

准分子激光深层光刻蚀在 LIGA 工艺中的应用*

沈蓓军 王润文 路敦武 黄惠杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 介绍了一种用于准分子激光深层光刻实验装置的设计,并将该装置成功地应用于 LIGA 工艺的深层光刻中,光刻实验表明准分子激光层光刻具有很大的实用意义。

关键词 微机械 微细加工 LIGA 工艺 光刻

1 引 言

八十年代末期国际上在微机械电子学方面出现了一个新的势头,人们正研究利用集成电路微细加工技术将机构及其驱动器、传感器、控制器、电源集成于仅几立方毫米的硅片上而获得完备的机电一体化的微电子机械系统,它可广泛应用于农业、工业、航天、军事、医疗、航海等各个领域,对机械电子行业将带来巨大的影响。随着微电子机械系统研究的深入,现有的集成电路微细加工技术因其二维平面微细加工特性和加工材料单一等因素的限制已越来越表现出具有很大的局限性,已满足不了微电子机械系统三维立体微细加工的需求。1987年西德 Karlsruhe 核研究中心的微结构技术研究所研究出一种新型的三微细加工工艺——LIGA 工艺技术用于对微结构元件的制作^[1], LIGA 是德文光刻(Lithografie)、电铸(Galvanoformung)、模铸(Abformung)的缩写, LIGA 工艺技术主要包括三个工艺过程:深层同步辐射软 X 射线光刻、电铸成型及铸塑。

由于 LIGA 工艺本身的特点,它可以用来制作各种材料如:塑料、金属、陶瓷的三维微结构元件,目前 LIGA 工艺已广泛应用于微型机械、微光学元件制作、装配和内连技术、光纤技术、传感器技术、医学和生物工程等方面^[2],美国、西德等国的一些公司运用 LIGA 工艺技术已经开始批量生产微结构元件作为商品进行销售。

* 国家攀登计划资助课题

激光 LIGA 工艺技术国际上90年代才出现,1994年德国在 Straboutage 召开的 EMRS 春季会议上正式发表论文“光子激光 LIGA 用于微机械大规模生产”^[3],日本滨松(Hamamatsu)在紫外准分子激光制造微元件已形成简易加工机械投放市场。

激光 LIGA 工艺实际上是用准分子激光的深层刻蚀来取代 LIGA 工艺中的同步辐射软 X 射线深层刻蚀,采用激光 LIGA 工艺可以回避高精密的 X 射线掩模制作、套刻对准等一系列技术难题,激光光源的经济性和使用的广泛性大大优于同步辐射软 X 光源,从而可以大大降低 LIGA 工艺的制造成本,使 LIGA 工艺得以广泛的使用。另外激光 LIGA 工艺不象 X 射线光刻那样需要化学腐蚀显影,而是光子直接打断分子键的冷加工,因而没有化学腐蚀的横向浸润影响,加工边缘陡直,精度高,光刻性能优于同步辐射 X 射线光刻。

激光 LIGA 工艺的技术关键在于如何利用激光来实现图形的深层光刻,因而激光 LIGA 研究的重点就是对微细图形的深层光刻问题。用激光光刻蚀图形的方法主要有激光扫描法和激光投影光刻法二种,从经济性考虑我们采用激光投影光刻法,其实验装置设计及实验方法介绍如下。

激光 LIGA 工艺实验装置

如图1所示,激光 LIGA 工艺实验装置由准分子激光器、光学照明系统(照明均匀器)、对准观察系统、掩模、硅片台、光刻投影镜头组成。紫外激光光束经照明系统均匀器的光强均匀化后照射在掩膜板上,掩膜图案通过光刻投影镜头成像在涂有 PMMA 胶层的硅片上,通过光子直接打断分子键消溶 PMMA 将掩膜图案转移至硅片上,从而完成 PMMA 的深层光刻。激光 LIGA 工艺实验装置的各系统单元性能指标及设计要求分述如下。

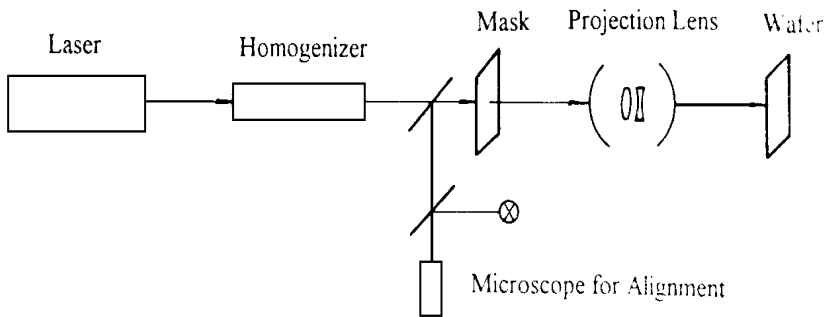


Fig. 1 Scheme of laser LIGA lithography apparatus

1 准分子激光器

准分子激光器是七十年代初期发展起来的新型气体激光器,它能有效地产生紫外和远紫外高功率、高能量的辐射脉冲。我们采用的准分子激光器主要参数和性能指标如下:

单脉冲能量: 100 ~ 200mJ 连续可调

平均功率: 5 ~ 8W

激光脉冲宽度: ~ 35ns

重复频率: 0.5 ~ 110Hz

中心波长: 248.3nm

谱线宽: 1nm

照明系统

在实际的准分子光刻系统中,照明均匀性通常要求优于 $\pm 2.5\%$,准分子激光器的激光束光场分布如图所示,其横向分布基本均匀,而纵向呈高斯分布,为此必须设计一种光学匀匀器以使光刻物镜视场内照明均匀。

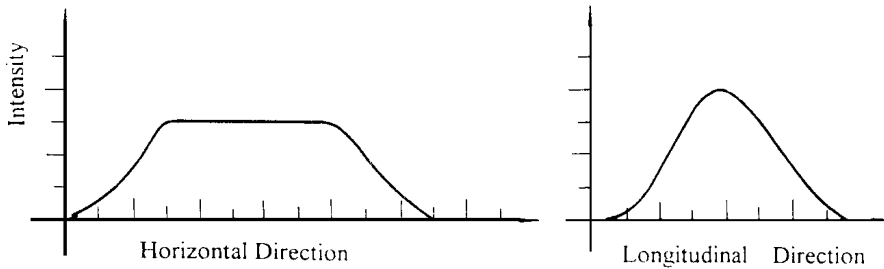


Fig. 2 Optical intensity distribution of excimer laser

3 投影光刻镜头

投影光刻镜头要求具有一定的分辨率、图形传递的正确性、焦深、视场、物象共轭距,具体要求将在镜头设计部分阐述。

4 掩膜台、硅片台设计

为满足激光 LIGA 工艺中的套刻对准和光学调焦的需求,掩膜台必须具有 X 、 Y 、 Z 三维移动调整和一维转动 θ 调整,为了保证对准精度为 $\pm 1\mu\text{m}$,各维调整精度要求如下:

X 、 Y 、 Z 直线移动精度: $10\mu\text{m}$

转动调整精度为:

$$\theta = \arctg \frac{1}{1000} = 3.4$$

硅片台设计时需设置吹氮或真空吸附装置以防止激光消融后的 PMMA 重新在表面聚合,影响刻蚀质量。

3 准分子激光光刻镜头设计

激光 LIGA 工艺光刻镜头的要求不同于集成电路光刻镜头,集成电路光刻镜头主要传递线条图形,其镜头对光刻分辨率有很高的要求,而激光 LIGA 工艺光刻镜头需传递各种复杂图形的图案,它不仅要求有一定的光刻分辨率,而且还要求对图形形状能进行正确传递。此外激光 LIGA 工艺光刻镜头还需具有较大的焦深以满足深层光刻蚀的需求。激光 LIGA 工艺光刻镜头图形形状的正确传递可以通过控制矩形图形方角成像后变成圆角的半径大小来实现,圆角半径 R 与镜头的数值孔径 NA 的关系为^[4]:

$$R = 0.7(NNA)$$

假定将圆角半径控制在 $3.5\mu\text{m}$,则镜头的数值孔径为:

$$NA = 0.7 \times (0.248/3.5) = 0.05$$

此时光刻分辨率 L 为:

$$L = 0.62(\lambda/NA) = 3\mu\text{m}$$

焦深 D 为:

$$D = \lambda/NA^2 = 99.2\mu\text{m}$$

综上可得激光 LIGA 工艺光刻镜头的设计指标为:

数值孔径:	0.05
缩小倍率:	10·1
象方视场:	$2 \times 2\text{mm}^2$
工作波长:	248nm

4 准分子激光 PMMA 的消融

由于 PMMA 是有机高分子聚合物,在高能量的紫外光子的作用下,材料的化学键会发生断裂,生成物所占据的体积迅速膨胀,最后以爆炸的形式脱离母体而发生 APD(Ablative Photodecomposition)反应,因而可以利用准分子激光对 PMMA 进行直接刻蚀。为了实现 APD 过程,准分子激光的光强阈值应满足下式要求^[5]:

$$I = \frac{hc}{\alpha\lambda}N$$

式中: h 为普朗克常数; α 为材料的光吸收系数; λ 为波长; c 为分子体积; N 为阈值光子密度。

5 实验结果

我们在涂有 PMMA 的硅片上进行了准分子激光消融 PMMA 的实验。我们用于消融的 PMMA 膜厚度为 $40\mu\text{m}$, 激光脉冲能量为 $23\text{J}/\text{cm}^2$, 所用脉冲数为 900, 照片所示为所拍摄的刻蚀图形情况, 该实验表明, 利用上述实验装置对 PMMA 进行深层光刻是完全可行的。

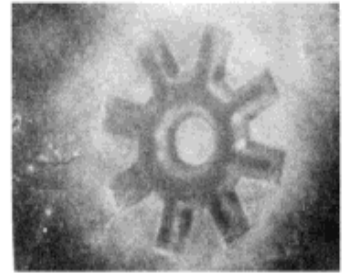


Fig. 3 The result of laser LIGA lithography on $40\mu\text{m}$ PMMA film

参 考 文 献

- 1 Ehrfeld W, et al. Progress in deep-etch synchrotron radiation lithography. J Vac Sci Technol, 1988, B6 (1): 178
- 2 Ehrfeld W, et al. Materials for LIGA products. Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical System, 1994. 86
- 3 Arnold J, Whrfeld U, Hrsch K, Lowe H. Combination of excimer laser micromachining and replication process suited for large scale production. Presented at EMRS Spring Meeting, Strasbourg, France, 1994, 23~27

- 4 王之江, 邹海兴. 投影光刻机光学系统的总体设计. 光学学报, 1987, 7(2): 159
- 5 张玉书, 张庆有. 准分子激光微细加工技术. 长春: 吉林大学出版社, 1990. 243

The Application of Excimer Laser Deep Lithography in LIGA Process

SHEN Bei-Jun, WANG Run-Wen, LU Dun-Wu, HUANG Hui-Jie

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 210800*)

Abstract

In the paper an excimer laser lithography apparatus is described. This apparatus is applied in deep lithography for LIGA process successfully. The lithography experiment result shows us that excimer laser deep lithography is very practical to LIGA process.

Key words: MEMS, Micromachining, LIGA process, Lithography

沈蓓军 工程师, 博士研究生。1984年毕业于上海大学机械工程系, 进入上海光学精密机械研究所工作后, 长期从事光学光刻方面的研究工作, 参加了1·4扫描投影光刻机, 线宽测量等半导体制造设备的研制工作, 1990年前后开始从事微机械的研究工作, 参加了微机械装配系统的研制工作, 现从事激光微细加工工艺方面的研究工作。