

利用电光偏转器进行激光脉冲整形的 两种扫描光路的比较

谢兴龙 陈绍和 许世忠 邓锡铭

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

摘要 从理论上系统地比较了利用电光偏转器进行激光脉冲整形的两种扫描光路, 并对两种扫描方式的优缺点进行了论述, 指出了一种对空间扫描线复原精度的估计方法, 为现阶段神光-I升级的实验工作提供了理论基础。

关键词 脉冲整形, 扫描光路, 平行光扫描, 会聚式扫描

1 引言

激光脉冲整形是控制激光脉冲形状的重要手段, 目前已报道的利用电光偏转器的脉冲整形技术, 可以获得宽度为几个纳秒到几十个皮秒的可调整形激光脉冲^[1]。它利用两块相同的电光偏转器, 当激光脉冲入射第一块偏转器的同时, 在其上加一高压电脉冲, 由于电光效应, 偏转器的折射率将随着电位梯度的变化而变化, 从而激光脉冲在整个时间包络内不同时刻的分量将被偏转不同的角度, 于是整个脉冲的时间特性便转换为空间特性, 在空间范围内形成一条扫描线, 通过在扫描线上放置整形小孔, 再利用第二块偏转器复原扫描线, 便得到所需时间宽度的整形激光脉冲^[2~4]。目前已经报道的整形方案是采用平行光入射偏转器的扫描方式^[5,6]。为了提高均匀性和能量利用率, 我们将平行光扫描方式改进为会聚光扫描方式, 本文从理论和实验的角度上对这两种扫描方式进行研究, 并将它们的优缺点加以比较, 得出了具有一定实用价值的结论。

2 两种扫描光路

图1(a)表示平行光扫描结构。激光脉冲入射至第一块电光偏转器后, 完成时空转换, 经过一个 $4f$ 系统(由共焦放置的透镜 f_1, f_2 组成), 再由第二块电光偏转器复原, 整形小孔放在 $4f$ 系统的共同焦面上(即 f_1 的后焦面上), 这样在第二块偏转器后就得到了经过整形的激光脉冲, 其时间宽度由整形小孔的口径所决定; 图1(b)为会聚光扫描结构。在第一块偏转器前加会聚透镜 f_3 , 在第二块偏转器后加会聚透镜 f_4 , f_3, f_4 构成 $4f$ 系统[对应于图1(a)中的 f_1, f_2], 入射激光脉冲首先被 f_3 会聚到第一块偏转器上, 这样其入射截面将小于平行光扫描时的入射截面, 提高了能量利用率, 经过 $4f$ 系统和第二块偏转器复原后, 再由 f_4 转化为平行光。

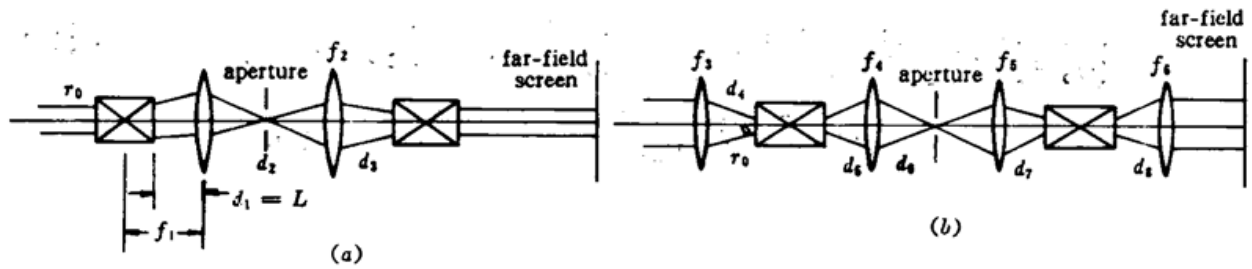


Fig. 1 Schematic of two optical scanning-paths

(a) parallel optical scanning-path; (b) converging optical scanning-path

3 两种扫描结构优缺点的比较

3.1 傍轴近似下的透镜焦距及镜间距离对光脉冲复原状况的影响

在图 1 中,假定入射光线距光轴距离为 r_0 ,初始入射角为 θ_0 ,电光偏转器长度为 d ,所加电位梯度为 E ,则光线经过偏转器后将偏转一个角度 $adE^{[7]}$,其中 a 为偏转器常数,利用光线追迹和矩阵光学的方法可求得对于平行光扫描方式,其出射脉冲在偏转器右侧的离轴距离和出射角分别为:

$$r = r_0 \left[1 - \frac{d_3}{f_2} - \frac{d_2}{f_1} - \frac{d_3}{f_1} + \frac{d_2 d_3}{f_1 f_2} \right] + (\theta_0 + adE) \left[d_1 \left(1 - \frac{d_3}{f_2} \right) \left(1 - \frac{d_2}{f_1} \right) - \frac{d_1 d_3}{f_1} + d_2 + d_3 - \frac{d_2 d_3}{f_2} \right] \quad (1)$$

$$\theta = adE + r_0 \left(\frac{d_2}{f_1 f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right) + (\theta_0 + adE) \left(1 - \frac{d_2}{f_2} - \frac{d_1}{f_1} - \frac{d_1}{f_2} + \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} \right) \quad (2)$$

共焦情况下有

$$r = -r_0 \frac{f_2}{f_1} \quad (3)$$

$$\theta = adE \left(1 - \frac{f_1}{f_2} \right) - \theta_0 \frac{f_1}{f_2} \quad (4)$$

同样的道理,对于会聚光扫描有

$$r = d_8 adE + \left[\left(1 - \frac{d_4}{f_3} \right) r_0 + d_4 \theta_0 \right] \times \left[\left(1 - \frac{d_7}{f_5} \right) \left(1 - \frac{d_6}{f_4} \right) - \frac{d_7}{f_4} + \frac{d_6 d_8}{f_4 f_5} - \frac{d_8}{f_4} - \frac{d_8}{f_5} \right] + \left(\theta_0 + adE - \frac{r_0}{f_3} \right) \left[d_5 \left(1 - \frac{d_7}{f_5} \right) \left(1 - \frac{d_6}{f_4} \right) - \frac{d_5 d_7}{f_4} + d_6 + d_7 - \frac{d_6 d_7}{f_5} + d_8 - \frac{d_6 d_8}{f_5} - \frac{d_5 d_8}{d_4} - \frac{d_5 d_8}{d_5} + \frac{d_5 d_6 d_8}{f_4 f_5} \right] \quad (5)$$

$$\theta = \left[\left(1 - \frac{d_4}{f_3} \right) r_0 + d_4 \theta_0 \right] \left[\left(1 - \frac{d_8}{f_6} \right) \left(\frac{d_6}{f_4 f_5} - \frac{1}{f_4} - \frac{1}{f_5} \right) - \left(1 - \frac{d_7}{f_5} \right) \left(\frac{1}{f_6} - \frac{1}{f_4} \right) + \frac{d_7}{f_6 f_4} \right] + \left(\theta_0 + adE - \frac{r_0}{f_3} \right) \left[\left(1 - \frac{d_8}{f_6} \right) \left(1 - \frac{d_6}{f_5} - \frac{d_5}{f_4} - \frac{d_5}{f_5} + \frac{d_5 d_6}{f_4 f_5} \right) - \frac{d_5}{f_6} \left(1 - \frac{d_7}{f_5} \right) \left(1 - \frac{d_6}{f_5} \right) + \frac{d_5 d_7}{f_4 f_6} - \frac{d_6}{f_6} - \frac{d_7}{f_6} + \frac{d_6 d_7}{f_5 f_6} \right] + \left(1 - \frac{d_8}{f_6} \right) adE \quad (6)$$

共焦情况下

$$r = f_6 adE \left(1 - \frac{f_4}{f_5} \right) + \theta_0 \left(\frac{f_4 f_6}{f_5} - \frac{f_3 f_5}{f_4} \right) - r_0 \frac{f_4 f_6}{f_3 f_5} \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 \frac{f_3 f_5}{f_4 f_6} \tag{8}$$

从(3),(4)两式知平行光扫描时,共焦情况下出射光脉冲的离轴距离不随电位梯度的变化而变化,但其出射角 θ 在 $4f$ 系统两透镜的焦距不等时,与电位梯度的大小有关。在空间特性上表现为光斑的大小略有少许的变化,所以复原状况是否完全只有从光斑大小上得以验证,对会聚光扫描方式,从(7),(8)两式可以看出,光脉冲的出射角度在共焦时只与初始时的入射角有关,即复原后光斑尺寸是一固定值,但是其出射脉冲的离轴距离却与电脉冲的电位有关,从而不同时刻将处在不同的位置,于是在不完全复原的情况下,光斑将是一条椭圆状的扫描线而不再是初始时的圆形形状;对于非共焦情况,两种扫描方式出射脉冲的离轴距离与出射角都与电脉冲的电位有关,经过第二块偏转器后都不能得到完全复原。

3.2 衍射效应对入射光斑尺寸的影响

假定入射激光脉冲截面半径为 R ,对平行光扫描方式而言,只有在 $2R$ 小于第一块偏转器口径的分量才能被系统收集利用,而对会聚光扫描方式而言,入射脉冲在整个透镜口径范围内的分量都能被系统收集利用,从而提高了能量的利用率。由于衍射效应的存在,入射光脉冲的线度也要受到一定的限制,当入射激光脉冲截面半径 R 小于透镜口径时,经过透镜的 Airy 斑直径 x 满足

$$x = \frac{0.61\lambda f}{R} \tag{9}$$

式中 λ 为入射光脉冲波长, f 为透镜焦距,因为光束要会聚,要求 $x < 2R$,即

$$R > \frac{\sqrt{1.22}f}{2} \tag{10}$$

对于在实验中使用的 YAG 激光器来说, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 取 $f = 70 \text{ cm}$, 有

$$R > 0.45 \text{ mm} \tag{11}$$

3.3 两种扫描光路中由偏转器导致的轴向球差

在图 2 中,光线在偏转器内传输时有

$$y = y_0 + \frac{\alpha E}{2} x^2 - \frac{\theta_0^2}{2\alpha E} \tag{12}$$

在不同的 y_0 和 θ_0 处的入射光线其出射处的切线与 x 轴的交点显然不同,这个差别便是由第一个偏转器所导致的轴向球差。取入射光斑距最远的两点 $A(0, a)$ 和 $B(0, -a)$, 其初始入射角分别为 θ_{0A} 和 θ_{0B} , 则出射点 C, D 处切线与 x 轴的交点分别为

$$x_c = d + \frac{1}{\alpha E d} \left(a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \tag{13}$$

$$x_D = d + \frac{1}{\alpha E d} \left(-a - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \tag{14}$$

式中 d 为电光偏转器的长度,假定 $4f$ 系统靠近第

一个偏转器的透镜焦点在 $d/2$ 处,即 $f_1 = d/2 + L$, L 为第一个偏转器的右表面与 $4f$ 系统第一个透镜之间的距离,经过 $4f$ 系统后有

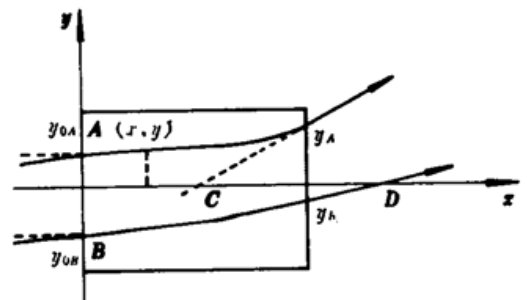


Fig. 2 Spherical error caused by the electro-optic deflector, where the displacement CD is the spherical error from light rays. A and B, travelling through the electro-optic deflector along different paths

$$v_c = f_2 + \frac{f_2^2}{\alpha E d f_1^2} \left(a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \quad (15)$$

$$v_D = f_2 + \frac{f_2^2}{\alpha E d f_1^2} \left(-a - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \quad (16)$$

式中 v_c, v_D 分别为 x_c, x_D 经过 $4f$ 系统后的像距。假定 $4f$ 系统第二个透镜的焦点也在第二块偏转器的中心, 于是经过第二块偏转器的光线与 x 轴的交点为

$$x_{1c} = \left(\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2} \right) \left(a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) + \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} \frac{f_2^2}{f_1^2} \left(a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \quad (17)$$

$$x_{1D} = \left(\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2} \right) \left(-a - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) + \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} \frac{f_2^2}{f_1^2} \left(-a - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \quad (18)$$

这样由 $4f$ 系统所带来的轴向球差为

$$B_A \equiv x_{1c} - x_{1D} = \left(\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2} \right) \left(2a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} \right) + \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} \frac{f_2^2}{f_1^2} \left(a - \frac{\theta_{0A}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} \frac{f_2^2}{f_1^2} \left(-a - \frac{\theta_{0B}^2}{2\alpha E} + \frac{\alpha E}{2} d^2 \right) \quad (19)$$

对于会聚光扫描方式, 其轴向球差只要将上式中的 f_1 换成 f_4, f_2 换成 f_5 , 并且将其余相应的量看作是会聚光扫描时的值即可。由(19)式可以看出, 对平行光扫描方式, $\theta_0 = 0$, 在 $4f$ 系统 $f_1 = f_2$ 时, 轴向球差为零, 这说明平行光扫描方式对补偿由偏转器自身所带来的轴向球差的影响方面, 具有一定的优越性, 而会聚光扫描方式在满足 $f_4 = f_5$ 的情况下, 因入射偏转器的初始角 θ_0 总不为零并且随着光线入射偏转器位置的不同而不同, 也就是说, $\theta_{0A} \neq \theta_{0B}$ 所以总会或多或少地对复原状况产生影响。

3.4 非傍轴球差问题

初始激光脉冲在经过第一块偏转器之后, 将偏转一个相对较大的角度, 所以非傍轴球差在 $4f$ 系统上影响很大, 故只考虑 $4f$ 系统就行了。由于非傍轴球差在两种扫描方式中所起的效果是一样的, 所以我们在讨论时不再区分是对于平行光扫描方式还是对于会聚光扫描方式。

假定任一透镜两凸面曲率半径相同, 并且焦距为 f , 折射率为 n , 则其球差系数^[7]

$$A = - \frac{4n^2(n-1) - n + 2}{8nf^2(n-1)^2} \quad (20)$$

经过 $4f$ 系统之后的球差为

$$E_A = A(h_1^2 f_1 + h_2^2 f_2) = - \frac{4n^2(n-1) - n + 2}{8nf^2(n-1)^2} (\alpha E d + \theta_0)^2 (f_1 + f_2) \quad (21)$$

$$E_r = - \frac{4n^2(n-1) - n + 2}{8nf^2(n-1)^2} (\alpha E d + \theta_0)^3 \quad (22)$$

式中 E_A, E_r 分别为纵向球差和横向球差。显然, 由非傍轴球差也会导致扫描线的不完全复原, 也就是说出射第二块偏转器的激光脉冲其离轴距离和出射角都与电脉冲的电位值有关, 但实际情况是偏转角一般在几十个毫弧度的范围, 由(21), (22)式可以估算出非傍轴球差略去后一般不会带来更大的影响。

3.5 其他情况和要求

从(8)式看出入射光束的截面越小, 偏转器内光束经过的截面上电位梯度的相对变化越小, 其均匀性越好, 同时由于采用了透镜会聚入射光束, 使得入射激光脉冲的截面可以远小于偏转器的截面, 提高了能量利用率, 从这点意义上说, 会聚光扫描方式优于平行光扫描方式, 不

过会聚光扫描与平行光扫描方式相比在复原激光脉冲方面还有如下要求：(1) 会聚之后入射脉冲集中在截面很小的区域内，这就要求偏转器在脉冲经过的路径上材料必须均匀，并且入射脉冲不能太强，否则非线性现象将破坏复原效果；(2) 对两块偏转器都要求入射光束中心与偏转器轴线严格重合，因为偏转器内不同位置电位梯度不同，从而偏转角也不同，如果位置差别较大也会破坏复原效果，但平行光扫描方式其入射脉冲充斥了偏转器的通光截面，它不存在对以上两点的要求。

4 实验结果及其分析

如图 1, 图 2 所示, 我们在实验中所用的偏转器尺寸为 $6 \times 6 \times 32$ mm, 通光孔径为 4 mm, 4f 系统两透镜的焦距均为 70 cm, 这样两偏转器间的距离为 280 cm, 利用远场屏观测光斑大小, 我们得到对于平行光扫描的情况, 加上整形小孔和不加整形小孔前后的光斑大小差不多, 通过分析我们知道这是因为光斑的大小由偏转器的通光口径所决定, 而偏转器的通光口径是不变的, 但是由于是平行光入射, 光束进入偏转器时很容易因为擦边产生衍射, 造成光束通过第二块偏转器时不能完全复原; 对于会聚光扫描的情况, 加上整形小孔的光斑位置与不加整形小孔的光斑位置相比移动了大约 0.2 mm, 此时由于光束经过透镜会聚, 偏转器的通光口径不能决定光斑的大小, 从而以上所讨论的诸因素起决定作用, 造成了光斑的移动, 但是对发散角为 0.6 mrad 的入射光束用焦距 0.5 m 的透镜聚焦成 0.3 mm 的细光束, 不会造成擦边并且复原很好, 由于光通过第一个偏转器时没有光衍射, 信噪比至少达到 10^3 , 光束经过第二个偏转器只是散射其脉冲的一部分, 通过整形小孔时, 对比度二次方地增加, 因此系统信噪比会大于 10^6 , 从分析的角度上讲, 0.2 mm 的移位与几十米甚至上百米的光路相比正好对应了利用电光偏转器进行激光脉冲整形所能达到的复原精度。所以由此提供了一种提高复原精度和对复原效果进行评估的方法。

5 结束语

我们比较了利用电光偏转器进行激光脉冲整形的两种扫描光路, 系统地讨论了影响脉冲整形复原效果的诸因素。综上所述, 在实验固有的精密范围内, 会聚光扫描方式与平行光扫描方式相比, 尤其是在初始光斑较大时, 将大大提高整形系统的能量利用率, 这一点将有利于减小引入下级放大器的噪声, 在提高神光-I 光束性能方面具有较大的参考价值。

参 考 文 献

- 1 A. R. Isaakyan, K. V. Kolchin, B. I. Makshantsev. Possibility of generating femtosecond laser pulses by a deflection method. *Quant. Electr.*, 1993, 23(5): 417
- 2 V. I. Kryzhanovskii, V. A. Serebryakov, V. R. Startsev et al.. Fast-response electrooptic deflectors and their use in the control of time parameters of laser pulses in the range $10^{-11} \sim 10^{-8}$ s. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1982, 12(1): 48
- 3 V. I. Kryzhanovskii, A. A. Chertkov, V. A. Malinov et al.. Contrast ratio of laser pulses shaped by electrooptic deflectors. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1985, 15(2): 239
- 4 V. I. Kryzhanovskii, V. A. Parfenov, V. A. Serebryakov et al.. Formation of regions of efficient compression of ultrashort pulses in a passive switch. *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.*, 1977, 3:32 [*Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1977, 3: 13]

- 5 V. I. Kryzhanovskii, A. A. Mak, I. N. Sventitskaya *et al.*. Optics of femtosecond laser pulses. *Kvantovaya Electr.*, (MOSCOW) 1977, 4 : 345 [*Sov. J. Quant. Electr.*, 1977, 7 : 190]
- 6 Yu. K. Rrbrin. Spatial control of optical beams [in Russian]. *Sovet-skoe Radio*, (MOSCOW) 1977, 5 : 126
- 7 A. K. Ghatak. Optics, Tata Mcgraw-Hill (first edition), New Delhi, India 1980. Chapter 2. 51~57

Comparison of the Two Optical Scanning Paths in a Laser Pulse Forming System by a Pair of Electro-optic Deflectors

Xie Xinglong Chen Shaohe Xu Shizhong Deng Ximing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract In this paper, we compare the two optical scanning paths which have been used in the forming of the laser pulse, and discuss their advantages and disadvantages. A method is presented to evaluate the restoring accuracy of the scan-line of the laser pulse which will find an important application in the experimental work of the "SHENGUANG I" upgrading system.

Key words pulse forming, optical scanning path, parallel optical scanning, converge optical scanning