

文章编号: 0258-7025(2009)08-1999-05

基于 BSO 的液晶空间光调制器

石 涛 黄子强 张翠玉

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 紫外光敏材料硅酸铋(BSO)在短波长的蓝紫光激励下电阻率会急剧降低,可作为良好的光信息写入材料,用作光寻址的液晶空间光调制器(LC-SLM)的感光层。介绍了以 BSO 为基的光寻址透射式液晶空间光调制器的结构和工作原理,从 BSO 晶体产生光电导效应的机理出发,得到了光电流和光照功率的关系,实验测量了 BSO 晶体片在不同频率和不同强度的光照下的光电响应。通过对液晶分子指向矢分布随电压变化的理论计算,得到了在不同光照强度下 BSO 基的液晶空间光调制器产生的光程差,与实验中液晶盒在不同电压下产生的光程差有相同的变化趋势。

关键词 光学器件;空间光调制器;硅酸铋晶体;光电导效应;液晶指向矢;光程差

中图分类号 TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.1999

Liquid Crystal Spatial Light Modulator Based on BSO

Shi Tao Huang Ziqiang Zhang Cuiyu

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) is a kind of photosensitive material. Its resistance would drop sharply when exposed to the short-wave-length light, such as UV, so it would be used as the sensitizing layer in the liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). In this paper, we have theoretically studied the principle of LC-SLM and the photoconductivity of BSO. The relationship between photocurrent and the power of the illumination is introduced. In the experiment, the photoconductive effect of a slice of BSO with different wave-lengths illumination is measured. The optical path difference caused by the LC-SLM exposed to the UV is calculated by computing the distribution of the liquid crystal director. The change of the optical path difference caused by UV is similar to the change of optical path difference when the LC cell is applied different voltages in the experiment;

Key words optical device; spatial light modulator; $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal; photoconductivity; liquid crystal director; optical path difference

1 引 言

空间光调制器(SLM)是利用电或光信号在时间空间上控制另外光源的振幅、相位或者行进方向等传播状态的装置。一般地说,空间光调制器含有许多独立的单元,它们在空间上排列成一维或者二维的阵列,每个单元都可以独立接受电学信号或光学信号的控制,并按此信号改变自身的光学性质,从而对照射在它上面的光波进行调制。空间光调制器由于其所具有的并行实时处理特性而被广泛应用于光计算、光

学信息处理以及光学神经网络中。空间光调制器品种繁多,涉及到的学科范围、理论基础以及工艺技术都十分广泛。空间光调制器一般按照光的读出方式不同,可以分为反射型和透射型;而按照输入控制信号的方式不同又可分为光寻址和电寻址;按其调制方式,一般又分为相位调制和振幅调制^[1]。总结近年国内外在 SLM 上的研究成果^[2~6],不难发现,反射式的 SLM 引入了介质反射镜,它与液晶(LC)中的多层界面的多次反射所产生的法布里干涉,引入了随机分

收稿日期: 2008-09-11; **收到修改稿日期**: 2008-12-31

作者简介: 石 涛(1984—),男,硕士研究生,主要从事液晶显示和液晶光阀方面的研究。

E-mail: michaelstone@163.com

导师简介: 黄子强(1956—),男,教授,硕士生导师,主要从事液晶电子学方面的研究。E-mail: zhuang@uestc.edu.cn

布的干涉条纹,而这种条纹是难以消除的;电寻址的SLM一般采用薄膜晶体管(TFT)模式,使得开口率低,导致透过率偏低,分辨率也难以提高。所以相比较起来,光寻址透射式的液晶空间光调制器(LC-SLM)具有能量利用率高,结构简单等优点。

2 工作原理

如图1所示,硅酸铋-液晶(BSO-LC)夹在两层氧化锡铟(ITO)玻璃之间,交流电压通过ITO加载在BSO-LC层上,液晶上的电压遵从阻抗分压规律。采用短波长的紫外光作为写入光,不会使BSO产生光电效应的红外光作为读出光。没有紫外光照射的地方,BSO电阻很高,LC上的分压就很低,液晶分子平行于基板排列;有紫外光照射的地方,BSO的电阻很低,使相应位置的液晶分子上的分压提高,液晶分子就发生了偏转,垂直于基板排列,从而使液晶层对红外光的透过率或者光程发生改变。这就实现了对红外光光强或相位的二维空间分布的调制。

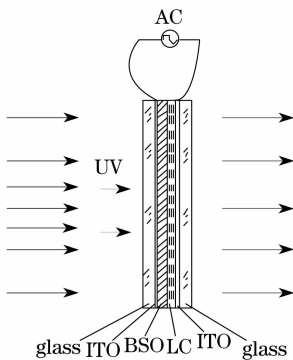


图1 基于BSO的LC-SLM设计方案

Fig. 1 Structure of LC-SLM based on BSO

3 BSO的光电导效应

BSO晶体是一种在可见光区的光导体,它的透过率^[7]如图2所示,反映出BSO的能带结构图如图3所示^[8]。它在常温下禁带宽度 $E_g = 3.25$ eV,根据能带理论,在波长 $\lambda < 380$ nm的光照射下,价带中电子将被激励到导带中,形成自由电子,在外电场的作用下,自由电子定向迁移,就产生了电流。

在无光照时,BSO的电导率 σ 很低 $[10^{-15}/(\text{m} \cdot \Omega)]$,几乎可以忽略不计;有光照时,光生载流子使 σ 显著增大。

假设在一个有限面元 ΔS 上,光照是均匀的,那么由光电导效应引起的光电流为^[9]

$$i(t) = e\mu n\Delta S = e\mu\Delta ST_{\text{R}}\alpha N_{\text{D}}I(t), \quad (1)$$

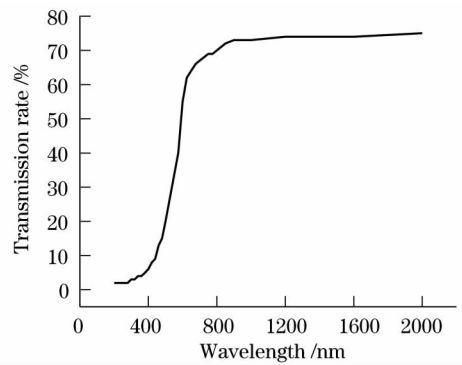


图2 BSO对不同波长的光的透过率

Fig. 2 Transmission rate of BSO with different wavelengths

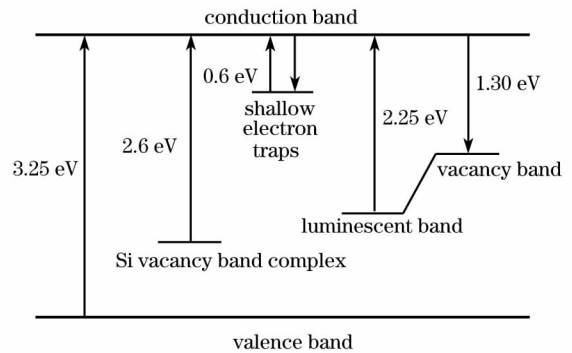


图3 常温下BSO的能带图

Fig. 3 Energy band diagram for BSO

其中 μ 代表自由电子的迁移率, n 代表自由电子的浓度, T_{R} 表示复合时间, α 为光生载流子的产生率, N_{D} 为施主密度, $I(t)$ 为随时间变化的光强信号。

由(1)式可知,光生载流子浓度跟光照功率成正比,光电流信号是光强信号的复现。

为了突现BSO的光电导效应,测得较准确的数据,实验中采用 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的BSO晶体薄片作为测试样品。在BSO晶体薄片两面蒸镀100 nm厚的透明导电材料ITO作为电极。为方便起见,直接用数字电桥测量BSO晶体片的电阻值,透明电极引出的导线连接数字电桥的输入端,便可直接读出被测的晶体片的阻值。光源采用光功率易于控制,单色性又好的LED,发光光谱如图4所示。

通过改变LED上的电流,就可以调整它的发光功率。在BSO晶体片旁边放置光功率计的探头,光照功率密度便可直接从光功率计上读出。

使用580 nm以上的橙、红和红外LED作光源时,BSO电阻值没有出现任何变化;而当使用紫、蓝和绿光作激励时,BSO却有明显的光电导效应,其电导随光功率密度的变化如图5所示。

从图5可看出,光电导跟光照功率密度有明显

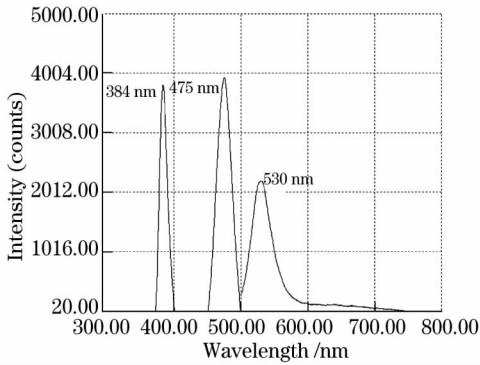


图4 三种不同波长的LED发光光谱

Fig. 4 Spectrum of the LEDs at three wavelengths

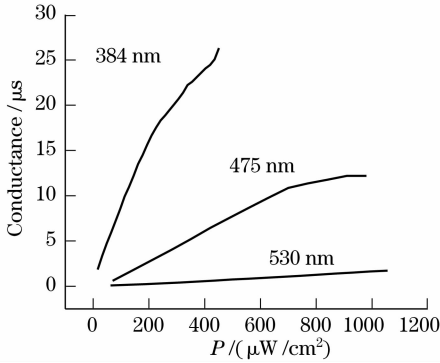


图5 BSO在不同波长光照下的光电响应

Fig. 5 Response of BSO with different wave-lengths illumination

的线性关系。相同功率密度的光照下,紫光激励产生的光电导率最高,蓝光产生的光电导次之,绿光获得的光电导最小。由此可见,光的波长越小,光电导效应越明显。反之,光的波长越大,光电导效应越弱,当光波长在600 nm以上时,光功率密度无论多大,都不能产生光电导效应。然而,黄绿光光子能量虽然小于BSO的禁带宽度,但也可以获得光电导效应,是因为BSO晶体的价带和禁带之间,还存在着2.25~2.6 eV的杂质能级,电子仍然可以从杂质能级中跃迁到导带成为载流子,产生光电流。

4 液晶层对光的调制

首先要使液晶层的阻抗跟明、暗态下的BSO阻抗匹配,即在没有紫外光照射的时候,按分压规律液晶上的电压降必须低于 V_{10} ;有紫外光照射的时候,液晶上的分压要高于 V_{90} 。液晶的阻抗,可以通过选用高阻值液晶材料,再在液晶中掺入适量的导电材料来调节。

4.1 振幅调制

为了提高光的利用率,采用不需要偏振片即可

改变透过率的宾主型液晶^[10]。把二向色染料混入透明的液晶中,外加电场控制液晶分子(主)的转向,而带动长棒状的染料分子(宾)一起转动。一般情况下,对于正型染料,光矢量与染料分子指向矢一致时,染料强烈吸收光波,体现为不透明状态;光矢量与染料分子轴垂直时,光波可以通过,体现为透明状态。然而,正型向列相液晶和正型染料组合的宾主盒(N_p+D_p),关态有颜色,开态呈无色的色底白像显示,这是一种负性显示。要实现正性显示,可采用负型向列相液晶和正型染料组合的宾主盒(N_n+D_p),或者正型向列相液晶和负型染料组合的宾主盒(N_p+D_n)。

4.2 相位调制

液晶是一种双折射晶体,液晶盒的光学性质与加电场前不同,双折射率也会受电场影响,这就是液晶的电控双折射特性^[11]。根据折射率椭球,寻常光折射率 n_o 为一固定值 n_{\perp} ,非常光的折射率 n_e 是关于光的传播方向与液晶指向矢的夹角 θ 的函数

$$\frac{1}{n_e^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_{\perp}^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_{//}^2}, \quad (2)$$

假设光是垂直于液晶层入射,液晶的倾角为 δ ,易见 δ 与 θ 互余,(2)式可写成

$$\frac{1}{n_e^2} = \frac{\sin^2 \delta}{n_{\perp}^2} + \frac{\cos^2 \delta}{n_{//}^2}. \quad (3)$$

因此,非常光的折射率 n_e 与液晶指向矢的分布有关^[12]。采用90°扭曲向列型液晶的弹性系数为 $k_{11} = 13.7 \times 10^{-12}$, $k_{22} = 7.0 \times 10^{-12}$, $k_{33} = 16.8 \times 10^{-12}$;电介系数 $\epsilon_{\perp} = 3.6 \epsilon_0$, $\epsilon_{//} = 10.3 \epsilon_0$;折射率液晶 $n_{\perp} = 1.520$, $n_{//} = 1.770$ 。将厚度 $d = 6 \mu\text{m}$ 的液晶盒等划分为200层,采用差分迭代法^[13],MatLab经200次迭代计算出液晶在电压 V_{LC} 下指向矢的分布。由(3)式可求得每一层液晶对非常光的折射率 n_e ,也就知道了每一层的光程,累加起来即可求得整个液晶盒对非常光的光程为

$$d_e = \sum_{i=1}^{200} n_e(i) \cdot d/200, \quad (4)$$

寻常光的光程 $d_o = n_{\perp} d$ 。光程差 Δ 可表示为

$$\Delta = |d_o - d_e|. \quad (5)$$

光照功率决定了BSO的电阻值,液晶层的电压 V_{LC} 可表示为

$$V_{LC} = \frac{VR_{LC}}{R_{BSO} + R_{LC}}. \quad (6)$$

如果液晶层的电阻值 $R_{LC} = 100 \text{ k}\Omega$,为了获得较大的电压范围,BSO的电阻值变化范围大致选取为50~500 k Ω 。根据实验中测得的数据和图5,在

384 nm 的紫光激励下,BSO 的电阻跟光照功率密度 P 的关系可用 $R_{\text{BSO}} = 11000 / P$ 拟合,所以光功率密度 P 取值大致范围要求在 $20 \sim 200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。使用 10 V 的交流电源作驱动电压,对不同的光照功率密度,可得出液晶上的分压 V_{LC} ,再计算出产生的光程差,如图 6 所示。

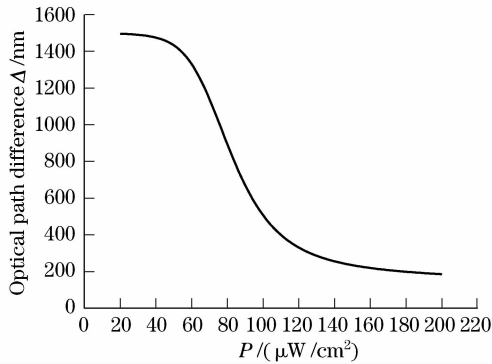


图 6 384 nm 紫光照射下的光程差

Fig. 6 Optical path difference caused by SLM under 384 nm UV

可见,液晶层上的分压越高,光程差越小。这是因为电压越大,液晶分子就越趋向于垂直排列,光轴方向就越接近于光的传播方向, n_o 就越接近 n_e ,光程差也就越小。光程差受到电压的调制,对读出光的相位调制也就实现了。产生的相位差 δ 可由光程差 Δ 和读出光的波长 λ 计算得出

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta. \quad (7)$$

由图 6 和(7)式可知,对于波长小于 1200 nm 的读出光,理论上可实现 2π 的相位调制。如果要对光波长大于 1200 nm 的读出光相位调制达到 2π ,需要采用厚度更大的液晶盒或双折射率更高的液晶材料^[14]。

采用自制 YM-8 向列型液晶材料封制了盒厚分别为 $6 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$ 的液晶盒,并使用应力双折射仪测量其在不同电压下产生的光程差^[15],测试结果如图 7 所示。

由图 7 可知,实验测量结果与理论计算的光程差有相同的变化趋势。

5 结 论

实验验证了功能材料 BSO 的光电特性,并通过液晶指向矢分布的计算得出了液晶空间光调制器在不同功率的写入光照射下产生的光程差。基于 BSO 的空间光调制器,可以通过振幅调制和相位调制高速动态地控制光波波面形状,用于对高功率激

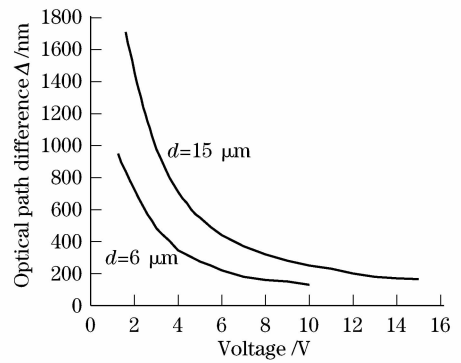


图 7 液晶盒在不同电压下产生的光程差

Fig. 7 Optical path difference with different voltages
光束的波面整形^[16]。由于受切割工艺对 BSO 晶体片的厚度限制的影响,BSO 基的液晶空间光调制器分辨率还有待提高。

参 考 文 献

- Zhao Dazun, Zhang Huaiyu. The Spatial Light Modulator[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992
- 赵达尊, 张怀玉. 空间光调制器[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992
- Brigitte Loiseaux, Jean-Pierre Huignard, Jean-Christophe Chanteloup *et al.*. Optically addressed liquid crystal light valves for adaptive control of amplitude and phase of laser beam[C]. *SPIE*, 1998, **3297**: 37~43
- Jerome Bourderionnet, Arnaud Brignon, Jean-Pierre Huignard *et al.*. Intracavity liquid-crystal light valve for spatial mode control of a Nd:YAG laser[C]. *SPIE*, 2003, **4829**: 670~672
- Nicolas Sanner, Nicolas Huot, Eric Audouard *et al.*. Spatial beam shaping of femtosecond pulses with an optically addressed light valve[C]. *SPIE*, 2005, **5708**: 63~70
- Ding Lei, Zhao Runchang, Li Mingzhong *et al.*. Feasibility study of liquid crystal light valve on beam-shaping[J]. *High Power Laser and Particulate Beams*, 2005, **17**(6): 849~850
- 丁磊, 赵润昌, 李明中等. 反射式液晶光阀用于激光束空间整形可行性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 849~850
- Liu Bohan, Zhang Jian, Wu Liying. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 213~217
- 刘伯哈, 张健, 吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 213~217
- Ning Jiping, Lin Huatie, Zhang Shibo *et al.*. Study on optoelectronic effect and light modulator in BSO crystals[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1992, **9**(2): 199~203
- 宁继平, 林华铁, 张士勃等. BSO 晶体光电特性及光调制器的研究[J]. *量子电子学*, 1992, **9**(2): 199~203
- Alfred E. Attard. Photoconductive and photorefractive effects in BSO[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(23): 5169~5187
- Dong Xiaoyi, Sheng Qiuqin, Zhang Jianzhong. Experimental research on spatial E-O effect and photoconductive effect in BSO crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 1989, **16**(1): 32~36
- 董孝义, 盛秋琴, 张建忠. BSO 晶体空间光电、光电导特性的实验研究[J]. *中国激光*, 1988, **16**(1): 32~36
- Huang Ziqiang. Principle of Liquid Crys Display[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008
- 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent

- birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1064~1066
王 宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(12): 1064~1066
- 12 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 13 Wang Qian, Yu Feihong, Kwok H. S. . Distribution of the liquid crystal director under applied voltage and its viewing characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(3): 311~316
王 谦, 余飞鸿, 郭海成. 外电场作用下液晶指向矢分布差分迭代求解及液晶盒视角电光特性研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(3): 311~316
- 14 Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.* . Characteristics of liquid crystal spatial light modulator ad oblique incidence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 374~378
叶必卿, 陈 军, 福智昇央 等. 液晶空间光调制器的斜入射特性 [J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 374~378
- 15 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1360~1364
张洪鑫, 张 健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1360~1364
- 16 Jun Kang, Wei Zhang, Hui Wei *et al.* . Pulse re-shaping by using a liquid crystal spatial light modulator and deflector for producing a specific waveform [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 184~186