

强激光的时间整形和空间整形*

——时空变换脉冲整形系统的工作特性

叶 东 吕百达 蔡邦维

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

隋 展

(西南核物理与化学研究所, 成都, 610003)

摘要: 本专题论文分为两部分。在第一部分中, 用傅里叶光学方法, 对时空变换脉冲整形系统的工作特性和一些工程设计中的实际问题, 作了深入的理论分析和数值计算。

关键词: 时空变换脉冲整形系统 傅里叶光学 透射屏 分辨本领

Temporal and spatial pulse shaping of high-power lasers

——Performance properties of a temporal-spatial pulse shaping system

Ye Yidong, Lü Baida, Cai Bangwei

(Institute of Laser Physics and Laser Chemistry, Sichuan University)

Sui Zhan

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry)

Abstract: This monograph is divided into two parts. In part I, based on the Fourier Optics method, detailed analytical and numerical calculations have been carried out to elucidate the performance properties and some problems concerning the practical design of the temporal-spatial pulse shaping system.

Key words: temporal-spatial pulse shaping system Fourier Optics transmission screen resolving power

一、引 言

在惯性约束核聚变(ICF)使用的高功率激光驱动器中,常常需要各种时间和空间分布的脉冲^[1,2],如时域中的尖桩栅形(picket fence)脉冲,空域中的平顶(flat-top)或超高斯(super-Gaussian)脉冲等。本文的目的是以典型例对强激光的时间整形和空间整形作较为深入的分析。全文分为两部分,第一部分研究用时空变换脉冲整形器对光束进行时间整形的问题。

时空变换脉冲整形是一种简便适用而又行之有效的整形方法,能得到不同时间分布的脉冲,最早由俄罗斯科学家提出,改进后的装置将在神光-2[#]中使用。本文对其工作特性进行了详细的理论研究和数值模拟,给出了输出脉冲波形相对于空间透射屏调制函数的变换关系,得到了根据给定的输出脉冲要求计算空间透射屏调制函数的公式,并讨论了时空变换脉冲整形系统可能引入光束的空间畸变等实际问题。

二、系统结构

时空变换脉冲整形系统的典型结构如图 1 所示。L₁, L₂ 构成一个 4f 系统, C₁ 位于 L₁ 前焦面, C₂ 位于 L₂ 后焦面, C₁, C₂ 是起电光偏转作用的晶体, 能使通过它的光束随晶体上的电压的变化而发生不同角度的偏转。S 是对光强进行空间调制的透射屏, 位于 4f 系统谱面上。入射光束通过电光偏转晶体 C₁, 偏转角按加于 C₁ 上的电压大小而随时间变化, 从而使光束沿一定方向扫描。因 C₁ 位于 L₁ 前焦面, 扫描光束通过 L₁ 后, 任何时刻传输方向总是平行于 z 轴。光束经透射屏 S 对其强度进行调制后射到 L₂ 上, 折向其后焦点, 再经 C₂ 偏转后沿 z 轴继续传输。透射屏 S 上的透射率随空间坐标 x, y 有一定分布。光束在不同时刻扫描通过屏上的不同位置, 透射光强随时间变化。

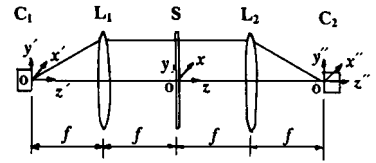


Fig. 1 A schematic illustration of the temporal-spatial pulse shaping system

在这个系统中, 改变屏上的透射率的空间分布, 就可改变输出脉冲的时间波形, 故称为时空变换脉冲整形系统。通过设计屏上不同的透射率函数可得到各种形状的输出脉冲波形。

三、时空变换脉冲整形系统的工作特性

设 C₁ 处入射场为
$$U_0(x', y', t) = f_0(x', y')g(t) \quad (1)$$

当电光晶体上未加电压(即光束在 S 上未扫描)时, 透射屏前表面上入射光场分布恰好为 L₁ 前焦面(C₁ 处)光场的傅里叶变换^[3](坐标系的取法见图 1):

$$U'_1(x, y, t) = g(t) \iint f_0(x', y') \exp[-i2\pi\{x'/(f) x + y'/(f) y\}] dx' dy' \quad (2)$$

用 $\mathcal{A}\{\}$ 表示对括号内的函数施行傅里叶变换, 则上式写成:

$$U'_1(x, y, t) = g(t) \mathcal{A}\{f_0(x', y')\} = g(t) f_1(x, y) \quad (3)$$

于是入射到屏上前表面的光强分布为:

$$I'_1(x, y, t) = |U'_1(x, y, t)|^2 = |g(t)|^2 \cdot |f_1(x, y)|^2 = G(t) I(x, y) \quad (4)$$

$$\text{式中, } G(t) = |g(t)|^2 \quad (5)$$

$$I(x, y) = |f_1(x, y)|^2 \quad (6)$$

分别表示屏上光强的时间分布和空间分布。

给电光晶体加上随时间变化的偏转电压, 使光束在屏上沿一定的方向(例如 y 方向)进行扫描, 设在 y 方向的扫描速度为 v, 则相应于(3), (4) 式入射到屏前表面上的光场分布和光强分布分别为:

$$U_1(x, y, t) = U'_1(x, y - vt, t) = g(t) f_1(x, y - vt) \quad (7)$$

$$I_1(x, y, t) = I'_1(x, y - vt, t) = G(t) I(x, y - vt) \quad (8)$$

$$\text{设屏的光强透射率函数为: } T(y) = |t(y)|^2 \quad (9)$$

式中, t(y) 是振幅透射率, 于是光束经过屏透射调制后, 在屏后表面出射的光场分布、光强分布分别为:

$$U_2(x, y, t) = t(y) U_1(x, y, t) = t(y) g(t) f_1(x, y - vt) \quad (10)$$

$$I_2(x, y, t) = T(y) I_1(x, y, t) = T(y) G(t) I(x, y - vt) \quad (11)$$

于是光束经过透射屏之后的辐射通量(能流)是

$$\begin{aligned}
 W(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_2(x, y, t) dx dy = G(t) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(y) I(x, y - vt) dx dy \\
 &= G(t) \int_{-\infty}^{\infty} I_x(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} T(y) I_y(y - vt) dy = c \cdot G(t) [T(\eta) * I_y(\eta)]_{\eta=vt} \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中，“*”表示卷积运算。推导(12)式时已设入射光束空间分布具有基模高斯的形式，且利用

$$I(x, y - \eta) = I_x(x) I_y(y - \eta) = I_x(x) I(\eta - y) \quad (13)$$

即 $I(x, y)$ 可分离变量且具有中心对称特性，并令 $c = \int_{-\infty}^{\infty} I_x(x) dx$

其后，光束通过透镜 L_2 折向其焦点，再经电光晶体 C_2 的偏转使之任何时刻光束沿 z 轴继续传输。在这个过程中光强不再受到调制，所以(12)式也就是时空变换脉冲整形系统最后输出的脉冲辐射通量(能流)随时间的变化函数。

(12)式的物理意义是很清楚的。一般情况下，对于时空变换脉冲整形系统，其输入脉冲的宽度 τ_{in} 远大于输出脉冲的脉宽 τ_{out} (典型值是 $\tau_{in} = 100\text{ns}$, $\tau_{out} = 4\text{ns}$)，所以 $G(t)$ 可看成是一缓变量。因此，该系统输出的脉冲波形主要由屏的光强透射率函数 $T(y)$ 与输入光束在屏上(相当于远场)光强分布的卷积来决定。据卷积的特性^[3]，可以把输出脉冲的时间波形看成是透射率函数 $T(y)$ 经过展宽和平滑化而得到的。

下面讨论透射率函数的一种特例：

设 T 为一可忽略缝宽的狭缝，缝的方向垂直于扫描方向。则 $T(y)$ 是一个沿扫描方向的 δ 函数

$$T(y) = \delta(y - y_0) \quad (14)$$

根据 δ 函数卷积的性质^[3]有：

$$\delta(y - y_0) * I_y(y) |_{y=vt} = I_y(y - y_0) |_{y=vt} = I_y(vt - y_0) \quad (15)$$

于是，据(12)式，此时该系统的输出脉冲 $W(t) = c \cdot G(t) I_y(vt - y_0)$ (16)

可见，即使透射屏是一个非常窄的狭缝，时空变换脉冲整形系统输出的脉冲也不是 δ 函数，输出脉宽不能压缩成无限窄，其最小宽度主要由屏上光斑的空间宽度决定。这个最小脉宽记为 τ_0 ，定义为最小可分辨脉宽，设屏上光斑直径为 D ，忽略 $G(t)$ 的影响，则

$$\tau_0 = D/v = \theta_0 f/v \quad (17)$$

式中， θ_0 是入射光束的远场发散(全)角。在实际系统中，电光晶体 C_1 对光束的偏折能力是有限的，设其最大偏折(全)角为 θ_{max} ，它与入射光的远场发散角 θ_0 之比是该系统的一个重要参数，称为分辨本领，即

$$N = \theta_{max}/\theta_0 \quad (18)$$

对应于 θ_{max} ，最大扫描时间为 τ_{max} 。经简单推导可得：

$$\tau_{max}/\tau_0 = \theta_{max}/\theta_0 = N \quad (19)$$

也就是说，对于时空变换脉冲整形系统，分辨本领这个参量在时域和空域中都有表现。在时域中，反映在电光晶体的最大扫描时间与系统输出的最小可分辨脉宽之比；在空域中，表现在电光晶体的最大偏转角与光束远场发散角之比。

四、时空变换脉冲整形的数值模拟

为了便于数值计算，(12)式可作进一步的变形。运用卷积定理可得

$$W(t) = c \cdot G(t) \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{A} T(\eta) \} \cdot \mathcal{A} I_y(\eta) \} \quad (20)$$

根据(20)式利用快速傅里叶变换算法，我们按一台实际的时空变换脉冲整形系统的有关

参数作了详细的数值模拟。在该系统中,透射屏 y 方向尺寸 5mm,扫描速度为 $v = 1\text{mm/ns}$ 透镜焦距 $f = 560\text{mm}$,输入脉冲的波形 $G(t)$ 设为高斯分布

$$G(t) = \exp - 2 \frac{t - 12.5}{\tau_0/2}^2 \quad (21)$$

$\tau_0 = 100\text{ns}$ 。截取 $-2.5 \sim 2.5\text{ns}$ 段输入。输入光束的空间振幅分布取为高斯分布:

$$f_0(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/\omega^2] \quad (22)$$

式中, $\omega = 1\text{mm}$ 。在上述参数下,对时空变换脉冲整形系统的各种透射屏调制函数的典型数值模拟结果见图 2。

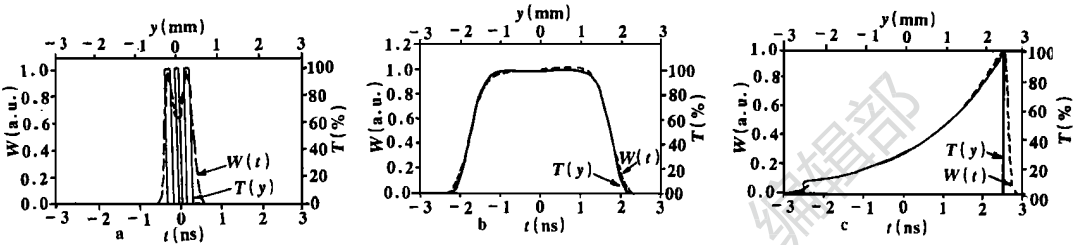


Fig. 2 $W(t)$ varies with $T(y)$

- a- $T(y) = \begin{cases} 1 & |y| < 0.04\text{mm, or } |y \pm 0.24\text{mm}| < 0.06\text{mm} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$
- b- $T(y) = \exp[-2(y/y_0)^3], y_0 = 2\text{mm}$
- c- $T(y) = \begin{cases} \exp[(y - 2.5)/1.66], & -2.5\text{mm} \leq y \leq 2.5\text{mm} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$

计算结果可以看出, $W(t)$ 实际是由 $T(y)$ 经展宽和平滑化而得到的。图 2 明显地表现了卷积的这种特点。如果 $T(y)$ 本身较为平滑,则 $W(t)$ 在形状上与 $T(y)$ 更相似,见图 2b,图中 $W(t)$ 曲线略向左边倾斜,是 $G(t)$ 截取非对称段输入影响所致。

五、根据输出脉冲设计透射率函数

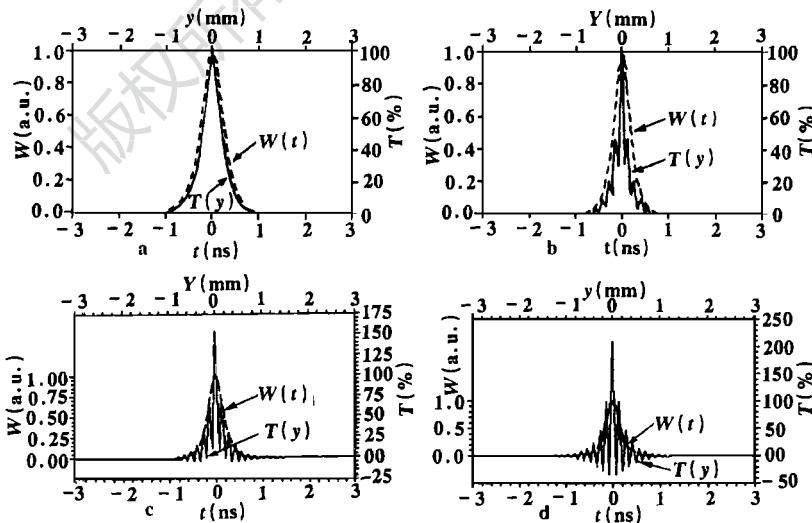


Fig. 3 Design of $T(y)$ according to the required $W(t)$ of the form $W(t) = \text{sech}(t/a)$

- a- $a = 0.2\text{ns}$ b- $a = 0.15\text{ns}$ c- $a = 0.14\text{ns}$ d- $a = 0.13\text{ns}$

在实际工作中往往需要根据输出脉冲波形的要求来设计屏的透射率函数。从(12)式出发经简单推导可得:

$$T(y) = c \cdot \mathcal{A} \{ \mathcal{A} W(t) / G(t) \} / \mathcal{A} I_y(y) \quad (23)$$

据此,可以由给定的输入和输出脉冲的参数来设计屏的透射率函数分布。

利用前一节的参数,据公式(23),我们作了多种输出波形的数值计算。以图3为例,对时空变换脉冲整形系统的工作特性作进一步讨论。图中选取的输出脉冲形状都是双曲正割函数:

$$W(t) = \text{sech}(t/a) \quad (24)$$

当 $a = 0.2 \text{ ns}$ 时,透射率函数近似为双曲正割分布。图3b, c, d中透射率函数在前沿和后沿附近出现剧烈振荡, a 越小,振荡越厉害,且屏的局部光强透射率 $T(y)$ 甚至有小于0或大于100%的情况,这显然是不可能在物理上实现的,这说明时空变换脉冲整形系统不可能得到任意形状的输出脉冲波形,它不可能产生太窄的脉冲,也不可能太陡的前沿和后沿,即时空变换脉冲整形系统输出脉冲宽度不可能窄于最小可分辨脉冲宽度 τ_0 ,其前沿不可能比最小可分辨脉冲的前沿更陡,后沿亦如此,设上升时间为 $\delta\tau$,则 $\delta\tau \geq \tau_0/2$ 。据(17)式可得

$$\delta\tau \geq \theta_0 f / v \quad (25)$$

六、时空变换脉冲整形系统对输出波前的影响

由(2)式,透射屏上的光强分布恰是入射光的频谱分布,由于透射屏对屏上光强的透射调制不是关于光斑的中心对称的,相当于对输入光束进行了一次非对称滤波,在屏的后表面处的光场分布为(10)式,再经过 L_2 传输到透镜后焦面的光场为

$$U_3(x'', y'', t) = \mathcal{A} U_2(x, y, t) = \mathcal{A} \{ t(y) g(t) f_1(x, y - vt) \} \quad (26)$$

由于 $t(x, y)$ 是非对称的,其结果必然会使输出光束出现或多或少的波前畸变。从激光束的传输角度看,透射屏处的光场分布恰为输入光束(同时也为输出光束)的远场分布,屏的非对称调制作用直接导致了输出光束的远场分布的非对称性(从而也影响了输出的近场均匀性)。显然,当屏上的透射率函数只在沿扫描线方向一维分布,在另一个方向(垂直于扫描方向)上是均匀分布时,输出光束只在扫描方向上出现波前畸变(不对称远场分布)。这种情况下的输出畸变最小,也便于进行补偿。

七、结 论

使用时空变换脉冲整形系统,可以把时间域的激光脉冲整形通过适当设计空间域的透射屏调制函数来实现,方法简单易行,具有广泛的用途。但输出的光束在远场可能出现非对称畸变,应考虑加以补偿。

参 考 文 献

- 1 Lowdermilk W H, Campbell E M, Campbell J H *et al.* Laser and Particle Beams, 1993: 11(2) L307~ 316
- 2 Soures J M, McCrooy R L, Doehly T R *et al.* Laser and Particle Beams, 1993: 11(2): 317~ 321
- 3 Goodman J W 著,詹达三译.傅里叶光学导论.北京:科学出版社,1987

* * *

作者简介:叶一东,男,1969年12月出生。硕士。主要研究方向为激光光束的传输变换和固体激光器件。

收稿日期:1995-04-13

