

文章编号:1002-2082(2018)05-0707-07

金纳米颗粒掺杂光致聚合物的体全息混合光栅模型

吴圣涵¹,曹良才¹,郝金坪²,朱辰²,金国藩¹

(1. 清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084; 2. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:金纳米颗粒掺杂光致聚合物在全息曝光过程中,光产物周期分布会形成折射率调制相位型主光栅,同时金纳米颗粒周期分布形成由局域表面等离子体共振引起强吸收的振幅型辅助光栅。研究基于耦合波理论的一种混合光栅模型,分析了光栅的体全息光学特性。结果表明,混合光栅中的折射率光栅和吸收光栅都能够提升体光栅的衍射效率;体光栅的角度选择性也可以得到明显的改善。

关键词:信息光学;体全息;光栅;衍射效率;光致聚合物;金纳米颗粒

中图分类号:TN26;O438.1

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0505002

Volume holographic mixed-gratings model in photopolymer doped with gold nanoparticles

Wu Shenghan¹, Cao Liangcai¹, Hao Jinping², Zhu Chen², Jin Guofan¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: During holographic recording, mixed gratings in photopolymer doped with gold nanoparticles are formed by the primary refractive index grating caused by periodic spatial distribution of photoproduct and the secondary absorption grating induced by spatial distributed nanoparticles because of local surface plasmon resonance. A mixed-grating model based on Kogelnik's coupled wave theory was investigated to analyze the volume holographic characteristics. Results show that both refractive index grating and absorption grating contribute to the improvement of diffraction efficiency; the mixed gratings also exert positive influence on angular selectivity.

Key words: information optics; volume holographic; grating; diffraction efficiency; photopolymer; gold nanoparticles

引言

体全息技术由于独特的布拉格选择性具备强大的数据存储和数据操作能力,在数据存储、三维显示以及全息光学元件设计等方面有着巨大应用前景^[1-3]。然而,体全息技术在实际应用中却受限于缺乏理想的体全息材料。传统全息材料如卤化银乳胶和重铬酸盐干板,尽管在全息技术发展中

做出了巨大贡献,但由于其后期湿化学处理方法复杂、噪声明显及受环境影响大等缺点已经不能满足体全息技术的发展需要。无机光折变材料如铌酸锂晶体、钛酸钡晶体等具有利用电荷密度差形成折射率调制以记录全息图的能力,但是其也有着记录光强阈值高、成本相对较高、光擦除和后续热固定等特点,也并非理想的体全息材料。有

收稿日期:2017-12-06; 修回日期:2018-06-26

基金项目:国家自然科学基金(61775117, 61327902, 61361160418); 固体激光技术重点实验室基金(9140C010102150C04017)

作者简介:吴圣涵(1995—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事全息光学方面的研究。

E-mail:wush15@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:曹良才(1977—),男,湖北公安人,博士,副教授,主要从事全息与光学信息处理方面的研究。

E-mail:clc@tsinghua.edu.cn

机光折变聚合物与无机光折变聚合物类似, 相对具有成本较低、加工方便、设计灵活的优点, 但需要额外施加高压, 一般厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 。色变材料等也因具有光擦除效果, 热稳定性和抗疲劳性低等缺陷, 目前还无法实现大范围体全息技术应用。光热敏玻璃具有优异的光学特性是较为理想的体全息材料, 其制造和加工成本远高于其他材料。而光致聚合物具有成本低、设计灵活、使用方便、操作简单、稳定性好等优点, 成为最具有潜力的体全息材料之一。尽管当前光致聚合物存在有高收缩率和记录的光栅衍射效率低的缺点, 但是这些缺点正在通过不同的配方和掺杂技术来逐步克服, 光致聚合物是一种非常有应用前景的体全息材料。

2000 年, 美国空军实验室在光致聚合物中掺杂金纳米颗粒, 获得了金纳米颗粒在光致聚合物中周期排布的电镜图像^[4]。随后, 日本电气通信大学 Y. Tomita 课题组先后对掺杂了二氧化钛、二氧化硅和超文化有机纳米粒子的光致聚合物进行实验探究, 获得了能够记录具有较高衍射效率体光栅及比较理想的体全息材料^[5-6]。2007 年, 德国波茨坦大学、德国弗劳恩霍夫应用聚合物研究所和乌克兰国家科学院联合探究了二氧化钛、二氧化硅纳米粒子表面修饰对掺杂聚合物的影响^[7]。2008 年, 德国波茨坦大学、乌克兰国家科学院又联合美国纽约大学对金纳米颗粒掺杂光致聚合物复合材料进行了较为深入的探究, 其实验结果显示, 尽管金纳米颗粒掺杂能够提升光致聚合物材料在记录光栅衍射效率方面的表现, 但在特定浓度下材料的光反应速率也会受到抑制, 这可能是金纳米颗粒表面局域等离子体共振产生电子云影响光引发剂活性的缘故^[8]。与此同时, 国内研究机构也开展了相关探究。河南大学黄明举教授课题组先后探究了二氧化钛、二氧化硅、四氧化三铁和三氧化二铝在光致聚合物中掺杂的影响, 并对部分纳米颗粒的纳米粒子粒径、表面修饰、浓度等参数进行了大量的实验探究^[9-13], 并在后续研究中报道了三氧化二铝纳米颗粒掺杂丙烯酰胺光致聚合物的优越性能^[14]。国内其他机构如北京理工大学等也对丙烯酰胺和聚甲基丙烯酸甲酯中的各种类型引发剂做了深入探索^[15-19]。

但掺杂技术能够提升光致聚合物衍射效率的机理依然不够明确。爱尔兰都柏林大学的 J. T.

Sheridan 教授课题组在光致聚合物的全系动力学方面做了深入研究^[20], 构建了光致聚合物多维度非局域扩散模型, 揭示了聚合物在光栅记录过程中, 由于不同空间聚合物速率导致单体空间上存在浓度差, 从而在化学势驱使下的迁移现象。针对金纳米颗粒掺杂光致聚合物, 随着全息干涉条纹照射, 较亮区域会产生较多的活性光引发剂, 进而光聚合反应比较强烈, 消耗更多单体的同时, 也会在该区域产生更多的光产物。在单体空间浓度差的驱使下, 单体会从浓度较高的暗区迁移扩散到浓度较低的亮区, 金纳米颗粒也会出现相反的迁移现象^[21]。

如图 1 所示, 纳米颗粒用非球状表示, 以示区别。全息曝光后, 会形成光产物和金纳米颗粒的相间周期排布。光产物的周期排布会形成折射率调制主光栅, 即纯光致聚合物记录信息的折射率调制光栅; 金纳米颗粒的周期排布由于金纳米颗粒独特的局域等离子体共振引起的强吸收现象会形成一个振幅型吸收光栅^[22-24]。本论文对这种材料中双重光栅的现象依据基于 Kogelnik 耦合波理论的一种混合光栅模型, 分析了光栅的体全息光学特性^[25], 以揭示金纳米颗粒掺杂光致聚合物衍射效率提升机理, 并进一步分析折射率光栅和吸收光栅对角度选择性的影响。

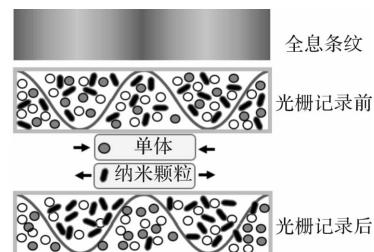


图 1 体全息光栅记录中多组分迁移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-component migration in volume holographic grating recording

1 混合光栅模型

为简化模型, 本文仅讨论金纳米颗粒掺杂光致聚合物中的非倾斜体全息光栅, 即参考光和信号光对称于材料平面法线时记录的体光栅。光栅条纹平行于材料平面法线, 光栅矢量与材料平行。如图 2 所示, 忽略垂直入射面方向(y 轴)对材料折射率和吸收的影响。材料中由周期性光产物分布形成的折射率光栅可表示为

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cos(\mathbf{K}_G \cdot \mathbf{x}) \quad (1)$$

式中: ϵ_1 为折射率光栅调制深度; ϵ_0 为平均折射率; ϵ 表示实际折射率; \mathbf{K}_G 表示光栅矢量; \mathbf{x} 表示 x 轴方向。

由空间周期排布的金纳米颗粒形成的吸收光栅可表示为

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\mathbf{K}_G \cdot \mathbf{x} + \varphi) \quad (2)$$

式中: σ_1 为吸收光栅调制深度; σ_0 为平均透射率; σ 表示实际透射率; \mathbf{K}_G 表示光栅矢量, 与(1)式中相同, 代表两个光栅矢量方向平行; \mathbf{x} 表示 x 轴方向; φ 表示吸收光栅与折射率光栅的相位差。两个光栅关系如图 2 所示。

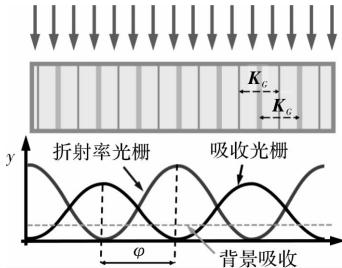


图 2 折射率调制、吸收调制及背景吸收同时存在的混合光栅示意图

Fig. 2 Illustration of relationships among refractive index grating, absorption grating and background absorption

光栅标量波动方程 $\nabla^2 E + k^2 E = 0$ 中: $E(x, y)$ 为电磁波电场复振幅分布; 传播常数 k 与折射率调制和吸收调制关系为

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon - j\omega\mu\sigma \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速。将(1)式和(2)式代入(3)式, 可得混合光栅的传播常数 k :

$$k^2 = \beta^2 - 2j\alpha_0\beta + 2\beta\kappa^+ e^{j\mathbf{K}_G \cdot \mathbf{x}} + 2\beta\kappa^- e^{-j\mathbf{K}_G \cdot \mathbf{x}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -2j\alpha_0\beta\tilde{R}(y) + 2\beta\kappa^-\tilde{S}(y) + \frac{d^2}{dy^2}\tilde{R}(y) - 2j\mathbf{K}_{Py}\frac{d}{dy}\tilde{R}(y) &= 0 \\ (\beta^2 - \sigma^2 - 2j\alpha_0\beta)\tilde{S}(y) + 2\beta\kappa^+\tilde{R}(y) + \frac{d^2}{dy^2}\tilde{S}(y) - 2j\mathbf{K}_{Dy}\frac{d}{dy}\tilde{S}(y) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中 \mathbf{K}_{Py} 和 \mathbf{K}_{Dy} 分别为读取光光波矢量和衍射光光波矢量在 y 轴方向分量。忽略(11)式中二次求导项, 可得耦合波方程:

$$\begin{cases} \cos\theta\tilde{R}^* + \alpha_0\tilde{R} = -j\kappa^-\tilde{S} \\ \cos\theta\tilde{S}^* + (\alpha_0 + j\vartheta)\tilde{S} = -j\kappa^+\tilde{R} \\ \vartheta = \Delta\theta \cdot K_G \cos\theta - \Delta\lambda \cdot K_G^2 / 4\pi n \end{cases} \quad (12)$$

其中相位光栅平均传播常数 β 和振幅光栅的平均吸收常数 α_0 分别为

$$\beta = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_0}}{\lambda}, \alpha_0 = \frac{\mu c \sigma_0}{2\sqrt{\epsilon_0}} \quad (5)$$

式中 λ 为光在真空中的波长。

两个光栅的之间的耦合常数定义为

$$\kappa^\pm = \frac{1}{4} \left[\frac{2\pi\epsilon_1}{\lambda\sqrt{\epsilon_0}} - \frac{j\mu c \sigma_1 (\cos\varphi \pm j\sin\varphi)}{\sqrt{\epsilon_0}} \right] \quad (6)$$

耦合常数 κ 表示了两个光波之间的耦合程度, 是耦合波理论的关键参数。当 $\kappa=0$ 时, 可以认为两个光波之间没有耦合, 不会发生衍射。对于体光栅, 可以利用耦合波理论近似条件, 其折射率调制度和吸收调制度可分别表示为

$$\Delta n = \frac{\epsilon_1}{2\sqrt{\epsilon_0}}, \Delta\alpha = \frac{\mu c \sigma_1}{2\sqrt{\epsilon_0}} \quad (7)$$

根据金纳米颗粒掺杂光致聚合物多组分动力学模型, 金纳米颗粒与光致聚合物的相间空间周期分布, 两个光栅之间相位差为 π 。则耦合常数可写为

$$\kappa^\pm = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \Delta n - j \frac{\Delta\alpha}{2} e^{\pm j\varphi} \quad (8)$$

只考虑一级衍射和复振幅沿 y 轴方向能量变化, 材料中的总电场包括透射场和衍射场两部分:

$$\tilde{E} = \tilde{R}(y) \exp(-j\mathbf{K}_P \cdot \mathbf{r}) + \tilde{S}(y) \exp(-j\mathbf{K}_D \cdot \mathbf{r}) \quad (9)$$

式中: $\tilde{R}(y)$ 和 $\tilde{S}(y)$ 分别为透射光和衍射光复振幅; \mathbf{K}_P 和 \mathbf{K}_D 分别为读取光和衍射光的波矢量并有关系:

$$\mathbf{K}_D = \mathbf{K}_P - \mathbf{K}_G \quad (10)$$

将(4)、(9)、(10)式代入前文提到的标量波动方程经过化简可得:

式中: θ 为介质中读取光波方向; ϑ 为定义的布拉格失配量; \tilde{R}^* 和 \tilde{S}^* 分别代表透射光和衍射光在 y 方向的导数; 该方程通解为

$$\begin{cases} \tilde{R}(y) = r_1 e^{\chi_1 y} + r_2 e^{\chi_2 y} \\ \tilde{S}(y) = s_1 e^{\chi_1 y} + s_2 e^{\chi_2 y} \end{cases} \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式可得:

$$\begin{cases} (\cos\theta\chi_i + \alpha_0)r_i = -j\kappa^- s_i \\ (\cos\theta\chi_i + (\alpha_0 + j\vartheta))s_i = -j\kappa^+ r_i \end{cases} \quad (14)$$

其中 $i=1, 2$ 。代入初始条件 $\tilde{R}(0)=1, \tilde{S}(0)=0$, 求解(14)式可得:

$$\begin{cases} \chi_{1,2} = -\frac{\alpha_0}{\cos\theta} - j\frac{\vartheta}{2\cos\theta} \mp \frac{1}{2}(\frac{\vartheta^2}{\cos^2\theta} + 4\frac{\kappa^+\kappa^-}{\cos^2\theta})^{\frac{1}{2}} \\ s_1 = -s_2 = -j\kappa^+/\cos\theta(\chi_1 - \chi_2) \\ r_1 = \frac{-\alpha_0 - \chi_2 \cos\theta}{\cos\theta(\chi_1 - \chi_2)} \\ r_2 = \frac{\alpha_0 + \chi_1 \cos\theta}{\cos\theta(\chi_1 - \chi_2)} \end{cases} \quad (15)$$

故可求得衍射光复振幅函数形式为

$$\begin{cases} S = -je^{-\alpha d/\cos\theta} e^{-je\frac{1}{v}} \text{sinc}(\sqrt{v^2 + \epsilon^2}) \\ \epsilon = \Delta\theta \cdot k_0 d \sin\theta \\ v = \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cos\theta} + j\frac{\Delta\alpha \cdot d}{2 \cos\theta} \end{cases} \quad (16)$$

式中: α_0 为材料的平均吸收常数; ϵ 为与波矢 k_0 相关的相位参量; 体全息光栅的有效厚度为 d ; 布拉格角为 θ_0 ; 角度失配量为 $\Delta\theta$ 。因此, 通过公式 $\eta = SS^*$ 可推导得到衍射效率表达式为

$$\begin{cases} \eta = SS^* = [\sin^2(\nu_r) + \text{sh}^2(D_1/2)] \exp(-2D_0) \\ \nu_r = \pi \cdot \Delta n \cdot d / (\lambda \cos\theta) \\ D_0 = \alpha_0 d / \cos\theta \\ D_1 = \Delta\alpha \cdot d / \cos\theta \end{cases} \quad (17)$$

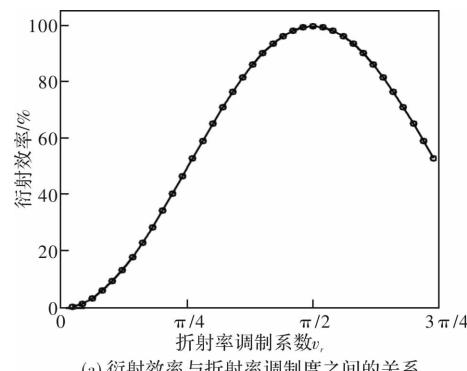
式中: D_0 为背景吸收系数; ν_r 和 D_1 分别为材料的折射率调制和吸收调制系数; 定义吸收调制深度为 $D_m = \alpha_1 / \alpha_0$ 。

2 混合光栅衍射效率及角度选择性分析

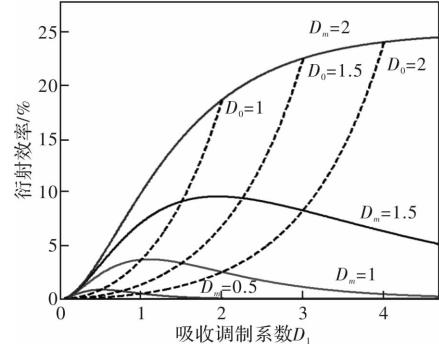
2.1 折射率调制和吸收调制对衍射效率影响

在读取材料中记录的混合体光栅过程中, 由(17)式可知, 对于同一读取入射角 θ , 其一级衍射效率主要受到体光栅记录后的折射率调制深度 Δn 、吸收调制程度 α_1 和背景吸收 α_0 影响。为方便讨论和计算, 直接计算乘以常数系数后的折射率调制系数 ν_r 、吸收调制系数 D_1 和背景吸收系数 D_0 对衍射光衍射效率的影响。根据混合光栅模型, 一级衍射光衍射效率 η 随折射率调制系数 ν_r 变化

趋势如图 3(a)所示。在初始阶段, 即 $\nu_r \leq \pi/2$, 衍射效率会随着折射率调制系数增加而增加。在到达一定程度后, 即 $\nu_r > \pi/2$, 折射率调制系数继续增加, 衍射效率反而会下降, 处于光栅过曝状态。这可能是光致聚合物中记录光栅的衍射效率会随时间变化先增加后减小的原因, 也证明了光栅实时监测系统在光栅记录中的必要性^[26]。本文讨论的体光栅均处于弱光栅调制情况, 其折射率调制系数小于 $\pi/2$ 。图 3(b)为在一定弱光栅调制情况下, 衍射效率与吸收调制参数之间的关系。吸收调制产生包括前文定义的背景吸收 D_0 、吸收调制系数 D_1 和吸收调制深度 D_m 。对于单个实线, 衍射效率随吸收调制深度增加先上升后下降。对于实线之间差异, 衍射效率随吸收调制深度增加明显上升。背景吸收对衍射效率的影响随吸收调制深度的不同而不同, 例如, 当吸收调制深度为 2 时, 衍射效率也会随着平均吸收的增大而升高, 如图 3(b)中虚线所示。通过虚线之间的差异, 背景吸收增大, 会使衍射效率降低。因此, 提高折射率调制度和吸收调制深度均可提高材料衍射效率, 背景吸收却对衍射效率呈负增益效果。



(a) 衍射效率与折射率调制度之间的关系



(b) 吸收调制深度不变时衍射效率随吸收调制度的变化曲线(实线), 背景吸收不变时衍射效率随吸收调制度的变化曲线(虚线)

图 3 混合光栅模型中的衍射效率

Fig. 3 Diffraction efficiency in mixed-grating model

2.2 折射率调制和吸收调制对角度选择性影响

体光栅具有独特的布拉格选择性, 即当参考光改变读取光栅入射角时, 衍射效率会发生急剧变化。当参考光角度改变量大于或等于 $\Delta\theta$ 时, 衍射效率近似为零。此时, 可在该入射角记录另一个光栅, 实现在同一位置记录多个光栅, 即体全息角度复用。该技术是体全息技术最重要的优势之一, 角度选择性也是体光栅的重要性能之一。

根据同相混合光栅模型, 本文讨论折射率调制光栅和吸收调制光栅对体全息角度选择性的影响。设定体光栅厚度为 1 mm, 两光束入射角均为 15° 。当背景吸收为 $D_0 = 0.5$, 无吸收调制, 即 $D_1 = 0$, 衍射效率与角度失配量之间的关系如图 4(a) 所示。由图可知, 当折射率调制度增加, 角度选择性曲线的宽度有所变窄, 即角度选择性略有提升; 但角度选择性提升极为有限, 且旁瓣衍射效率明显提升。旁瓣较高的衍射效率明显会影响复用光栅, 降低被复用光栅的信噪比, 实际上减弱了材料的角度选择性。当折射率调制系数为 $v_r = \pi/2$, 不同吸收调制系数条件下, 衍射效率与角度失配量之间的关系如 4(b) 所示。随着吸收调制系数 D_1 增加, 角度选择性半高全宽有所增加, 但其旁瓣衍射效率得到明显抑制, 在实际中增加了材料的角度选择性能力。

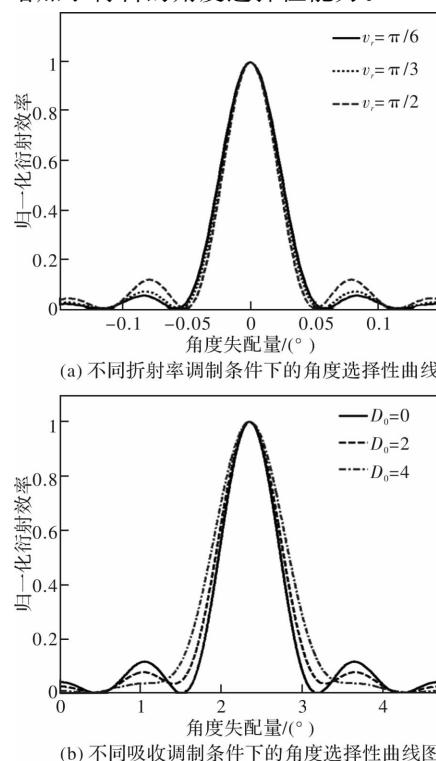


图 4 混合光栅的角度选择性

Fig. 4 Angular selectivity in mixed-gratings model

3 结论

本文依据基于耦合波理论的混合光栅模型, 分析了金纳米颗粒掺杂光致聚合物材料性能优于无掺杂光致聚合物现象的机理。掺杂光致聚合物的光栅衍射效率曾经被简单认为是折射率调制度提升的结果, 吸收会降低衍射效率。实际上, 在金纳米颗粒掺杂光致聚合物中, 增大折射率调制度和吸收调制度, 均有可能提升材料中记录光栅的衍射效率。同时还可以发现, 增大吸收调制度即提升衍射效率的同时, 对衍射效率角度选择性曲线的旁瓣起到抑制作用, 提升了光栅的综合性能。混合光栅模型的构建为今后的掺杂聚合物性能改善提供了参考依据, 有助于开发高性能的体全息光学材料和制备性能优异的体全息光栅器件。

参考文献:

- [1] GAN Liangqin, YANG Shanggong, XU Daisheng, et al. Study on making color hologram of large object [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 829-832.
- [2] LIU Hongpeng, WANG Weibo, WANG Hui. Holographic head up displays based on large photopolymer [J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(9): 92-95.
- [3] 刘鸿鹏, 王维波, 王辉. 基于大尺寸光致聚合物的全息平视显示仪研制[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(9): 92-95.
- [4] WU Shenghan, WANG Zheng, CAO Liangcai, et al. Volume holographic display technology based on angular multiplexing [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 215-220.
- [5] 吴圣涵, 王婧, 曹良才, 等. 多路角度复用体全息三维显示技术[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 215-220.
- [6] VAIA R A, DENNIS C L, NATARAJAN L V, et al. One-step, micrometer-scale organization of nano- and mesoparticles using holographic photopolymerization: a generic technique [J]. Advanced Materials, 2001, 13(20): 1570-1574.
- [7] SUZUKI N, TOMITA Y, KOJIMA T. Holographic recording in TiO_2 nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(10): 1780-1782.
- [8] SUZUKI N, TOMITA Y, KOJIMA T. Holographic recording in TiO_2 nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(10): 1780-1782.

ters, 2002, 81(22): 4121-4123.

[6] SUZUKI N, TOMITA Y, OHMORI K, et al. Highly transparent ZrO_2 nanoparticle-dispersed acrylate photopolymers for volume holographic recording [J]. Optics express, 2006, 14(26): 12712-12719.

[7] SAKHNO O V, GOLDENBERG L M, STUMPE J, et al. Surface modified ZrO_2 and TiO_2 nanoparticles embedded in organic photopolymers for highly effective and UV-stable volume holograms [J]. Nanotechnology, 2007, 18(10): 105704.

[8] GOLDENBERG L M, SAKHNO O V, SMIRNOVA T N, et al. Holographic composites with gold nanoparticles: nanoparticles promote polymer segregation [J]. Chemistry of Materials, 2008, 20(14): 4619-4627.

[9] WANG Longge, LI Feitao, ZHAO Lei, et al. Study of holographic characteristics of a photopolymer doped with TiO_2 nanoparticles [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3103-3107.
王龙阁, 李飞涛, 赵磊, 等. 掺杂 TiO_2 纳米颗粒的光致聚合物全息特性的研究[J]. 中国激光, 2010, 37 (12): 3103-3107.

[10] LI Yunxi, LI Chunliu, XUE Xiaoyu, et al. Study of holographic characteristics of photopolymers doped with different size Al_2O_3 nanoparticles [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(5): 913-919.
李赟玺, 李春柳, 薛晓渝, 等. 掺入不同粒径 Al_2O_3 纳米颗粒的光致聚合物全息特性研究[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(5): 913-919.

[11] XIAO Yong, WANG Sulian, TANG Daoguang, et al. Holographic characteristics of the photopolymer sensitized by four photosensitizers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 928-933.
肖勇, 王素莲, 唐道广, 等. 四种光敏剂共敏化光致聚合物的全息性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36 (4): 928-933.

[12] LU Hai, LI Ruoping, SUN Caixia, et al. Theoretical fitting of photochemical reaction parameters in holographic photopolymer [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 307-312.
路海, 李若平, 孙彩霞, 等. 全息光致聚合物中光化学反应参数的理论拟合研究[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 307-312.

[13] LI Chunliu, LI Yunxi, XUE Xiaoyu, et al. Holographic properties of modified and unmodified Fe_3O_4 -nanoparticles dispersed acrylate photopolymer [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 43 (6): 616006-616006.
李春柳, 李赟玺, 薛晓渝, 等. 掺杂修饰与未修饰 Fe_3O_4 纳米粒子的光致聚合物全息性能[J]. 光子学报, 2013, 43(6): 616006-616006.

[14] LI Y, WANG C, LI H, et al. Effect of incorporation of different modified Al_2O_3 nanoparticles on holographic characteristics of PVA/AA photopolymer composites [J]. Applied Optics, 2015, 54 (33): 9799-9802.

[15] GENG Yaohui, LI Chunpeng, YU Dan, et al. Preparation and volume holographic storage stability of multi-component doped P photopolymer [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(4): 692-696.
耿耀辉, 李春鹏, 于丹, 等. 多成分掺杂甲基丙烯酸基光致聚合物的制备及其体全息存储稳定性的研究[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(4): 692-696.

[16] XU Xiangmin, ZHANG Heling, LI Zhanhua, et al. Holographic grating made of two-wavelength water-resistant photopolymer [J]. Journal of Applied Optics, 2009 (5): 823-826.
徐向敏, 章鹤龄, 李展华, 等. 双波长非水溶性光致聚合物全息光栅的研究[J]. 应用光学, 2009 (5): 823-826.

[17] LIU Pan, YAO Qiuxiang, ZHENG Zhiqiang, et al. Hologram recording in photopolymer films with high diffraction efficiency [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(7): 567-571.
刘攀, 姚秋香, 郑志强, 等. 高衍射效率光致聚合物薄膜中全息记录研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32 (7): 567-571.

[18] LIN Xingyu, XING Ruisong, LIU Shui. Optical response analysis of holographic polymeric materials (PQ/PMMA) [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(3): 349-354.
林星宇, 邢端松, 刘水. 全息聚合材料 PQ/PMMA 的光学反应分析[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 349-354.

[19] RUAN Junying, KANG Guoguo, LIU Ying, et al. Study on holographic storage of PW/PMMA with different thickness [J]. Optical Technique, 2017, 43 (2): 126-129.
阮俊英, 康果果, 刘颖, 等. PQ/PMMA 光致聚合物的偏光全息特性研究[J]. 光学技术, 2017, 43 (2): 126-129.

[20] GUO J, GLEESON M R, SHERIDAN J T. A review of the optimisation of photopolymer materials for holographic data storage [J]. Physics Research

International, 2012, 2012: 1-16.

[21] LI Chengmingyue. Gold nanoparticles doped volume holographic polymers and their applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 21-25.
李承明月. 金纳米球掺杂体全息聚合物及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2014: 21-25.

[22] LI C, CAO L, HE Q, et al. Holographic kinetics for mixed volume gratings in gold nanoparticles doped photopolymer[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5017-5028.

[23] NEIPP C, PASCUAL C, BELENDEZ A. Mixed phase-amplitude holographic gratings recorded in bleached silver halide materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(10): 957.

[24] TOMITA T S, FUJIWARA H, NAKAGAWA K. Contribution of absorptive and refractive gratings to mixed holograms using xanthene-dye-doped films [J]. Optical Review, 2004, 11(1): 48-54.

[25] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.

[26] GALLEGOS, ORTUÑO M, NEIPP C, et al. Overmodulation effects in volume holograms recorded on photopolymers[J]. Optics Communications, 2003, 215(4): 263-269.