

文章编号: 0258-7025(2006)08-1051-05

# 单轴晶体电光调制器的温度特性

林凯燕<sup>1,2</sup>, 许 婕<sup>1</sup>, 王红成<sup>1</sup>, 余卫龙<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)  
(<sup>2</sup> 揭阳职业技术学院机电与电子工程系, 广东 揭阳 522000)

**摘要** 利用线性电光效应的耦合波理论,对单轴晶体铌酸锂电光调制器的温度特性进行了研究。通过计算机进行数值计算,详细分析出射光光强随入射光方向、温度的变化关系。发现在某些入射光方向上,出射光光强不随温度的变化而变化,并且在该方向附近,角度在一定范围内是可调的,温度的稳定性可以保持。进一步还发现,当极角  $\theta$  固定在  $0^\circ$ ,方位角  $\phi$  在  $0 \sim \pi/2$ ,温度在 243~343 K 范围内变化时,调制器的温度稳定性相当好;另外,当  $\phi$  固定在  $\pi/8$ , $\theta$  在  $0 \sim 0.0032\pi$  范围内变化时,调制器的温度稳定性也很好,出射光强对入射光强之比几乎不随温度而变化。这一结果表明,可以通过调节入射光的方向来保证调制器的温度稳定性,而这些方向是可利用线性电光效应的耦合波理论计算得出的。

**关键词** 非线性光学;线性电光效应;电光调制器;耦合波理论;温度特性

中图分类号 O 436.4 文献标识码 A

## Temperature Properties of Uniaxial Crystal Electro-Optic Modulator

LIN Kai-yan<sup>1,2</sup>, XU Jie<sup>1</sup>, WANG Hong-cheng<sup>1</sup>, SHE Wei-long<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,  
Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China

<sup>2</sup>Department of Electromechanical and Electronic Engineering, Jieyang College, Jieyang, Guangdong 522000, China

**Abstract** A wave coupling theory of linear electro-optic effect is used to investigate the temperature properties of electro-optic modulator made by a uniaxial crystal LiNbO<sub>3</sub>. The dependence of output intensity on the incident direction and the temperature is characterized by numerical calculations. It is found that along some directions, the output intensity of the modulator is insensitive to the temperature within a range of angles. Further, when the polar angle  $\theta$  is set to 0, azimuth angle  $\phi$  changes from 0 to  $\pi/2$  and the temperature  $T$  changes from 243 to 343 K, the modulator presents perfect temperature stability. In addition, when  $\phi$  is set to  $\pi/8$  and  $\theta$  changes from 0 to  $0.0032\pi$ , the temperature scarcely has effect on the ratio of output intensity to input intensity. Therefore, the temperature stability can be ensured by adjusting the incident direction of the beam, which can be obtained from the wave coupling theory of linearly electro-optic effect.

**Key words** nonlinear optics; linear electro-optic effect; electro-optic modulator; wave coupling theory; temperature property

## 1 引 言

光束振幅(强度)或相位的调制,在光通信、光信息传输、光学精密测量等方面起着关键的作用<sup>[1]</sup>。对光的调制有电光调制、声光调制、磁光调制等。电光调制因调制速率高<sup>[2]</sup>,目前已成为光通信的重要

调制技术<sup>[3,4]</sup>。电光调制的物理基础是电光效应,这包括线性电光效应(普克尔效应)和克尔电光效应。因为线性电光效应比克尔效应的作用效果明显,实际的电光调制器基本上都是根据线性电光效应原理设计的<sup>[5]</sup>。长期以来,人们主要采用折射率椭球理论对线性电光效应进行分析<sup>[6,7]</sup>。当电场的

收稿日期:2005-12-31;收到修改稿日期:2006-03-09

基金项目:国家自然科学基金(10374121,10574167)资助项目。

作者简介:林凯燕(1979—),女,广东揭阳人,中山大学硕士研究生,主要从事非线性光学方面的研究。

导师简介:余卫龙(1952—),男,中山大学教授,博士生导师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail:stils02@zsu.edu.cn

方向及光的传播方向都是任意方向时,用该理论进行器件设计将遇到难以克服的困难。受该理论的限制,过去所设计的器件,外电场只能加在某些特殊的方向上。故通常只能采用纵向调制或横向调制,可是,这两种调制方法又各有缺点<sup>[8]</sup>。纵向调制需要透明电极和较高的半波电压,而横向调制则温度稳定性很差<sup>[9]</sup>。因此,如何获得最优设计,既减少半波电压又能使调制器在很大的温度变化范围内稳定地工作就成为电光调制器设计中需要解决的问题。

不久前,W. L. She 等提出了一种全新的线性电光效应耦合波理论<sup>[10,11]</sup>。运用该理论,可以分析光在任意方向的电场作用下沿任意方向传播时线性电光效应的各种情况。这样,就可以很方便地研究入射光为任意方向的情况下调制器的温度特性。根据线性电光效应耦合波理论,此前对 LiNbO<sub>3</sub> 线性电光调制器作了优化设计,找出一个温度稳定的角度,并讨论该角度附近调制器的温度特性<sup>[12]</sup>,但未能进行全面系统的分析。本文在文献<sup>[10]</sup>和<sup>[12]</sup>的基础上,利用数值方法,详细分析 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制中出射光光强随入射光方向和温度变化的关系。其结果对拓展电光开关和电光调制器的应用会有一定的指导作用。

## 2 基本理论

文献<sup>[10]</sup>提出的线性电光效应耦合波理论,是从麦克斯韦方程出发,把入射电光晶体的光波分解为两个独立的互相垂直的线偏振分量  $E_1, E_2$  (对应于 o 光与 e 光分量),通过一系列的推导,最后得到耦合波方程并由该方程解得电光晶体出射面处的  $E_1, E_2$  光的电场强度的解析解。若记

$$\begin{cases} E_1(r) = E_1(r)a \\ E_2(r) = E_2(r)b, \\ E(0) = E_0c \end{cases} \quad (1)$$

其中  $a \cdot b = 0, a, b, c$  为单位向量,则有效电光系数可以表示为

$$\begin{cases} r_{\text{eff1}} = \sum_{i,j,k} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk}) (a_j\gamma_{jkl}b_kc_l) \\ r_{\text{eff2}} = \sum_{i,j,k} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk}) (a_j\gamma_{jkl}a_kc_l), \\ r_{\text{eff3}} = \sum_{i,j,k} (\epsilon_{jj}\epsilon_{kk}) (b_j\gamma_{jkl}b_kc_l) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\gamma_{jkl}$  为电光张量元,将前两个下标  $jk$  作以下替换:  $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23(32) \rightarrow 4, 31(13) \rightarrow 5, 12(21) \rightarrow 6$ , 三阶张量  $\gamma_{jkl}$  就简化为平常通用的电光系数  $r_{jk} \cdot \epsilon_{jj}$  和  $\epsilon_{kk}$  为介电张量的对角元,且

$$\epsilon_{jj} = n_{jj}^2, \quad \epsilon_{kk} = n_{kk}^2, \quad (3)$$

记参量  $d_i (i = 1, 2, 3, 4)$  的表达式为

$$\begin{cases} d_1 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff1}} E_0, & d_2 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff2}} E_0 \\ d_3 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff1}} E_0, & d_4 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff3}} E_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $k_0$  为光在真空中的波矢长,  $E_0$  为外加电场强度,  $n_1, n_2$  为  $E_1, E_2$  光在介质中的折射率。则由耦合波方程

$$\begin{cases} \frac{dE_1(r)}{dr} = -id_1 E_2(r)e^{i\Delta k r} - id_2 E_1(r) \\ \frac{dE_2(r)}{dr} = -id_3 E_1(r)e^{i\Delta k r} - id_4 E_2(r) \end{cases}, \quad (5)$$

解得电光晶体出射面的  $E_1, E_2$  光的电场强度的解析解为

$$E_1(\omega) = E_1(r)e^{ik_1 r} = \rho_1(r)e^{i(k_1+\beta)r} e^{i\phi_1(r)}, \quad (6)$$

$$E_2(\omega) = E_2(r)e^{ik_2 r} = \rho_2(r)e^{i(k_2+\beta)r} e^{i\phi_2(r)}, \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} \rho_1(r) = \sqrt{E_1^2(0)\cos^2(\mu r) + \left[\frac{\gamma E_1(0) - d_1 E_2(0)}{\mu}\right]^2 \sin^2(\mu r)}, \\ \phi_1(r) = \arg\left\{E_1(0)\cos(\mu r) + i\left[\frac{\gamma E_1(0) - d_1 E_2(0)}{\mu}\right]^2 \sin(\mu r)\right\}, \\ \rho_2(r) = \sqrt{E_2^2(0)\cos^2(\mu r) + \left[\frac{\gamma E_2(0) + d_3 E_1(0)}{\mu}\right]^2 \sin^2(\mu r)}, \\ \phi_2(r) = \arg\left\{E_2(0)\cos(\mu r) - i\left[\frac{\gamma E_2(0) + d_3 E_1(0)}{\mu}\right]^2 \sin(\mu r)\right\}, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \beta = (\Delta k - d_2 - d_4)/2, \\ \mu = \sqrt{(\Delta k + d_2 - d_4)^2 + 4d_1 d_3}/2, \\ \gamma = (d_4 - d_2 - \Delta k)/2, \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\Delta k = k_2 - k_1$ , 而  $k_i = n_i k_0, i = 1, 2, E_1(0), E_2(0)$  分别为  $E_1, E_2$  光在入射处的振幅值,  $r$  为电光晶体长度。

对正交偏振系统,根据线偏振光干涉的原理可以求得输出光强为

$$I_{out} = \frac{\rho_1^2(r) + \rho_2^2(r) - 2\rho_1(r)\rho_2(r)\cos[\phi_1(r) - \phi_2(r)]}{2} \quad (10)$$

### 3 LiNbO<sub>3</sub> 晶体电光调制器的温度特性

LiNbO<sub>3</sub> 晶体已被广泛用于制造电光调制器,但这种晶体的折射率对温度的变化比较敏感<sup>[13,14]</sup>。考虑温度影响,LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体的主折射率为温度的函数,其折射率色散公式为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} n_o^2 = 4.9130 + \frac{0.1173 + 1.65 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.78 \times 10^{-2} \lambda^2, \\ n_e^2 = 4.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 + \frac{0.097 + 2.7 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.24 \times 10^{-2} \lambda^2, \end{cases} \quad (11)$$

其中  $T$  为温度(单位 K),  $\lambda$  为入射光波长(单位  $\mu\text{m}$ )。设  $\mathbf{k}_1$  (或  $\mathbf{k}_2$ ) 与光轴 ( $z$  轴) 的夹角为  $\theta$ , 而  $\mathbf{k}_1$  (或  $\mathbf{k}_2$ ) 在  $xy$  平面的分量与  $x$  轴的夹角为  $\phi$ ; 于是

$$\begin{cases} \mathbf{a} = [\sin\phi, -\cos\phi, 0] \\ \mathbf{b} = [-\cos\theta\cos\phi, -\cos\theta\sin\phi, \sin\theta] \end{cases}, \quad (12)$$

利用折射率方程

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2} + \frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2}, \quad (13)$$

可得  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$  光在介质中的折射率  $n_1 = n_o, n_2 = n_e(\theta)$ 。LiNbO<sub>3</sub> 晶体的非零电光张量元素分别为  $r_{12} = -3.4, r_{13} = 8.6, r_{33} = 30.8, r_{42} = 28, r_{22} = -r_{12}, r_{23} = r_{13}, r_{51} = r_{42}$  和  $r_{61} = r_{12}$  (单位是  $10^{-12} \text{m/V}$ )<sup>[6]</sup>。另外,不妨设  $E_1(0) = E_2(0) = 1 \text{ V/m}, \mathbf{c} = [\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0], \lambda_0 = 500 \text{ nm}, r = 2.5 \text{ cm}, E_0 = 200 \text{ V/cm}$ 。为了方便地对电光调制温度稳定性进行研究,计算入射光为任意方向时出射光强对温度的导数  $I'_{out}$ 。图 1 给出了  $T = 300 \text{ K}$  时  $I'_{out}$  随  $\theta$  和  $\phi$  的变化关系(在其他温度情况下,结果具有相似性)。可注意到,在某些角度区域内,  $I'_{out} = 0$ , 出射光的光强几乎不随温度变化。下面选其一组  $\theta = 0, \phi = \pi/8$  进行讨论。

我们发现,当  $\theta = 0, \phi$  在  $0 \sim \pi/2$ , 温度在  $243 \sim 343 \text{ K}$  (即  $-30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的范围内变化时,调制器的温度稳定性都相当好,如图 2 所示。

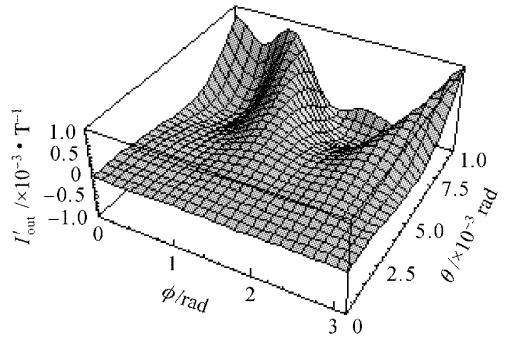


图 1 出射光强  $I'_{out}$  对温度的偏导数随  $\theta, \phi$  变化的关系图

Fig. 1 Partial derivative of output intensity  $I'_{out}$  on the temperature  $T$  as a function of  $\theta$  and  $\phi$

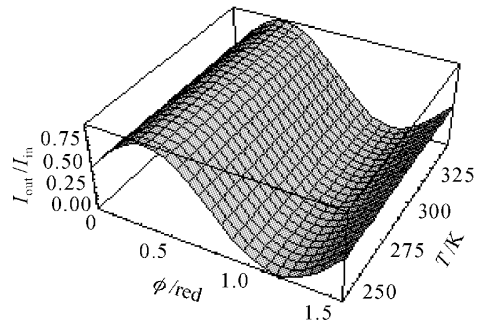


图 2  $\theta = 0$  时出射光强与入射光强的比值随  $\phi$  和温度  $T$  的变化关系图

Fig. 2 Ratio of output intensity to input intensity as a function of  $\phi$  and  $T$  when  $\theta = 0$

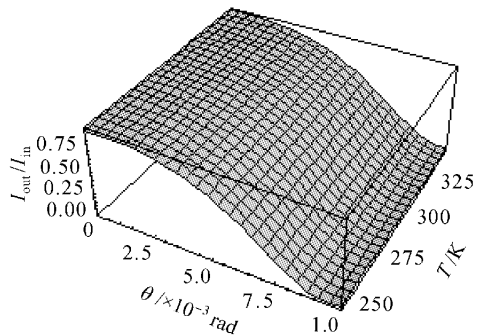


图 3  $\phi = \pi/8$  时出射光强与入射光强的比值随  $\theta$  和温度  $T$  的变化关系图

Fig. 3 Ratio of output intensity to input intensity as a function of  $\theta$  and  $T$  when  $\phi = \pi/8$

另外,当  $\phi = \pi/8, \theta$  在  $(0 \sim 0.0032\pi)$  的范围内变化时,调制器的温度稳定性也较好。图 3 为  $\phi = \pi/8, \theta$  在  $(0 \sim 0.0032\pi)$  范围内变化时,  $I_{out}/I_{in}$  随  $T$  的变化关系。在此范围内,  $I_{out}/I_{in}$  几乎不随  $T$  变化,但随  $\theta$  增大则逐步变小,在  $\theta = 0.0032\pi$  时,  $I_{out}/I_{in} = 0$ 。

计算表明,在其他一些方向上出射光强受温度的影响很大,例如图 4 所示的情况 ( $\theta = 0.2\pi, \phi = 0.8\pi$ )。

我们也研究了  $\theta = \pi/2$  的情况,发现出射光强受温度变化的影响也很大,但当保持在一定的温度时, $\phi$  在  $0.063\pi$  到  $\pi/6$  的范围内调节,出射光强却较为稳定,如图 5 所示。

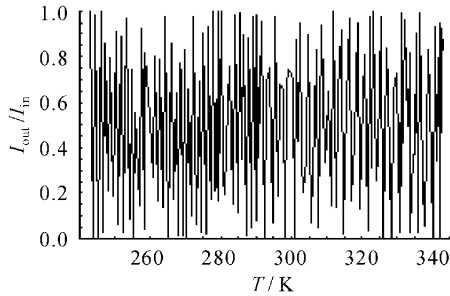


图 4  $\theta = 0.2\pi, \phi = 0.8\pi$  时出射光强与入射光强的比值随温度变化的关系图

Fig. 4 Ratio of output intensity to input intensity as a function of the temperature  $T$  when  $\theta = 0.2\pi, \phi = 0.8\pi$

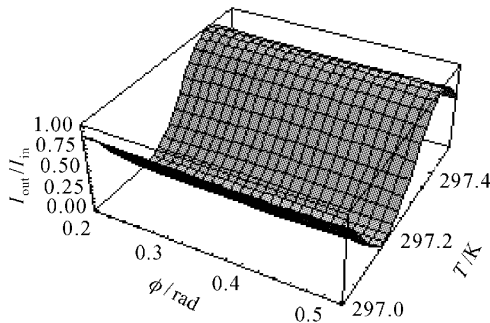


图 5  $\theta = \pi/2$  时出射光强与入射光强的比值随  $\phi$  和温度  $T$  的变化关系图

Fig. 5 Ratio of output intensity to input intensity as a function of  $\phi$  and  $T$  when  $\theta = \pi/2$

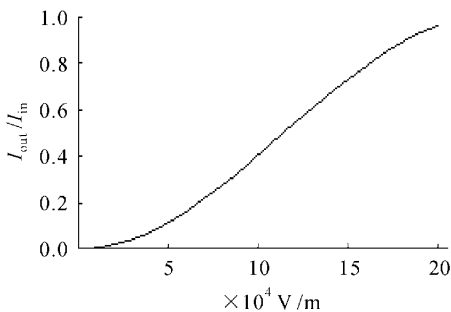


图 6  $\theta = 0, \phi = \pi/8, T = 298\text{ K}$  时出射光强与入射光强的比值随外加电场  $E_0$  的变化曲线图

Fig. 6 Ratio of output intensity to input intensity versus the external electric field  $E_0$  when  $\theta = 0, \phi = \pi/8, T = 298\text{ K}$

以上例子说明,利用电光效应耦合波理论方法,可以找到一系列温度稳定的方向,这样就解决了以前严重困扰电光调制器的温度敏感性问题。因温度稳定角度的选取范围已知,从而大大地降低了器件设计和实验实现的难度。从温度稳定的角度范围中任意选取一个方向,就可以计算出出射光强与入射光强的比值随外加电场  $E_0$  的变化曲线,从而得到半波电压。图 6 为  $\theta = 0, \phi = \pi/8, T = 298\text{ K}$  时的情况。若取其他角度也可以得出类似的结果。

### 4 结 论

以线性电光效应的耦合波理论为基础,研究了单轴晶体  $\text{LiNbO}_3$  的电光调制中出射光光强与入射光方向、温度的依赖关系,找出一系列合适的角度,为电光调制器的最优化设计提供依据。这套方法也适用于其他电光晶体,应用范围很广,而且原理简单,仅仅运用角度调节,就解决了调制器温度稳定性的问题。它容易实现,避免了以往理论所带来的困难,可供光器件的设计者参考。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Minghua, Zhao Xu. Recent progress on ultrahigh speed optical modulator [C]. *SPIE*, 2000, **4225**:263~266
- 2 Song Yuan, Jin Guolian, Liang Binming. Physical mechanism of the refractive index change in the  $\text{LiNbO}_3$  waveguides [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(10):1025~1028  
宋 媛, 金国良, 梁斌明. 铌酸锂波导中折射率改变的物理机制研究[J]. *光电子 • 激光*, 2001, **12**(10):1025~1028
- 3 N. C. J. van der Valk, T. Wenckebach, P. C. M. Planken. Full mathematical description of electro-optic detection in optically isotropic crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(3):622~631
- 4 Y. Q. Lu, M. Xiao, G. J. Salamo. Wide-bandwidth high frequency electro-optic modulator based on periodically poled  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(8):1035~1037
- 5 Jiang Minhua. Crystallography [M]. First edition. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1980. 318~322  
蒋民华. 晶体物理[M]. 第一版. 济南: 山东科学技术出版社, 1980. 318~322
- 6 A. Yariv. Quantum Electronics [M]. Third edition. Liu Songhai, Wu Cunkai, Wang Mingchang transl.. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988. Chapter 14  
A. 亚里夫. 量子电子学[M]. 第三版. 刘颂豪, 吴存恺, 王明常译. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 第 4 章
- 7 M. J. Gunning, R. E. Raab. Systematic eigenvalue approach to crystal optics; an analytic alternative to the geometric ellipsoid model [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(8):2199~2207
- 8 Zheng Guoliang, She Weilong. A temperature insensitive design for electro-optic modulator and variable optical attenuator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1077~1080  
郑国梁, 余卫龙. 温度不敏感电光调制器和保偏光衰减器设计 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1077~1080
- 9 Dong Xiaoyi. The Electronics of Light Wave [M]. First edition. Tianjin: Nankai University Press, 1987. 312~356

- 董孝义. 光波电子学[M]. 第一版. 天津: 南开大学出版社, 1987. 312~356
- 10 W. L. She, W. K. Lee. Wave coupling theory of linear electrooptic effect [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**:303~305
- 11 D. D. Wu, H. B. Chen, W. L. She *et al.*. Wave coupling theory of the linear electro-optic effect in a linear absorbent medium [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11):2366~2371
- 12 Chen Haibo, She Weilong. Temperature dependence of electrooptic modulator and its optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1353~1357  
陈海波, 余卫龙. 电光调制器的温度特性及其最优化设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(10):1353~1357
- 13 Xu Hao, Shen Hongyuan. Expressions of thermal refractive index coefficients for LiNbO<sub>3</sub> crystal heavily doped with magnesium [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4):393~397  
徐浩, 沈鸿元. 高掺镁 LiNbO<sub>3</sub> 晶体折射率温度系数的表示式[J]. 光学学报, 1994, **14**(4):393~397
- 14 Tang Duoqiang, Zhang Haibin, Hu Hongzhang *et al.*. Temperature property of integrated AOTF and its high accuracy digital control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):629~632  
唐多强, 张海斌, 胡鸿璋 等. 集成光学声光可调滤波器的温度特性及其精密数字控制[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):629~632
- 15 Zhang Kecong, Wan Ximin. *Nonlinear Optical Crystal Materials* [M]. First edition. Beijing: Science Press, 1996. 201~203  
张克从, 王希敏. 非线性光学晶体材料科学[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1996. 201~203

## 中国光学学会 2006 年学术大会的通知

### 2006' General Congress of Chinese Optical Society

**会议时间:**2006 年 9 月 3~5 日

**会议地点:**中国·广州

**主办单位:**中国光学学会

**承办单位:**华南师范大学, 广东省光学学会

**展馆地点:**中国·深圳(2006 年 9 月 6~9 日)

**协办单位:**清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

**会议宗旨:**两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3~5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

**会议名誉主席:**王大珩(中国科学院)

**会议主席:**母国光(南开大学)

**节目委员会主席:**金国藩(清华大学)

**组织委员会主席:**刘颂豪(华南师范大学)

**大会秘书长:**邢达(华南师范大学)

大会安排 15 个专题会议(分会场): 1) 量子光学与非线性光学, 2) 生物与医学光学, 3) 激光物理与技术, 4) 光学功能材料, 5) 集成光子学与光纤光学, 6) 光通信与光传感, 7) 光学存储与光全息, 8) 工程光学与光学制造, 9) 光电技术与系统, 10) 光学薄膜技术, 11) 超快光学, 12) 光学微系统与微纳米技术, 13) 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14) 激光加工技术, 15) 光学教学研究

**会议论文提交截止时间:**2006 年 6 月 15 日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

**承办单位地址:**广州市华南师范大学信息光电子科技学院, 邮政编码:510631

**电话:**+86-020-39310309, +86-020-85216848, **传真:**+86-020-39310311, **联系人:**崔红丽, 罗爱平

**电子邮箱:**guangd@scnu.edu.cn(崔红丽), luoaiping2003@126.com(罗爱平)

本会议建立了会议网页, 网址为: <http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请访问浏览, 了解会议细节和相关的最新信息。