

光折变晶体中反射型多重全息图的 布喇格偏移*

李宝胜 袁 泉 陶世荃

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

提要 从理论上研究了光折变反射型全息光栅的布喇格偏移问题,着重研究了布喇格偏移随写入时间的演变。实验证实了反射型光栅确实存在布喇格偏移现象,验证了布喇格偏移量随写入时间的演变与折射率调制度随写入时间的演变有相同的规律。实验表明,在大容量全息存储中,曝光时间很短的全息图可以在记录角度读出,而布喇格偏移的影响可以忽略。

关键词 全息存储,读出条件,布喇格偏移

1 引 言

体全息存储技术能实现高密度存储(10^{12} bit/cm³ 量级)和高速并行的数据存取,在光学图像数据库、光学神经网络以及模式识别等领域有着广阔的应用前景,因此日益受到科研工作者的重视。目前关于全息存储器的存储机理、存储材料、复用技术等方面的研究都有了重大进展,但在存储器的性能方面,准确地再现数据或图像仍然是体全息存储器读出系统的基本问题。

基于布喇格衍射的角度和波长选择性^[1]是利用体全息技术获得高密多重存储的基本依据。但另一方面,布喇格条件也对体积型材料中大容量体全息存储的读出条件提出了苛刻的要求。以角度复用为例,如果读出角度偏离布喇格条件,就不能获得理想的衍射效率,并可能引起像质的恶化。根据 Kogelnik 的耦合波理论,对于理想的静态全息记录材料,满足布喇格条件的最佳读出角度(布喇格入射角)即为写入全息图时参考光的角度。光折变晶体是位相型体全息存储材料,具有高存储容量、高衍射效率以及存储的信息可以被反复擦除和刷新等优点,因而成为体全息存储的首选材料。但是,在光折变晶体中由于双光束之间的动态耦合和自衍射,使光束干涉的等相面会发生弯曲或倾斜^[2],导致全息图的最佳读出角度往往不同于写入参考光角度^[3],我们称此现象为布喇格偏移。显然,布喇格偏移的存在,使光折变晶体中体全息存储的最佳读出条件变得复杂。

对于透射型光折变光栅在稳态条件下布喇格偏移的问题,已经有了较为充分的研究^[3,4],但对于反射型全息光栅,仅有文献[3]在光栅相移为 0 和 $\pi/2$ 的条件下给出了布喇格偏移的数值解。由于反射型全息光路特别适合于盘式全息存储,而且多重存储器中绝大多数全息图的记

* 国家自然科学基金和北京市自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-08-18; 收到修改稿日期: 1998-12-07

录未达稳态,属于动态的范畴,故研究光折变晶体中反射型多重全息图的布喇格偏移是十分必要的。本文从理论和实验两方面研究在多重存储条件下反射型光栅的布喇格偏移规律。

2 数值计算和理论分析

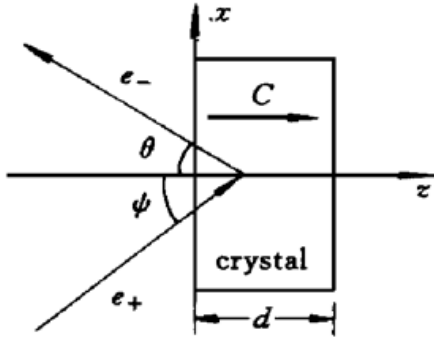


图1 反射型光栅读出光路配置
Fig. 1 Readout of a reflection-type photorefractive grating

假设读出光与原参考光有相同的波长和偏振态,而且读出光的强度足够低,不足以改变已经记录下来的光栅。根据 Heaton 等关于稳态全息光栅的再现模型,允许读出光在原参考光附近一定角度范围内再现光栅。令 e_+ 为读出光, e_- 为再现出的信号光, C 轴方向为晶轴方向, θ 为写入光的入射角(设为对称入射), ψ 为读出光的入射角, d 为晶体的厚度(见图 1)。描述反射型光栅再现过程中两波耦合的微分方程组为^[3]

$$\frac{de_+}{dz} - j\kappa e_- \exp[+j(\phi + \delta_k z)] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{de_-}{dz} + j\kappa e_+ \exp[-j(\phi + \delta_k z)] = 0 \quad (2)$$

其中, $\kappa = \Gamma \frac{\cos\theta}{\cos\psi} = \{m_0 \exp(2\Gamma \sin\Phi_g z) / [(1 - m_0)^2 + 4m_0 \exp(2\Gamma \sin\Phi_g z)]\}^{1/2}$, $\delta_k = 4\pi n(\cos\psi - \cos\theta) / \lambda$, $\phi = \Gamma \cos\Phi_g z$, $m_0 = \frac{m(1+m)}{m + \exp(2\Gamma \sin\Phi_g d)}$ 。式中 n 为晶体的折射率, λ 为光波波长, m 为记录光栅时物光与参考光的强度之比(简称物参比), Φ_g 为光栅相移, Γ 为耦合系数。光栅相移 Φ_g 表征折射率光栅相对于光波干涉花样的相移; 耦合系数 Γ 与光致空间电荷场的强度有关, Γd 称为耦合强度。微分方程组的边界条件为 $e_-(d) = 0$, $e_+(0) = 1$ 。式中 ψ, θ 均在晶体内部取值, 为了便于与实验结果比较, 应根据折射定律转化为外部角度 $\psi_{\text{ext}}, \theta_{\text{ext}}$ 。通过对一系列读出角度 θ_{ext} , 求微分方程组(1), (2) 的数值解, 得到光栅衍射效率 η ($\eta = |e_-(0)|^2$) 与读出角度的关系曲线, 曲线上峰值衍射效率对应的读出角度(最佳读出角度) 与原参考光入射角度的偏离即为布喇格偏移, 记为 $\Delta\theta_{\text{opt}}$ 。

对大容量体全息存储来说, 绝大多数全息图的写入都未达到稳态。由于光折变晶体具有慢时间响应特性, 合理地采用准稳态近似^[5], 即在响应时间范围的每一小间隔内位相栅近似呈稳态。由于耦合系数是写入时间 t 的函数, 为了研究布喇格偏移量 $\Delta\theta_{\text{opt}}$ 与写入时间 t 的关系, 我们计算了布喇格偏移量 $\Delta\theta_{\text{opt}}$ 与耦合强度 Γd 的关系(根据实验条件选取 $n = 2.2$, $\lambda = 633 \text{ nm}$, $d = 2.8 \text{ mm}$, $m = 1/9$, $\theta_{\text{ext}} = 30^\circ$, Φ_g 分别设定为 $0, 4\pi/24, 7\pi/24, 10\pi/24$), 计算结果表明, 对于给定的光栅相移 Φ_g , 布喇格偏移量 $\Delta\theta_{\text{opt}}$ 正比于耦合强度 Γd , 比例系数与 Φ_g 有关, 可表示为

$$\Delta\theta_{\text{opt}} \propto \Gamma d \quad (3)$$

光束耦合系数 Γ 与空间电荷场成正比, 故其随时间的变化可写为 $\Gamma(t) = \Gamma_{\text{sat}}[1 - \exp(-t/\tau_w)]$, 其中 Γ_{sat} 为稳态时的耦合系数, τ_w 为写入时间常数。因此若定义稳态下布喇格偏移量为 $\Delta\theta_{\text{sat}} = \Delta\theta_{\text{opt}}(t \rightarrow \infty)$, 便有

$$\Delta\theta_{\text{opt}}(t) = \Delta\theta_{\text{sat}}[1 - \exp(-t/\tau_w)] \quad (4)$$

另一方面, 对于小折射率光栅调制, 衍射效率可近似表示为 $\eta(t) \approx [\pi d \Delta n(t) / (\lambda \cos\theta)]^2$ 。

并且 $\Delta n(t)$ 有与 $\Gamma(t)$ 相同的随时间变化关系, 即 $\Delta n(t) = \Delta n_{\text{sat}} [1 - \exp(-t/\tau_w)]$, Δn_{sat} 为饱和折射率调制度。因此有 $\eta(t) = \eta_{\text{sat}} [1 - \exp(-t/\tau_w)]^2$, 其中 $\eta_{\text{sat}} = [\pi d \Delta n_{\text{sat}} / (\lambda \cos \theta)]^2$ 为饱和衍射效率, 该式与(4)式比较可知, 在光栅形成过程中, 布喇格偏移量 $\Delta \theta_{\text{opt}}(t)$ 随时间的演变具有与 $[\eta(t)]^{1/2}$ 相同的动态过程。当光栅写入的初始时刻($t \rightarrow 0$), 折射率位相栅还未形成, 这时不会产生布喇格偏移现象。以后随着折射率位相栅形成, 布喇格偏移现象也同时出现。如果这时要正确读出已写入的光栅, 就必须使读出光入射角满足此时的布喇格入射角。随着写入时间的延长, 布喇格偏移现象相应加强, 当写入的光栅接近稳态时($t \rightarrow \infty$), 布喇格偏移趋于恒定。

3 实验验证

本实验中所用的激光器为氩氖激光器($\lambda = 633 \text{ nm}$), 记录介质为双掺铈酸锂晶体($\text{Ce} \cdot \text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$)。读出光入射角的扫描精度为 $\pm 0.002^\circ$, 光栅写入角度 $\theta_{\text{ext}} = 30^\circ$, 物参比 $m = 1.9$ 。

3.1 验证布喇格偏移现象的存在

采用计算机控制的反射全息光栅实验光路, 将光栅写入直到稳态, 写入过程中每隔一定时间间隔, 关闭物光束, 迅速在原参考光束照明下采集衍射效率, 得到的衍射效率随写入时间的变化曲线称为写入曲线。光栅写入到稳态后, 将读出光在原参考光角度附近扫描该光栅, 并采集衍射效率, 得到的衍射效率随读出光相对原参考光的角度偏离量 ($\Delta \theta_{\text{ext}} = \psi_{\text{ext}} - \theta_{\text{ext}}$) 而变化的曲线称为读出曲线。一组典型的写入曲线和读出曲线如图 2 所示。

由图 2 的写入曲线 (a) 和读出曲线 (b) 可以看出, 在读出曲线的零位置(原参考光位置)得到的衍射效率, 与写入曲线中光栅记录结束时的衍射效率 (10.3%) 近似相等, 而读出曲线中峰值衍射效率 (17.1%) 的角位置不同于写入时参考光的位置, 布喇格偏移量达 0.025° 。这证明反射型全息光栅确实存在布喇格偏移现象。

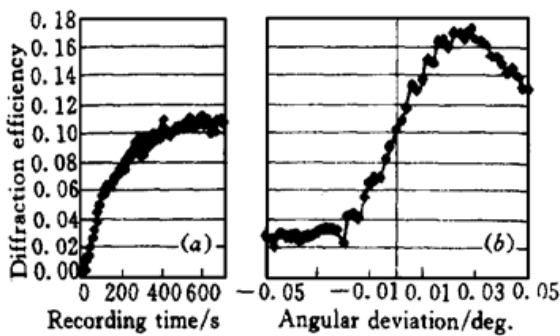


图 2 光栅的写入曲线 (a) 和读出曲线 (b)
Fig. 2 A typical writing curve (a) and reading curve (b) of a saturate grating

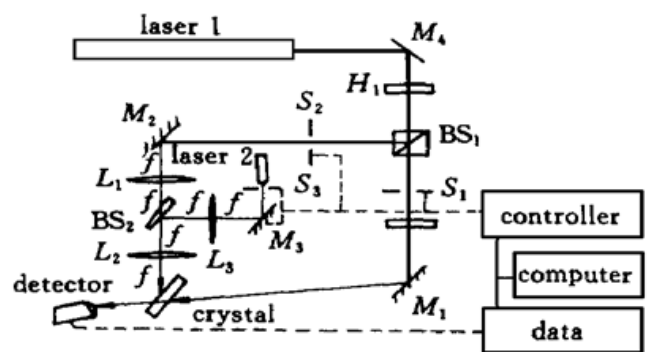


图 3 测量光栅动态写入过程中布喇格偏移的光路
 M_1, M_2, M_4 : 反射镜; M_3 : 旋转反射镜; BS_1 : 偏振分束镜; BS_2 : 楔形分束镜; H_1, H_2 : 半波片; $L_1 \sim L_3$: 透镜; $S_1 \sim S_3$: 快门

Fig. 3 Experiment set-up for measuring Bragg-shift during grating formation

M_1, M_2, M_4 : mirrors; M_3 : rotation mirror; BS_1 : polarized beam splitter; BS_2 : beam splitter; H_1, H_2 : half-wave plates; $L_1 \sim L_3$: lenses; $S_1 \sim S_3$: electrical shutters

3.2 测量动态情况下的布喇格偏移

为了测定光栅在动态写入过程中的布喇格偏移, 在光路中使用了两台激光器, 见图 3。激

激光器 1(60 mW)用于写入光栅,激光器 2(1 mW)用于读出光栅。光栅记录过程中,每隔一定的时间间隔阻断激光器 1,用激光器 2 扫描读取光栅,采集光栅的衍射效率,确定峰值衍射效率和布喇格偏移量。实验中要保证入射到晶体上的读出光强度远远小于写入光强度(实际比例为 1·8.6),并且读取时间足够短(累计读取时间与写入时间之比约为 1·70)。

实验得到的 $\Delta\theta_{\text{opt}}(t)$ 和 $[\eta(t)]^{1/2}$ 随时间演变曲线如图 4 所示。通过比较可以看出,布喇格偏移随时间的演变与折射率位相栅随时间的演变有相同的趋势,与理论分析基本符合。

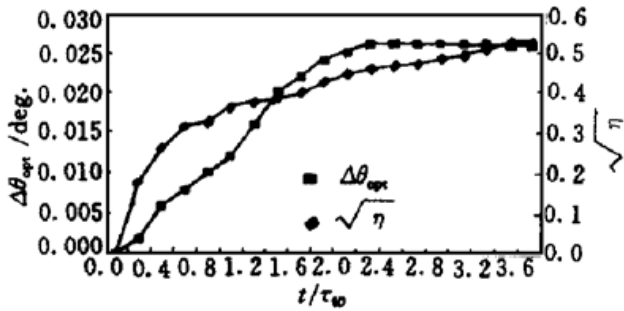


图 4 $\Delta\theta_{\text{opt}}(t)$ 和 $[\eta(t)]^{1/2}$ 随归一化写入时间的变化曲线

Fig. 4 $\Delta\theta_{\text{opt}}(t)$ and $[\eta(t)]^{1/2}$ versus normalized exposure time t/τ_w

对于大容量全息存储来说,全息图一般未达到稳态,而且大多数全息图的写入时间极短。以空间-角度复用的三维盘式全息存储方案(SAMHD)^[6]为例,存储轨道中有 99% 以上全息图的归一化写入时间(曝光时间与写入时间常数之比)小于 0.04,最大的也仅为 0.07。图 4 示出当全息图归一化写入时间为 0.07 时,偏移量低于 0.002°,而图 2(b) 示出该全息图的选择角全角宽约为 0.1°。由此可见,只要适当确定全息图的曝光时间序列,大容量全息存储中布喇格偏移现象不足以影响最佳读出位置的变化,即可以认为原参考光位置就是最佳读出位置。

为原参考光位置就是最佳读出位置。

3.3 多重全息存储实验中的布喇格偏移

我们采用 SAMHD 方案在盘状光折变铌酸锂晶体中实现了 2000 个图像的全息存储^[7]。由于采用 SAMHD 方案,所有全息图的曝光时间都在 2~ 3 s 的范围内,远远小于材料的响应时间常数。实验中得出的布喇格偏移量为 $(-2 \pm 3) \times 0.001^\circ$,即大多数全息图的布喇格偏移量在 $-0.005^\circ \sim 0.001^\circ$ 范围之间,与晶体的旋转选择角度(0.04°) 相比很小。在原参考光位置读出的衍射效率平均为峰值衍射效率的 80%。研究表明,这一衍射效率的下降对再现像质量的影响可以忽略。因此,对小曝光时间写入的全息图可以不考虑布喇格偏移的影响。

4 结 论

我们在理论上得出动态光栅的布喇格偏移与写入时间的关系,随着写入时间的延长,布喇格偏移现象也很显著。实验与理论符合。实验验证了反射型光折变光栅布喇格偏移现象的存在。而且实验数据表明,对写入到稳态的全息图,布喇格偏移现象对最佳读出条件的影响较大。对于大容量全息存储,只要适当确定全息图的曝光时间序列,可使得布喇格偏移现象不足以影响最佳读出条件。

参 考 文 献

- 1 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick holograms gratings. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909~ 2947
- 2 N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state. *Ferroelectrics*, 1979, **22**: 949~ 960
- 3 J. M. Heaton, P. A. Mills, E. G. S. Paige *et al.*. Diffraction efficiency and angular selectivity of

- volume phase holograms recorded in photorefractive materials. *Opt. Acta*, 1984, **31**(8): 885~ 901
- 4 S. Tao, Z. H. Song, D. R. Selviah. Bragg-shift of holographic gratings in photorefractive Fe:LiNbO₃ crystals. *Opt. Commun.*, 1994, **108**(1, 2, 3): 144~ 152
 - 5 Guo Siji, Wang Lijun, Wang Jiayou *et al.*. Study of dynamic properties of photorefractive two-wave mixing. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(7): 618~ 622 (in Chinese)
 - 6 S. Tao, B. Li, Z. Jiang *et al.*. Spatioangularly multiplexed 3-D holographic disks using photorefractive crystals. 1997 Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices (PR'97), 1997. 242~ 245
 - 7 Yuan Quan, Tao Shiquan, Song Xuehua *et al.*. Disk-type 3-D holographic storage in a photorefractive crystal. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(12): 1097~ 1102 (in Chinese)

A Study on the Bragg-shifts for Reflection-type Photorefractive Holographic Gratings

Li Baosheng Yuan Quan Tao Shiquan

(Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract The Bragg-shift in reflection-type photorefractive holographic gratings, especially its time evolution, has been investigated both theoretically and experimentally. Experiments demonstrated that there does exist the Bragg-shift in reflection-type photorefractive holographic gratings, and it increases with time similarly to the time evolution of the index modulation. The research shows that in large-scale holographic storage, the influence of Bragg-shift on the reconstruction quality can be negligible so that the hologram can be read out at the same angle as it was recorded, if the hologram was recorded for a short exposure time.

Key words photorefractive holographic storage, readout condition, Bragg-shift