

文章编号: 1001-3806(2009)04-0374-03

## 达曼类滤波器的飞秒脉冲整形技术

邹 华, 朱卫华, 吴 坚, 吴建伟, 王国栋  
(河海大学 理学院, 南京 210098)

**摘要:** 为了研究飞秒激光时空变换整形技术, 采用理论分析与计算机模拟结合讨论的方法, 分析了以达曼类滤波器为模板的  $4f$  系统的飞秒脉冲整形技术。以梯度算法优化设计出达曼类滤波器, 包括等间距、等强度和不等间距、不等强度达曼光栅, 并模拟讨论了产生的超快时域多脉冲与光谱平面上调制周期的重复数、元件间距不等效应和波长效应的影响。结果表明, 以达曼类滤波器为模板的飞秒脉冲整形中, 模板周期重复数越多, 输出脉冲的质量越高; 元件间距不等和波长效应使输出脉冲的平均度和衍射效率都有所降低。

**关键词:** 光学器件; 超快光学; 飞秒整形; 时空变换; 达曼类滤波器

**中图分类号:** TN242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.011

## Femtosecond pulse shaping for Dammann-type filters

ZOU Hua, ZHU Wei-hua, WU Jian, WU Jian-wei, WANG Guo-dong  
(College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study how to shape femtosecond pulses with space-time conversion technique, combining theoretical analysis with computer simulation, femtosecond pulse shaper of  $4f$  system applying Dammann-type filters as mask was analyzed. Firstly, Dammann-type filters including equally-spaced and equal-intensity gratings and unequally-spaced and equal-intensity gratings were designed with gradient algorithm. Then, the relation among the generated multiple ultrafast temporal pulses, the periodic repetition number, the spacing between the components and the wavelength in the spectral plane was discussed. The results showed that the perfect uniformity of the output pulse trains was strongly affected by the number of periodic repetition number. The efficiency and uniformity of the resultant output pulses became lower because of the spacing between the components and the wavelength effect.

**Key words:** optical device; ultrafast optics; femtosecond pulse shaping; space-time conversion; Dammann-type filter

### 引 言

上世纪 90 年代超快激光技术领域发生改革性的突破, 同时在超快光脉冲时空变换整形波形合成和诊断技术这些辅助的领域中也发生了重要突破<sup>[1-2]</sup>。时空变换飞秒脉冲整形技术是一种简便适用、行之有效且唯一实现时域整形的方法, 能得到不同时间分布的脉冲, 其应用开辟了全新的认识飞秒动态世界的新工具<sup>[2]</sup>。像包括编码和解码的光纤通讯系统中信息脉冲群的产生<sup>[3]</sup>, 原子系统相干控制的复杂脉冲结构的产生<sup>[4]</sup>和飞秒化学<sup>[5-6]</sup>等。仅位相滤波器飞秒脉冲整形中的滤波器可用许多优化算法实现<sup>[7-9]</sup>。在时域中

脉冲整形滤波器的设计类似于空域中光束整形和阵列产生的仅位相滤波器的设计。仅位相脉冲整形更有效(即结果有最小的能量损失)和比较容易实现。一个比较熟悉的仅位相滤波器的例子如达曼类滤波器, 用来产生数字光通信系统中的等强度的阵列<sup>[10]</sup>。达曼光栅是一种具有特殊孔径函数的二值相位光栅, 其对入射光波产生的夫琅和费衍射图样是一定点阵数目的等光强等间距的光斑。平顶的脉冲群可以用达曼光栅滤波器产生。达曼类滤波器作为整形的模板在飞秒脉冲整形领域的研究有重要的意义。

### 1 达曼类滤波器整形原理

所采用飞秒脉冲整形的装置如图 1 所示, 它是由一对衍射光栅、透镜和一个脉冲整形模板组成的  $4f$  系统。所希望的输出波形的产生可通过实现一个所需要的频率响应来实现。好几种优化方法可以实现空间模式的脉冲整形的模板。在图 1 的装置中用的是仅位相达曼类滤波器作为模板, 包括等强度、等间距达曼光栅

基金资助: 河海大学理工自然科学基金资助项目(2084/407187)

作者简介: 邹 华(1976-), 女, 博士, 讲师, 主要从事信息光学和超快光学整形的研究。

E-mail: zouhuazh@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-06-23; 收到修改稿日期: 2008-11-07

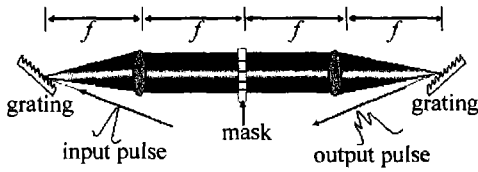


Fig. 1 Apparatus for femtosecond pulse shaping

和等强度、不等间距达曼光栅。先用梯度算法优化出达曼类滤波器的精确解,然后理论上计算和制作出达曼光栅。

二元位相光栅即(0, π),在上面优化达曼类滤波器的基础上,假设输入的超短脉冲为高斯分布。对称的脉冲阵列产生的原理可由下面的式子描述:

$$M(x) = \sum_{k=1}^N \text{rect} \left[ \frac{x - (x_k + x_{k-1})/2}{x_k - x_{k-1}} \right] \quad (1)$$

式中,  $M(x)$  指单位振幅的透射率函数,即  $M(x)$  的振幅是1,  $x_k$  是  $M(x)$  转换点的坐标,  $x_0 = 0, x_{N+1} = 1, x \in [0, 1]$ 。输入中心波长 800nm 左右的飞秒钛蓝宝石激光是类高斯光谱函数,输入脉冲半峰全宽为 72fs,对其空间调制的振幅是一系列振幅变化的矩形,如图 2 所示,显示了区间在  $0 \leq x \leq 1$  的基本周期。在区间  $x = 0$  到  $x = 1$  之间有  $N$  个位相转换点,  $M(x)$  随着一系列矩形值  $A_k = E_m(w_k) = \exp[-25(w_k - 0.5)^2]$  在 0 和 1 之间改变,  $w_k$  是在 0 和 1 之间输入光谱的半径。这里有效的频率响应  $H(\omega) \approx M(x)$ 。则模板后的光场可以写作:

$$E_m(x, \omega) = E_m(\omega)H(\omega) \approx E_m(\omega)M(x) \quad (2)$$

因此,输出模式由复合场的傅里叶变化给出,即:

$$E_{out}(t) \approx \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{2t\pi} [(\sin\alpha_k - \sin\alpha_{k-1}) + i(\cos\alpha_k - \cos\alpha_{k-1})] \quad (3)$$

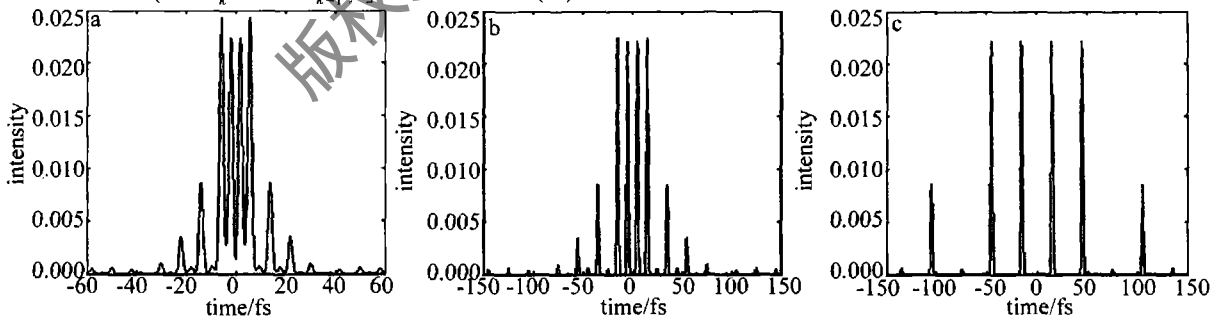


Fig. 3 Output pulses of a 1 × 4 array

a—the periodic repetition number is 2 b—the periodic repetition number is 5 c—the periodic repetition number is 15

最终输出脉冲的效率、平均度和周期重复数有关。通过从 2 到 15 个不同周期的精确模拟可得到 3 点:(1) 输出脉冲的平均度受周期重复数的影响,周期重复数越多平均度越好;(2) 通过模拟分析,当周期重复数多于 15 时平均度和效率是一致的,稳定性较好;相反当周期重复数少于 15 时平均度和效率是不稳定的;即为了得到比较平整的输出脉冲,应选择多于 15 的周期重

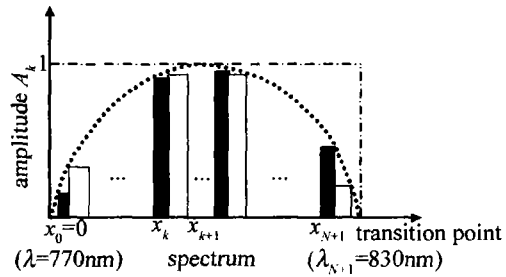


Fig. 2 Graphical representation of the Gaussian spectra, the dotted line denoting the amplitude of the Gaussian spectrum; the dashed line denoting the ideal spectra with a perfect rectangular shape and the various shaded rectangles denoting the phase modulation of Damman grating

式中,  $A_k$  是高斯函数的振幅,  $\alpha_k = 2t\pi x_k$ , 转换函数仅有两个值 1 和 -1, 相应于位相值 0 和  $\pi$ 。因而,光栅是完全由  $N$  个转换点  $x_1$  到  $x_N$  描述的,此处位相发生了改变。这样就可以得到输出的对称脉冲的光斑模式。上面就是对于对称飞秒脉冲时间模式产生原理的描述。

## 2 周期重复数的影响

众所周知,在时域中平均度直接受位相转换点的精确度影响。同时,输出脉冲群的极好平均度也受模板周期重复数的影响,所谓周期重复数是在优化达曼光栅时 0 和 1 之间出现的优化好的周期值的次数。这里选择 0 和 1 之间重复数是 2, 5, 15 来分析这个效应。周期重复数是 2 时,相应的时间输出脉冲不太平整、光滑,如图 3a 所示;周期重复数是 5 时,输出脉冲变的比较平整,如图 3b 所示;周期重复数增加到 15 时,在时域中平整的脉冲群就能产生,如图 3c 所示。从图 3 可发现,输出脉冲的时间间距和周期重复数密切相关。

复数;(3) 在空域中模板的周期重复数越大,时间输出脉冲展得越宽。

## 3 波长效应

达曼类滤波器是二元位相光栅,即 0 和  $\pi$  的位相调制,如果相移比  $\pi$  小或大,则输出脉冲可能会发生变化。相移由光栅制造过程中的刻蚀深度决定。当然

其它因素也有影响,这里考虑了在模板平面不同波长的影响。最常见的用于产生相同间距脉冲群的模板没有考虑波长效应<sup>[8]</sup>。实际上,和WEINER报道的结果相比考虑位相随波长变换是一个非常重要的因素。当飞秒脉冲在时间模式产生装置中通过第1个透镜时不同波长的飞秒脉冲在模板平面垂直展开。由于波长从770nm~830nm变换,不同相移之间的微小不同使输出脉冲就会产生令人惊讶的变化。假设钛蓝宝石飞秒激光器的中心波长是800nm,对应的位相值是 $\pi$ ,即:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda_c}(n-1)h = \pi \quad (4)$$

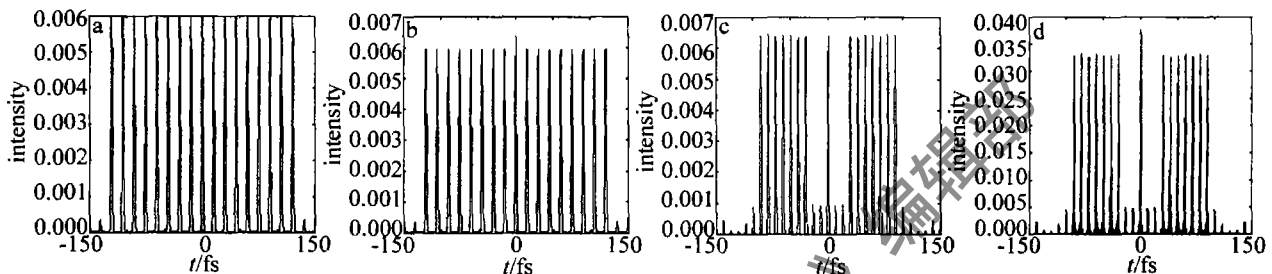


Fig. 4 Temporal output pulse

a, c—without consideration of the change of the phase with the wavelength b, d—with consideration of the change of the phase  $\theta$  with the wavelength

强度、不等间距序列  $a_n = \{11111111001001111111\}$  为模板的输出脉冲阵列为例,得到的超快时间脉冲的模式如图4b所示和图4d所示。和图4a和图4c比可看出,时间轮廓的最终平均度除了位相敏感的中心脉冲的振幅变化较大外,其它的脉冲基本上是一致的,中心脉冲比其它脉冲要亮得多,这意味着即使对微小的位相改变,中心脉冲相对于其它脉冲也会有大的改变。

#### 4 各元件间距不等效应

如前面所述,飞秒脉冲时空变换整形技术是一种4f结构的零色散的装置。理论上和实验中都要求各元件之间的距离为透镜的焦距f,如果任意两个元件间的距离不等于f(大于或小于透镜的焦距f),输出脉冲将发生变化。当选模板为达曼类滤波器时,输出脉冲不再是达曼滤波器的准确的傅里叶变换,而是多了一个位相项。这相当于加了一个调制函数:

$$M'(x) = \exp\left(\frac{i\pi dx^2}{\lambda f^2}\right) \quad (6)$$

设透镜焦距为10cm,d为失调量,假设为11cm。则光栅和透镜之间距离大于f时,输出脉冲见图5,给出了1×7阵列的输出脉冲在各元件之间间距不等造成的影响。图5a为理想的零色散情况下脉冲的输出情况,图5b为间距失调后的脉冲输出情况。两图比较可以看出,输出脉冲已明显受影响,无论是能量还是平均度都不如等间距时高,脉冲旁瓣增多,中心脉冲能量变小。

式中, $n = 1.623$ ,表示光刻胶涂层的折射率,h表示凹槽的深度(忽略了底层的深度,因为它随波长的变换很小)。从(4)式可得到  $h = 642\text{nm}$ 。随着波长从770nm~830nm变化相移呈现线性改变:

$$\theta = \frac{2 \times (1.623 - 1) \times 642}{\lambda} \pi \quad (5)$$

从(5)式可知,相移 $\theta$ 和波长 $\lambda$ 成反比。输入波长从770nm~830nm变化,则对应的相移是从  $0.964\pi \sim 1.039\pi$ ,虽然位相值离 $\pi$ 只有很小的变化,在输出脉冲的质量上却有显著的影响,即每一个像素以0或 $\theta$ 的位相调制(不再是0和 $\pi$ )。以等强度、等间距和等

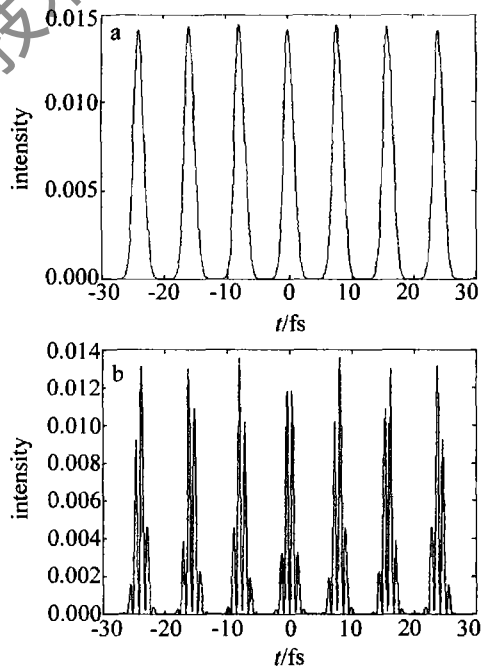


Fig. 5 a—temporal output pulses of 1×7 array without consideration of change of spacing between components b—with consideration of change of spacing between components

#### 5 结论

分析了整形后的脉冲与周期重复数、元件间距不等和输入波长之间的关系。飞秒激光时空变换技术已应用到光谱位相编码和解码的CDMA通讯研究和生物医学的图像处理中,特别在飞秒激光与物质飞秒动

(下转第380页)

性激光粉末烧结设备上制作了大量制件。经试验验证,该扫描系统制作的零件尺寸精度为  $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ ,零件的垂直度为  $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。如图3所示,该零件尺寸为  $450\text{mm}$ (长)  $\times$   $395\text{mm}$ (宽)  $\times$   $283\text{mm}$ (高),制作该零件需设备连续稳定  $15\text{h}$ 。制作出的零件尺寸精度,垂直度均能满足要求。

## 5 结论

3 维动态聚焦激光振镜扫描系统的数学模型是整个系统设计的基础。其设计关键在于优化设计扫描路径的插补算法,精确控制动态聚焦轴与  $x, y$  轴振镜的同步,同时根据振镜扫描系统的动态性能调整好激光及振镜系统的响应延时,使在工作面上的扫描线质量最好。作者开发的3 维动态聚焦激光振镜扫描系统在华中科技大学快速成型中心的SLS设备上经过长期使用,经验证其扫描精度、重复定位精度以及稳定性均达到设计要求,并已基本到达商业化的要求。

### 参考文献

[1] NGOI B K A, VENKATAKRISHNAN K, TAN B, *et al.* Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for microstructure [J]. *Opt Commun*,

2000,182(1/3):175-185.

- [2] WANG R M, LU B H. Analysis of several dynamic focus systems for laser scanning [J]. *Applied Laser*,1998,18(1):10-12(in Chinese).
- [3] XIE J, DUAN Zh Ch, SHI Y Sh. Study of key technologies for galvanometric scanning system used in selective laser sintering [J]. *Manufacturing Automation*,2004,26(4):9-12(in Chinese).
- [4] EHRMANN J S. Optics for vector scanning [J]. *Proc SPIE*, 1991, 1454:245-254.
- [5] YU X S. Distortion correction for dual galvanometer scanning [J]. *Laser & Infrared*,1997,27(5):35-39(in Chinese).
- [6] VENKATAKRISHNAN K, TAN B, NGOI B K A. Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for precision engineering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2002,38(3/4):153-171.
- [7] ZHU L Q. Error analysis and correcting method of the two vibrational mirrors scanning system [J]. *Applied Laser*,2001,21(5):325-327(in Chinese).
- [8] WANG H Q, SHI Y Sh, HUANG Sh H. The control arithmetic of laser galvanometer scanning system with 3-D and its application [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*,2003,31(5):73-74(in Chinese).
- [9] PHAM D T, GAULT R S. A comparison of rapid prototyping technologies [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1998,38(10/11):1257-1287.
- [10] SUN H L, LIN Sh Zh. Research on errors reasons in dual-galvanometric laser scanning manufacturing [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(3):161-163(in Chinese).

(上接第376页)

态控制等领域有重要的意义。相信超快脉冲的产生将会有重要的应用前景。

### 参考文献

- [1] ZHANG J Zh. Measurement of ultrashort laser pulses using frequency-resolved optical gating [J]. *Laser Technology*,2008,32(2):194-197(in Chinese).
- [2] WEINER A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulates [J]. *Review Scientific Instruments*,2000,71(5):1929-1960.
- [3] WEINER A M, HERITAGE J P, SALEHI J A. Encoding and decoding of femtosecond pulses [J]. *Opt Lett*,1998,13(4):300-302.
- [4] MESHULACH D, SIBERGERG Y. Coherent quantum control of two-photon transitions by a femtosecond laser pulse [J]. *Nature*,1998,396(19):239-241.
- [5] ASSION A, BAUMERT T, BERGT M, *et al.* Control of chemical reac-

tions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses [J]. *Science*,1998,282(30):919-922.

- [6] RICE S. Optical control of reactions [J]. *Nature*,2000,403(3):496-498.
- [7] ZHOU C H, LIU L R. Numerical study of Damman array illuminators [J]. *Appl Opt*,1995,34(26):5961-5969.
- [8] WEINER A M, OUDIN S, LEAIRD D E. Shaping of femtosecond pulses using phase-only filters designed by simulated annealing [J]. *J O S A*,1993,A10(5):1112-1120.
- [9] HACKER M, STOBRAWA G, FEURER T. Iterative Fourier transform algorithm for phase-only pulse shaping [J]. *Optics Express*,2001,9(4):191-199.
- [10] DAMMANN H, GORTLER K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms [J]. *Opt Commun*,1971,3(5):312-315.