

# 单个微微秒脉冲的研究

支婷婷 唐贵琛 裘佩霞

(中国科学院上海光机所)

## 提 要

由被动锁模钕玻璃激光器产生的锁模脉冲序列中,分别从不同位置选出单脉冲,并研究了它们的时间和光谱特性。实验表明,在时间和光谱分布上满足高斯型的带宽极限脉冲,是呈现在序列的前部。随着序列的延续,光谱宽度显著加宽,并有明显的调制现象。加宽与理论计算符合很好,证明了加宽主要是强光下的自相位调制所引起。最后,对实验中的某些现象进行了讨论。

## Investigation on single picosecond pulses

Zhi Tingting Tang Guisheng Qiu Peixia

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

## Abstract

Single pulses at different time have been selected from a mode-locked pulse train produced in a passive mode-locked Nd:glass laser, and the temporal and spatial characteristics of the pulses have been studied. Experiments show that bandwidth-limited pulses with Gaussian temporal and spatial distribution appear in the front part of the pulse train, the spectral width is broadened significantly and obvious modulation appears with the evolution of the train. The broadening is in good agreement with theoretical calculation results. It proves that the broadening is caused by self phase modulation under the action of intense light. Some experimental phenomena are discussed.

在激光核聚变和超短脉冲的其他应用中,需要微微秒或亚毫微秒的脉冲振荡源,它可以通过锁模方式来获得。此外,往往对振荡器输出的光束,要求在时间、空间和光谱分布上是高斯型的带宽限制脉冲。关于微微秒脉冲的产生、测量和单脉冲的选出,已有工作

报导<sup>[1]</sup>,不同腔型下,空间高斯光束的获得,也已有较成熟的理论和实验。本文将专门研究单个微微秒脉冲的时间和光谱特性,其目的是企图了解锁模脉冲是如何发展的,要得到振荡带宽极限的超短脉冲,应该选取序

收稿日期:1979年6月9日。

列脉冲中的哪一个。这对激光核聚变和微微秒脉冲的其他应用,都是有实际意义的。

## 一、理论概述

### 1. 带宽、谱宽乘积

在理想锁模情况下:

$$\Delta\nu \cdot \Delta\tau \geq K$$

$\Delta\nu$  是锁模脉冲带宽,  $\Delta\tau$  为锁模脉冲宽度,  $K$  是常数。对不同的脉冲形状, 常数  $K$  应为不同的值。如高斯型脉冲的时间分布是:

$$I(t) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi T}} \exp\left(-\frac{t^2}{T}\right)$$

$T$ ——脉冲时间间隔;

它的半高宽是:

$$\Delta\tau_{1/2} = 2(\ln 2)^{1/2} T \quad (2)$$

按频率分布的高斯型函数为:

$$I(\omega) = \frac{I_0}{2\sqrt{\pi T}} \exp\left(-(\omega T)^2\right)$$

它的半高宽是

$$\Delta\omega_{1/2} = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{T} \quad (3)$$

则(2)和(3)的乘积

$$\Delta\tau_{1/2} \cdot \Delta\omega_{1/2} = K = 2\ln 2 / \pi = 0.44 \quad (4)$$

满足  $K$  等于确定值的脉冲, 通常称为带宽极限脉冲, 常数  $K$  称为“时间-带宽乘积”。对高斯型脉冲, “时间-带宽乘积”是 0.44。带宽极限脉冲具备有脉冲的“光滑的”不调制特性, 是理想的完全锁模脉冲。

### 2. 光脉冲的频谱加宽

窄谱线的输出, 应说是激光的重要特性之一。但是, 由于工作物质在腔内, 将对激光传输产生很大的影响。在这里, 我们主要讨论自相位调制引起频谱加宽的情况。

按 B. V. Коробкий<sup>[2]</sup> 对铍玻璃激光器相位调制的计算, 设光脉冲的表示式是:

$$E(t) = E_0 \exp\{i\omega_0 t\} \exp\{t/\tau_0\}^2 \quad (5)$$

$E_0$ ——场振幅;

$\omega_0$ ——频率;

$\tau_0$ ——脉冲的宽度。

如果非线性折射系数  $n_2$  所影响的时间与脉冲的持续时间相比是小的话, 则脉冲在长度为  $Z$  的介质中传播所引起的位相扰动<sup>[3]</sup>

$$\delta\phi(t) = -k_0(\delta n/n_0)Z \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{\omega_0 n_0}{C}$$

$n_0$ ——介质折射率;

在电场  $E(t)$  作用下, 折射率的变化是

$$\delta n = n - n_0 = n_2 \langle E(t)^2 \rangle \quad (7)$$

则

$$\delta\phi(t) = \frac{2\pi\nu_0 Z n_2 E^2(t)}{C} \quad (8)$$

如果光脉冲经介质后的输出光束可表示为:

$$E_m(t) = E(t) \exp\{i\delta\phi(t)\} \quad (9)$$

则输出辐射频谱分布的傅氏积分可由下式表示:

$$F(\Delta\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 e^{-i(\omega-\omega_0)t} \cdot e^{i\alpha t} e^{-2\left(\frac{t}{T}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^2} dt \quad (10)$$

这里

$$\alpha = \frac{-2\pi Z n_0 E_0^2}{\lambda} \quad (11)$$

利用(10)式, 可以对自相位调制引起的谱线加宽进行计算。如果考虑自聚焦效应的话, 即  $\alpha$  值很大, 则情况将变得复杂。

## 二、实验布置

### 1. 单个微微秒脉冲的产生

实验装置见图 1。产生单个微微秒脉冲装置由三部分组成, 第一部分是铍玻璃的锁模振荡器, 第二部分是电光选脉冲开关, 激光放大系统是第三部分。

振荡器的具体参数列于图 1 中。激光棒浸没在恒温的、循环流动的重铬酸钾溶液内, 以便滤去泵浦光的紫外部分及冷却棒。 $\phi 3$  毫米的小孔置于腔内, 用来获得振荡器的单横模输出。振荡器的整个装置安置在一个结实的铸铁底座上, 两个腔镜被四根等长的

殷钢棒支撑,从而减小温度效应对腔的形变,并且,整个器件在恒温下运转,这样,保证了输出光束的空间稳定性。为了消除染料盒与腔镜间反射,引起对测量光束脉宽的影响,实验中,全反腔镜与染料盒是一体化的。染料盒内充满十一甲川的丙酮溶液,浓度是由1.06微米的透过率  $T=68\%$  表征的。

选脉冲开关是采用激光触发火花隙,把电压加于  $45^\circ$  单块铈酸锂晶体上,从而从脉冲序列中选出单脉冲。开关的详细描述在工作总结<sup>[1]</sup>中已有报导。由不同位置选出单脉冲是通过改变触发火花隙的传输电缆的长度及改变触发球隙光束的光强来完成的,序列前部和中部单脉冲选出时,采用的传输电缆约90厘米,选在后部时,换成16米。用灵敏炭斗测量了单脉冲的能量,得到从序列前部、中部、后部选出的单脉冲的能量分别是0.2毫焦耳、1毫焦耳、0.3毫焦耳。

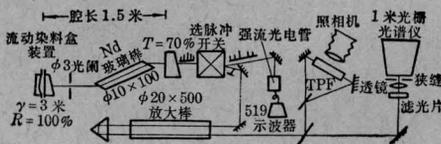


图1 研究单脉冲的实验装置

为了提供足够的能量或功率,保证同时完成对双光子荧光(TPF)和光谱的测量,必须加放大级进行放大。实验中放大棒为单灯泵浦,也有流水冷却。被选出的单脉冲往返两次经过放大棒,通常,能量增益是64。

## 2. TPF 测量

TPF方法的测试装置见图1。100毫米长的荧光管内充满了若丹明6G溶液,溶剂是二氯乙烷。荧光象被分为两部分,一部分用以定标,另一部分用于测量;定标是采用一块对1.06微米透过90%的滤光片,由阶梯法来制作照相底片的乳胶特性曲线。TPF记录相机的焦距  $f=55$  毫米,相对孔径是1:1.3。实验中使用的胶片为国产27Din。

## 3. 光谱测量

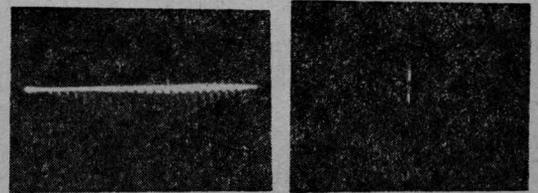
一台1米光栅光谱仪(色散为  $13.6\text{\AA}/$ 毫米,分辨率是  $0.2\sim 0.3\text{\AA}$ )。用一般的黑白胶片经红外敏化处理,用来拍照记录。为了直接得到光谱的半宽度,光谱仪入射狭缝的上半部焦平面处,用一块对1.06微米透射50%的滤光片覆盖,这样,谱线上下两部分的强度比为1:2,由此可确定光谱线的半宽。

## 4. 锁模脉冲序列的观察

采用对1.06微米灵敏的强流光电管和Tektronix 519示波器,来监测选出单脉冲以后的脉冲序列,用国产27Din胶卷拍照记录。

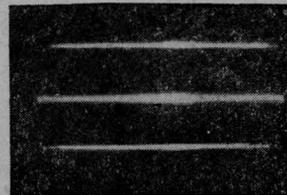
## 三、实验结果

图2为一组从锁模脉冲序列前部选出的

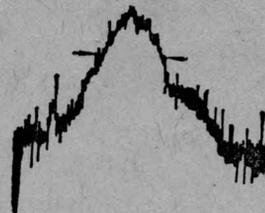


(a) 锁模脉冲序列照片  
(极大前第13个已选出)

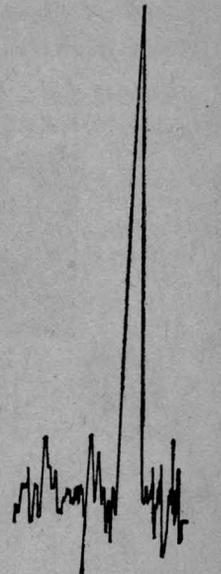
(b) 光谱照片



(c) TPF照片

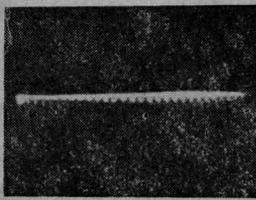


(d) 照片c的透过率描述



(e) 照片b的透过率描述

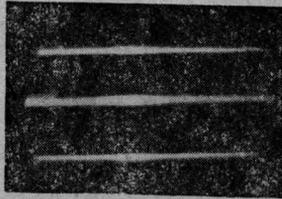
图2 选在锁模脉冲序列前部的另一组照片



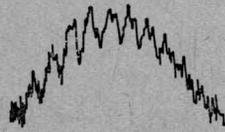
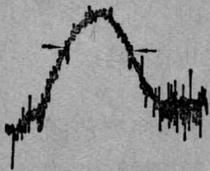
(a) 脉冲序列照片  
(极大前第 13 个已被选出)



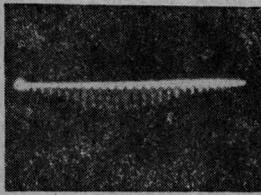
(b) 光谱照片



(c) TPF 照片



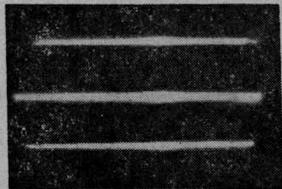
(d) 照片 c 的透过率描述 (e) 照片 b 的透过率描述  
图 3 选在脉冲序列中部的一组单脉冲照片



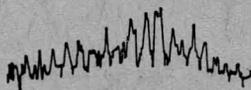
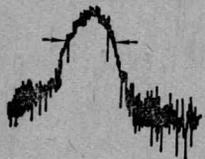
(a) 脉冲序列照片(极大后的第 9 个脉冲已被选出)



(b) 光谱照片



(c) TPF 照片



(d) 照片 c 的透过率描述 (e) 照片 b 的透过率描述  
图 4 选在脉冲序列后部的单脉冲的另一组照片

单脉冲的 TPF、光谱照片和被选出单脉冲后的脉冲序列照片, 以及对应的 TPF、光谱照片的透过率描述。选出单脉冲的位置是序列极大前的第 13 个。测得脉冲的半宽度是 36 微微秒, 相对的光谱半宽度为  $0.57 \text{ \AA}$ , 从而得到带宽和脉宽的乘积是 0.61。图 3 和图 4 同样是选在序列中部和后部的一系列照片及描述。同时也测得了对应的脉宽, 谱宽及其乘积。为了便于说明本实验条件下这些量的变化。表 1 列举了脉冲选在此三种位置下的结果。

表 1 选在不同位置的单脉冲实验数据

次数	TPF 对比度	选出单脉冲位置	脉宽 (微微秒)	谱宽 ( $\text{\AA}$ )	带宽·谱宽 $\Delta t \cdot \Delta \nu$
1	2.5	前 11	33	0.85	0.823
2	2.3	前 11	46	1.04	1.41
3	2.9	前 13	36	0.57	0.61
4	2.8	前 14	63	0.57	1.06
5	2.4	前 11	40	0.45	0.53
6	2.6	前 11	53	1.02	1.59
7	2.5	前 12	40	0.57	0.63
8	3.0	前 10	33	1.32	1.09
9	2.5	前 9	40	0.86	1.01
1	2.9	前 1	50	21.1	30.8
2	2.7	前 2	73	2.56	5.5
3	3.0	后 1	30	3.42	3.2
4	2.9	后 2	30	3.42	3.2
5	3.0	前 3	30	4	3.4
6	2.4	前 1	63	3.42	6.3
7	2.7	前 3	46	1.71	2.3
8	2.8	极大	36	15.4	16.5
9	2.9	前 1	56	15.4	25.5
1	2.8	后 4	40	9.13	10.7
2	3.0	后 8	40	2.28	2.66
3	2.9	后 9	40	10.8	12.6
4	2.4	后 6	63	12	22.2
5	3.0	后 7	36	11.4	12.2
6	3.0	后 7	36	2.28	2.14

#### 四、讨 论

表 1 的计算结果表明, 满足高斯型的带宽极限脉冲 ( $K$  值接近理论值 0.44), 是呈

现在锁模序列脉冲的前部,中部和后部的  $K$  值显著变大。实验中  $K$  值的不稳定与充电电压的严格控制有关。只要严格控制电压,在序列前部脉冲均能测得  $K$  值接近理论值。

TPF 的对比度大部分测得在 2.5 以上,但稳定性不够理想。按带宽极限脉冲的特性,在时间分布和光谱分布上都应该是“光滑”的,但实验中,除了序列前部脉冲的光谱分布为“光滑”外,TPF 的透过率描述看不出“光滑性”的变化。这可能是实验中所采用记录底片的分辨率过低之故。

实验结果还表明,随着锁模脉冲序列的延续,光谱有明显加宽。由表 1 看出,序列前部的光谱半宽  $\leq 1 \text{ \AA}$ ,而中部脉冲  $\gg 1 \text{ \AA}$ 。光谱照片的描述表明,序列前部脉冲的光谱描述很光滑,中部和后部的脉冲,它们的光谱描述调制较大。特别是中部的脉冲,其光谱描述的极大峰附近上升平缓,极大峰处出现下凹。我们按 B. V. Коробкий 的计算,运用频谱分布的表示式(10),代入实验中的已知参数,即  $\tau_0 = 30$  微微秒,  $Z = 40$  厘米(光脉冲沿腔往返一次经过工作物质的路程),并分别取  $\alpha = 0.3, 1, 2, 3$  和 4 等值,用计算机计算(10)的积分,计算结果示于图 5 中。图中的横坐标取谱宽与脉宽乘积值,纵坐标为积分  $F$  的模平方 ( $|F|^2$ ),并对入射能量的平方进行了归一化。从图 5 看出,  $\alpha$  由 0.3  $\rightarrow$  4,也就是入射能量从 0.1  $\rightarrow$  1.44 毫焦耳,相当于本实验内序列前部与中部的单脉冲能量。在以上变化情况下,不仅  $\Delta\omega\tau_0$  的值跟随增大,即谱宽增大,并且,谱线分布的轮廓,由较光滑的高斯型(如  $\alpha = 0.3$  和 1)变化到轮廓极大峰的平缓和下凹(如  $\alpha = 3$  和 4)。这与实验结果是完全相符的。由此,证明了随着序列脉冲的延续,谱线加宽和调制的出现,主要是由于自相位调制所影响。至于序列后部的脉冲,虽然入射能量并不最大,但因已受序列中部强脉冲相位调制的影响,且脉冲经工作物质往返次数比前部和中部脉冲多,因此,谱

线的轮廓更复杂些。

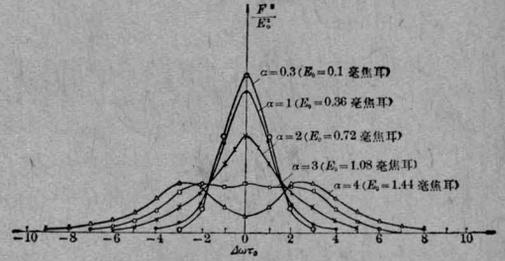


图 5 计算的频谱分布图

最后,从实验结果还看到,测得的脉冲半宽度  $\sim 30$  微微秒,但它的变化呈现跳跃式,这与实验结果<sup>[1]</sup>是相同的。如在序列前部选出脉冲的九次测量中,脉宽变化的几个值,仍是 33、40、53 和 63 微微秒。脉宽跳变的原因估计是随机卫星脉冲的影响。

此外,实验中的光谱照片,整个分布出现多线状结构,它是由锁模染料盒的标准具效应所引起的,图 6 为染料盒的简图,染料的溶剂丙酮,它的折射率是 1.36,而染料盒材料玻璃的折射率是 1.5 左右,因此,实际上存在的 A、B 两面将等效于标准具作用。由于存在标准具效应,所以脉宽较宽,得不到小于 10 微微秒的脉冲。

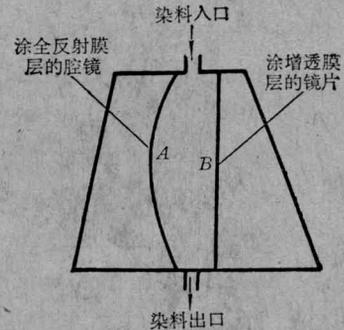


图 6 染料盒与全反射镜一体化装置简图

### 参 考 文 献

- [1] 唐贵琛等;《激光》1979, 6, №9, 33~38.
- [2] V. V. Korobkin, A. A. Malyutun; *JETP Lett.*, 1970, 12, 150-152.
- [3] R. A. Fisher, P. L. Kelly; *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 14, No. 4, 140.