文章编号:1005-4642(2022)06-0043-06



全息光栅实验的教学研究

赵康鑫^a,于 吴^a,郎赤诚^a,陶冠奇^b, 康秀英^c,彭宇帆^b,王引书^{b,c,d} (北京师范大学 a. 未来教育学院,广东 珠海 519087; b. 实验与实践创新教育中心,广东 珠海 519087; c. 物理学系,北京 100875;d. 文理学院,广东 珠海 519087)

摘 要:通过光栅制备及表征实验,将全息技术、分光计应用、光谱仪技术及应用和夫琅禾费衍射等实验有机结合成 光学模块体系.搭建了三角形和马赫-曾德尔干涉光路,制作了光栅常量为 6.624~182.4 μm 的一维和二维全息光栅. 利用光纤光谱仪校准激光波长,用光学显微镜观察光栅结构,并用分光计准确测量光栅衍射角,通过夫琅禾费衍射仪测 量光栅衍射的强度分布,系统分析了光栅特性.通过实验验证了干涉角 φ>1.88°的条件下,实现全息光栅的可控制作.

关键词:全息光栅;正弦型振幅光栅;光栅常量 中图分类号:O436.1 文献标识码:A DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.06.008

任何具有空间周期性的衍射屏都可以称为衍 射光栅,光栅是极为重要的分光元件[1],广泛用于 单色仪、摄谱仪、光谱仪、光纤通讯、光计算机技 术、光信息处理系统等领域[2]. 全息光栅的制作 原理是相干光干涉条纹在全息干板上的记录,制 备方法有菲涅耳双棱镜法、阿贝成像原理法、杨氏 双缝干涉法、菲涅耳双面镜法、迈克耳孙干涉法、 马赫-曾德尔干涉法等[3-6]. 全息光栅的制作与表 征涉及光的干涉、衍射原理,通过全息光栅的制作 与表征,可以将全息技术、夫琅禾费衍射原理与技 术、光谱仪及分光计的应用等实验内容有机结合, 学生可以学习如何应用相关知识,从不同角度,用 不同分析技术综合研究特定问题,建立严谨对待 实验结果的科学态度;同时以光栅技术为切入点, 可以了解与之相关的光刻等高端技术.因此,全 息光栅的制作与其参量测量在大学物理实验教学 中占据重要地位,对培养学生自主探索、综合应用 相关知识等有一定意义.

本文利用不同光路的激光全息方法制作了多 组光栅常量各不相同的一维、二维全息光栅,用不 同的方法测量了所制作光栅的光栅常量和衍射强 度分布,结合 Matlab 软件模拟分析了影响正弦型 光栅衍射强度分布的因素,给出了制备全息光栅 参量可控的实验条件,探索了将多个光学实验进 行有机结合,培养学生从不同角度研究同一物理 问题的思维方法,提高学生综合分析问题和解决 问题的能力.

1 实验仪器与方法

在光学平台上完成全息光栅的制作,采用 655 nm的半导体激光器作为光源,分别采用了如 图 1 所示的三角形光路和马赫-曾德尔干涉光路 来制作一维全息光栅,二维全息光栅的制作是在 一维光栅的基础上,通过将全息干板旋转 90°进 行二次曝光制作完成.制作光栅的条件如表 1 所 示.实验首先用光纤光谱仪测量激光器的光谱来 校准激光的波长;然后用光学显微镜观察光栅的 结构,并用分光计准确测量光栅的衍射角;最后用 夫琅禾费衍射实验仪测量光栅衍射的强度分布, 计算光栅常量并进行对比分析.采用 Matlab 软 件模拟正弦型光栅的衍射强度分布,综合分析全 息光栅的衍射特性.

收稿日期:2021-10-13;修改日期:2021-12-21

基金项目:北京师范大学教学建设与改革项目(No. S212129)

作者简介:赵康鑫(2001-),男,甘肃兰州人,北京师范大学未来教育学院 2019 级物理学专业本科生. E-mail: 201911039513@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:王引书(1967一),女,甘肃静宁人,北京师范大学物理学系教授,博士,从事低维材料物理研究及实验教学. E-mail:yswang@bnu.edu.cn



⁽a)三角形光路(b)马赫-曾德尔干涉光路图 1 实验光路

表1 光栅制作的设计参量及测量的光栅常量

| 光栅 | $	heta_{ m D}/(\degree)$ | $\sin 	heta_{ m D}/10^{-3}$ | $d_{ m D}/\mu{ m m}$ | $d_{ m S}/\mu{ m m}$ |
|----|--------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0.103 | 1.798 | 182.4 | 170.8 |
| 2 | 0.300 | 5.236 | 62.62 | 61.63 |
| 3 | 0.660 | 11.52 | 28.46 | 30.50 |
| А | 2.29 | 39.97 | 8.206 | 8.145 |
| В | 3.07 | 53.58 | 6.122 | 6.624 |

注:下标 D 表示实验预设值,S 表示分光计测量值.

2 实验原理

2.1 全息光栅制作原理

图1中的三角形光路和马赫-曾德尔干涉光路的工作原理相同.下面以三角形光路图为例来说明工作原理.图1(a)中激光经过扩束镜与准直镜后,得到1束平行光,平行光经分束镜分束后,得到2束相干光,经反射镜反射后,2束相干光在感光板处发生干涉.

图 2 所示为三角形光路图中经过反射镜后的 光路简化图.图中 M_1 和 M_2 反射出的 2 束相干 光的波矢为 k_1 和 k_2 ,两波矢与接收面法线(z 方 向)的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 .2束相干光之间的夹 角为 $\varphi = \theta_1 + \theta_2$,入射光波长为 λ ,则光栅常量 为^[4]



图 2 三角形干涉光路简化图

当 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 时,

 $2d\sin\theta = \lambda, \qquad (2)$

式(2)即为制作全息光栅时的光栅方程.实验上 通过测量图 2 中光栅制作时的干涉角可以得到设 计光栅的光栅常量.

2.2 全息光栅的衍射原理

激光照射平面衍射光栅时,会发生夫琅禾费 衍射.如图3所示,在光屏 P1和 P2处分别出现 ±1级的衍射光斑,更高级次的衍射光斑距离光 屏中心更远.



图 3 光栅衍射示意图

平面衍射光栅方程为[1]

 $d\sin \theta_j = j\lambda, j = 0, \pm 1, \pm 2, ...$ (3) 其中, θ_j 为衍射角,d为光栅常量, $l_{\pm 1}$ 为±1级亮 条纹至0级光斑的距离.根据衍射光路的几何关 系,即可在实验上测量光栅常量 d.

3 实验结果与分析

3.1 全息光栅的结构

图 4 为在显微镜下观察到光栅 A 的一维、二 维全息光栅结构图,显微镜的物镜规格为 10× /2.5. 从图 4 可看出,光栅周期均匀分布,说明制 作的全息光栅结构良好.其他光栅的结构和光栅 A 的相似. 从显微镜图中测量到光栅 A 和 B 的 光栅常量分别为 d^A_A=8.18 μm,d^B_B=6.71 μm.



a) — 维(100×) (b) __维(100×) 图 4 显微镜观察光栅表面图像

3.2 衍射光斑的几何关系及光栅常量测量

图 5 为光栅 A 的一维、二维全息光栅衍射 图.实验中只观察到 0 级、±1级衍射斑点. 夫琅 禾费衍射图频谱的亮点数量反映了光栅的类型. 如果夫琅禾费衍射图的频谱只有 0 级和±1级, 则表明此光栅是正弦型光栅;如果其频谱出现 2 级、3 级…亮点,则表明此光栅是非正弦型光栅; 当亮点很多时,表明该光栅接近矩形光栅^[78].本 文采用激光全息法制得的全息光栅频谱只有 0 级 和±1级,表明所制备的光栅是标准的正弦型透 射光栅.可以使用光栅方程式(3)计算其光栅常 量.为保证实验结果的精确,用光纤光谱仪测量 了实验中所使用的半导体激光器的光谱,如图 6 所示,中心波长为 λ=655.77 nm.

(a)一维(b)二维图 5 光栅 A 的夫琅禾费衍射图样

图 6 激光器的光谱图

根据图 3 位置关系, 对三角形光路制备的全 息光栅 A 进行测量,得到 $l_{\pm 1} = 27.2 \text{ mm}, r =$ 334.0 mm,则由式(3)计算得出光栅 A 的光栅常 量 $d_A^d = 8.13 \mu m$;同理,对于马赫-曾德尔干涉光 路制作的全息光栅 B,得到 $l_{\pm 1} = 34.2 \text{ mm}, r =$ 334.0 mm,计算出 $d_B^d = 6.40 \mu m$. 与表 1 中设计 的光栅常量 $d_A^D = 7.960 \mu m, d_B^D = 6.301 \mu m$ 的相 对偏差分别为: $\delta_A = 2.1\%, \delta_B = 1.5\%$.

显然,三角形干涉光路的误差大于马赫-曾德

尔干涉光路.但是三角形干涉光路搭建简便,干 涉现象直观,更有利于学生理解实验原理,且制得 的光栅正弦性好,因此在课时少的实验中推荐使 用三角形光路干涉法.

3.3 用分光计测量全息光栅的衍射角和光栅常量

用衍射光路几何关系测量光栅常量,一般存 在较大误差.采用分光计能够精确测量出衍射角 θ_i以计算光栅常量.表2为分光计测量的光栅 A 和 B 的 0 级与±1 级衍射角对应的刻度盘读数. 目镜由-1 级转至+1 级时所转过的角度为

$$2\theta_{j} = \frac{1}{2} [(R_{1} - R_{2}) + (R_{1}' - R_{2}')], \quad (4)$$

其中, R 为游标读数.由表 2 数据可得 θ_{jA} = 4.62°, θ_{jB} = 5.68°.则由分光计测量的光栅 A 和 B 的光栅常量为: d_A^s = 8.145 μ m, d_B^s = 6.624 μ m. 其他光栅的常量见表 1.与衍射频谱法测量光栅 常量的相对偏差为: δ_A = 0.2%, δ_B = 3.3%; 与实 验预测值的相对偏差为: δ_A' = 2.3%, δ_B' = 4.9%.

表 2 分光计测量光栅衍射角的数据

| 人自业皿 | 欠 / | 1 | R |
|------|------------|--------|------------------|
| 主息九伽 | 矛纹纵数 | 左游标 | 右游标 |
| _ | 0 | 90°56′ | 270°59′ |
| | +1 | 95°35′ | 275°28′ |
| A | -1 | 86°22′ | $266^{\circ}12'$ |
| D | +1 | 96°41′ | 276°32′ |
| D | -1 | 85°20′ | 265°09′ |

显然,三角形干涉光路所得光栅常量的相对 偏差小于马赫-曾德尔干涉光路,且通过解三角形 的方法预测出的光栅常量较测量衍射角计算光栅 常量有更大的偏差.分光计测量光栅常量的可信 度更高,是精确测量光栅常量的方法,本文将分光 计测定的光栅常量作为此实验的理论值.但是, 分光计法的缺点是载物台与目镜距离的限制,在 衍射角较小,即光栅常量较大时,使用分光计测量 衍射角可能会使0级条纹与±1级条纹重合,导 致测量结果不准确.

比较显微镜图像和分光计方法的结果,显微 镜图像的测量值相对于分光计法测量值的相对偏 差为: $\delta_A = 0.4\%$, $\delta_B = 1.3\%$.显然相对偏差较 小,测量的光栅常量准确度较高.当衍射角较小, 即光栅常量较大时,显微镜法则是更好的测量光 栅常量的方法.

3.4 全息光栅衍射强度的分布

全息光栅是平面衍射光栅的一种,其衍射光 强的分布可一定程度上反映光栅的质量.用夫琅 禾费衍射仪测量了全息光栅 A 和 B 的衍射强度 的分布.光栅 B 的衍射强度分布如图 7 所示.从 图 7 中可以看出,±1 级的衍射强度远远小于 0 级的衍射强度,所制作的其他光栅的衍射强度的 分布与之类似.由双光束干涉原理知,2 束振幅 相同的相干光发生干涉时,在干涉位置的光强分 布可以写为

$$I_{X} = 2E_{0}^{2} + 2E_{0}^{2}\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}(\sin\theta_{1} + \sin\theta_{2})\right], \quad (5)$$

其中, $2E_0^2\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)\right]$ 为相干干涉 项.由此可知,双光束干涉时,其光强分布以余 (正)弦规律变化,引发全息干板乳胶层按余(正) 弦记录,使得全息光栅遮光部分按余(正)弦分布, 即双光束干涉制作的全息光栅为正弦型振幅光 栅.同时,正弦型振幅光栅的衍射条纹及光强分 布与普通平面矩形衍射光栅的衍射不同,其透过 率函数按正(余)弦变化,复振幅形式较复杂.

由衍射透过率函数可知正弦型光栅的夫琅禾 费衍射在 x 方向上的光强分布为^[8]

$$I(x,0) = \left(\frac{L^2}{2\lambda z}\right)^2 \left\{ \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{Lx}{\lambda z}\right) + \frac{m}{4} \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{L}{\lambda z}(x+f\lambda z)\right] + \frac{m}{4} \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{L}{\lambda z}(x-f\lambda z)\right] \right\},$$
(6)

其中,L为有效光栅边长,表征激光通过有效光栅 面积的大小;z为光栅至接收屏的距离;m≪1,表 示透过率函数呈正弦变化的幅度.则中央主极大 位置的光强为

$$I(0,0) = \frac{L^4}{4\lambda^2 z^2},\tag{7}$$

可得 0 级和 ± 1 级 3 个亮点的相对光强为 1 和

 $m^2/4$,在全息光栅的频谱中只能观察到这 3 个亮 点,表明此光栅正弦型良好.对于光栅 A 和 B,在 衍射距离 z=11.50 cm 时, ± 1 级相对光强约为 0.33%和 0.78%,则 $m_A = 0.19$, $m_B = 0.10$.用 Matlab 模拟做出正弦型振幅光栅夫琅禾费衍射 强度的理论分布如图 8 所示,正弦型振幅光栅的 夫琅禾费衍射频谱半角宽度由有效光栅大小 L 决定,相对强度由 m 决定.从图 8 中可以看出,随 着 L 逐渐变小,衍射频谱展宽,但相对位置和幅 值不变,展宽是由于光栅尺寸变小产生的.由图 9 可知 m 会大幅影响衍射相对强度,这也是图 7 中 把±1 级位置放大 50 倍才能看到的原因.

图 8 正弦型振幅光栅衍射强度的理论分布(m=1)

(L=0.05 mm)

在制作全息光栅时,可以通过控制光路得到 正弦性非常好的全息光栅,但对于此光栅的衍射 光强和斑点特征,并不由光路决定,而是由 *m* 和 *L* 同时影响^[8],最终导致全息光栅衍射 0 级与±1 级光强之比较大.同时,光源距离接收屏越远,接 收到的光强就越小,即使示波器积分区间调整至 最大,观察到的波峰变化也会非常小.故实验中 需将整体光路距离适当减小,使衍射强度分布更 加明显.

由式(6)知,当 $x = \pm f\lambda z$ 时,衍射为±1级极

大,即图 7 两边 ± 1 级谱与 0 级谱的间隔 $l'_{\pm 1}$ 均为 $f\lambda z$,则光栅常量为

$$d = \frac{\lambda z}{l' + 1}.$$
 (8)

由测量的衍射谱中±1级的峰位,计算出光栅 A 和 B 的光栅常量 d_A = 8.02 μ m, d_B = 6.56 μ m,与 分光计法测量值的相对偏差为 δ_A = 1.5%, δ_B = 1.0%,相对偏差较小.

3.5 全息光栅的可控制作方法分析

从理论上讲,只要在制备操作中做到足够精确,就能得到预期光栅常量的全息光栅,但从图 10 光栅常量随干涉角、衍射角的变化图中可以看出,在干涉角度较小($d > 10 \ \mu m, \varphi = 1.88^{\circ} < 0.033 \ rad)时,曲线斜率的绝对值会非常大,对干$ 涉角度控制的精确度要求会迅速提高,故在小角度干涉时对光栅规格的控制会变得十分困难.同 $理,衍射角较小(<math>\theta_i = 3.76^{\circ} < 0.066 \ rad)时,通过$ 观察频谱来确定光栅常量会有更大误差.

图 10 光栅常量随干涉角和衍射角的变化曲线

由式(2)知,光栅常量 $d = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$,故利用线 性拟合比例系数来判断、分析利用 2 种光路图可 控制作全息光栅方法的可行性.实验中测量图 2 中 $\Delta N_1 N_2 O$ 的高 h 与底边长 l 计算 sin θ 的值.

令
$$y = \frac{1}{\sin \theta}, k = \frac{\lambda}{2},$$
则式(2)可表示为
 $d = ky.$ (9)

图 11 所示为 d 随 y 的变化关系,可以得出 λ = 687.86 nm,与光谱仪测量的激光波长 655.77 nm 的相对偏差 δ_{λ} = 4.9%, R^2 = 0.999 3.显然,通过 控制干涉角来测量光栅常量的误差很大,由图 11 中最后 1 个实验点可以看出,当干涉角过小,即值 过大时,预测值误差则会更大.在干涉角 q > 3.76°时,通过控制 *φ* 来控制光栅常量的大小是可 行的.制作较大光栅常量的光栅时,使用马赫-曾 德尔干涉光路更方便,由于其良好的"平行四边 形"特性,可以使得双光束干涉角度较小.三角形 干涉光路无法满足此时足够小的角度,这也是马 赫-曾德尔光路的优势所在.

图 11 通过干涉角预测光栅常量的实验点拟合

在一次测量的情况下,不涉及重复测量,不考 虑 A 类不确定度,则 $u_l = u_h = u_B = 0.29$ mm, $u_A = 0$,则光栅常量的不确定度 $u_d = 2 \times 10^{-8}$ m; 即对于光栅 A,其理论预测光栅常量值 d = $(8.20\pm0.02) \mu$ m.由以上分析可知,仪器精度对 预测光栅常量的影响较小,可采用多次测量的方 法降低人为测量误差.

4 结束语

通过光栅制备及表征实验,将全息技术、分光 计应用、光谱仪技术及应用和夫琅禾费衍射等实 验有机结合成光学模块体系,不仅可以使学生对 光学知识有更深入地理解,还能够让学生深入体 会自主探究性学习的思路和方法,提高学生创新 思维和科学素养.

参考文献:

- [1] 姚启钧.光学教程[M].6版.北京:高等教育出社,2019.
- [2] 赵鹏飞,邱大庸.制作全息光栅与测定氦氖激光波 长[J].中山大学学报论丛,2002,22(1):213-215.
- [3] 刘香茹,陈庆东,李立本. 全息光栅制作光路的比较 研究[J]. 大学物理实验,2008,21(1):20-22.
- [4] 朱江转,马梦姿,杨伟雪,等.基于菲涅耳双棱镜分 波前干涉装置的全息光栅制作实验[J].物理实验, 2021,41(2):22-26.
- [5] 何建瑜,赵荣涛,竺江峰. 新马赫-曾特尔全息光路

全息光栅[J]. 大学物理实验,2011,24(2):32-34.

Expansion of the teaching of holographic grating experiment

ZHAO Kang-xin^a, YU Hao^a, LANG Chi-cheng^a, TAO Guan-qi^b, KANG Xiu-ying^c, PENG Yu-fan^b, WANG Yin-shu^{b,c,d}

(a. College of Education for the Future; b. Experiment and Practice Innovation Education Center,

Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China;

c. Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

d. College of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

Abstract: Through grating preparation and characterization experiments, holography technology, spectrometer application, spectrometer technology and application, Fraunhofer diffraction were organically combined into an optical module system. Triangular and Mach-Zehnder interference light paths were built. One and two-dimensional holographic gratings with grating constant of 6. $624 \sim 182.4 \ \mu m$ were manufactured. The laser wavelength was calibrated with a fiber spectrometer, the grating structure was observed with an optical microscope, and the diffraction angles of gratings were accurately measured with a spectrometer. Finally, the grating properties were systematically analyzed by measuring the intensity distribution of grating diffraction with a Fraunhofer diffractometer. In addition, it was confirmed experimentally that fabrication of the holographic grating could be realized for the case of the interference angle larger than 1.88°.

Key words: holographic grating; sinusoidal amplitude grating; grating constant

「责任编辑:郭 伟】

实验方法研究[D]. 长春:东北师范大学,2015.

(上接 42 页)

Construction and application of MOOC for signals and systems course

LIU Xiu-huan, WANG Hai-yan, WANG Xue, SHI Dai-hu, TIAN Ya-nan, CHEN Mian-shu

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The construction and application of MOOC are the important part in the teaching reform for higher education. The construction and application of MOOC for "signals and systems" were discussed, mainly involving the reconstruction and optimization of MOOC contents, the application process and application effect of MOOC. Besides, the tight combination of MOOC for "signals and systems" with the open experiments based on a hybrid of not only online and offline but virtuality and reality was elucidated, which provided the powerful support for training the professional talents in the electronics information field.

Key words: signals and systems; massive open online course(MOOC); lab of electronics intelli-「责任编辑:郭 伟] gence (LEI); open experiment; teaching reform