

文章编号: 0258-7025(2003)06-0529-04

光折变晶体全息存储中散射噪声特性的研究

万玉红¹, 袁 韞¹, 刘国庆¹, 陶世荃¹, 赵业权²

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100022; ²哈尔滨工业大学光信息技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用信噪比损失系数(LSNR)深入研究了光折变铌酸锂晶体中散射噪声对全息输入图像像质的影响。对不同掺杂物质、不同掺杂浓度、不同处理方法以及不同记录方式的大量晶体进行了实验研究,并重点考察了物光束引起的散射噪声的特性。实验结果表明,氧化态晶体的散射噪声的影响小于生长态和还原态晶体,反射光路较之透射光路和邻面入射(90°)光路更不易受散射噪音影响。

关键词 信息光学;全息存储;光折变晶体;散射噪声

中图分类号 TB 877 **文献标识码** A

Study on the Characteristics of Scattering Noise in Photorefractive Holographic Storage

WAN Yu-hong¹, YUAN Wei¹,

LIU Guo-qing¹, TAO Shi-quan¹, ZHAO Ye-quan²

¹College of Applied Sciences, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China
²Technology Center of Photoelectronic Information, Harbin Institute of
Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract In this paper the effects of scattering noise on input images for holographic storage in photorefractive lithium niobate crystals have been investigated in detail by means of measurements of loss of signal-to-noise ratio (LSNR). A variety of lithium niobate crystal samples with different dopants, different doping concentrations, different annealing after growth, and used for different recording geometries are studied. More attention has been paid to the characteristics of scattering noise resulting from object beams. The experimental results show that the effect of scattering noise in oxidized crystals is less significant than that in reduced or as-grown crystals. Comparing with transmission and 90° recording geometries, reflection geometry is less subject to the effect of scattering noise.

Key words information optics; holographic storage; photorefractive crystal; scattering noise

1 引言

三维全息存储以其存储容量大和存取速度快等优势,有可能成为最具实用性的下一代存储器。但实际的光折变晶体全息存储系统中存在多种噪声,严重影响了体全息存储图像的质量。噪声的主要来源之一是晶体的散射噪声,它是由于强的相干光长时间照射晶体而引起的,且随着照明时间的加长,这种噪声又有可能积累加剧。散射噪声的存在,导致

记录介质的有效动态范围减小,从而使存储容量下降。因此,散射噪声问题是光折变体全息存储器实用化过程中最大的障碍之一。研究散射噪声的特性及其对全息输入像像质的影响有重要意义。

本文在已有研究的基础上,从散射噪声的成因出发,通过对不同掺杂物质、不同掺杂浓度、不同处理方法以及不同记录方式下的晶体的大量实验,定量研究了散射噪声对全息输入像像质的影响。由于

收稿日期:2002-03-14;收到修改稿日期:2002-04-30

基金项目:国家973计划(编号:G19990330)和自然科学基金(编号:69977005)资助项目。

作者简介:万玉红(1976.6—),女,河北安平人,北京工业大学应用数理学院在读研究生,主要从事光存储与光信息处理的研究。E-mail: yhongw@eyou.com

参考光引起的散射噪声的特性已有研究报道^[1],故本文着重讨论物光中的散射噪声对像质的影响。

2 理论分析

光折变晶体的散射噪声是由“扇形”散射光引起的。“扇形”散射光的成因是种子光的放大。当一束光入射到光折变晶体上时,由于晶体的不均匀性,特别是晶体表面的缺陷,使一部分入射光改变原来的传播方向,从而成为“扇形”散射光的种子光。尽管种子光的能量很小,但光折变材料的增益较大,散射光经过与入射光耦合而被放大,放大后的光强可能很强^[2]。散射光与入射光(物光或参考光)相互干涉而形成的噪声光栅与含有信号光的折射率光栅同时被记录在晶体内,再现时,满足 Bragg 条件的噪声光栅同时被读出,影响信息的准确复现。噪声严重时,甚至会使信号完全淹没在噪声中,无法读出。

扇形散射光及噪声光栅的形成机制不能以简单的两波耦合来解释,它是一个复杂的多波混合过程。散射光的强弱受到材料的性能、晶轴的取向、入射光的强度、光斑大小等多种因素的制约。进一步的实验结果表明,散射噪声严重的晶体,其内部机制的晶格错位就明显。也就是说,晶体自身的缺陷是散射光形成的重要因素之一。

通常,我们用信噪比(SNR)来评价全息存储二值图像的质量。即

$$\text{SNR} = (I_1 - I_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) \quad (1)$$

其中 I_1, I_0 分别为亮、暗像元光强的平均值, σ_1, σ_0 分别为亮、暗像元的标准差。由于 SNR 与光强的平均值有关,晶体的吸收率不同会引起 SNR 的显著差别,因此,只根据 SNR 的大小,无法对晶体的散射噪声进行定量的比较。我们在实验研究中采用信噪比损失系数(LSNR)^[1]来定量分析散射噪声造成图像像质下降的程度。LSNR 定义为

$$\text{LSNR} = 10 \times \log(\text{SNR}_0 / \text{SNR}_1) \quad (2)$$

其中 SNR_0 为直接透过“干净”晶体(即晶体已经过彻底的热擦除)成像获得的原始像的信噪比,此时没有任何散射光栅形成; SNR_1 为在相同成像系统中,经强相干光一段时间的照射,散射噪声建立后获得的透过晶体所成像的信噪比。上式表明,LSNR 越小,像质衰减越少,散射噪声影响越小。文献[1]对参考光散射噪声的研究结果表明,采用 LSNR 来作为散射噪声影响存储图像像质的判据是符合实际情况的。

3 实验

依据(2)式设计了实验来考察物光对散射噪声的贡献。首先采集通过“干净”晶体的直透像,然后采用较为简单的方法来模拟大规模复用全息存储的过程,即用强的物光长时间照明晶体,照射一定时间后再采集透过晶体所成的图像。测出图像的 $I_1, I_0, \sigma_1, \sigma_0$, 利用(1)式分别计算直透像的信噪比 SNR_0 和散射噪声建立后直透像的信噪比 SNR_1 , 并利用(2)式算得 LSNR, 从而分析图像像质的相对变化, 定量得出散射噪声对直透图像像质的影响。

3.1 实验装置

图 1 是实验的光路设置简图。物光光路采用 $4f$ 系统, 晶体放置在傅里叶变换透镜的后焦面(频谱面)上, 加入滤波光阑, 仅让零级谱通过照明晶体(要求物光在频谱面上零级谱的功率为 7 mW)。对于同一系列的晶体都照射相同的时间, 根据 LSNR 的大小来比较晶体间的差异。由于物光束与参考光束正交, 故此光路适合于透射、反射和邻面入射(90° 光路)三种记录方式(图 1 中所示为反射式记录方式)。控制快门的关断与开通可分别进行物光和参考光的散射噪声的实验。实验中, 晶体放置在频谱面稍前(7 mW 的零级谱功率是在未放入晶体前, 用功率计在频谱面的准确位置测得的), 对不同的记录方式均采用了垂直偏振。实验发现在沿晶体的轴向方向(正向)和逆晶轴方向两种情况中, 散射噪声存在明显的差异, 本文仅对噪声较大的取向加以讨论。

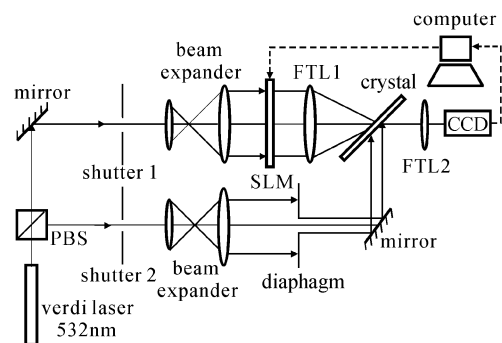


图 1 实验光路简图

Fig. 1 Optical setup of the experiment

3.2 实验结果

测试了不同掺杂物质、不同掺杂浓度经过不同处理以及不同记录方式几个系列的铌酸锂晶体中物光散射噪声的情况, 并对有代表性的几块晶体考察了其参考光(参考光功率为 80 mW)引起的散射噪

声的影响,与物光引起的散射噪声加以比较。

表 1 示出不同掺杂晶体中物光散射噪声引起图像信噪比的损失。各样品均为 z 切割,因而均采用反射记录方式;晶体均为生长态。

由于晶体的不均匀性或晶体表面的缺陷会引起入射光的“扇形”散射,从而导致“扇形”散射噪声。杂质掺杂会造成晶体的不均匀性,相当于在晶体中增加了附加的散射核,所以随着杂质浓度的增加,散射噪声的影响也会更显著,LSNR 也随之增大。表 1 清楚地表明了这一点。另外,由表 1 也可以看出,掺杂物质不同,物光的散射噪声也不同。 Fe 、 Ce 为光折变敏感杂质, Zn 为抗光折变杂质,所以,掺入 Fe 、 Ce 的双掺晶体的物光散射噪声比单掺 Fe 的更为严重,而双掺 Fe 、 Zn 的晶体中物光所引起的散射噪声的影响却远小于单掺 Fe 的情形。但另一方面,双掺 Fe 、 Zn 的晶体的动态范围也相应小于单掺 Fe 的情形,这在一定程度上限制了存储容量。近期我们正通过实验研究来探索不同掺杂比例的 $\text{Fe}:\text{Zn}:\text{LiNbO}_3$, 以使其各项性能均满足实验要求。总的看来,掺 Zn 的晶体还是一种很有前途的光折变全息存储材料。

表 1 LSNR 随掺杂浓度和杂质种类的变化

Table 1 Variation of LSNR with different dopants

Dopant /wt.-%	Crystal ID	Illumination time/min	LSNR /dB
Fe_2O_3	0.06	BCR	9.1
	0.08	BBR	9.8
	0.1	BAR	11.5
Fe_2O_3	0.03	HN17	7.7
$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CeO}$	0.03, 6 mol.-%	HN11	11.5
	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{ZnO}$	0.03, 6 mol.-%	HN13

对经不同后处理的几个系列晶体的实验结果示于表 2。记录方式仍为反射式。实验发现的一般规律是:经氧化处理的晶体物光散射噪声影响比生长态的小,经过还原处理的晶体散射噪声的影响则有更严重的倾向。这说明铌酸锂晶体中的 Fe^{2+} 是引起散射的原因,强的物光长时间照射晶体所引起的“扇形”散射可能是以 Fe^{2+} 为中心。这与单掺铁的铌酸锂晶体的掺杂浓度越大,像质下降越严重,LSNR 也随之增大的实验结果也是相符合的。

图 2 示出 HN15, HN16, HN17 三块晶体在初始信噪比近似相等的情形下,经过相同时间的强物

光照射,“扇形”散射噪声建立后,所获得的透过晶体所成的像。可以看出,经过氧化处理的晶体(HN16)的物光散射噪声对全息存储像像质的影响要小于另两种情形。

表 2 经过不同后处理的晶体中物光散射噪声的影响

Table 2 Influence of scattering noise induced by an object beam in crystals with different retreatments

Dopant	Treatment	Crystal ID	Illumination time/min	LSNR /dB
Fe_2O_3 (0.03 wt.-%)	As grown	HN17	25	7.7
	Reduced	HN15		9.9
	Oxidized	HN16		4.3
Fe_2O_3 (0.08 wt.-%)	As grown	BBR	10	9.8
	Oxidized	BBR-1		6.3
Fe_2O_3 (0.03 wt.-%) ZnO (6 mol.-%)	As grown	BN1	25	1.7
	Reduced	BN1-1		5.3

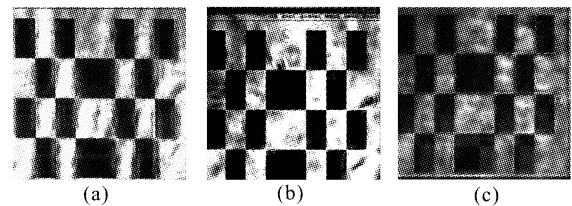


图 2 经过不同后处理的晶体所成的像

(a) 生长态(HN17);(b) 氧化态(HN16);(c) 还原态(HN15)

Fig. 2 Influence of fanning noise on the image fidelity

in three crystals with different retreatments

(a) as grown (HN17);

(b) oxidized (HN16); (c) reduced (HN15)

表 3 不同记录方式下晶体散射噪声的影响程度

Table 3 Influence of fanning noise on the image fidelity in different recording geometries

Crystal ID	Recording geometry	Illumination time/min	LSNR /dB
BN1	Reflection	5	-1.5
BN1-T	Transmission		8.1
BN1-S	90-degree		11.8
HN13	Reflection	25	2.9
HN13T	Transmission		7.2

表 3 示出同为 $\text{Fe}:\text{Zn}:\text{LiNbO}_3$ 晶体,用于不同记录方式的 2 个系列样品的实验结果。所有样品均为掺 Fe_2O_3 (0.03 wt.-%) 和 ZnO (6 mol.-%) 的生长态铌酸锂晶体。反射记录方式采用 z 切割的晶体,透射记录方式采用 x 或 y 切割的晶体,而邻面入

射方式采用 45° 切割的晶体。由表 3 看出, 反射光路受散射噪声影响最小。究其原因, 可能由于正向散射的几率较大, 而扇形散射又基本沿着晶体的光轴方向。在反射式光路下, 散射光进入物光成像光路的部分较少, 图像像质下降不是很严重。所以, 反射式记录对于抑制散射噪声的影响有一定的优势。

实验中还对几块有代表性的晶体的参考光散射噪声的影响与物光散射噪声影响做了比较, 实验数据如表 4 所示。虽然所用的物光的功率 (7 mW) 远小于参考光的功率 (参考光功率为 80 mW), 但实验结果表明, 物光对散射噪声的贡献比参考光大得多。此外, 对于抗散射的晶体无论物光还是参考光散射

噪声的影响都很小, 所以掺铋铁的铌酸锂晶体是一种很有实用价值的光折变体全息存储材料。

值得指出的是, 实验结果得出了一些 LSNR 为负值的情形, 即经过长时间的强光照射后的全息存储图像反而更好了。这可能是由于 CCD 的动态范围有限, 以及手工操作及激光器不稳定等原因所引起的误差, 当 SNR_0 与 SNR_1 很接近的情况下, 计算结果就有可能为负值。所以 LSNR 为负值的情形至少能说明该晶体像质稳定, 受散射噪声影响小。导致 LSNR 为负值是否还有其他的因素或机制, 还有待于进一步的深入研究。

表 4 物光及参考光散射噪声的比较

Table 4 Comparison of scattering noise induced by an object beam and a reference beam

Dopant	Treatment	Crystal ID	Illumination time/min	LSNR/dB	
				Object beam	Reference beam
Fe_2O_3 (0.03 wt.-%)	As grown	HN13	25	2.9	0.1
	Reduced	HN15		9.9	1
ZnO (6 mol.-%)	Oxidized	HN16		4.3	0.2
Fe_2O_3 (0.08 wt.-%)	As grown	BBR	10	9.8	0.8
	Oxidized	BBR-1		6.3	0.2

4 结 论

信噪比损失系数 (LSNR) 可以作为评价手段来考察晶体是否适合高保真度全息存储。实验中采用采集直透图像, 分析其像质的相对变化来描述散射噪声对全息存储输入图像像质的影响。实验结果表明, 参考光或物光长时间照射晶体会引起晶体内散射噪声的建立, 且物光的散射噪声影响远比参考光的散射噪声影响显著; 反射式光路的散射噪声影响最小; 经过氧化处理后的晶体的散射噪声变小。为了尽可能地减小散射噪声的影响, 实际存储系统中, 应当选用物光散射噪声小的取向, 并选择适当的记

录方式、适当掺杂和后处理的晶体来抑制散射噪声的影响。

参 考 文 献

- 1 Mingyan Qin, Shiquan Tao, Guoqing Liu. Effect of scattering noise on the data fidelity of holograms recorded in photorefractive crystals [C]. MRS Symp. Proc. Vol. 674, Applications of Ferromagnetic and Optical Materials, Storage and Magnetolectronics. Paper V2. 6. 1~V2. 2. 6 (2001)
- 2 Suiqian. Study on some problems in photorefractive volume storage [D]. PHD, Nankai University, April 1997