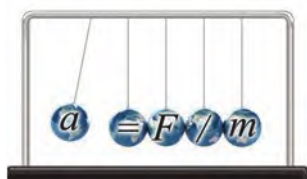


文章编号:1005-4642(2021)02-0022-05



普通物理实验

基于菲涅耳双棱镜分波前干涉装置的全息光栅制作实验

朱江转,马梦姿,杨伟雪,侯文越,方青庭,罗锻斌

(华东理工大学 理学院 物理系,上海 200237)

摘 要:不同于传统全息光栅制作教学实验中的分振幅干涉光路,提出了利用准平行相干光源照射菲涅耳双棱镜实现分波前干涉制作全息光栅的方法.利用菲涅耳双棱镜分波前光路分别演示了单个双棱镜制作一维全息光栅和 2 个棱脊正交菲涅耳双棱镜制作二维全息光栅.实验过程中可通过多种方法对干涉条纹间距和光栅常量进行估算,丰富了干涉实验内容和光栅制作实验内容.

关键词:准平行光源;菲涅耳双棱镜;分波前干涉;全息光栅

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.02.004

光栅是利用光的衍射原理使得光波发生色散的 光学元件,广泛应用于光栅光谱仪、光通信、光 互联、耦合器、偏转器、滤波器等^[1-2].原制光栅是 用金刚石刻刀在精制的平行平面的光学玻璃上刻 划而成.由于原制光栅价格昂贵,常用的是复制 光栅和全息光栅.2 束相干平行光成一定角度相 交时,在 2 束光相交区域将形成干涉条纹,用全息 干板将干涉条纹拍摄下成为全息光栅.相比于传 统的刻划光栅,全息光栅具有无鬼线、杂散光少、 分辨率高、有效孔径大、生产效率高、价格便宜等 优点,全息光栅已广泛应用于光谱研究、光学精密 测量和光波调制等领域^[3].

由于全息光栅的制作实验结合了光的干涉和 衍射内容,目前国内不少高校已经在全息照相实 验的基础上,把全息光栅的制作实验作为综合性 设计性实验进行开设^[4-8].为了提高全息光栅制 作实验的教学质量,国内同行在光源光束质量改 进^[3]、不同干涉光路选择等方面展开了大量的教 学研究工作^[9-14].从这些工作可以看到,实验室 制作全息光栅的光路主要有分波前的杨氏双缝干 涉光路、分振幅的平晶干涉以及马赫-曾德干涉 光路、迈克耳孙干涉仪光路等,其中马赫-曾德干

涉仪光路和迈克耳孙干涉仪光路是实验教学中最 常用的全息光栅制作光路^[12-13].上述光路都涉及 比较多的光学元件(如反射镜、分束镜和扩束镜 等)和较复杂的光路调整.为了减少光路的光学 元件,可以利用阿贝成像原理实现全息低频光栅 的制作光路^[15-16],但光路的调整也相对复杂.在 本文中,利用准平行相干光源照射菲涅耳双棱镜 形成分波前干涉装置制作全息一维和二维全息 光栅^[17].此方法中的光路调节便捷,干涉效果演 示直观,全息光栅记录过程简单;同时在实验过程 中学生可以通过多种方法对干涉条纹间距和光栅 常量进行估算与计算.这种全息光栅制备实验,丰 富了光的干涉实验内容和光栅制作实验内容,提 高了学生实验兴趣,可以收到较好的实验教学 效果.

1 平行光入射菲涅耳双棱镜分波前干涉 条纹间距与相关参量的关系

单色平行光正入射到菲涅耳双棱镜底面光路 示意图如图 1 所示.图中棱上下两部分折射的光 会发生重叠,从而在重叠区域产生干涉条纹.干 涉条纹的间距决定了所制作全息光栅的光栅常

收稿日期:2020-03-08;**修改日期:**2020-11-26

基金项目:华东理工大学 2019 年本科教育教学方法改革研究项目;2019 年度上海市重点课程建设项目 (No. YK0126154);上海市 2019 年度大学生创新实验项目

作者简介:朱江转(1985-),女,安徽安庆人,华东理工大学理学院实验师,硕士,研究方向为非线性光 学. E-mail:jzzhu@ecust.edu.cn

通讯作者:罗锻斌(1976-),男,广东梅州人,华东理工大学理学院副教授,博士,研究方向为复杂光场 调控及物理实验教学. E-mail:dblou@ecust.edu.cn



量. 如果入射光波长为 λ , 2 列折射光波矢 k_1 和 k_2 与 z 轴夹角分别为 θ_1 和 θ_2 . 设 2 列折射波的振幅分别为

$$E_1 = E_0 e^{i(\omega t - k_1 \cdot r)}, E_2 = E_0 e^{i(\omega t - k_2 \cdot r)}. \quad (1)$$

在 xy 平面上, 沿 x 方向上有

$$E_1 = E_0 e^{i(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1)}, E_2 = E_0 e^{i(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2)}, \quad (2)$$

式中 $|k_1| = |k_2| = \frac{2\pi}{\lambda}$. 又总光场

$$E_T = E_1 + E_2 = E_0 e^{i\omega t} (e^{-i\frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1} + e^{+i\frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2}), \quad (3)$$

$$I_T = E_T^* E_T = 4E_0^2 \cos^2 \left[\frac{\pi x}{\lambda} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \right], \quad (4)$$

上式余弦项中幅角改变 π , 强度相同, 所以干涉条纹间距 Δx 为

$$\frac{\pi \Delta x}{\lambda} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = \pi, \quad (5)$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}. \quad (6)$$

实验中平行光正入射菲涅耳双棱镜, 2 束折射光关于 z 轴对称, $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, 所以有

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (7)$$

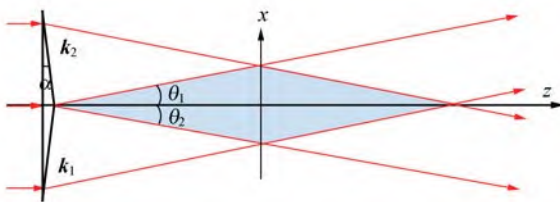


图 1 平行光正入射菲涅耳双棱镜示意图

对于折射光的偏向角 θ , 考虑到菲涅耳双棱镜底角 α 非常小 ($\alpha \ll 1^\circ$, 此种棱镜也称为光楔), 深入分析光线正入射光楔产生的偏向角.

如图 2 所示, 设菲涅耳双棱镜玻璃折射率为 n , 根据折射定律, $n \sin i_1 = \sin i_2$, 又 $i_1 = \alpha$, 故 $n \sin \alpha = \sin i_2$. 当 α 很小时, 有 $\sin \alpha \approx \alpha$, $\sin i_2 \approx i_2$, 所以有 $n\alpha = i_2$. 则图 2 中偏向角为 $\theta = i_2 - i_1 = n\alpha - \alpha = (n-1)\alpha$. 所以最后得到

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{\lambda}{2(n-1)\alpha}, \quad (8)$$

上式说明, 平行光束正入射菲涅耳双棱镜, 得到的干涉条纹与出射光束的偏向角 θ 有关, 而 θ 的确定, 可以根据菲涅耳双棱镜的相关参量 (折射率和底角) 进行估算. 在本文中利用实验光路相关参量对 θ 进行测量, 进而估算出 Δx 并与测量的光栅常量进行比较.

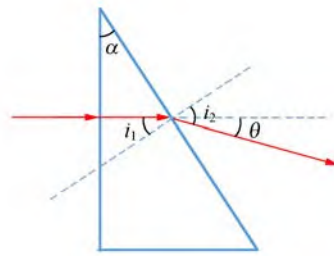


图 2 光楔使垂直入射光线产生偏向角示意图

2 基于菲涅耳双棱镜分波前干涉的全息光栅制作实验

2.1 平行光入射菲涅耳双棱镜分波前干涉光场的产生

实验光路如图 3 所示. 光源使用尾纤输出激光器系统 (FC). 其中内置波长 650 nm 单模激光器, 输出功率为 2 mW, 由 FC 接头尾纤输出. 将 300 mm 准直镜安装在激光管夹持器上, 并连接激光输出尾纤. 打开激光器, 调整适当的输出电流使激光器出光.

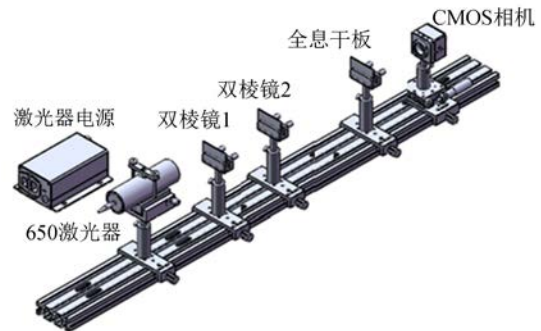


图 3 实验装置示意图

利用图 3 的尾纤输出激光器系统, 可以在沿着光学导轨的方向获得准平行光束, 输出光斑如图 4 所示. 在光源前面, 可以分别放置菲涅耳双棱镜 1 和菲涅耳双棱镜 2. 利用白屏在导轨方向的不同位置, 可以分别观察到激光器输出光斑经过双棱镜 1 和双棱镜 2 后的光场分布. 图 5(a) 和 (b) 是光束经过棱脊竖直放置的菲涅耳双棱镜 1 后导轨方向不同位置处的光场分布; 图 5(c) 和 (d) 是在棱脊竖直放置的菲涅耳双棱镜 1 后再增加棱脊水平放置的双棱镜 2 后, 导轨方向不同位置处的光场分布.

在传统的菲涅耳双棱镜分波前干涉实验中, 利用单色光源照射狭缝, 一方面要求狭缝的取向

与双棱镜的棱脊严格平行,另一方面要求经过狭缝的光束应与双棱镜的棱脊对齐并能产生叠加区域以便产生干涉.而从图 5 可以看出,相对于传统的菲涅耳双棱镜分波前干涉实验,本实验利用扩束后的准平行光束照射双棱镜,不仅可以获得面积可观交叠干涉区域,而且获得交叠干涉区域的操作大为简化.

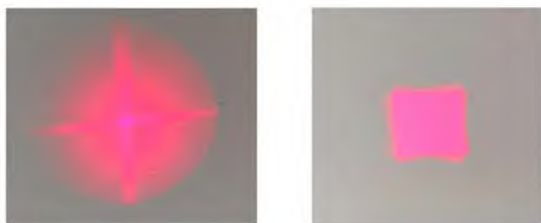


图 4 尾纤输出激光器系统的输出光斑



(a)单棱镜叠加光场

(b)单棱镜远场相切光场



(c)垂直放置双棱镜光场 (d)垂直放置双棱镜中间叠加光场

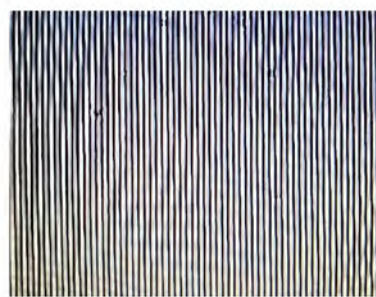
图 5 准直光束经过菲涅耳双棱镜后导轨不同处的光场分布

为了直观地观察光束交叠区域的干涉光场的情况,在实验中把 COMS 相机放置于光场交叠区域,再让 COMS 相机连接显示器.通过显示器可以让学生看到沿着导轨方向不同位置处干涉光场的分布.如图 6 所示,(a)是光束经过棱脊竖直放置的菲涅耳双棱镜 1 后的干涉光场分布;(b)是在棱脊竖直放置的菲涅耳双棱镜 1 后再增加棱脊水平放置的双棱镜 2 后的干涉光场分布.

2.2 全息光栅的制作

获得了干涉场,只要把全息干板置于干涉光

场中便可制作全息光栅.实验中使用天津市津感光材料销售有限公司的全息-I 型全息干板.曝光时,将全息干板支架放置于图 3 光路中合适的位置.分别记录如图 6 所示的光束经过单个棱脊竖直放置的菲涅耳双棱镜后的干涉光场分布和光束经过 2 个棱脊相互垂直的菲涅耳双棱镜组合后干涉光场分布.在实验中,根据 2 束光交叠区域光场的实际亮度,设置曝光时间设为 8 s.曝光后的干板到暗室中进行冲洗,显影时特别要注意显影时间的控制,避免导致干板太黑而影响光栅的衍射效果.经过显影和定影,最终获得利用菲涅耳双棱镜分波前干涉装置制作的全息光栅.



(a)单棱镜棱脊竖直放置



(b)双棱镜棱脊相互垂直放置

图 6 准直光束经过棱脊放置方向不同的菲涅耳棱镜后形成的干涉光场分布

3 全息光栅常量的估算与测量

通过干涉条纹的间距与相关参量之间关系的分析,菲涅耳双棱镜的相关参量,如棱镜折射率和棱镜底角已知,则估算干涉条纹间距,进而估算光栅常量.根据准直光束入射的特点,在本文中直接根据光路和光束参量对干涉条纹间距进行估算,并用所制备全息光栅的衍射光斑利用光栅方程计算光栅常量,两者进行比较符合得较好.

以单个菲涅耳双棱镜的制备光路为例,先利

用图 7 光路估算干涉条纹间距 Δx . 先测入射菲涅耳双棱镜的准直光束的光斑直径为 3.50 cm; 然后在双棱镜出射光路方向移动观察白屏, 直到出现图 7 光路右侧 2 束光光斑轮廓边缘相切, 记录下此时白屏与菲涅耳双棱镜之间的距离, 为 271.38 cm. 根据 $\Delta x = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = 50.40 \mu\text{m}$. 如果根据所用菲涅耳双棱镜的参量, 折射率 $n=1.53$, $\alpha=41'$, 利用 $\Delta x = \frac{\lambda}{2(n-1)\alpha} \approx 51.59 \mu\text{m}$. 2 种方法得到的干涉条纹间距 Δx 很接近, 说明在实验中利用图 7 方法进行估算 Δx 合理. 在利用光路参量对于 Δx 的估算中, 可认为光束的非理想准直是其误差的主要来源.

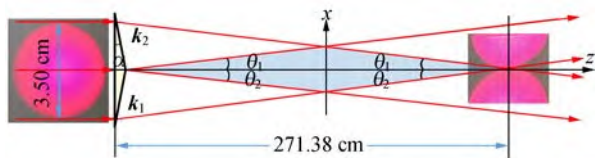
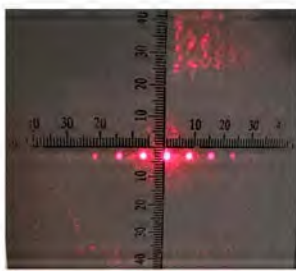
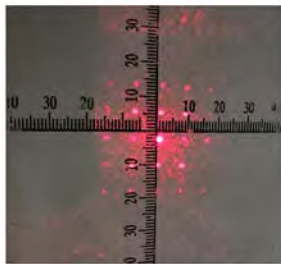


图 7 干涉条纹间距 Δx 的估算光路

将晾干后的全息光栅放置在支架上, 用 He-Ne 激光束垂直照射, 激光通过光栅衍射, 在白屏上可以观察到衍射光点, 如图 8 所示. 只要测出 0 级和 1 级衍射光斑的间距及屏到光栅的距离, 就可以利用光栅方程计算光栅常量^[8-11].



(a) 一维光栅



(b) 二维全息光栅

图 8 利用单双棱镜和棱脊垂直放置双棱镜组合制备的全息光栅衍射光点分布

以单个菲涅耳双棱镜制备的一维光栅的衍射花样为例, 利用图 9 的光路测量制备的全息光栅的光栅常量. 其中 D 为 ± 1 级衍射光斑的距离, L 为观察屏与全息底片的距离. 为了减小误差, 改变了一系列的 L , 测量对应的 D , 两者关系如图 10 所示.

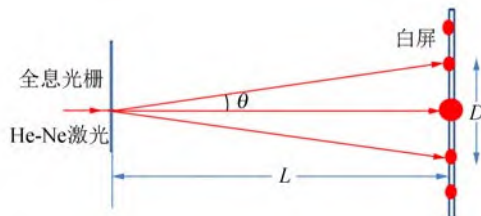


图 9 全息光栅光栅常量的测量光路

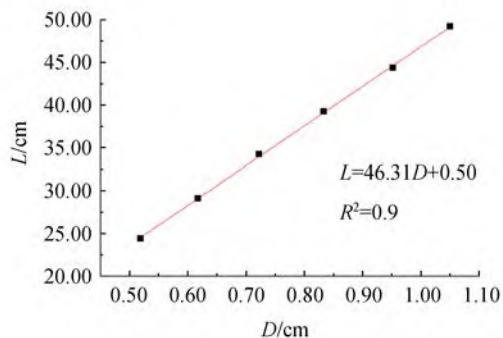


图 10 全息光栅光栅常量测量中 $D-L$ 关系曲线

利用光栅方程 $d\sin\theta = k\lambda$, $k=1$, θ 为对应衍射光斑的衍射角. 考虑 θ 的小角度近似, $d \frac{D/2}{L} = \lambda$, 有 $d = \frac{2L\lambda}{D}$; 测量中入射光为 He-Ne 激光波长 λ 为 632.8 nm. 利用图 10 线性拟合得到的斜率 46.3, 计算得到光栅常量 $d = 58.59 \mu\text{m}$. d 与前面估算的 Δx ($50.40 \mu\text{m}$, $51.59 \mu\text{m}$) 相比比较接近.

4 结束语

相对于目前在全息光栅制作实验教学中常用的分振幅光路, 利用扩束准平行相干光源照射菲涅耳双棱镜, 利用菲涅耳双棱镜形成分波前干涉装置形成一维和二维干涉条纹, 制备了相应的全息光栅. 基于扩束准平行相干光源的分波前干涉装置, 光路调节便捷, 干涉条纹演示直观, 改变双棱镜之间的夹角还可以获得不同的干涉条纹; 同时, 全息光栅记录过程简单, 光栅制作成功率高.

在实验过程中,学生可以对干涉条纹间距和光栅常量进行估算与计算.上述实验丰富了光的干涉实验内容和光栅制作实验内容,提高了学生实验兴趣,收到了较好的实验教学效果.

参考文献:

- [1] 吕且妮,谢洪波. 工程光学实验教程[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2018:61-66.
- [2] 陈士谦,范玲,吴重庆. 光信息科学与技术专业实验[M]. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2007:71-73.
- [3] 黄德康,曹望和,朱茂华,等. 高质量全息光栅的制作[J]. 光学技术,2002,28(3):255-256.
- [4] 王秀敏. 全息光栅的制作及光栅常数测定的研究[J]. 大学物理实验,2008,21(1):4-6.
- [5] 类成新,李凤灵. 全息光栅实验系统的制作[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2007,21(6):78-80.
- [6] 邵新凯,郑亚茹. 正弦光栅的制作[J]. 物理实验,2000,20(5):7-8.
- [7] 李春芳. 低频全息光栅制作光路设计[J]. 实验科学与技术,2013,11(5):30-31,60.
- [8] 梁文耀,刘基. 基于 Unity 的激光全息法制作微结构的虚拟仿真实验开发[J]. 物理实验,2019,39(3):42-37.
- [9] 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.
- [10] 杨伟斌,滕坚. 实验室全息光栅的制作及质量评定[J]. 物理与工程,2009,19(1):29-32.
- [11] 何建瑜,赵荣涛,竺哲欣,等. 全息光栅制作新发现[J]. 大学物理实验,2011,24(3):47-50.
- [12] 何建瑜,赵荣涛,竺江峰. 新马赫-曾特全息光路图制作高频全息光栅[J]. 大学物理实验,2011,24(6):9-11.
- [13] 柯红卫,杨嘉,贺秀良,等. 利用迈克耳孙干涉仪制作全息光栅[J]. 物理实验,2004,24(7):30-32.
- [14] 黄婉华,程敏熙,陈映纯. 利用平面平晶反射干涉制作低频全息光栅[J]. 物理实验,2012,32(4):40-42.
- [15] 李芳菊,董康军. 利用阿贝成像原理制作低频全息光栅[J]. 物理实验,2008,28(5):37-38.
- [16] 李芳菊. 球面波照明下利用阿贝滤波制作全息光栅[J]. 大学物理实验,2011,24(6):27-28.
- [17] 杨振军,许景周,庞兆广,等. 利用菲涅耳双棱镜研究光的干涉现象[J]. 物理实验,2017,37(4):23-26.

Experiment of holographic gratings fabrication based on Fresnel double prism wavefront splitting interference device

ZHU Jiang-zhuan, MA Meng-zi, YANG Wei-xue,
HOU Wen-yue, FANG Qing-ting, LUO Duan-bin

(Department of Physics, School of Science, East China University of
Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Different from the interference light path in traditional holographic grating making experiment, a new method of fabricating holographic gratings by using quasi parallel coherent light source to irradiate Fresnel double prism to realize wavefront splitting interference was proposed. The fabrications of one-dimensional holographic grating with a single Fresnel prism and two-dimensional holographic grating by two Fresnel prisms with orthogonal ridges were demonstrated. The interference fringe distance and the grating constant were estimated by many methods. The experimental contents of light interference and grating fabrication were enriched.

Key words: quasi parallel light source; Fresnel double prism; wavefront splitting interference; holographic grating

[责任编辑:郭 伟]