

CPM 染料激光器的计算机模拟*

王清月 赵兴俊

(天津大学精密系)

Computer simulation of CPM dye lasers

Wang Qingyue, Zhao Xingjun

(Department of Precision Instruments, Tianjin University, Tianjin)

提要: 本文就碰撞锁模染料激光器腔内各元件对脉冲的影响进行了定量分析,对脉冲的形成进行了计算机模拟,得到了脉冲波形的非对称数值解,并且根据模拟结果对脉冲的形成机理进行了讨论。

关键词: CPM 染料激光器

一、引言

我们的 CPM 染料激光器结构如图 1 所示。它是由六个反射镜组成的环形腔。腔内有两个喷流,分别是增益介质 Rh6G 和可饱和吸收介质 DODCI,溶剂为乙二醇。此外,还有一个由四个棱镜组成的系统,用来调节腔内的色散^[1]。

该激光器的腔内元件比较多,腔内各元件对脉冲的影响是复杂的。有些效应在时域

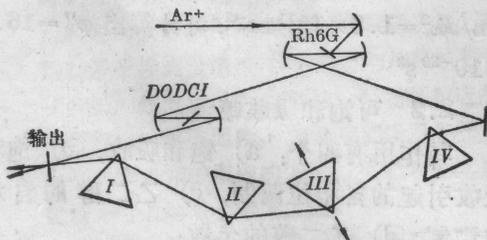


图1 实验装置图

对脉冲产生影响(如自相位调制效应、增益效应等),有些则在频域对脉冲产生影响(如色散效应等)。因此,要求出腔内光脉冲的精确解析解是不可能的。O. E. Martinez 等人^[2]于 1985 年曾建立了关于腔内光脉冲的偏微分方程组,经过简化和数学处理后变成一个多元超越方程组。对这个多元超越方程组,若不做一些大的近似,即使求其数值解,在数学上的处理也十分繁琐,一般的中小型计算机也不能胜任。鉴于这些情况,我们从另一方面入手,即用计算机模拟光脉冲在腔内的运行情况。也就是说,先设在腔内有一个光脉冲,让此光脉冲在腔内运行,当光脉冲遇到某一元件时,就把这个元件对光脉冲的影响加上去,让此光脉冲在腔内周而复始地运行下去,直到此模拟脉冲的形状、大小稳定下来。这时的模拟脉冲就是我们所求的实际

收稿日期: 1987 年 9 月 21 日。

* 本项目为国家科学基金项目。

腔内形成的脉冲。

二、计算机模拟

设光脉冲在遇到光学元件之前,其光场是 $E(t)$,若遇到自相位调制效应,光场的位相会变化 $\delta\varphi(t)$,这时的光场变为:

$$E(t) = E_0(t) \exp[i\omega_0 t + i\varphi(t) + i\delta\varphi(t)] \quad (1)$$

对各种不同的自相位调制, $\delta\varphi(t)$ 的具体表达式会有不同。

若遇到色散,则必须把光场的表达式由时域变到频域,其形式如下:

$$E(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) e^{i\omega t} dt \\ = E_0(\omega) \exp[i\varphi(\omega)] \quad (2)$$

通过色散介质时,光场将改变位相 $\delta\varphi(\omega)$,其形式是:

$$E(\omega) = E_0(\omega) \exp[i\varphi(\omega) + i\delta\varphi(\omega)] \quad (3)$$

我们将 $\delta\varphi(\omega)$ 在 ω_0 附近进行 Taylor 展开:

$$\delta\varphi(\omega) = \delta\varphi(\omega_0) + (\omega - \omega_0) \left. \frac{d\delta\varphi(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} \\ + \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \left. \frac{d^2\delta\varphi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} + \dots \quad (4)$$

通过分析可知,零阶项只会引起一个位相的平移,一阶项只会引起光脉冲包络在时域内的一个平移,二者对光脉冲的形状无影响。对光脉冲形状有影响的只有二阶项。我们定义一个参数 φ'' ,其表达式是:

$$\varphi'' = \left. \frac{d^2\delta\varphi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} \quad (5)$$

在实际计算中,只需求出 φ'' 即可。

下面就腔内各元件对脉冲的影响逐项进行分析。

2.1 增益喷流

增益喷流对脉冲的作用有三个:(a) Rh6G 的增益,(b) 乙二醇的自相位调制,(c) 乙二醇的色散。至于增益饱和所引起的

折射率变化,因其影响较小,本文计算中予以忽略。

a) Rh6G 的增益。

增益可表示为^[2]:

$$g = g_0 \exp \left[\left(\int_{-\infty}^t E^2(t') dt' \right) / (\sigma \cdot s) \right] \quad (6)$$

式中 g_0 是线性增益, σ 是光斑面积, s 是与分子稳定性及饱和能量有关的参数。对照实验中的参数,在计算中取 $g_0 = 0.05$, $\sigma = 10^{-6} \text{ cm}^2$, $s = 15 \text{ nJ/m}^2$,对应这些参数, $\int_{-\infty}^t E^2(t') dt'$ 应取 $\text{nJ}(10^{-9} \text{ J})$ 作单位。

b) 乙二醇的自相位调制

乙二醇的自相位调制引起脉冲位相的变化由(7)式给出。

$$\delta\varphi_s(t) = \frac{-n_2 \omega l}{c} \cdot \frac{E^2(t)}{\sigma} \quad (7)$$

对我们的实验,式中参数为:

$$n_2 = 3.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W},$$

$$\omega = 3.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1},$$

$$l = 160 \mu\text{m},$$

$$\sigma = 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$$

$$c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

c) 乙二醇的色散

由于乙二醇的色散而引起脉冲在频域的位相变化是

$$\delta\varphi(\omega) = \omega n(\omega) l / c \quad (8)$$

由此可得:

$$\varphi'' = - \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \\ = \frac{l\lambda^3}{2\pi c^2} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (9)$$

在实际情况中,我们取 $l = 160 \mu\text{m}$, $\lambda = 61 \text{ nm}$, $d^2n/d\lambda^2 = 1.8 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$,可计算出 $\varphi'' = 16.8 \times 10^{-30} \text{ s}^2$

2.2 可饱和吸收喷流

其作用有四个:a) 饱和吸收,b) 饱和吸收引起的自相位调制,c) 乙二醇的自相位调制,d) 乙二醇的色散。

a) 饱和吸收

饱和吸收可表示为^[27]:

$$s = -\varepsilon_0 \exp(-\mu s_1/s_0) \quad (10)$$

式中 ε_0 代表 DODCI 的线性吸收。 s_1 、 s_0 是与所用物质分子稳定性有关的参数, u 可表示为:

$$\mu = \left[\int_{-\infty}^t E^2(t') dt' \right] / (u_s \cdot \sigma) \quad (11)$$

u_s 是 DODCI 的饱和吸收能量密度。在计算中我们取 $\varepsilon_0 = 0.04$, $s_1 = 4$, $s_0 = 100$, $u_s = 1.5 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{nJ}$, $\sigma = 10^{-6} \text{ cm}^2$ 。

b) 饱和吸收引起的自相位调制

由于饱和吸收引起脉冲各部分的位相发生变化。在计算时我们取 DODCI 的中心吸收频率 $\omega_0 = 3.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 激光的中心频率 $\omega = 3.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, DODCI 的吸收曲线半宽度 $\Delta\omega_0 = 2.37 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, $\alpha_0 l = 0.4$, $u_s \sigma = 0.15 \text{ nJ}$

c) 乙二醇的自相位调制

与增益喷流中乙二醇引起的自相位调制的表达式相同, 所不同的是 DODCI 喷流的有效厚度 $l = 40 \mu\text{m}$, 而不是 $160 \mu\text{m}$ 。

d) 乙二醇的色散

根据 (9) 式, 取 $\lambda = 610 \text{ nm}$, $d^2 n/d\lambda^2 = 1.8 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$, $l = 40 \mu\text{m}$, 可得 $\varphi'' = 4.2 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 。

2.3 四棱镜系统及各反射镜的色散

四棱镜系统会产生一个可调的色散^[1]。此外, 当腔内光的中心波长与反射镜的中心波长有偏差时, 反射镜对光有色散作用^[3]。在计算中我们将腔内的总色散量作一个变量来处理。四棱镜系统的色散量是正负可调节的, 在实验中只要使棱镜 III (或棱镜 II) 沿着其顶角平分线方向平动 (见图 1), 就可以改变色散而不影响整个激光器的光路。该系统产生的色散量的大小在 10^{-28} s^2 量级^[1] (1 mm 厚的石英产生的色散是 $0.9 \times 10^{-28} \text{ s}^2$), 其调节范围约在 $-10 \times 10^{-28} \text{ s}^2$ 到 $10 \times 10^{-28} \text{ s}^2$ 之间。正色散和负色散对光脉冲的影响有着质的区别, 在实验中改变色散也观察到了

使光脉冲稳定性发生改变的突变点。为此我们分别取腔内总色散值为 $-100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 和 $100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 进行模拟。

2.4 损耗

激光器是暴露在空气中的, 空气中的尘埃对光会产生散射损耗。此外, 各个反射镜的反射面及各个棱镜的折射面也会有一些损耗。我们用一个总损耗 γ 来表示, 一般取:

$$\gamma = -0.02 \quad (12)$$

总之, 在时域内影响光脉冲的因素有增益、吸收、损耗和自相位调制。设光脉冲在未经过这些现象时的形式是:

$$E(t) = E_{in}(t) \exp[i\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (13)$$

经过这些现象后, 则变为:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) e^{\beta} \cdot e^{i[\omega_0 t + \varphi(t) + \delta\varphi(t)]} \quad (14)$$

式中 $\beta = g, \varepsilon, \gamma$, 分别对应着增益、吸收和损耗; $\delta\varphi(t)$ 对应着自相位调制的影响。

在频域影响脉冲的因素我们只考虑色散, 它对脉冲影响的数学表达式是:

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) \exp\left[i\varphi(\omega) + \frac{1}{2} \varphi''(\omega - \omega_0)^2\right] \quad (15)$$

式中 $\frac{1}{2} \varphi''(\omega - \omega_0)^2$ 项是由色散引起的。喷流溶剂乙二醇产生的色散, 前面已给出数值。四棱镜系统及各反射镜产生的色散, 作为变量处理, 分别取为 $-100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 和 $100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 。

脉冲的初始条件我们取其包络为双曲正弦形, 脉宽取 200 fs , 中心频率为 610 nm , 对应着在实验中腔内的平均功率约 1 W , 每秒有 10^8 个脉冲, 我们取每个脉冲的初始能量为 10 nJ 。

将腔内各元件对脉冲的影响做了定量分析后, 即可进行计算机模拟。其方法就是假定模拟脉冲在腔内运行, 遇到某元件, 就把某元件对脉冲的影响加上, 并让模拟脉冲在腔内多次运行下去, 直到稳定。值得注意的是各种效应对脉冲的影响不一定在同一域内

(时域或频域),这就要求经常地进行 Fourier 变换。再者,脉冲在腔内需运行多次才能稳定,这会使计算时间变得很长。但因要求的容量不大,在一般小型计算机上即可进行。

我们对腔内存在不同的色散的情况下进行了模拟,分别取 φ'' 为 $-100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 和 $100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ 进行了计算。

对 $\varphi'' = 100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$, 计算结果如图 2 所示。在计算中发现,在色散为正的情况下,脉冲很不容易稳定下来,图 2 是进行了 300 多次运行后的结果。从图中看出,光谱曲线十分尖锐,光谱未能被展宽,脉冲宽度也很宽。

图 3 是对应着 $\varphi'' = -100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$, 运行了 60 次的结果。我们发现运行 60 次其结

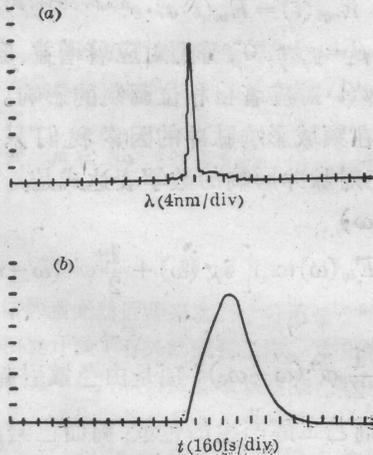


图 2 脉冲在腔内进行 300 次时的脉冲形状 (b) 和它的谱线 (a)。计算的 $\varphi'' = 100 \times 10^{-30} \text{ s}^2$

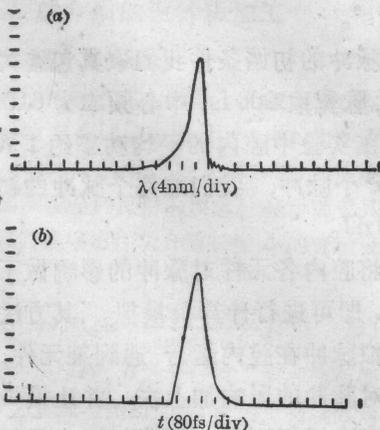


图 3 在腔内进行 60 次的脉冲形状 (a) 和它的谱线 (b)

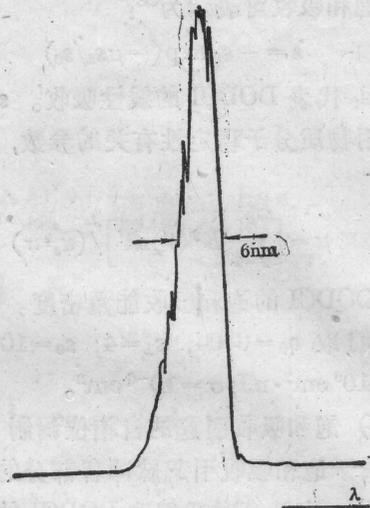


图 4 实验测量的脉冲谱

果已经稳定,光谱已被明显展宽,且出现了不对称性,这与我们在实验中测得的光谱曲线图 4 形状 (其 φ'' 约为 $2 \times 10^{-28} \text{ s}^2$) 是相似的,脉冲的宽度也变窄了。

三、讨 论

由于自相位调制效应,脉冲具有了啁啾,对于啁啾和色散同号者使脉冲展宽,对于啁啾和色散异号者变窄。从我们的模拟结果可看出,对腔内存在正色散时,脉冲是很宽的,且稳定性不好;当腔内的总色散量为负时,脉宽是窄的,稳定性很好,并且模拟出的光谱曲线与实验中测得的光谱曲线是相同的。

从以上分析可得到下列结论: (1) 腔内存在负色散是脉冲得到压缩和稳定的必要条件。(2) 不仅光谱曲线是非对称的 (在实验中可直接观察),而且脉冲的形状也是非对称的 (在实验中不可直接观察)。由于得到了脉冲的数值表达式,就可以更精确地描述脉冲的各种特性。

参 考 文 献

1. R. L. Fork *et al.*, *Opt. Lett.*, **9**, 150 (1984)
2. O. E. Martinez *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, **2**, 753 (1985)
3. J. A. Valdmanis *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22** (1), 112 (1986)