**附件一：**

**论文格式要求及其他说明**

论文书写顺序为：标题、作者、作者单位（包括单位全称、城市、邮政编码）、摘要、关键字（以上均要求中英文）、首页基金项目正文、参考文献、作者简介栏（作者简介包括姓名、性别、出生年、职称、专业、Email等）。文章各要素一定要齐全，以免后续更改替换的麻烦。**文章中所有的英文和数字均应用Times New Roman字体（包括图表中），以下各项不再赘述**，其他各项具体要求如下：

1、标题：文章标题上方空五号字一行，一般最多不超过两行，居中，黑体二号字。

2、作者：作者上方空五号字一行，作者行为仿宋四号字，作者间用逗号（中文逗号）隔开，单位序号用上标，举例如“刘艳宾1,2)，弓小平1)，潘展超1)，韩琼1)”。

3、作者单位：五号宋体字，各单位之间用“；”隔开，一般一个单位占一行，内容应包括单位全称、城市、邮政编码，打括号。举例如“（中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京，100083）”。

4、摘要、关键字：中文摘要与作者单位之间空五号字一行。“摘要、关键字”宋体，加粗五号，内容为宋体五号，关键词间用“；”隔开。分类号、文献标识码、文章编号不做要求。英文标题同上一行空五号字一行，英文字号同中文。

5、正文：正文为五号宋体字，章节标题一般不超过3个层次，各级标题一律顶格并用阿拉伯数字连续编号（手动输入，不要用自动编号），数字编号与标题间空一个汉字（两次空格键），一级标题用四号宋体字（段前0.5行，段后0.5行），编号为1，2，3……，不标“前言”字样，亦不给前言节序号（或可认为其序号为0）。二级标题用五号黑体字，编号为1.1，1.2，1.3……，三级以下标题亦都用五号黑体字，编号为1.1.1，1.1.2，1.1.3……。若确有必要，可编四级、五级标题。

文中公式、方程式、图、表均应编排序号，且图表序号均应在正文中相应出现。

文后参考文献表中列出的文献必须是在正文（含图表）提及过的，正文（含图表）提及过的文献必须列出在参考文献表中。参考文献一律采用顺序编码制。注意，华人的外文文献，请在引用处和文献表中均尽量将作者的名亦全拼给出。

变量代号请用斜体，矢量代号为黑斜体。但pH、Eh、重力加速度g、圆周率代号π、自然对数的底e、各种元素符号等永远是正体；常用函数名sin、cos、lg、ln，一些算子如微分符d为正体。

地层代号，下奥陶统冶里组上段O1*y*2中的1为下角标，*y*为斜体，不是下标，2为上角标。以此类推。

文中凡表示确切数字和公历年月日的均使用阿拉伯数字，仅专有名词中的数字、部分序数词等用汉字，外文字母注意区分大小写。

6、图表要求：图表及图表名请直接插入，勿用表格、文本框插入。保证图清晰可辨、美观大方，图中文字采用小五号宋体字，图名采用小五号宋体字，图说明采用小五号宋体字，居中。表名采用小五号宋体字，居中，表内容采用小五号宋体字，表格一律采用三线表。

7、参考文献：小五号宋体（Times New Roman）字，论坛采用顺序编码制引用文献。

参考文献表按顺序编码制组织时，各篇文献要按正文部分标注的序号依次列出。

8、 非正式出版物， 包括硕士、学士学位论文，请列在“注释/Note(s)”项下，置于结论、谢语之后，参考文献之前；若有多条，按文中出现顺序排列，其序号用阴圈码。文中引用处用第一作者（等）后加阴圈码上角标（如张三❶；李四等❷；王五等❸），或直接写阴圈码上角标于引用内容之后。博士学位论文可以作为正式出版物使用。

9、作者简介栏：宋体六号字，包括基金项目信息和作者信息，基金项目采用“注：本文为xxxxx项目、YYYY项目和ZZZZ项目的成果。”的格式。作者信息采用“作者简介：姓名，性别，出生年月。最高学位，职称，从事专业。 Email：”的格式。

**模板如下**

薄膜表面直接四光束激光干涉制备复眼的研究[[1]](#footnote-1)\*

张海鑫，陈旭浪，张鲁佳，刘光泽，张金金，王大鹏，王作斌[[2]](#footnote-2)\*\*

（长春理工大学国家纳米操纵与制造国际联合研究中心，吉林省长春市，130022）

**摘要：**本论文基于四光束激光干涉光刻理论，在薄膜表面实现了四光束激光直接干涉光刻制备微纳复眼结构，为薄膜的功能仿生优化提出了新的方法。由于目前研究主要集中在半导体材料领域，实验为激光干涉光刻研究提供了一个新的应用方向。对于多层复合薄膜，激光干涉光刻的效果与薄膜的透光率具有相关性，即在一定范围内，透光率影响光刻结构的形成。实验在保持四光束激光干涉光刻系统波长和入射角度不变的条件下，通过改变能量得到不同的光刻图样，结果证实了理论分析与模拟光刻图案的合理性。

**关键词：**干涉光刻；复眼结构；薄膜

中图法分类号:TN249 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2014)12-2283-05

**Fabrication of fly-eye structures on thin films by direct four-beam laser interference lithography**

Zhang Hai-xin, Chen Xu-lang, Zhang Lu-jia, LiuGuang-ze, Zhang Jin-jin, Wang Da-peng, Wang Zuo-bin

(International Research Centre for Nano Handling and Manufacturing of China, Changchun University of Science and Technology, Changchun, China, 130022)

**Abstract:** This paper presents a method for the optimization of the bionic function of thin films to implement fly-eye structures by direct four-beam interference lithography. Apart from the main approaches made in the field of semiconductor materials, the method provides a new application area of laser interference lithography. For multilayer composite films, the results of laser interference lithography are related to the transmittance of films, and within a certain range of laser fluences, the transmittance affects the formation of lithographic patterns. In the experiment, the laser wavelength was 1064nm and the incidence angles of beams were 5°. The different lithographic patterns were obtained using different laser fluences. The experiment results are in accordance with the theoretical analysis and simulation.

**Key words:** Interference lithography; "fly-eye" structure; thin film

**1引言**

复眼是由许多个小多边形结构的小眼组合而成的，在每只复眼中，有4000多只小眼，拥有复眼的昆虫中，苍蝇的复眼能看到周围近360°的物体[1]。此外，复眼由众多小眼组成，具有极高的分辨率和全方位的细微角度观察能力[2]，因此可普遍应用于探测、气象卫星、雷达等系统中，有着极其广泛的应用前景[3]。

为了获得类似于复眼的结构，目前已经开发出电子束曝光、离子束曝光、压印、激光干涉光刻等多种制造技术[4][5]。应用电子束、离子束曝光技术可以获得任意表面结构，但是由于曝光技术的效率低和成本高，因此限制了工业应用。压印技术主要应用在制造二维结构中,需要更换，并会出现模式不完整的现象,所以压印技术不适合制作3D模式的复眼结构[6]。激光干涉光刻是一种新兴的3D制作技术，由于可制作周期和准周期的微纳米结构，所以其应用潜力巨大[7]。

激光干涉光刻技术是利用两束或多束激光在材料表面相干涉，形成强弱不同的能量分布，从而实现激光对材料的3D刻蚀[8]。双光束激光干涉可形成平行的条纹图样分布，多光束激光干涉可形成密集排列的点阵或孔阵图样分布[9]。由于激光干涉光刻技术相比其他技术具有更大的曝光面积和焦深，所以对于高效制造周期性3D结构更加有利[10]。

在光刻制造技术进入纳米尺度之后，光刻掩模的成本在整个光刻成本中所占份额不断攀升，因此光刻技术的应用前景很大部分取决于光刻掩模技术的发展[11]。以往的光刻工艺是在硅等材料表面涂光刻胶，利用光刻胶的感光特性进行光刻，最后再除去材料表面的光刻胶，形成所需的结构[12]。在薄膜材料表面进行直接四光束干涉光刻制备复眼结构，实现了无掩模光刻，节省了掩膜的高昂费用，简化了操作要求，降低了制造成本[13]。

本项目实验中采用激光干涉光刻技术，在不同透光率薄膜表面直接进行四光束激光干涉光刻，以制备微纳复眼结构，并通过使用不同激光能量和不同透光率的薄膜进行试验，最终得出在薄膜表面制备复眼结构的最佳激光能量值范围，为后续研究奠定了坚实基础。

**2理论分析与仿真**

四束激光的干涉可以看作是四束激光电场矢量的叠加。由麦克斯韦方程组可解出平面电磁波形式[6]：

其中***K***为波矢，大小，*λ*是波长，*θ*是入射角，*φ*是方位角，*A*为振幅，***P***为总偏振矢量，*Ψ*是偏振角，***r***是位置矢量，*w*为频率，*δ*为初始相位。

由（1）式可知，波动方程是线性方程，所以当两束或多束满足波动方程的光波相遇时可进行线性叠加[14]：

图1是四光束干涉光路图，其中方位角*φ*1=180°，*φ*2=0°，*φ*3=270°，*Ф*4=90°。入射角*θ*1=*θ*2=*θ*3=*θ*4=*θ*=5°、初始相位*δ*1=*δ*2=*δ*3=*δ*4=0°，则有：

；

；

代入公式（2）可得：

(3)

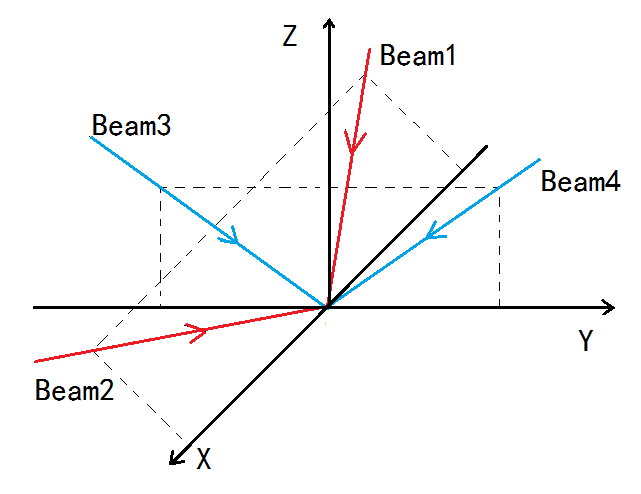


图 1 四光束干涉光路

通过MATLAB模拟仿真不同入射角的四光束干涉模式，得到图2：a为入射角*θ*1=*θ*2=*θ*3=*θ*4=*θ*=5.5°，方位角*φ*1=180°，*φ*2=0°，*φ*3=270°，*Ф*4=90°的2D图；b为入射角*θ*1=*θ*2=*θ*3=*θ*4=*θ*=9°，方位角*φ*1=180°，*φ*2=0°，*φ*3=270°，*Ф*4=90°的2D图；c为a沿截面线的光强度变化曲线；d为b沿截面线的光强度变化曲线；e为a的3D图；f为b的3D图。由此可见，计算机模拟仿真结果与理论分析（3）式一致，在选定入射角*θ*1*=θ*2*=θ*3*=θ*4的条件下，入射角的改变只对所形成阵列的周期产生影响。

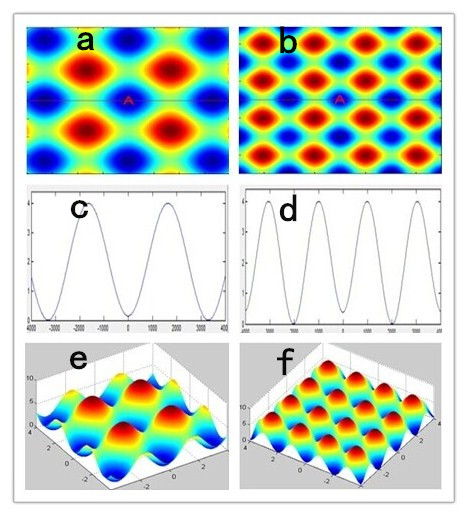


图 2 计算机模拟仿真

**3实验**

间接激光干涉光刻是在材料表面涂上光敏感材料光刻胶，经烘焙、曝光、刻蚀除去光刻胶后方可实现需要的干涉光刻结构；直接激光干涉光刻是光束直接作用在材料表面实现光刻，光刻过程繁杂度大大降低；对比发现直接激光干涉光刻比间接激光干涉光刻具有过程简单、成本低、灵活性高和可靠性强的优点[15]。因此本实验采用了直接激光干涉光刻技术作为实验方法。

本实验中，四光束干涉光刻系统如图3所示。实验使用脉冲激光器，输出波长*𝜆*，激光能量密度*J*，激光作用光斑直径6mm，频率和脉冲持续时间的系统光源。光源的激光光束分成了四束光。光束的分光通过分光镜BS1、BS2、BS3实现，四光束在材料表面干涉的方位角与入射角由反射镜M1、M2、M3、M4调节，波片Q1、Q2、Q3、Q4和偏振镜P1、P2、P3、P4用来选择偏振方向和能量强度。光刻在超净实验条件下进行。实验中，四束光入射角*θ*1=*θ*2=*θ*3=*θ*4=*θ*=5°，方位角*φ*1=180°，*φ*2=0°，*φ*3=270°，*Ф*4=90°，偏振B1、B2为0°，B3、B4为90°。选取材料透光率分别为5%、30%、75%的薄膜，分别在其表面使用能量值为15mj、20mj、25mj、30mj、35mj、40mj、45mj的四光束激光进行干涉光刻。

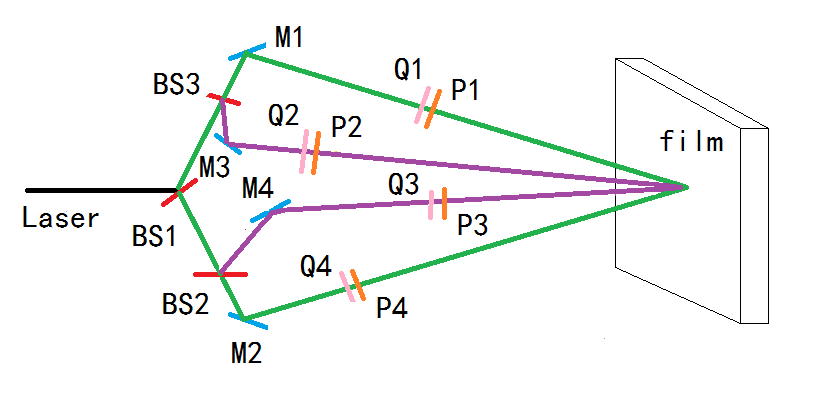


图 3 四光束干涉光刻系统

在薄膜表面干涉光刻后，用共聚焦显微镜观察获得的薄膜表面复眼结构如图4，放大倍率均为728倍，其中：a-f为透光率5%，能量分别为15mj、20mj、25mj、30mj、40mj的干涉光刻图样；g-l为透光率30%，能量分别为15mj、20mj、25mj、30mj、35mj、40mj的干涉光刻图样；m-r为透光率75%，能量分别为15mj、20mj、25mj、30mj、35mj、40mj的干涉光刻图样；当能量大于40mj时，由于能量过大，透光率分别为5%、30%、75%的薄膜表面均无法获得所需复眼结构。

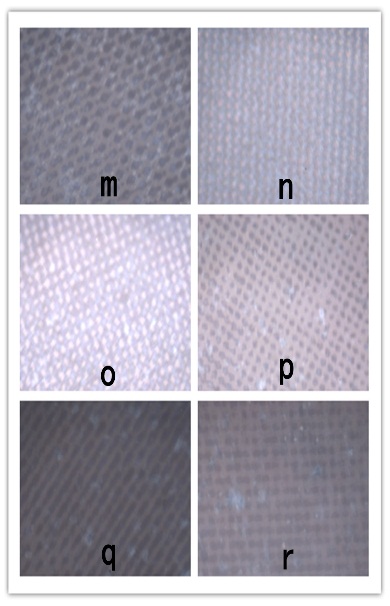
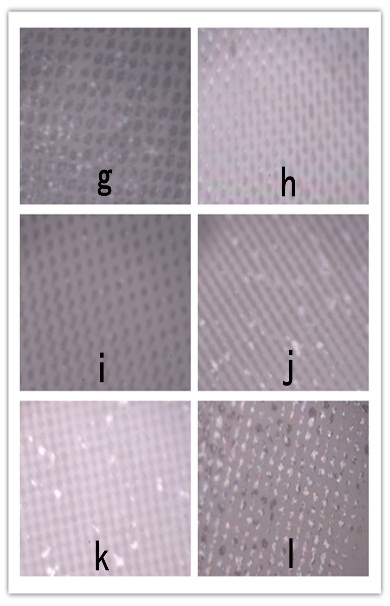
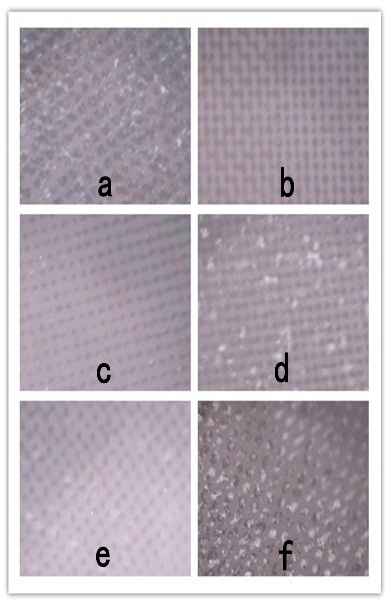


图 4 共聚焦显微镜观察薄膜表面复眼结构

四光束激光直接干涉光刻可形成周期性孔阵结构，由多边形密排组成，与复眼结构一致；透光率分别为5%、30%、75%的薄膜在20mj-30mj时均形成清晰周期复眼结构，且在25mj时最为明显；当能量小于15mj时由于能量过小，结构模糊；观察可知，当能量在15-25mj之间时，透光率越低所形成结构越清晰；当能量在25-40mj之间时，透光率越高所形成结构越清晰；当能量高于40mj时，由于能量过大，所形成结构逐渐消失。反应了激光干涉光刻形成微纳结构与薄膜的透光率相关，且在一定区间内，透光率影响形成的微纳结构效果。使用共聚焦显微镜测定了20mj-30mj时所形成清晰复眼结构的平均单周期尺度为8.666μm。

实验使用反射率测试系统对光刻前后的透光率5%、30%、75%的薄膜进行了反射率测试，测试结果如表1所示。

表 1 激光干涉光刻前、后反射率

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| transmittance of films | 5% | 30% | 75% |
| reflectivity before lithography | 0.1858-0.3220 | 0.2149-0.2363 | 0.1731-0.2392 |
| reflectivity after lithography | 0.0575-0.0794 | 0.1336-0.1440 | 0.0316-0.0461 |

可发现经激光干涉光刻后形成的复眼结构反射率普遍降低,可以在薄膜表面实现减反特性。

**4结束语**

本实验利用直接激光干涉光刻技术，使用多组不同能量值激光在不同透光率薄膜表面光刻，实现了不同透光率下薄膜的复眼结构制备，并测定了复眼单周期尺度、干涉光刻前后薄膜的反射率以及薄膜光刻的最佳能量范围。结果表明在不同透光率薄膜表面均可以实现微纳复眼结构的制备，其结构具有减少薄膜反射率特性；薄膜光刻最佳能量范围的测定为薄膜的光学加工做了进一步的探索，提供了一种新的实现途径。在薄膜表面实现四光束激光直接干涉光刻制备微纳复眼结构的研究，为薄膜的功能仿生优化提出了新的方法,同时也为后续研究提供了新的方向。

**参考文献:**

[1] LI Jun, WEI Min-xiang. Based on large vehicles "fly-eye" sensor network collision avoidance system research [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering. 2010, (3): 3-6.

李军，魏民祥. 基于“蝇眼”传感网络的大型车辆防撞系统研究. 农业装备与车辆工程. 2010 ,(3):3-6。

[2] Charles C. H. Jui. Results from the High Resolution Fly’s Eye Experiment [J]. AIP Conf. Proc. 2000, 516(3): 17-25.

[3] XU Yan, YAN Shu-hua, ZHOU Chun-lei. Advances in bionic study on insects compound eyes [J]. Optical Technique. 2006, 32: 10-12.

徐琰，颜树华，周春雷等. 昆虫的复眼仿生研究进展[J]. 光学技术. 2006, 32:10-12.

[4] Oh S S, Choi C G, Kim Y S. Fabrication of micro-lens arrays with moth-eye antireflective nanostructures using thermal imprinting process [J]. Microelectronic Engineering. 2010, 87(11): 2328–2331.

[5] Hong E J, Byeon K J, Park H, et al. Fabrication of moth-eye structure on p-GaN layer of GaN-based LEDs for improvement of light extraction [J]. Materials Science and Engineering. 2009, 163(3): 170–173.

[6] Xu J, Wang Z B, Zhang Z A, et al. Fabrication of moth-eye structures on silicon by direct six-beam laser interference Lithography [J]. Journal of Applied Physics. 2014, 115(20): 3101.

[7] Xie Q, Hong M H, Tan H L, et al. Fabrication of nanostructures with laser interference lithography. Journal of Alloys and Compounds. 2008, 449(1-2): 261–264.

[8] Lai N D, Liang W P, Lin J H, et al. Fabrication of two-and three-dimensional periodic structures by multi-exposure of two-beam interference technique [J]. Optics Letters. 2005, 13(23): 9605-9611.

[9] Murillo R, Van Wolferen H A, Abelmann L, et al. Fabrication of patterned magnetic nanodots by laser interference lithography [J]. Microelectronic Engineering. 2005, 78-79: 260-265.

[10] Chen C G, Ralf K, Joo C, et al. Beam alignment for scanning beam interference lithography [J]. Vac. Sci. Technol. 2002, 20(6): 3071.

[11] WENG Shou-song, MIU Cai-qin. Prospect of maskless lithography [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing. 2005, 8:1-3.

翁寿松,缪彩琴.无掩模光刻技术的前景,2005,8:1-3

[12] Arriola A, Rodriguez A, Perez N, et al. Fabrication of high quality sub-micron Au gratings over large areas with pulsed laser interference lithography for SPR sensors [J]. Optical Materials Express. 2012, 2(11): 1571-1579.

[13] GU Xiao-yong. Study and fabrication of micro- and nano- structures for antireflection [D].Suzhou: Soochow University, 2013.1-6.

顾小勇. 减反特性的微纳复合结构的制备和研究,2013.1-6

[14] ZHANG Jin. Study on Laser Interferometric Lithography [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. 31-35.

张锦. 激光干涉光刻技术.博士学位论文, 2003. 31-35

[15] Moon J H Z, Ford J, Yang S, Fabricating three-dimensional polymeric photonic structures by multi-beam interference lithography [J]. Polymers for Advanced Technologies. 2006, 17(2): 83-93.

**作者简介:**

王作斌（1960-），男，哈尔滨人，教授，博士生导师，主要从事纳米测量与制造技术方面的研究。

\*\***E-mail**：wangz@cust.edu.cn

1. 收稿日期：2014-08-28 修订日期: 2014-10-25

   \*基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)，No.2012CB326406，2012-2014；大学生创新创业训练计划，No.2013S001； [↑](#footnote-ref-1)
2. [↑](#footnote-ref-2)