

# 主动锁模激光器脉冲的瞬态形成

李洪谱 蓝信炬 刘耀兰

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文通过建立一合理的锁模模型, 采用数值算法模拟了 Nd:YAG 主动锁模激光器脉冲的瞬态形成。发现初始的自发辐射, 在腔内必须往返  $10^5 \sim 10^6$  次(对应时间为 1ms 左右), 才进入稳定的锁模状态。实验中, 我们采用一简单的方法测出了锁模脉冲的这一稳态建立时间, 而且与理论计算结果基本相符。

**关键词:** 锁模脉冲

## The instantaneous pulse evolution in active mode-locked laser

Li Hongpu, Lan Xinju, Liu Yaolan

(Institute of Laser, HUST)

**Abstract:** By setting up a suitable active mode-locked mode, the evolution process of a instantaneous pulse is simulated with a numerical calculation method. The simulation results show that the primary radiation come to a stable mode-lock state only after 1 ~ 1.5ms reflections (about 1 ms). With a simple method, the evolution time of a mode-locked pulse measured experimentally. This experimental result is consistent with theory calculation basically.

**Key words:** mode-locked pulse

### 一、引言

到目前为止, 有关主动锁模理论大都撇开锁模脉冲形成的初始过程, 而仅仅关心稳态脉冲的性质。Kuizenga 曾发展了锁模脉冲瞬态形成的理论<sup>[1]</sup>, 得出脉冲宽度的瞬变窄化规律: 初始激光场在腔内往返  $10^3 \sim 10^4$  次, 接近形成稳态脉冲, 而且调制深度  $\theta_A$  愈大, 达到稳态所需的往返次数愈少。然而此瞬态理论的出发点是假设初始脉冲是一完美的高斯型, 脉冲带宽远小于增益带宽。因此, 这些理论仅能适合于锁模脉冲形成的最后阶段。本文借助于计算机数值模拟, 在时域、频域内很好地模拟了脉冲产生的瞬态过程, 并在实验中采用一简便方法近似的测出了锁模脉冲的稳态建立时间。

## 二、主动锁模激光器脉冲瞬态形成的计算机模拟

### 1. 锁模模型的建立

我们以典型的声光调幅型 Nd : YAG 锁模激光器为研究对象,并考虑不失谐的情况。图 1 是激光谐振腔的等效图。

(A) 激光场的表述 初始的激光场可表述为:

$$\epsilon(t) = \text{Re}E(t)\exp[i2\pi\nu_0 t] \quad (1)$$

$E(t)$  是复幅度,  $\nu_0$  是原子线型的中心频率。显然, 脉冲的瞬时光强为

$$I(t) = |E(t)|^2 \quad (2)$$

脉冲的频谱幅度为

$$\epsilon(\nu) = E(\nu - \nu_0) \quad (3)$$

$E(\nu)$  是脉冲包络  $E(t)$  的傅里叶变换。单脉冲能量

$$W = \int I(t) dt \quad (4)$$

(B) 增益介质的表述 对均匀加宽线型介质, 幅度往返增益可表为:

$$g(\nu) = \exp\left[\frac{g}{1 + 2i(\nu - \nu_0)/\Delta\nu_g}\right] \quad (5)$$

对于高重复率的锁模激光器, 腔内的瞬态增益可表述为<sup>[2]</sup>

$$g = \frac{g_0}{1 + 2W/W_{sat}} \quad (6)$$

$g_0$  是非饱和的往返幅度增益。饱和能量  $W_{sat}$  与饱和光强有关。

$$W_{sat} = T_m I_{sat} = I_{sat}/f_m \quad (7)$$

式中,  $f_m = T_m^{-1}$  是锁模脉冲的重复频率。

(C) 调制器的数学表述 仅考虑幅度调制, 则幅度传输函数<sup>[3]</sup>为

$$M(t) = \exp\left[-a/2 - \frac{a^2}{2} \sin^2(\pi f_m t)\right] \quad (8)$$

式中,  $a$  为腔内的往返损耗(包括散射, 镜的耦合输出和其它的线性损耗)。

### 2. 计算机模拟计算的建立

为了计算方便, 我们截取时间在  $-T_m/2 \leq t \leq T_m/2$  中的脉冲包络  $E(t)$ , 并取  $N$  个分立的取样值, 则

$$E_n = W_{sat}^{-1/2} E(t_n) \quad (9)$$

式中,  $t_n = n\Delta t, \Delta t = \frac{T_m}{N}, -N/2 + 1 \leq n \leq N/2$ 。同样我们用分立谱替代脉冲频谱  $E(\nu - \nu_0)$

$$E_n = W_{sat}^{-1/2} E(\nu_n - \nu_0) \quad (10)$$

式中,  $\nu_n = \nu_0 + nf_m$ 。(9)式与(10)式中系数  $W_{sat}^{-1/2}$  的引入只是为了方便计算。经过上面的处理后, 我们采用快速傅里叶算法<sup>[4]</sup>, 使任意形状的初始脉冲能够有效地在频率域、时间域之间

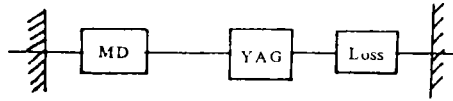


Fig. 1 The diagram of an active mode-locked laser

变换。具体步骤如下:

首先把时间域中的起始脉冲  $E_n$  贮存在一数组中,第一,采用 FFT 算法将  $E_n$  转换成频率域中的形式  $E_n(\nu_n)$ 。第二,脉冲往返通过增益介质, $E_n(\nu_n)$ 变为  $E_n'(\nu_n)$ ,这里,

$$E_n'(\nu_n) = E_n(\nu_n)g(\nu_n) = E_n(\nu_n)\exp\left[\frac{g}{1 + 2i(f_m/\Delta\nu_g) - n}\right]$$

第三,采用 FFT 算法将  $E_n'(\nu_n)$ 转换成时间域中的  $E_n'(t_n)$ 。第四,脉冲往返通过调制器, $E_n'(t_n)$ 变为  $E_n''(t_n)$ ,这里,

$$E_n''(t_n) = E_n'(t_n) \cdot M^2(t_n)$$

第五,算出此时的饱和增益系数  $g$ ,然后用新的  $g$  值重新从第一步开始,重复进行循环。

### 3. 模拟计算结果

在我们的计算中,采用的原始数据为调制器调制频率  $f_m = 200\text{MHz}$ ,调制器调制深度  $\theta_A = 0.412$ ,原子线宽  $\Delta\nu_g = 120\text{GHz}$ ,小信号的往返幅度增益  $g_0 = 0.365$ ,腔的往返损耗  $a = 0.162$ 。下面是我们的模拟结果。图 2 是初始激光场的场强及频谱分布图。图 3、图 4、图 5 分别是初始

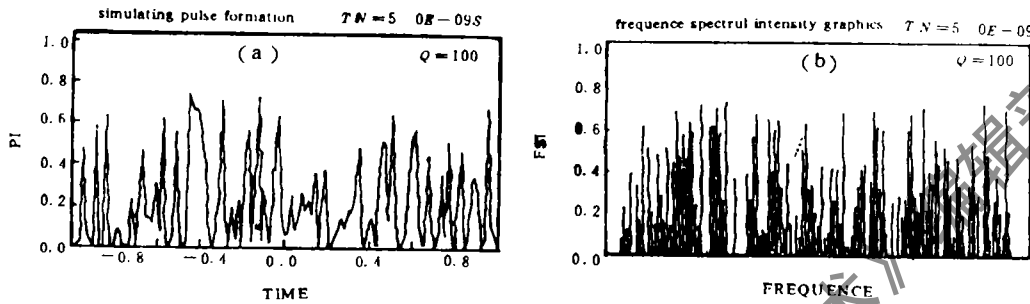


Fig. 2 The primary pulse intensity

a—the primary pulse intensity in time domain b—the primary pulse intensity in frequency domain

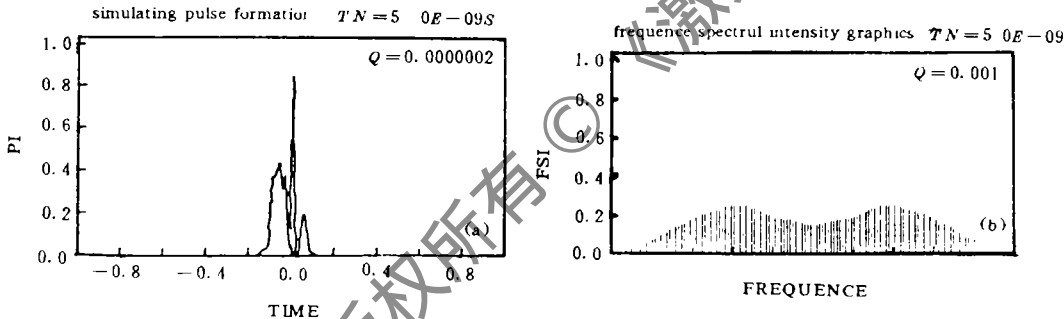


Fig. 3 Laser intensity after 4000 time reflections

a—laser intensity in time domain b—laser intensity in frequency domain

激光场在腔内经过 4000 次、10000 次及  $10^5$  次往返后激光场的场强分布及频谱分布图。由图 2 ~ 图 5,我们可以得出结论:锁模脉冲是逐步达到稳态的,在理想情况下,稳态脉冲确实是高斯型。在上面所给定的特定参数条件下,循环  $10^4$  次(对应时间为  $50\mu\text{s}$ )后,时间域中脉冲包络已接近稳态值,频率域中频谱形状逐步呈现高斯型,经过  $10^5$  次腔内往返(对应时间为  $0.5\text{ms}$ )后,频谱的形状已成为完美的高斯型,只有此时,我们才认为锁模脉冲进入了稳定状态。

the output of the photodiode per incident  
laser : YAG laser  
光腔型波导系统，激光  
序列波导系统，激光  
和波导系统，激光系统，激光系统  
波导系统，激光系统，激光系统  
和波导系统，激光系统，激光系统  
和波导系统，激光系统，激光系统  
和波导系统，激光系统，激光系统

版权所有 © 《激光技术》编辑部

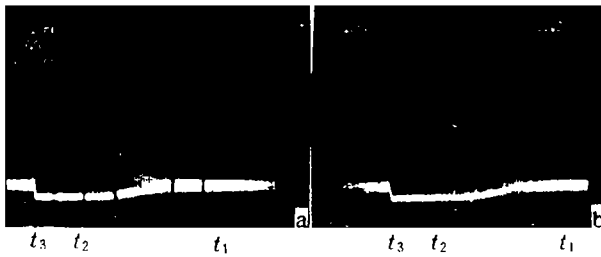


Fig. 8 The waveform measuring the stable laser pulse setup time for different modulation depth, the setup time is  $t = t_2 - t_1$ , the chopper on-off time is  $t = t_3 - t_2$   
 a — modulation depth  $\theta_A = 0.364$  b — modulation depth  $\theta_A = 0.412$

$\tau = 1.0\text{ms}$ 。实验中,斩波器本身的断开时间为  $320\mu\text{s}$ ,反映在图 8a, 8b 中即为  $t = t_3 - t_2$ , 大约为  $320\mu\text{s}$ , 这从另一方面说明了我们的实验的正确性。从上面的实验结果我们还可以看出,随着调制深度的增加,稳态锁模脉冲建立的时间是逐渐减少的,这与 Kuizenga 的瞬态理论是相同的。

## 四、结 论

对于典型 Nd : YAG 主动锁模激

光器,初始激光场变成稳定的脉冲序列需  $10 \sim 100\mu\text{s}$ 。然而,即使短脉冲的包络已接近其稳定值,脉冲还可能是线性调制的,或是有时间次结构。只有脉冲在腔内经过大约  $10^5 \sim 10^6$  ( $1 \sim 1.5\text{ms}$ )次往返传播,频谱的形状达到完美的高斯型,脉冲方达到稳定值。实验中,测得的锁模稳态脉冲建立时间其规律与理论计算基本吻合。

### 参 考 文 献

- 1 Kuizenga D J. Opt Commun, 1977; 22: 157~160
- 2 Siegman A E, Heritier J M. IEEE J Q E, 1980; QE-16: 324~334
- 3 Siegman A E, Kuizenga D J. Opt Electron, 1974; 6: 43~66

作者简介:李洪谱,男,1963年12月出生。讲师。现在主要从事激光与光电子学的研究。

蓝信炬,男,1934年出生。教授。长期从事固体激光技术的科研与教学工作。

刘耀兰,女,1940年出生。副教授。现从事激光技术和激光焊接的研究。

收稿日期:1993-03-12 收到修改稿日期:1993-06-07

· 简 讯 ·

### CO<sub>2</sub> 激光器

Optomic 公司研制了一种用于材料加工的新型千瓦级大功率 CO<sub>2</sub> 激光器。根据新概念及其专利的设计,这种激光器是第三代工业激光器的真正的先驱者,尺寸为现在技术条件的激光器的四分之一。

该激光器采用标准化方式设计和制造,功率范围能覆盖 500W 到 10kW。

可买到的样机:ICCL750 型双组合件,输出功率 750W; ICCL1000 型双组合件,输出功率 1000W; ICCL1500 型三组合件,输出功率最高可达 1600W。

译自 Electro Optics, 1993; 23(106); 5 於祖兰 译 巩马理 校