

## 铌酸锂晶体:从全息存储到三维显示

郑大怀<sup>1</sup>, 王烁琳<sup>1,2</sup>, 陈俊锐<sup>1</sup>, 张宇琦<sup>1</sup>, 刘宏德<sup>1</sup>, 任梦昕<sup>1\*</sup>, 孔勇发<sup>1\*\*</sup>, 许京军<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>南开大学物理科学学院&泰达应用物理研究院, 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457;<sup>2</sup>江苏科技大学理学院, 江苏 镇江 212100

**摘要** 铌酸锂晶体是一种多功能、多用途的人工晶体材料,具有温度稳定性好、易于光学冷加工、性能易调控等优势。作为典型的光折变晶体,铌酸锂被广泛应用于高密度光存储、激光物理、信息处理和计算等研究与应用领域。伴随海量存储及动态全息三维显示的巨大需求与快速发展,基于铌酸锂晶体的三维光存储及动态显示再次成为研究热点。针对上述研究与应用,综述了铌酸锂晶体光折变全息存储及显示的原理、研究历史和最新进展,并对未来可能的发展方向进行了展望。

**关键词** 材料; 铌酸锂晶体; 光折变效应; 全息存储; 全息显示

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL230850

## 1 引言

铌酸锂(LN)晶体是一种集电光、声光、压电、非线性和光折变效应于一身的多功能人工晶体材料,被称为“光子学硅”<sup>[1-5]</sup>。基于其优异的光折变性能,铌酸锂成为全息三维存储和显示的候选材料之一<sup>[6]</sup>。随着信息科学技术的高速发展,磁带、磁盘以及光盘已经不能满足人们日益增长的数据存储需求。全息三维存储容量的理论极限可以达到 $10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup><sup>[7]</sup>,远远高于传统的一维、二维存储器。因此,研究人员基于LN晶体的光折变效应在全息存储中的应用展开了广泛研究:发展了大家熟知的饱和衍射效率大幅提高的掺铁铌酸锂(LN:Fe)晶体<sup>[8]</sup>,可实现非挥发存储的铁锰双掺铌酸锂(LN:Fe, Mn)晶体<sup>[9]</sup>;发现了光感应光散射的辐照光斑尺寸效应<sup>[10-11]</sup>和光爬行效应<sup>[12]</sup>,并将其成功应用于全息光散射理论分析;实现了信息存储过程中的噪声抑制,成功将存储容量提高至30 Gbit/cm<sup>3</sup>以上,远高于当时的二维盘片的存储容量,并成功研制了三维全息海量存储器原型机。进入21世纪后,机械硬盘快速崛起,磁存储很快占领了存储市场,以铌酸锂为代表的光全息存储逐渐淡出视野。近几年,随着增强现实(AR)、虚拟现实(VR)对三维显示技术的迫切需求,基于铌酸锂晶体的动态全息三维显示技术重新进入人们的视线,并取得一系列研究成果。通过含有孤对电子离子的掺杂,

LN晶体的光折变响应速度显著提高,铌镁双掺铌酸锂晶体在442 nm激光作用下,响应时间缩短到13 ms,可满足动态全息显示的要求<sup>[13]</sup>。市场对于理想三维显示技术以及海量数据储存有着迫切需求,铌酸锂晶体在动态全息三维显示和光存储方面表现出巨大的应用前景<sup>[14]</sup>。

本文综述了铌酸锂晶体全息三维存储和显示的原理、研究历史及进展,并对未来的发展趋势进行了展望,以期LN晶体在未来信息光学的飞速发展中继续绽放异彩。

## 2 铌酸锂晶体全息存储及显示基本原理

## 2.1 铌酸锂晶体的光折变效应

光折变效应的全称为光致折射率变化效应,由美国物理学家Ashkin等<sup>[15]</sup>发现。Ashkin在诸多领域做出了开创性成果,2018年由于其发明了光镊并在生物系统中广泛应用而获得诺贝尔物理学奖。1966年,Ashkin等<sup>[15]</sup>用铌酸锂和钽酸锂晶体进行激光倍频实验时,发现强光辐照会引起晶体折射率的不均匀变化,严重破坏了晶体相位匹配条件,降低了倍频转换效率。这是当时所不希望发生的,因此最初把这种效应称为“光损伤”。1968年,Chen等<sup>[16]</sup>提出基于LN晶体的上述“光损伤”效应可用于全息存储,同时考虑到通过光辐照或者高温处理可以消除这种效应,为了与不可消

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-06-27; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-07-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFA0705000, 2022YFA1404800)、国家自然科学基金(12034010, 12134007, 12222408, 92050114, 12174202, 12074200)、天津市自然科学基金(21JCZDJC00300, 21JCQNJC00250)、中央高校基本科研业务费(63191522, 63233009)

通信作者: \*ren\_mengxin@nankai.edu.cn; \*\*kongyf@nankai.edu.cn; \*\*\*jjxu@nankai.edu.cn

除的、不利的光学损伤区分开来,研究人员将这种光辐照引起的折射率不均匀变化更名为光致折射率变化或光折变效应。光折变效应作为光学信息处理的基本手段之一,可应用于光存储<sup>[17]</sup>、全息显示<sup>[18]</sup>、光信息处理<sup>[19]</sup>、空间调制器<sup>[20]</sup>、全光学时间微分器<sup>[21]</sup>以及图像相减、相加、反演等众多领域。

## 2.2 光折变全息存储及显示原理

全息术是由英国物理学家 Gabor<sup>[22]</sup>在 1948 年首先提出的,初衷是为了消除电子显微镜的像差,提高图像的分辨率。由于当时没有足够强的相干辐射光源,并且无法分离和观察共轴记录技术形成的“孪生像”,限制了全息技术的发展和應用。1960 年激光器的发明极大地推动了全息术的发展,再次引起了人们对全息

技术的研究兴趣。随后 Leith 等<sup>[23]</sup>采用离轴的记录方式,消除了孪生像,成功将不同衍射级的图像分离开来。1971 年, Gabor 因为发明和发展了全息术获得诺贝尔物理学奖,全息技术开启了蓬勃发展的时期。

图 1 所示为 2008 年美国亚利桑那大学基于光折变聚合物实现光全息存储和显示的原理图<sup>[24-25]</sup>。加载有空间光信息的信号光与另一束相干光在聚合物材料中发生干涉和衍射形成全息图。当光折变材料再次被参考光照射时,便可以读取前期存储的信息或呈现三维图像。基于二波耦合的过程分析光折变全息存储和读取的物理过程,当信号光 S 和参考光 R 以一定角度入射到光折变介质时,由于光的干涉将在介质中形成全息干涉图样。

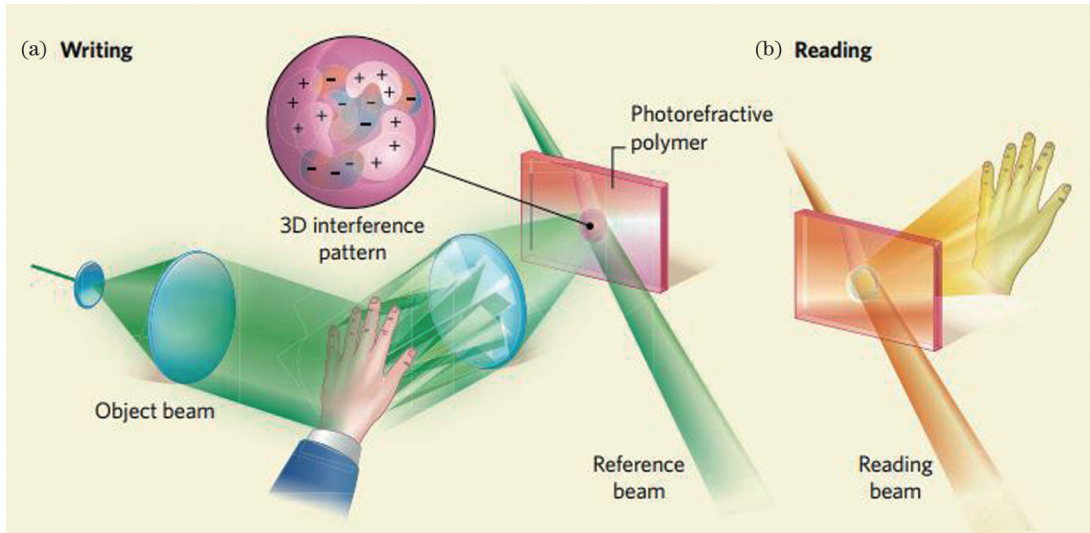


图 1 全息显示的记录和再现过程<sup>[25]</sup>。(a)记录;(b)再现

Fig. 1 Recording and reproduction processes of holographic displays<sup>[25]</sup>. (a) Recording; (b) reproduction

设通过介质的两束光波的振幅分别为

$$\begin{cases} S(x, y) = S_0(x, y) \exp [j\varphi_S(x, y)] \\ R(x, y) = R_0(x, y) \exp [j\varphi_R(x, y)] \end{cases} \quad (1)$$

则介质内叠加的光强分布为

$$I(x, y) = (S + R)(S^* + R^*) = SS^* + RR^* + SR^* + S^*R = S_0^2 + R_0^2 + 2S_0R_0 \cos(\varphi_S - \varphi_R), \quad (2)$$

其中第三项为周期变化,包含了光波的信息,致使明暗条纹的出现。

对于透射式全息,透过率函数  $T_H$  为

$$T_H(x, y) = \tau_0 + \beta [S_0^2 + R_0^2 + 2S_0R_0 \cos(\varphi_S - \varphi_R)], \quad (3)$$

式中: $\tau_0$ 为均匀透过率常数; $\beta$ 为常数项。

当读出光栅的光波与参考光相似时,可以将该光波  $C$  定义为

$$C(x, y) = C_0(x, y) \exp [j\varphi_C(x, y)], \quad (4)$$

则其复振幅为

$$W(x, y) = CT_H \propto I = C \{ \tau_0 + \beta [S_0^2(x, y) + R_0^2(x, y) + 2S_0(x, y)R_0(x, y) \cos(\varphi_S(x, y) - \varphi_R(x, y))] \} = \beta C_0 (\tau_0 + S_0^2 + R_0^2) \exp(j\varphi_C) + \beta C_0 R_0^2 \{ S_0^2 \exp[(\varphi_C - \varphi_R)] + S_0^2 \exp[j(\varphi_C + \varphi_R)] \}. \quad (5)$$

可以看出,式(5)中的第一项为直射光波;第二项中包含信号光信息 S,称为+1级衍射光波;第三项中有  $S^*$ ,即带有与信号光共轭的像的信息,称为-1级衍

射光波。而 $(\varphi_C - \varphi_R)$ 和 $(\varphi_C + \varphi_R)$ 被称作相位因子,可改变重建光波的相位。

由此可见,光折变晶体的全息三维显示通过波

前记录以及波前再现,完成了信息的存储和读取。通过改变信号光与入射光的夹角,改变两束光照射晶体的区域,可以将多个全息图存储于同一块晶体中。

### 2.3 光折变晶体全息存储及读取的特点

光折变晶体作为一种体存储材料,在实现三维存储或显示方面表现出诸多优点<sup>[26]</sup>。(1) 大容量:众所周知,衍射结构的分辨率能够达到辐照波长的量级,存储容量的极限则与辐照波长的倒数( $1/\lambda$ )正相关。如果选择可见光(波长 500 nm)进行辐照,就可在一个维度上得到  $10^5$  bit/cm 的存储信息量。如果进一步采用光折变晶体进行三维空间全息存储,则其理论存储容量的极限值可达  $1/\lambda^3$ ,即同等条件下存储容量极限达  $10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup>,这是其他存储技术所无法比拟的。(2) 并行性:基于光折变晶体的全息存储器,每页全息图中的信息量至少是  $10^4\sim 10^5$  bit,并且它们作为一个全息图可以同时存入。因此,即使光折变全息存储材料的写入和擦除时间相对较长(超过毫秒量级),并行性可使等效的信息存储速度比实际写入全息图的速度加快 4~5 个量级,这在一定程度上弥补了光折变材料响应速度慢的不足。值得提出的是,目前掺杂铌酸锂晶体的光折变响应速度已显著提升,响应时间缩短至毫秒量级<sup>[4]</sup>,这进一步极大地提高了信息存储的速率。(3) 实时性:与传统的全息记录材料(干板)相比较,光折变全息存储不需要显影、定影等手段,可以即时地存储和读取,这大大提高了其使用的便捷性。(4) 可循环使用:如果计划彻底更换光折变晶体中存储的信息,可以使用均匀光辐照或者通过升温(200 °C左右)的方法实现全部擦除,也可以通过相减光学运算方法修改部分全息图。(5) 选择性:利用光折变体材料全息图的布拉格选择性,可以有选择地进行信息检索,并实现联想记忆。(6) 可接受的暗存储时间:以铌酸锂晶体为例,暗电导比较低,暗存储时间可长达几个月,在信息不断更新的背景下,这一存储时间基本满足应用要求。对于需要长期或永久保存的信息,可以通过固定光折变光栅来实现。

## 3 铌酸锂晶体全息存储

光折变全息三维存储被认为是下一代光学存储技术之一,具有更小的体积、更大的存储量和更高的数据传输率等显著优点。LN 晶体基于其优异的光折变效应成为光学体全息存储的候选材料之一,但饱和衍射效率低、响应速度慢、易挥发、光散射明显成为限制其实际应用的直接障碍。研究人员围绕调控 LN 晶体光折变效应开展了大量工作,并取得一系列重要成果,包括发展了多种光折变饱和衍射效率显著提高、响应速度明显加快、可实现非挥发存储的掺杂 LN 晶体,发现了 LN 晶体的紫外光折变效应,揭示了光扇形效应的机制及控制方法。目前美国微软公司已

经投入大量经费研究“光云项目”,积极开发基于 LN 晶体的全息存储技术,用于解决云端数据的海量存储与交互问题。

### 3.1 可见波段光折变效应与光存储

所谓光折变掺杂,是指掺入某种或几种离子后 LN 晶体的光折变效应能够得到增强。研究发现通过掺杂变价离子,尤其是过渡金属离子,如铁、铜、锰、镍等,可以提高 LN 晶体的光折变性能<sup>[27-29]</sup>。这些过渡金属离子以缺陷形式进入 LN 的晶格中,一方面在合适的激光照射下激发电子,另一方面还能够在晶体禁带中引入适当的能级,提高晶体的光折变能力,有利于全息存储的数据存储深度。掺杂 LN 晶体中以大家熟知的 LN:Fe 晶体最为典型<sup>[8]</sup>,该晶体的饱和衍射效率超过 70%(波长 488 nm 时),并且光栅在黑暗环境下可以存储较长时间,因此一提到铌酸锂的光折变全息存储,人们就会想到 LN:Fe 晶体。但 LN:Fe 晶体中存在较强的光感应“扇形”噪声光散射,这会引致存储器件输出图像或数据的严重畸变,此外 LN:Fe 晶体的光折变响应时间在分钟量级,同样制约了其实际应用。

对掺杂 LN 晶体的光折变性能研究表明,易变价的掺杂离子可以作为光折变中心提高晶体的光折变性能,不变价离子掺杂通常可以提高晶体的抗光折变能力。南开大学张光寅课题组 Liu 等<sup>[30-33]</sup>首先提出通过抗光折变离子与光折变离子的共掺,可以达到取长补短的效果,大幅提高 LN 晶体的光折变灵敏度。其中抗光折变离子的主要作用是消除本征缺陷形成的双极化子( $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}\text{-Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$ )和小极化子( $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ ),减少它们对载流子迁移的束缚。许京军、孔勇发课题组 Zhang 等<sup>[34-37]</sup>先后报道了共掺抗光折变离子( $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{In}^{3+}$ 、 $\text{Hf}^{4+}$ 、 $\text{Zr}^{4+}$ 等)可以提高 LN:Fe 的响应速度,其中效果最显著的是锆铁双掺 LN(LN:Zr,Fe)晶体,响应时间缩短到秒量级(1.8 s),饱和衍射效率达 40% 以上(波长 532 nm 时),如表 1 所示。此外, LN:Fe 晶体的一个缺点是光感应光散射阈值低,双掺铌酸锂晶体可以同时有效提高铌酸锂晶体的光散射阈值。遗憾的是,目前双掺 LN 晶体的秒量级响应仍然较慢,无法满足日益增长的光全息存储的数据写入和提取要求。

### 3.2 紫外光折变效应与光存储

由于短波激光可提高全息的分辨率和灵敏度,铌酸锂晶体在紫外光波段的光折变特性及应用成为光全息存储研究的重要组成部分。研究人员对纯 LN 晶体和掺铁 LN 晶体的紫外光折变效应开展了很多研究,包括载流子类型及迁移动力、二波耦合光放大等<sup>[38-39]</sup>。2000 年,南开大学许京军(Xu)等<sup>[40]</sup>发现了在 351 nm 紫外激光作用下高掺镁铌酸锂(LN:Mg)晶体光折变增强效应,并对其开展了系统研究,研究结果表明 LN:Mg 晶体在紫外光作用下衍射效率大大

表 1 不同双掺 LN 晶体的光折变性能对比(激光波长为 532 nm, 功率密度为 250 mW/cm<sup>2</sup>)<sup>[37]</sup>Table 1 Comparison of photorefractive properties of different co-doped LN crystals  
(laser wavelength: 532 nm; intensity: 250 mW/cm<sup>2</sup>)<sup>[37]</sup>

Sample	Doping concentrations				Photorefractive properties			
	Fe mass fraction / %	Mg molar fraction / %	Hf molar fraction / %	Zr molar fraction / %	$\eta_{\text{sat}} / \%$	$\tau_r / \text{s}$	$S / (\text{cm} \cdot \text{J}^{-1})$	$\sigma_{\text{ph}} / (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$
LN:Fe	0.01				70	160		
LN:Fe,Mg <sub>2</sub>	0.01	2			70	60		
LN:Fe,Mg <sub>6</sub>	0.01	6			15	15		
LN:Fe,Hf <sub>2</sub>	0.03		2		68.0	17.2	3.99	$1.31 \times 10^{-13}$
LN:Fe,Hf <sub>5</sub>	0.03		5		55.4	10.7	5.23	$1.78 \times 10^{-13}$
LN:Fe,Zr <sub>1</sub>	0.03			1	25.5	2.2	13.46	$2.52 \times 10^{-12}$
LN:Fe,Zr <sub>2</sub>	0.03			2	32.0	1.8	12.87	$2.91 \times 10^{-12}$
LN:Fe,Zr <sub>3</sub>	0.03			3	32.7	1.8	13.48	$2.72 \times 10^{-12}$
LN:Fe,Zr <sub>4</sub>	0.03			4	32.5	1.8	13.40	$3.10 \times 10^{-12}$
LN:Fe,Zr <sub>5</sub>	0.03			5	42.2	2.2	12.61	$3.04 \times 10^{-12}$

增强,响应时间明显缩短,双光耦合系数、光电导和光折变灵敏度也有了很大提高。这一结果与之前人们公认的“镁是抗光折变离子”这一概念恰恰相反。随后的研究表明,在可见光波段所谓的抗光折变掺杂(镁、锌、铟等)LN晶体,在紫外波段均表现出明显的光折变效应,这极大地丰富了紫外全息存储可用的晶体类型。掺杂LN晶体能够在波长更短的紫外波段实现光折变,意味着光折变光栅的尺寸可以更小、更精细,这对于高分辨率、高灵敏度全息存储十分重要。同时,当掺镁量超过掺杂阈值时,LN晶体的紫外光散射现象同样受到了抑制,这极大地促进了晶体在全息存储方面的实际应用。随后,Lamarque等<sup>[41]</sup>采用南开大学所提供的高掺镁铌酸锂晶体作为紫外光折变晶体,用二波耦合光放大实现了可编程的二维激光打标,该套系统可用于反诈骗和信息加密等方面。

### 3.3 非挥发存储

研究人员发现LN晶体用于全息存储时,信息的读取或存储过程容易出现信息的丢失,这一现象被称作信息挥发。出现信息挥发是由于形成光折变光栅的电荷在光照的情况下进行了重新分配。人们尝试用各种方法来固定全息存储的信息,包括光固定<sup>[9,42-43]</sup>和热固定<sup>[44-46]</sup>,但这两种方法均有操作复杂、成本较高的问题。德国物理学家Buse等<sup>[9]</sup>提出通过掺杂不同能级位置的光折变杂质实现非挥发存储,并设计生长了铁锰双掺铌酸锂晶体(LN:Fe,Mn)。其中铁离子在铌酸锂带隙中占据浅能级,锰离子占据深能级,全息存储过程中分别使用紫外汞灯和红光激光激发锰离子和铁离子,利用铁离子形成的空间电荷场对锰离子施加影响,成功地将铁离子上记录的信息转移到锰离子上。当使用红光读取信息时,由于只能逐渐擦除铁离子形成的光栅,而不能激发

较深能级的锰离子,因此不影响锰离子形成的信息光栅,从而实现了非挥发存储。LN:Fe,Mn晶体一定程度上解决了光折变光栅易挥发的问题,为全息存储器从实验室走向实际应用迈出了相当关键的一步,然而,其响应速度有待提高。之后,孔勇发(Kong)等<sup>[47]</sup>分析了LN:Fe,Mn晶体的缺陷能级模型,认为在该晶体里至少包含了Fe<sup>2+/3+</sup>,Mn<sup>2+/3+</sup>,Nb<sub>Li</sub><sup>4+</sup>-Nb<sub>Nb</sub><sup>4+</sup>和Nb<sub>Li</sub><sup>4+</sup>四种缺陷,如图2(a)所示。本征缺陷相关的小极化子和双极化子使光折变过程中载流子迁移率降低,从而导致光折变响应速度较慢。他们进一步提出,通过抗光折变离子的共掺,可以消除掉晶体内部的本征缺陷而不影响充当光折变中心的掺杂缺陷,从而提高非挥发存储的响应速度。实验结果表明,铅铁锰三掺铌酸锂(LN:Zr,Fe,Mn)晶体<sup>[47]</sup>和铪铁锰三掺铌酸锂(LN:Hf,Fe,Mn)晶体<sup>[48]</sup>取得了很好的预期效果,尤其是LN:Zr,Fe,Mn晶体保持了较高的非挥发存储效率,同时响应时间缩短到1s以内,大幅提高了晶体非挥发存储的灵敏度,如图2(b)所示。与此同时,LN:Zr,Fe,Mn晶体兼顾了较高的饱和衍射效率、较长的存储时间以及显著的抗散射能力,推动了LN晶体在光全息信息存储方面的实际应用。

### 3.4 光扇形效应的抑制

在铌酸锂的光折变效应广泛应用于全息存储领域的同时,人们发现光折变全息总是受到光感应光散射(即光扇形效应)的影响。这是一种非线性光散射过程,主要原因是入射光与铌酸锂晶格缺陷引起的散射光相干涉,形成了噪声相位光栅,最终导致了散射光噪声放大。张光寅、许京军课题组通过对掺铁铌酸锂晶体光扇形效应的研究,发现光感应光散射的辐照光斑尺寸效应<sup>[10-11]</sup>和光爬行效应<sup>[12]</sup>,为光扇形现象的起因提供了直接的实验证据。因此,在全息存储的实际应

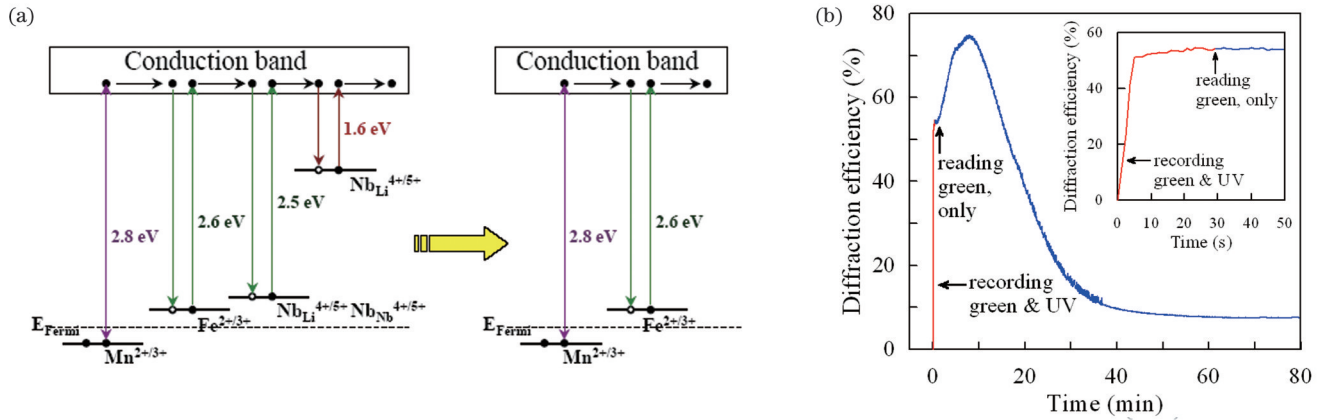


图2 掺杂LN晶体的非挥发存储<sup>[47]</sup>。(a)LN:Fe,Mn晶体的能级结构图;(b)LN:Zr,Fe,Mn晶体非挥发全息存储与读取过程  
Fig. 2 Non-volatile storage of doped LN crystal<sup>[47]</sup>. (a) Band structure of LN:Fe,Mn crystal; (b) non-volatile holographic storage and reading

用中,可以利用尺寸效应,尽可能减小入射光斑尺寸和样品厚度,提高信噪比,有效抑制光扇形效应;另外也可利用光爬行效应引起90°光散射放大与前向散射光放大的竞争,有效抑制光扇形效应<sup>[49]</sup>。通过对铌酸锂晶体的噪声多波耦合机制、信噪光之间的光放大竞争以及光致光散射光阈值效应的理论研究实现了噪声抑制,成功将存储容量提高至30 Gbit/cm<sup>3</sup>以上,比当时二维盘片的存储容量高1000倍,成功研制了三维全息海量存储器原型机。

#### 4 铌酸锂晶体动态全息显示

三维显示可以完整展现场景的强度和深度信息,以极强的视觉沉浸感和真实感,带来二维显示无法比拟的视觉体验,以及前所未有的临场感。随着增强现实、虚拟现实、元宇宙等三维应用场景的风靡,三维显示技术越发得到大众的关注<sup>[50-57]</sup>。体三维显示、光场三维显示和全息三维显示是最接近真实的三维显示技术。其中,全息三维显示无需佩戴辅助设备,避免了观看者的疲劳和眩晕,同时能够获取目标场景的所有光学信息,被公认为终极的三维显示技术<sup>[58-60]</sup>。基于光敏感材料的静态全息三维显示已取得长足发展,但受限于材料的灵敏度不够高,基于光敏感材料的实时动态全息三维显示尚未能取得突破性进展<sup>[61-66]</sup>。LN晶体具有显著的光折变效应,是三维显示的候选材料之一,但长久以来,由于响应速度慢并未得到足够关注。目前研究人员围绕基于LN晶体实现全息三维显示的研究目标,在材料性能调控、视频全息显示等方面均取得了一些关键性进展,尤其是生长了在蓝光波段能够达到实时动态显示要求的铋镁双掺LN晶体,实现了刷新频率60 Hz的视频全息显示。

##### 4.1 高价态离子掺杂

人们熟知的LN:Fe晶体的饱和衍射效率可达70%,但响应时间在分钟量级<sup>[8]</sup>;铌铁双掺LN(LN:Zr,

Fe)晶体的饱和衍射效率保持在40%以上,响应时间明显缩短,但仍在秒量级<sup>[37]</sup>。研究人员尝试了各种方案,通过共掺多种离子来提升LN晶体的光折变响应速度,研究表明高价离子能够显著影响LN晶体的光折变性能。2012年,孔勇发课题组Dong等<sup>[67]</sup>首次尝试五价离子掺杂,通过钒离子掺杂使LN晶体在532 nm激光作用下的响应时间缩短到570 ms,如图3所示;2012—2013年田甜(Tian)等<sup>[68-69]</sup>报道钼镁共掺LN(LN:Mo,Mg)晶体在671 nm、532 nm和488 nm激光作用下的响应时间分别缩短到1.2 s、0.37 s和0.33 s。通过高价态离子掺杂,LN晶体的光折变响应速度相比纯LN晶体或LN:Fe晶体光折变响应速度提高了三个数量级,为实时可刷新全息显示带来了希望,也为实时动态全息显示开拓了方向。

##### 4.2 含孤对电子离子掺杂

彩色、实时动态全息三维显示要求光折变材料在红、绿、蓝三基色都可以实时动态响应。从具体指标看,图像刷新频率需 $\geq 25$  Hz(即每帧刷新时间 $\leq 40$  ms),以达到人眼观看连贯的效果。前面提到的高价态离子掺杂LN晶体,尽管其响应时间缩短至百毫秒量级<sup>[67-69]</sup>,但仍不能满足实时动态全息三维显示的要求。

铋离子Bi<sup>3+</sup>具有特殊的核外电子排布,最外层存在两个价电子(6s<sup>2</sup>),并具有孤对电子的立体构型,可为化合物提供非中心对称的结构基元。一些常见的含铋化合物均表现出优异的非线性光学性能<sup>[70-71]</sup>。2016年,许京军、孔勇发课题组Zheng等<sup>[73]</sup>报道了掺铋LN晶体在320~420 nm的宽谱吸收,在晶体带隙中引入了缺陷能级充当光折变中心,参与晶体的光折变过程;利用铋镁双掺铌酸锂(LN:Bi,Mg)晶体,将光折变响应时间大幅缩短至170 ms,并保持了17%的饱和衍射效率。2017年,Li等<sup>[74]</sup>通过第一性原理计算发现LN:Bi晶体中的Bi孤对电子效应能够使LN的结构在局部产生极大的晶格畸变。同时,Bi最外层6s<sup>2</sup>孤对电子的局域强极化,

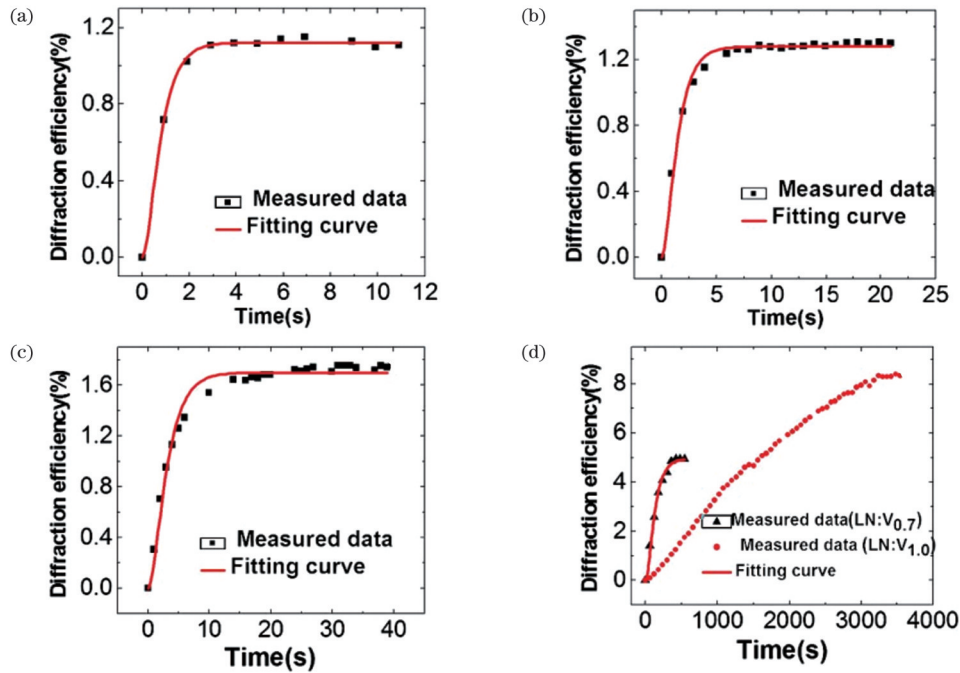


图3 不同钒离子掺杂浓度的LN:V晶体的衍射效率随时间变化曲线<sup>[67]</sup>。钒离子掺杂浓度(摩尔分数):(a) 0.1%;(b) 0.3%;(c) 0.5%;(d) 0.7%和1.0%

Fig. 3 Diffraction efficiency as function of time for LN:V crystals with different V doping concentrations<sup>[67]</sup>. V concentrations in molar fraction are: (a) 0.1%; (b) 0.3%; (c) 0.5%; (d) 0.7% and 1.0%

将导致较大的局域晶格弛豫和巨大的能量增益,产生光折变效应的显著增强,这为掺铋提高晶体光折变性能提供了理论支持。2019年,郑大怀(Zheng)等<sup>[13]</sup>生长了2英寸(1英寸 $\approx$ 2.54 cm)LN:Bi,Mg晶体,并发现在442 nm处晶体的光折变性能表现更加优异,响应时间缩短到13 ms,饱和衍射效率达27%,光折变灵敏度达到163 cm/J,与同成分LN晶体相比提高了3个数量级。图4展示了通过二波耦合实验得到的晶体衍射效率随时间变化、能量转移过程以及耦合增益等性能指标<sup>[13]</sup>。这些结果表明LN:Bi,Mg晶体表现出优异的光折变性

能,能够满足动态全息显示的基本要求,随后基于该晶体实现了刷新频率为30 Hz的动态全息显示。2021年,王烁琳(Wang)等<sup>[75]</sup>设计并生长了系列铋铈、铋钨、铋钨双掺铋酸锂晶体,并对该系列晶体的光折变效应进行了深入研究,提出了孤对电子参与的双电子激发、迁移、俘获的高效光折变机制,新引入的缺陷 $\text{Bi}_{\text{Nb}}^{2-}/\text{Bi}_{\text{Li}}^{2+}$ 作为施主,在特定波段的光辐照下它们的两个电子同时被激发、迁移,最后被受主 $\text{Bi}_{\text{Nb}}^0/\text{Bi}_{\text{Li}}^{4+}$ 俘获。该过程相比本征缺陷充当光折变中心更高效,从而使得掺铋LN晶体的响应速度显著提升。

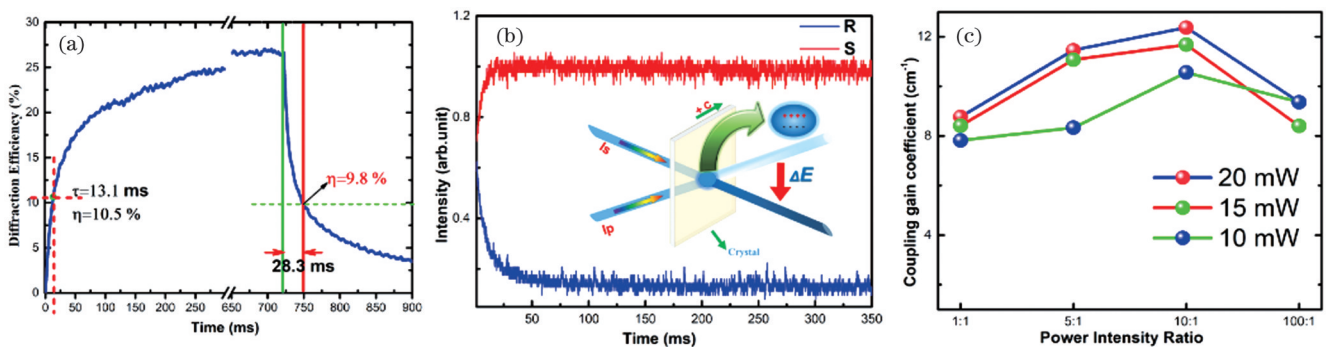


图4 LN:Bi,Mg晶体性能指标<sup>[13]</sup>。(a)衍射效率随时间的变化曲线,其中左侧曲线对应记录过程;(b)能量转移过程,图中红色曲线为信号光强,蓝色曲线为泵浦光强;(c)耦合增益系数随泵浦光与信号光强度比的变化

Fig. 4 Performance indicators of LN:Bi,Mg crystal<sup>[13]</sup>. (a) Diffraction efficiency as function of time, with curve on left side referring to writing process; (b) energy transfer from pump beam (blue line) to signal beam (red line); (c) coupling gain coefficient at different intensity ratios between pump and signal light

人们对显示效果的需求日渐提高。30 Hz的刷新频率仅仅能够达到人眼对视觉舒适性的层面,更

高的刷新频率不仅可以减少屏幕的闪烁,减轻视觉疲劳,还可以使显示更加稳定、流畅,获得更佳

看体验。王烁琳等(Wang)<sup>[14]</sup>对掺铋LN晶体的光折变性能进行了进一步优化,将LN:Bi,Mg晶体的响应时间缩短至10 ms以内,实时衍射效率达到11.4%,并通过增加4f系统改进了全息图的质量,实

现了刷新频率为60 Hz的实时动态全息显示,如图5所示。这一刷新频率与现今主流的高清显示器一致,为基于LN晶体的实时动态全息显示奠定了坚实的基础。



图5 基于铌酸锂晶体实现刷新频率为60 Hz的动态全息显示

Fig. 5 Dynamic holographic display at refresh rate of 60 Hz based on LN crystal

## 5 结束语

基于优异的光折变性能,铌酸锂成为全息三维存储和显示的主要候选材料。随着云计算等互联网技术的飞速发展,基于铌酸锂晶体的高密度、大容量光学全息三维存储为日益迫切的海量数据吞吐需求提供了解决方案。然而信息载入和提取速度的提高、固定和保存寿命的延长等问题仍需要深入研究。随着虚拟现实、增强现实、元宇宙等概念的日渐兴起,三维显示表现出巨大的应用前景和经济效益,可实时写入和读取的光折变全息显示是实现三维动态显示的重要技术方法。因此,有必要继续围绕铌酸锂晶体红、绿、蓝三波段响应速度的提高开展深入研究,提前布局动态全息显示装置及技术研究。

此外,得益于亚微米级铌酸锂单晶薄膜的产业化制备以及成熟的半导体微纳加工工艺在铌酸锂微纳器件制备中的成功应用,短短几年内基于绝缘体上铌酸

锂(LNOI)的新效应及微纳光学器件研究异军突起,取得了令人瞩目的成果。铌酸锂片上高性能电光调制器、激光器、放大器、波导等功能器件和传输器件均被成功制备,LNOI成为新一代优异的集成光子学平台之一。随着基于LNOI的集成光学器件及新效应的研究深入,光折变效应在片上微纳器件研究中也表现了出来。与体块铌酸锂晶体中一样,光折变效应对于亚微米铌酸锂薄膜的微纳器件的应用也是一把双刃剑。光折变效应对于频率梳、微波光子学等器件的性能会产生不利影响,但在一些微纳器件中也表现出了快速的光折变响应,为可编辑光子学器件方面的研究提供了机遇。因此,基于LNOI的微纳体系及相关集成光学系统中的光折变效应及应用同样值得关注。

## 参 考 文 献

- [1] Kong Y F, Bo F, Wang W W, et al. Recent progress in lithium niobate: optical damage, defect simulation, and on-chip devices[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(3): 1806452.

- [2] 郑大怀, 吴婧, 商继芳, 等. 电光调 Q 晶体研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(11): 1139-1148.  
Zheng D H, Wu J, Shang J F, et al. Progress on electro-optic crystals for Q-switches[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2017, 47(11): 1139-1148.
- [3] 高博锋, 任梦昕, 郑大怀, 等. 铌酸锂的耄耋之路: 历史与若干进展[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(7): 1183-1199.  
Gao B F, Ren M X, Zheng D H, et al. Long-lived lithium niobate: history and progress[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(7): 1183-1199.
- [4] 郑大怀, 张宇琦, 王烁琳, 等. 铌酸锂晶体的光折变效应[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(S1): 1626-1642.  
Zheng D H, Zhang Y Q, Wang S L, et al. Photorefractive effect of lithium niobate crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2022, 51(S1): 1626-1642.
- [5] Volk T, Wöhlecke M. Lithium niobate: defects, photorefractive and ferroelectric switching[M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [6] Chen F S. Optically induced change of refractive indices in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$ [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(8): 3389-3396.
- [7] Amodei J J, Phillips W, Staebler D L. Improved electrooptic materials and fixing techniques for holographic recording[J]. Applied Optics, 1972, 11(2): 390-396.
- [8] Phillips W, Amodei J J, Staebler D L. Optical and holographic storage properties of transition metal doped lithium niobate[J]. RCA Review, 1972, 33: 94-109.
- [9] Buse K, Adibi A, Psaltis D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals[J]. Nature, 1998, 393(6686): 665-668.
- [10] Zhang G Y, Li Q X, Ho P P, et al. Dependence of speckle size on the laser beam size via photo-induced light scattering in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [J]. Applied Optics, 1986, 25(17): 2955-2959.
- [11] Zhang G, Liu S, Wu Z, et al. Degenerate stimulated parametric scattering in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1987, 4(6): 882-885.
- [12] Liu S M, Xu J J, Zhang G Y, et al. Light-climbing effect in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal[J]. Applied Optics, 1994, 33(6): 997-999.
- [13] Zheng D H, Wang W W, Wang S L, et al. Real-time dynamic holographic display realized by bismuth and magnesium co-doped lithium niobate[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(24): 241903.
- [14] Wang S L, Shan Y D, Zheng D H, et al. The real-time dynamic holographic display of LN:Bi, Mg crystals and defect-related electron mobility[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(12): 210135.
- [15] Ashkin A, Boyd G D, Dziedzic J M, et al. Optically-induced refractive index inhomogeneities in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$ [J]. Applied Physics Letters, 1966, 9(1): 72-74.
- [16] Chen F S, La Macchia J T, Fraser D B. Holographic storage in lithium niobate[J]. Applied Physics Letters, 1968, 13(7): 223-225.
- [17] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory[J]. Science, 1989, 245(4920): 843-845.
- [18] Chen C P, Su Y K, Jhun C G. Recent advances in holographic recording media for dynamic holographic display[J]. Journal of Optics and Photonics, 2014, 1(1): 1-8.
- [19] Lin S H, Hsieh M L, Hsu K Y, et al. Photorefractive Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystal thin plates for optical information processing[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(7): 1112-1119.
- [20] Moreno I, Davis J A, Hernandez T M, et al. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator[J]. Optics Express, 2011, 20(1): 364-376.
- [21] Rivas L M, Singh K, Carballar A, et al. Arbitrary-order ultrabroadband all-optical differentiators based on fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1209-1211.
- [22] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [23] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with continuous-tone objects[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(12): 1377-1381.
- [24] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.
- [25] Perry J W. Update on 3D displays[J]. Nature, 2008, 451(7179): 636-637.
- [26] 孔勇发, 许京军, 张光寅, 等. 多功能光电材料: 铌酸锂晶体[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 179-180.  
Kong Y F, Xu J J, Zhang G Y, et al. Multifunctional photoelectric material: lithium niobate crystal[M]. Beijing: Science Press, 2005: 179-180.
- [27] McMillen D K, Hudson T D, Wagner J, et al. Holographic recording in specially doped lithium niobate crystals[J]. Optics Express, 1998, 2(12): 491-502.
- [28] Buse K, Jermann F, Krätzig E. Infrared holographic recording in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  and  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ [M]//European materials research society symposia proceedings. Amsterdam: Elsevier, 1995, 48: 237-240.
- [29] Yang Y P, Adibi A, Berben D, et al. The role of Mn in photorefractive  $\text{LiNbO}_3:\text{C}$  [M]//Photorefractive Effects, Materials, and Devices, July 8, 2001, Delavan, Wisconsin. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2001: 101.
- [30] Liu Y W, Liu L R, Xu L Y, et al. Experimental study of non-volatile holographic storage in doubly-and triply-doped lithium niobate crystals[J]. Optics Communications, 2000, 181(1/2/3): 47-52.
- [31] Adibi A, Buse K, Psaltis D. Two-center holographic recording[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2001, 18(5): 584-601.
- [32] Liu F C, Kong Y F, Ge X Y, et al. Improved sensitivity of nonvolatile holographic storage in triply doped  $\text{LiNbO}_3:\text{Zr, Cu, Ce}$  [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 6333-6339.
- [33] Xu Z P, Xu C, Leng X S, et al. Growth and nonvolatile holographic storage properties of Hf: Ce: Cu:  $\text{LiNbO}_3$  crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1): 661-664.
- [34] Zhang G Y, Xu J J, Liu S M, et al. Study of resistance against photorefractive light-induced scattering in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe, Mg}$  crystals [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2529: 14-17.
- [35] Zhang G Q, Tomita Y, Zhang X Z, et al. Near-infrared holographic recording with quasi-nonvolatile readout in  $\text{LiNbO}_3:\text{In, Fe}$ [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(8): 1393-1395.
- [36] Liu B, Li C L, Bi J C, et al. Photorefractive features of non-stoichiometry codoped Hf: Fe:  $\text{LiNbO}_3$  single crystals[J]. Crystal Research and Technology, 2008, 43(3): 260-265.
- [37] Kong Y F, Wu S Q, Liu S G, et al. Fast photorefractive response and high sensitivity of Zr and Fe codoped  $\text{LiNbO}_3$  crystals[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(25): 251107.
- [38] Orłowski R, Krätzig E. Holographic method for the determination of photo-induced electron and hole transport in electro-optic crystals [J]. Solid State Communications, 1978, 27(12): 1351-1354.
- [39] Jungen R, Angelow G, Laeri F, et al. Efficient ultraviolet photorefractive in  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Applied Physics A, 1992, 55(1): 101-103.
- [40] Xu J J, Zhang G Y, Li F F, et al. Enhancement of ultraviolet photorefractive in highly magnesium-doped lithium niobate crystals [J]. Optics Letters, 2000, 25(2): 129-131.
- [41] Lamarque T, Nicolaus R, Loiseaux B, et al. Programmable 2D laser marking device based on a pulsed UV image coherent amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5063: 386-388.
- [42] Imbrock J, Kip D, Krätzig E. Nonvolatile holographic storage in iron-doped lithium tantalate with continuous-wave laser light[J]. Optics Letters, 1999, 24(18): 1302-1304.
- [43] Bai Y S, Kachru R. Nonvolatile holographic storage with two-step recording in lithium niobate using CW lasers[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(15): 2944-2947.
- [44] Montemazzani G, Günter P. Thermal hologram fixing in pure and doped  $\text{KNbO}_3$  crystals[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(12): 2323-2328.
- [45] Kirillov D, Feinberg J. Fixable complementary gratings in



- photorefractive BaTiO<sub>3</sub>[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(19): 1520-1522.
- [46] Staebler D L, Burke W J, Phillips W, et al. Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 26(4): 182-184.
- [47] Kong Y F, Liu F C, Tian T, et al. Fast responsive nonvolatile holographic storage in LiNbO<sub>3</sub> triply doped with Zr, Fe, and Mn [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3896-3898.
- [48] Zhou Z F, Wang B, Lin S P, et al. Defect structure and nonvolatile hologram storage properties in Hf: Fe: Mn: LiNbO<sub>3</sub> crystals[J]. *Optik*, 2011, 122(13): 1179-1182.
- [49] 张光寅, 武原庆, 刘思敏, 等. LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体薄片中的光爬行效应[J]. *中国激光*, 1987, 14(8): 511-512.
- Zhang G Y, Wu Y Q, Liu S M, et al. Light climbing effect in LiNbO<sub>3</sub>: Fe crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1987, 14(8): 511-512.
- [50] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(11): 210030.
- [51] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12954.
- [52] Zhang C L, Zhang D F, Bian Z P. Dynamic full-color digital holographic 3D display on single DMD[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(3): 200049.
- [53] Yendo T, Fujii T, Tanimoto M, et al. The Seelinder: cylindrical 3D display viewable from 360 degrees[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2010, 21(5/6): 586-594.
- [54] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 28.
- [55] Yu H, Lee K, Park J, et al. Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(3): 186-192.
- [56] Carmigniani J, Furrer B, Anisetti M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 51(1): 341-377.
- [57] Mystakidis S. Metaverse[J]. *Encyclopedia*, 2022, 2(1): 486-497.
- [58] Xing Y, Lin X Y, Zhang L B, et al. Integral imaging-based tabletop light field 3D display with large viewing angle[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(6): 220178.
- [59] Xia X X, Zheng Z R, Liu X, et al. Omnidirectional-view three-dimensional display system based on cylindrical selective-diffusing screen[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(26): 4915-4920.
- [60] Xiao X, Wakunami K, Nam J, et al. Three-dimensional holographic display using dense ray sampling and integral imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9117: 91170R.
- [61] Köber S, Salvador M, Meerholz K. Organic photorefractive materials and applications[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(41): 4725-4763.
- [62] Blanche P A, Bablunian A, Voorakaranam R, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80-83.
- [63] Gao H Y, Liu P, Zeng C, et al. Holographic storage of three-dimensional image and data using photopolymer and polymer dispersed liquid crystal films[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(9): 094205.
- [64] Gao H Y, Liu P, Liu J C, et al. Study on permanent holographic recording in trimethylol propane triacrylate-based photopolymer films with high diffraction efficiency[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B22-B27.
- [65] Li X, Li Y, Xiang Y, et al. Highly photorefractive hybrid liquid crystal device for a video-rate holographic display[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8824-8831.
- [66] Zhou P C, Li Y, Liu S X, et al. Colour 3D holographic display based on a quantum-dot-doped liquid crystal[J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(10): 1478-1484.
- [67] Dong Y F, Liu S G, Kong Y F, et al. Fast photorefractive response of vanadium-doped lithium niobate in the visible region[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1841-1843.
- [68] Tian T, Kong Y F, Liu S G, et al. Photorefraction of molybdenum-doped lithium niobate crystals[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2679-2681.
- [69] Tian T A, Kong Y F, Liu S G, et al. Fast UV-vis photorefractive response of Zr and Mg codoped LiNbO<sub>3</sub>: Mo[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10460-10466.
- [70] Zhang W L, Cheng W D, Zhang H, et al. A strong second-harmonic generation material Cd<sub>4</sub>BiO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> originating from 3-chromophore asymmetric structures[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(5): 1508-1509.
- [71] Xue D, Betzler K, Hesse H, et al. Origin of the large nonlinear optical coefficients in bismuth borate BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub>[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 1999, 176(2): R1-R2.
- [72] Zheng D H, Kong Y F, Liu S G, et al. The photorefractive characteristics of bismuth-oxide doped lithium niobate crystals[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(1): 017132.
- [73] Zheng D H, Kong Y F, Liu S G, et al. The simultaneous enhancement of photorefraction and optical damage resistance in MgO and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> co-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20308.
- [74] Li L L, Li Y L, Zhao X. Hybrid density functional theory insight into the stability and microscopic properties of Bi-doped LiNbO<sub>3</sub>: lone electron pair effect[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(11): 115118.
- [75] Wang S L, Shan Y D, Wang W W, et al. Lone-pair electron effect induced a rapid photorefractive response in site-controlled LiNbO<sub>3</sub>: Bi, M (M=Zn, In, Zr) crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(19): 191902.

## Lithium Niobate Crystals: From Holographic Storage to 3D Display

Zheng Dahuai<sup>1</sup>, Wang Shuolin<sup>1,2</sup>, Chen Junkun<sup>1</sup>, Zhang Yuqi<sup>1</sup>, Liu Hongde<sup>1</sup>, Ren Mengxin<sup>1\*</sup>,  
Kong Yongfa<sup>1\*\*</sup>, Xu Jingjun<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics & TEDA Institute of Applied Physics, Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China;*

<sup>2</sup>*College of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China*

### Abstract

**Significance** Lithium niobate (LN) crystal is a kind of multi-function and multi-purpose artificial crystal material, which has the advantages of good temperature stability, easy optical cold processing, and properties control. As a typical photorefractive (PR) crystal, LN is widely used in research and applications in high-density optical storage, laser physics, information processing, computing, etc. With the rapid development of information science and technology, magnetic tape, disk, and optical disc cannot meet

the increasing demand for data storage. The theoretical limit of holographic three-dimensional (3D) storage capacity can reach  $10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup>, which is much higher than the traditional one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) memory. Meanwhile, real immersion experience makes 3D display a huge market demand. The dreamed 3D display in the future should be viewed without auxiliary wearing devices. Holographic display is one of the techniques to realize 3D display. Then, with the enormous demand and rapid development of massive storage and dynamic holographic display, 3D optical storage and dynamic display based on LN crystals have once again become a research hotspot.

**Progress** Here, we present an overview of the principles, history, and recent advances in holographic data storage and display based on LN crystal. Compared with the commonly used liquid crystal display materials, LN crystals present many advantages, such as good temperature and chemical stability, high diffraction efficiency, and no need to apply high voltage. The photorefractive response of LN crystal is significantly improved by the doping of cations containing lone-pair electron, and the response time of bismuth and magnesium co-doped LN crystal is reduced to 7.2 ms under the activation of 442 nm laser, which meets the requirements of real-time dynamic holographic display. The crystal has been used to demonstrate a real-time holographic display with a refresh rate of 60 Hz, as that of the high-definition television. It seems that LN:Bi, Mg is a suitable candidate material for holographic 3D display. Meanwhile, a reasonable calculation is carried out to understand the mechanism of its fast response. The results indicate that the electron mobility while Bi occupying Nb-site is significantly greater than that in Li-site, which directly induces the fast response of LN:Bi, Mg crystals when the concentration of Mg is beyond its doping threshold. This work provides an ideal candidate material for holographic 3D display and expands the technique for performance control of LN crystals. In addition, doping high valence ions (vanadium and molybdenum) can significantly affect the photorefractive performance of LN crystals. Molybdenum and magnesium co-doped LN crystal can exhibit excellent photorefractive performance in all visible light bands, bringing hopes for real-time refreshable color holographic displays.

**Conclusion and Prospects** Due to its excellent photorefractive properties, LN has become a major candidate material for holographic 3D storage and display. With the rapid development of Internet technology, such as cloud computing, high-density and large-capacity optical holographic 3D storage based on LN crystals provides a solution to the increasingly urgent demand for massive data throughput. However, the improvement of information loading and extraction speed and the extension of fixed and storage life still need further study. With the rise of virtual reality (VR), augmented reality (AR), meta-universe, and other concepts, 3D display has shown great application prospects and economic benefits. Photorefractive holographic display that can be written and read in real time is an important technology for realizing 3D dynamic display. Therefore, it is necessary to continue to carry out in-depth research on the improvement of the response of LN crystal in red, green, and blue bands and to arrange dynamic holographic display devices and technology research in advance.

In addition, thanks to the sub-micron LN single crystal thin film preparation as well as the industrialization of mature semiconductor micro-nano processing technology in preparation of LN micro-nano devices, just after a few years, the research on the new effect of LN on insulator (LNOI) and micro-nano optics has made remarkable achievements. High-performance electro-optical modulators, lasers, amplifiers, waveguides, and other functional devices and transmission devices on the LN chips have been successfully fabricated, and LNOI has become one of the new generations of excellent integrated photonics platforms. With the in-depth research of LNOI-based integrated optics and new effects, photorefractive effect is also shown in the research of on-chip micro and nanodevices. Like bulk LN crystals, photorefractive effect is also a double-edged sword for applying micro and nanodevices of submicron LN films. On the one hand, photorefractive effect can adversely affect the performance of frequency comb and microwave photonics devices, but some micro and nanodevices, on the other hand, also show fast photorefractive response, which provides an opportunity for the research of editable photonics devices. Therefore, the photorefractive effects and applications of LNOI-based micro-nano systems and related integrated optical systems are also worthy of attention.

**Key words** materials; lithium niobate crystal; photorefractive effect; holographic storage; holographic display