

单级衍射量子点阵光栅的聚焦离子束直写法制备及光学性能检测*

黄成龙¹⁾²⁾³⁾ 张继成³⁾ 刁凯迪³⁾ 曾勇³⁾ 易勇¹⁾²⁾ 曹磊峰³⁾ 王红斌^{3)†}

1) (西南科技大学, 四川省非金属复合与功能材料重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 绵阳 621010)

2) (西南科技大学, 极端条件物质特性实验室, 绵阳 621010)

3) (中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2013年7月13日收到; 2013年9月18日收到修改稿)

采用聚焦离子束直写技术, 成功制作了面积为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, 线密度 $500\ \text{mm}^{-1}$, 圆孔直径 $800\ \text{nm}$, 金吸收体厚度为 $500\ \text{nm}$ 的单级衍射量子点阵光栅. 研究了该光栅在波长 $442\ \text{nm}$ 激光下不同传输距离的衍射特性以及相对衍射效率. 实验结果表明, 量子点阵光栅不存在高级衍射, 只保留了 ± 1 级和 0 级衍射, 具有良好的单级衍射特性. 1 级衍射与 0 级衍射间距随传输距离的增大而增大, 实测值与理论计算值相符.

关键词: 聚焦离子束直写加工 (FIB), 量子点阵光栅 (QDADG), 单级衍射

PACS: 81.07.Ta, 42.79.Dj, 81.16.Nd

DOI: 10.7498/aps.63.018101

1 引言

透射光栅因其色散、分束等性质在光谱学、天文学以及激光等离子体诊断等领域具有重要的应用价值^[1-4]. 但是, 传统黑白透射光栅 1 级衍射信号受到高级衍射的干扰, 给光谱解析带来了一定的困难. 因此, 利用现有技术制作出具有单级衍射性能的透射光栅已成为目前光栅研究工作的一个重点. 针对这一问题, 2005 年曹磊峰^[5] 提出了量子点阵光栅 (quantum-dot-array diffraction grating, QDADG) 的概念, 并在此后的工作中验证了该光栅的单级衍射特性^[6], 这对单级衍射光栅的研制奠定了一定的基础.

单级衍射光栅对纳米加工技术提出的要求就是纳米级的分辨能力、较高的效率和陡直剖面. 这对现有的微纳加工技术而言, 电子束光刻技术、X 射线光刻技术以及微电镀技术是较好的选择^[7-11]. 利用这一技术, Zhao 等人^[12] 在 2008 年报道了量子点密度沿一维呈正弦分布, 沿另一维随机分布的软

X 射线 QDADG, 此光栅线密度 $250\ \text{mm}^{-1}$, 最小微结构尺寸为 $250\ \text{nm} \times 250\ \text{nm}$, 已达到国内微加工水平极限. 2011 年, Kuang 等^[13] 报道了准正弦单级衍射光栅, 光栅最小结构单元为 $500\ \text{nm} \times 500\ \text{nm}$, 周期 $1\ \mu\text{m}$, 已达到 ICF 实用水平. 尽管采用电子束光刻和 X 射线光刻在单级衍射光栅方面取得了一些研究成果, 但是工艺繁琐复杂、造价高、周期长以及制作难度大等缺点也制约着该方法的推广和应用.

聚焦离子束直写技术 (focused ion beam, FIB)^[14-18] 是现代纳米器件加工的重要手段. FIB 不需要掩模版可以直接在基底上进行光栅结构的加工, 理论分辨率 $7\ \text{nm}$, 束斑直径可达 $100\ \text{nm}$, 可以满足单级衍射光栅特征结构的加工要求. 因此, 本文首次利用 FIB 技术来制作单级衍射 QDADG, 实现了光栅结构的拼接, 测量了该光栅对波长 $442\ \text{nm}$ 激光的衍射模式, 研究了不同传输距离下光栅的衍射特性, 并从理论上分析证明了测量结果的正确性.

* 四川省非金属复合与功能材料重点实验室开放基金 (批准号: 11zxfk19) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: willking3@126.com

2 实验

如图 1 所示, 本实验所设计的单级衍射光栅是二维随机分布的圆孔阵列, 把边长为 $2\ \mu\text{m}$ 的方格作为一个基元, 一个圆孔占据一个基元, 圆孔孔径 $813.36\ \text{nm}$. 2011 年, 魏来等^[19] 对此光栅的衍射模式作了理论模拟, 其相对衍射效率为 (1 级衍射光强与 0 级衍射光强之比) 21%, 与理想的正弦光栅衍射光强 25% 相差 4%, 其原因在于计算过程中的光栅周期数是有限的; 另外, 1 级衍射光强与次级衍射光强之比已达到 300 以上, 由此可知, 该光栅结构与传统衍射光栅相比能有效抑制高级衍射的出现, 表现出优异的单级衍射性能.

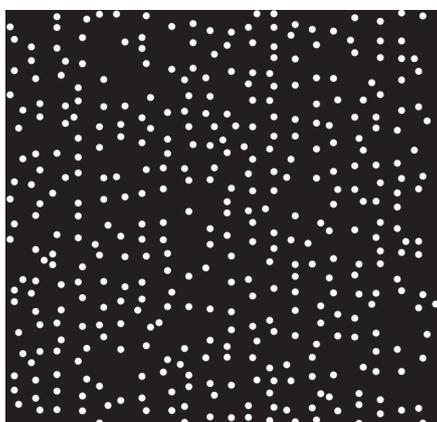


图 1 QDADG 设计图

FIB 直写技术是把离子束斑聚焦到亚微米甚至纳米级尺寸, 利用电磁偏转系统直接轰击工件并将图形转移到基片上的加工方法, 它通过在基底上去除或者添加材料实现亚微米至纳米级的加工. 采用 FIB 直写技术加工 QDADG 的工艺流程如图 2 所示: 1) 利用磁控溅射在石英基底上先后溅射一层 $30\ \text{nm}$ 的 Cr 和 $500\ \text{nm}$ 的 Au. 其中, Cr 膜作为过渡层以使 Au 膜能较好的附着在基底上; Au 膜作为光栅吸收体. 2) 将光栅设计图导入电镜系统, 根据 BMP 图灰度值的不同, 采用高能聚焦 Ga^+ 束轰击 Au 膜, 实现光栅图形的转移. 3) 利用精确的坐标平移, 实现光栅结构的拼接, 以获得面积为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的单级衍射光栅.

如图 3 所示, 利用上述工艺加工 QDADG, 圆孔按照设计图一样均匀地分布在 Au 膜上. 圆孔孔径为 $800\ \text{nm}$, 与设计值相差 $13.36\ \text{nm}$. 这是因为 FIB 系统是根据图形的灰度值来进行逐点加工, 由于图形分辨率偏低使得圆孔边缘模糊化, 对于模

糊部分 FIB 系统不会进行加工, 从而导致圆孔孔径的实际值比设计值小. 此外, 为了清楚观察孔深度是否贯穿整个薄膜厚度以及孔壁的陡直情况, 采用 FIB 对光栅进行小区域切割. 从图 4 可以看出, 圆孔穿透于整个膜层, 圆孔侧壁存在 21° , 18.5° , 18° , 17.2° 的倾斜角, 其原因是随着 Au 膜厚度的增加 Ga^+ 能量逐渐衰减, Au 膜的刻蚀面积逐渐减小, 使得圆孔剖面会呈现出梯形形状. 倾斜的圆孔侧壁会因增加入射光的反射而降低光栅的衍射效率. 因此, 可以适当增加加工时间以补偿 Ga^+ 的能量损失, 尽可能使圆孔孔壁陡直度更高以满足光栅的衍射要求.

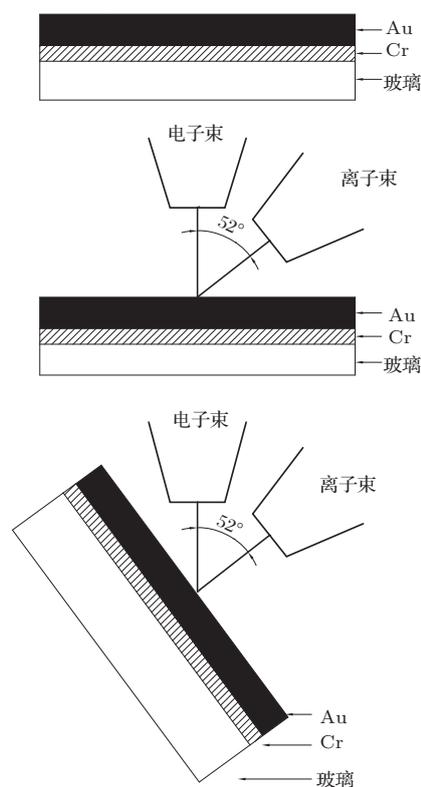


图 2 FIB 制备 QDADG 的工艺流程图

光栅有效面积是影响光栅衍射性能的重要参数之一. 有效面积越大, 光栅的光透过率越高, 其衍射条纹越明显. 利用 FIB 加工光栅, 由于视场大小局限, 其每一次加工面积为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$. 为了实现大面积 QDADG 的制作, 需对图 3 中的结构进行复制. 因此, 采用坐标位置平移实现光栅图形的拼接, 拼接精度 $0.0001\ \text{mm}$. 在拼接过程中出现间隙, 如图 5 所示, 这主要由 Au 膜厚度差异以及系统误差所致. 通过拼接技术获得了有效面积为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, 线密度 $500\ \text{mm}^{-1}$ 的单级衍射 QDADG. 与电子束

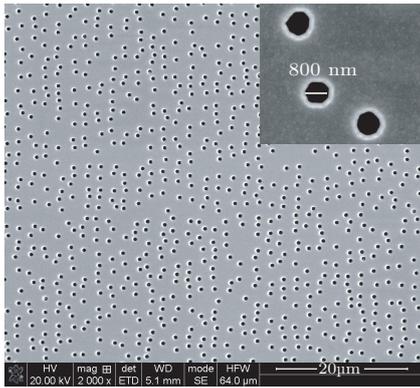


图3 实际制作的QDADG微观形貌

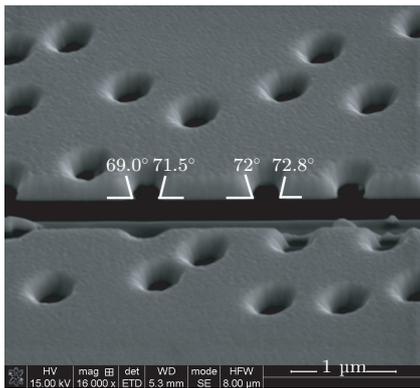


图4 圆孔剖面图

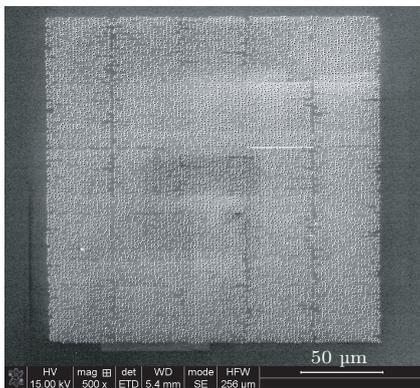


图5 大面积QDADG的SEM图

光刻和X射线光刻相比,单级衍射光栅的FIB制作过程是在一个系统中一次性完成,并且工艺步骤大

大简化,没有涉及到诸如光刻胶旋涂、显影定影、化学腐蚀以及残胶去除等一些繁琐的工艺,具有简单易操作,方便耗时少等优点.

3 光学性能检测

将所制作的单级衍射QDADG进行衍射性能测试,实验布局如图6所示.采用He-Cd固体激光器作为光源,入射光是准直度较好的单色光,波长442 nm,能量11 mW.调整光栅的位置,使得光斑正入射到光栅有效区域中,CCD接收范围13 mm×13 mm.使用图像处理软件Winview和Matlab对CCD记录的衍射模式进行处理,可以得到QDADG的1级衍射与0级衍射的位置、光强以及相对衍射效率.从图7可以看出,该光栅的±1级衍射对称分布在0级衍射的两边,高级衍射被有效地抑制,表现出良好的单级衍射性能.而且,当光栅到观察屏的距离(传输距离) z 逐渐增大时,光栅1级衍射与0级衍射的间距 l 也逐渐增大.如表1所示, l 的实测值与理论值符合得较好.我们可以用经典的光栅方程 $d\sin\theta = n\lambda$ 来解释这一现象,其中 d 为光栅周期, θ 为衍射角, n 为衍射级数, λ 为入射光波长.对于本实验中的QDADG, $d = 2\ \mu\text{m}$, $n = \pm 1$, $\lambda = 442\ \text{nm}$.由图6中的几何关系可以很容易得到 l 的计算值.最后,通过数据分析可知,QDADG的相对衍射效率随 l 值的变化波动不大,分别为15.5%($z = 14\ \text{mm}$),14.6%($z = 16\ \text{mm}$)和14.7%($z = 18\ \text{mm}$).这一结果低于理论模拟值(21%),其原因来源于圆孔侧壁倾斜、石英基底对入射光的吸收以及实验数据的判读误差.

表1 $500\ \text{mm}^{-1}$ QDADG1级衍射与0级衍射间距变化的实测值与理论值比较

| 传输距离 z/mm | 14 | 16 | 18 |
|---------------------------|----------|------|------|
| 1级衍射与0级衍射间距 l/mm | 理论值 3.22 | 3.68 | 4.14 |
| | 实测值 3.13 | 3.50 | 4.02 |

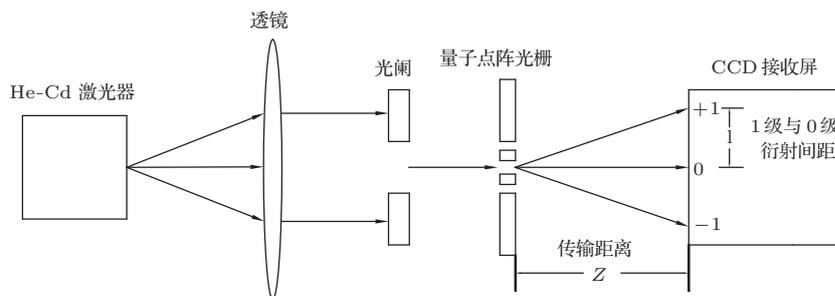


图6 QDADG衍射实验布局

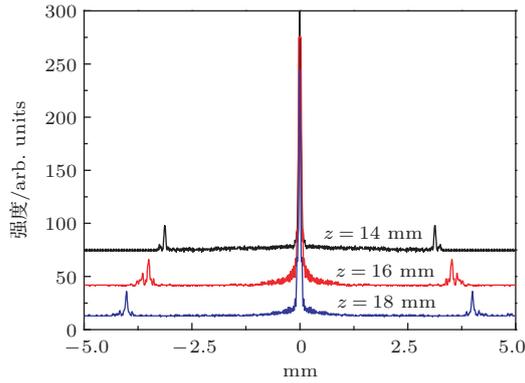


图7 不同传输距离下 500 mm^{-1} QDADG 的衍射模式

4 结 论

本文避免了传统的复杂工艺路线, 采用 FIB 直写技术制备了线密度为 500 mm^{-1} , 孔径 800 nm , 吸收体厚度 500 nm 的单级衍射 QDADG. 为了获得较大面积的光栅结构, 利用坐标平移方式实现了图形的拼接, 得到了 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的光栅有效面积. 对其作了初步的光学性能测试, 实验结果表明, 该光栅在波长 442 nm 的入射光下不存在高级衍射, 具有良好的单级衍射特性. 因此, FIB 技术在单级衍射 QDADG 上的成功运用, 有助于进一步探索 FIB 直写技术在高线密度 (1000 mm^{-1} 以上) 单级衍射光栅以及其他微纳光学元件中的应用.

参考文献

- [1] Weisberg A, Craparo J, Saro R D, Pawluczyk R 2010 *Appl. Opt.* **49** 200
- [2] Zou B, Chiang K S 2013 *Journal of Lightwave Technology* **31** 2223
- [3] Mariën G, Jovanovi N, Cvetojevi N, Williams R, Haynes R, Lawrence J, Parker Q, Withford M J 2012 *Astronomy & Astrophysics* **421** 3641
- [4] Kantsyrev V L, Baure B S, Shlyaptseva A S, Fedin D A, Hansen S, Presura R, Chamberlain D, Ouart N D, Jones A, Lebeau H 2000 *SPIE* **4138** 203
- [5] Cao L F China Patent CN200410081499 [2005-07-27] (in Chinese) [曹磊峰中国: CN200410081499 2005-07-27]
- [6] Cao L F, Forster E, Fuhrmann A, Wang C K, Kuang L Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 053501
- [7] David C, Bruder J, Rohbeck T, Grünzweig C, Kottler C, Diaz A, Bunk O, Pfeiffer F 2007 *Microelectron. Eng.* **84** 1173
- [8] Gorelick S, Guzenko V A, Vila-Comamala J, David C 2010 *Nanotechnology* **21** 295303
- [9] Luo C C, Li Y G, Susumu S 2012 *Optics & Laser Technology* **44** 1649
- [10] Kong L Q, Zhang C J, Huang S L, Zhu X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 036102 (in Chinese)[孔令琦, 张春婧, 黄胜利, 朱贤方 2012 物理学报 **61** 036102]
- [11] Sun L Y, Gao Z Y, Zou D S, Zhang L, Ma L, Tian L, Shen G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 206801 (in Chinese)[孙丽媛, 高志远, 邹德恕, 张露, 马莉, 田亮, 沈光地 2012 物理学报 **61** 206801]
- [12] Zhao M, Zhu X L, Chen B Q, Xie C Q, Liu M, Cao L F 2007 *Optical Engineering* **47** 058001
- [13] Kuang L Y, Cao L F, Zhu X L, Wu S C, Wang Z B, Wang C K, Liu S Y, Jiang S E, Yang J M, Ding Y K, Xie C Q, Zheng J 2011 *Opt. Lett.* **36** 3954
- [14] Feng Y J, Cheng Q H, Wu P H 1995 *Chin. Phys.* **4** 301
- [15] Zhang H B, Feng R J, Katsumi U 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 2011
- [16] Giannuzzi L A, Stevie F A 2004 *Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice* (New York: Springer Science+Business Media) pp1-12
- [17] Chen L M, Li P G, Fu X L, Zhang H Y, Li H L, Tang W H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 0582 (in Chinese)[陈雷明, 李培刚, 符秀丽, 张海英, Li H L, 唐为华 2005 物理学报 **54** 0582]
- [18] Gu W Q, Ma X G, Li W P 2006 *Focused ion beam micro-nano fabrication technology* (Beijing: Beijing Industry University Press) pp1-87 (in Chinese) [顾文琪, 马向国, 李文萍 2006 聚焦离子束微纳加工技术 (北京: 北京工业大学出版社) 第 1-87 页]
- [19] Wei L, Cao L F, Fan W, Zang H P, Gao Y L, Zhu X L, Xie C Q, Gu Y Q, Zhang B H, Wang X F 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 387 (in Chinese) [魏来, 曹磊峰, 范伟, 臧华平, 高宇林, 朱效立, 谢长青, 谷渝秋, 张保汉, 王晓方 2011 强激光与粒子束 **23** 387]

Fabrication and optical property characterization of quantum-dot-array diffraction grating with single order diffraction based on focused ion beam*

Huang Cheng-Long¹⁾²⁾³⁾ Zhang Ji-Cheng³⁾ Diao Kai-Di³⁾ Zeng Yong³⁾
Yi Yong¹⁾²⁾ Cao Lei-Feng³⁾ Wang Hong-Bin^{3)†}

1) (*State Key Laboratory Cultivation Base for Nonmetal Composites and Functional Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

2) (*Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

3) (*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 13 July 2013; revised manuscript received 18 September 2013)

Abstract

Quantum-dot-array diffraction grating(QDADG), with an area of $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, a line density of 500 line/mm, an aperture size of 800 nm and a gold absorber of 500 nm thick, is successfully fabricated by focused ion beams. The diffraction properties and relative diffraction efficiencies of QDADG are measured at different transfer distance for 442 nm laser. It is shown that the high-order diffraction is removed from the spectra with only the ± 1 and 0 order diffraction lines reserved. Moreover, in accordance with the calculated values obtained using the grating equation, variations of space between the 1st order and the 0th order increase gradually with the increase of transfer distance.

Keywords: focused ion beam(FIB), quantum-dot-array diffraction grating(QDADG), single order diffraction

PACS: 81.07.Ta, 42.79.Dj, 81.16.Nd

DOI: [10.7498/aps.63.018101](https://doi.org/10.7498/aps.63.018101)

* Project supported by the Open Foundation of Key Laboratory for Nonmetal Composites and Functional Materials of Sichuan Province, China (Grant No. 11zxfk19).

† Corresponding author. E-mail: willking3@126.com