

顺电相 KLTN 晶体 Kerr 系数和透射率的 数字全息测量

邱 阳 吕且妮 赵 爽 周期辉

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出一种用于顺电相晶体 Kerr 系数和透射率的数字全息测量方法。该方法是数字记录晶体在不同电压时的全息图,再现数字全息图,得到晶体的复振幅信息,即振幅和相位分布。由晶体的振幅分布获得晶体的透射率;由相位分布得到不同电压差时的折射率变化量,从而计算得到晶体的电光系数。对顺电相 $\text{Mn}_{0.25}\%:\text{KLTN}$ 晶体进行了测量,记录了不同入射光模式以及不同电压时的数字全息图,得到了晶体透射率 T 和电光系数 R_{11} 、 R_{12} 。研究表明,该方法可用于顺电相晶体电光系数和透射率的测量,并且对晶体形状,照明光斑大小没有要求。

关键词 数字全息;钽铌酸钾锂晶体;透射率测量;电光系数测量

中图分类号 O438; O799

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.090902

Simultaneous Measurement of Electrooptic Coefficient and Transmittance of KLTN Crystal with Digital Holography

Qiu Yang Lü Qieni Zhao Shuang Zhou Qihui

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract We present a method of measuring the transmittance and Kerr coefficients of a paraelectric crystal by digital holography. Digital holograms of the crystal with different voltage are recorded, the amplitude and phase information are extracted from numerically reconstructed image. The transmittance of crystal is measured by use of the amplitude information, and the spatial distribution of the induced refractive index change can be obtained by different phase of different voltage and the effective electro-optic coefficient is calculated by means of the refractive index change. Experiment has been carried out by examining a paraelectric phase $\text{Mn}_{0.25}\%:\text{KLTN}$ crystal, and the research results show that the method presented in this paper is successful and feasible, which are irrelevant at the shape of crystal and the size of light source.

Key words digital holography; potassium lithium tantalate niobate crystal; transmittance measurement; electrooptic coefficient measurement

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 090.28801

1 引 言

掺杂的顺电相钽铌酸钾锂(KLTN)晶体具有较大的二次电光系数,高的衍射效率和(亚)纳秒级的响应时间^[1-4],可用于光存储、光开关等领域^[5-7],是目前被认为用作电控全息光开关的最佳材料,也是非线性光学研究的重点材料之一。折射率和电光系数是表征晶体光学性质的重要物理量,也是衡量晶体材料及其电光性能优劣的重要参数。目前已提出多种测量方法,如文献[8,9]用最小偏向角测量了 KLTN 晶体的折射率,利用干涉法和椭圆偏法测量晶体的二次电光系数。

数字全息,即物场的全息图直接以数字方式记录在 CCD 上,再以数字方式再现,同时获得 3D 物体的振

收稿日期: 2013-05-17; 收到修改稿日期: 2013-06-09; 网络出版日期: 2013-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61077072)

作者简介: 邱 阳(1987-),女,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: qiuyang19871226@126.com

导师简介: 吕且妮(1966-),女,博士,副教授,主要从事数字全息和粒子测量等方面的研究。E-mail: qienil@tju.edu.cn

(通讯联系人)

幅和相位信息,整个过程简单,灵活,更便于进行定量分析,测量,已作为一种新的方法用于各种领域^[10-13]。数字全息测量晶体电光系数和透射率的方法目前未见报道。本文提出利用数字全息法测量 KLTN 晶体的电光系数。同时,利用再现物光波的强度信息获得 KLTN 晶体的透射率。这种非接触测量方法较其他光学方法相比可一次性获得晶体多个参数,同时具有原理简单、测量方便、直接和成本低等特点,为晶体光学参数测量提供一种新的测量方法。

2 全息图的数字记录光路系统和数字再现

图 1 所示为 KLTN 晶体电光系数 R 及其透射率 T 测量的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)型数字全息实验光路系统示意图。其中 BE 为扩束准直系统;PBS 为偏振分束棱镜;M1,M2 为反射镜;BS 为分束棱镜; $\lambda/2$ 为 $1/2$ 波片;HV 为直流电压加载系统;TC 为温度控制系统。波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的半导体激光器发出的细光束,经扩束准直系统 BE 变为直径为 20 mm 的平行平面宽光束,经偏振分束棱镜 PBS 分为两束偏振状态互相垂直的偏振光。通过在任意臂中加入 $1/2$ 波片,使这两束光在 CCD 上发生叠加干涉,形成数字全息图,存储于计算机。实验中所用 CCD 为 GRAS-50S5M-C 型相机,像素尺寸 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,敏感像素数 2448×2048 ,HV 为电压加载系统,最高电压 600 V ,TC 为温度控制系统,精度为 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

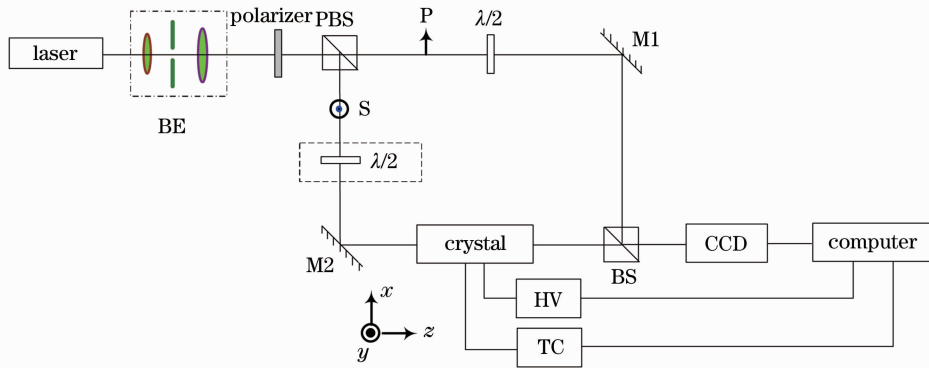


图 1 实验光路系统示意图

Fig. 1 Experimental setup

设记录在 CCD 面 (x, y) 上的光场强度分布为

$$I(x, y) = |o(x, y)|^2 + R^2 + Ro(x, y)\exp(i2\pi x \sin \alpha / \lambda) + Ro^*(x, y)\exp(-i2\pi x \sin \alpha / \lambda), \quad (1)$$

式中 $o(x, y)$ 为记录在 CCD 上的物光波分布, $R(x, y) = R\exp(-i2\pi x \sin \alpha / \lambda)$ 为参考光波, α 为参考波与全息图法线方向的夹角, λ 为记录光波波长。在线性记录条件下,全息图的透过滤函数为 $t(x, y) \propto I(x, y)$ 。在图 1 中,设物光波分布 $o(x, y; 0)$ 的角谱 $\tilde{O}(k_x, k_y; 0)$ 为^[14]

$$\tilde{O}(k_x, k_y; 0) = \mathcal{F}[o(x, y; 0)], \quad (2)$$

式中 k_x, k_y 分别为 x 方向和 y 方向的空间频率。则在 z 平面上的角谱 $\tilde{O}(k_x, k_y; z)$ 分布为

$$\tilde{O}(k_x, k_y; z) = \tilde{O}(k_x, k_y; 0)\exp(ik_z z), \quad (3)$$

式中 $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ 。实像再现像面上的光场分布为

$$O'(x', y'; z) = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{O}(k_x, k_y; z)] = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{O}(k_x, k_y; 0)\exp(ik_z z)], \quad (4)$$

其光场强度和相位分布分别为

$$I'(x', y') = O'(x', y')O'^*(x', y'), \quad (5)$$

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im } O'(x', y')}{\text{Re } O'(x', y')}, \quad (6)$$

式中的 Re 和 Im 分别为复振幅的实部和虚部。

若没有晶体时的物光波的复振幅为 $O'_0(x', y')$, 则晶体的透射率 T 可表示为

$$T(x, y) = \frac{|O'(x', y')|^2}{|O'_0(x', y')|^2}, \quad (7)$$

将不同电压时的相相位减得到对应的包裹相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 为

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y), \quad (8)$$

对包裹相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 解包裹, 得到真实的晶体相位差分布 $\delta'(x, y)$ 。则晶体折射率变化量 $\Delta n(x, y)$ 为

$$\Delta n(x, y) = \lambda\delta'(x, y)/(2\pi d). \quad (9)$$

根据折射率变化量 $\Delta n(x, y)$ 与有效电光系数 R_{eff} 关系^[15]

$$\Delta n = n - n_0 = -\frac{1}{2}n_0^3 R_{\text{eff}} E^2 \quad (10)$$

得到 R_{eff} , 式中 n_0 为折射率常数, E 为施加的外电场。

3 实验结果及分析

搭建图 1 所示的实验光路系统, 实验所用的晶体为 $3.7 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 的顺电相 $\text{Mn}_{0.25}\% : \text{KLTN}$ 晶体。将电极用导电银胶固定在晶体上, 沿 y 轴方向加载电压, 实验时保持室温温度 $T = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (高于居里温度 $3 \text{ }^\circ\text{C}$)。开启电压加载系统, 记录不同电压和不同入射光模式时的全息图。图 2(a) 为 TM 模式的偏振光照射晶体所记录的全息图, 其中电压 $U = 0$ 。对图 2(a) 利用角谱再现算法数字再现, 其傅里叶频谱、再现像及包裹相位分布如图 2(b)~(d) 所示。图 3(a)~(d) 分别给出了在 $U = 600 \text{ V}$, TM 模式时, 所记录的全息图、频谱、再现像和包裹相位图。图 4(a) 给出了 TM 模式, $U = 0 \text{ V}$ 和 $U = 600 \text{ V}$ 状态下, 将图 2(a) 和图 3(a) 两幅全息图直接相加, 角谱法数字再现得到包含不同状态下物光波信息的干涉场, 采用最小二乘余弦解包裹算法, 对图 4(b) 所示的包裹相位进行解包裹, 其三维分布如图 4(c) 所示。

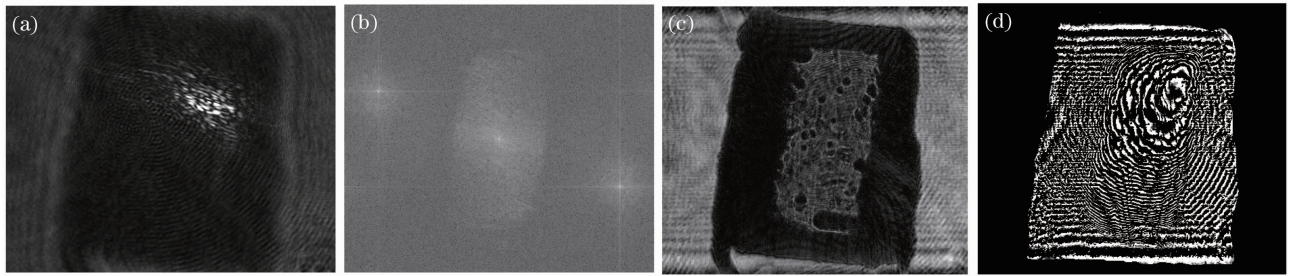


图 2 电压 $U = 0 \text{ V}$ 时的实验结果。(a) 全息图; (b) 频谱图; (c) 再现像; (d) 包裹相位

Fig. 2 Experimental results when $U = 0 \text{ V}$. (a) Hologram; (b) frequency spectrum; (c) reconstructed image; (d) wrapped phase

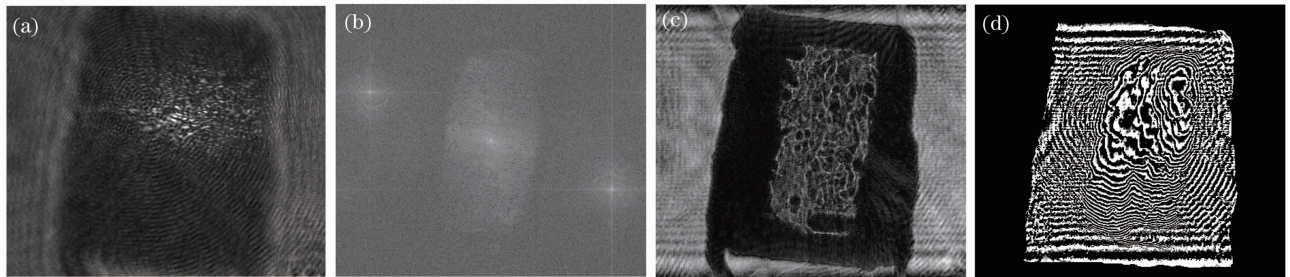


图 3 电压 $U = 600 \text{ V}$ 时的实验结果。(a) 全息图; (b) 频谱图; (c) 再现像; (d) 包裹相位

Fig. 3 Experimental results when $U = 600 \text{ V}$. (a) Hologram; (b) frequency spectrum; (c) reconstructed image; (d) wrapped phase

图 5 为不同入射光模式照射 $\text{Mn}_{0.25}\% : \text{KLTN}$ 晶体, 其透射率与电压的关系曲线。图 5(a)~(b) 中实线圆所示为用数字全息法 (Holography) 测量得到的结果, 为了验证本文所提出的数字全息法测量透射率的可行性及正确性, 实验中用功率计光强法 (Intensity) 对晶体的透射率进行了测量, 其结果如图 5 中实线方形所示。由图 5 可以看出, 利用数字全息方法测得的透射率与功率计测得的结果一致, 且透射率与所加电压大小无关, 与入射光模式也无关。

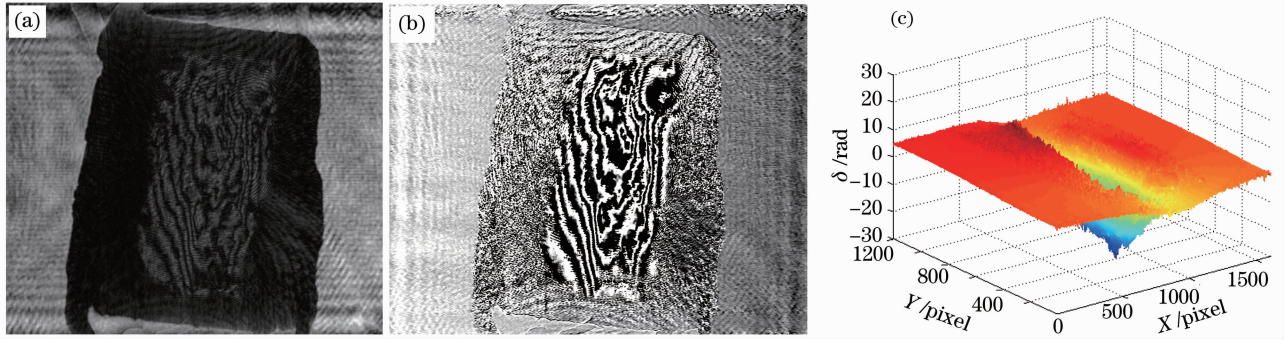


图4 (a) 晶体干涉图; (b) 包裹相位差; (c) 图(b)解包裹相位差的三维分布

Fig. 4 (a) Interferogram of the crystal; (b) wrapped phase difference; (c) 3D distribution of unwrapped phase of Fig(b)

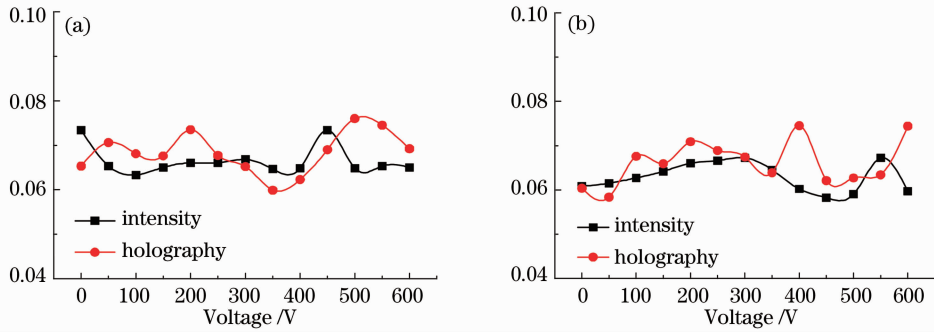


图5 不同电压下晶体透射率测量结果。(a) TE模式; (b) TM模式

Fig. 5 Transmittance with respect to the applied voltage of 0 V to 600 V. (a) TE mode; (b) TM mode

将不同电压下的全息图采用角谱再现算法再现,由(2)式计算得到不同电压时的包裹相位。电压 $U \neq 0$ 时的包裹相位与 $U=0$ 时的包裹相相位减,得到不同电压差 ΔU 时的相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 。采用最小二乘余弦解包裹算法对 $\Delta\varphi(x, y)$ 解包裹,得其真实相位分布 $\delta'(x, y)$ 。根据(9)式计算得到 $Mn_{0.25\%}$:KLTN 晶体折射率变化量 $\Delta n(x, y)$ 。对不同电压时的最大值 Δn ,采用非线性最小二乘拟合法进行拟合,其拟合曲线如图 6 所示,其中拟合公式为 $\Delta n = aU^2$ 。当入射光为 TM 模式时,系数 $a = n_0^3 R_{11} / (2l^2) = -2.6675 \times 10^{-10}$; 对于 TE 模式的入射光, $a = n_0^3 R_{12} / (2l^2) = 1.3833 \times 10^{-11}$, 其中 $l = 2.2 \text{ mm}$ 为电极方向晶体厚度,折射率常数 $n_0 = 2.3^{[8]}$ 。经计算得 $Mn_{0.25\%}$:KLTN 晶体电光系数 $R_{11} = 2.12 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$, $R_{12} = -0.11 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$, 这一计算结果与文献[8]中结果的数量级一致。

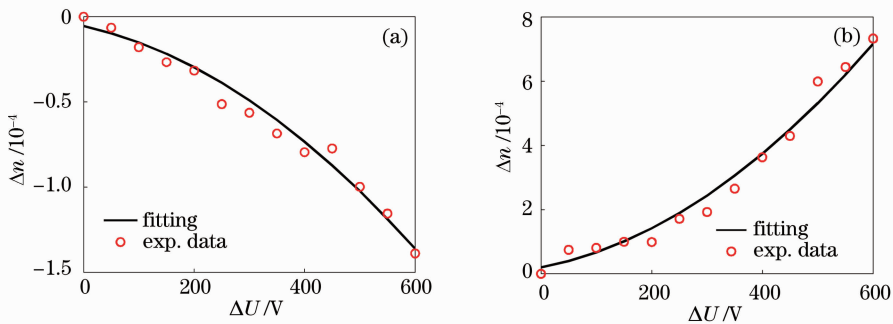


图6 折射率变化量 Δn 与电压差 ΔU 的关系曲线。(a) TM模式; (b) TE模式

Fig. 6 Δn versus ΔU . (a) TM mode; (b) TE mode

4 结 论

提出一种基于数字全息测量 KLTN 晶体电光系数和透射率的方法。该方法是基于 Mach-Zehnder 型数

字全息系统,记录 $\text{Mn}_{0.25\%}:\text{KLTN}$ 晶体的数字全息图,数字再现得到晶体的复振幅,进而得到晶体的透射率和相位分布。将不同电压时的相相位减获得相应的相位差分布,采用最小二乘余弦法对其解包裹,得到晶体的真实相位分布,进而计算得到晶体的折射率变化量,从而求得电光系数 R_{11} 和 R_{12} 。研究结果证明了该方法的可行性。这种非接触测量方法具有原理简单、测量方便、直接和成本低等特点,为晶体光学参数测量提供一种新的测量方法。

致谢 特别感谢哈尔滨工业大学理学院周忠祥教授和田浩副教授,以及国防科学技术大学季家睿教授在材料方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Hao Tian, Zhongxiang Zhou, Dewei Gong, *et al.*. Photorefractive properties of paraelectric potassium lithium tantalite niobate crystal doped with iron[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(6): 1720–1724.
- 2 Hao Tian, Zhongxiang Zhou, Dewei Gong, *et al.*. Enhanced photorefractive properties of paraelectric potassium-lithium-tantalite-niobate by manganese doping[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41(9): 095105.
- 3 Noam Sapiens, Aharon Weissbrod, Aharon J Agranat. Sub nanosecond electroholographic switching [C]. *Laser and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference*. Baltimore, Maryland, America, 2009: JW31~2.
- 4 Noam Sapiens, Aharon Weissbrod, Aharon J Agranat. Fast electroholographic switching[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 353–355.
- 5 A J Agranat. Electroholographic artificial neural networks[J]. *Physika A*, 1993, 200(1-4): 608–612.
- 6 B Pesach, G Bartal, E Refaeliet, *et al.*. Free space optical cross-connect switch by use of electroholography[J]. *Appl Opt*, 2000, 29(5): 746–758.
- 7 B Pesach, E Refeali, A J Agranat. Investigation of the holographic storage capacity of paraelectric $\text{K}_{1-x}\text{Li}_x\text{Ta}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_3$ [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(8): 642–644.
- 8 Hao Tian, Zhongxiang Zhou, Haifeng Wang, *et al.*. Optical properties of cubic $\text{K}_{0.95}\text{Li}_{0.05}\text{Ta}_{0.61}\text{Nb}_{0.39}\text{O}_3$ single crystal[J]. *Optical Materials*, 2008, 31:106–109.
- 9 Chen Qizhen, Tian Hao, Zhou Zhongxiang, *et al.*. Electro-optic property and voltage-controlled diffractive property of Fe-doped potassium sodium tantalate niobate crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0706002.
陈启珍,田浩,周忠祥,等.掺Fe的钽铌酸钾钠晶体的电光及电控衍射性能[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0706002.
- 10 M Mosrraf Hossain, Dalip Singh Metha, Chandra Shakher. Refractive index determination: an application of lensless Fourier digital holography[J]. *Opt Engng*, 2006, 45(10): 106203.
- 11 Lü Qieni, Ge Baozhen, Gao Yan, *et al.*. Simultaneous measurement of size and velocity of alcohol spray with digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 266–270.
吕且妮,葛宝臻,高岩,等.乙醇喷雾场粒子尺寸和速度的数字全息测量[J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 266–270.
- 12 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of Chinese medical decoction pieces[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0209002.
王华英,郭中甲,张志会,等.基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209002.
- 13 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongxia, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309002.
马利红,王辉,金洪霞,等.数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309002.
- 14 L Yu, M K Kim. Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(16): 2092–2094.
- 15 A J Agranat. *Infrared holography for optical communications*[M] New York: Springer, 2003. 129–156.