

不同切型 BaTiO₃ 晶体二波耦合特性研究*

许心光 牟晓东 胡居广 邵宗书

(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)

摘 要 分析了光折变晶体的电光系数对二波耦合特性的影响。二波耦合能量转移方向不仅依赖于晶体中光生载流子的电荷符号以及入射光与晶体 c 轴的相对取向, 而且依赖于晶体电光系数各分量的相对大小; 这种特性特别明显地表现在相向二波耦合作用中。对不同掺杂浓度(掺铋或掺铈)的 0° 切割和 45° 切割的体块及薄片的 BaTiO₃ 晶体进行了实验观察, 结果与理论符合得很好。

关键词 光折变, BaTiO₃ 晶体, 前向二波耦合, 相向二波耦合, 电光系数。

1 引 言

光折变晶体的二波耦合特性是研究光折变晶体的最基本的和重要的特性。由于光折变晶体的二波耦合作用在光放大和图像处理等方面有着广泛的和潜在的应用价值^[1~3], 所以几十年来, 光折变晶体的二波耦合特性一直被研究者们所广泛注意。目前的理论和实验研究主要集中在应用广泛的前向二波耦合(FTWM)过程中; 对两束光反向平行传播时的相向二波耦合(CTWM)的理论和实验研究较少^[4, 5]。本文对 0° 和 45° 切型的 BaTiO₃ 晶体的整个角度的相向二波耦合特性从实验上进行了全面研究。实验结果与理论结果符合得很好, 同时进一步验证了本文作者发现的相向二波耦合的独特的波耦合特性^[6~8]。

2 理论分析

2.1 二波耦合理论分析

图 1 是二波耦合作用简图, 其中, 图 1(a)、(b)为前向二波耦合, 图 1(c)、(d)为相向二波耦合, 图中 α_1 、 α_2 分别为信号光 I_1 和泵浦光 I_2 与晶体 $+c$ 轴的内夹角, θ 是每束光与 x 轴的夹角。

根据 Kukhtarev-Vinetskii 模型^[9], 前向二波耦合的能量耦合方程可写为

$$\frac{d}{dx} I_1 = - \gamma_F \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_1,$$

* 国家攀登计划和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-04-09; 收到修改稿日期: 1998-05-18

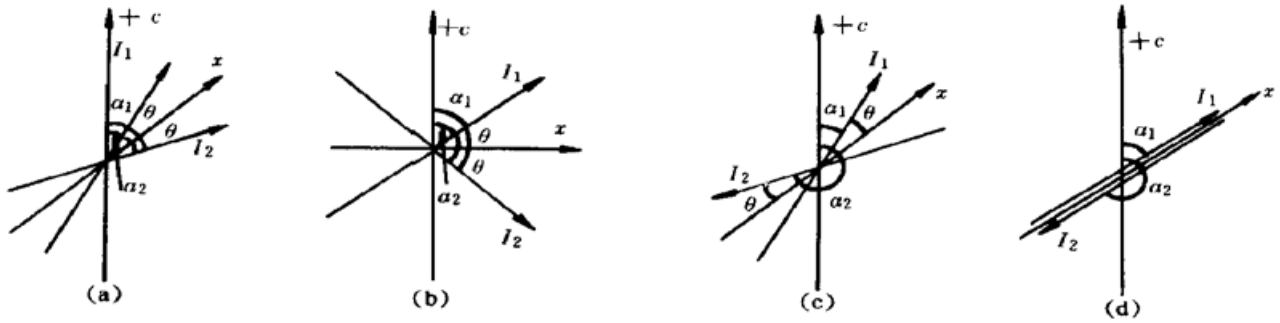


Fig. 1 Schematic diagram of two-wave mixing in photorefractive crystals. (a), (b) FTWM and (c), (d) CTWM. α_1 is the internal angle between beam I_1 and the $+c$ axis; α_2 is the internal angle between beam I_2 and the $+c$ axis; θ is the angle between each of the beams and the x axis

$$\frac{d}{dx} I_2 = \gamma_F \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_2, \quad (1)$$

相向二波耦合的能量耦合方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} I_1 &= -\gamma_R \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} - \alpha I_1, \\ \frac{d}{dx} I_2 &= -\gamma_R \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} + \alpha I_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, α 为吸收系数. γ_F 、 γ_R 分别为前向和相向二波耦合系数。

由上述两组波耦合方程可以看出, 无论是前向二波耦合还是相向二波耦合, 其二波耦合能量转移方向都是由耦合系数 γ_F (γ_R) 的正负符号决定的。当耦合系数为正值时, 二波耦合作用使 I_1 的能量减小, I_2 的能量增加, 即能量由 I_1 流向 I_2 ; 反之, 当耦合系数为负值时, I_2 的能量减小, I_1 的能量增加, 能量由 I_2 流向 I_1 。因此, 由耦合系数的变化规律即可判断出前向和相向二波耦合的能量转移特性。

2.2 电光系数对前向二波耦合系数的影响

根据文献^[5, 6, 10~12], 前向二波耦合系数 γ_F 可写为

$$\gamma_F = \frac{\omega}{2c} \frac{n^3 r_{\text{eff}}^F E_{\text{sc}}}{\cos [(\alpha_1 - \alpha_2)/2]} \quad (3)$$

(3) 式中相关系数见文献^[6, 8], 对于图 1(a) 的情形, 前向有效电光系数可推得:

$$r_{\text{eff}}^F = \left[(n_o^4 r_{13} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + 2n_o^2 n_e^2 r_{42} \cos^2 \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) + n_e^4 r_{33} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2) \right] \times \sin \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) / (n_o^3 n_e). \quad (4)$$

当 $\alpha_2 + \alpha_1 = \pi$ 即图 1(b) 的配置时:

$$r_{\text{eff}}^F = (-n_o^4 r_{13} \cos^2 \alpha_1 + n_e^4 r_{33} \sin^2 \alpha_1) / n_o^3 n_e. \quad (5)$$

以上各式中, ω 为光波频率; n_o 、 n_e 分别为该晶体 o 光和 e 光折射率; n 为无外场时晶体的折射率; r_{ij} (r_{13} , r_{33} , r_{42}) 为电光系数张量中的非零分量. E_{sc} 为空间电荷场。

不难发现, 前向二波耦合的有效电光系数 r_{eff}^F , 当 $\alpha_1 + \alpha_2 \neq \pi$ 时, 由于 r_{42} 是 BaTiO₃ 晶体的最大电光系数分量^[8], r_{eff}^F 始终为正值, 从而 γ_F 的正负情况在整个入射角度范围内与电光系数无关, 保持正值, 说明前向二波耦合能量转移方向只与光折变晶体载流子的电荷正负符号及入射光与晶体 c 轴的相对取向有关。具体地讲, 空穴型载流子 (如 BaTiO₃ 晶体) 二波耦合能

量转移始终是向 + c 轴方向进行的, 电子型载流子晶体(如铌酸锶钡-SBN 晶体)二波耦合能量转移始终是向 - c 轴方向进行的。

当两束入射光满足图 1(b), 即 $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ 的条件时, 从 (5) 式可以看出, r_{eff}^F 的正负值与电光系数有关, 由于 BaTiO₃ 晶体的电光系数 $r_{33} > r_{13}$, 而且对于 0° 切型晶体, 入射光与 c 轴的内夹角 $\alpha_1 > 45^\circ$, 所以一般情况下(5)式为正值。在以往的二波耦合研究中, 认为能量转移方向是由光生载流子的电荷符号、入射光与 c 轴的相对取向决定的, 也是基于这种原因。但是从理论上, 仍然可以得到 r_{eff}^F 的正负值变化。当晶体的电光系数分量 $r_{13} > r_{33}$, 前向二波耦合能量转移方向仍然可能改变。

图 2 是 BaTiO₃ 晶体的图 1(a)、(b) 配置的前向二波耦合系数 γ_F 随入射角 α_1 变化的理论特性曲线。在图 1(a) 配置时, 取 $\alpha_2 = 60^\circ$ 。从中可以看出其能量转移是向 + c 方向进行的。

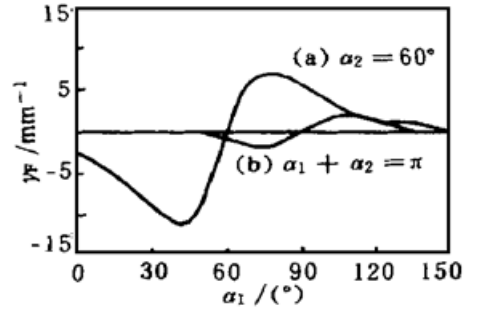


Fig. 2 Plot of the coupling constant γ versus α in the forward two-wave mixing

2.3 电光系数对相向二波耦合系数的影响

相向二波耦合系数 γ_R 为

$$\gamma_R = - \frac{\omega}{c} \frac{n^3 r_{\text{eff}}^R E_{\text{sc}}}{\sin [(\alpha_2 - \alpha_1)/2]}, \quad (6)$$

(6) 式中相关系数见文献[6, 8], 对于图 1(c) 配置相向二波耦合有效电光系数为

$$r_{\text{eff}}^R = - [n_o^4 r_{13} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + 2n_o^2 n_e^2 r_{42} \cos^2(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}) + n_e^4 r_{33} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2] \sin(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}) / (n_o^3 n_e), \quad (7)$$

当 $\alpha_2 - \alpha_1 = \pi$, 即图 1(d) 配置有效电光系数为

$$r_{\text{eff}}^R = (n_o^4 r_{13} \cos^2 \alpha_1 - 2n_o^2 n_e^2 r_{42} \sin^2 \alpha_1 + n_e^4 r_{33} \sin^2 \alpha_1) \cos \alpha_1 / (n_o^3 n_e), \quad (8)$$

图 3 是图 1(c)、(d) 配置的 BaTiO₃ 晶体相向二波耦合系数 γ_R 随入射角 α_1 变化的理论曲线。

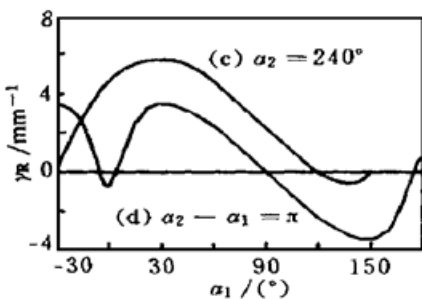


Fig. 3 Plot of the coupling constant γ_R versus α in the contradirectional two-wave mixing

其中, 在图 1(c) 配置情形, 取 $\alpha_2 = 240^\circ$ 。比较图 2 和图 3 可以看出相向二波耦合系数 γ_R 与前向二波耦合系数 γ_F 在大部分角度上是相反的, 说明在大部分角度上, 相向和前向二波耦合的能量转移方向是相反的。显然晶体的电光系数各分量的相对大小对相向二波耦合的有效电光系数 r_{eff}^R 值的正负变化有着十分显著的影响, 从而影响了相向二波耦合的耦合系数和能量转移特性。

具体地说, 对于图 1(d) 配置, 在 $\alpha_1 < 90^\circ$ 的几乎所有角度, 耦合系数 γ_R 保持正值。由(2)式可知, 耦合后探测光 I_1 减弱, 泵浦光 I_2 获得增益; 在 $\alpha_1 > 90^\circ$ 的几乎所有角度, 耦合系数 γ_R 保持负值, 从而泵浦光 I_2 减弱, 探测光 I_1 获得增益。这就意味着相向二波耦合作用的结果是: 在 $\alpha_1 < 90^\circ$ 和 $\alpha_1 > 90^\circ$ 的几乎所有角度, 能量转移方向是向 - c 轴的。

当 α_1 接近 c 轴时, 即接近 0° 和 180° 时, 此时 r_{eff}^R 值为正值。即 $\alpha_1 < 90^\circ$ 的较小区域, γ_R 是

负值; 而 $\alpha_1 > 90^\circ$ 的较小区域, γ_R 是正值。此时相向二波耦合和前向二波耦合的能量转移特性相同, 向 + c 方向转移。

从(8)式还可以得到, 当晶体的 r_{42} 比 r_{33} 小时, r_{eff}^R 值没有正负的变化, 相向二波耦合的能量转移方向在所有角度都相同。此结论与 Ce:SBN 晶体的实验结果是一致的^[13, 14]。

3 实验结果与讨论

对不同的 BaTiO₃ 晶体进行了相向二波耦合实验, 表 1 中是不同样品的参数。实验中, 以 I_1' 和 I_1'' 分别表示实验光路中不加泵浦光 I_2 和有 I_2 时, 探测光 I_1 经过晶体后功率计所测到的光强。因此, 可以用 $\ln(I_1''/I_1')$ 值的符号变化来判断在晶体中, 经过二波耦合后, I_1 能量的增减, 并由此确定二波耦合作用的能量转移方向。信号光与泵浦光的能量比为: $I_1 \cdot I_2 = 1 \cdot 1500$ 。

Table 1. The parameters for several BaTiO₃ crystals

sample No.	crystal size/mm	adulterant and weight ratio	cut type/($^\circ$)
1	7.10(c) \times 6.99 \times 6.76	Rh: 4.0×10^{-4}	0
5	4.23(a) \times 4.91 \times 4.64	Ce: 5.0×10^{-5}	45
6	8.50(a) \times 5.64 \times 1.88	Ce: 5.0×10^{-5}	45
9	6.81(c) \times 5.81 \times 6.31	Rh: 6.0×10^{-4}	0
16	8.78(c) \times 6.70 \times 4.21	Ce: 5.0×10^{-5}	0
18	7.00(c) \times 8.40 \times 7.50	Rh: 2.18×10^{-4}	0

图 4 是 1 号和 16 号样品、实验配置为图 1(b) 的前向二波耦合的实验结果, 实验结果与理论结果符合得很好。

图 5 是 9 号样品、两光束在靠近 c 轴时的实验结果。为了获得其他角度的实验特性, 对 45° 切型的样品进行了研究。图 6、图 7(a) (b) 是 45° 切型 5 号和 6 号样品的相向二波耦合能量转移特性。从图 6 可看出, 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间能量转移值没有明显的变化, 这是由于很弱的信号光向泵浦光转移能量时, 出现了能量耗尽; 为此在图 7(a) 的实验中, 增强信号光强使光强比为 $1 \cdot 50$, 结果与理论符合得很好。

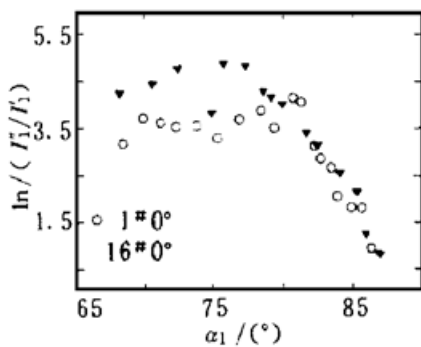


Fig. 4 $\ln(I_1''/I_1')$ of FTWM in BaTiO₃ crystal as a function of α_1 , α_1 is the internal angle between beam I_1 and + c axis

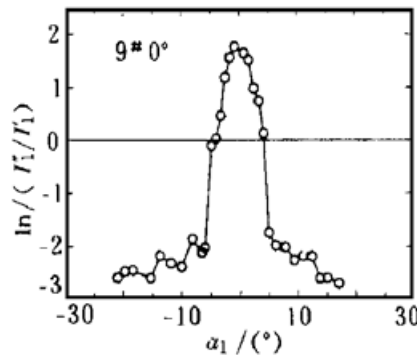


Fig. 5 $\ln(I_1''/I_1')$ of CTWM in BaTiO₃ crystal as a function of α_1

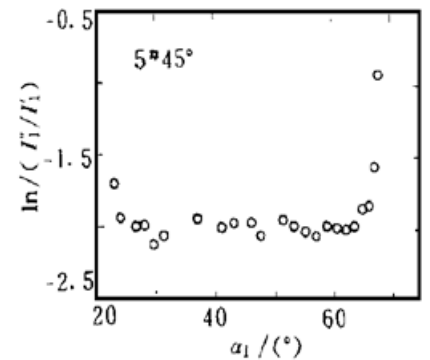


Fig. 6 $\ln(I_1''/I_1')$ of CTWM in block BaTiO₃ crystal as a function of α_1

图 8 是 18 号样品^[6]和 6 号样品以图 1(d) 配置的相向二波耦合, $\ln(I_1''/I_1')$ 随探测光 I_1 与

晶体 + c 轴的内夹角 α_1 变化的实验结果。圆圈为 18 号样品，三角形为 6 号样品的图 7 实验数据放大后的实验结果。可以看出相向二波耦合的能量转移特性： α_1 在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 之间时， $\ln(I_1''/I_1')$ 为负值，相向二波耦合作用后， I_1 能量减小，能量向 - c 方向转移； α_1 在 $90^\circ \sim 175^\circ$ 之间时 $\ln(I_1''/I_1')$ 为正值， I_1 能量增加，能量仍然向 - c 方向转移。只有当两光束靠近 c 轴时，即 α_1 接近 0° 和 180° 时，相向二波耦合能量转移方向与前向二波耦合能量转移方向相同，即向 + c 方向。

不同切型样品的相向二波耦合实验结果表明， I_1 在晶体 + c 方向整个角度的能量变化都与理论曲线符合得很好。这进一步验证了相向二波耦合理论^[6-8]。

另外，由于 BaTiO₃ 晶体在 c 轴 $\pm 5^\circ$ 附近的相向二波耦合作用，其能量具有转向的特性（图 5），所以利用这一特性可以确定非 0° 切型的 BaTiO₃ 晶体的准确切型，以及较验晶体非 0° 极化加工的结果。所以 BaTiO₃ 晶体的这种独特的相向二波耦合特性必将会得到更广泛的应用。

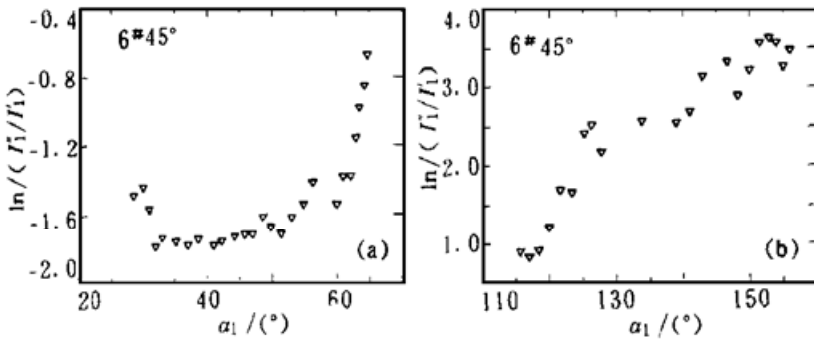


Fig. 7 $\ln(I_1''/I_1')$ of CTWM in the thin block of BaTiO₃ crystal as a function of α_1

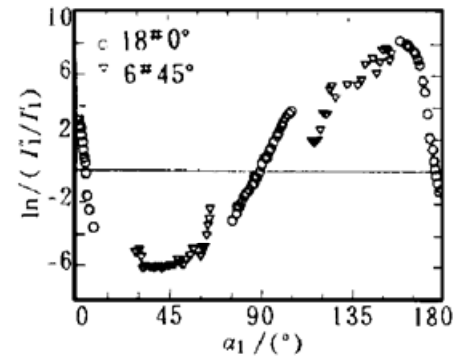


Fig. 8 $\ln(I_1''/I_1')$ of CTWM in Rh-doped BaTiO₃ crystal as a function of α_1

结 论 对 0° 和 45° 切割的具有不同掺杂和不同掺杂浓度的 BaTiO₃ 晶体的理论分析和实验研究表明，二波耦合的能量转移特性不仅依赖于光折变晶体的光生载流子的电荷符号及两束光相对于 c 轴的取向，而且依赖于晶体电光系数各分量的相对大小。在相向二波耦合实验中表现出的这种特性，可能为更深入研究光折变效应，解释光折变晶体自泵浦相位共轭现象^[7, 15]，以及确定 BaTiO₃ 晶体的切型等方面起到重要作用。

参 考 文 献

[1] 岳学锋, 邵宗书. 光折变材料及其应用. 济南: 山东科学技术出版社, 1994. 265~ 273
 [2] Gunter P, Huignard J P. Photorefractive Materials and Their Applications I, II. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 151~ 163
 [3] Fainman Y, Klancnik E, Lee S H. Optimal coherent image amplification by two-wave coupling in photorefractive BaTiO₃. *Opt. Engng.*, 1986, **25**(2) : 228~ 234
 [4] Yeh P. Two-wave mixing in nonlinear media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(3) : 484~ 519
 [5] Yeh P. Contra-directional two-wave mixing in photorefractive media. *Opt. Commun.*, 1983, **45**(5) : 323 ~ 326
 [6] Mu Xiaodong, Xu Xin'guang, Chen Jun *et al.*. Energy transfer characteristics of photorefractive contra-directional two-wave mixing. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(3, 4) : 189~ 193
 [7] Mu Xiaodong, Shao Zongshu, Zhang Jingwen *et al.*. Study on self-built optical path production in Ce-

- doped BaTiO₃ stimulated photorefractive scattering self-pumped phase conjugator. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(16) : 2275~ 2277
- [8] 许心光, 牟晓东, 邵宗书等. 掺铋 BaTiO₃ 晶体的二波耦合特性. 山东大学学报(自然科学版), 1998, **33**(1) : 52~ 57
- [9] Kukhtarev N V, Markov V B, Odulov S G *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystal. I. steady state. *Ferroelectrics*, 1979, **22**(4A) : 949~ 960
- [10] Cronin-Golomb M, Fischer B, White J O *et al.*. Theory and application of FWM in PR media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(1) : 12~ 29
- [11] Segev M, Ophir Y, Fischer B. Nonlinear multi two-wave mixing, the fanning process and its bleaching in photorefractive media. *Opt. Commun.*, 1990, **77**(2, 3) : 265~ 274
- [12] Klein M B, Valley G C. Beam coupling in BaTiO₃ at 442 nm. *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**(11) : 4901~ 4905
- [13] Yue Xuefeng, Shao Zongshu, Chen Jun *et al.*. Contradirectional two mixing in a strontium barium niobate self-pumped phase-conjugate mirror. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(2) : 142~ 144
- [14] Yue Xuefeng, Shao Zongshu, Chen Jun *et al.*. Demonstration of self-pumped phase conjugation with a laser beam incident to strontium barium niobate crystals from a negative *c* face. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(3) : 585
- [15] Mu Xiaodong, Shao Zongshu, Zhang Liangmin *et al.*. A novel internal linear cavity stimulated photorefractive scattering self-pumped phase conjugator. *Opt. Commun.*, 1997, **136**(3, 4) : 283~ 287

Coupling Characteristics of Two-Wave Mixing in Different Cut Type BaTiO₃

Xu Xinguang Mu Xiaodong Hu Juguang Shao Zongshu

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan 250100)

Xu Haiqing Luo Haosu Zhong Weizhuo

(Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 210800)

(Received 9 April 1998; revised 18 May 1998)

Abstract Characteristics of two-wave mixing in different BaTiO₃ crystal are investigated. The results of experimental and theoretical analysis show that the energy transfer characteristics of contradirectional two-wave mixing (CTWM) is different from forward two-wave mixing (FTWM). The energy transfer direction of TWM depends not only on the orientation of the crystal *c* axis and the sign of the light-induced carriers, but also on the electro-optic coefficients. The experimental observation is in good agreement with theoretical analysis of CTWM in the crystal of 0°-cut type and 45°-cut type.

Key words photorefractions, BaTiO₃, two-wave mixing, contradirectional two-wave mixing, forward two-wave mixing, electro-optic coefficients.