

偶氮基薄膜的全息光存储

付申成, 刘益春

(东北师范大学集成光电子全国重点实验室, 紫外光发射材料与技术教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要 全息光存储利用光的干涉和衍射原理记录并重建三维信息, 具有超高存储密度和并行读写能力, 是信息存储的重要发展方向. 在诸多全息存储介质中, 偶氮分子因其分子体积小、偏振敏感、光响应速度快、折射指数变化幅度大及与聚合物基质兼容性好等优势而备受关注. 本文综合评述了40年来偶氮材料在偏振全息存储和表面浮雕光栅领域的发展情况, 特别展示了偶氮分子掺杂的聚合物薄膜高密度复用偏振全息存储的设计思路和实验结果, 分析了偶氮基薄膜用于光子集成芯片的可行性.

关键词 偶氮分子; 偏振全息; 表面浮雕光栅

中图分类号 O631; O438.1 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20250211

Holographic Optical Storage in Azo-based Films

FU Shencheng, LIU Yichun*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Key Laboratory of UV Light-emitting Materials and Technology, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract Holographic optical storage exhibits recording and reconstructing ability for three-dimensional information based on optical interference and diffraction. It has ultra-high storage density and parallel reading and writing ability, and becomes an important developing direction of information storage. Among various kinds of holographic storage media, azo molecules have attracted much attention due to their advantages such as small molecular size, polarization sensitivity, fast light response, large refractive index changes, and high compatibility with polymer matrix. Herein, we review the applications of azo materials in polarization holographic storage and surface relief gratings in the past 40 years, especially the design and experimental results of high-density multiplexing polarization holographic storage in azo molecule-doped polymer thin films. The feasibility of application of azo-based thin films in photon integrated chip is also analyzed.

Keywords Azo molecule; Polarization holography; Surface relief grating

信息载体的演变和存储技术的革新是人类文明和社会进步的标志, 在经历了雕刻、书写和磁-光电存储几个阶段后, 信息存储正朝着高效、可靠、集成的方向发展. 光存储是起步较早且技术成熟的数据存储模式, 其能耗和寿命指标在同类技术中表现出较大的优势. 当受到激光辐照时, 介质在光斑照射处发生物理或化学性质变化, 不同点位的介质状态对应于不同的数据存储单元, 由此构建出逐点扫描的光盘存储技术. 然而, 该技术中的单个光点只代表1 Bit信息, 且存储密度受限于聚焦光束的艾里斑半径. 突破传统点位式(Bit-wise)的光存储模式, 发展单点KB至MB级的页面式(Page-wise)图像存储将有效提升海量数据的处理能力.

收稿日期: 2025-07-31. 网络首发日期: 2025-09-17.

联系人简介: 刘益春, 男, 博士, 教授, 中国科学院院士, 主要从事氧化物半导体光电功能材料与器件方面的研究.

E-mail: yeliu@nenu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 12374270)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.12374270).

1948年, Gabor^[1]提出全息照相概念, 将获得的图案命名为全息图(Hologram). 但受限于当时的技术水平, 全息存储并未得到广泛关注. 直到十余年后, 激光器的出现为全息术提供了优异的相干光源, 推动了全息光存储的发展. 1963年, Van Heerden^[2]构建了全息数据存储的经典架构. 激光光源通过分束器分割为物光束和参考光束两部分, 二者空间叠加, 最终形成微纳周期结构的干涉条纹(即全息图). 该条纹涵盖了物光束振幅和相位的“全部信息”, 若介质能够复制该条纹信息, 则可实现全息光存储. 进一步调整光路的几何空间位置, 可发展出更高密度的角度复用和波长复用全息存储. 然而, 实现这些复用全息存储技术的关键是要发展出与之匹配的高性能全息存储材料, 通常要求介质具有超高的空间分辨能力、多维度光场响应特性、可形成表面光洁平整的薄膜或块体结构等.

1966年, Ashkin等^[3]观察到铌酸锂(LiNbO₃)晶体折射率受强光辐照而产生非均匀变化的现象. 1968年, Chen等^[4]基于上述发现提出将LiNbO₃晶体应用于全息光存储. 然而, 读出光辐照晶体会引发信息擦除、衍射效率降低等问题, 为此, 人们提出热固定、电固定、双色光子门记录固定、双掺杂光色效应固定和强光过写入固定等方案^[5-9], 以解决存储稳定性问题. 偏振作为激光的重要物理属性, 是拓展全息光存储维度的有效切口. 自Kakichashvili^[10]首次在光学各向异性材料中实现全息图的偏振记录以来, 偏振光栅就引起了研究者的极大关注. 光的偏振态可以用全息方法记录和再现, 全息术由此产生新分支——偏振全息术(Polarization holography)^[11]. 1985年, Todorov和Nikolova等^[12-14]首次在甲基橙掺杂的聚乙烯醇薄膜中发现偏振全息特性, 开启了有机偏振全息存储的新领域. 经过四十余年的发展, 偶氮基薄膜在多维度复用全息存储和表面浮雕光栅等方向取得了长足进步, 为微纳尺度下的光电子器件的发展提供了重要的材料平台. 本文综合评述了偶氮基薄膜的偏振全息存储基本原理、实验设计思路和应用出口, 对偶氮材料的表面浮雕光栅特性和分布反馈激光器应用也进行了系统阐述.

1 偏振全息存储

偏振全息术利用光场电矢量与极性分子之间的相互作用, 将激光偏振态随空间位置变化而形成的全息图存储在偏振敏感介质中. 这与传统光强度调制的全息图不同, 即使干涉条纹中所有区域光强是均匀分布的, 三维偏振信息也可以被介质高效识别并记录. 偶氮分子受到偏振光激励产生的光异构和光取向过程主要有3种机制^[15-20]: (1) 分子角度烧孔机制(Angular hole burning, AHB); (2) 分子角度重排机制(Angular redistribution, AR); (3) 分子角度扩散机制(Angular diffusion, AD). 如图1所示, 偶氮反式分子(*trans*)以N=N双键为中心呈空间对称分布, 电偶极矩很小; 而顺式分子(*cis*)的空间结构呈现出非对称分布, 具有较大的电偶极矩. 按照AHB机制, 反式偶氮分子吸收光子转变为顺式分子的概率正比于 $\cos^2(\theta_p)$ [其中, θ_p 是偏振光电场(E)方向与分子轴向之间的夹角]. AR机制认为如果泵浦光是线偏振光, 只要分子的电偶极矩在泵浦光偏振方向上有分量, 偶氮基团就会继续吸收泵浦光能量, 产生可逆的顺反异构. AD机制则考虑到热扰动的影响, 当环境温度高于材料的玻璃化转变温度时, 角度扩散过程将起主导作用, 阻止光致各向异性的形成. 在经历了(*trans-cis-trans*)周期性异构循环之后, 顺

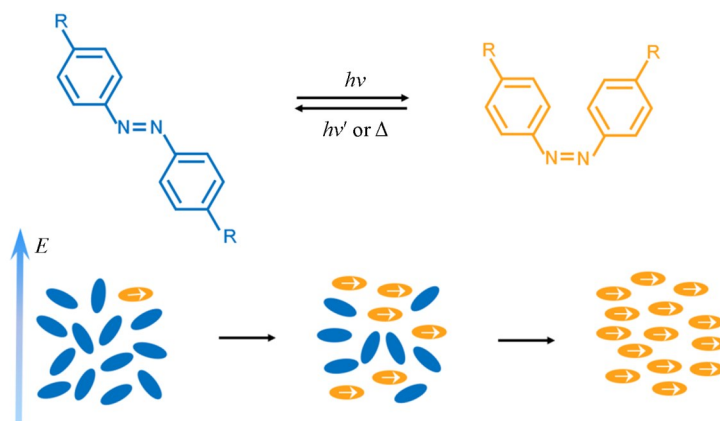


Fig. 1 Photo-isomerization and photo-orientation processes of azo molecules under polarized light excitation

式分子不断地被偏振光的电场取向, 最终不同位置处的分子主轴沿着干涉光场中的各个偏振光电矢量排布, 达到动态平衡, 实现偏振全息记录.

拓展偶氮基薄膜的写入波段是实现高密度全息存储的重要途径. 甲基橙掺杂的聚乙烯醇(MO/PVA)薄膜吸收峰位于450 nm附近的蓝光区域, 600 nm以上的红光对基态的反式分子不产生作用, 直接使用红光激光器无法对其进行全息存储. 然而, 激发态下的顺式分子在红光或热的作用下会发生分子异构的逆向反应, 如果该偶氮基薄膜中的顺式分子占据主导, 则可以实现红区存储. 为此, 吉林大学、东北师范大学和中国科学院长春物理所在上世纪九十年代中期利用红光作为记录光源, 在MO/PVA薄膜中先后实现了双光子全息存储^[21]和旋转复用偏振全息存储^[22], 为偶氮染料的高密度光存储提供了全新的研究思路和发展空间. 在单束488.0 nm蓝光预辐照后, 稳定的反式结构变成顺式结构, 聚合物基质中的顺/反式分子数比率大幅上升. 此时, 利用线偏振正交(*s-p*)的632.8 nm红光干涉光场激发薄膜介质, 由于顺式分子对632.8 nm光偏振敏感, 部分顺式分子的取向将被偏振调制, 形成分子取向光栅, 同时这部分顺式分子吸收红光能量回到稳定的反式状态, 但偏振调制的分子取向被保持. 受到聚合物基质的空间束缚, 顺式分子的寿命较长, 实验结果表明, MO/PVA经488.0 nm激光辐照10 s, 再间隔20 s后, 仍然能用632.8 nm红光记录信息, 由此可以利用其长寿命的物理过程来进行多重光学存贮. 在前述过程中的红光存贮后, 顺式分子数量减少. 通过旋转样品, 再次利用剩余取向角度的顺式分子数, 形成下一套偏振调制的分子取向光栅. 由于样品已旋转了一定角度, 因而所形成的取向光栅的方向将不同, 所以它们具有不同的衍射方向(图2). 实验上可分辨二重取向光栅衍射信号所对应样品的最小旋转角度为2°. 由于顺式分子是不稳定的, 随时间增加而有一部分顺式分子返回到反式状态, 此外, 每次旋转记录都将消耗顺式分子, 加速了顺式分子向反式分子的转变, 当顺式分子数目减少到不足以形成有效的相位光栅时则不能存贮信息.

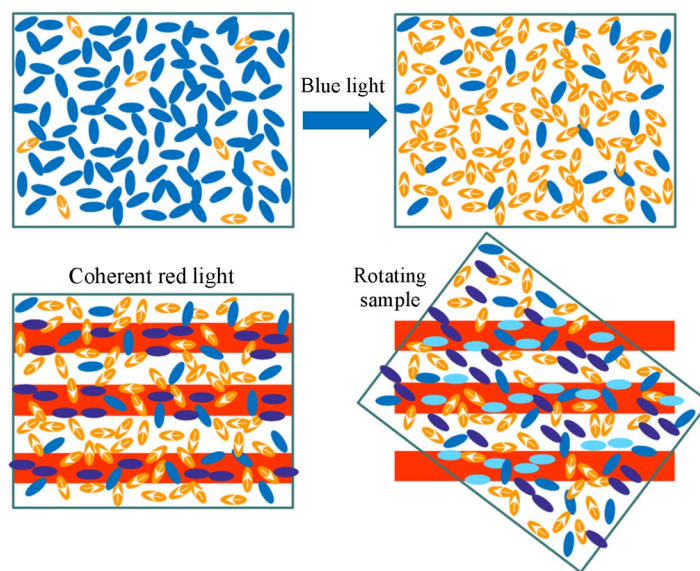


Fig. 2 Schematic diagram of polarization holographic storage mechanism of polymer film doped with azo molecules using peristrophic multiplexing techniques

为了使多重存贮中各取向光栅有较均匀的衍射效率, 在三重存贮中, 分别采用记录时间为1, 2和3 s, 获得了亮度均匀的衍射光斑. 这一设计思想的巧妙之处在于有效规避了多重存储的信息串扰, 旋转样品再次用红光存贮时, 已形成全息光栅的反式分子并不参加接续反应, 而是剩余的顺式分子被偏振调制形成新的取向光栅, 这些分子再回到反式状态时, 由于其光栅矢量与前一个光栅不同, 因而是可分辨的, 即, 后一存贮过程对前一存贮过程并无大的影响. 此外, 利用D- π -A结构使反式偶氮苯吸收边红移至红光区域, 由此可以省略蓝光门控过程, 只用红光进行数据写入和读出^[23]. 引入手性氨基酸端基, 考虑到氨基酸端基与聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基质有强氢键作用, 可限制偶氮苯分子热运动, 将有利于多幅全息图存储, 对提高有机光折变能力和偏振全息效率也有加和作用^[24,25].

由此可见, 基质环境是偶氮分子光异构和光取向过程的重要影响因素. 有效调控聚合物基质的分子量可以实现高衍射效率的体全息存储^[26]、增强光诱导分子各向异性能力^[27]. 考虑到液晶的偏振敏感性, 也可以将偶氮分子掺入聚合物分散液晶中, 形成全光开关^[28]、用于动态存储^[29]. 发展偶氮聚合物偏振光栅与铁电液晶相位遮光器相结合的光束转向技术, 可获得 95.7% 的效率和 82 μs 的切换时间, 为非机械光束转向装置提供了通用的候选方案^[30]. 圆偏振态在可更新全息响应中具有明显的优势, 与线性偏振全息术相比, 在未降低响应时间的情况下, 圆偏振全息衍射效率可提高 4 倍^[31,32], 并且其衍射图像亮度与读出光偏振态密切相关, 可调控切换信息的忠实再现或零再现^[33]. 利用偏振计还可以研究读出光偏振态与其衍射光偏振态之间的依赖关系. 这种关联特性受制于偶氮基偏振全息光栅类型, 如, 正交线偏振全息光栅能够将 s 偏振的探测光转换为 p 偏振的衍射光; 正交圆偏振全息光栅能够将右旋圆偏振 (RCP) 的探测光转换为左旋圆偏振 (LCP) 的衍射光 (图 3). 偏振全息光栅将传统玻片和衍射光栅功能整合, 形成“衍射玻片”, 对于发展多功能衍射光学元件和全光器件非常有益^[34]. 此外, 利用全息技术在偶氮聚合物薄膜中能够有效记录涡旋光场, 由于涡旋光束的轨道角动量本征值是任意拓扑荷数, 理论上具有无穷多的本征态, 允许传输内容无限增加, 这也使偶氮基薄膜在高维度偏振全息中的应用成为可能^[35].

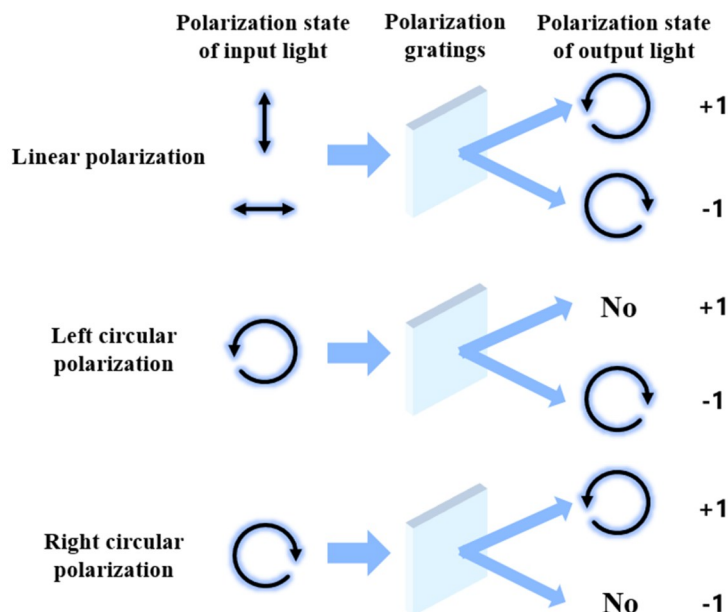


Fig. 3 Light conversion process of azo-based circular polarization holographic grating element (RCP-LCP)

2 表面浮雕光栅

将偶氮分子与聚合物主链偶联, 形成偶氮聚合物, 在偏振干涉光场作用下可构建表面浮雕光栅 (Surface relief gratings, SRGs). 1995 年, Rochon 与 Batalla 等^[36]首次报道偶氮聚合物受偏振干涉光场激发后可形成结构稳定的衍射光栅. 进一步用原子力显微镜观察薄膜表面, 发现了周期规则排布的隆起和凹陷区域. 当加热至玻璃化转变温度 (T_g) 以上时, 这种表面浮雕结构可以完全擦除且无永久损伤. 同年, Kim 与 Tripathy 等^[37,38]在非线性光学聚合物中观察到更为显著的表面形变, 调制深度达到 120 nm.

随后, 人们对偶氮基薄膜表面浮雕光栅形成机制开展了广泛探讨. 理论突破源于 1998 年 Kumar 等^[39]提出的梯度力模型, 该模型指出, 当在光栅矢量方向上存在强度梯度和电场分量时, 力密度将促进低折射率亮区的聚合物链向暗区移动, 最终产生表面浮雕图案. 光场梯度力对于 SRGs 的形成是至关重要的, 特别在 p - p 干涉模式下, 光场可以有效驱动偶氮分子沿着光栅矢量方向形成大规模质量迁移 (图 4). 2000 年, Fiorini 团队^[40]获得了实验上的直接证据, 他们通过原子力显微镜观测到发色团

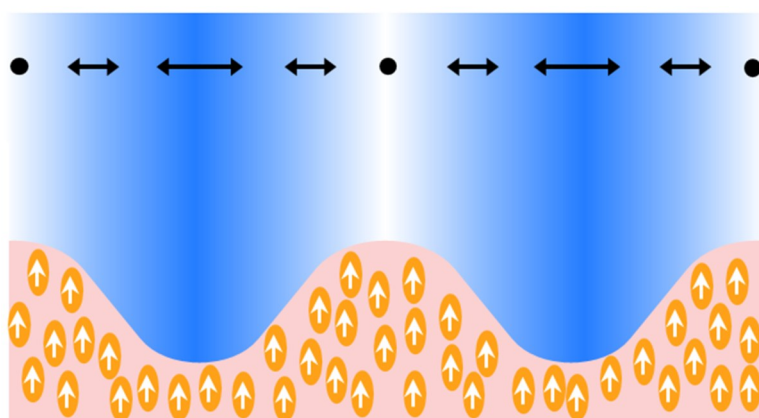


Fig. 4 Surface relief gratings of azo-based films modulated by *p-p* interference light field

从高强度区域向低强度区域定向移动,表明聚合物链的质量迁移是光诱导客体发色团运动的结果. Yager等^[41]进一步发现,含偶氮苯非线性光学发色团的聚合物薄膜对低功率干涉光有机械响应,在玻璃化转变温度以下就可以一步形成表面浮雕图案,该制备过程仅需要几秒到几分钟,调制深度却达到了原始薄膜的厚度水平. 2009年, Audorff等^[42]量化了7种偏振组合对偶氮膜SRGs调制深度的影响,表明梯度力强度差异是光栅浮雕高度分化的主要原因. 2010年, Sobolewska等^[43]进一步精确拟合了 *s-s*, *s-p* 及 RCP-LCP 偏振配置下的衍射效率实时演变规律,分析折射指数光栅和表面浮雕光栅间的相移(0或 π)是偏振全息动力学的关键影响因素.

此外,研究者们还提出了光致流体化机制,用于揭示表面浮雕形成的深层动力学. 持续的顺反异构化过程会使偶氮分子周围的聚合物基质软化,产生流动化趋势. 在非均匀光场照射下,“流化”区域与未照射区域之间的薄膜表面形变概率存在明显差异. 如,2002年, Hubert等^[44]证明偶氮苯聚合物膜在特定条件下可形成六边形微结构,其自聚焦过程依赖于激光偏振态、入射角、波长及染料性质,这一特点展示了光诱导薄膜自发图案化的分子级控制潜力. 2014年, Hurdac等^[45]通过原位光学显微镜首次观察到在没有热源控制的情况下产生的光流体化过程,其包含光照区流动化、质量向暗区迁移、反向质量位移补偿3个阶段. 随后该机制进一步发展,马兰戈尼效应^[46]和光镊效应^[47]相继被提出. 也有研究指出SRGs形成过程的局部应力也是存在的,这一过程源于侧链偶氮分子在照射区域与未照射区域之间取向程度明显不同,由此引发聚合物主链骨架的重新取向,对于不同玻璃化转变温度的薄膜均可以产生局部机械应力,引起不可逆的形变^[48].

表面浮雕光栅可以作为有效的光学反馈谐振腔,用于分布反馈(Distributed feedback, DFB)激光发射(图5). 2012年, Goldenberg等^[49]突破了传统多层器件的物理限制,通过分离染料发射光谱与偶氮吸收光谱,并结合超快光刻工艺,成功在单一偶氮层内实现了DFB激光发射. 偶氮材料双光束干涉所形成的浮雕光栅,除了直接作为DFB激光器的波导层外,还可用作复制周期性结构的模板,精准复制到

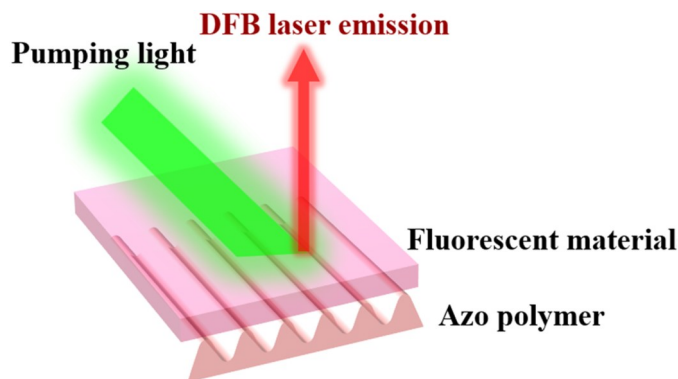


Fig. 5 Distributed feedback laser emission based on azo-polymers

低折射率聚合物上,为水凝胶增益介质提供了有效的分布式光学反馈^[50].随着这一领域研究的逐渐深入,对DFB激光器性能的提升逐渐成为研究热点.针对金属接触导致染料猝灭这一长期挑战,本团队^[51]于2025年提出了Au等离子体辅助偶氮聚合物纳米腔结构,成功制备出三层DFB器件,在完全避免猝灭效应的同时显著降低了激光发射阈值.

值得关注的是,偶氮基薄膜所形成的表面浮雕光栅的应用不止于DFB激光器.近年来,其在光驱动智能器件领域也取得了重要进展.如,Wang等^[52]在2021年利用偶氮液晶分子构建了基于Janus结构的光驱器件,实现了大角度的光控弯折;Stefan等^[53]开发的杂芳基偶氮开关实现了宽太阳光谱范围内的光响应,为发展可持续光驱动系统提供了新思路.与此同时,偶氮材料在信息处理与显示方面的潜力也被不断挖掘.2025年,Milano团队^[54]巧妙地利用了偶氮聚合物对偏振光的敏感性,成功模拟了神经形态功能,有力证明了其在模仿生物系统复杂处理能力方面的巨大潜力.McGee等^[55]则基于偏振光敏感特性,通过空间光调制器精密调控入射光偏振态的空间分布,在偶氮基薄膜上诱导形成了具有不同周期的表面浮雕光栅阵列;他们进一步利用不同周期光栅对不同波长结构光的选择性散射差异和光栅周期的空间排布,实现了可在近场观测的彩色图像.这些研究共同彰显了表面浮雕光栅及偶氮功能材料在光子学与智能材料领域的广阔应用前景.

3 总结与展望

本文系统阐述了全息光存储的基本概念,从时间维度上综合评述了全息存储介质的发展历程.分析了偏振光诱导偶氮分子光异构和光取向的物理过程,以及偶氮基偏振全息光栅的光场调控特性,展示了基于“蓝光门控+红光偏振全息+介质旋转”3种手段相结合的偶氮薄膜高密度全息光存储.系统总结了偶氮薄膜的表面浮雕光栅的形成机制和分布反馈激光发射的应用途径.近期研究表明,偶氮基薄膜偏振光存储已经扩展至光路径调控^[35]、光驱动器件^[53]、仿生模拟^[54]和彩色显示^[55]等多个领域,有望成为集成光子器件发展的重要材料平台.

1995年12月至1998年5月作者刘益春在吉林大学化学系从事博士后研究期间,开展了有机光存储方面的工作,感谢汤心颐先生和李铁津先生给予作者的鼓励和关于偶氮材料高密度全息光存储的有益讨论,谨以此文纪念二位先生.

参 考 文 献

- [1] Gabor D., *Nature*, **1948**, *161*, 777—778
- [2] Van Heerden P. J., *Appl. Optics*, **1963**, *2*(4), 393—400
- [3] Ashkin A., Boyd G. D., Dziedzic J. I., Smith R. G., Ballman A. A., Levinstein J. J., Nassau K., *Appl. Phys. Lett.*, **1966**, *9*(1), 72—74
- [4] Chen F. S., LaMacchia J. T., Fraser D. B., *Appl. Phys. Lett.*, **1968**, *13*(7), 223—225
- [5] Kirillov D., Feinberg J., *Opt. Lett.*, **1991**, *16*(19), 1520—1522
- [6] Ma J., Chang T., Hong J., Neurgaonkar R., Barbastathis G., Psaltis D., *Opt. Lett.*, **1997**, *22*(14), 1116—1118
- [7] Adibi A., Buse K., Psaltis D., *Opt. Lett.*, **1999**, *24*(10), 652—654
- [8] Buse K., Adibi A., Psaltis D., *Nature*, **1998**, *393*(6686), 665—668
- [9] Kewitsch A., Segev M., Yariv A., Neurgaonkar R., *Opt. Lett.*, **1993**, *18*(15), 1262—1264
- [10] Kakichashvili S. D., *Soviet J. Quantum Electronics*, **1974**, *4*(6), 795
- [11] Todorov T., Nikolova L., Tomova N., *Appl. Optics*, **1984**, *23*(24), 4588—4591
- [12] Todorov T., Nikolova L., Stoyanova K., Tomova N., *Appl. Optics*, **1985**, *24*(6), 785—788
- [13] Ivanov M., Nikolova L., Todorov T., Dragostinova V., *Opt. Quant. Electron.*, **1994**, *26*(11), 1013—1018
- [14] Ivanov M., Todorov T., Nikolova L., Tomova N., Dragostinova V., *Appl. Phys. Lett.*, **1995**, *66*(17), 2174—2176
- [15] Sekkat Z., Dumont M., *Appl. Phys. B*, **1992**, *54*(5), 486—489
- [16] Page R. H., Jurich M. C., Reck B., Sen A., Twieg R. J., Swalen J. D., Willson C. G., *J. Opt. Soc. Am. B*, **1990**, *7*(7), 1239—1245
- [17] Sekkat Z., Dumont M., *Appl. Phys. B*, **1991**, *52*(2), 121—123
- [18] Todorov T., Nikolova L., Tomova N., *Appl. Optics*, **1984**, *23*(23), 4309—4312
- [19] Nikolova L., Markovsky P., Tomova N., Dragostinova V., Mateva N., *J. Mod. Opt.*, **1988**, *35*(11), 1789—1799
- [20] Blanche P. A., Lemaire P. C., Dumont M., Fischer M., *Opt. Lett.*, **1999**, *24*(19), 1349—1351

- [21] Fei H., Wei Z., Wu P., Han L., Zha Y., Che Y., *Opt. Lett.*, **1994**, *19*(6), 411—413
- [22] Liu Y., Wang H., Tian M., *Proc. SPIE*, **1995**, *2405*, 148—154
- [23] Zhang Y., Lu Z., Deng X., Liu Y., Tan C., Zhao Y., Kong X., *Opt. Mater.*, **2003**, *22*(3), 187—192
- [24] Zhang Y., Lu Z., Deng X., Liu Y., Zhao Y., *Opt. Commun.*, **2003**, *220*(4—6), 289—295
- [25] Zhang Y., Tan C., Liu Q., Lu R., Song Y., Jiang L., Liu Y., *Appl. Surf. Sci.*, **2003**, *220*(1—4), 224—230
- [26] Li H., Wang J., Wang C., Zeng P., Pan Y., Yang Y., *P. JPN Acad. B: Phys.*, **2016**, *92*(8), 330—335
- [27] Schab Balcerzak E., Skorus B., Siwy M., Janeczek H., Sobolewska A., Konieczkowska J., Wiacek M., *Polym. Int.*, **2015**, *64*(1), 76—87
- [28] Shian Li M., Fuh A. Y. G., Wu S. T., *Opt. Lett.*, **2011**, *36*(19), 3864—3866
- [29] De Sio L., Serak S., Tabiryan N., Umeton C., *J. Mater. Chem.*, **2011**, *21*(19), 6811—6814
- [30] Guo Q., Xu L., Sun J., Yang X., Liu H., Yan K., Kwok H. S., *Liq. Cryst.*, **2019**, *46*(9), 1383—1388
- [31] Tsutsumi N., Yabuhara Y., Kinashi K., Sakai W., *Opt. Mater. Express*, **2017**, *7*(5), 1647—1655
- [32] Chen H., Lyu Z., Wang C., *Opt. Commun.*, **2025**, *583*, 131717
- [33] Cai P., Wang J., Wang C., Zeng P., Li H., *Chin. Opt. Lett.*, **2016**, *14*(1), 010009
- [34] Nersisyan S. R., Tabiryan N. V., Steeves D. M., Kimball B. R., *Appl. Optics*, **2009**, *48*(21), 4062—4067
- [35] Chen T. Y., Wang C. S., Pan J. Y., Sun L. L., *Acta Physica Sinica*, **2021**, *70*(5), 054204(陈天宇, 王长顺, 潘雨佳, 孙丽丽. 物理学报, **2021**, *70*(5), 054204)
- [36] Rochon P., Batalla E., Natansohn A., *Appl. Phys. Lett.*, **1995**, *66*(2), 136—138
- [37] Kim D. Y., Tripathy S. K., Li L., Kumar J., *Appl. Phys. Lett.*, **1995**, *66*(10), 1166—1168
- [38] Kim D. Y., Li L., Jiang X. L., Shivshankar V., Kumar J., Tripathy S. K., *Macromolecules*, **1995**, *28*(26), 8835—8839
- [39] Kumar J., Li L., Jiang X. L., Kim D. Y., Lee T. S., Tripathy S., *Appl. Phys. Lett.*, **1998**, *72*(17), 2096—2098
- [40] Fiorini C., Prudhomme N., De Veyrac G., Maurin I., *Synthetic Met.*, **2000**, *115*(1—3), 121—125
- [41] Yager K. G., Barrett C. J., *Curr. Opin. Solid St. M.*, **2001**, *5*(6), 487—494
- [42] Audorff H., Walker R., Kador L., Schmidt H. W., *J. Phys. Chem. B*, **2009**, *113*(11), 3379—3384
- [43] Sobolewska A., Bartkiewicz S., Miniewicz A., Schab-Balcerzak E., *J. Phys. Chem. B*, **2010**, *114*(30), 9751—9760
- [44] Hubert C., Malcor E., Maurin I., Nunzi J. M., Raimond P., Fiorini C., *Appl. Surf. Sci.*, **2002**, *186*(1—4), 29—33
- [45] Hurduc N., Donose B. C., Macovei A., Paius C., Ibanescu C., Scutaru D., Hamel M., Branza-Nichita N., Rocha L., *Soft Matter*, **2014**, *10*(26), 4640—4647
- [46] Kim C. B., Wistrom J. C., Ha H., Zhou S. X., Katsumata R., Jones A. R., Janes D. W., Miller K. M., Ellison C. J., *Macromolecules*, **2016**, *49*(18), 7069—7076
- [47] Moujdi S., Rahmouni A., Mahfoud T., Nesterenko D. V., Halim M., Sekkat Z., *J. Appl. Phys.*, **2018**, *124*(21), 213103
- [48] Yadavalli N. S., Loebner S., Papke T., Sava E., Hurduc N., Santer S., *Soft Matter*, **2016**, *12*(9), 2593—2603
- [49] Goldenberg L. M., Lisinetskii V., Gritsai Y., Stumpe J., Schrader S., *Adv. Mater.*, **2012**, *24*(25), 3339—3343
- [50] Paatelainen M., Lahikainen M., Berdin A., Kuntze K., Nau W. M., Nonappa, Priimagi A., *Adv. Opt. Mater.*, **2023**, *11*(15), 2300232
- [51] Liu Y., Zhang Z., Jiang X., Fu S., Zhang X., Liu Y., *Opt. Lett.*, **2025**, *50*(17), 5374—5377
- [52] Liu J., Wang J., Ikeda T., Jiang L., *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, *31*(48), 2105728
- [53] Zhang Z. Y., Dong D., Bösking T., Dang T., Liu C., Sun W., Xie M., Stefan H., Li T., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*(31), e202404528
- [54] Ferrarese Lupi F., Rosero-Realpe M., Ocarino A., Frascella F., Milano G., Angelini A., *Adv. Mater.*, **2025**, *37*(41), 2501813
- [55] Strobelt J., Santer S., Abourahma H., Music M., Farzan Z., Nezamis P., Leon R., McGee D. J., *ACS Appl. Opt. Mater.*, **2025**, *3*(7), 1461—1476

(Ed.: Y, K, S)