

同步辐射 X 射线光刻应用 新领域——LIGA 技术

田扬超 胡一贯 刘泽文 阚娅

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥, 230026)

介绍了一种超微细加工新方法-LIGA 技术, 并就 LIGA 技术对掩模材料、光刻胶和光源的要求予以讨论, 同时还介绍了国外在这方面的最新研究成果。LIGA 技术是深度 X 射线刻蚀、电铸成型和塑料铸模等技术相结合的综合技术, 是制造微型机械最有前途的方法。与传统半导体超微细加工方法相比, LIGA 技术有以下优点: (1) 用材广泛, 可以是金属、陶瓷、聚合物及玻璃; (2) 可加工任意复杂的图形结构; (3) 可制造有较大高宽比的超微细元件; (4) 加工精度高, 可达亚微米; (5) 可重复复制, 工业上能批量生产, 成本低。

关键词 LIGA 技术 X 射线光刻 同步辐射 超微细加工

随着集成电路集成度提高, 电子元件的体积愈来愈小, 而与之匹配的机械却显得笨重, 已远不能适应要求, 迫切需要微小而精确可靠的微型机械元件与之适应。微型机械就其尺寸而言, 用常规机械加工方法是无法加工的, 因此需要开辟新的加工途径。

近年来 Ehrfeld 教授及其同事^[1-3]发展了 LIGA 技术。这一技术被认为是超微细加工最有效和最有前途的方法。目前用这一方法已在实验室里制备出了多种产品, 工业化批量生产也正在积极推进之中。

LIGA 这一词来源于德文(Lithographie Galvanoformung and Abformung), 即深度 X 射线刻蚀、电铸成型、塑料铸模等技术结合。

1 LIGA 技术工艺原理及过程

图 1 示出工艺流程图^[1-3], 主要工艺过程如下:

(1) 深度 X 射线刻蚀——利用同步辐射 X 射线在数百微米厚的光刻胶上刻蚀出较大高宽比的光刻胶图形, 高宽比一般达到 100。

(2) 电铸成型及制模——将金属从电极上沉积在底板光刻胶图形的空隙里, 直至金属填满整个光刻胶的图形空隙为止。实际上, 这一过程是将光刻胶图形转化为相反结构的金属图形。此金属结构可作为最终产品, 也可作为批量复制的模具。

(3) 注模复制——将去掉基板和光刻胶的金属模壳附上带有注入孔的金属板, 从注入孔向

收稿日期: 1993-04-06 收到修改稿日期: 1993-08-30

模腔中注入塑料,然后去掉模壳。在金属板上留下一个塑料结构,此塑料结构可作为产品,也可将它作为模芯,以金属板作电极进行另一次电铸成型,然后去掉塑料模芯,便复制出一个金属微结构产品。

用 LIGA 技术进行超微细加工有如下优点:用材广泛,可以是金属、陶瓷、聚合物及玻璃;可加工任意复杂的图形结构;制造出有较大的高宽比的超微细元件;加工精度高,可达亚微米;可以重复复制,工业上能批量生产,成本低。

2 LIGA 技术要求

为得到理想的具有较大高宽比的立体结构超微细加工元件,须作深度 X 射线刻蚀。最终得到的 X 射线光刻胶图形质量依赖于 X 射线掩模图形的精度、辐射过程的投影精度和 X 射线光刻胶的留膜率等因素,所以为了保证图形的质量,对掩模、光源和光刻胶都有一定的要求,下面分别叙述之。

2.1 X 射线掩模

2.1.1 基底(X 射线透过膜、吸收体支持膜)材料 用于深度 X 射线光刻的掩模在某些细节上不同于制作大规模集成电路的 X 射线掩模。由于深度 X 射线刻蚀时光刻胶较厚,曝光剂量较大,在实际应用中,吸收体正下方光刻胶的曝光剂量不应大于 100 J/cm^2 , 否则 PMMA 将裂解,影响图形质量,因此要求掩模的反差要大(一般大于 200)。为使掩模反差大,基底材料对 X 射线吸收系数应较小,所以掩模基底必须使用原子序数较小的元素制成。

L. Lehr 等^[1]对 Be, C, Si, Ti 用作基底材料时的各种性质作了比较。Be 对 X 射线的吸收系数较小,光通量损失也较小,显示了较好的性质。对深度 X 射线光刻,由于辐照强度较大,曝光时间长,基底材料应比通常 X 射线掩模基底材料厚些,且不易变形,并须具有良好的稳定性。综合考虑各种因素,金刚石膜能够满足稳定性和光学透明性的要求,但制作金刚石薄膜的现行工艺须加以改进,使之薄膜表面的粗糙度小于 $0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$ 。

在制作掩膜时,不同的工艺(如反应离子刻蚀、溅射镀膜等),所用基底材料的化学稳定性和毒性也是应加考虑的重要因素。Be 虽有良好性质,但其毒性较大,不易用于制作深度 X 射线光刻掩模基底材料。Ti 虽不是十分理想的基底材料,但因其制作简单,目前仍在继续使用。因此,综合考虑上述因素,金刚石膜是未来最有希望的深度 X 射线光刻掩模基底材料。

2.1.2 吸收体材料 吸收体材料须对同步辐射光有较大吸收,这是对深度 X 射线光刻掩模吸收体的最主要要求,因此吸收体应由原子序数较大的元素制成。就对同步辐射光吸收性质

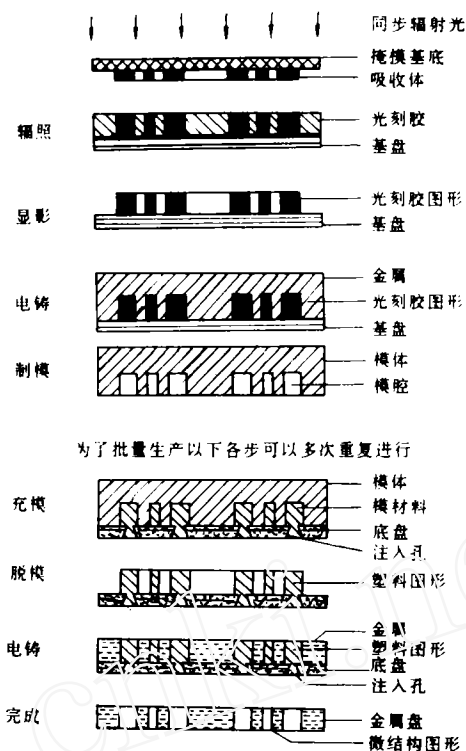


图 1 LIGA 工艺流程图

Fig. 1 Typical LIGA production sequence for the fabrication of metallic microstructure

而言, Au、Ta、W 等都是制作掩模吸收体的良好材料。利用 LIGA 工艺进行超微细加工时, 曝光剂量大, 为得到高质量的较大高宽比的图形, 掩模图形应有较大的反差, 须采用较厚的吸收体(10—15 μm)。厚的掩模吸收体一般采用电镀方法加工, 但控制其厚度增长比较复杂, 给掩模制造带来新的难度。

综合各种因素(如对同步辐射 X 射线的吸收、应力控制和电镀时图形的形成), Au 是最好的吸收体材料。值得注意的是, 当掩模基底材料为金刚石时, 须考虑到这两种材料热膨胀系数差别较大这一因素。

2.2 光刻胶

要得到较大高宽比的图形, 光刻胶必须很厚(一般为几百 μm , 有时可达 1000 μm), 一般甩胶工艺甩出的光刻胶厚度小于 50 μm 。为此 Mohr 等^[4]采用一种静态涂胶法制备出较厚的光刻胶层。这种方法是将 30% 的 PMMA 溶于甲基丙烯酸酯中, 用过氧苯甲酸和二甲基苯胺作为引发剂, 使之发生聚合反应, 最终聚合为 PMMA 树脂, 同时加 1% 的双甲基丙烯酸酯作为交联剂^[1], 以减少应力引起的缺陷。

为改善光刻胶和衬底粘结的牢固性, 将带有双键聚合基的硅烷掺入 PMMA 树脂, 使硅烷端连于衬底的金属表面, 同时聚合基端又和光刻胶形成共价键。

将上述配比的原料树脂简单地注入金属底板上, 为避免空气中的氧对聚合反应的抑制作用, 在光刻胶上面盖一玻璃片。光刻胶的厚度可以通过调节衬底和玻璃片之间的距离来控制。

2.3 光源

在深度 X 射线光刻时, 表面光刻胶和底层光刻胶的曝光剂量差别较大, 在实际应用中, 要求底层光刻胶的曝光剂量(D_D)不能小于 3.5 kJ/cm^2 ; 表面光刻胶的曝光剂量(D_S)不能超过 25 kJ/cm^2 , 剂量大会引起光刻胶出现裂隙和起泡。

深度 X 射线光刻对 X 射线波长的第一个限制条件是: $D_S/D_D = 6$

图 2 示出单色光辐射, $D_S/D_D = 6$ 时 PMMA 的刻蚀深度和辐射波长之间的关系。由图可见, 长波辐照到光刻胶上, 能量易被上面的光刻胶吸收, 而使上面的光刻胶曝光剂量过量, 而底层光刻胶达不到所要求的曝光剂量。可以看出, 只有波长小于 0.3 nm 时, 才能获得深度大于 500 μm 的 PMMA 光刻胶的图形。

在深度 X 射线光刻时, 要获得高精度的图形结构, 还须考虑其他限制条件。其中对图形质量影响很大的因素有: Fresnel 衍射和光电子。由于阴影效应在吸收体的边缘会产生 Fresnel 衍射, 将导致曝光剂量呈现正弦函数方式分布, 导致吸收体阴影部分的剂量增加, 使图形质量下降。光刻胶吸收 X 射线后, 将产生光电子。光电子的分布和入射 X 射线的方向垂直, 与之对应的能量将传递到吸收体阴影部分的光刻胶上, 并使之曝光, 造成图形质量下降。

Fresnel 衍射效应正比于 $\lambda^{1/2}$, 光电子的影响和 λ^{-2} 成正比。Ehrfeld 等^[1]结合模型计算, 综合考虑了这两个因素对图形精度的影响。结论是:

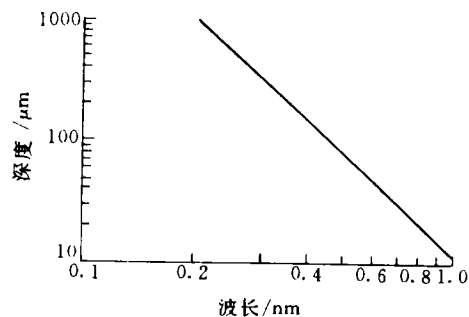


图 2 PMMA 光刻胶刻蚀深度和 X 射线波长的关系($D_S/D_D = 6$)

Fig. 2 Maximal depth in PMMA as function of wavelength of X-ray at $D_S/D_D = 6$
 $D_D > 3.5 \text{ kJ}/\text{cm}^2$; $D_S < 25 \text{ kJ}/\text{cm}^2$.

对 500 μm 厚的光刻胶而言, X 射线波长为 0.2—0.3 nm 时, 能够得到精确度较好的复制图形。

可见, 普通 X 射线光刻虽可满足图形线宽要求, 但不能使上、下光刻胶的曝光剂量同时满足深度 X 射线光刻的要求, 故必须采用同步辐射 X 射线来作深度光刻。

2.4 电铸成型及制模

将金属电解沉积在光刻胶结构的金属基板上, 用以形成高精度、高可靠性的结构图形。深度 X 射线光刻的光刻胶图形具有很大的高宽比, 而横向结构尺寸可能很小。电镀时必须确保金属沉积从金属基板开始, 且均匀增加, 以保证金属图形有较好的可靠性和精确性, 同时还应保证金属沉积致密, 不易脱离。

电铸所产生的图形表面在结构高度和平整度方面可能有轻微的变化, 通过高精度的金刚石铣削抛光技术处理得到比较平整的表面结构, 再用溶解液溶去聚合物, 即可得到金属图形。

2.5 注模复制

已经证实在 LIGA 工艺中塑料注模是十分有用和低廉的复制技术。由于 LIGA 技术制造的图形结构的横向尺寸小, 而高度很高, 乍一看在脱模时很难做到不损坏图形结构, 但是由于铸模时, 光刻胶图形侧壁非常陡直, 而且在电铸过程中保持非常好的平整性, 所以这种结构为脱模提供了非常好的先决条件。微型模具制备完成后, 根据最终所需制备微型机械的材料, 进行充模和脱模, 便得到最终的微型机械。

3 国外 LIGA 技术研究现状

目前, 对 LIGA 技术感兴趣的国家和地区日益增多, 德、日、美相继投入巨资进行开发研究, 法国正积极准备开展此项研究工作。这一方法被认为是最有前途的三维超微细加工方法, 有着广泛的应用前景。目前, 德国、美国已在实验室里研制出微型传感器(温度传感器和加速度传感器)、涡轮机、微型喷嘴、微型滤波片、微型马达以及微型机械零件等产品, 工业批量生产正在积极研究推进中。美国威斯康星大学 Henry Guckel 教授^[6]领导的研究小组对 LIGA 技术进行了改进, 开发出 SLIGA 技术, 此技术关键是增加了聚酰亚胺牺牲层(Sacrificial Layer)特殊工艺。SLIGA 技术突破了原来 LIGA 技术只能制作固定在基板上的微结构图形的限制, 为任意几何形状可动的三维结构制作开辟了道路, 拓展了 LIGA 技术的应用领域。

参 考 文 献

- 1 Lehr L, Ehrfeld W. LIGA-Technique an Overview. The 6th Chinese International Summer School of Physics on Application of Synchrotron Radiation, Beijing, July, 1992.
- 2 Ehrfeld W, Munchmeyer D. Three-Dimensional Microfabrication Using Synchrotron Radiation. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1991, A303:523.
- 3 Munchmeyer D, Langen J. Manufacture of Three-Dimensional Microdevices Using Synchrotron Radiation. Rev Sci Instrum, 1992, 63:713.
- 4 Mohr J, Ehrfeld W, Minchemyer D. Requirements of Resist Layers in Deep-etch Synchrotron Radiation Lithography. J Vac Sci Technol, 1988, B6:2264.
- 5 Ehrfeld W. The LIGA Process for Microsystem. Micro System Technologies 90, 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components. Berlin. September, 1990.
- 6 冈田正. 精密工学会志(日). 1992, 58(3):3.

A NEW APPLICATION FIELD OF SYNCHROTRON RADIATION LITHOGRAPHY——LIGA TECHNIQUE

TIAN YANGCHAO HU YIGUAN LIU ZEWEN KAN YA

(*National synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

ABSTRACT

The LIGA technique is reviewed in the paper. It is based on a combination of deep-etch X-ray lithography, electroforming and molding process. The LIGA technique uses deep-etch synchrotron radiation lithography for producing a primary microstructure which is then replicated in metal by electroforming, for the purpose of mass-production of microstructures molding process with polymers are used. The fabrication of microproducts by means of the LIGA process is advantageous due to several reasons: 1) a large variety of materials are useable like metals, ceramics, polymers and glasses; 2) the choice of the pattern is not restricted; 3) huge structural heights of several hundred micrometers and minimum lateral dimensions in the order of one microm are achievable; 4) extremely precise microstructure with a submicro accuracy are obtainable; 5) low cost, mass-production may be performed for industrial purpose.

Key words LIGA technique X-ray lithography Synchrotron radiation Fabricating microstructure