

# 一种新型高时间分辨的光扫描装置设计

魏惠月<sup>1</sup> 徐涛<sup>1</sup> 王峰<sup>1</sup> 彭晓世<sup>1</sup> 韦欣<sup>2</sup> 刘慎业<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)  
<sup>2</sup> 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要** 在惯性约束聚变(ICF)研究中,为了更好地对点火前分解实验的精密时间过程进行高精度的测量,提出一种新型的高时间分辨的光扫描装置。该装置根据光生载流子效应、波导传输和棱镜色散原理,采用全光学元件避免了空间电荷效应的影响。同时,瞄准 1 ps 的时间分辨能力,对该装置的关键部件光扫描模块进行了计算设计与模拟分析,通过光路仿真进行验证。结果表明该扫描装置能够使信号光发生偏转效应得到时间-空间转换,进而为下一步的模块制作和实验研究提供良好的理论依据。

**关键词** 光学器件;高时间分辨;光扫描;光生载流子;棱镜色散

**中图分类号** TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0823003

## Designment of a Novel Optical Streak Camera with Ultrahigh Temporal Resolution

Wei Huiyue<sup>1</sup> Xu Tao<sup>1</sup> Wang Feng<sup>1</sup> Peng Xiaoshi<sup>1</sup> Wei Xin<sup>2</sup> Liu Shenye<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)  
<sup>2</sup> *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract** For more precise measurements of the temporal evolution of plasma in the study of inertial confinement fusion (ICF), a novel optical streak camera with ultrahigh temporal resolution is proposed. Based on the photo-generated carrier effects, waveguide transmission and prism dispersion principle, this all-optical device can avoid the influence of the space charge effect. Then the key component in the camera, the optical scanning module, is designed and simulated through an emulator aiming at 1 ps time resolution capability. Results show that this module can deflect the signal light and transform the information it contains from time domain into space domain, which verifies the feasibility of such system and its benefits for the following experiments.

**Key words** optical devices; ultrahigh temporal resolution; optical scanning; photo-generated carrier; prism dispersion

**OCIS codes** 230.1150; 230.7390; 320.5390; 320.7100

## 1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)研究中,点火的持续过程非常短,约为百皮秒量级,但却非常复杂。为了更好地研究激光与物质相互作用、束能量的吸收、等离子体加热和压缩过程、靶丸的内爆动力学等相关的基础性课题,超高时间分辨的诊断技术变得尤为重要<sup>[1]</sup>。同时,只有对点火前分解实验的时间过程进行高精度的测量才能够做到对点火过程的高精度控制。条纹相机是一种高灵敏、高时空分辨的诊断工

具,在惯性约束聚变实验中具有不可替代的作用<sup>[2-3]</sup>。传统条纹相机都是利用电子光学系统加扫描电压的方式将时间信号转换为空间位置信息,从而进行高精度的时间记录。但是,空间电荷效应的存在导致了相机空间分辨率的限制,转换到时间轴也就是时间分辨率的限制<sup>[4-5]</sup>。就抗干扰技术而言,由于现有记录技术存在电子线路,在实际实验中的强 X 射线、中子和伽玛射线的干扰下,扫描电路会受到很强的干扰,从而影响信号判读。就相机本

**收稿日期**: 2013-01-17; **收到修改稿日期**: 2013-04-11

**基金项目**: 国家 863 计划、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0102020)

**作者简介**: 魏惠月(1984—),女,硕士,实习研究员,主要从事激光聚变光学诊断设备的设计和开发等方面的研究。

E-mail: why\_ji@126.com

身而言,强辐射对扫描相机系统有损伤,会影响设备的寿命。

综合以上需求和问题,本文根据光生载流子效应、波导传输和棱镜色散原理,提出一种新型的高时间分辨的光扫描装置。该装置采用全光学元件,避免了空间电荷效应的影响,可满足未来点火高精度诊断和恶劣工作环境的需要。光扫描模块是新型高时间分辨光扫描装置的重要组成部分,它在抽运激光作用后,芯层相应位置的折射率会发生微小的变化。此时,由于信号光会在波导芯层中多次传输,所以即使很小的折射率变化也会在波导中产生比较明显的偏转效果,可以利用光学偏转效应进行信号光携带信息的时间-空间转换<sup>[6-9]</sup>。瞄准 1 ps 的时间分辨能力给出了光扫描模块的模型结构与模拟设计,并对设计的光扫描装置进行了光学仿真。

## 2 高时间分辨的光扫描原理

光扫描模块是利用光生载流子能够改变半导体折射率这一性质工作的。一定波长的光照射到半导体材料上会被吸收,进而激发出电子-空穴对,使得半导体材料中的非平衡载流子增多。研究发现,当波导中的载流子浓度发生变化时(达到  $10^{18}$  以上)就会在相应位置引起比较明显的折射率变化<sup>[10-11]</sup>。因此,若在半导体材料上加一特殊结构的掩模板,那么可在半导体中得到所需结构的折射率变化。

新型高时间分辨的光扫描装置主要由三部分组成:耦合模块、光扫描模块以及记录系统。它的工作

原理与条纹相机类似,但是能够达到条纹相机所达不到的皮秒量级时间分辨,同时整个光扫描过程只有光参与作用,避免了空间电荷效应的影响。该装置的光扫描模块由特殊结构的半导体平面光波导与金属掩模板组成,其工作原理如图 1 所示。半导体平面光波导的上包层镀有由一系列周期排布的小直角三角形组成的掩模板。一旦信号光耦合进入平面光波导的芯层中,抽运光即从平面光波导的正上方均匀垂直照射在金属掩模板上。由于波导上包层受到一系列直角三角形掩模板的阻挡,抽运光只在未受阻挡的芯层中激发出光生载流子,并在小于皮秒的时间间隔内产生折射率变化,从而在芯层中产生一系列相应的直角棱镜阵列<sup>[12]</sup>。这样折射率变化的芯层就有了三角棱镜的折光效果。对于此时在芯层中的信号光,由于要离开波导所需要传播的距离不同,所以它们所经过的棱镜个数不同,其偏转角也就不同。先进入芯层的前部分信号光经过的棱镜数目少,发生的偏转角相对小,后进入芯层的后部分信号光经过的棱镜数目多,其发生偏转的作用也就大,也就是说,信号光的偏转程度与其在芯层中经过的棱镜数目成正比。发生偏转的信号光再由记录系统接收,即可得到在空间上放大的时间信号。抽运光消失后,折射率的回复时间为纳秒量级,远大于皮秒量级的信号光通过棱镜阵列的时间。因此可认为信号光通过时折射率为抽运光激发之后的折射率,且通过过程中折射率不发生改变。

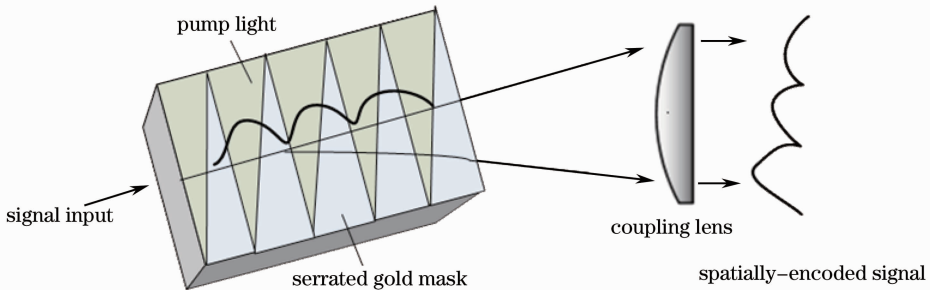


图 1 偏转原理图

Fig. 1 Schematic diagram of deflection

## 3 高时间分辨的光扫描模型

### 3.1 扫描模块结构设计

由光扫描装置的工作原理可知,合理地选择平板波导结构的芯层和包层材料以及它们的厚度是器件工作的关键。对于材料和厚度的选择,从抽运光角度考虑,包层材料应不吸收或尽可能少吸收抽运

光,芯层材料对抽运光应有合理的吸收。如果芯层材料的吸收太强,使芯层下部分得不到足够的抽运光,会导致芯层在垂直于波导平面方向也产生折射率差,进而使信号光在垂直方向发生偏折,影响测量的精度。因此,在光扫描装置设计时应使芯层材料对抽运光的穿透深度与芯层的厚度基本一致。从信

号光角度考虑,一方面包层材料和芯层材料都应不吸收信号光,另一方面包层材料对信号光的折射率应小于芯层材料,同时包层的厚度应大到足够把信号光限制在芯层中,芯层应有足够的厚度,使信号光能低损地在芯层中传播,但是也不能太大,否则会使信号光产生多横模传输。

选用载流子迁移率较高的 GaAs 材料制作光扫描模块。新型光扫描装置整个扫描过程为百皮秒量级,而 GaAs 载流子复合时间为纳秒量级,完全能够满足光扫描的要求。根据实验室现有短脉冲激光器,以  $0.532 \mu\text{m}$  作为抽运光,  $0.78 \mu\text{m}$  作为信号光,对光扫描装置中的扫描模块进行设计。改变 GaAs 材料的掺杂浓度,以实现抽运光不被包层吸收,而在芯层中体吸收。对  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  材料,折射率  $n$  随 Al 组分  $x$  的变化关系由实验得出:

$$n = 3.590 - 0.710x + 0.091x^2. \quad (1)$$

平面光波导制作时通过模拟计算选用  $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$  材料作为芯层,则根据(1)式可得平面光波导芯层的折射率为 3.3,因此信号光在芯层中的速度可近似为  $v_g = c/n = 0.91 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。信号光通过抽运光照射区域所需的时间即为系统的记录时间  $T$ ,平面光波导的长度与掩模板的长度为  $Z = Tv_g$ 。由光扫描模块输出的信号光的最大偏转角为  $\theta = N\theta'\Delta n$ ,其中  $N$  为芯层中产生的棱镜数目(即为掩模板中三角形的个数), $\theta'$  为三角形的顶角值, $\Delta n$  为芯层的有效折

射率变化值。当棱镜的直角边长为  $L$  时,棱镜数目  $N \approx Z/(L\theta')$ 。系统的角分辨率  $\delta\theta \approx \lambda/L$ ,则可分辨的点为  $N' = \theta/\delta\theta \approx \Delta nZ/\lambda$ ,由此可知时间分辨为  $\tau = T/N' = \lambda/(v_g\Delta n)$ 。设该装置的理想时间分辨率为 1 ps,平面光波导中芯层的有效折射率变化为  $\Delta n = \lambda/(v_g\tau) = 0.0086$ 。设整个光扫描的记录时间为 132 ps,则平面光波导的长度为 12 cm。掩模板中三角形底边  $L$  的长度为微米量级,一方面它可以减少进入芯层中的抽运光能量,同时也可以在芯层中产生足够的棱镜阵列。另外,因为信号光经过波导芯层不被吸收,所以结合  $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}$  材料的性质,以及记录系统(实验中采用光束分析相机)可接受的波长范围,该器件能够检测的单波长范围是  $750 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$ 。

### 3.2 扫描模块结构模拟

平面光波导芯层厚度的确定是光扫描模块的另一难点。通过计算分析可知,由于抽运光波长较短,包层很难不吸收抽运光,但是当 Al 组分  $x$  达到 0.8 时,对于  $1 \mu\text{m}$  的包层,吸收可以忽略。设平面光波导上包层材料为  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ,厚度  $d_1 = 1 \mu\text{m}$ ;下包层材料为  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ,厚度  $d_3 = 2.73 \mu\text{m}$ ,对芯层内光传输情况进行了模拟研究。由于 TE 模与 TM 模的光在平面波导中的传播略有不同,以下的模拟都设定为 TE 模,模式的计算基于传输矩阵法。图 2 为模式分析图,上半部分折线为折射率分布曲

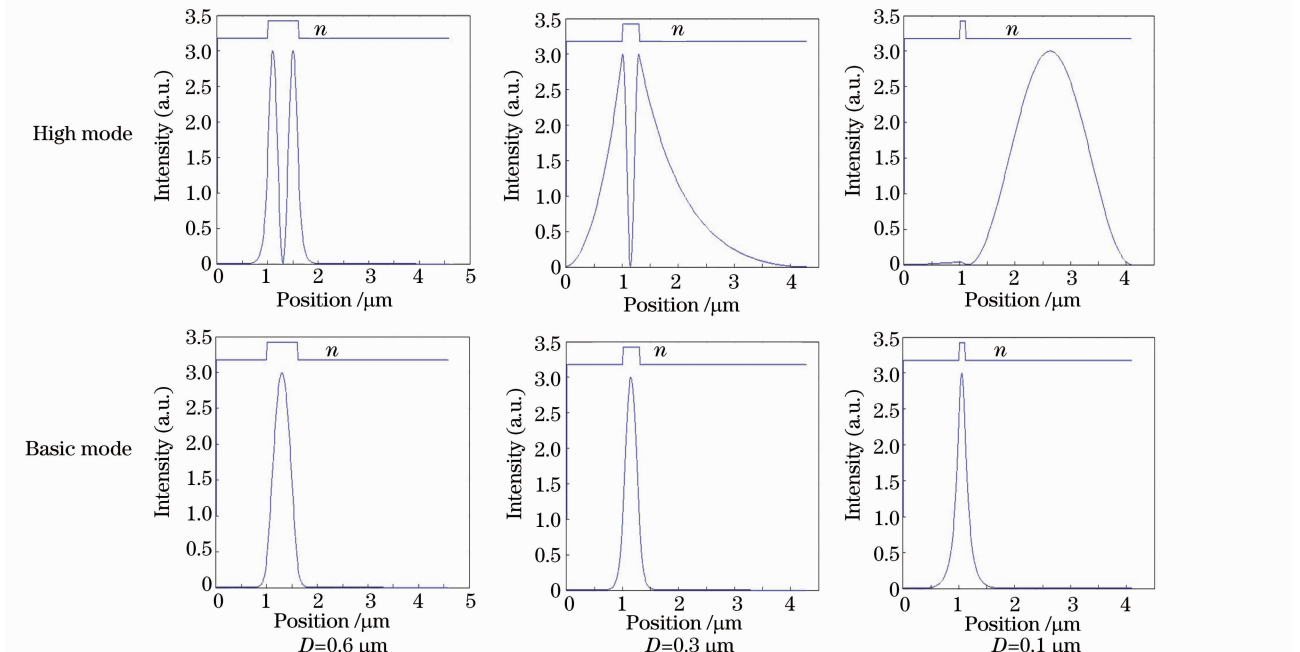


图 2 不同芯层厚度下的模式分布情况

Fig. 2 Mode distribution for different core layer thicknesses

线(较高的折射率部分表示芯层),下半部分曲线为光强分布曲线。从图中可以看到当厚度  $D=0.6\ \mu\text{m}$  时,信号光能够低损传输,而且信号光的一阶模与基模均能够稳定存在即光主要限制在包层中;而当芯层厚度减至  $0.3\ \mu\text{m}$  甚至  $0.1\ \mu\text{m}$  时,芯层的传输损耗增大,只有基模能够稳定传输,没有一阶模的存在。由于材料折射率差较小,所以对光的限制减弱,导致了一阶模不能稳定存在,而且同时会带来传输效率

较低的缺点。因此,光扫描模块中平面光波导芯层厚度最终确定为  $0.6\ \mu\text{m}$ 。

为进一步验证通过棱镜阵列实现时间-空间转换方法的可行性,对有无棱镜阵列两种情况的平面光波导进行了仿真研究,光路如图 3 所示,一束平行光由光源 S 发出经过柱面镜 L1 耦合输入至光波导 G 中,信号光通过平面光波导的芯层后经柱面镜 L2 耦合输出,最后经透镜 L3 后会聚。

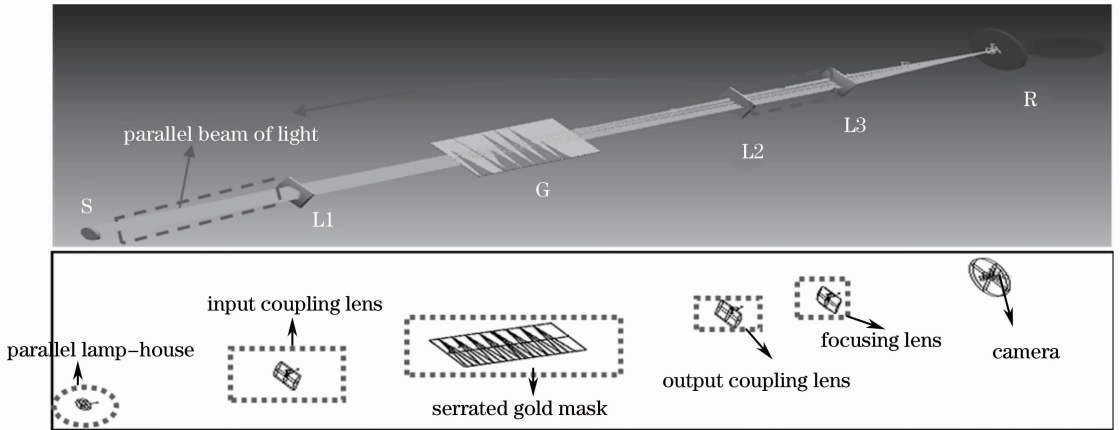


图 3 光扫描装置光路仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of the optical scanning device

当会聚透镜 L3 的焦距为  $24\ \text{mm}$ ,经过的棱镜数目为 8 个,波导中棱镜与波导芯层折射率差约为  $0.006$  时,如图 4 所示,最终在像面上得到的信号光相对无棱镜时偏移  $0.2\ \text{mm}$ 。而光扫描装置中不同

时刻的信号光经过的棱镜数目与时间成正比,结合仿真可知,由扫描模块输出的不同时刻的信号光的偏转量也与时间成正比,因此光扫描装置通过棱镜阵列将时间信号转换成空间信号的方法是可行的。

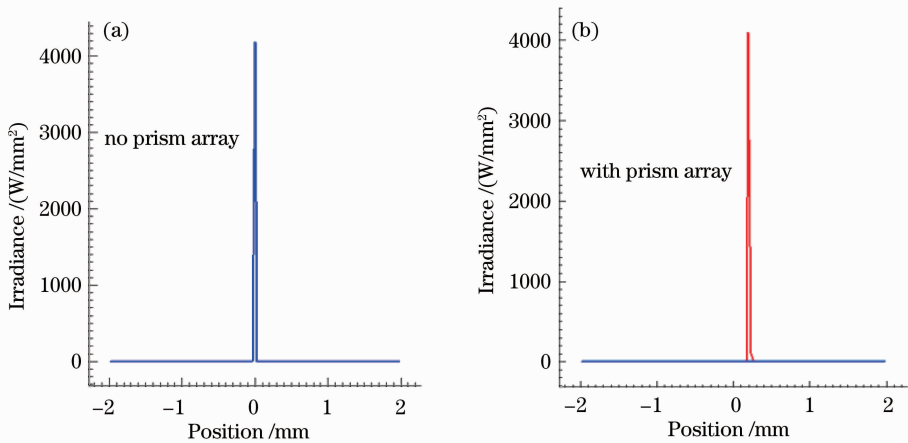


图 4 棱镜阵列导致信号光偏转的情况

Fig. 4 Signal light deflection caused by prism array

## 4 结 论

根据光生载流子效应、波导传输和棱镜色散原理,提出一种新型的高时间分辨的光扫描装置。分析了该装置的全光学元件进行光扫描的基本理论。

光扫描模块是新型高时间分辨光扫描装置的关键组成部分,重点介绍了该模块的结构设计的依据以及不同芯层厚度时信号光的模式分布情况,并最终确定了芯层的最佳厚度。根据光扫描模块工作原理,

对有无棱镜阵的列情况进行光学仿真,结果表明该扫描方法能够使信号光发生偏转,实现时空转换,为下一步的模块制作与实验研究提供良好的理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 Hu Xin, Jiang Shaoen, Cui Yanli, *et al.*. A time resolved three channel soft X-ray spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(3): 1447-1451.  
胡 昕, 江少恩, 崔延莉, 等. 一种时间分辨三通道软 X 射线光谱仪[J]. *物理学报*, 2007, 56(3): 1447-1451.
- 2 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin, *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0404001.  
程书博, 张惠鸽, 王哲斌, 等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0404001.
- 3 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Xu Tao, *et al.*. Study on time characteristics of fast time response plastics scintillator EJ-232 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1216001.  
彭晓世, 王 峰, 徐 涛, 等. 快响应塑料闪烁体 EJ-232 的时间特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1216001.
- 4 Tian Jinshou, Zhao Baosheng, Wu Jianjun, *et al.*. Transfer property of electron pulse in a femto-second electron diffraction system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 123-128.  
田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 电子脉冲在飞秒电子衍射系统中的传输特性[J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 123-128.
- 5 Yuan Yongteng, Hao Yidan, Zhao Zongqing, *et al.*. Dynamic range of X-ray streak camera affected by space charge effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 6963-6968.  
袁永腾, 郝轶聃, 赵宗清, 等. 空间电荷效应对 X 射线条纹相机动态范围影响的研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 6963-6968.
- 6 L Friedrich, G I Stegeman, P Millar, *et al.*. Dynamic, electronically controlled angle steering of spatial solitons in AlGaAs slab waveguides [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(18): 1438-1440.
- 7 S Hisatake, K J Tada, T D Nagatsuma. Linear time-to-space mapping system using double electrooptic beam deflectors [J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 21753-21761.
- 8 Gong Renxi, Zhang Yimen, Shi Shunxiang, *et al.*. A new analytical model for optically controlled photoconductive semiconductor switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 101-105.  
龚仁喜, 张义门, 石顺祥, 等. 一种新型的光控光导半导体开关解析模型[J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 101-105.
- 9 S. Hisatake, T Kobayashi. Time-to-space mapping of a continuous light wave with picosecond time resolution based on an electrooptic beam deflection [J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 12704-12709.
- 10 Qi Wei. Study of GaAs-Based Carrier Injection Type Optical Switch [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 25-30.  
戚 伟. 砷化镓载流子注入型光开关的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 25-30.
- 11 Chen Kejian, Yang Ailing, Jiang Xiaoqing. The analysis of model of the change in refractive index of semiconductor induced by photo-induced carriers [J]. *Optical Instruments*, 2002, 24(4): 34-38.  
陈克坚, 杨爱龄, 江晓清. 光生载流子对半导体波导材料折射率影响的模型研究[J]. *光学仪器*, 2002, 24(4): 34-38.
- 12 L Sun, J H Kim, C H Jang, *et al.*. Polymeric waveguide prism-based electro-optic beam deflector [J]. *Opt Eng*, 2001, 40(7): 1217-1222.

栏目编辑: 韩 峰