

利用双膜系介质镜谐振腔产生 30 fs 锁模脉冲*

王清月 刘 航 章若冰 刑岐荣
(天津大学精密仪器系)

提 要

本文通过计算机叠代法,分析计算了一般所用的 $\lambda_m/4$ 单膜系介质腔镜的色散,发现用这种腔镜难以补偿腔内脉冲的正啁啾。设计了一种双膜系介质镜,它具有补偿正啁啾所需的合适色散量 $\ddot{\phi}(\omega) = 1.3 \times 10^{-28} \text{sec}^2$,用它代替一般腔镜,结果在没有附加任何其它色散元件情况下,直接从简单的碰撞锁模染料激光器获得 30fs 的脉冲输出。
关键词: 啁啾; 双膜系反射镜; 飞秒。

一、介质腔镜色散的理论分析

一个复振幅 $E_i(\omega)$ 的光场入射到介质镜上,反射后的光场复振幅为 $E_r(\omega)$,它们的关系是: $E_r(\omega) = E_i(\omega)r(\omega)$,其中 $r(\omega) = |r(\omega)|\exp[i\phi(\omega)]$ 是介质镜的反射系数, $|r(\omega)|^2 = R(\omega)$ 为反射率, $\phi(\omega)$ 为相移。在讨论超短脉冲啁啾补偿时,通常把 $\phi(\omega)$ 在其带宽中心频率 ω_0 处展开:

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \left[\frac{d\phi}{d\omega} \right]_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left[\frac{d^2\phi}{d\omega^2} \right]_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots,$$

其中,第一项为常数,第二项可用傅里叶变换证明,它在时域中仅引起平移,而不改变脉冲形状,第三项可引起脉冲在时域包络中的线性啁啾,第四项及其他项为非线性色散项,对应非线性啁啾,因它们很小,本文中忽略之。所考虑予以补偿的是第三项,即线性啁啾。

首先考虑标准的 $\lambda_m/4$ 膜系高反介质镜, λ_m 为其镀膜谐振波长,它的结构为 $G(HL)^m HA$, $(HL)^m$ 表示具有高反射率(H)和低折射率(L)的材料在基片(G)上交替分别镀 m 层的周期结构。我们利用计算机叠代法对反射率 $R(\omega)$, 相移 $\phi(\omega)$, 相位色散 $\ddot{\phi}(\omega)$ 作为波长 λ 的函数进行了数值计算。在计算中不考虑各层材料本身的吸收和色散。典型 CPM 激光器的腔镜介质膜的镀膜谐振波长为 $\lambda_m = 590 \text{nm}$, 对于高折射率 $n_H = 2.1$ (二氧化锆) 和低折射率 $n_L = 1.45$ (二氧化硅) 交替 23 层 ($m = 11$) 的 $\lambda_m/4$ 高反膜系, 图 1 实线给出了 $R(\omega)$ 和 $\ddot{\phi}(\omega)$ 在垂直入射情况下的结果。可以看出, $\ddot{\phi}(\omega)$ 在谐振波长 λ_m 处为 0, 偏离谐振波长长波和短波方向各自分别有正、负值, 而且在高反射率曲线的两个边缘处变化很陡。CPM 染料激光器中心波长 $\lambda_0 = 614 \text{nm}$, 此处 $\ddot{\phi}$ 的值为 $2.3 \times 10^{-28} \text{sec}^2$, 而按参考文献^[2,3] 的讨论, 补偿腔内啁啾合适的 $\ddot{\phi}(\omega)$ 值应为 10^{-28}sec^2 量级。要产生这么大的色散, 只有把镀膜中心

收稿日期: 1987年7月30日; 收到修改稿日期: 1987年12月9日

* 本文工作得到国家自然科学基金的资助。

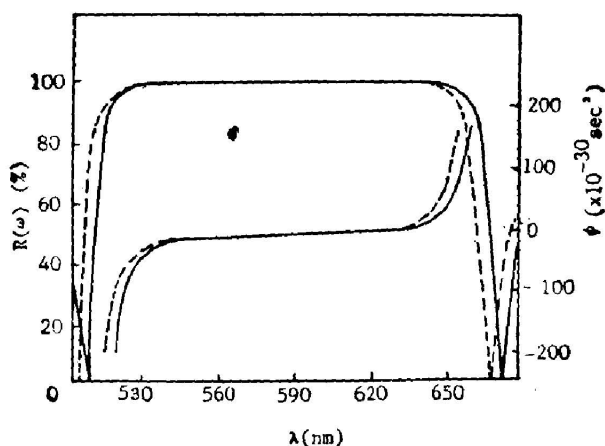


Fig. 1 Plot of the reflectivity $R(\omega)$ and the phase dispersion $\ddot{\phi}(\omega)$ versus the wavelength for a standard $\lambda_m/4$ ($\lambda_m=590$ nm) dielectric mirror made of 23 layers of high- ($n_H=2.1$) and low- ($n_L=1.45$) refractive index materials. The solid lines show the case of normal incidence and the dashed lines show the case of 12 sloping incidence

波长向短波方向移动,使介质腔镜工作在高反射率曲线的长波下降沿附近。但此时,镜子的反射率明显下降,使整个腔的损耗明显增加(通常 $\sim 4\%$),这对于激光器的振荡,特别是我们所用低功率氩离子泵浦的CPM染料激光器影响是很大的,甚至导致激光器不能工作。在我们的实验中已经得到证实。同时,由于在此区域内,其反射率和色散量都随波长急剧变化,因此要控制一定的反射率和色散量,对镀膜工艺的要求也是很高的。另外,在实际的CPM染料激光器中,激光总是以一定角度入射到腔镜上,但为了不造成很大的难以补偿的像散和获得稳定的谐振腔^[9],入射角一般保持在 12° 以内。图1虚线给出了同种反射镜在入射角为 12° 时的计算结果,由于斜入射相当于镀膜谐振波长变短,反射率曲线和相位色散曲线都发生蓝移,但 $\ddot{\phi}(\omega)$ 值在激光中心波长 614 nm处虽略有增加,但仍达不到 10^{-28} sec^2 量级。

鉴于上述情况,我们设计了一种双膜系的多层介质膜,它的结构是 $G[590(HL)^mH]L_d[514.5(HL)^mH]A$,先以 $\lambda_1=590$ nm为镀膜谐振波长,在基片上交替镀 $2m+1$ 层(我们所用为23层即 $m=11$)高低折射率的 $\lambda/4$ 膜,然后再在这个高反膜系上叠加中心波长为 $\lambda_2=514.5$ nm的另一个 $\lambda/4$ 高反膜系,高低折射率材料交替镀23层。为了消除其反射率曲线中的透射率峰值,在两个多层高反膜系之间,加进一层厚度为 $\frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} = 138$ nm的低折射率过渡层,我们所用镀膜材料仍为 $n_H=2.1$ (二氧化锆), $n_L=1.45$ (二氧化硅)。图2给出了这种多层介质膜系的计算结果,在激光中心波长 $\lambda_0=614$ nm处,其 $\ddot{\phi}(\omega)$ 的值约为 1.3×10^{-28} sec^2 (入射角几度情况下),正适合于腔内啾啾补偿的需要。若在基底上先镀23层谐振波长为 514 nm的 $\lambda/4$ 膜系高反膜,然后镀过渡层,最后再叠加上谐振波长为 590 nm的23层 $\lambda/4$ 膜系高反膜。计算结果由图3给出,它的 $\ddot{\phi}(\omega)$ 值在激光中心波长 614 nm处约为 $2.4 \times$

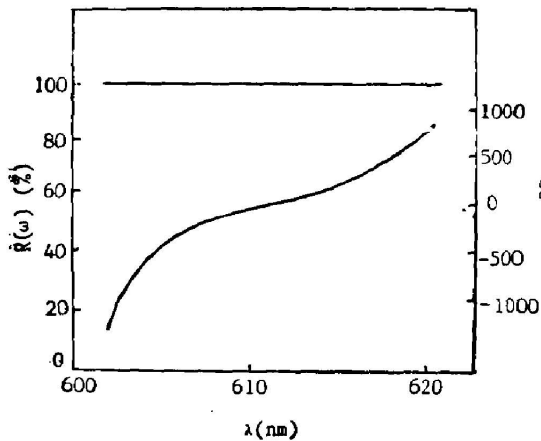


Fig. 2 Plot of the reflectivity $R(\omega)$ and the phase dispersion $\check{\phi}(\omega)$ versus the wavelength λ for a $G[590(HL)^{11}H]L[514.5(HL)^{11}H]A$ doubly coated stack $\lambda_m/4$ dielectric mirror

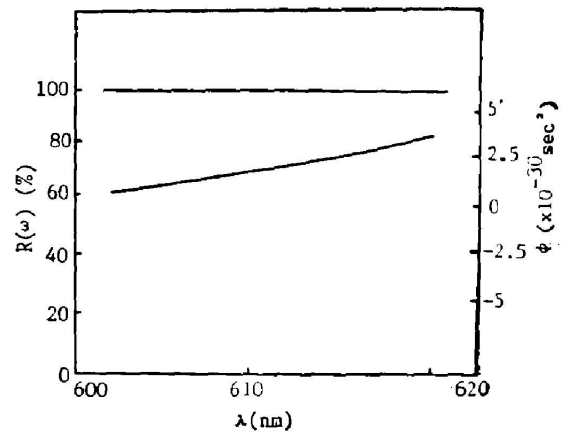


Fig. 3 Plot of the reflectivity $R(\omega)$ and the phase dispersion $\check{\phi}(\omega)$ versus the wavelength λ for a $G[514.5(HL)^{11}H]L[590(HL)^{11}H]A$ doubly coated stack $\lambda_m/4$ dielectric mirror

10^{-30} sec^2 (对入射角几度情况), 仍然很小。由此可见, 对双膜系的腔镜而言, $\check{\phi}(\omega)$ 主要由上面的膜系影响, 而 $R(\omega)$ 则同时受到两个膜系的影响, 所以可通过选择每个膜系的谐振波长, 进行合适组合来获得特定波长所需要的 $R(\omega)$ 和 $\check{\phi}(\omega)$ 值。

二、实验研究

CPM 染料激光器如图 4 所示, 增益介质为 Rh6G, 浓度约为 $2 \times 10^{-3} \text{ M/l}$, 喷流厚度是 $200 \mu\text{m}$, 可饱和吸收介质为 DODCI, 浓度为 $1.3 \times 10^{-4} \text{ M/l}$, 喷流厚度为 $50 \mu\text{m}$, 值得注意的是这里 DODCI 的浓度要比通常采用的 10^{-3} M/l 浓度低得多, 这是因为虽然溶剂的 SPM 使得腔内脉冲主要部分具有正啁啾, 但由于吸收介质 DODCI 的饱和, 会引起脉冲前面部分具有负啁啾, 这样当用负色散元件来补偿脉冲主要部分的正啁啾时, 反而又引起脉冲前部的展宽, 我们通过减小 DODCI 浓度, 可相应减少脉冲前面部分的负啁啾量, 从而使得在补偿正啁啾时, 防止脉冲前面部分过分加宽, 更有效压缩脉冲宽度^[10]。同时也降低实现碰撞锁模运转所需的泵浦功率。在我们的激光系统中, 是由 $2 \sim 4 \text{ W}$ 的 Ar^+ 激光全线泵浦, 比其它系统的 514.5 nm 单线 6 W 的泵浦功率要低得多。

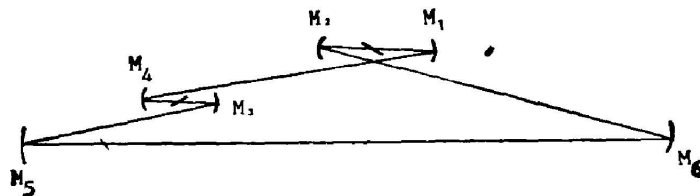


Fig. 4 The six-mirror cavity used for the CPM dye laser

染料激光器谐振腔结构象以前我们所报告的^[11],由六面反射镜组成,它要比 Fork^[6]等人和 Yawashita^[8]等人所用的七镜腔更简单,而且各个镜面处激光束夹角很小,消除了由于

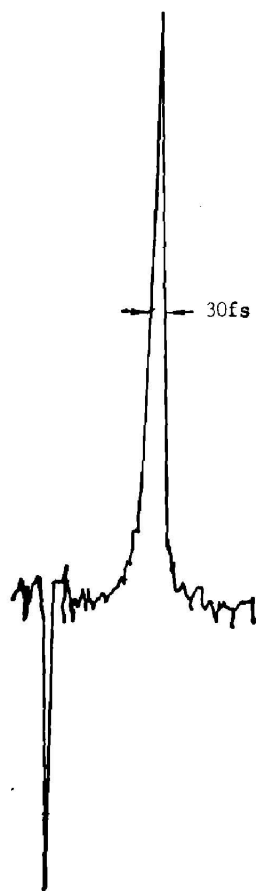


Fig. 5 Second-order autocorrelation of the pulse train with peak-to-background ratio of 3 to 1. The pulse duration is 30 fsec if pulse shape of Sech^2 is supposed

于 45° 入射的高反射镜所引起的难以补偿的色散。谐振腔整个腔长为 302 cm, 如图 4, 在增益介质 Rh6G 喷流处的反射镜 M_1 和 M_2 与在可饱和吸收介质 DODCI 喷流处的反射镜 M_3 和 M_4 的曲率半径分别为 5, 5, 5 和 2.2 cm, M_4 采用更小曲率半径的反射镜, 是为了使激光束在吸收介质喷流处得到更好聚焦, 以产生深度饱和。同时, 根据计算, 为了得到一个更稳定的谐振腔, 我们使腔内光束在 $M_1 \sim M_4$ 上的入射角为 $4^\circ \sim 6^\circ$ 或 $9^\circ \sim 12^\circ$ ^[9]。

介质腔镜 M_1 , M_2 和 M_3 , M_6 是单膜系反射镜, 谐振波长为 590 nm, 带宽 100 nm, 入射角为几度的情况下, 在激光中心波长 614 nm 处的相位色散大约为 $2.3 \times 10^{-20} \text{ sec}^2$, 这个值相对很小, 可以忽略。介质腔镜 M_5 和 M_4 是前述的双膜系反射镜, 在激光中心波长 614 nm 处的相位色散大约为 $1.3 \times 10^{-28} \text{ sec}^2$ 。它用以补偿由于染料溶剂的 SPM 引起的脉冲中部的正啁啾。脉冲宽度测量是用共线的强度二阶相关测量法, 相关器由中空棱镜组成。以 0.8 mm 厚的 KDP 晶体产生二次谐波, 并且认为脉冲包络为 Sech^2 形。

通过调整谐振腔, 可以改变腔内光束在反射镜上的入射角, 从而调节色散, 在最佳情况下, 获得 30 fs 的脉冲输出序列(相关函数曲线如图 5 所示)。这比不加色散元件时的 90 fs 脉冲窄 2/3, 其中心波长为 614 nm, 重复率为 100 MHz, 在 2% 的输出耦合情况下, 每束光的平均输出功率为 18 mW。

三、结 论

在研究了介质腔镜的色散情况下, 我们发现利用单膜系腔镜产生之色散补偿脉冲的正啁啾是以增加激光器的损耗为代价的, 且色散量变化剧烈, 又难以精确控制。我们提出用双膜系介质镜产生负色散的新方法, 该介质腔是由一个谐振波长接近激光中心波长的 $\lambda_m/4$ 高反膜系再在其上叠加一个谐振波长比激光中心波长短的 $\lambda_m/4$ 高反膜系所组成的双膜系介质镜, 它能产生适量的负色散, 以补偿腔内脉冲中心部分的正啁啾。利用这种介质镜代替一般腔镜; 在不加其它任何色散元件情况下, 从简单的六镜腔 CPM 染料激光器直接获得了 30 fs 的脉冲序列输出。