

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 晶体的电-光和光-电导效应实验研究

赵明君 李育林 秦玉文

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

徐 良 瑛

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

提 要

从实验上和理论上对光折变晶体 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 的电光效应和光电导效应进行了系统的研究, 并进一步探讨了这两种效应中出现的非稳振荡现象。

关键词 电光效应; 光折晶体; $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

1 引 言

由于 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) 晶体具有显著的电光特性和光电导特性, 已被广泛地应用于非线性多波混频^[1,2], 实时全息元件^[3], 空间光调制器^[4], 非相干到相干转换器件^[5], 以及新型的光电、光纤传感元件等。近期主要侧重研究其电光特性作为实时器件, 早在 1985 年法国学者 Huignard 等^[6]进行了探索; 随后 Miteva^[7]研究了提高其记录特性和读出效率的途径, 其中较为普遍使用的为运动光栅模型^[8]。然后就 BSO 晶体而言, 光电导特性也是一个很重要的物理量, Peltier 等人于 1977 年作过初步的研究^[9], 近来这方面的研究却尚少见报道。本文在 BSO 晶体实时空间光调制器和双光束耦合特性的研究过程中^[5,10], 对其电光效应和光电导特性进行了实验测试研究和进一步的理论探讨。

2 电光效应

实验中使用的 BSO 晶体 [$10 \times 10 \times 3$; $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$] 其电光特性的主要参数如表 1 所列, 依据 Peltier 等人提出的“能带迁移 (band transport)”模型理论^[9], 其常温下能带结构如图 1 所示, 空带宽度为 3.25 eV, 由于 Si 空位的吸收展宽, 实际空带宽度为 2.60 eV^[9]。当晶体内发生双束耦合时 (即, 晶体被条纹状光照时), 电子 (或空穴) 从施主 (或受主) 满带被激发, 载流子通过扩散、漂移、光伏等向着暗场方向运动, 从而建立空间电荷场, 经过光电效应转换成折射率光栅。该光栅的衍射效率用另一束低功率及满足布喇格条件的 He-Ne 光

收稿日期: 1991年7月16日; 收到修改稿日期: 1992年1月20日

* 本课题得到国家自然科学基金的部分资助。

Table 1 Characteristics parameter of BSO crystal

Coeff. E. O. r_{41}	$V_{\frac{1}{2}\lambda}$	$\alpha^{(2)}$ ($\lambda=514\text{ nm}$)	$\sigma(\Omega^{-1}\text{cm}^{-1})$ $I_0(\text{Wcm}^{-2})$
$5 \times 10^{-10} \text{ cmV}^{-1}$	3.9 kV	2.3 cm^{-1}	$1.6 \times 10^{-15} + 7.3 \times 10^{-8} I_0$

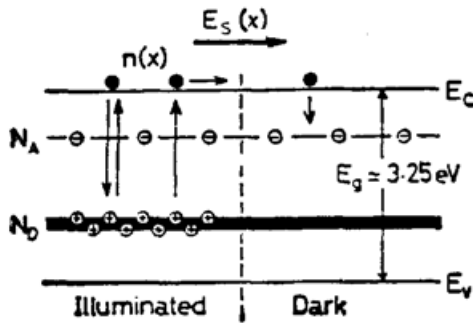


Fig. 1 The band transport model of BSO crystal

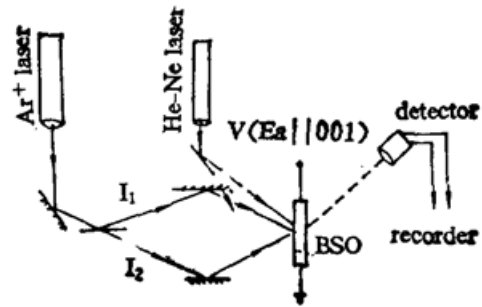


Fig. 2 Diagram of experiemntal system

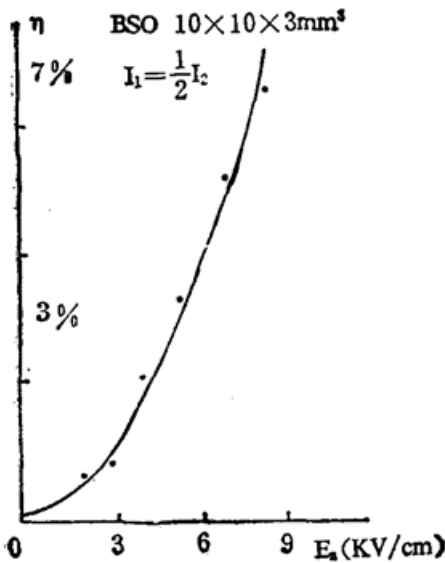


Fig. 3 Diffraction efficiency η vs. applied fields E_a

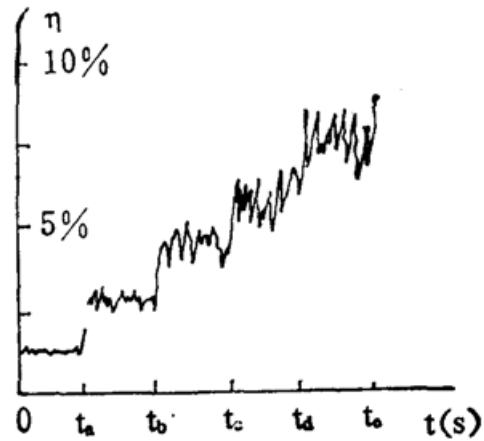


Fig. 4 Diffraction efficiency vs. time t for various applied fields

(BSO: $10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$, $I_1 = 0.8 I_2$, The time scales: t_a-0 ; t_b-t_a ; t_c-t_b ; t_d-t_c ; t_e-t_d were applied fields $E_a=2; 3; 4; 5; 6 \text{ kV/cm}$, respectively)

连续监测,如图 2 所示,在未施加高压时,衍射效率非常低(千分之几);当施加高压电场时(沿 001 轴),衍射效率骤增.其关系如图 3 所示.同时,实验发现,体光栅衍射随时间呈现较大的非稳现象,图 4 给出了衍射效率随时间呈现的非稳振荡现象,当外加电场增大时,这种现象加剧,从而给实验读数造成相当大的困难.

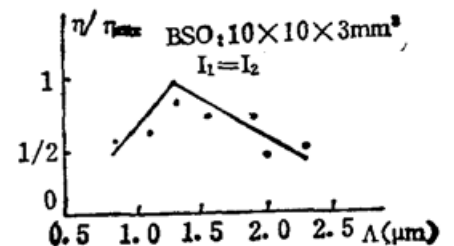


Fig. 5 Diffraction efficiency vs. grating periods

图 5 给出了衍射效率 η 与 I_1 和 I_2 间夹角,即光栅周期的关系实验曲线.另外在实际中, η 还与两束光偏振方向之间的夹角有关^[11].

3 光电导效应

表 1 知 BSO 晶体的电阻率较大(10^{16}). 实验中, 无光照时, 即使有很高的偏压, 光电流也很小, 实验中几乎观察不出来, 若用光照时, 立即可观察到光电流效应. 在电场作用下, 光生载流运动如图 1 所示, 其微观运动服从 Kukhtarev 方程

$$(\partial N^+ / \partial t) = SI(N_0 - N^+) - \nu n N^+, \quad (1)$$

$$(\partial n / \partial t) = (\partial N^+ / \partial t) + (1/e)(\partial j / \partial x), \quad (2)$$

$$j = e\mu n E - \mu K_0 T (\partial n / \partial x), \quad (3)$$

$$(\partial E / \partial x) = (e/\epsilon)(N^+ - n - N_A), \quad (4)$$

式中 n 为电子密度; N^+ 为电离施主密度, N_D 为施主密度; N_A 为受主密度; S 为光致电离系数; I 为光强; ν 为电-离重新复合系数; j 为电流密度; e 为电子电荷. 方程 (3) 为欧姆定律, 在此忽略了光伏电流, 于是

$$E = E_0 + E_{sc}(x), \quad (5)$$

它包含了外加电场 E_0 和光感生电场 E_{sc} .

如果用一束均匀的平面波照射晶体, 则有

$$[\partial E_{sc}(x) / \partial x] = 0, \quad (\partial n / \partial x) = 0. \quad (6)$$

由 (3) 式和 (6) 式可得到

$$j = \mu n_0 e E_0, \quad (7)$$

即光电流与外加电场和照射光强成正比. 如图 6 所示. 其所测数据如表 2 所列.

如果用两束相干光 I_1 和 I_2 , 且光栅周期为 Δ , 即条纹形光照射晶体时, 则

$$[\partial E_{sc}(x) / \partial x] \neq 0, \quad (\partial n / \partial x) \neq 0. \quad (8)$$

这样扩散电流存在, 由方程 (3) 可知, 在相同光强下, 均匀光 ($\Delta=0$) 产生的电流比条纹形式 ($\Delta \neq 0$) 照射产生的电流大, 如图 7 所示. 图 8 给出了光导电流*与光栅周期关系的实验曲

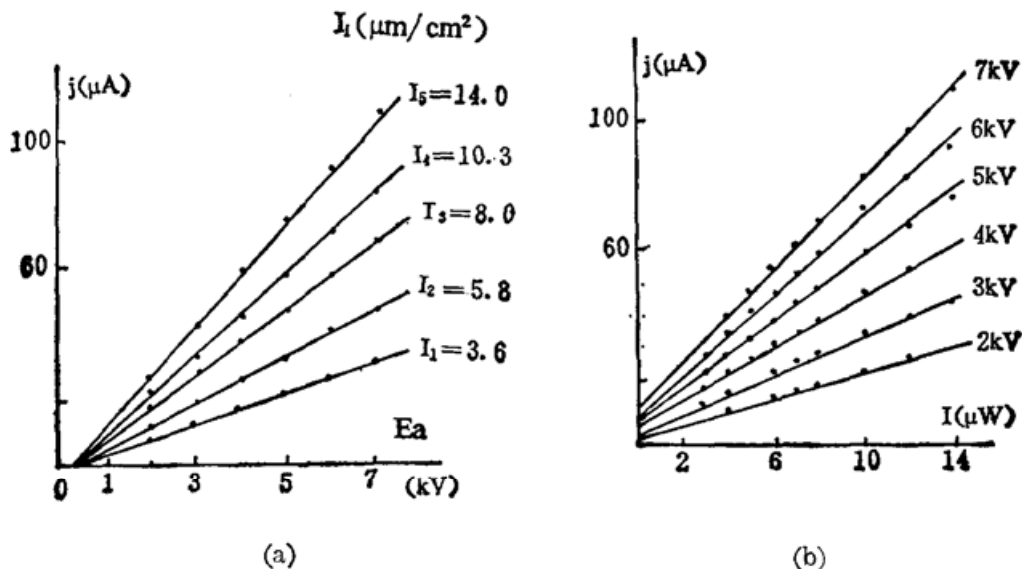


Fig. 6 Photocurrent vs. applied fields (a); light intensities (b)

* 这里电流大小取的是读数平均值, 实际中电流随时间出现振荡波动现象^[12].

Table 2 Measurement of photocurrent depends applied field and light intensities

E (W)	2	3	4	5	6	7
I (mW/cm ²)	j (μ A)					
3	8.0	12.6	17.3	22.4	27.3	32.3
4	10.1	16.1	22.2	28.3	34.5	40.4
5	12.3	19.2	26.5	33.7	41.4	48.6
6	14.5	22.6	30.8	39.1	47.4	55.6
7	16.5	25.4	34.5	43.7	52.7	62.3
8	18.5	28.3	38.5	48.7	59.1	69.4
10	22.2	33.8	46.7	59.1	72.4	84.0
12	26.3	39.5	54.5	68.5	82.5	97.5

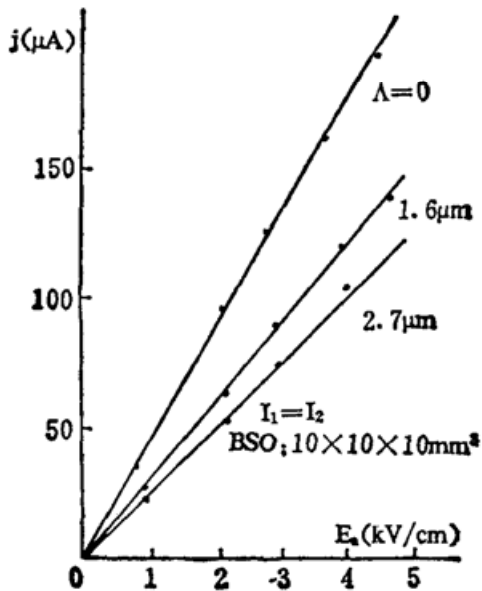


Fig. 7 j photocurrent vs. applied field E_a

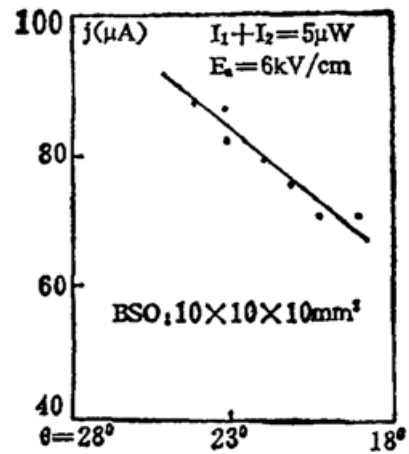


Fig. 8 Photocurrent vs. angle θ between I_1 and I_2 [$\Delta = (\lambda/2)/\sin(\theta/2)$]

线, 可见随周期增大, 光电流减小.

4 讨 论

在上面双光束耦合光栅衍射效率以及光导电流的测试过程中, 这些参数都随时间呈现振荡波动现象. 它可通过由光栅衍射理论^[13]分析, 探讨出这类波动的机制为: (1) 光栅位相; (2) 光栅的幅值随时间变化. 依据光折耦合波理论, 双光束干涉形成的光强为

$$I = I_0 [1 + m \cos Kx], \tag{9}$$

而感应的空间电荷场为

$$E_{sc} = E_{sc}^0 [1 + m \cos(Kx + \phi_\theta)], \tag{10}$$

式中 m 为调制度, ϕ_θ 为其相应的相移.

在不考虑吸收情况下, 光折体内折射率光栅的衍射效率 η 为^[14]:

$$\eta = \sin^2(\pi l \Delta n / \lambda \cos \theta), \quad \Delta n = 0.5 n_0^3 \nu_{\text{eff}} E_{sc}, \quad (11)$$

式中 l 为晶体厚度; λ 为使用光的波长; θ 为布喇格角. 由方程(3)、(5)、(11)可知, 当 E_{sc} 随时间出现变化时, 则有 η 和 j 随时间发生相应的变化. 由方程(10)知, E_{sc} 随时间变化的关键是 m 和 ϕ_0 是时间的函数.

在本文的实验中, I_1 和 I_2 来自同激光源, 故其耦合为简并情况, $\Delta\omega=0$, 在 ϕ_j 中不能包含 $\Delta\omega t$ 这一项. 在动态 Kukhtarev 方程解过程中, 假定 N_D 和 N_A 是常量. 双光束在 BSO 晶体中发生相互作用, 由电光效应引起的折射光栅其相位和幅值是时间 t 的函数. 这样得到方程(1)式~(4)式的一般解为^[15]

$$n = n_0 \{1 + m(t) \cos [Kx + \phi(t)]\}, \quad (12)$$

$$E = E_0 \{1 + m(t) \cos [Kx + \phi(t)]\}, \quad (13)$$

$$N^+ = N_0^+ \{1 + m(t) \cos [Kx + \phi(t)]\}. \quad (14)$$

把(12)和(13)式代入方程(3), 略去余弦因子的高阶项后, 再与(14)式一并代入(2)式, 分别比较正、余弦函数的系数, 得到

$$(\partial m / \partial t)(N_0^+ - n_0) = -(\mu/e) K_B T n_0 K^2 m, \quad (15)$$

$$(\partial \phi / \partial t) = -[2\mu K n_0 E_0 / (N_0^+ - n_0)]. \quad (16)$$

求解方程(15)和(16)式得到

$$m(t) = m_0 \exp(-\alpha t), \quad (17)$$

$$\phi = -\omega t + C_0, \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \mu K_B T n_0 K^2 / (N_0^+ - n_0) e, \\ \omega &= 2\mu K n_0 E_0 / (N_0^+ - n_0), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中 α 为吸收系数, ω 为振荡频率, C_0 为常数.

由(13)和(18)式可知, 空间电荷场引起的折射率变化量为

$$\Delta n = \beta m(t) \cos(Kx - \omega t), \quad (20)$$

这个变化的折射率光栅使其衍射效率和光导电流随时出现振荡现象, 随着电场的增强, 这种振荡现象加剧. 这与图4观察到的现象相符.

(20)式仅能定性地说明本文在测量过程中观察到的衍射效率和光导电流随时间呈现的振荡现象. 更进一步的探讨正在进行之中.

参 考 文 献

- [1] P. Yeh, Photorefractive two-beam coupling in cubic crystals. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **B4**(9): 1382~1386
- [2] J. P. Huignard, A. Marrakchi, Coherent signal beam amplification in two wave mixing experiments with photorefractive BSO crystals. *Opt. Commun.*, 1981, **38**(4): 249~254
- [3] J. P. Herriau, J. P. Huignard, Hologram fixing process at room temperature in photorefractive BSO crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(8): 1140~1142.
- [4] R. A. Sprague, P. Nisenson, The PROM—a statue report, *Opt. Eng.*, 1978, **17**(3): 256~266
- [5] 赵明君, 李育林, 王 昭. 光折 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 空间光调制器. *光学学报*, 1991, **11**(9): 810~814
- [6] P. Refregier, L. Solymar, H. Rajbenbach *et al.*, Two beam coupling in photorefractive BSO crystals with moving gratings: theory and experiments. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(1): 45~57
- [7] M. G. Miteva, Some possibilities for improving the holographic recording characteristics in BSO

- monocrystals. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22** (8): 1365~1368
- [8] G. C. Valley, Two-wave mixing with an applied field and a moving grating. *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, **B1** (6): 868~873
- [9] M. Peltier, F. Mickeron, Volume hologram recording and charge transfer process in BSO and BGO. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48** (9): 3683~3690
- [10] Li Yulin, Zhao Mingjun, Studing the performance of crystal materials for real-time holographic recording and display. *Soviet-Chinese Joint Seminar on Holography and optical information processing, Proc. of SPIE*, 1991, **1731**: 30~35
- [11] T. Sawada, K. Ujihara, Influence of optical activities on properties of a phase conjugate wave generated in a photorefractive BSO crystal. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25** (8): 1937~1946
- [12] G. Xu, S. Nagvi, T. A. King, Efficient ac-field enhancement of phase conjugate in BSO. *Opt. Commun.*, 1991, **81** (1-2): 89~94
- [13] 于美文. 光学全息及信息处理, 北京: 国防工业出版社, 1984: 77~98
- [14] G. C. Valley, M. B. Klein, Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing. *Opt. Eng.*, 1983, **22** (6): 704~711
- [15] M. Carrasacosa, F. Agullo-Lopez, Kinetics for optical erasure of sinusoidal holographic gratings in photorefractive materials. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22** (8): 1369~1375

Electrooptic and photoelectric effects of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals

ZHAO MINGJUN LI YULIN QIN YUWEN

(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xian 710068)

XU LIANG YING

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica, Shanghai 200050)

(Received 16 July 1991; revised 20 January 1992)

Abstract

This paper presents a systematic study on the electro-optic and photo-conductive characteristics of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal experimentally and theoretically. The instability oscillation phenomenon is discussed.

Key words electrooptic effect, photorefractive crystal, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.