

好于60nm. 图4是人鳞癌细胞组织切片的 X 射线显微图, 它可以明显分辨出细胞核仁和细



图4 人鳞癌细胞组织切片 X 射线显微图  
(由光学显微镜观测)

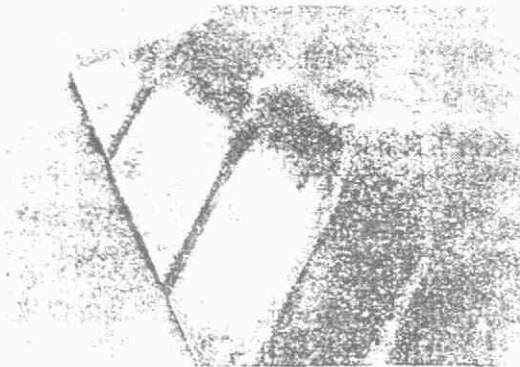


图5 大蒜内表皮(湿)X 射线显微图  
(由光学显微镜观测)

胞染色体, 并可看出致密胞浆及胞壁排列结构<sup>[8]</sup>. 图5是大蒜内表皮(湿样品状态)的 X 射线显微图, 图中框边显示出 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 窗口边缘.

合肥国家同步辐射实验室软 X 射线显微术光束线和实验站仍在进行建设, 使其不断完善. 在使用已有条件进行应用研究的同时, 我们还在开展其他形式的 X 射线显微成像方法(如 X 射线全息术)的研究.

致谢 作者感谢合肥国家同步辐射实验室和我们研究组的许多同事和研究生在我们实验站建设和所做的研究工作中作出的贡献及给予的支持.

### 参 考 文 献

- [1] 谢行恕, 物理学进展, 12-3(1992), 333.
- [2] M·Howells, J. Kirz and D. Sayre, *Scientific American*, 264-2(1991), 88.
- [3] X. Xie et al., *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* A246 (1986), 698.
- [4] Y. So et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 60-7 (1989), 2041.
- [5] E. Anderson and D. Kern, in *X-ray Microscopy II*, eds. A. Michette, G. R. Morrison and C. J. Brckley, Springer, Berlin, (1992), 75.
- [6] 赵永飞等, 中国科学技术大学学报, 24-1(1994), 51.
- [7] C. Jia et al., in *X-ray Microscopy in Biology and Medicine*, eds. K. Shinohara et al., Jpn. Sci. Soc. Press. Tokyo, (1990), 247.
- [8] C. Jia et al., *NSRL Ann. Rep.* (1992—1993), 50.

## 微细加工新方法——LIGA 技术\*

田 扬 超

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

**摘 要** 本文介绍了一种微细加工新方法 LIGA (in German: Lithography, Galvanoformung, Abformung) 技术的基本原理及特点, 同时还简单说明了这种方法的技术要求, 报道了国内外在这方面开展研究的成果.

**关键词** 微细加工, 深度 X 射线刻蚀, 三维立体加工, 应用

\* 1995年7月3日收到.

## 1 前言

近20年,各种用于进行微细加工和微细制作的有效工具和技术得以发展和创造出来.如单晶硅的湿法化学取向腐蚀、低压等离子体或离子束刻蚀,这些方法均源于微电子工艺,并已成功用于制作微机械和微光学元件.

随着科学技术的发展和进步,80年代中期,德国 Ehrfeld 教授及其同事<sup>[1]</sup>在 Karlsruhe 核研究中心创造的 LIGA 技术是一种全新的微细加工技术. 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.目前,它被认为是进行三维立体加工最有前途的加工方法之一.

## 2 LIGA 技术基本原理

### 2.1 固定图形结构的制作原理

图1是其基本原理图<sup>[1-7]</sup>.它包括三个基本过程,即深度 X 射线光刻、电铸成型及塑料铸模.

(1) 深度 X 射线刻蚀:这一步是利用同步辐射 X 射线光刻,将掩模图形复制在几十微米或几百微米厚的光刻胶上,刻蚀出有较大高宽比的光刻胶图形,高宽比一般大于100.

(2) 电铸成型:这一工艺过程是将金属从电极上沉积在光刻胶图形的空隙里,直至金属填满整个光刻胶图形空隙为止.

(3) 注模复制:这一工艺是将去掉基板和光刻胶的金属模壳附上带注入孔的金属板,从注入孔向模腔注入塑料,然后脱模得到塑料模具.

经过以上三个工艺过程后,就制作出一个塑料模具,因此可以大量复制金属或非金属(如陶瓷)等材料的微结构元件.这三个工艺过程又可以相互独立,根据产品用材的需要,各工艺过程的产品也可以作为最终产品使用.

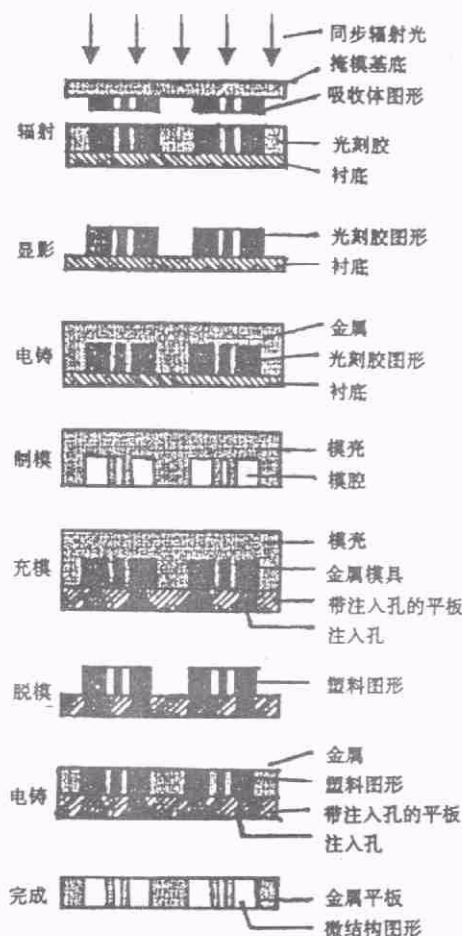


图1 LIGA 基本原理图

### 2.2 活动结构制作原理

除了采用分别制作各自活动的部件,然后组装为整机的方法外<sup>[9]</sup>,可以在上述的 LIGA 工艺过程中加入所谓的牺牲层 (sacrificial layer) 后,能够制造出部分或全部的活动部件,其制作原理图示于图2<sup>[6,8,9-10]</sup>.这一技术是在制作较大高宽比的图形之前,在衬底上沉积一层几微米厚的牺牲层材料,然后用光刻和湿法腐蚀得到活动部件的衬底图形,接下来的工艺和制作固定图形的 LIGA 工艺一样,只不过这时应调整 X 射线掩模的活动部件图形,使其对准牺牲层上活动部件的图形.在图形制作完成之后,再将牺牲层刻蚀除去,就能够得到完全或部分活动的部件,加入牺牲层技术后,大大开拓了 LIGA 产品的应用领域.这一技术在传感

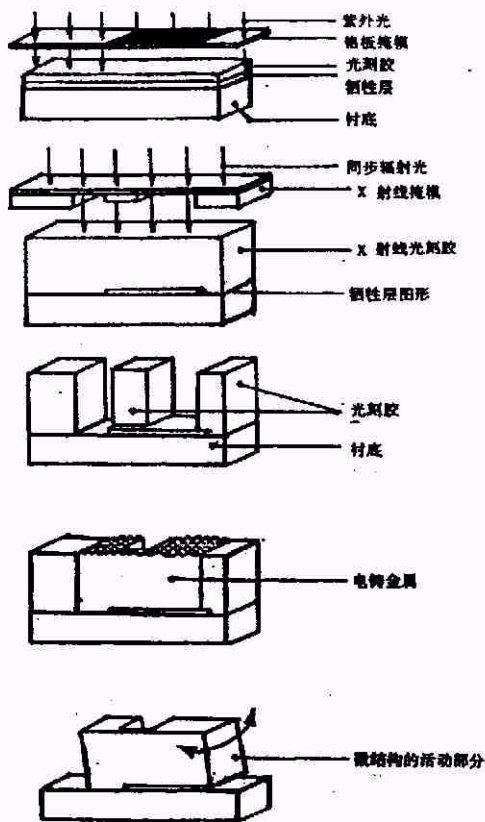


图2 活动部件的 LIGA 基本原理

器<sup>[9,10,12]</sup>和微电机<sup>[5,13]</sup>等器件制作方面能够发挥其优越性,特别是它能够较容易地制作出一部分固定而另一部分活动的器件(如加速度传感器)。

### 2.3 复杂的三维结构的制作原理

一般来讲,LIGA 技术制作的图形侧面垂直性和平行性均很好,而且图形具有相同的纵向高度,如果对上述的 LIGA 工艺进行修改,就能制作出不同高度尺寸的图形或侧面倾斜的图形,使之满足实际需要。

在制作不同高度的图形时,可以采用多次曝光的方法制作,第一次制作出第一层图形,电镀得出金属图形后,再涂第二层光刻胶,通过对准后,曝光得出第二层图形,再电镀得出第二层金属图形。图3(a)是其原理图<sup>[5]</sup>,图3(b)是实

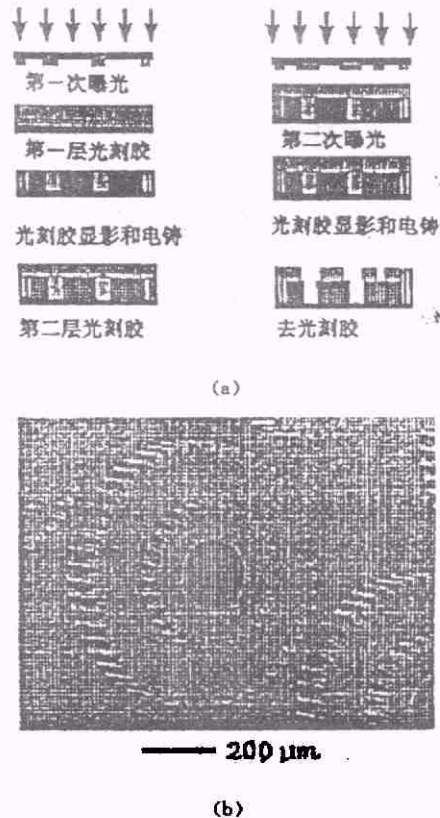


图3 不同纵向高度微细元件制作原理及实验结果

验结果<sup>[5]</sup>。在 LIGA 工艺过程中,通常保持同步辐射光和光刻胶垂直,因此得到侧壁垂直的图形。但是只要改变同步辐射光和光刻胶表面的夹角,使之不垂直,就能够得到侧壁倾斜的图形结构,以满足实际需要。图4(a)是其原理图<sup>[5]</sup>,图4(b)是同步辐射光和光刻胶表面夹角为 $20^\circ$ ,同时旋转样品而刻蚀出的十六棱图形<sup>[2]</sup>。

制作上述复杂三维立体图形时,要求 X 射线掩模的对准精度高,同时样品台应有倾斜和旋转等功能。

### 3 技术要求

为了得到理想的具有较大高宽比的超微细立体结构元件,需作深度 X 射线光刻。最终得到 X 射线光刻胶的图形质量依赖于 X 射线掩

物理

模图形精度、辐射过程的投影精度和光刻胶留膜率等因素,所以为了保证图形的质量,对掩模、光源等都有一定的要求。

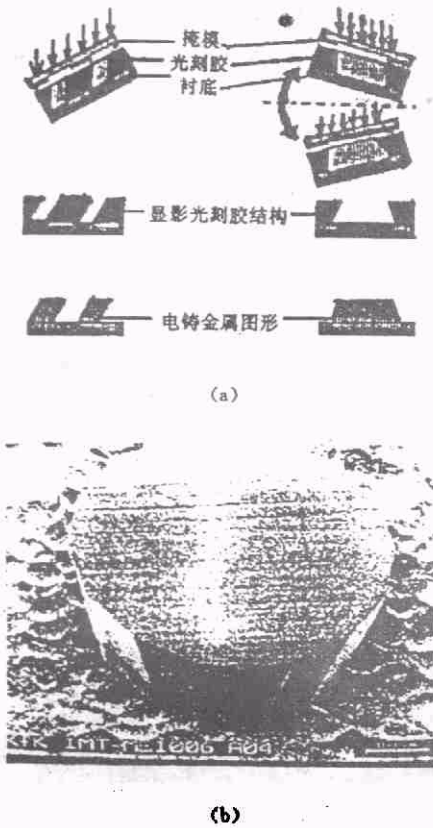


图4 倾斜侧壁元件制作原理及实验结果

(1) X 射线掩模:基底需用原子序数较小的轻元素制作,而且应有比较好的耐辐照能力和不易变形等性质。Be, C, Si, Ti 等无机材料和聚酰亚胺等有机材料均可以用于制作掩模基底。吸收体应采用原子序数较大的重元素制作。Au, Ta, W 等都是制作掩模吸收体的良好材料,而使用较广的是金。根据不同胶厚和不同的使用波长,其吸收体厚度要求5—10 $\mu\text{m}$ 。

(2) 光源:因为波长较长的 X 射线穿透能力弱,波长较短的 X 射线穿透能力强,而要刻蚀的光刻胶厚度在几十或几百微米,甚至上千微米,所以刻蚀时应使用波长较短的 X 射线,同时要想曝出比较好的光刻胶的图形,其上下层的曝光剂量之比应为  $D_1/D_2 = 6$ ,再考虑阴

影效应、Fresnel 电子和光电子对图形的质量影响,最理想的深度同步辐射光刻波长为0.2nm。

有关光刻胶的制作、电铸工艺和塑料铸模工艺中应注意的技术问题,可参阅文献[1,14]。

#### 4 LIGA 技术的优点

LIGA 技术和其他微细加工方法相比较,它有许多优点:

- (1)用材广泛,可以是金属、陶瓷、聚合物及玻璃。
- (2)可以加工任意复杂的图形结构。
- (3)可以制作有较大高宽比的微细元件。
- (4)加工精度高,可以达到亚微米。
- (5)由于采用了铸模复制技术,工业部门能批量复制生产,因此成本低。

#### 5 国内外 LIGA 技术微结构产品

德国、美国等已在实验室里研制出多种微结构元件或微机械,下面列举其中几种加以说明。

##### 5.1 微齿轮

在进行基础研究时,大部分实验室均以研究齿轮作为起步。现已可制作出齿形为渐开线的齿轮<sup>[2]</sup>,而且能够相互咬合。研究表明,LIGA 技术可以自由地进行二维设计,并且精确度可达到亚微米,所以在设计时能够进行计算机优化,使之满足我们对图形结构的需要。

##### 5.2 加速度传感器

德国已在实验室里制作出电容式加速度传感器,如图5所示<sup>[9,10]</sup>。振动块连接在悬杆上,它可以在两个固定的电极间运动,其中振动块与电极间所形成的电容器的电容随加速度变化而变化,在制作过程中采用了上述的牺牲层技术。还可以通过优化改善静止时的电容和温度系数。用 LIGA 技术制作加速度传感器时可同时集成控制系统的电路,因此完全可以使其微型化。



图5 LIGA 技术制作的加速度传感器

### 5.3 集成光学和微光学元件

图6是用 LIGA 技术制作光纤夹<sup>[12]</sup>,用 LIGA 技术制作的光纤夹最大的优点在于可以使衬底上的对准结构的热膨胀系数因子和光纤夹保持一致,从而可以减少热膨胀对对准精度的影响,提高耦合效率.如一排可以连接24根光纤的光纤夹,其周期为 $400\mu\text{m}$ ,最大误差为 $0.3\mu\text{m}$ ,24根光纤的总误差为 $1-2\mu\text{m}$ .在德国,用 LIGA 技术制作的光纤夹已进入商业生产阶段.用 LIGA 技术还制作了多种微光学和集成光学元件(如波分复用仪<sup>[17,18]</sup>).

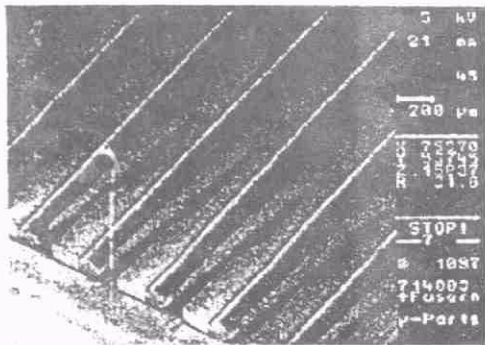


图6 LIGA 技术制作光纤夹

在数据传输系统多支光纤的网络中,需要用到多种无源器件,而其中的波导结构均可以用 LIGA 技术制作<sup>[22]</sup>.用 LIGA 技术制作的第一个简单的结构是 Y 型耦合器<sup>[22]</sup>.

另外,还有多种光学元件已可用 LIGA 技术制作出来,如三棱镜<sup>[21,22]</sup>、柱面镜<sup>[21]</sup>、分束器<sup>[21]</sup>、光开关<sup>[24]</sup>等.这些器件可以通过精心设计在衬底上一次制作成功,而且还可以将预对

准装置和微元件制作在一起,使光纤能够高度对准,从而减小损失.

### 5.4 微电机

德国和美国已在实验室里制作出微电机;制作出的微电机有静电型和电磁型两种.德国 Karlsruhe 研究中心制作出了静电式微电机<sup>[23]</sup>,其中转齿有56个齿,周期为 $30\mu\text{m}$ ,轴为 $4.8\mu\text{m}$ ,转子直径为 $267\mu\text{m}$ .

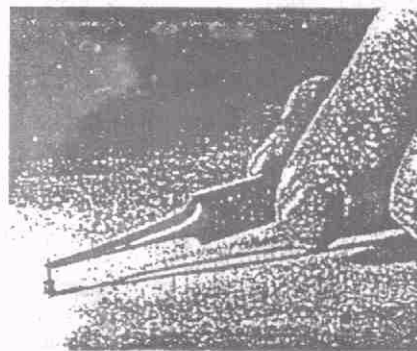
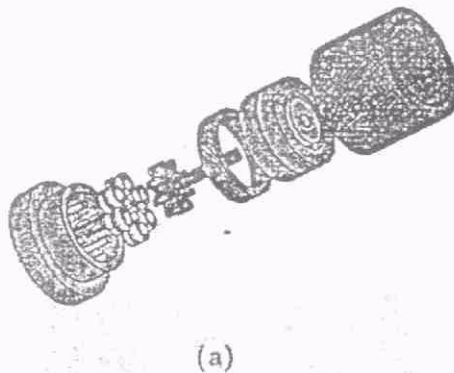


图7 德国 IMM 制作的电磁式电机

Wisconsin 大学制作出了电磁马达,六个电极中两个相对的电极的线圈相连,组成每一相的定子线圈<sup>[13]</sup>.此微电机在空气中转动时,转速可达到 $33000\text{rpm}$ .图7(a)是德国 Maniz 微技术研究所(IMM)制作的微电机零部件的结构,其中定子和转子是用 LIGA 技术制作的,图7(b)是其组装后的实物图.

除了上述用 LIGA 技术制作的微结构或微物理

机械外,还制作出了多种其他的微结构或微机械,在此不一一举例.总之,实验已经证明,LIGA 技术是制作微结构和微机械的成功方法.

国内 LIGA 技术的研究工作尚处于起步阶段,目前中国科学技术大学国家同步辐射实验室和中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室等单位正在进行这方面的研究工作.

### 参 考 文 献

- [1] E. W. Becker, E. Ehrfeld et al., *Microelectroc. Eng.*, 4(1986), 35.
- [2] A. Ronger, J. Echert, D. Munchmeyer et al., *J. Micromech. Microeng.*, 2(1992), 133.
- [3] W. Ehrfeld, P. Bley, F. Gots et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, B6-1(1988), 178.
- [4] W. Ehrfeld and D. Munchmeyer, *Nucl. Instrum. and meth. in Phy. Res.*, A303(1991), 523.
- [5] H. Leher, W. Ehrfeld, Proc. of the European Symposium on Frontier in Science and Technology with Synchrotron Radiation, Aix-en-Provence, France, April 5—8, 1994.
- [6] D. Munchmeyer and J. Langen, *Rev. Sci. Instrum.*, 63(1992), 713.
- [7] H. Lehr, W. Ehrfeld, M. Schmidt et al., *J. Micromech. Microeng.*, 2(1992), 229.
- [8] B. Kowang, W. Bacher, P. Bley et al., Proc. of Micromech. Europe, Nov. 26—27, 1990, Berlin, Germany.
- [9] C. Burbaum, J. Mohr and P. Bley, *Sensors and Actuators A*, 25—27(1991), 559.
- [10] J. Mohr, C. Burbaum et al., Proc. of 1st Int. Conf. on Micro. Electro. Mechanical Systems, Sept. 10—13, 1990, Berlin, Germany.
- [11] P. Bley, J. Gottert, M. Harmening et al., 2nd Int. Conf. Micro. Electro. Opt. Mech. Systems and Components, Oct. 29—Nov. 1, 1991, Berlin.
- [12] A. Rogner, W. Ehrfeld, D. Munchmeyer et al., *J. Micromech. Microeng.*, 1(1991), 167.
- [13] H. Guckel, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phy. Res.*, B79(1991), 247.
- [14] H. Lehr, W. Ehrfeld, The 6th Chinese International Summer School of Physics Application of Synchrotron Radiation, Beijing, July, 1992.
- [15] W. Ehrfeld, *Microsystem Technologies '90*, ed. H. Reichl, Berlin, Springer, pp. 521—528.
- [16] J. Mohr, B. Anderer and W. Ehrfeld, *Sensors and Actuators A*, 25—27(1991), 571.
- [17] D. Munchmeyer and W. Ehrfeld, *SPIE*, 803(1987), 72.
- [18] A. Rogner and W. Ehrfeld, *SPIE-Proc.*, 1506(1991), 80.
- [19] J. Cottert and J. Mohr, *SPIE-Proc.*, 1506(1991), 170.
- [20] A. Robner, Proc. Plastic Optical Fibers and Applications Conf., Paris, (1992).
- [21] K.-H. Brenner, M. Kufner, S. Kufner et al., *Appl. Optics*, 32(1993), 6464.
- [22] A. Muller, J. Gottert and J. Moht, *J. Micromech. Microeng.*, 3(1993), 158.
- [23] U. Wallrabe, P. Bley, B. Krevet et al., *Micro. Electro. Mechanical Systems '92*, Feb. 4—7, 1992, Trave-munde, Germany.

## 合肥国家同步辐射实验室同步辐射光刻研究\*

胡 一 贯

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室,合肥 230026)

**摘 要** 同步辐射光刻技术是 X 射线光刻技术的重要发展,适用于深亚微米乃至纳米级图形的超微细加工,特别是 LIGA 技术的出现大大拓展了同步辐射光刻的应用领域,使它不仅适合于超大规模集成电路等平面微结构的加工,也适合于具有复杂构造的三维立体结构和器件的制作.文章简要介绍了 NSRL 光刻光束线和实验站概况及研究工作进展.

\* 1995年6月28日收到.