

文章编号: 0258-7025(2002)12-1067-04

啁啾脉冲放大系统中单光栅展宽器的优化

徐 光¹, 钱列加², 范滇元¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800

² 复旦大学信息学院光科学与工程系, 上海 200433

摘要 计算了啁啾脉冲激光放大系统中单光栅展宽器在入射角大于和小于利特罗角两种入射情况, 发现对同一飞秒脉冲在相同展宽比条件下, 入射角小于利特罗角时所需光栅宽度要远小于入射角大于利特罗角时所需的光栅宽度, 且在入射角小于利特罗角时存在一最佳入射角, 此时所对应的光栅宽度达到最小值。同时理论分析及数值计算显示, 在上述条件下入射角小于利特罗角时此单光栅展宽器的等效光栅对间距较入射角大于利特罗角时大为缩短。

关键词 啁啾脉冲放大, 利特罗角, 光栅宽度

中图分类号 TH 744 文献标识码 A

Optimization of the Single-grating Stretcher in Chirped-pulse Amplification

XU Guang¹, QIAN Lie-jia², FAN Dian-yuan¹

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

² Department of Optical Science and Engineering, College of Information, Fudan University, Shanghai 200433

Abstract For a pulse under the same stretch ratio there are two cases: one is the incident angle being less than Littrow angle and the other is the incident angle being bigger than Littrow angle. Investigation shows that the needed grating width is less in the former case than that in the latter case, and with the incident angle being one optimum value the needed grating width will reach the maximum in first case. Under the same condition the perpendicular distance between the gratings is also much less in first case than that in second case.

Key words chirped-pulse amplification, Littrow angle, grating width

1 引 言

近年来, 发展大能量、高峰值功率的超短光脉冲激光器, 用于强场物理、超快 X 射线的产生和高密度等离子体等方面的研究, 已引起了人们极大的关注。啁啾脉冲放大技术是目前成功、高效地产生高峰值功率超短光脉冲的一个重要手段。其核心就是将超短光脉冲在放大之前进行时域上的展宽, 目的在于降低放大过程中激光脉冲的强度, 避免对放大器光学元件造成的损伤。目前, 最常用的展宽器为

E. B. Treacy 1969 年提出的光栅对系统^[1], 及 O. E. Martinez 1987 年在此基础上建立的基于光栅对的展宽及压缩系统^[2]。Ming Lai 于 1993 年又发明了一种更紧凑的单光栅展宽系统^[3], 如图 1 所示, 此系统克服了上述结构的复杂性, 同时也减少了光栅个数。但至今对于在相同脉冲展宽比条件下, 入射角的变化对光栅展宽器的光栅宽度及光栅对间距的影响却未有过系统研究^[4-7]。通过对单光栅展宽系统在入射角大于利特罗角和入射角小于利特罗角两种入射情况下光栅宽度的数值计算, 我们发现对同

收稿日期: 2001-09-17; 收到修改稿日期: 2001-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60088003), 973 国家重点基础研究发展规划(G19990752023) 和国家 863 高技术惯性约束核聚变项目。

作者简介: 徐光(1971—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士生, 主要从事飞秒超短脉冲理论及实验研究。

一飞秒脉冲在相同展宽比条件下,入射角小于利特罗角时所需光栅宽度要远小于入射角大于利特罗角时所需的光栅宽度,计算结果显示光栅宽度有 12%~29% 的减少。同时,对入射角小于利特罗角时的光栅宽度与入射角的变化关系进行数值模拟,证实存在一最佳入射角,此时所对应的光栅宽度达到最小值。在上述过程中,理论分析表明入射角小于利特罗角时,此单光栅展宽器的等效光栅对间距,较入射角大于利特罗角时也有较大缩短,计算结果为 77%~88% 的缩短。这充分说明,在入射角小于利特罗角时,已有单光栅展宽器被进一步优化,即缩短了所需的光栅宽度,同时减小了展宽器占用的空间。上述结果无疑为实现小型、经济的桌面高功率啁啾脉冲放大系统奠定了坚实基础。

2 单光栅展宽系统的结构及理论分析和数值计算

单光栅展宽系统是一双层结构,如图 1((a) 侧视图, (b) 俯视图) 所示,图中 1 为光栅, 2 为水平屋脊镜, 3 为垂直屋脊镜。光脉冲由水平屋脊镜和垂直屋脊镜中间入射到光栅上,第一次展宽利用光栅的下部,第二次展宽利用光栅的上部,每次展宽的光路如图 1(b) 所示,整个展宽过程光脉冲四次通过光栅,从而确保激光束空间特性的恢复。

现在来计算单光栅展宽系统的光栅宽度,图 2 为其等效光路图。由图 2 可知,光栅宽度 L 由三部分组成:入射光斑在光栅上的投影 a ,入射光线与出

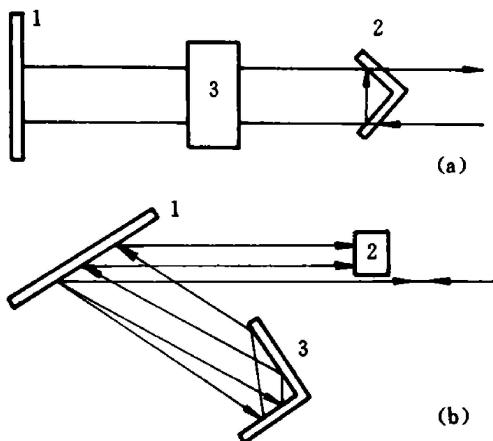


图 1 单光栅展宽器侧视图(a)和俯视图(b)

1: 光栅; 2: 水平屋脊镜; 3: 垂直屋脊镜

Fig. 1 Side view (a) and top view (b) of the single-grating stretcher

1: grating; 2: roof-mirror reflector for horizontal displacement; 3: roof-mirror reflector for vertical displacement

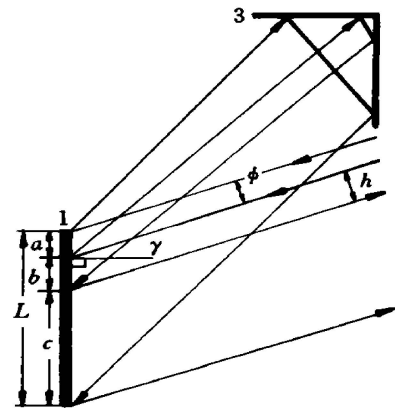


图 2 单光栅展宽器等效光路图

1: 光栅; 3: 垂直屋脊镜; ϕ : 光斑直径; h : 入射光线与出射光线间距; γ : 入射角; L : 光栅宽度,由三部分组成:入射光斑在光栅上的投影 a ,入射光线与出射光线间距在光栅上的投影 b 及光脉冲经一次展宽后的宽度 c

Fig. 2 Schematic of the single-grating stretcher

1: grating; 3: roof-mirror reflector for vertical displacement; ϕ : diameter of light spot; h : distance between incident and output light; γ : incident angle; L : grating width: a , projection of light spot on the grating; b , projection of distance between incident and output light; c , width of light after one time stretch

射光线间距在光栅上的投影 b 及光脉冲经一次展宽后的宽度 c , 即

$$L = a + b + c \tag{1}$$

$$a = \frac{\phi}{\cos \gamma} \tag{2}$$

$$b = \frac{h}{\cos \gamma} \tag{3}$$

式中 ϕ 为光斑直径, h 为入射光线与出射光线间距, γ 为入射角。

光脉冲经一次展宽后的宽度 c , 可利用此单光栅展宽器的等效的光栅对(图 3) 作计算。如图 3 所示可得

$$c = \frac{1}{2}g(\tan \beta - \tan \alpha) + \frac{\phi}{\cos \gamma} \tag{4}$$

式中 g 即 AF 为光栅对间的垂直距离, β 为光脉冲频谱中最低频率成分的衍射角, α 为光脉冲频谱中最高频率成分的衍射角。

由 E. B. Treacy 文中^[1] (5b) 式可知

$$g = \frac{2c^2 d^2 \tau_1 \tau_2 \cos^3 \theta}{\lambda_0^3} \tag{5}$$

式中 θ 为中心波长 λ_0 的衍射角, d 为光栅常数, τ_1 为入射光脉宽, τ_2 为展宽后脉宽。

设入射光脉冲为无啁啾的高斯型, 故其谱宽为

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_0^2}{2c\tau_1} \tag{6}$$

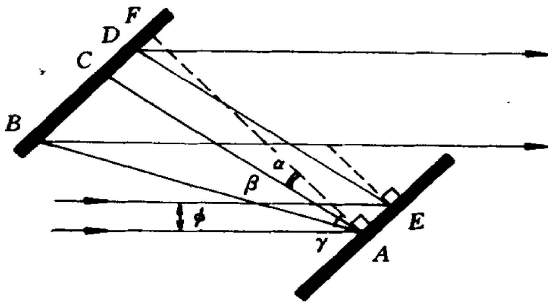


图 3 单光栅展宽器的等效光栅对

AF : 光栅对间的垂直距离; β : 光脉冲频谱中最低频率成分的衍射角; α : 光脉冲频谱中最高频率成分的衍射角; ϕ : 光斑直径; γ : 入射角

Fig. 3 Grating pairs model of the single-grating stretcher

AF : the perpendicular distance between the gratings; ϕ : diameter of light spot; γ : incident angle; β : the diffraction angle of the lowest frequency; α : the diffraction angle of the highest frequency

由光栅方程^[4] 可得利特罗角 i 及衍射角 θ , α , β 为

$$\theta = \arcsin \left| \frac{\lambda_0}{d} - \sin \gamma \right| \quad (7)$$

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{\lambda_0 - \Delta \lambda}{d} - \sin \gamma \right| \quad (8)$$

$$\beta = \arcsin \left| \frac{\lambda_0 + \Delta \lambda}{d} - \sin \gamma \right| \quad (9)$$

$$i = \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \quad (10)$$

联合(1)~(10)式,得:

2.1 光栅宽度与入射角的关系

$$L = \frac{2\phi}{\cos \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right|} + \frac{h}{\cos \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right|} + \frac{\tau_1 \tau_2 c^2 d^2}{\lambda_0^3} \cos^3 \left| \arcsin \left| \frac{\lambda_0}{d} - \sin \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right| \right| \right| \left| \tan \left| \arcsin \left| \frac{\lambda_0 + \frac{\lambda_0^2}{2c\tau_1}}{d} - \sin \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right| \right| \right| - \tan \left| \arcsin \left| \frac{\lambda_0 - \frac{\lambda_0^2}{2c\tau_1}}{d} - \sin \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right| \right| \right| \right| \quad (11)$$

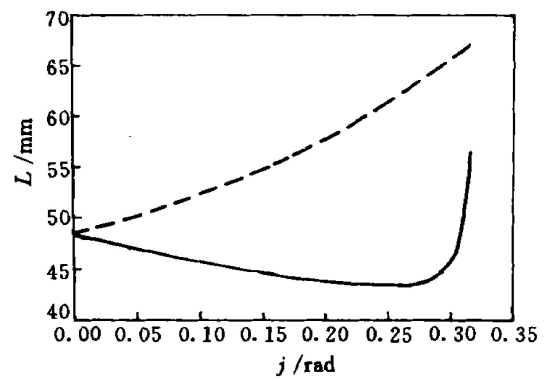
式中“+”对应入射角大于利特罗角时的情况,此时 $\gamma = i + j$, j 为入射角相对利特罗角的偏量。由上式分析可知,随入射角 $\gamma = i + j$ 的增大,即 j 的增大光栅宽度 L 也相应增大。式中“-”对应入射角小于利特罗角时的情况,此时 $\gamma = i - j$, j 为入射角相对利特罗角的偏量。同样由(11)可得,随入射角 $\gamma = i - j$ 的减小,即 j 的增大光栅宽度 L 将减小且数值模拟显示此减小过程中存在一极小值点。

2.2 单光栅展宽器的等效光栅对间距与入射角的关系

$$g = \frac{2\tau_1 \tau_2 c^2 d^2}{\lambda_0^3} \times \cos^3 \left| \arcsin \left| \frac{\lambda_0}{d} - \sin \left| \arcsin \frac{\lambda_0}{2d} \pm j \right| \right| \right| \quad (12)$$

式中“+”“-”的意义与(11)中完全相同。

由(12)式可知单光栅展宽器的等效光栅对间距 g , 在入射角大于利特罗角的情况下随入射角 $\gamma = i + j$ 的增大,即 j 的增大而增大,而在入射角小于利特罗角的情况下随入射角 $\gamma = i - j$ 的减小,即 j 的增大而减小。

图 4 光栅宽度 L 随角偏量 j 的变化曲线

虚线为入射角大于利特罗角时的情况,

实线为入射角小于利特罗角时的情况

Fig. 4 Curve of grating width (L) vs angle deviant (j)

The dashed line represents the incident angle is bigger than Littrow angle. The solid line represents the incident angle is less than Littrow angle

下面利用钛宝石激光振荡器输出的 800 nm, 80fs 的光脉冲作具体数值计算。取光斑直径 $\phi = 6$ mm, 入射光线与出射光线间距 $h = 10$ mm, 光栅常数 1800 lines/mm。由式(10)可得此时利特罗角 $i = 46^\circ$ 。图 4 绘出了该光脉冲被展宽到 80 ps, 即 1000 倍展宽比时, 入射角小于和大于利特罗角时光栅宽度 L 随角偏量 j 的变化。由图可以清楚看到, 在入射角大于利特罗角时(虚线) 随入射角的增大光栅宽度也在增大, 在入射角小于利特罗角时(实线) 随入射角的减小光栅宽度也在减小, 且存在一极小值点, 此时 j 对应最佳角偏量 j_0 , 即, 相应于最佳入射角 $\gamma_0 = i - j_0$ 。表 1 列出了几种展宽比时的数据, 表中 L_1 为角偏量 j 取最佳角偏量 j_0 时, 入射角小于利特罗角的光栅宽度, L_2 为角偏量 j 也取最佳角偏量 j_0 时入射角大于利特罗角的光栅宽度, $\Delta L = L_2$

- L_1 为光栅宽度差, T 为脉冲展宽比, $\Delta L/L_2$ 为减小率。可以看出入射角小于和大于利特罗角对光栅宽度影响是很大的, 有 12%~29% 的变化。图 5 给出了在上述光脉冲输入情况下, 脉冲展宽为 80 ps, 入射角小于和大于利特罗角时, 单光栅展宽器的等效光栅对间距 g 随角偏量 j 的变化。两曲线的走向显示, 等效光栅对间距在入射角小于利特罗角时较入射角大于利特罗角时大为缩短。表 2 列出了几种展宽比时的数据, 表中 g_1 为角偏量 j 取最佳角偏量 j_0 时, 入射角小于利特罗角时的等效光栅对间距, g_2 为角偏量 j 也取最佳角偏量 j_0 时入射角大于利特罗角时的等效光栅对间距, $\Delta g = g_2 - g_1$ 为等效光栅对间距差, T 为脉冲展宽比, $\Delta g/g_2$ 为缩短率。可以看出此缩短率为 77%~88%。

表 1 不同展宽比时光栅宽度计算值

Table 1 Calculated grating widths for different stretch ratio

T	τ_2 /ps	j_0 /rad	L_1 /mm	L_2 /mm	ΔL /mm	$\Delta L/L_2$
1000	80	0.250	43	61	18	29%
2000	160	0.225	61	76	15	20%
3000	240	0.215	78	92	14	16%
4000	320	0.200	94	107	13	12%

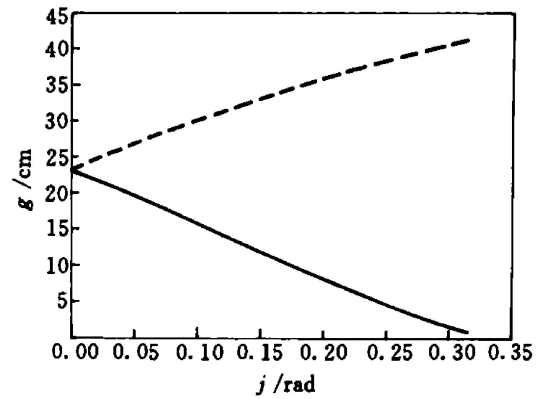
表 2 不同展宽比时光栅对间距计算值

Table 2 Calculated perpendicular distance between the gratings for different stretch ratio

T	τ_2 /ps	j_0 /rad	g_1 /cm	g_2 /cm	Δg /cm	$\Delta g/g_2$
1000	80	0.250	5	38	33	88%
2000	160	0.225	13	74	61	83%
3000	240	0.215	21	110	89	81%
4000	320	0.200	33	144	111	77%

3 结 论

本文系统分析计算了啁啾脉冲激光放大系统中的单光栅展宽器, 在入射角大于和小于利特罗角两种入射情况下, 光栅宽度及等效光栅对间距随入射角的变化, 得出了在入射角小于利特罗角时存在一最佳入射角, 此时光栅宽度达到最小值及入射角小于利特罗角时光栅宽度和等效光栅对间距较入射角大于利特罗角都有大幅度的减小和缩短的结论。针对钛宝石激光振荡器输出的 800 nm, 80 fs 的光脉冲作具体数值计算, 结果是光栅宽度有 12%~29% 的

图 5 单光栅展宽器的等效光栅对间距 g 随角偏量 j 的变化曲线

虚线为入射角大于利特罗角时的情况,
实线为入射角小于利特罗角时的情况

Fig. 5 Curve of the perpendicular distance between the gratings (g) vs angle deviant (j)

The dashed line represents the incident angle is bigger than Littrow angle. The solid line represents the incident angle is less than Littrow angle

减少, 等效光栅对间距有 77%~88% 的缩短。此项工作为实际啁啾脉冲激光放大实验提供了一种经济、紧凑的单光栅展宽器的设计方案。

参 考 文 献

- Edmond B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- Oscar Eduardo Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: application to fiber compensation in 1.3~1.6 μm region [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 59~64
- Ming Lai, Shui T. Lai, Casimir Swinger. Single-grating laser pulse stretcher and compressor [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 6985~6987
- Jiang Jie, Yang Tianxin, Yu Jian *et al.*. A design of femtosecond pulse stretcher [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(1): 122~125 (in Chinese)
- Yang Jianjun, Sun Yanling, Ruan Shuangchen *et al.*. Study on single-grating stretcher in chirped-pulse amplification [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(4): 457~461 (in Chinese)
- Zhao Shanghong, Wang Yishan, Chen Guofu *et al.*. Study of laser pulse stretching for chirped-pulse amplification of femtosecond pulse [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(3): 204~207 (in Chinese)
- Mark Trentelman, Lan N. Ross, Colin N. Danson. Finite size compression gratings in a large aperture chirped pulse amplification laser system [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 8567~8573
- Liao Yanbiao. *Physics Optics* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1986. 130 (in Chinese)