

飞秒激光器的相位薄膜*

王明利 范正修 龚 辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜技术中心, 上海 201800)

摘 要 论述了飞秒激光器的相位补偿特点, 讨论了采用相位薄膜作为补偿晶体的色散和相位自调制的飞秒激光器, 并对相位薄膜进行了理论设计。

关键词 飞秒激光器, 相位薄膜。

近年来超短脉冲得到了很大的发展, 特别是飞秒激光器, 作为高功率激光的一个重要发展方向, 得到了人们极大的重视^[1]。飞秒激光器可用来研究非线性光学现象, 测量各种超快物理和化学过程。最近采用相位延迟色散薄膜代替棱镜、光栅色散元件, 已研制了脉冲宽度小于10 fs的激光器^[2], 这种激光器结构更加紧凑, 激光更加稳定可靠。本文论述了飞秒激光的相位补偿特点并对相位薄膜进行理论设计。

1 飞秒激光的相位特点

一个短脉冲是许多单个正弦频率的相干叠加, 其幅度在某一时刻相长相加。在激光器里, 允许的振荡频率由两个因素决定: 1) 激光器几何尺寸允许的模频率, 2) 激光材料的增益带宽。决定模频率的要求是在激光腔中, 光往返振荡后电场必须自洽。激光材料的增益宽度由激光材料的原子或者分子结构决定, 一般地, 增益带宽包含许多模频率。因为每一个模对于另外模都是随机相位, 为了产生短脉冲, 每个单独的模之间应该有恒定的相位差, 所以它在空间某一点相长全部相加, 而另外的点则相互抵消。

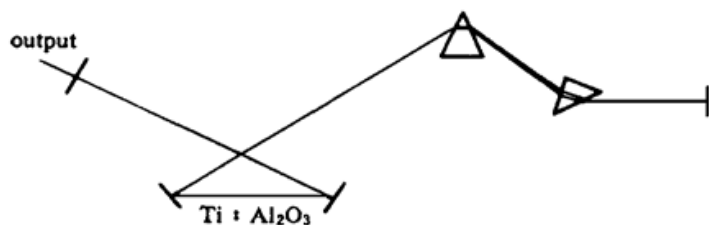


Fig. 1 Schematic self-mode-locked laser with prism compensation

图1为一个传统的自锁模钛宝石激光器的结构, 由激光晶体、一对棱镜和四个镜片组成。棱镜对补偿晶体的色散, 在可见光谱波段, 材料具有正常色散, 即较长的波长(红光)传播速度高于较短的波长(蓝光)。在棱镜中红光传播最快, 它通过第一个棱镜折射得最小, 这个效应使红光在第二棱镜中传输的光程更长, 如果没有补偿, 则短脉冲通过晶体后将变宽。偏离峰值的补偿将使叠加相位相对偏移, 从而产生衰减, 因为它们不再相长相加到

* 中国科学院上海光机所所长基金资助。

收稿日期: 1996年1月15日

脉冲上。

2 飞秒激光薄膜相位补偿

图2为采用相位色散薄膜补偿的钛宝石激光器结构图, $M_1 \sim M_7$ 为相位色散薄膜。采用相位薄膜代替棱镜补偿晶体的色散和相位自调制, 同样可达到限制脉冲宽度。由于激光晶体中 $n = n_0 + n_2 I$, 其中 n_0 为晶体的线性系数, I 为瞬间脉冲强度。光束聚焦到晶体时, 在光束的中心, 非线性的相位延迟将达到最高, 引起自聚焦。于是, 对强脉冲, 腔中存在一个附加的“透镜”, 而对于低强度的则没有, 当一个脉冲在激光器中来回传播时, 会出现许多过程。首先, 自聚焦效应产生随时间变化的损耗。材料的非线性折射率系数也引起脉冲的相位自调制。当脉冲通过晶体材料时, 相位自调制将展宽脉冲的光谱。对于短脉冲的产生, 光在激光腔中往返一次的时间必须与频率无关, 即 $T(\omega) = d\Phi/d\omega = T_0 = \text{常数}$, Φ 为一次往返后光的总相位提前量。对 $T(\omega)$ 以中心频率 ω_0 作泰勒级数展开为:

$$T(\omega) = d\Phi/d\omega = \Phi(\omega_0) + \Phi'(\omega_0)\Delta\omega + (1/2)\Phi''(\omega_0)\Delta\omega^2 + \dots$$

其中 Φ 、 Φ' 和 Φ'' 是关于频率的相位微分, 在此表达式中, 当 Φ' 不等于零时, 脉冲将有一线性频率啁啾。未补偿的色散, 将引起偏离激光器中的频率相对于锁模时相位移动, 加宽了脉冲宽度。当薄膜的负群速度色散与晶体的色散和相位自调制的啁啾相补偿时, 展宽的带宽又被压缩。作为激光器的反射镜, 首先必须具有高的反射率, 同时它要能够补偿晶体的色散, 这样要对薄膜进行特殊设计。

薄膜的反射率和反射相位的变化可以通过薄膜的特征矩阵得到, K 层薄膜结构的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \sigma_j & (i/\eta_j) \sin \sigma_j \\ i\eta_j \sin \sigma_j & \cos \sigma_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}$$

式中, $\sigma_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos \theta_j$ 为膜层的位相厚度, n_j 为膜层的折射率, d_j 为膜层的厚度, θ_j 为折射角, η_j 为膜层的导纳。

薄膜和基底的组合导纳为 $Y = C/B$, 则

$$R = [(\eta_0 B - C)/(\eta_0 B + C)] [(\eta_0 B - C)/(\eta_0 B + C)]^*$$

反射相移为

$$\Phi = \arctg [i\eta_0(CB^* - BC^*)/(\eta_0 BB^* - CC^*)]$$

群速度延迟(GDT)为反射相移对角频率求导的负值, 即 $\Phi = -d\Phi/d\omega$ 群速度色散(GDD)则为群速度延迟对角频率求导, 即 $\Phi = d^2\Phi/d\omega^2$ 。

当薄膜的群速度色散正好能补偿光在晶体中的色散和相位自调制中的啁啾时, 材料展宽的脉冲被压缩(忽略高级次色散)。

图3是一个37层薄膜群速度延迟随波长变化的理论曲线。图4为群速度色散随波长的变化曲线图。

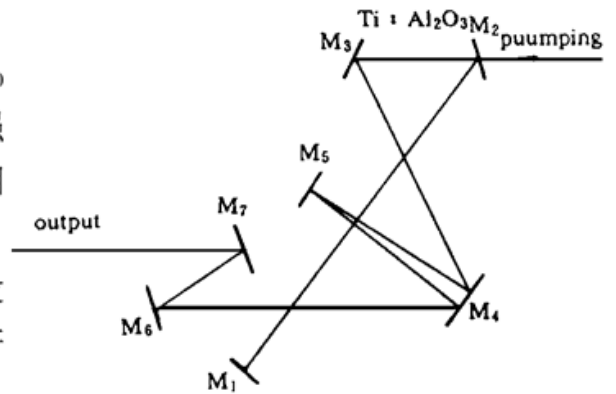


Fig. 2 Schematic Ti:sapphire laser with phase films compensation

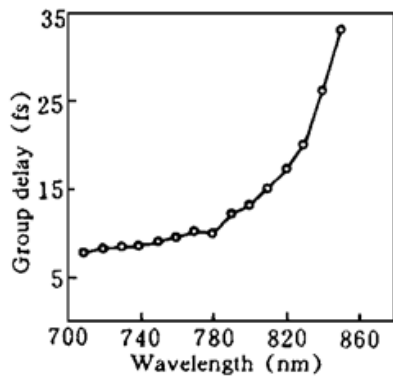


Fig. 3 Computed group delay as a function of wavelength of the multilayer

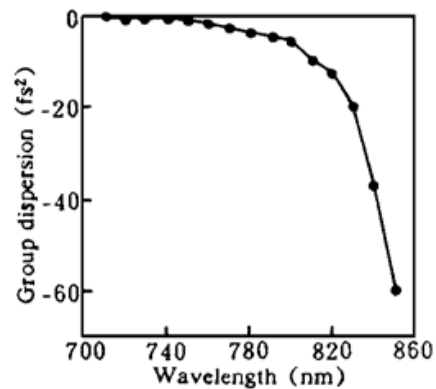


Fig. 4 Computed group dispersion as a function of wavelength of the multilayer

图 5 为薄膜的反射光谱曲线。从图 3、图 4 和图 5 可以看出波长在 700~ 850 nm 之间, 薄膜具有 99.5% 以上的反射率和相对平稳增加的相位延迟特性说明在此波段, 既具有高反能力又具有补偿色散的能力。

总 结 根据飞秒激光器工作物质的特点, 调节薄膜的结构, 使薄膜在宽的波长范围内, 能补偿激光工作物质中的相位色散和相位自调制, 展宽激光的波长频谱范围, 压缩激光的脉冲宽度。采用薄膜相位色散代替棱镜的色散, 对压缩飞秒激光脉冲宽度将起十分重要的作用。本文只对相位薄膜的理论进行论述, 实验将另作报道。

感谢刘艳同志在论文文字上的工作。

参 考 文 献

- [1] Christian Spielmann *et. al.*, Ultrabroad band femtosecond lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(4): 1100~ 1114
- [2] Robert Supoc *et. al.*, Chirped multilayer coating for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 201~ 204

Phase Films for Femtosecond Lasers

Wang Mingli Fan Zhengxiu Gong Hui

(The Center of Film Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 January 1996)

Abstract The phase characteristics of the femtosecond lasers have been described, and the ultrashort pulse laser with the phase films compensation of the dispersion and phase self-modulation have been discussed. The phase films have been designed.

Key words phase film, femtosecond laser.

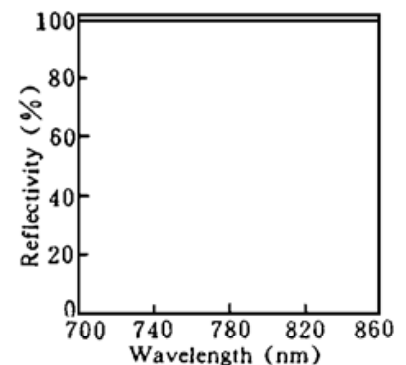


Fig. 5 Computed reflectivity as a function of wavelength of the multilayer