

光折变晶体全息存储的图像灰度保真度

唐 斌^{1,2} 陶世荃³ 江竹青³ 王大勇³ 沈兰荪¹

¹ 北京工业大学电子工程系 北京 100022;

² 中国科技大学电子工程与信息科学系 合肥 230026; ³ 北京工业大学应用物理系 北京 100022

提要 提出了用归一化灰度线性度误差来评价体全息再现图像的灰度保真度,并在此基础上实验研究了光折变晶体中全息存储的灰度保真度与记录物参光强比的关系,结果与理论预期符合得很好;研究了全息存储过程灰度线性度误差随记录时间演变,表明只要选择适当的记录物参光强比,即使记录时间较短(衍射效率较低)也能获得较高的灰度保真度。

关键词 灰度保真度,归一化灰度线性度误差,记录物参光强比,记录时间,衍射效率

1 引 言

利用体全息技术存储数据的想法在 30 年前就开始引起人们的注意^[1]。近年来随着光折变材料、激光器、空间光调制器(SLM)和高质量 CCD 的高速发展,体全息存储器的实用化逐渐成为可能,并已在世界范围内掀起了研究热潮,并取得了显著的进展^[2]。其中对二值图像(位数据页)的存储和恢复研究得较为充分,包括研究如何提高存储容量、提高存储数据的信噪比、减小误码率等等。全息技术本质上是相干二次光学成像,其光学本质使得全息技术可以直接存储多灰度阶的光学图像。多灰度模拟图像的直接存储和恢复在光学图像模式识别、光学相关等领域有广阔的应用前景。

要对图像的灰度信息进行直接存储和恢复,就要保证存储后再现的图像具有较高的灰度保真度。本文研究了在 $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ 光折变晶体中体全息存储灰度图像时,影响灰度保真度的因素和改善灰度保真度的方法,并测量了一个采用常规 CCD 探测器的实际存储系统可达到的灰度保真度。

2 理论分析

考虑在光折变晶体中的反射型像面全息图,研究其灰度保真度要对存储和再现过程进行分析。记录过程是否达到饱和也是一个可能的影响因素,下面分别进行讨论。

2.1 饱和情况下衍射效率和记录物参光强比的关系

由动态光折变理论,反射式全息图的稳态衍射效率与记录物参光强比的关系为^[3]

$$\eta = \frac{\beta \cdot [\exp(\gamma L) - 1]^2}{(1 + \beta)[1 + \beta \exp(2\gamma L)]} \quad (1)$$

式中, $\beta = I_o/I_R$ 为记录物参光强比, γ 为耦合常数, L 为晶体厚度, γL 为耦合强度。

对于给定的存储晶体和记录光路配置, 稳态情况下的 γL 是常数。则由(1) 式, 衍射效率只与记录物参光强比 β 有关。当参考光是均匀强度的光波时, 再现光波面不同区域的衍射效率只与物光相应区域的光束强度有关。进行像全息存储灰度图像时, 物光波面上各点的光强不同, 它们分别代表着不同的灰度信息, 各点的记录物参光强比(称之为局部记录物参光强比) 不同, 再现时各点衍射效率也不同, 因而再现像中会出现不同的灰度信息。实验所用存储材料 $\gamma L = 1.0$, 则利用(1) 式得到的衍射效率 η 与记录物参光强比 β 的关系曲线见图 1 所示。

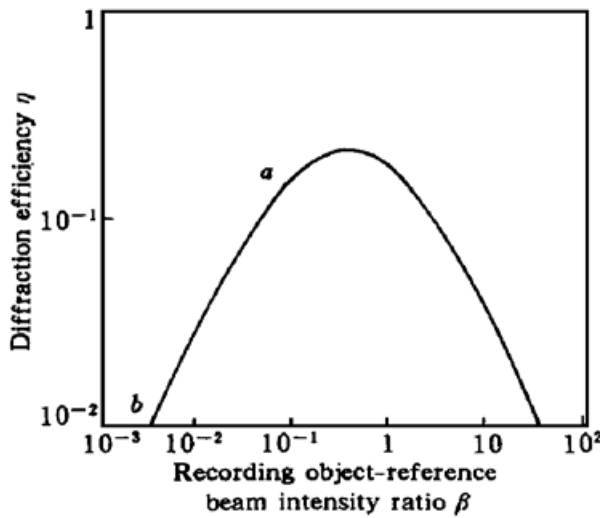


图 1 衍射效率 η 和记录物参光强比 β 的关系曲线($\gamma L = 1.0$)

Fig. 1 The theoretical curve of the diffraction efficiency (η) as a function of the recording object-reference beam intensity ratio ($\gamma L = 1.0$)

从图 1 中可见, 衍射效率 η 和局部记录物参光强比 β 并不都呈线性关系。对应最大的衍射效率有一最佳记录光强比, 光强比大于或小于此值, 衍射效率都会下降; 若存储时的不同区域的局部记录物参光强比处在大于最佳光强比的区域, 将会再现出灰度值发生反转的图像。为了高保真地再现存储图像的灰度, 就必须在存储时合适地选择总记录物参光强比, 使得物光中不同灰度区域对应的局部记录物参光强

比处在 η - β 的关系曲线中相对线性的 ab 区域内。

2.2 记录时间考虑

光折变晶体中, 空间电荷场随记录时间的变化关系可近似表述成^[4,5]

$$E_{sc}(t) = E_{sc} \left[1 - \exp \left[- \frac{t}{\tau_w} \right] \right] \quad (2)$$

其中, τ_w 为晶体的响应时间, E_{sc} 为稳态时的空间电荷场, 可以表示成

$$E_{sc} = \frac{\sqrt{\beta}}{1 + \beta} E_w \quad (3)$$

E_w 为与记录物参光强比 β 无关的量, 其随时间的变化也遵循(2) 式的关系。

稳态时的耦合常数 γ 可以表示成

$$\gamma = \frac{1}{2} k_0 n^3 r_{\text{eff}} |E_w| \quad (4)$$

k_0 为光在真空中的传播常数, n 为光折变晶体的折射率, r_{eff} 为有效电光系数。

虽然(1) 式和(4) 式是在稳态时导出的, 但我们可以合理地将记录的动态过程看成是准稳态过程, 因而对于不同的记录时间, (1) 式和(4) 式都是近似适用的, 只是 γ 随时间变化, 则 $\gamma(t)$ 和 $\eta(t)$ 可分别写为

$$\gamma(t) = \gamma \left[1 - \exp \left[- \frac{t}{\tau_w} \right] \right] \quad (5)$$

$$\eta(t) = \frac{\beta \cdot \{ \exp[\gamma(t)L] - 1 \}^2}{(1 + \beta) \{ 1 + \beta \exp[2\gamma(t)L] \}} \quad (6)$$

(5), (6) 两式说明, 不同的记录时间、衍射效率和记录物参光强比依然符合前面讨论的关系, 只

是关系式中的耦合常数随时间单调增加。图 2 是随记录时间增加, γL 分别等于 0.5, 0.75 和 1.0 时, 衍射效率 η 和记录物参光强比 β 的关系曲线。从图可知, 随记录时间增加, 最佳衍射效率向小记录物参光强比方向移动, ab 段也相应移动。因而, 为了得到较好的灰度保真度, 记录时间越长, 选择的总记录物参光强比应越小。当记录时间较短时, 选择合适的总记录物参光强比仍能得到较好的灰度保真度。

3 实验研究

在前面对存储灰度图像的保真度进行理论分析的基础上, 存储了反射型像面全息图, 对再现图像的灰度保真度进行了实验研究。

3.1 灰度图像

待存储的灰度图像由四个区域组成(见图 3(a)), 这些区域的透射率各不相同, 在均匀强度平面波的照射下, 它们的透射光强度各不相同。我们用透射光强度来表示图像的四个区域的灰度值, 实测得它们的透射光强度呈线性变化, 亦即它们所代表的四个灰度值呈线性递增, 如图 3(b) 所示。

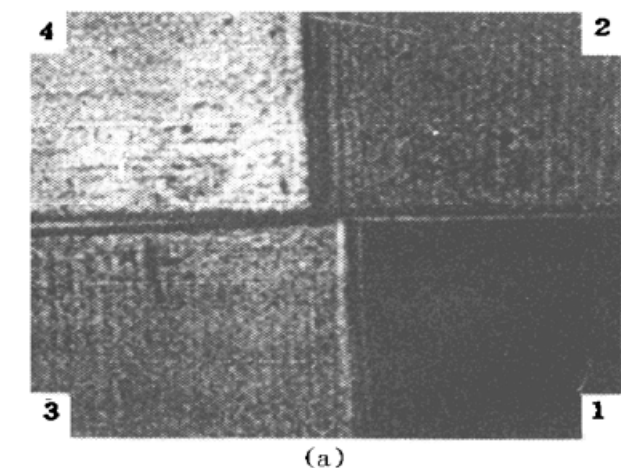


图 3 原始图像 (a) 及不同区域的灰度测量值 (b)

Fig. 3 The original image (a) and the measured value of the gray regions (b)

3.2 存储图像灰度保真度评价方法

对于再现图像的灰度保真度的评价方法, 目前还未见系统报道, 一种可能的方案是像图 3(b) 那样画出再现图像的灰度值曲线, 但当有大量的再现图像需要比较灰度保真度或一幅图像中有大量的不同灰度区域需要研究时, 它难以给出明晰的评价结果。在输入的原图像为线性灰度系列的情况下, 为了便于对整个图像系统的灰度保真度给出统一的评价, 我们定义了归一化灰度线性度误差 NNE (Normalized Nonlinear Error)

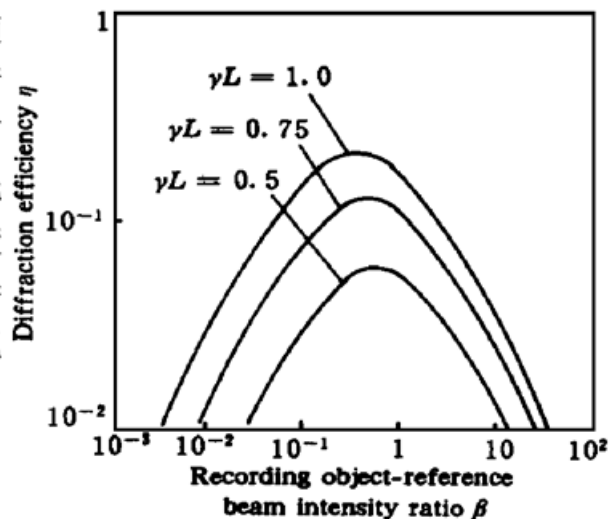


图 2 不同耦合强度时的衍射效率 η 与记录物参光强比 β 的理论关系曲线

Fig. 2 The theoretical curve of the diffraction efficiency (η) as a function of the recording object-reference beam intensity ratio with different coupling strengths

$$NNE = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} \left[G_0 + \frac{G_{N-1} - G_0}{N-1} \cdot n - G_n \right]^2}}{(G_{N-1} - G_0)} \tag{7}$$

式中, G_n 表示第 n 个区域再现灰度值, N 为总的灰度区域, 原始图像最低灰度区域的再现灰度值为 G_0 , 原始图像最高灰度区域的再现灰度值为 G_{N-1} 。

(7) 式的物理含义是, 在再现图像中, 由相对于原始图像最大灰度区域和最小灰度区域的实测灰度值确定理想的再现灰度线性曲线, 并由此得到每个灰度区域的理想再现值, 然后求所有的实测值对理想值的方差, 得到不同区域的再现灰度值线性度误差。由于再现参考光功率或再现图像的衍射光功率的不同, 线性度相同时, 不同实验条件下算得的 NNE 可能不同, 造成 NNE 的不可比性, 因而(7) 式中对算得的线性度误差值用再现图像的 $(G_{N-1} - G_0)$ 值进行归一化。

使用(7) 式, 可以从一条灰度值的变化曲线中提取出一个特征量, 从而方便地比较不同实验条件下的灰度保真度。分析(7) 式可知, 当 $NNE = 0$, 实测的灰度值完全线性, 保真度最好, 随着 NNE 的增大, 灰度线性度逐渐下降, 保真度变差。

实验中发现使用较低的总记录物参光强比进行存储时, 实验测得的各区域灰度值均大于理想值, 只是在不同情况下, 实验值偏离理想值的幅度不同, (7) 式正好能够度量这种偏离幅度。

3.3 实验装置

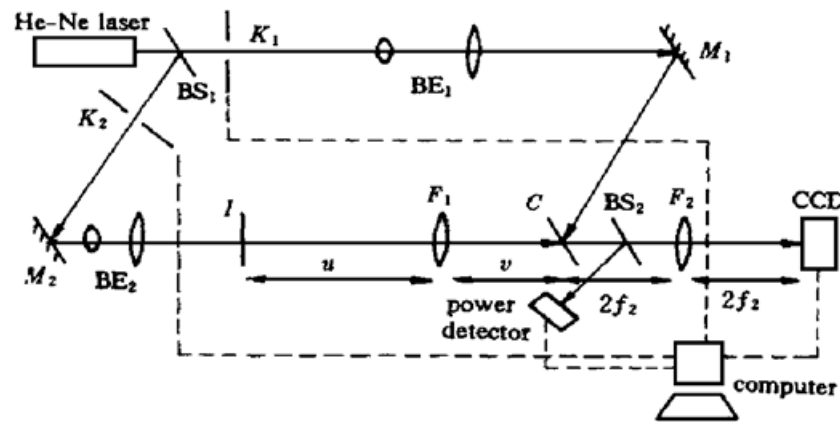


图 4 记录像面全息图实验装置图

Fig. 4 The experimental setup for recording image plane holograms

实验所用的记录像面全息图的实验装置见图 4 所示, 采用了反射型记录方案。图中, He-Ne 激光器发出的 633 nm 的光经过 BS_1 分成物光和参考光两束, 物光经过快门 K_2 , 反射镜 M_2 后由 BE_2 进行滤波、扩束准直, 原始图像 I 由透镜 F_1 (直径为 55 mm, 焦距为 115 mm) 在片状 $Fe \cdot LiNbO_3$ 晶体 C (厚度为 3.1 mm) 上成缩小 4 倍的像(像的直径约为 3 mm); 参考光经过 K_1 , BE_1 和 M_1 后在 C 上与物光相干记录(参考光和物

光束间的夹角为 120°)。再现时采用原参考光照明, 衍射光被 BS_2 分成两束, 透射部分由透镜 F_2 (直径为 55 mm, 焦距为 120 mm) 在常规 CCD 上成像, 反射部分由功率计采集。

3.4 饱和情况下的灰度保真度

当选择 1·2 的总记录物参光强比存储到饱和时, 再现图像的灰度测量值见图 5。从图中可看出, 灰度值发生了部分反转。随后, 将总记录物参光强比减小到 1·30, 再现图像的灰度测量值见图 6 所示, 具有较好的线性度。

当总记录物参光强比分别为 1·2 和 1·30 时, 各个灰度区域的再现灰度值与理论值的比较见图 7 所示。由于灰度最低区域的局部记录物参光强比很小, 为了作图方便, 图 7 中将其都标在 β 为 10^{-4} 处, 灰度最低区域的再现灰度值并不为零, 这主要是由于光学噪声和电子噪声的

影响。从图中可知, 实验测得的再现图像灰度值与理论值有一定的偏差, 对于 1:2 的总记录物参光强比, 测量值的变化趋势与理论是符合的; 当总记录物参光强为 1:30 时, 甚至实验值与理论值也基本符合。说明选择合适的总记录物参光强比将会得到较理想的再现灰度保真度。

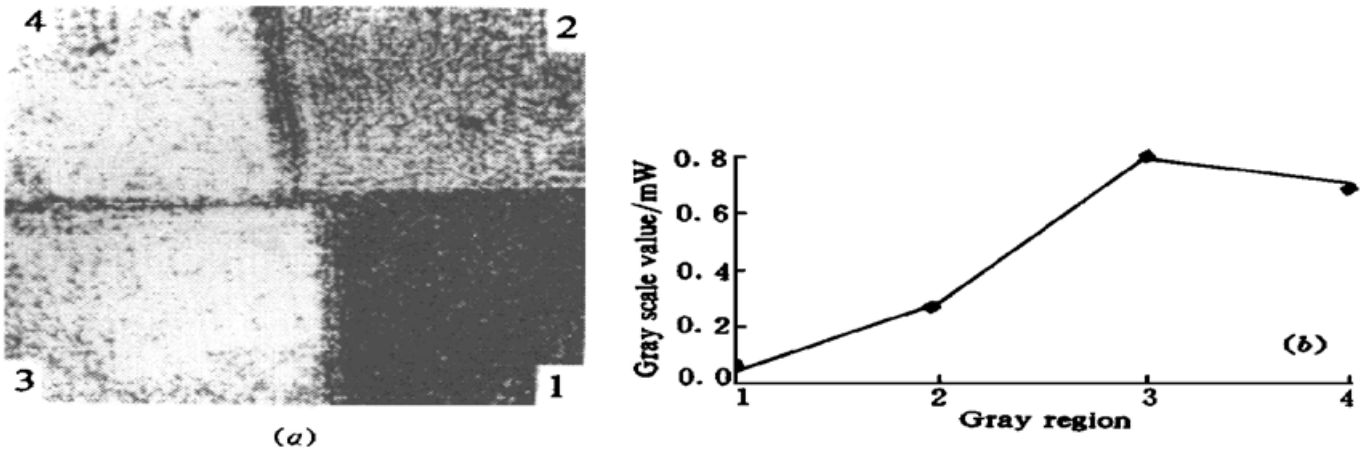


图 5 总记录物参光强为 1:2 时, 再现图像 (a) 及不同区域的灰度测量值 (b)

四个灰度区域的局部记录物参光强比分别为: 8×10^{-6} , 3.33×10^{-1} , 6.67×10^{-1} , 1

Fig. 5 The retrieved image (a) and the measured gray values (b) for a recording beam ratio 1:2
The recording beam intensity ratios of the individual gray regions are 8×10^{-6} , 3.33×10^{-1} , 6.67×10^{-1} , and 1, respectively

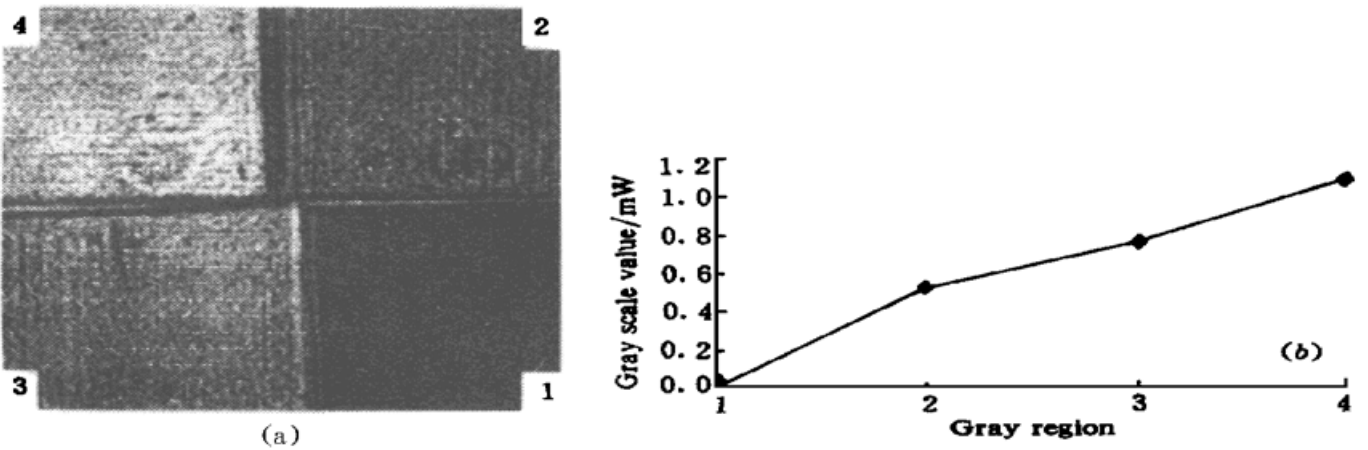


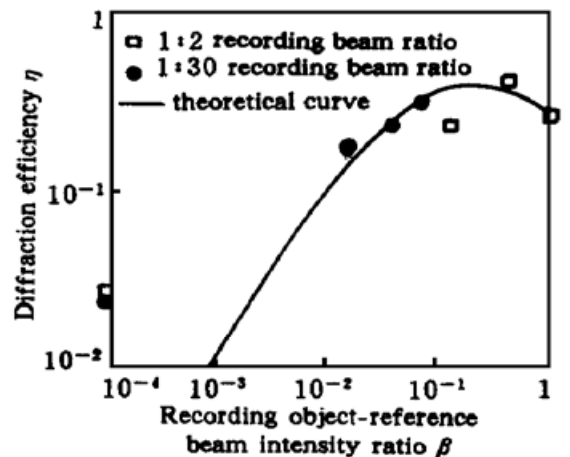
图 6 总记录物参光强比为 1:30 时, 再现图像 (a) 及不同区域的灰度测量值 (b)

四个灰度区域的局部记录物参光强比分别为: 5×10^{-7} , 2.2×10^{-2} , 4.4×10^{-2} , 6.7×10^{-2}

Fig. 6 The retrieved image (a) and the measured gray values (b) for a recording beam ratio 1:30
The recording beam intensity ratios of the individual gray regions are 5×10^{-7} , 2.2×10^{-2} , 4.4×10^{-2} , and 6.7×10^{-2} , respectively

图 7 局部记录物参光强比分别为 5×10^{-7} , 2.2×10^{-2} , 4.4×10^{-2} , 6.7×10^{-2} 和 8×10^{-6} , 3.33×10^{-1} , 6.67×10^{-1} , 1 时的衍射效率测量值以及所对应的理论衍射效率 ($YL \approx 1.0$)

Fig. 7 The theoretical and measured diffraction efficiencies of the recording object-reference beam intensities as 5×10^{-7} , 2.2×10^{-2} , 4.4×10^{-2} , 6.7×10^{-2} , and 8×10^{-6} , 3.33×10^{-1} , 6.67×10^{-1} , and 1, respectively ($YL \approx 1.0$)



3.5 灰度保真度随记录时间的变化

由(5)和(6)式可知,在未达到饱和之前,随着记录时间的增加, γ 增大, η - β 变化曲线的线性区域 ab 段所对应的记录物参光强比减小。由于不同记录时间对应的 ab 线性区域会部分重合,因而选择合适的记录物参光强比,可以在一段记录时间内都能得到较好的灰度保真度。选择 1.30 的总记录物参光强比,实验所得不同记录时间的 NNE 值变化曲线如图 8 所示。

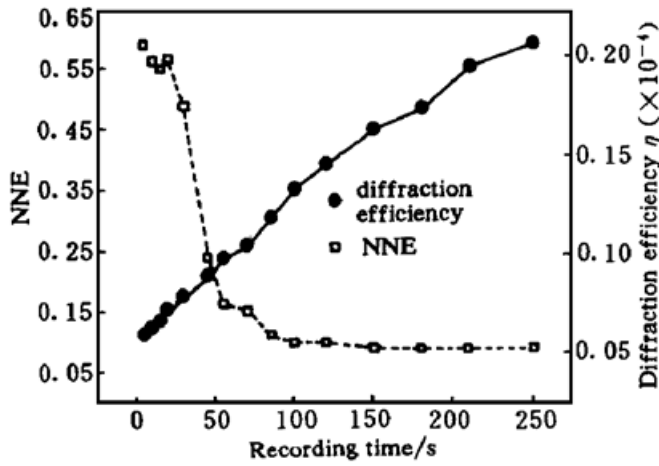


图 8 NNE 和衍射效率 η 测量值随记录时间的变化关系曲线

Fig. 8 NNE and diffraction efficiency versus the recording time

从图 8 可以看出随着记录时间增加,衍射效率会逐渐增加。当超过一定的记录时间后,虽然衍射效率还在逐步增加,但归一化灰度线性度误差会很快下降,并趋于稳定,达到了较满意的灰度保真度,此时对应的记录时间远小于饱和记录时间。

当记录时间很短时,灰度保真度较差。这由两方面的原因造成:第一,实验所用的 $Fe \cdot LiNbO_3$ 响应时间较长,若记录时间过短,光栅还没有建立。第二,较短记录时间得到较好的线性度保真度所要求的记录物参光强比大于实际选择的记录物参光强比。

从图中还可以看出,衍射效率为 10^{-5} 量级时就得到较好的灰度保真度,这说明在记录高质量的灰度图像时,并不需要刻意追求衍射效率,从而为复用存储多幅高灰度保真度图像提供了可能。

从图中还可以看出,衍射效率为 10^{-5} 量级时就得到较好的灰度保真度,这说明在记录高质量的灰度图像时,并不需要刻意追求衍射效率,从而为复用存储多幅高灰度保真度图像提供了可能。

4 结论和讨论

虽然在光折变晶体中的全息记录过程是与记录物光和参考光束的波面振幅和位相分布有关的复杂的相干记录过程,但通过对体全息存储灰度图像的再现灰度保真度的理论分析和实验研究发现,再现图像的灰度保真度只与记录物参光强比有直接的关系,根据具体的材料特性选择合适的总记录物参光强比,可以得到满意的再现灰度保真度。证实了在光折变晶体中存储高质量的灰度图像是可能的。

研究还发现,根据存储材料特性选择合适的总记录物参光强比(我们的实验值为 1.30),即使在小衍射效率情况下也能够得到较好的灰度保真度。表明在光折变晶体中存储灰度图像,不仅可达到较高的再现质量,同时还能够达到较高的复用存储图像数量。

根据对实验数据的详细分析,从灰度线性度中提取特征值,首次提出了使用归一化灰度线性度误差 NNE 来评价再现图像的灰度保真度,所得到的评价结果与实际情况符合得较好。

需要指出的是,使用 NNE 值判断再现图像的灰度线性度有它的局限性。比如,如果原始图像中的灰度值变化是非线性时,使用 NNE 无法进行评价,此外 NNE 还无法对再现灰度值反转的情况进行判别,此时可以考虑使用原始图像和再现图像之间的相关系数进行评价,使用相关系数还可以部分地判别再现灰度值反转的情况。本文在实验研究图像的灰度保真度随时间的变化关系时使用了较小的总记录物参光强比,没有发生灰度值反转的情况,实验所得的每

个区域的灰度值均大于理想值, 因而使用它来分析我们的实验数据还是较为满意的。

参 考 文 献

- 1 P. J. van Heerden. Theory of optical information storage in solids. *Appl. Opt.*, 1963, **2**(4): 393~ 400
- 2 J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesselink. Volume holographic storage and retrieval of digital data. *Science*, 1994, **265**(5173): 749~ 752
- 3 L. Z. Cai, P. Yeh, H. K. Liu. Mean fringe contrast, optimum beam ratio and maximum diffraction efficiency for volume gratings written by coupled waves. *Opt. Comm.*, 1996, **132**(1, 2): 48~ 54
- 4 G. C. Valley, M. B. Klein. Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing. *Opt. Eng.*, 1983, **22**(6): 704~ 711
- 5 N. V. Kukhtarev. Kinetics of hologram recording and erasure in electrooptic crystals. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1976, **2**(12): 438~ 440

The Gray Scale Fidelity of Images Retrieved from Holograms in Photorefractive Crystals

Tang Bin^{1,2} Tao Shiquan³ Jiang Zhuqing³ Wang Dayong³ Shen Lansun¹

¹*Electrical Engineering Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*

²*Electrical Engineering & Information Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

³*Applied Physics Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*

Abstract In this paper, a new quantity, normalized nonlinear error (NNE) is proposed for the first time to our knowledge for the estimation of the gray scale fidelity of images retrieved from volume holograms stored in photorefractive $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ crystals. Based on this, the dependence of gray scale fidelity on recording object-reference beam ratios is experimentally investigated, and the results agree well with theoretical predictions. The dynamic evolution of the normalized nonlinear error during hologram recording is also studied. The results show that a satisfactory gray scale fidelity can be obtained as long as the recording beam ratio is carefully chosen, even if the recording time is short, hence the diffraction efficiency is quite low.

Key words the gray scale fidelity, normalized nonlinear error (NNE), the recording object-reference beam ratio, recording time, diffraction efficiency