

基于不同类型明胶的 DCG 体全息光栅衍射特性研究

刘龙飞^{1,2}, 邵咏松³, 李文强², 闫占军^{1,2}, 刘玉杰^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 中国人民解放军驻六一三所军事代表室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 不同类型明胶制成的重铬酸盐明胶体全息光栅在衍射效率、带宽以及噪声等衍射性能方面存在差异, 决定了体全息光栅的光学应用领域。采用重铬酸铵明胶全息制备工艺, 研究了3种常用明胶制成的体全息光栅的衍射特性。实验表明, 在相同的条件下 GC-1 及 GC-3 明胶制成的体全息光栅衍射效率较高, 接近理想值 100%; GC-1 明胶光栅的带宽较宽, 可达到 46 nm, 而 GC-3 明胶光栅带宽较窄, 仅有 17 nm; GC-2 明胶制成的体全息光栅效率较低且曲线形状较差。对3种明胶的全息衍射特性进行了深入研究, 为不同领域全息元件制备中明胶类型的选择提供了依据。

关键词: 体全息光栅; 衍射效率; 重铬酸盐明胶; 带宽; 噪声

中图分类号: O438.1 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2016)02-0091-03

Diffraction Characteristics of DCG Volume Holographic Grating Based on Different Gelatins

LIU Long-fei^{1,2}, SHAO Yong-song³, LI Wen-qiang², YAN Zhan-jun^{1,2}, LIU Yu-jie^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

3. Military Representative office of PLA in No.613 Institute, Luoyang 471000, China)

Abstract: Volume holographic grating of Dichromated Gelatin (DCG) made of different kinds of gelatin may have different characteristics in diffraction efficiency, bandwidth and noise, which determines the application areas of the volume holographic grating. The diffraction characteristics of the volume holographic gratings made of three kinds of gelatin are studied through experiments. The experimental result shows that: 1) With the same fabrication parameters, volume holographic gratings made of GC-1 gelatin and GC-3 gelatin exhibit high diffraction efficiency (nearly 100%); 2) The bandwidth of GC-1 gelatin grating is 46 nm, while the bandwidth of GC-3 gelatin grating is only 17 nm; and 3) The GC-2 gelatin grating has low diffraction efficiency and bad curve. The study can provide a reference for selecting gelatin in fabrication of holographic grating for different application areas.

Key words: volume holographic grating; diffraction efficiency; dichromated gelatin; wavelength bandwidth; noise

0 引言

重铬酸盐明胶(DCG)是一种很好的位相型记录介质,具有成像质量好,感光度高和价格低廉的优点,广泛应用于光讯息的记录和保存^[1-4]。基于 DCG 制成的体全息光栅具有严格的波长选择性和角度选择性^[5],适用于多种全息元件的制作。而作为全息记录材料中的明胶,它的性质很大程度上决定了所制成的

体全息光栅的衍射特性及应用领域。

明胶是取自于动物不同组织部分的天然产物,原材料的来源不同和加工方法上的差异,使得不同明胶在性质上的差异很大,这些差异直接影响到 DCG 全息图的衍射特性。文献[6]发现,有较高分子量的明胶表现出较高的感光性和较低的解像力。文献[7]测定了不同明胶的分子量分布并研究了分子量分布不同对全息图性质的影响。文献[3]在分子水平上研究了不同类型的明胶对 DCG 全息图衍射效率的影响,得出活性胶所制成的全息图衍射效率较高的结论。在实际应用中,为了得到高质量的成像,往往对全息元件中体光

栅的衍射特性有着严格的要求。影响体全息光栅衍射特性的因素主要有明胶类型、曝光工艺以及化学处理等因素。本文采用目前全息领域最常用的 GC-1, GC-2 和 GC-3 3 种明胶来进行实验, 研究用不同类型明胶记录形成的体全息光栅的衍射特性的差异, 分别对这 3 种明胶进行相同的工艺处理过程, 对比相应的体全息光栅的衍射特性曲线, 讨论了各自的适用领域, 为全息元件制作中明胶类型的选择提供了依据。

1 实验

1.1 实验方案

1.1.1 样品

本文所使用的明胶来自 DCG 体全息光栅制备最常用的 3 种明胶, 由表 1 可以看出, 3 种明胶的各种参数均不相同。

表 1 3 种明胶性能指标

Table 1 Performance index of three kinds of gelatin

性能指标	GC-1 明胶	GC-2 明胶	GC-3 明胶
水分/%	10.5	12.43	8.5
勃氏粘度/(mPa·s)	7.5	4.86	5.5
透过率	450 nm	83.1	93
	650 nm	98	98
PH	6.5	6.18	5.5
二氧化硫	18	20.46	16

1.1.2 光路

实验中使用的主要仪器有: Ar⁺ 氩离子激光器(波长 514 nm)、激光照度计、分光光度计、全息干板(6 块)等。

本文采用双光束曝光光路, 形成的体全息光栅更加均匀、稳定。如图 1 所示, 由激光器发射的光束经过分束镜后沿不同的光路进行传输, 两光束分别通过不同的反射镜、空间滤波器及扩束镜后相遇, 在 DCG 膜层发生干涉, 再经过后期处理可得到体全息光栅。曝光过程中, 全息干板整体浸泡在匹配液中, 所采用的材料为 K9 玻璃, 这是为了使其衍射效率与匹配液更加接近, 以降低体全息光栅的噪声干扰, 同时提高衍射效率。

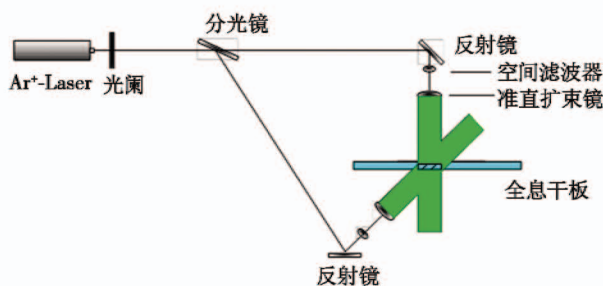


图 1 双光路激光曝光光路

Fig. 1 Exposure experiment of dual optical path

1.1.3 方法

本实验中体全息光栅的制作流程主要包括涂板、敏化、曝光、处理 4 个过程。分别采用 125 mJ/cm² 和 200 mJ/cm² 曝光量进行曝光, 每种明胶各自对应两种曝光量, 编号为 1, 2。其他环节的处理工艺均相同。具体制作流程如下所述。

1) 涂板: 在玻璃平板上覆盖一层浓度为 4% 且含有 0.4% 重铬酸铵的明胶溶液; 在室温(25 °C)下干燥 24 h; 在 85 °C 下烘烤 2 h。

2) 敏化: 将全息干板浸入浓度为 3% 的重铬酸铵溶液中 15 min, 溶液温度为 25 °C; 将敏化后的全息干板静置 20 h。

3) 曝光: 使用能量密度为 125 mJ/cm² (200 mJ/cm²) 氩离子激光器($\lambda = 514$ nm) 对全息干板进行曝光。

4) 处理: 在 0.5% 的重铬酸铵溶液中浸泡 15 min; 在定影液中浸泡 9 min; 使用去离子水冲洗 20 min; 连续使用不同浓度(50%, 70%, 100%) 的异丙醇对全息干板进行脱水干燥, 脱水时间分别为 8 min, 8 min, 10 min。

1.2 体光栅衍射特性参数的定义

为了更好地描述体光栅的性能, 需要采用一些特征参数来对体光栅进行表征。体光栅的衍射特性参数包括角带宽、波带宽、衍射效率及噪声等^[8-10], 本文主要讨论波带宽、噪声及衍射效率这 3 种衍射特性。

1) 平均噪声。噪声是在曝光区域和非曝光区域都存在的、影响体光栅衍射效率的多种因素的集合, 包括菲涅耳反射、材料吸收和非使用级次衍射等。如图 2 所示, 在非衍射波段, 因为有噪声的存在, 体光栅的透过率并非 100%, 定义 500 ~ 680 nm 波段的噪声平均值作为平均噪声 δ , δ 可以很好地反映体光栅整体的透过率特性。

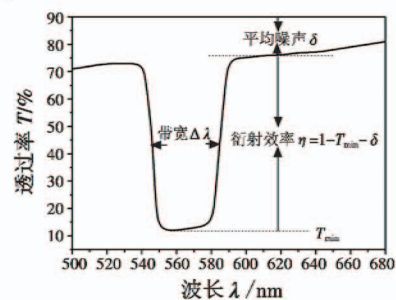


图 2 体全息光栅透过率曲线

Fig. 2 Transmission efficiency curve of volume holographic grating

2) 衍射效率。体光栅的衍射效率通常定义为从光栅衍射输出的光通量与入射光波的总光通量之比。在不考虑菲涅耳反射、材料吸收和非使用级次衍射等噪声因素作用的情况下, 体光栅的衍射效率 η 与透过

率 T 之间的关系为

$$\eta = 1 - T \quad (1)$$

若考虑噪声因素,则式(1)可以进一步精确为

$$\eta = 1 - T - \delta \quad (2)$$

因此,本文以式(2)为依据来测定体全息光栅衍射效率,首先通过分光光度计测定体全息光栅在不同波长下的透过率曲线,根据透过率曲线可以得到体光栅的噪声参数,然后计算出特定波长下的衍射效率。

3) 波带宽。将体全息光栅衍射效率下降到峰值的一半时所对应的波长差定义为波带宽 $\Delta\lambda$ 。

2 实验结果与讨论

测试结果如图 3 所示。

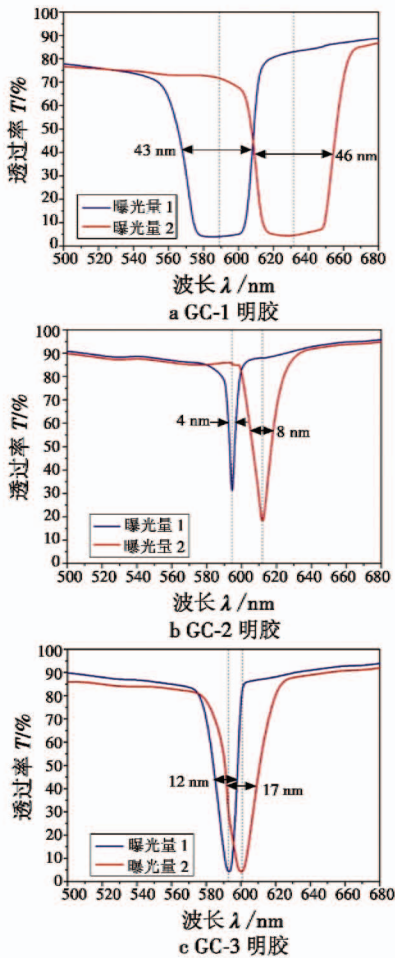


图 3 3 种明胶体光栅透过率曲线

Fig. 3 Volume holographic grating transmission efficiency curves of the three kinds of gelatin

按照 2.2 节的定义,可以得到表 2 中的体全息光栅衍射特性参数。表 2 给出了两种曝光量下在不同明胶上记录形成的体光栅的峰值波长、波长带宽、平均噪声和衍射效率等特征参数。在相同的曝光量下,不同明胶形成的体全息光栅的衍射特性有着明显的差别。

基于 GC-1 明胶记录形成的体全息光栅具有大的带宽及较高的衍射效率,且线型陡直,但其平均噪声相对于其他两种明胶较大;基于 GC-2 明胶记录形成的体全息光栅带宽较窄,衍射效率也偏低,但平均噪声相对较小;基于 GC-3 明胶记录形成的体全息光栅则具有窄的带宽和高的衍射效率,同时平均噪声也较小。比如曝光量为 200 mJ/cm^2 时,GC-1 明胶光栅波长带宽为 43 nm ,是 GC-3 明胶光栅的 3 倍多。对于同一种明胶,高曝光量形成的体全息光栅的峰值波长偏短。同时,随着曝光量的增加,体全息光栅的波带宽和噪声也相应有所增大的趋势。对于衍射效率的变化,文献[3]中已经做过相关实验,结论是同一明胶所对应的体全息光栅的衍射效率随曝光量的变化是先随曝光量的增大而增大,达到一个最大值,然后开始下降。

表 2 3 种明胶对应体全息光栅特性

Table 2 Volume holographic grating performance of three kinds of gelatin

明胶 编号	曝光量/ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	带宽 $\Delta\lambda/\text{nm}$	峰值波 长/ nm	平均噪 声 $\delta/\%$	衍射效 率 $\eta/\%$	
GC-1	1	200	43	589	22	75
	2	125	46	632	23	74
GC-2	1	200	4	594	14	56
	2	125	8	612	14	68
GC-3	1	200	12	593	13	83
	2	125	17	601	16	80

体全息光栅由于其“体”本质,故具有严格的布拉格波长和角度选择性,体全息光栅这个特性可应用于多种全息光学元件。全息光学元件的优点是结构紧凑、重量轻、成本低,并能提供一些独特的功能,因此越来越广泛地应用在各个领域中。而不同的全息光学元件对光栅衍射特性有着不同的需求。例如,GC-3 明胶光栅可应用于全息衍射平显中,充分利用了其在某个窄波段范围内有高的衍射效率、在此外的波段范围内有高的透过效率的特性,目前,全息衍射平显已经批量装备战斗机和民用运输机。除此之外,GC-3 明胶光栅还可以用于体全息相关识别、高密度体全息存储、光互连、光谱滤波等领域。而在新一代的机载瞄准显示系统的全息波导显示系统中,要求体光栅具有高效率、宽带宽、低噪声的特性,相比之下,GC-1 明胶光栅更为合适。

3 总结

通过实验发现,在相同工艺条件下,不同类型的明胶所制成的体全息光栅的衍射特性有着明显的差别。其中,GC-1 明胶光栅和 GC-3 明胶光栅衍射效率较大,GC-2 明胶光栅和 GC-3 明胶光栅的噪声较小,而带宽方面,GC-1 明胶光栅最大,GC-3 明胶光栅次之,GC-2

(下转第 103 页)

- 721-732.
- [7] PIRKUL H, ARAS O A. Capacitated multiple item ordering problem with quantity discounts [J]. IIE Transactions, 1985, 17(3):206-211.
- [8] 郭霖瀚,王恺,王严. 多级多层维修器材供应链需求建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10):2038-2043. (GUO L H, WANG K, WANG Y. Multi-indenture multi-echelon spare part supply chain requirement modeling and simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10):2038-2043.)
- [9] EYNAN A, KROPP D H. Periodic review and joint replenishment in stochastic demand environments [J]. IIE Transactions, 1998, 30(11):1025-1033.
- [10] KHOUJA M, MICHALEWICE Z. A comparison between genetic algorithms and the RAND method for solving the joint replenishment problem[J]. Production Planning & Control, 2000, 11(6):556-564.
- [11] DE GIOVANNI L, PEZZELLA F. An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem [J]. European Journal Operation Research, 2010, 200(2):395-408.
- [12] 李敏强,寇纪淞,林丹,等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:174. (LI M Q, KOU J S, LIN D, et al. Basic theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002:174.)
- [13] 王林,陈璨,曾宇容. 资源约束情况下随机性联合采购模型的差分进化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7):1541-1546. (WANG L, CHEN C, ZENG Y R. Differential evolution algorithm for stochastic joint replenishment model with resource constraint[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7):1541-1546.)

(上接第93页)

明胶光栅最低。同时,曝光量对体全息光栅的衍射特性也有着显著的影响,随着曝光量的增加,体光栅的峰值波长变短,噪声增大。由此可见,不同记录材料形成的体全息光栅具有不同的衍射特性,分别具有不同的应用价值。在体全息光栅的研究中,全息记录材料的选取至关重要。本实验对比分析了3种常用明胶所制成的体全息光栅的衍射特性,讨论了各自的适用范围,为全息工作者对明胶类型的选择提供了依据。

参 考 文 献

- [1] BOFFI P, UBALDI M C, PICCININ D, et al. 1550 nm volume holography for optical communication devices[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(10):1355-1375.
- [2] ZHENG G W, TAN J C, HE Y L, et al. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6):1554-1559.
- [3] 熊良文,哈流柱,彭必先,等. 不同类型的明胶对 DCG 全息图的衍射效率影响的研究[J]. 感光科学与光化学, 1997, 15(1):32-38. (XIONG L W, HA L Z, PENG B X, et al. A study on effect of different gelatins on diffraction efficiency of dichromated gelatin holograms[J]. Photographic Science and Photochemistry, 1997, 15(1):32-38.)
- [4] 于松嘉. 全息记录材料的某些研究和进展[J]. 影像技术, 1999(2):7-9. (YU S J. Some researches of holographic materials and their advancements [J]. Image Technology, 1999(2):7-9.)
- [5] 陶世荃,江竹青,万玉红,等. 光学体全息技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2013:6-7. (TAO S Q, JIANG Z Q, WAN Y H, et al. Optical volume holographic technology and application[M]. Beijing:Scienc Press, 2013:6-7.)
- [6] ENDO A, YADA T, MAEJIMA T, et al. Relationship between molecular weight and exposure characteristics of dichromated gelatin [J]. Journal of the Society of Photographic Science and Technology of Japan, 1984, 47:329.
- [7] LIM Y H, KOBAYASHI H, OKAWA Y, et al. Relationship between photographic characteristics and molecular weight distribution of dichromated gelatin[J]. Photographic Science and Engineering, 1993, 41(6):203-205.
- [8] 彭必先,熊良文,陈丽娟. DCG 全息研究进展[J]. 功能材料, 1997, 28(5):446-454. (PENG B X, XIONG L W, CHEN L J. The development of studies on DCG holography[J]. Functional Materials, 1997, 28(5):446-454.)
- [9] 周海宪,程云芳. 全息光学[M]. 北京:化学工业出版社,2006:28-29. (ZHOU H X, CHENG Y F. Holographic opticals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:28-29.)
- [10] 孙青荣,李荣. 全息图像实验的噪声及衍射效率[J]. 新余高专学报, 2003, 8(2):13-15. (SUN Q R, LI R. The noise and diffraction efficiency of the hologram experiment[J]. Journal of Xinyu College, 2003, 8(2):13-15.)