the output-pulses vary with the tuning frequencies^[2]

参 考 文 献

- [1] 许宝西等, F-P 滤波窗在半导体光孤子源中的作用. 光学学报, 1994, **14**(10): 1063~ 1067
- [2] M. Nakazawa *et al.*, Transform-limited pulse generation in the gigahertz region from a gain-switched distributed-feedback laser diode using spectral windowing. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(12): 715~ 717
- [3] 吴芳, 蒋泽明, 黄肇明 在单模光纤中传输的光脉冲啁啾的分析. 中国激光, 1996, **23**(6): 495~ 499

On the Optimal Tuning of F-P Resonator for Compression of Optical Chirped Pulse

Jiang Zeming Wu Fang Huang Zhaoming

(Department of Electronic Engineering, Jiading Campus of Shanghai University)

(Received 30 August 1996)

Abstract Dual Mechanism for optical chirped pulse being compressed with a F-P resonator always simultaneously exists, which is the mechanism of filtering effect and dispersion effect. Dispersion of F-P resonator can change the phase of wave spectrum of chirped pulse and appear as normal or extraordinary characters, depending on the difference between the tuning wavelength of F-P resonator and the optical carrier wavelength. It turns out that the optimal tuning wavelength-range of F-P resonator for compression of chirped pulse is a set of noncontiguous wavelength regions separated from each other with spacing of about several nm. The results here also have successfully explained the experimental results by M. Nakazawa *et al* in 1990, for the first time.

Key words optimal tuning of F-P resonator, chirped pulse.