

文章编号: 0253-2239(2010)04-1071-05

# 用于光谱色散平滑技术的双通调制器实验研究

张琥杰<sup>1</sup> 周申蕾<sup>1</sup> 李菁辉<sup>1</sup> 冯 伟<sup>2</sup> 林尊琪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要** 在惯性约束聚变中, 辐照的均匀性直接影响到内爆实验的效果, 通常结合各种空间、时间平滑技术提高光束的均匀性。光谱色散平滑技术正是一种常用的时间平滑技术, 其核心是频谱展宽技术。为提高频谱展宽的效果, 将单通的腔式调制器设计成双通调制器, 以满足光谱色散平滑技术中频谱展宽的要求。理论上计算了双通调制器情况下的速度匹配条件, 得到了一个清晰的表达式, 同时在实验上验证了理论分析的正确性, 以此验证了双通调制器的可行性。最后基于以上方案, 进一步提出了改进成多通调制器的构想。

**关键词** 激光物理; 激光辐照均匀性; 光谱色散平滑技术; 双通调制器; 准速度匹配

中图分类号 N34 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.1071

## The Experimental Research on Double-Pass Phase Modulator Applied on Technology of Smoothing by Spectral Dispersion

Zhang Hujie<sup>1</sup> Zhou Shenlei<sup>1</sup> Li Jinghui<sup>1</sup> Feng Wei<sup>2</sup> Lin Zunqi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> Shanghai Institute of Laser and Plasma China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

**Abstract** On the experiment of inertial confinement fusion, the success of implosion experiments is depended on the irradiation uniformity. In order to improve the uniformity of laser intensity, time smoothing technologies are always applied with spatial technologies. Technology of smoothing by spectral dispersion is one of the familiar time smoothing technologies, and spectral broadening is the core technology. To improve the effect of spectral broadening, a double-pass phase modulator which would meet the need of spectral broadening of technology of smoothing by spectral dispersion is designed instead of the old single-pass phase modulator. The matching condition under double-pass modulator is calculated theoretically, and a satisfying result is also attained in the experiment, so the feasibility of double-pass phase modulator is validated. Based on the above discussion, another idea of multiple-pass phase modulator is mentioned.

**Key words** laser physics; uniformity of laser irradiation; technology of smoothing by spectral dispersion; double-pass phase modulator; quasi velocity matching

### 1 引 言

在惯性约束聚变实验中, 靶面激光的辐照均匀性<sup>[1]</sup>是一个重要的技术参数, 因为靶面辐照不均匀不仅使达到聚变点火所需的激光能量增加, 而且会引起诸如瑞利-泰勒不稳定性等多种等离子体不稳定性。为此, 发展了多种靶面均匀辐照技术, 其中包

括透镜列阵法<sup>[2]</sup>、随机相位板法<sup>[3]</sup>、诱导空间非相干法<sup>[4]</sup>、部分相干光法<sup>[5]</sup>以及光谱色散平滑等<sup>[6,7]</sup>。

在光谱色散平滑技术中, 相位调制及频谱展宽技术是其核心单元环节, 相应的高频块状电光相位调制器是核心器件。在其工作过程中, 如果微波和光波的速度完全匹配, 那么调制器的调制度随晶体

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-06-15

基金项目: 国家 863 计划(2008AA804604)资助课题

作者简介: 张琥杰(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光光束匀滑方面的研究。E-mail: zhanghujie@ustc.edu

导师简介: 林尊琪(1942—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

长度增加而成比例地增大。但在通常情况下,微波的速度不完全等于光波的速度。当光入射晶体时,首先受到微波的正向电场调制,在传播一段距离后,由于速度失配,光波开始受到微波的负向电场调制,并导致调制度的下降。因此,在速度失配的情况下,调制度存在一极限值。

为解决这个问题,提出了畴反转结构下的调制器<sup>[8]</sup>,通过高压极化晶体的办法使得电光晶体特定区域的晶轴方向反转,从而使调制度随晶体长度增加而增大。但是制作该类型调制器对工艺水平要求极高,并且畴反转后的晶体光学质量较差,这成为制造畴反转调制器进一步提高的瓶颈。本文采用传统的腔式调制器结合双程通光调制的方法来提高电光调制器的调制度,以满足光谱色散平滑技术的要求。

## 2 理论分析

理论上,若微波和光波的传播速度完全一致,只

要有足够长的传输距离和一定的微波功率,就可以得到足够宽的频谱展宽。但是目前广泛采用的基地材料如铌酸锂、钽酸锂,对频率相差较大的光波和微波,存在着不同的介电常数,导致这两种波的传播速度不同。这样,调制度并不会随着调制器长度的增加而一直增大,而是存在一个极限值。

在单通的腔式调制器<sup>[9]</sup>中设光波与微波沿晶体  $x$  方向传播, $t$  时刻晶体的折射率变为

$$n = n_e + n_m \cos[\omega_m(t - x/V_m)], \quad (1)$$

式中  $n_e$  为未加电场时的折射率, $n_m$  为折射率变化的振幅, $\omega_m$  为所加调制微波的频率  $V_m$  为微波在晶体中的群速度,那么时间  $t_0$  时刻光波入射到晶体,晶体中光波的群速度为  $V_0$ ,则  $x/V_0$ s 后,光波到达  $x$  的位置,此时折射率为

$$n = n_e + n_m \cos\left\{\omega_m\left[t_0 + \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_m}\right)x\right]\right\}. \quad (2)$$

若  $\lambda$  为光波在真空中的波长,那么光波在晶体传播  $x$  距离的相位改变量为

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^x n dx = \frac{2\pi}{\lambda} n_e x + \frac{2\pi n_m}{\lambda} \frac{1}{\omega_m(1/V_m - 1/V_0)} \left\{ \sin\left[\omega_m\left[t_0 + \left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)x\right]\right] - \sin\omega_m t_0 \right\} = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_e x + \frac{2\pi n_m}{\lambda} \frac{2}{\omega_m(1/V_m - 1/V_0)} \sin\left[\frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)x\right] \cos\left[\omega_m t_0 + \frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)x\right] = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_e x + \delta_0 \cos\left[\omega_m t_0 + \frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)x\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $|\delta_0| = \left| \frac{2\pi n_m}{\lambda} \frac{2}{\omega_m(1/V_m - 1/V_0)} \sin\left[\frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)x\right] \right|$  为调制度。

通常情况下,  $V_m \neq V_0$ , 因此,单通的调制度并不随  $L$  的增加而单调增加,而是呈正弦变化,并存在一个最优长度及极限调制度。对于一个晶体长度为  $L$  的电光调制器,它的调制度对应为

$$\frac{2\pi n_m}{\lambda} \cdot \frac{2}{\omega_m(1/V_m - 1/V_0)} \sin\left[\frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)L\right].$$

因此,利用双通的调制器结构克服速度失配带来的调制度损失。

图 1 所示为双通调制器的结构示意图,入射激光经偏振反射镜 M1 反射后经过  $45^\circ$  法拉第旋光器及电光调制器,再由全反镜 M2 反射,原光路返回电光调制器及法拉第旋光器,在此方式下,相位调制器

两次对光束作用,在偏振反射镜 M1 处透射。

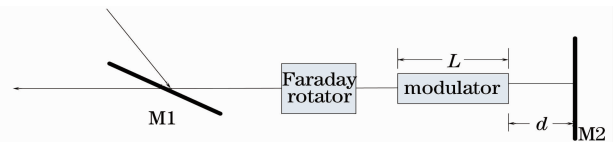


图 1 双通调制器结构示意图

Fig. 1 Scheme of the two-pass phase modulator

该设计通过一个反射镜使光束两次通过电光晶体,调节电光晶体到反射镜的距离使得第一次通过时光波与微波的速度失配得到补偿,从而达到双倍调制度的效果。

设调制器到反射镜的匹配距离为  $d$ ,可以得到此时光波的相位改变量为

$$\theta' = \frac{2\pi}{\lambda} n_e L + \delta_0 \cos\left[\omega_m t_0 + \frac{\omega_m}{2}\left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0}\right)L\right] + \frac{2\pi}{\lambda} n_0 2d + \frac{2\pi}{\lambda} n_e L +$$

$$\begin{aligned} & \delta_0 \cos \left[ \omega_m \left( t_0 - \frac{L}{V_0} - \frac{2d}{c} \right) + \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right) L \right] = \\ & \frac{4\pi}{\lambda} n_c L + \frac{4\pi}{\lambda} n_0 d + \delta_0 \left\{ \cos \left[ \omega_m t_0 + \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right) L \right] + \cos \left[ \omega_m \left( t_0 - \frac{L}{V_0} - \frac{2d}{c} \right) + \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right) L \right] \right\} = \\ & \frac{4\pi}{\lambda} n_c L + \frac{4\pi}{\lambda} n_0 d + 2\delta_0 \cos \left[ \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{L}{V_0} + \frac{2d}{c} \right) \right] \cos \left[ \omega_m \left( t_0 - \frac{L}{2V_0} - \frac{d}{c} \right) + \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right) L \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

由上式可以得到双通调制器的调制度

$$|\delta| = 2 \left| \delta_0 \cos \left[ \frac{\omega_m}{2} \left( \frac{L}{V_0} + \frac{2d}{c} \right) \right] \right|, \quad (5)$$

其中  $d$  为电光晶体与反射镜的距离, 此调制度是关于匹配距离  $d$  的函数, 且随  $d$  值呈余弦变化。当满足  $\frac{\omega_m}{2} \left( \frac{L}{V_0} + \frac{2d}{c} \right) = m\pi$  时调制度最大, 此时  $d = \frac{cm\pi}{\omega_m} - \frac{cL}{2V_0}$

当  $\frac{\omega_m}{2} \left( \frac{L}{V_0} + \frac{2d}{c} \right) = (m+0.5)\pi$  时, 调制度为 0。

由(5)式可以得到调制度与匹配距离的关系曲线如图 2 所示:

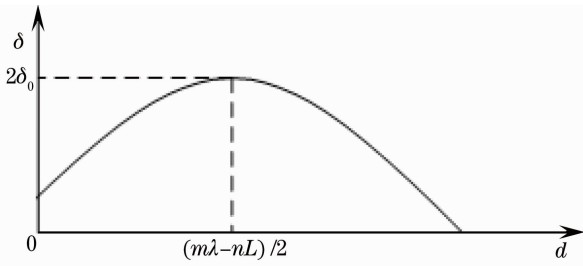


图 2 调制度与匹配距离曲线

Fig. 2 Graph of modulator depth with matching length

如图所示, 调制度是以正弦形式变化的, 在紧贴情况 ( $d=0$ ) 下, 调制度存在一个初始值。随着调制器与反射镜间距的增加, 调制度逐渐增大, 在完全匹配时到达峰值; 继续增大距离, 调制度由于速度失配开始减小, 并在完全失配处下降到零值。

而且从图中可以看出, 调制度在峰值附近对距离变化不敏感, 而在底部非常显著。这使得很难精确地直接寻找出最佳调制位置。可以先寻找到精确

消调制的距离, 然后推算出相位匹配的位置。

另外, 还可以从另一种更为直观的角度寻找到匹配距离<sup>[10]</sup>。补偿速度失配就是要让光波两次通过电光晶体时微波的位相情况一致。由于微波在调制器内是驻波分布, 晶体两端的微波相位情况是相同的, 这就只需要保证在光波两次进入晶体的这段时间, 正好是微波周期的整数倍。

在上述系统中, 光波经过的光程为  $nL + 2d$ , 时间为  $(nL + 2d)/c$ 。微波的周期为  $1/f$ , 其中  $c$  为真空中的光速,  $f$  为微波的调制频率。

当

$$(nL + 2d)/c = m/f, \quad (6)$$

则满足匹配条件。

由(1)式可得

$$d = (m\lambda - nL)/2, \quad (7)$$

$$d' = [(m+0.5)\lambda - nL]/2, \quad (8)$$

其中  $d$  是满足双通下的匹配距离,  $d'$  是双通情况下完全失配的距离。

### 3 实验结果

实验装置<sup>[11,12]</sup>如图 3 所示, 通过偏振反射镜 M1 将主激光反射进入光路系统, 光束依次通过  $45^\circ$  法拉第旋光器及电光调制器, 之后经全反镜 M2 反射原路返回, 再依次通过电光调制器及法拉第旋光器。光束两次通过电光调制器, 同时两次通过  $45^\circ$  法拉第旋光器, 偏振态转变  $90^\circ$ , 经偏振反射镜 M1 透射而出。在后端在  $45^\circ$  加入了一个法布里-珀罗 (F-P) 腔, 并通过 CCD 观察光谱展宽的效果。

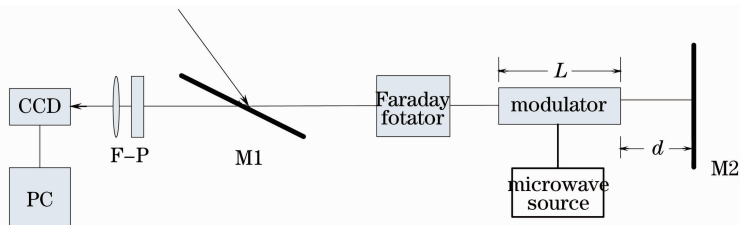


图 3 实验排布图

Fig. 3 Scheme of experiment

实验中,采用的微波调制频率为 3.3 GHz,此频率微波在真空中的波长约为 9.09 cm,使用的块状电光调制器的电光晶体<sup>[9]</sup>是微量掺 MgO 的 LiNbO<sub>3</sub>,取折射率  $n$  为 2.2 附近,晶体长度  $L$  为 2.4 cm 附近,由(2)式计算,需要的  $d$  值为 2.4 cm。

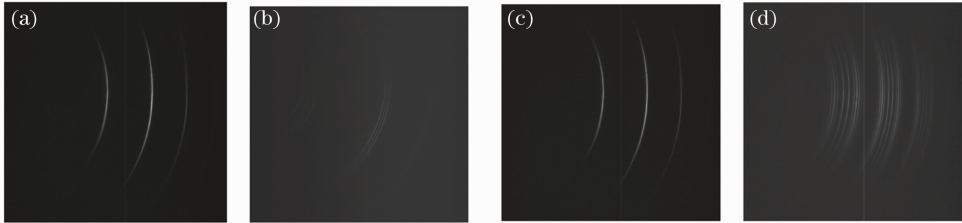


图 4 频谱展宽效果图。(a)无微波调制;(b)单程调制;(c)最佳消调制;(d)最佳调制

Fig. 4 Photo of expanded spectrum. (a) without micromwave modulate;(b) single-pass modulation;(c) optimal demodulation;(d) optimal modulation

图 4(c)中,调制器距离反射镜 4.8 cm,为消调制状态;图 4(d)中,调制器距离反射镜 2.6 cm,和之前的理论计算结果吻合较好。实际上,在图 4(d)的距离附近,调制效果随距离的变换并不明显,大概在此基础上偏离 $\pm 0.2$  cm 才能肉眼分辨出区别。

同时,可以看出,单程调制的情况下,单侧边频数在 2~3 之间,而改进的双通调制器边频数可以达到 5,基本满足实验的要求。

## 4 讨 论

以上讨论了改进的双通调制器,从理论上分析了微波与光波的匹配条件,并在实验上得到了理想的结果。为了使调制度进一步提高,可以将双通调制器改进为多通调制器,如图 5 所示。

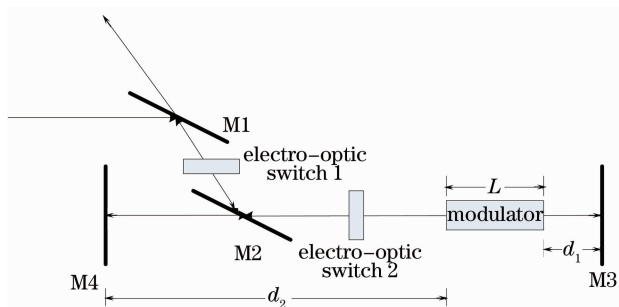


图 5 多通调制器结构示意图

Fig. 5 Scheme of the several-pass phase modulator

如图 5,在双通调制器的基础上,在其左侧再加入一个全反镜 M4,和右侧的反射镜共同形成一个谐振腔,激光在腔内多次通过调制器,并将双通情况下的法拉第旋光器替换成一个电光开关,另外,在两个偏振反射镜 M1, M2 之间也加入一个电光开关。

由(7)式,(8)式可得  $d' - d = \lambda/4 \approx 2.25$  cm,即可以把调制器在相位完全失配处向反射镜方向移动 2.25 cm 找到相位完全匹配的位置。

CCD 探测到的频谱展宽如图 4 所示。

入射激光经偏振反射镜 M1 反射进入光路系统,此时电光开关 1 不打开,激光又偏振反射镜 M2 反射进入谐振腔结构,电光开关 2 此时打开一次,使得激光的偏振态转变  $90^\circ$ ,在两个全反镜 M3, M4 形成的谐振腔间多次反射来回通过电光调制器。在需要取出该激光时,同时打开电光开关 1, 2, 这样激光通过电光开关 2 时偏振态转变  $90^\circ$ ,由 M2 反射后经过电光开关 1,偏振态再次转变  $90^\circ$ 经 M1 透射而出回到主光路。

为满足激光和微波的速度匹配,类似双通情况下的,  $d_1, d_2$  需要满足

$$nl + 2d_1 = m_1\lambda, \quad (9)$$

$$nl + 2d_2 = m_2\lambda. \quad (10)$$

在  $N$  通调制的情况下( $N$  必须为偶数),在匹配情况下所能达到的最大调制度  $\delta_N = N|\delta_0|$ 。

在多通情况下,由于把被动的法拉第旋光器替换成主动地电光开关,如何精密控制电光开关的工作时间是多通调制的主要问题。

## 5 结 论

由于在电光调制器中光波与微波存在速度失配问题,调制度不能随电光晶体长度的增加单调增加,存在一个理论的极限调制度,制约了光谱色散平滑技术中的频谱展宽效果。为了克服这个极限值,采用了双通调制器的技术,先从理论上寻找出双通情况下的匹配条件,并在实验上实现了双通的调制效果,再进一步分析了将双通改进到多通情况的匹配条件。实验表明了利用该方法提示电光调制器的调制度的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 S. Skupsky, K. Lee. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7): 3662~3674
- 2 X. Deng, X. Liang, Z. Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~381
- 3 Y. Kate, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11): 1057~1060
- 4 R. H. Lehmborg, S. P. Obenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Opt. Commun.*, 1983, **46**(1): 27~31
- 5 H. Nakano, N. Miyanaga, K. Yagi *et al.*. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd:glass laser system[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(5): 580~582
- 6 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 7 Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 341~345  
周申蕾,林尊琪,朱 俭 等. 谱色散匀滑的计算研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 341~345
- 8 Chen Lijun. Study on Fiber Nonlinear Laser[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University. 2005  
陈理军. 光纤非线性激光器的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005
- 9 Guo Fengzhen, Yu Changtai, Wang Wei. A novel type of electro-optic modulator suitable for THz-width sidebands generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 935~938  
郭风珍,于长泰,汪 伟 等. 用于产生太赫超宽边带光谱的新型电/光调制器[J]. 光学学报, 1995, **15**(7): 935~938
- 10 T. F. Gallaher, N. H. Tran, J. P. Watjen. Principles of a resonant cavity optical modulator[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(4): 510~514
- 11 Zhou Shenlei. The Technology of Smoothing by Spectral Dispersion[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics  
周申蕾. 光谱色散平滑技术的研究[D]. 上海:上海光学精密机械研究所. 2006
- 12 Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun *et al.*. Experimental study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 321~325  
周申蕾,朱 俭,李学春 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 321~325