

光寻址空间光调制器研制进展及性能测试

黄大杰, 范薇, 张攀政, 李菁辉, 唐顺兴, 郭亚晶, 李学春, 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

摘要: 报道了自研的光寻址空间光调制器的最新进展, 介绍了器件工作原理与结构, 并对其光敏响应特性曲线、静态位相波前畸变、透射时间波形畸变的离线测试结果进行了报道, 同时也利用该器件在高功率激光装置上进行了在线测试。结果表明, 该调制器可以根据需求实现所需的强度透过率分布, 而且对高功率激光系统没有引入附加的影响。最后, 结合该调制器的实际使用环境, 分析了激光系统空间滤波器对整形效果的影响, 说明在高功率激光系统中使用该调制器时, 空间滤波器尺寸也是决定光束整形精度的重要因素。

关键词: 光束质量; 光寻址; 液晶; 空间光调制器

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0920001

Development progress and performance test of optically addressed spatial light modulator

Huang Dajie, Fan Wei, Zhang Panzheng, Li Jinghui, Tang Shunxing, Guo Yajing, Li Xuechun, Lin Zunqi

(Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The development of the optically addressed spatial light modulator (OASLM) was reported. Its structure and working principle was introduced in detail. Meanwhile, the photosensitive response curve, static wave-front distortion and temporal waveform distortion was investigated in detail in the process of experiment. Besides, OASLM was successfully demonstrated in the online experiment. The results show that OASLM not only has the ability to achieve the desired transmittance distribution, but also has no additional effect on the high-power laser system. Finally, the shaping effect of spatial filter in the laser system was analyzed. The result shows that the size of spatial filter was also an important factor which determined the shaping precision when this device was used in high power laser systems.

Key words: beam quality; optically addressed; liquid crystal; spatial light modulator

收稿日期: 2016-01-17; 修订日期: 2016-02-20

作者简介: 黄大杰(1986-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光光束质量控制方面的研究与器件研制。Email: hdajie@siom.ac.cn

通讯作者: 范薇(1975-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、放大器技术以及激光控制技术等方面的研究。

Email: fanweil@siom.ac.cn

0 引言

空间光调制器由于具有实时控制的功能,在光束空间整形、光束相位控制等方面得到越来越多的应用^[1-2]。而液晶空间光调制器作为一种最常见的调制器,通过利用液晶的电控双折射效应,对入射光的相位、振幅进行调制^[3]。该类型器件目前已实现商业化量产的主要有 TFT (Thin-Film-Transistor) 型透射式和 LCOS(Liquid-Crystal-on-Silicon)型反射式两种。TFT 型器件由于像素内部不透明电极及晶体管的影响,透过率很低(<10%),从而使其在很多场合的应用受到限制。而 LCOS 型器件由于利用了 CMOS 工艺将电极集成在反射面上,使其能量利用率大大提升,目前填充因子可以达到 90%以上,但由于这种器件的反射面上通常有多层膜结构,当用于对短脉冲调制时,容易引起光谱畸变等问题,而且作为一种反射式器件,使用时必须使光学系统的整体排布发生调整。光寻址空间光调制器可以设计为透射式器件,使用时只需直接插入到需要透过率调整的位置即可,而不会对原有的光路结构产生影响,从而使整体光路变得相对简单。这种调制器通过利用光导层的光电导特性,使电极分布可以实时控制,从而可以控制液晶层的电压分布。这种调制器作为一种透射式器件,同时具有很高的空间透过率。目前已在美国的 NIF、法国的 LMJ 等装置上得到应用,被用于实现损伤点“预屏蔽”、光束强度预补偿等功能^[4-5]。中国科学院上海光学精密机械研究所高功率联合室对此器件进行了跟踪研制,于 2012 年对自研的光寻址液晶调制器进行了首次报道^[6],并利用 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 连续光进行了相关测试。

文中主要介绍了该调制器的最新研制进展,对其进行了光、机、电集成化设计,使其成为一台实用化的仪器设备。通过对调制器的光敏响应曲线、静态透过波前畸变进行测试,并对其进行离线与在线的相关实验验证,表明该调制器对激光脉冲时间波形、远场焦斑形态不会引入额外的影响,同时也测试了该调制器的“预屏蔽”功能。

1 光寻址空间光调制器基本原理与器件结构

文中所述的调制器工作在“光寻址”模式,通过利用光导材料的光敏特性,可以有效避免“电寻址”器件的“黑栅”效应,以下结合图 1 对其工作原理进行说明:液晶层与光导层 BSO 晶体呈串联结构,交

流电压通过导电膜施加于两者之上。由于 BSO 晶体的光电导特性^[7-8],当照射其上的光敏光(所用光源为 470nm 蓝光 LED,对 BSO 晶体有较强的光电导效应)强度发生改变时,晶体的电阻会发生改变,从而引起液晶层分压的改变,因此通过控制照射在光导体上的光敏光强度分布,即可在液晶层上实现所需的电压分布,从而对 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 信号光的强度分布进行控制。与传统的透射式电寻址空间光调制器相比,该器件避免了不透明电极的使用,消除了“黑栅效应”,从而使器件的透过率得到很大程度的提升。而且,通过将产生“光寻址”作用的光导体直接作为液晶盒的基板之一,使器件的加工工艺变得相对简单,从而优化了器件在静态波前畸变方面的性能。因此,该光寻址器件在透过率、静态波前畸变方面具有一定优势。

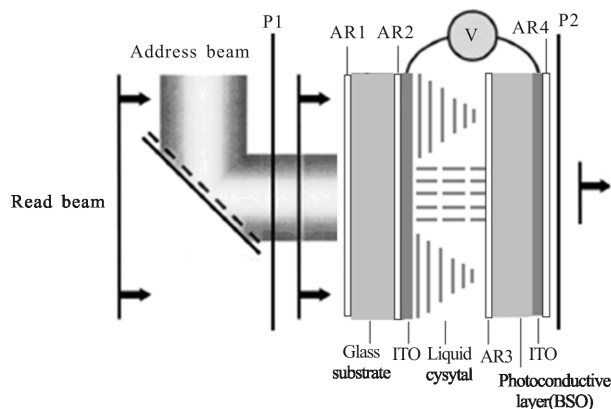


图 1 光寻址液晶空间光调制器工作原理

Fig.1 Working principle of the optically addressed liquid crystal spatial light modulator

目前已将光敏光控制系统与液晶光阀进行一体化设计,结构如图 2 所示, $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 信号光按图 3 中箭头所示方向通过该调制器。

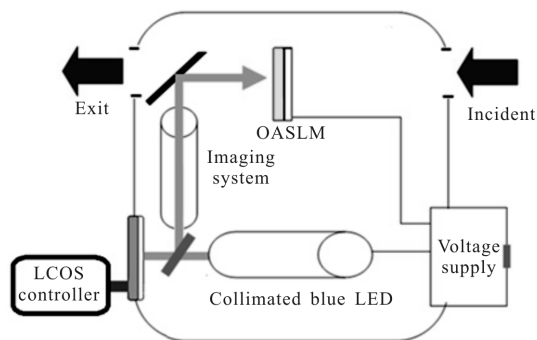


图 2 自研的集成化光寻址调制器内部结构图

Fig.2 Structure of the integrated optically addressed modulator

液晶光阀与光敏照明系统的驱动电压参数均可通过图 3 中的液晶显示屏进行设置, 控制器与电脑相连接, 通过控制电脑便能实现对 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 光强度分布的调节。

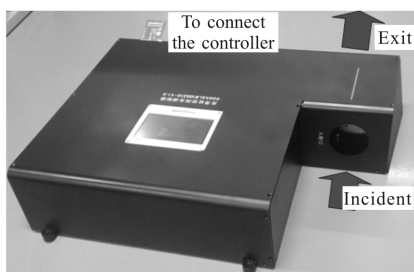


图 3 集成化光寻址调制器实物图

Fig.3 Picture of the integrated optically addressed modulator

2 调制器离线测试

由于该器件主要是通过调节 $\lambda=470\ \text{nm}$ 光敏光强度来实现对 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 信号光的透过率控制, 所以光敏光强度与器件透过率的对应关系直接决定控制精度, 图 4 是实测结果。

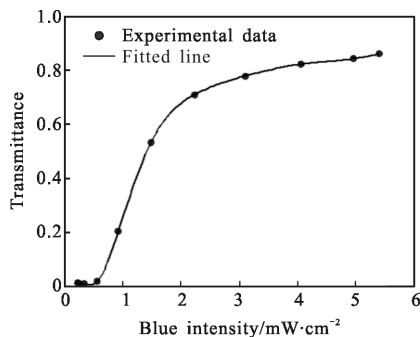


图 4 光寻址调制器的光敏响应曲线

Fig.4 Photosensitive response curve of the optically addressed modulator

由此图可知, 器件的最高透过率达到 85%, 开关比高于 50:1。

该调制器作为透射式元件使用时, 固有的静态透过波前畸变也是不容忽略的参数, 该参数将会影响调制器后方的光束质量。

结合图 1 可知, 玻璃与 BSO 晶体相互距离的精确控制直接决定调制器的整体透过波前畸变, 目前该距离是通过间隔子支撑两者的缝隙来实现的。所用的间隔子为直径 $4.0\ \mu\text{m}$ 的硅球, 通过压盒工艺实现了间隔子在边缘位置的均匀分布, 这也保证了器

件整体具有很小的透过波前畸变。经过测试发现, 该位相畸变对于高功率激光光束的影响几乎可以忽略, 利用 ZYGO 干涉仪的测试结果如图 5 所示。

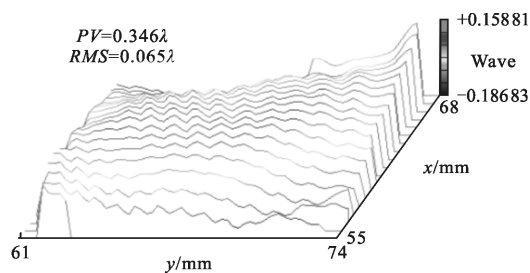


图 5 调制器的静态透过波前畸变

Fig.5 Static transmission wavefront distortion of the modulator

上述测试区域为 $12\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$, $PV=0.346\lambda$ ($\lambda=632\ \text{nm}$), 换算为信号光波长 $1\ 053\ \text{nm}$, 即为 $PV=0.21\lambda$ ($\lambda=1\ 053\ \text{nm}$)。作为一种透射性器件, 该波前畸变对入射光的影响是较小的。

又由图 1, 该调制器为多层介质结构, 不同介质表面的反射易引起幅频效应, 当入射光为脉冲光时, 就会引起脉冲光时间波形畸变, 通过对不同介质表面进行增透处理可以有效解决这个问题, 图 6 所示的测试结果表明该器件对脉冲光的时间波形没有影响。

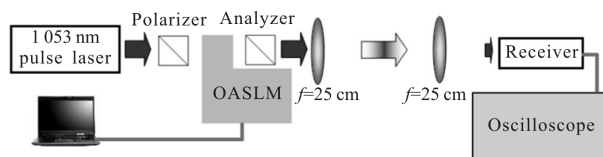


图 6 测试调制器透射光时间波形畸变的光路

Fig.6 Optical setup for measuring the time waveform distortion of transmitted light of the modulator

图中, OASLM (Optically Addressed Spatial Light Modulator) 即表示集成化的光寻址空间光调制器, 与图 3 对应。 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 脉冲光依次经过起偏器、OASLM、检偏器后, 经 1:1 像传递后, 经光纤耦合后输入至光电管 Receiver, 并由示波器测试光脉冲时间波形。

利用图 6 所示的光路分别对有、无 OASLM 时, 光电管 Receiver 接收到光脉冲时间波形进行对比, 测试结果如图 7 所示。

上述分别在离线情形下对自研的光寻址调制器进行了光敏响应特性曲线、静态位相波前畸变、透射

时间波形畸变等的测试, 结果表明该器件工作性能良好, 适用于 $\lambda=1\ 053\ \text{nm}$ 光的透过率分布控制。

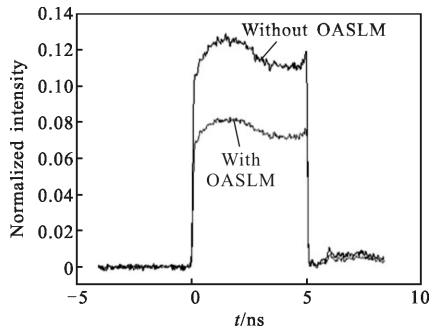


图 7 光路中有、无 OASLM 时的光脉冲时间波形对比

Fig.7 Time waveform comparison of the light pulse with and without OASLM in the light path

3 调制器在线测试

在线测试的光路结构如图 8 所示, 调制器位于 SF1 注入端前方, 软边光阑之后。通过设置调制器的透过率分布, 控制注入光的近场强度分布。由于预放段输出的激光已经是线偏振光, 而光路中的法拉第隔离器内均具有偏振器, 故在图中对偏振器并未作另外注释。

图中的光束质量测试系统 “Beam Quality Diagnostic System” 主要用于对输出光的近场、远场及时间波形进行测试。

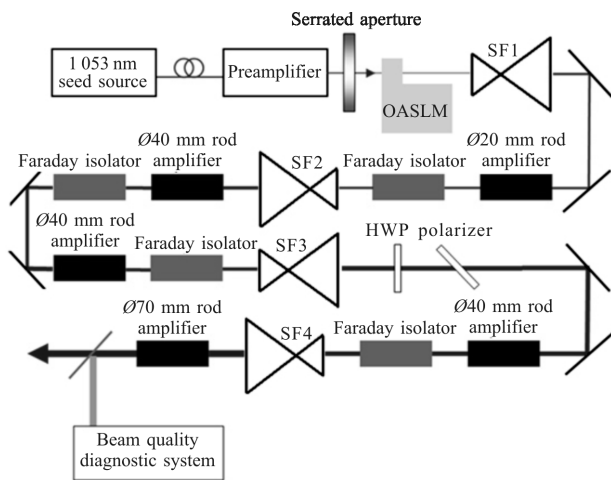


图 8 包含光寻址空间光调制器的高功率激光系统

Fig.8 High-power laser system schematic which contains OASLM

首先需要对插入光寻址调制器后, 静态情形下 (未开放大器) 输出光的远场分布进行测试, 以便对

调制器可能引入的附加位相畸变进行判断, 从而对该调制器用于高功率激光系统的可行性进行判断。对比测试结果如图 9 和图 10 所示。

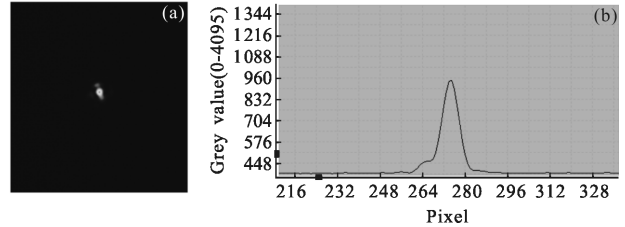


图 9 系统中未插入光寻址调制器时, 输出光的远场强度分布

Fig.9 Far-field intensity distribution of the output light when the system contains no OASLM

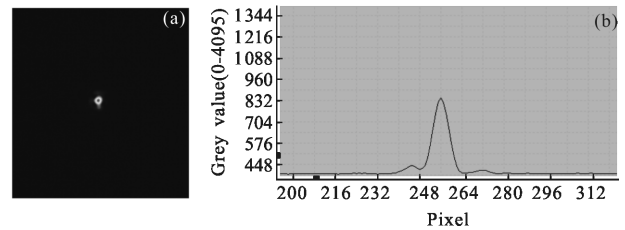


图 10 系统中插入光寻址调制器时, 输出光的远场强度分布

Fig.10 Far-field intensity distribution of the output light when the system contains OASLM

然后, 使图 8 中的棒状放大器均处于开启状态, 当光寻址调制器处于全开时, 最终输出能量约 10 J; 使光寻址调制器同时生成 $\Phi 400\ \mu\text{m}$ 、 $\Phi 600\ \mu\text{m}$ 、 $\Phi 800\ \mu\text{m}$ 、 $\Phi 1\ \text{mm}$ 的四个“预屏蔽”点 (预放输出处的光斑大小为 $\Phi 9\ \text{mm}$, 四个挡光点的相对方位依次是左上、右上、左下、右下, 该功能可以对终端光学元件上的损伤点进行“遮挡”, 从而有效提升光学元件的使用寿命), 此时在输出处测得近场强度分布如图 11 所示, 对应的时间波形分布如图 12 所示。

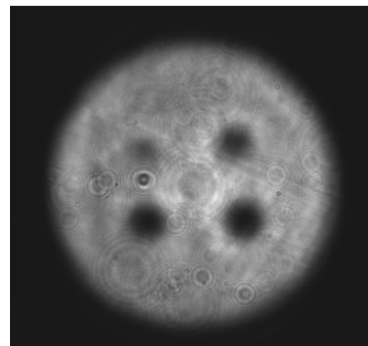


图 11 含有遮挡点的光束分布

Fig.11 Beam distribution with blockers

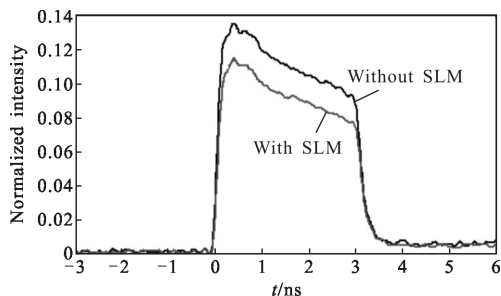


图 12 时间波形对比

Fig.12 Comparison of time waveform

由上述测试结果可知，此调制器引入的附加位相畸变对于高功率激光系统的影响是可以忽略的；当棒状放大器正常工作，输出能量为 10 J 时，光寻址调制器实现空间强度整形后的输出时间波形与没有调制器时是完全一样的，这充分证明了此调制器用于高功率激光系统是会产生额外幅频效应的。

4 关于预屏蔽实验结果的分析与讨论

在高功率激光系统中使用空间光调制器时，空间滤波器对光束整形效果的影响是必须要考虑的。对于上文所述的“预屏蔽”实验，当屏蔽孔的尺寸不同时，光束强度分布对应的频率分布不同，所以经过不同大小滤波器滤波后的效果是不同的。

对于上述第三部分的在线测试“预屏蔽”功能，考虑到滤波器对实际屏蔽效果的影响，做了相应的理论模拟。光束直径 $D=9\text{ mm}$ 的区域上，分别生成 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、 $600\text{ }\mu\text{m}$ 、 $800\text{ }\mu\text{m}$ 和 1 mm 的屏蔽孔效果如图 13 所示。

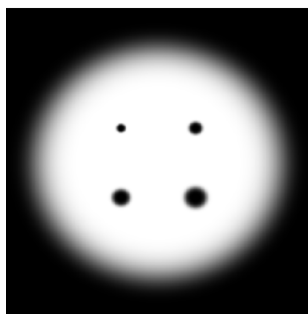


图 13 空间滤波前，四个不同大小屏蔽孔位于光束上的模拟效果

Fig.13 Simulated beam profile with four “blockers” of different sizes before spatial filtering

此光束强度分布经过 4 倍、7 倍、20 倍衍射极限的滤波小孔滤波后，光束强度分布的模拟效果分别

如图 14 所示。

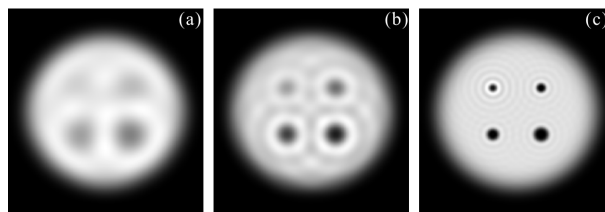


图 14 分别经过 4 倍(a)、7 倍(b)、20 倍(c)衍射极限滤波孔滤波后的模拟效果图

Fig.14 Simulated beam profile after spatial filtering with 4DL pinhole(a), 7DL pinhole(b) and 20DL pinhole(c)

由此模拟结果可知，当激光系统中的滤波器尺寸较小时，空间滤波过程会减弱屏蔽孔的屏蔽深度，而且屏蔽孔尺寸越小，屏蔽深度越浅；随着空间滤波器尺寸增大，空间滤波后的屏蔽深度加大。

由于图 8 所示激光系统中的滤波器尺寸约为 7 倍衍射极限，与实际测试结果图 11 进行比对可知，模拟效果图 14(b)与实测结果是比较接近的，这充分说明了挡光点尺寸过小时，挡光区域“暗度”不够是由激光系统中的空间滤波器造成的。所以在高功率激光系统中使用该器件时，空间滤波器尺寸的选择也是需要重点考虑的。

5 结论

文中对自研光寻址空间光调制器的工作原理、器件结构、器件工作特性等进行了介绍。在离线实验平台上测试了该器件的静态透过波前畸变、时间波形畸变；在线实验时，对输出光的远场、时间波形畸变、近场强度控制能力等进行了测试。结果表明，该器件可以用于高功率激光系统的近场强度控制，并且不会引入位相畸变、时间波形畸变等额外影响。

参考文献：

[1] Ma Haotong, Zhang Pu, Wang Xiaolin, et al. Near-diffraction-limited annular flat-top beam shaping with dual phase only liquid crystal spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8251–8260.

[2] Li Sensen, Wu Yulei, Liu Zhiwei, et al. High-quality near-field beam achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 681–689.

- [3] Wang Kangjun. Crystal spatial light demodulator and its application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 6(6): 65–67. (in Chinese)
王康俊. 液晶空间光调制器及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 6(6): 65–67.
- [4] John Heebner. Programmable beam spatial shaping for the national ignition facility[C]//SPIE, 2010: 003139.
- [5] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams [C]//Laser Damage Symposium XLII: Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers. International Society for Optics and Photonics, 2010: 78421C.
- [6] Huang D, Fan W, Li X, et al. An optically addressed liquid crystal light valve with high transmittance [J]. *Photonics Asia*, 2012, 8556: 855615–855617.
- [7] Aldrich R E, Hou S L, Harvill M L. Electrical and optical properties of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(1): 493–494.
- [8] Aubourg P, Huignard J P, Hareng M, et al. Liquid crystal light valve using bulk monocrystalline $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ as the photoconductive material [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(20): 3706–3712.