

文章编号: 0253-2239(2007)02-0272-3

# 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形\*

郭爱林 杨庆伟 谢兴龙 高 奇 薛志玲 李美荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要:** 为了充分利用放大介质的增益带宽, 获得脉宽更短, 功率更高的输出脉冲, 需要将输入到主放大链的种子脉冲进行光谱整形来补偿放大过程中的增益窄化效应。提出了利用变栅距反射光栅实现中心波长 1053 nm, 谱宽 6 nm 啁啾脉冲的光谱整形。运用严格的光栅衍射耦合波理论分析光栅的衍射特性, 发现该方案不会引入相位畸变。分别计算和分析了刻槽深度、入射角大小、光栅周期以及入射光波长的变化对衍射效率的影响, 通过选取适当的光栅参量可获得 0.5%~84% 的光谱调制深度。

**关键词:** 激光光学; 啁啾脉冲; 光谱整形; 变栅距光栅; 严格耦合波分析; 空间整形

中图分类号: TN243 文献标识码: A

## Chirped Pulse Spectrum Shaping by Spatial Grating with Variable Line-Space

Guo Ailin Yang Qingwei Xie Xinglong Gao Qi Xue Zhiling Li Meirong

(Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** In order to take full advantage of amplifier gain-bandwidth, and obtain a shorter pulse with higher power in the terminal, it is necessary to conduct a spectrum shaping before the seed pulse being injected into the main amplifier chain to compensate the effect of gain narrowing. A new method, based on the spatial grating with variable line-space for spectrum shaping of chirped laser pulse with the central wavelength at 1053 nm and line width 6 nm, is presented. The rigorous coupled-wave theory is used to analyze the characteristics of grating diffraction, and the results indicate that this method produces no phase distortion. The diffraction efficiency, as a function of the depth and period of groove, incident angle, and incident wavelength, is calculated and analyzed, respectively. With proper grating parameters, the spectrum modulation depth from 0.5% to 84% can be achieved.

**Key words:** laser optics; chirped pulse; spectrum shaping; variable line-space gratings; rigorous coupled-wave analysis; spatial shaping

## 1 引 言

啁啾脉冲放大技术在超短超强激光中有重要的应用<sup>[1,2]</sup>。由于啁啾脉冲具有一定的光谱宽度, 因此在放大过程中由于增益窄化效应使得激光脉冲不能充分利用放大介质的增益带宽, 不能有效地从放大介质中提取能量<sup>[3]</sup>, 而且啁啾脉冲变窄将增加光栅压缩后的超短脉冲宽度, 限制了脉冲功率的进一步提高等一系列问题。因此, 需要利用光谱调制器件展宽输入到主放大链的种子脉冲的光谱来补偿放

大器的增益不均匀性。这种光谱调制器在调制带宽内对中心频谱的衰减大于对边缘频谱的衰减, 而使得光谱顶端变平甚至在光谱中心产生凹陷<sup>[4]</sup>。

由于目前高能超短脉冲激光系统主放大链采用钎玻璃作为增益介质, 因此种子啁啾脉冲的中心波长为 1053 nm, 谱宽仅为 6 nm。由于该种子啁啾脉冲谱宽较小, 采用常规的光谱整形技术难以有效地对其进行整形, 因此需要探索其他的、更有效的光谱整形技术。

\* 国家高技术 863-804-2 课题(2005AA842090)资助。

作者简介: 郭爱林(1981-), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要从事拍瓦超短脉冲激光技术方面的研究。

E-mail: gal147@163.com

导师简介: 谢兴龙(1968-), 男, 安徽人, 研究员, 博士, 主要从事超短脉冲与强激光技术方面的研究。

E-mail: xiexl329@mail.shnc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-22; 收到修改稿日期: 2006-05-31

平行光经光栅衍射后将产生各级衍射光,其中零级光的衍射方向为光栅平面的镜面反射方向,光栅的周期、槽深都能影响能量在各级衍射光中的分布,利用展宽器中脉冲频谱在空间展开的特点,可以在光路中插入具有合适的反射率(零级光效率)分布曲线的光栅来达到光谱整形的目的。

## 2 原 理

### 2.1 应用变栅距光栅实现光谱整形的基本原理

在高能量超短脉冲激光装置中通常采用多通展宽器来展宽飞秒种子脉冲,展宽器中色散元件的作用使得激光束在展宽器中的特定位置具有光谱空间分布的特点,如图 1 所示,这种光谱的空间分布便于实现光谱整形。通过改变光谱对应光栅位置的刻线周期来实现对 0 级光的调制,利用全反镜将 0 级光反射回原光路而达到光谱整形的目的。

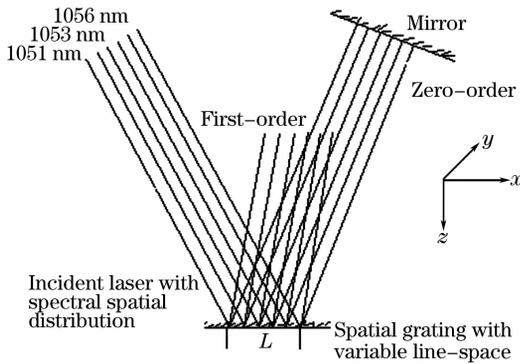


图 1 光谱整形原理

Fig. 1 Theory of spectrum shaping

由于 TM 模入射情况下光栅的吸收较 TE 模大,同时 TM 模对光栅制作工艺上引起的误差比较敏感,且理论分析较 TE 模情况复杂,因此我们以电场矢量方向垂直于入射面的 TE 模入射来分析<sup>[5]</sup>。

设入射光为

$$E(x, z) = E_y \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin \theta + z \cos \theta) \right], \quad (1)$$

其中  $E_y$  为入射光电场分量的振幅,  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为波长。

根据严格的耦合波计算<sup>[5,6]</sup>, 光栅的各衍射级可表示为

$$E_j(x, z) = E_{y,j} \exp [i(k_{x,j}x - k_{z,j}z)], \quad (2)$$

式中

$$k_{x,j} = 2\pi \left( \frac{1}{\lambda} \sin \theta + j \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (3)$$

$$k_{z,j} = 2\pi \sqrt{\left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 - \left( \frac{1}{\lambda} \sin \theta + j \frac{1}{\Lambda} \right)^2}, \quad (4)$$

$\Lambda$  为光栅周期,  $j$  为衍射级次, 零级光可表示为

$$E_0(x, z) = E_{y,0} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin \theta + z \cos \theta) \right], \quad (5)$$

比较(1)式与(5)式, 0 级光电场分量的振幅得到了调制, 而相位因子保持不变, 即不会引入相位畸变问题。这对于惯性约束聚变快点火实验中对拍瓦激光光束质量的高要求具有重要意义。

### 2.2 光栅的衍射特性分析

对于光栅衍射的能量分布情况的计算不宜采用标量衍射理论而应当采用严格的耦合波分析方法<sup>[7]</sup>。现以镀金矩形槽对称面型光栅为例来分析。

#### 1) 槽深对衍射效率的影响<sup>[5]</sup>

理论和实验证明光栅的峰值衍射效率出现在光栅周期等于衍射波长且入射角满足布拉格条件时, 图 2 为光栅周期等于中心波长 1053 nm (950 l/mm)、一级布拉格条件(30°)入射时 0 级、1 级衍射效率随槽深  $d$  的变化, 由图 2 可见, 当  $d \approx 0.8\lambda$  时 1 级衍射效率达到最大值。

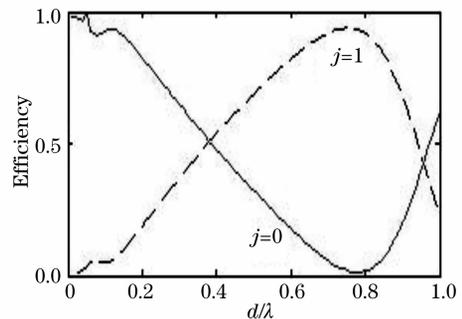


图 2 槽深对衍射效率的影响

Fig. 2 Diffraction efficiency for gold coated rectangular-groove reflection grating as a function of groove depth  $d$

#### 2) 入射角的选取

槽深  $d=0.8\lambda$ 、光栅周期为  $\Lambda=\lambda$  时, 衍射效率随入射角  $\theta$  变化的关系如图 3 所示。由图可以看出, 当入射角满足布拉格条件( $\theta=30^\circ$ )时, 1 级衍射效率达到最大值, 相应的 0 级则为最小值; 对于入射角的选取, 首先要考虑 0 级衍射随光栅周期变化时效率的变化范围; 其次还要考虑入射光的几何宽度  $s$ , 如图 1 所示。入射角  $\theta$  越大, 光射照在光栅上的长度 ( $L = s/\cos \theta$ ) 就越长, 这样光谱整形的空间分辨力就越高, 因此要尽量采用尺寸大的光栅; 再次, 入射角应该偏离利特罗角(即 1 级衍射光与入射光重合、沿相反方向传播), 以免 1 级衍射光反射回光路中而影响光谱整形效果; 最后, 角度的选择还要便于相关光学器件的摆放。以下取入射角为  $40^\circ$  为例进行分析。

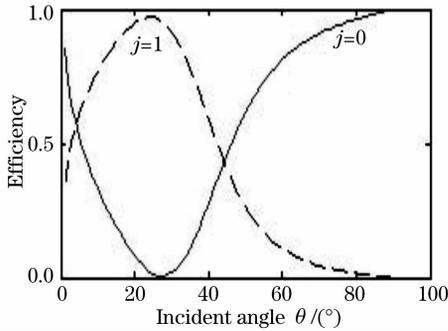


图 3 衍射效率随入射角的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency for gold coated rectangular-groove grating as a function of incident angle  $\theta$

### 3) 不同光栅周期时的衍射效率的变化

$\theta=40^\circ$ 、 $d=0.8\lambda$  时 0 级、1 级衍射效率随光栅每毫米刻线数的变化,如图 4。可见在 863 l/mm 时 0 级光有最大效率 91.837%,980 l/mm 时 0 级光有最小效率 7.286%,从而在范围 863~980 l/mm 之间取值即可实现对 1053 nm 波长 0 级衍射效率为 7.286%~91.837%的调制,这完全能满足光谱整形的要求。

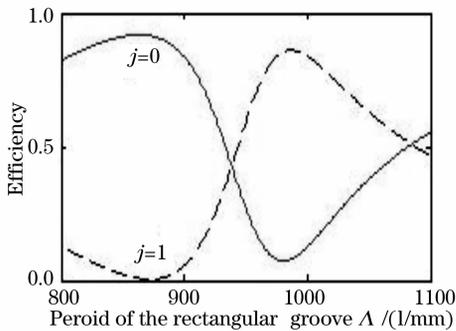


图 4 不同光栅周期时的衍射效率的变化

Fig. 4 Diffraction efficiency for gold coated rectangular-groove reflection grating as a function of period of rectangular groove

对于其他波长(1051~1056 nm)的衍射效率计算如图 5 所示,可见在该波段内光栅对各波长的光波衍射特性相近。

### 4) 光栅每毫米刻线分布的计算

光栅的 0 级衍射效率与  $x, t$  (每毫米刻线数) 有关,设衍射效率表示为  $R(x, t)$ , 入射光光强分布为  $P(x)$ , 将其整形为光强分布函数为  $Q(x)$ , 因此入射光经光栅衍射、全反镜反射再经光栅衍射回原光路中, 由于光栅槽型的对称性, 有

$$Q(x) = P(x)R^2(x, t). \quad (6)$$

采用上述分析中所用的参量, 对 0 级光的调制  $Q(x)/P(x)$  可以在 0.531%~84.340% 之间变化,

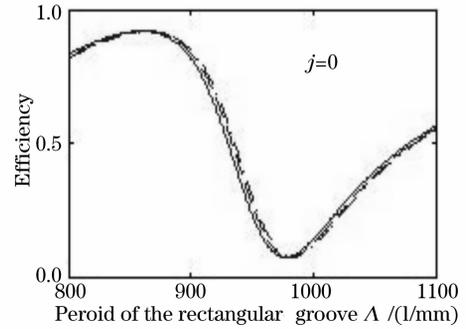


图 5 不同光栅周期时的衍射效率的变化

Fig. 5 Diffraction efficiency for gold coated rectangular-groove reflection grating as a function of period of the rectangular groove

这完全满足实现光谱整形的要求。

由(6)式可知光栅反射率(零级光效率)分布曲线  $R(x, t)$  由  $Q(x)/P(x)$  决定, 通过程序可以解出  $R(x, t)$  对应的光栅刻线周期分布函数  $t(x)$ ; 根据  $t(x)$  即可制作出符合特定要求的光谱整形光栅。

## 3 结 论

通过对光栅的严格耦合波分析与计算发现, 光栅 0 级光的相位因子和入射光相位因子相等, 即该整形方案不会引入相位畸变。适当选取入射角和光栅槽深后, 利用具有光栅刻线周期分布函数  $t(x)$  的变栅距反射光栅可以实现对具有空间光谱分布的光束的光谱整形。

## 参 考 文 献

- 1 Donna Strickland, Gerard Mourou. Compression of amplified chirped optical pulse[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 Xie Xinglong, Zhu Jianqiang, Liu Fengqiao *et al.*. 20TW sub-picosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 865~872 (in Chinese)
- 3 谢兴龙, 朱健强, 刘凤翘 等. 20TW 亚皮秒激光系统 (SPS) 与中子产生实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 865~872
- 3 B. C. Stuart, S. Herman *et al.*. Chirped-pulse amplification in Ti:sapphire beyond 1  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(3): 528~538
- 4 Zhu Pengfei, Yang Jingxin, Xue Shaolin *et al.*. Spectrum shaping of the ultrashort pulse [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1075~1078 (in Chinese)
- 5 朱鹏飞, 杨镜新, 薛绍林 等. 超短脉冲的光谱整形[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1075~1078
- 5 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(11): 1780~1787
- 6 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 811~818
- 7 H. P. Herzig. *Micro-Optical Components, System and Application* [M]. Zhou Haixian transl., Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 63~64 (in Chinese)
- H. P. 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 周海宪译, 北京: 国防工业出版社, 2002. 63~64