

基于棱镜对的超短脉冲倍频系统的光学设计

张留洋¹ 孙培敬¹ 黄金哲^{1*} 曲玉秋² 浦绍质¹ 武慧南¹ 刘豫江¹

¹哈尔滨理工大学光电信息科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150080

²黑龙江大学物理科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 针对宽带超短脉冲的倍频,用光学设计软件设计了10 fs、0.8 μm 超短脉冲的倍频系统,该系统包括4个棱镜、2个聚焦透镜。宽带倍频系统要求脉冲中所有的波长成份在非线性晶体中均能实现相位匹配,据此选择操作数建立系统评价函数;以非线性光学倍频中的允许角度评价光学系统的质量;分别对基波和谐波的光路优化设计,获得的棱镜尺寸、棱镜间距和透镜焦距等参数能够使脉冲中的各频率成份以相位匹配方向入射到非线性晶体或无空间啁啾的合束。此外,编写宏对光学系统中群延色散进行控制,使基波在晶体中心无啁啾,以获得最佳倍频效果,谐波光路引入一定的群延色散补偿谐波中的啁啾,消除了谐波中的时间啁啾,获得高质量的谐波脉冲。

关键词 光学设计;超短脉冲;倍频;光谱角色散

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0922006

Optical Design of Frequency-Doubling System for Ultrashort Pulses Based on Prism Pairs

Zhang Liuyang¹ Sun Peijing¹ Huang Jinzhe¹ Qu Yuqiu² Pu Shaozhi¹
Wu Huinan¹ Liu Yujiang¹

¹Department of Optoelectric Information Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

²College of Physics Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract To realize frequency-doubling of ultrashort pulses, optical design software is employed to design the frequency-doubling system for 10 fs, 0.8 μm ultrashort pulses in which contains four prisms, two lenses and a nonlinear crystal and all of them can be made by common glass materials. Firstly, the principle of frequency-doubling system is introduced. The optical system requires that all of frequency components can reach phase matching in nonlinear crystal and the merit function is built based on this point. The quality of the optical system is evaluated by permitted angle. Consequently, the optimization is executed for parts of fundamental wave and second harmonic wave. Size of prisms, distance between prism pairs and focus length of lenses which can make each frequency component in fundamental wave or second harmonic wave strike into nonlinear crystal in phase-matching direction or superpose in space without spatial chirp are obtained. In addition, a macro program to compute group delay dispersion in optical system is used as an operand to control group delay dispersion in optical system. Finally, in order to reach optimal second harmonic generation, fundamental wave has no chirp at the center of crystal and the part second harmonic wave passes by introducing group delay dispersion to compensate the chirp in second harmonic wave. Then chirp in second harmonic pulse is eliminated and high quality second harmonic pulse output is obtained.

Key words optical design; ultrashort pulses; frequency-doubling; achromatic phase matching

OCIS codes 220.4830; 190.2620; 190.7110

收稿日期: 2015-5-5; 收到修改稿日期: 2015-5-27

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F201312)

作者简介: 张留洋(1981—),男,博士,副教授,主要从事超快光学和光学设计方面的研究。E-mail: johnien@163.com

*通信联系人。E-mail: hjinjer@126.com

1 引 言

超短脉冲由于其高功率和窄脉冲宽度在诸多领域中获得了广泛的应用^[1-3]。由于固体激光器的调谐范围有限,只能产生有限光谱范围的超短脉冲,拓展超短脉冲的光谱范围是超短脉冲技术的发展方向之一。倍频、和频、差频等光学频率变换方法是扩展超短脉冲激光光谱范围的主要手段,其中倍频作为和频的简并情况是光学频率变换的基本方法。相对于单色光倍频,具有较宽光谱范围的超短脉冲倍频更为复杂,不仅需要中心频率满足相位匹配条件,而且要求倍频器件有一定的相位匹配带宽,使脉冲的所有频率成份均能转换为谐波输出^[4]。一般的超短脉冲倍频方法是在考虑相位匹配的情况下采用薄的非线性晶体,薄晶体具有较大的相位匹配带宽^[5],此时,几乎所有的频率成份都可以转化为谐波,且群速度失配较小,能够获得高质量的谐波脉冲输出,但由于晶体长度短,因此转换效率较低。如果采用厚晶体,虽然可以获得高的转换效率,但厚晶体相位匹配带宽较小,不能使基频脉冲所有频率成份转化为谐波输出,谐波中包含的频率成份较少,使输出脉冲的脉宽展宽,降低了脉冲质量。为了提高转换效率,同时能够获得高质量的脉冲输出,采用宽带脉冲倍频技术—光谱角色散技术是一个有效的途径^[4,6-8]。光谱角色散技术利用角色散元件的特性,使超短脉冲的不同频率成份在空间中分离,即产生空间啁啾^[9-10],而后利用聚焦透镜使不同频率成份以各自的相位匹配角进入晶体,获得高的转换效率。光谱角色散系统一般采用多个棱镜或光栅与透镜的组合,系统的结构参数需要精确地确定以实现基波中所有频率成份均能达到相位匹配。光学设计软件能够直观的获得光学系统的参数和光线在光学系统中的传播^[11-12],并能方便的模拟棱镜、光栅等色散元件^[13-14],但基于几何光学的光学设计软件不能体现超短脉冲的时间特性,而难以应用于超快光学系统的设计。而 D C O'Shea^[15]利用 Zemax、Code V 和 OSLO 三种光学设计软件通过光纤追迹实现对棱镜对和光栅对等光学系统的群延色散和三阶色散的计算,使光学设计软件能够方便地计算超短脉冲的时间特性。本文利用光学设计软件设计了对 10 fs、0.8 μm 超短脉冲倍频的光学系统参数,整个系统能实现有效的倍频,并消除了谐波中的时间和空间啁啾。把光学设计软件用于超快光学,为超快光学的计算和实验设计提供了新的途径和手段。

2 光谱角色散系统

光谱角色散装置如图 1 所示,图中 P1、P2、P3 和 P4 为 4 个棱镜,P1、P2、P3 和 P4 相邻平面互相平行,NC 为非线性晶体,L1 和 L2 为透镜。红色的光线代表基频光,蓝色的光线代表倍频光。基频脉冲通过 P1 和 P2 的传播,相当于通过一个玻璃平板,则从 P2 中出射光线的方向与入射到 P1 的光线方向平行,但由于棱镜的角色散特性,从 P2 出射的光束具有一定的空间啁啾,该光束经 L1 会聚后进入非线性晶体,如果空间啁啾和 L1 的焦距选择合适,则基频光中的各个频率成份在进入晶体后,可满足各自的相位匹配条件。在非线性晶体中产生的倍频光经 L2 准直以后变为具有空间啁啾的光束,经过平行的棱镜对 P3、P4 消除空间啁啾,此过程为棱镜对 P1、P2 产生空间啁啾的相反过程,倍频超短脉冲从 P4 出射,出射方向与入射到 P1 的光束方向相同。

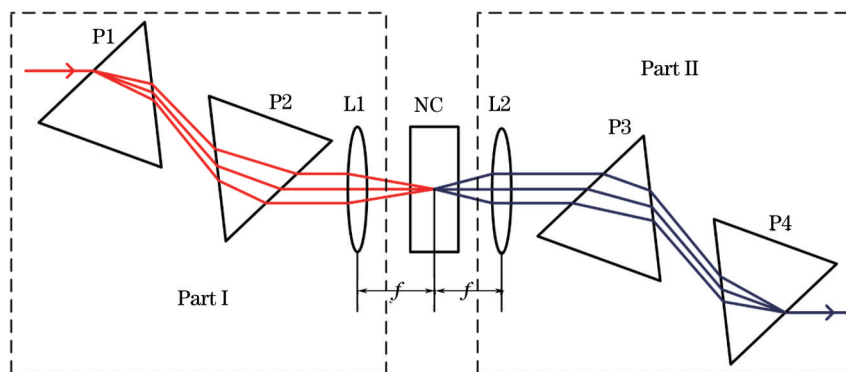


图 1 光谱角色散系统光路图

Fig.1 Scheme of achromatic phase matching system

在本设计中,选择光源为 10 fs 超短脉冲振荡器,中心波长 0.8 μm,根据傅里叶变换其光谱宽度大约 140 nm,光斑半径 2 mm。非线性晶体选择β-BBO,切割角 29.2°(0.8 μm 的相位匹配角),中心波长垂直于非线

性晶体入射,采取I型倍频。

3 系统要求

要保证基频光中各频率成份经过L1聚焦后,在BBO中满足相位匹配,各波长入射到BBO晶体的方向与中心波长光线方向的夹角 ϕ 满足:

$$\phi = \arcsin[n_{1o} \sin(\theta_p - \theta_{p0})], \quad (1)$$

其中, n_{1o} 为基频光在BBO中的折射率, θ_p 为不同波长在BBO晶体中的相位匹配角, θ_{p0} 为中心波长的相位匹配角, ϕ 这里称为最佳入射角。各波长的最佳入射角 ϕ 如表1所示。

表1 部分波长在晶体上的入射角及允许角度

Table 1 Incident angles into crystal and permitted angles for some wavelengths

Parameter	Value								
Wavelength / μm	0.73	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.87
$\phi / (10^{-2} \text{ rad})$	8.56	7.19	4.61	2.22	0	-2.06	-3.98	-5.77	-6.62
$\Delta\theta / (10^{-2} \text{ rad})$	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17	0.19	0.19	0.20	0.21
$\varphi_1 / (10^{-2} \text{ rad})$	8.65	7.18	4.49	2.05	0	-2.18	-4.04	-5.77	-6.58
$\varphi_2 / (10^{-2} \text{ rad})$	-8.71	-7.26	-4.57	-2.14	0	2.10	3.97	5.69	6.50

实际光学系统中各波长光线入射到晶体的角度总会和最佳入射角有一定的偏差,需要有一定的标准衡量光学系统的质量。这里,利用非线性光学频率变换中的允许角度来评价光学系统的质量。倍频过程的允许角度^[5]可表示为:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2l} \frac{(n_{2o}^2 \sin^2 \theta_p + n_{2e}^2 \cos^2 \theta_p)^{3/2}}{n_{2o} n_{2e} \sin(2\theta_p)}, \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta$ 即为允许角度,表示某一波长光束的入射方向与其相位匹配时的入射方向的最大允许偏差, l 为BBO晶体的长度, n_{2o} 和 n_{2e} 为谐波在BBO晶体中的主折射率。若选择BBO的长度为1 mm(直接倍频的离散长度为0.43 mm),得到不同波长的允许角度列于表1。

对于谐波,要求谐波中各频率成份消除空间啁啾和时间啁啾,能够输出无啁啾的谐波脉冲。

4 系统设计

4.1 系统参数分析

由于激光的能量集中于光斑的中心,因此把入射光束看作通过光斑中心的一条光线,此光线为倍频的主要光线;对于有限的传播距离,激光可近似的看做平行光,设置视场为0;在0.73~0.87 μm 范围,每隔0.01 μm 选择15个波长,进行光线追迹。为减少反射损失,光束以布儒斯特角入射到P1。

为满足光学系统的要求,需要适当数量的参数作为变量。该系统的主要参数有:棱镜的大小和材料,棱镜对之间的距离,2个透镜的焦距。棱镜的玻璃材料一般不选为优化变量,为减少光学系统的尺寸,一般应选择色散大的玻璃材料,但这样的玻璃会带来色散不均匀,可能使各频率成份光线的入射角度超出允许角度的范围,使倍频的效率降低,此时需用色散较小的玻璃,使光线的入射角度在允许角度之内,以保证有效倍频。此外,正常色散的玻璃材料将给脉冲带来正啁啾,使脉冲展宽,脉冲在棱镜中传输同样引入正啁啾,脉冲仅在棱镜对间传输时才能产生负啁啾,因此棱镜的尺寸、棱镜间距是控制系统啁啾的重要参数,同时棱镜对部分是产生空间啁啾的根源。聚焦透镜的焦距是控制各频率光线入射到晶体上的方向的主要参数。因此,选择棱镜对的尺寸、棱镜对的间距和两透镜的焦距共6个参数作为系统优化的变量。

4.2 模型建立及优化

由于倍频过程不能在光学设计软件中进行模拟,则需对图1所示的光学系统进行分割,NC之前为Part I,之后为系统Part II,根据系统的特点Part II采用反向设计。

对于Part I,要求各波长光线入射晶体上的角度应与上述的最佳入射角相等,以此建立评价函数。通过操作数 V_{real} 获得光线经过L1后的方向余弦,其应与最佳入射角 $\phi(\lambda)$ 的正弦大小相等,即

$$V_{\text{reab}}(\lambda) = \sin[\phi(\lambda)], \quad (3)$$

其中, $V_{\text{reab}}(\lambda)$ 为不同波长的操作数 V_{reab} 的值, 此外, 中心波长为脉冲中主要的频率的成份, 要保证中心波长的光线从棱镜对中出射后经过聚焦透镜的中心, 因此使用操作数 V_{reab} , 使中心波长在聚焦透镜上的 V_{reab} 值为零。为了考察脉冲通过光学系统的时间特性, 利用 D C O'Shea 所设计的宏计算了脉冲经过光学系统的群延色散^[15], 并利用宏作为优化操作数, 对脉冲中啁啾的进行控制。角色散脉冲的传输不同于平行光束的传输, 其二阶色散系数^[4]可表示为:

$$\alpha_j = \frac{d^2 k_j}{d\omega^2} + \frac{1}{v_j^2 k_{j0}}, \quad (4)$$

其中, $v_j = dk/d\omega$, k_{j0} 为中心波长的波常数, $j=1, 2$ 分别代表基波和谐波参数。利用 BBO 晶体的色散方程, 可得基波和谐波的二阶色散系数分别为 $2.50 \text{ fs}^2/\mu\text{m}$ 和 $1.33 \text{ fs}^2/\mu\text{m}$ 。为达到最佳的倍频效果, 要求基波在晶体中心无啁啾, 基波通过 0.5 mm 的 BBO 晶体产生的群延色散为 1250 fs^2 , 即要求 Part I 产生 -1250 fs^2 的啁啾, 使基波在晶体中心啁啾为零。那么, 由晶体出射的谐波的啁啾为 -1090 fs^2 , 需要通过 Part II 补偿, 即要求第二对棱镜引入的群延色散为 1090 fs^2 。

设置棱镜的坐标、棱镜的尺寸及聚焦透镜的曲率半径作为变量, 利用上述评价函数对 Part I 优化, 优化后的光学系统的结构如表 2、3 所示, 表中参数的单位均为毫米。优化后 P1、P2 两相邻面的垂直距离为 63.5 mm, 棱镜截面边长 18.7 mm。不同波长光线入射到 NC 上的角度 $\varphi_1(\lambda)$ 列于表 1, 与最佳入射角 $\phi(\lambda)$ 对比, 各波长的入射角度在倍频允许角度的范围之内。

表 2 Part I 的结构参数
Table 2 Parameters of Part I

	Surf: type	Radius	Thickness	Glass	Exit loc X	Exit loc Y	Exit loc Z
OBJ	Standard	Infinity	Infinity				
STO	Standard	Infinity	5.00				
2	Standard	Infinity	0				
3	Non-sequential component	Infinity	-		0	-133.44	102.67
4	Standard	Infinity	1.00				
5	Standard	14.31	3.00	K9			
6	Standard	-30.09	-				
IMA	Standard	Infinity					

表 3 Part I 的非序列元件参数
Table 3 Parameters of non-sequential components in Part I

Object type	X positon	Y positon	Z positon	Tilt about X	Tilt about Y	Tilt about Z	Material
Ploy object	0	-3.96	15.00	60.46	0	0	SF11
Ploy object	0	-125.18	87.67	0.46	0	0	SF11

表 4 Part II 的结构参数
Table 4 Parameters of Part II

	Surf: type	Radius	Thickness	Glass	Exit loc X	Exit loc Y	Exit loc Z
OBJ	Standard	Infinity	Infinity				
STO	Standard	Infinity	5.00				
2	Standard	Infinity	0				
3	Non-sequential component	Infinity	-		0	181.1	254.6
4	Standard	Infinity	1.00				
5	Standard	15.30	3.00	K9			
6	Standard	-30.97	-				
IMA	Standard	Infinity					

Part II为倍频光通过棱镜对及聚焦透镜的传播,追迹波长为Part I中的一半,若基波各波长都能达到相位匹配,由于晶体长度远小于空间走离长度,空间走离可忽略,则倍频光从晶体中出射的角度与基频光入射到晶体的角度相等。同时,要求Part II补偿谐波中的啁啾,需在Part II引入1090 fs²的正啁啾。由于倍频光的波长范围处于SF11的吸收带,棱镜材料采用K9玻璃,经过与Part I类似的优化过程,系统结构参数如表4、表5所示,棱镜对相邻面的垂直距离为204.3 mm,棱镜边长为24.3 mm。不同波长的谐波入射到NC上的角度 φ_2 列于表1,与最佳入射角相比,在倍频允许角度之内。

表5 Part II的非序列元件参数

Table 5 Parameters of non-sequential components in Part II

Object type	X positon	Y positon	Z positon	Tilt about X	Tilt about Y	Tilt about Z	Material
Ploy object	0	4.19	5.00	-56.86	0	0	K9
Ploy object	0		219.62	3.14	0	0	K9

通过上面的设计,可以保证基波倍频时,各波长基本沿相位匹配方向在倍频允许角度内入射,产生的谐波经过棱镜对,消除了空间和时间啁啾。

5 结 论

通过对宽带脉冲倍频系统的分析,确定倍频系统的设计指标,以光学倍频的允许角度评价倍频系统质量,设计针对10 fs脉冲倍频的光学系统。所设计的系统综合考虑了超短脉冲中时间啁啾和空间啁啾的补偿及消除,其中通过棱镜对参数和聚焦透镜焦距消除系统的空间啁啾,以棱镜对参数控制时间啁啾。所设计的系统能够使入射的所有波长成份几乎完美地实现了相位匹配和合束,实现了宽带超短脉冲的倍频。本文把光学设计软件用于超快光学系统设计,对超快光学系统的设计有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 P Joly, M Petrarca, A Vogel, *et al.*. Laser-induced condensation by ultrashort laser pulses at 248 nm[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(9): 091112.
- 2 C Janisch, N Mehta, D Ma, *et al.*. Ultrashort optical pulse characterization using WS2 monolayers[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(2): 383-385.
- 3 A Marini, F Biancalana. Ultrashort self-induced transparency plasmon solitons[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(24): 243901.
- 4 J J Huang, L Y Zhang, W C Zhang, *et al.*. Theory of second harmonic generation of ultrashort pulses for collinear achromatic phase matching[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30(2): 431-438.
- 5 Li Gang. *Coversion and Expansion of Laser Frequency*[M]. Beijing: Science Press, 2005, 144-147.
李 港. 激光频率的变换与扩展[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 144-147.
- 6 S Kane, J Squier. Grism-pair stretcher-compressor system for simultaneous second- and third-order dispersion compensation in chirped-pulse amplification[J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14(3): 661-665.
- 7 B A Richman, S E Bisson, R Trebino, *et al.*. All-prism achromatic phase matching for tunable second-harmonic generation[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(15): 3316-3323.
- 8 P Baum, S Lochbrunner, E Riedle. Tunable sub-10-fs ultraviolet pulses generated by achromatic frequency doubling[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(14): 1686-1688.
- 9 X Gu, S Akturk, R Trebino. Spatial chirp in ultrafast optics[J]. *Opt Comm*, 2004, 242(4-6): 599-604.
- 10 R L Fork, O E Martinez, J P Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. 1984, 9(5): 150-152.
- 11 Lü Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of large entrance pupil catadioptric star sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716002.
吕 博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 折反射式大入瞳星敏感器光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0716002.
- 12 Fang Zhiwei, Su Yahui, Wang Chaowei, *et al.*. Analysis and set up of optical system for holographic femtosecond laser processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0222002.
方致伟, 苏亚辉, 汪超炜, 等. 飞秒激光全息加工光学系统搭建与分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0222002.
- 13 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei, *et al.*. Prism hyperspectral imaging optical system design with rectangular aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1222001.

- 吴从均, 颜昌翔, 刘 伟, 等. 方形孔径棱镜式成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222001.
- 14 Yang Zengpeng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Optimization design method for optical system of prism-grating ultrashpectral imaging spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.
- 杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911003.
- 15 D C O'Shea. Group velocity dispersion using commercial optical design programs [J]. Appl Opt, 2006, 45(19): 4740-4746.

栏目编辑: 韩 峰