

BaTiO₃ 晶体自抽运相位共轭特性研究*

许心光 杜晨林 邵宗书 牟晓东 胡居广

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

徐海清 罗豪苏 仲维卓

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201800)

(1999 年 10 月 12 日收到, 2000 年 6 月 3 日收到修改稿)

研究了多种 Rh :BaTiO₃ 和 Ce :BaTiO₃ 晶体样品的受激背向光折变散射自抽运相位共轭特性和响应时间特性. 结果表明, 入射光与晶体 *a* 面或 *b* 面法线的夹角较大时, 自抽运相位共轭光有更高的反射率、更快响应时间. 利用前向二波耦合特性和相向二波耦合特性对实验现象给予合理的解释. 实验结果表明, 多数 Ce :BaTiO₃ 晶体比 Rh :BaTiO₃ 晶体的共轭光反射率高.

关键词: 钛酸钡晶体, 二波耦合, 自抽运相位共轭, 响应时间

PACC: 4265H

1 引 言

相位共轭光能够广泛用于运动目标的指向和跟踪、图像处理、光学计算、干涉计量、激光陀螺、光纤和卫星通讯系统、激光系统和光刻技术等领域. 其机理研究也成为光折变研究领域的热点之一. 目前四波混频(FWM)^[1,2](包括双作用区四波混频)^[3]作为一种基本的作用机制已被普遍用于解释自抽运相位共轭光形成的机理. 但随着光折变材料和器件的研究和发展, 这一机理在解释自抽运相位共轭光形成的过程时不很完善. 从各种文献报道可知, 各样品个体差异较大, 主要有掺杂元素、掺杂浓度、生长条件、极化条件、内部缺陷等多种因素的影响. 在对自建抽运光路形成机制的研究中, 我们提出了由散射中心、相向二波耦合(CTWM)和四波混频共同作用的半线性腔模型、线性腔模型, 较好地解释了产生相位共轭光的机理^[4-7]. 本文对 BaTiO₃ 晶体受激背向光折变散射自抽运相位共轭(SPS-SPPC)反射率特性和响应时间特性进行了仔细研究, 对生长和极化条件相同的不同掺杂和掺杂浓度的多块样品进行了比较, 力求探索共同规律并给予合理的解释.

2 BaTiO₃ 晶体 SPS-SPPC 特性

SPS-SPPC 器是最近发展的一种新型自抽运相位共轭器件, 与“猫”式自抽运相位共轭相比, SPS-SPPC 自建抽运光路的形成并不依赖晶体表面的全内反射^[8,9]. 因此这种器件可只对入射面进行抛光, 具有此“猫”式自抽运相位共轭更加简单的结构.

2.1 实验

实验配置参见文献[4,5], 使用波长为 514.5 nm 的氩离子激光器, *e* 偏振光入射. 几种 0° 切 BaTiO₃ 晶体样品参数见表 1.

表 1 几种 0° 切 BaTiO₃ 晶体样品参数

样品序号	晶体尺寸/mm	掺杂物和重量比
1	7.10(<i>c</i>) × 6.99(<i>b</i>) × 6.70(<i>a</i>)	Rh 4 × 10 ⁻⁴
2	6.84(<i>c</i>) × 8.15(<i>b</i>) × 6.84(<i>a</i>)	Rh 5 × 10 ⁻⁴
3	6.81(<i>c</i>) × 5.81(<i>b</i>) × 6.31(<i>a</i>)	Rh 5 × 10 ⁻⁴
4	6.94(<i>c</i>) × 4.91(<i>b</i>) × 2.24(<i>a</i>)	Rh 5 × 10 ⁻⁴
5	6.12(<i>c</i>) × 5.30(<i>b</i>) × 5.54(<i>a</i>)	Rh 5 × 10 ⁻⁴
6	5.64(<i>c</i>) × 5.32(<i>b</i>) × 2.60(<i>a</i>)	Ce 5 × 10 ⁻⁵
7	8.53(<i>c</i>) × 4.04(<i>b</i>) × 5.75(<i>a</i>)	Ce 5 × 10 ⁻⁵
8	8.78(<i>c</i>) × 4.21(<i>b</i>) × 6.70(<i>a</i>)	Ce 5 × 10 ⁻⁵
9	7.64(<i>c</i>) × 4.43(<i>b</i>) × 2.95(<i>a</i>)	Ce 5 × 10 ⁻⁵

* 国家攀登计划(批准号: 2)及山东大学青年科学基金(批准号: Y34006)资助的课题.

2.2 SPS-SPPC 光路形成特点

图 1 为 3[#] 掺 Rh 的 0° 切 BaTiO₃ 晶体内部自建抽运光路, θ 为入射光与入射晶面法线的夹角. 产生自抽运相位共轭光的过程中, SPS-SPPC 内部光路形成的特征与掺 Ce 0° 切 BaTiO₃ 晶体的基本相同^[5,6].

图 2 为 $\theta = 60^\circ$ 时部分样品的内部自建抽运光路. 从以下的实验结果可以看到, 内部自建抽运光路越清晰, 内部和表面杂散光越少的样品(如 3[#], 8[#]) 或角度(如图 1(e)), 其共轭光反射率越大, 响应时间越快. 同时, 可以看到反射率大、响应时间快的样品或角度, 晶体 *c* 面和晶体内部的杂散光较少.

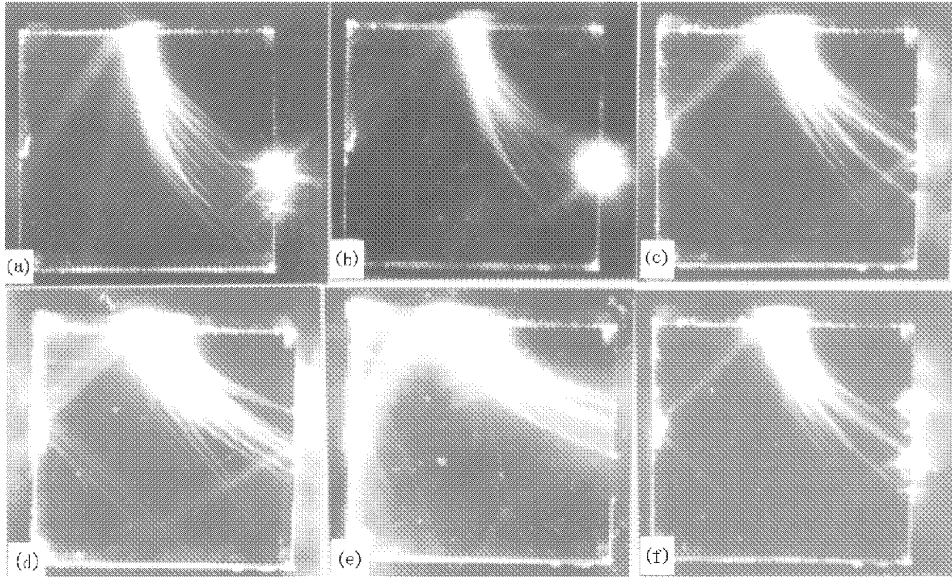


图 1 3[#]Rh :BaTiO₃ 晶体内部自建抽运光路 (a)–(e) 夹角 θ 分别为 30°、40°、50°、60°、70° (f) 和 (c) 为同一角度不同时间的抽运光路, $t(f) > t(c)$

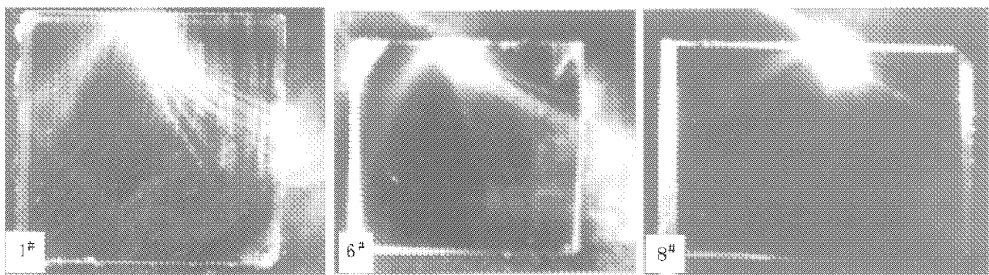


图 2 1[#]、6[#]、8[#] BaTiO₃ 晶体内部自建抽运光路 $\theta = 60^\circ$, 3[#] 见图 1(d)

2.3 BaTiO₃ 晶体 SPS-SPPC 光反射率特性

图 3 和图 4 分别为几种不同的 Rh :BaTiO₃ 和 Ce :BaTiO₃ 样品的共轭光反射率随角度变化的特性, 其中图 4(b) 为 8[#] 样品 *a* 面和 *b* 面的共轭光反射率特性.

π, α 为入射光与晶体 + *c* 轴的内夹角), 利用前向二波耦合特性拟合出晶体有效载流子浓度^[10–12], 结果见表 2.

表 2 几种 BaTiO₃ 样品有效载流子浓度及最高相位共轭光反射率

样品序号	1	3	5	6	7	(a)	(b)
$N_{eff}/10^{18} \text{cm}^{-3}$	10.76	4.68	12.3	26.1	3.50	11.8	11.8
$R_{pc}/\%$	51.2	69.6	55.3	53.1	67.3	68.5	65.5
$\theta/(\text{°})$	55	55	45	60	65	65	65

图 5 为几种样品的前向二波耦合特性, 晶体的入射面为 *a* 面, 实验为普通的实验配制($\alpha_1 + \alpha_2 =$

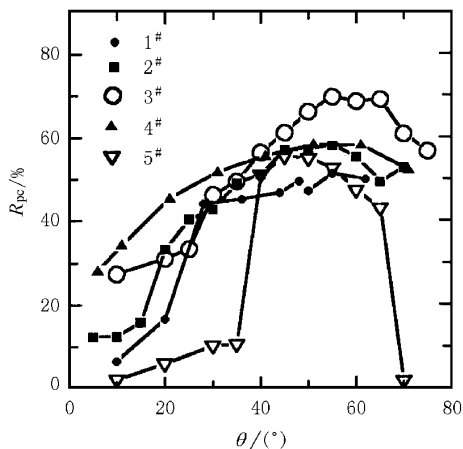


图3 Rh:BaTiO₃ 样品的 SPS-SPPC 光反射率随角度变化的实验特性

从实验结果可以看出,几种掺铈样品的共轭光反射率高于掺铈样品的,前向二波耦合增益较大的样品,其有效载流子浓度也较大,但与晶体生长时的掺杂浓度没有相应的关系,这可能是晶体生长时的多种因素造成的;共轭光反射率的高低与晶体的前向二波耦合增益及有效载流子浓度高低没有完全的对应关系,亦即有效载流子浓度较大的样品,其共轭光反射率不一定就高,这也说明影响共轭光反射率的因素是多方面的。

几种样品共同的实验结果是,入射角度较大(约 55°—65°)时,共轭光反射率较大。另外,晶体 c 面的透射光或散射光越弱,产生 SPS-SPPC 光反射率越大。除了其他因素外,这与晶体 c 面上的点缺陷的作用有很大关系。不同样品 c 面上点缺陷分布的不

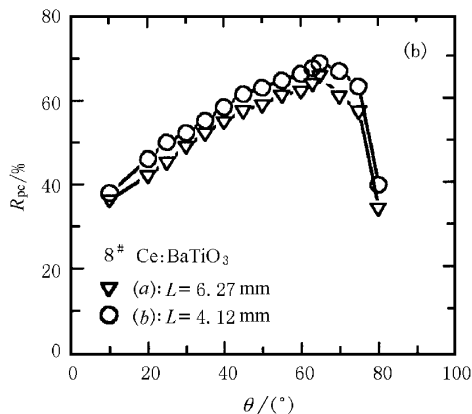
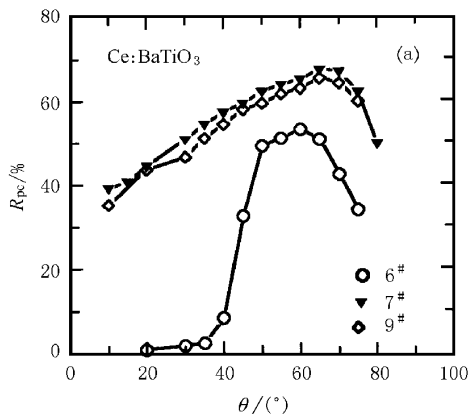


图4 (a) 6#、7#、9#和(b) 8# Ce:BaTiO₃ 样品的 SPS-SPPC 光反射率随角度变化的实验特性

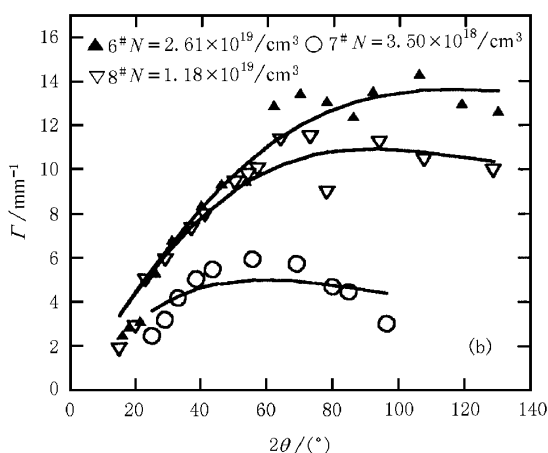
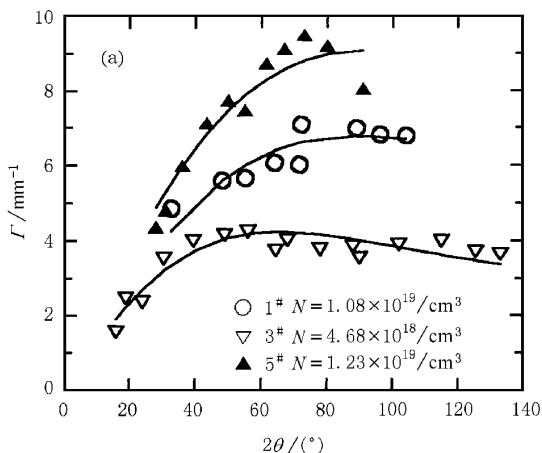


图5 几种样品的前向二波耦合增益特性及理论拟合曲线 (a)为 Rh:BaTiO₃ 晶体 (b)为 Ce:BaTiO₃ 晶体

同(如图 1(c)面上的亮点所示),也会造成 $R_{pc}-\theta$ 关系曲线的差异,参见图 1 至图 4.

2.4 SPS-SPPC 光响应时间特性

表 3 为几种 $BaTiO_3$ 晶体对应不同入射角度的 SPS-SPPC 响应时间曲线. 响应时间对应于输出共轭光达到最大值 $(1 - e^{-1})$.

表 3 $BaTiO_3$ 晶体不同入射角度的 SPS-SPPC 响应时间(单位: s)

样品和入射面	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	75°
5(a)	61	-	46	-	39	-	42	-	-
5(b)	61	-	37	-	28	-	30	-	-
6(a)	-	24	-	20	-	12	-	11	23
8(a)	-	37	-	23	-	16	-	14	47
8(b)	-	38	-	26	-	15	-	15.5	-

实验结果表明 ρ^0 切的 $BaTiO_3$ 晶体入射角度在 $55^\circ-65^\circ$ 时, SPS-SPPC 具有较短响应时间; 对某一晶体而言, SPS-SPPC 响应时间较短的入射角度, 稳态时 SPS-SPPC 光反射率较高.

3 理论分析

3.1 机理描述

当入射光从 a 面进入晶体后, 入射光束的散射光与入射光发生前向二波耦合作用, 由于 $BaTiO_3$ 晶体的前向二波耦合能量是向 $+c$ 方向转移, 所以偏向 $+c$ 方向的散射光不断得到加强, 从而形成偏向 $+c$ 方向的前向受激光折变散射, 亦即光扇.

由于晶体的不均匀性、缺陷、畴结构和掺杂离子, 使扇形光在晶体内再次产生散射. 其中沿原路返回的背向散射光将与前向入射光发生相向二波耦合作用并建立起反射光栅, 如图 6. 当背向散射光增益超过一定阈值条件后, 前向散射光和背向散射光将作为一对抽运光与入射光发生四波混频作用产生相位共轭光. 四波混频作用的过程中, 前向散射光从入射光中得到更多的能量, 形成清晰的抽运光路. 如此可以将抽运光路中前向和背向散射光的相向二波耦合过程等效为一个反射镜对前向散射光的反射. 由此 SPS-SPPC 的产生机理可用半线性腔模型描述^[9], 如图 7.

3.2 二波耦合特性对 SPS-SPPC 的影响

由于散射光较弱, 单靠散射中心的背向散射很

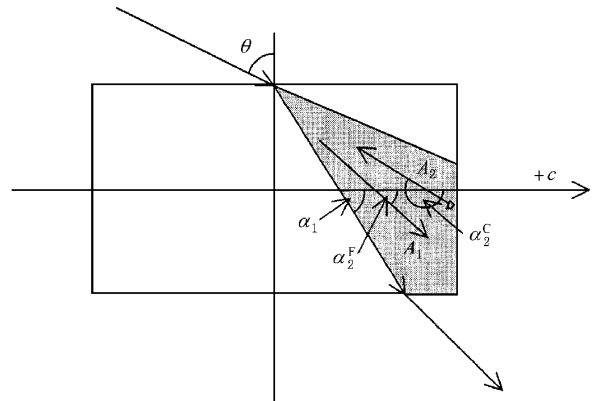


图 6 SPS-SPPC 中的前向二波耦合和相向二波耦合示意图

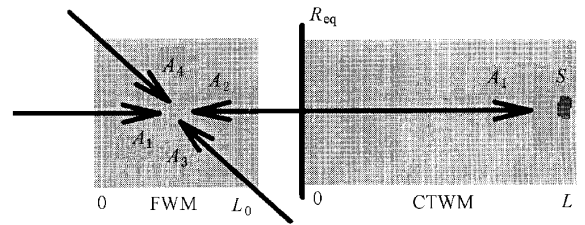


图 7 SPS-SPPC 半线性腔模型

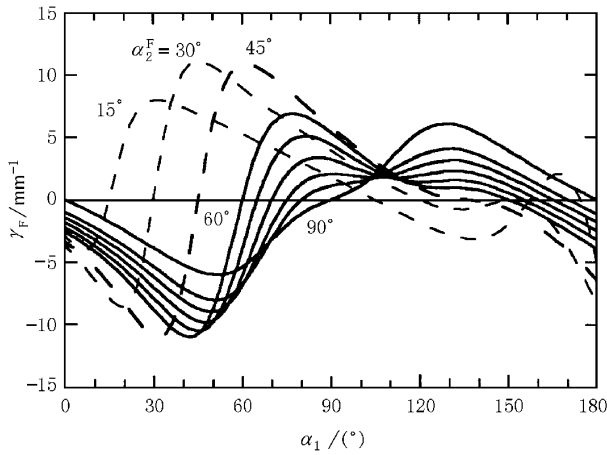
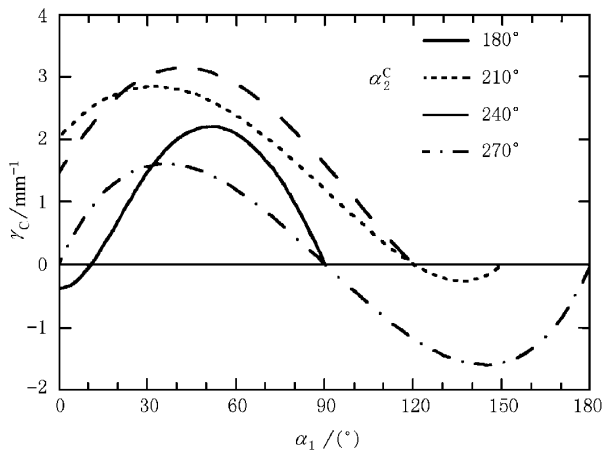
难满足半线性腔的阈值条件, 所以相向二波耦合是产生这种现象的主要原因. 而且根据实验光路特性和 SPS-SPPC 产生机理描述, 相向二波耦合过程的能量转移特性必须是向 $-c$ 方向转移. 实验结果表明, 其相向二波耦合能量转移方向确实是向 $-c$ 方向^[13, 14].

图 8 和图 9 分别为前向二波耦合系数 γ_F 和相向二波耦合系数 γ_C 随 α_1 在 $0^\circ-180^\circ$ 之间变化时的理论计算曲线. α 为入射光或散射光与晶体 $+c$ 方向的内夹角. 相关参数见文献^[13].

从图 8 可以看到, 当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时, 前向二波耦合系数 γ_F 为负值, 即前向二波耦合能量是向 $+c$ 方向转移. 对相向二波耦合, 从图 9 的耦合系数 γ_C 正负号取值可以看出, $BaTiO_3$ 晶体中相向二波耦合的能量转移是朝向 $-c$ 方向^[13, 14].

抽运光束 A_1 将从入射光中获得能量, 即前向散射光也随之增强, 入射光的能量向这条抽运光路集中, 形成清晰的内部光路. 当晶体存在多个散射中心时, 则晶体内部形成多条对应的抽运光路.

由于 $BaTiO_3$ 晶体具有较大的相向二波耦合系数, 相向二波耦合作用的结果, 使前向抽运光随传播距离的增加, 其能量越来越多地转向背向散射的抽

图8 BaTiO₃ 晶体前向二波耦合系数 γ_F 理论曲线图9 BaTiO₃ 晶体相向二波耦合系数 γ_C 理论曲线

运光,前向抽运光变得越来越细,越来越暗,自建抽运光路变得更为清晰,如图1和图2所示。

3.3 实验现象分析

对于某一晶体而言,产生自抽运相位共轭光,用四波混频理论能较合理地解释。但是在大幅度入射时,BaTiO₃晶体的SPS-SPPC光反射率和响应时间特性,单纯用四波混频理论无法解释。

由于BaTiO₃晶体的折射率大于2.4,所以图8和图9中 $\alpha_1 > 60^\circ$;当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\alpha_1 = 90^\circ$,因此 $60^\circ < \alpha_1 \leq 90^\circ$ 。

从图8前向二波耦合特性可以看出,随 θ 的增大, α_1 逐渐减小,前向二波耦合系数为负值,其绝对值逐渐增大,入射光与散射光的前向二波耦合作用,使偏向 $+c$ 方向的散射光越来越强,光路越来越清

晰(图1)。同时,这一特性也影响了SPS-SPPC光反射率和响应时间特性,随 θ 的增大,反射率增大,响应时间变小。

从图9相向二波耦合特性可以看出, α_1 在 $60^\circ-90^\circ$ 范围,随 α_1 逐渐减小,相向二波耦合系数为正值并逐渐增大,相向二波耦合能量向 $-c$ 方向转移;随 θ 的增大,背向散射光通过相向二波耦合作用从入射光或前向散射光获得更多的能量,如图6和图7中 A_1, A_2 都会越来越强,显然四波混频的结果,使共轭光反射率越来越大,响应时间越来越快。

同时,由于BaTiO₃晶体的相向二波耦合能量转移特性偏向 $-c$ 方向,入射光与共轭光的相向二波耦合作用也有利于SPS-SPPC光反射率的提高;在大角度入射时, γ_F 和 γ_C 都较大,产生SPS-SPPC的二波耦合作用较强,所以在大幅度范围SPS-SPPC的响应时间较短,并有较高的共轭光反射率。

但是,当入射角 $\theta > 70^\circ$ 时,共轭光反射率明显下降,响应时间增加。这可能是由于入射光斑过大时,晶体内部的有效作用长度过长或过短造成的^[5],同时入射角度过大时,很难保证入射光完全进入晶体。

- [1] M. Gonin-Golomb, B. Fischer, J. O. White, A. Yariv, *IEEE J. Quant. Electron.*, **20**(1984), 12.
- [2] J. Feinberg, R. W. Hellwarth, *Opt. Lett.*, **6**(1981), 519.
- [3] K. R. MacDonald, J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**(1983), 548.
- [4] X. Mu, Z. Shao, L. Zhang, M. Jiang, H. Luo, W. Zhong, *Appl. Opt.*, **36**(1997), 5888.
- [5] Y. Zhu, C. Yang, M. Hui, X. Niu, J. Zhang, T. Zhou, X. Wu, *Appl. Phys. Lett.*, **64**(1994), 2341.
- [6] X. Mu, Z. Shao, J. Zhang, L. Zhang, M. Jiang, H. Luo, W. Zhong, *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 2275.
- [7] X. Mu, Z. Shao, L. Zhang, J. Zhang, J. Wang, M. Jiang, *Opt. Commun.*, **136**(1997), 283.
- [8] J. Xu, Y. Wu, S. Liu, G. Zhang, D. Sun, Y. Song, H. Chen, *Opt. Lett.*, **16**(1991), 1225.
- [9] R. A. Mullen, D. J. Vickers, L. West, D. M. Pepper, *J. Opt. Soc. Am.*, **B9**(1992), 1726.
- [10] P. Yeh, *IEEE J. Quant. Electron.*, **25**(1989), 484.
- [11] K. R. MacDonald, J. Feinberg, M. Z. Zhao, P. Gunter, *Opt. Commun.*, **50**(1984), 146.
- [12] X. F. Yue, Z. S. Shao, *Photorefractive Materials and Its Application* (Shandong Science and Technology Press, Jinan, 1994), p. 156 (in Chinese) [岳学峰, 邵宗书, 光折变材料及其应用(山东科学技术出版社, 济南, 1994), 第156页]。

- [13] X. Mu ,X. Xu ,J. Chen ,Z. Shao ,M. Jiang ,*Opt. Commun.* , **141** (1997) ,189. [14] X. Mu ,X. Xu ,Z. Shao ,M. Jiang ,H. Luo ,W. Zhong ,*Appl. Phys. Lett.* , **71**(1997) ,1011.

CHARACTERISTICS AND RESPONSE RATE OF STIMULATED PHOTOREFRACTIVE SCATTERING SELF-PUMPED PHASE CONJUGATOR IN RARE-EARTH DOPED BaTiO₃*

XU XIN-GUANG DU CHEN-LIN SHAO ZONG-SHU MU XIAO-DONG HU JU-GUANG

(*State Key Laboratory of Crystal Materials , Shandong University , Jinan 250100 , China*)

XU HAI-QING LUO HAO-SU ZHONG WEI-ZHOU

(*Shanghai Institute of Ceramics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

(Received 12 October 1999 ; revised manuscript received 3 June 2000)

ABSTRACT

Characteristics and response times of the stimulated photorefractive scattering self-pumped phase conjugator (SPS-SP-PC) in the series of Rh-doped and Ce-doped BaTiO₃ crystals are investigated. The experimental results show that the SPS-SPPC has higher reflectivity and faster response rate at greater incident angle. The phenomenon was properly analysed using characteristics of two-wave mixing. By the way ,the phase conjugation reflectivity of Ce :BaTiO₃ is higher than that of Rh :BaTiO₃ crystals .

Keywords : BaTiO₃ crystal , two-wave mixing , self-pumped phase conjugator , response time

PACC : 4265H

* Project supported by the National " Climb " Program of China (Grant No. 2) and the Science Foundation for Young Scientists of Shandong University , China (Grant No. Y34006).