

# 在同步光源上兴起的一个高技术产业

梁 渝 生

(上海原子核所 201800)

## 一、从芯片光刻说起

本世纪八、九十年代以来,计算机的迅速发展带动了科技、工业、通讯和陆海空交通、航天、医疗卫生、能源环保、广电文化和经济、国防各行各业的发展,这一惊人发展引起的信息革命冲击着社会的各个领域.计算机的发展既代表国家现代化水平又与人民生活息息相关,其发展的关键是作为计算机硬件核心的大规模集成电路的生产所用的光刻技术的长足进步.纵观20世纪的各种新科技,其中影响人类进步的最重要的一种可算计算机芯片光刻的超大规模集成技术,在此世纪转折时期,光刻这种飞快发展的微电子技术本身也正在经历着一场变革.

各种集成电路 IC 芯片的制作过程,依赖一系列微细加工技术:采用照像复印的方法,将光刻掩模的微细图形精确地复印到涂在待刻蚀材料( $\text{SiO}_2$ , 多晶Si,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al, Au等薄层)表面的光刻胶上面,在光刻胶的保护下对待刻蚀材料进行选择刻蚀,从而将光刻胶上的图形转移到待刻蚀材料上.其中第一步微细光刻技术是微电子技术的核心,它的刻线宽度和间距决定了集成电路的尺寸,微细光刻技术的改进更促进着集成电路尺寸的进一步缩小,从而使集成度不断提高.近年来微电子技术的每一次突破,几乎都是以微细光刻技术为突破口,并以此命名,例如 $2\mu\text{m}$ 技术, $1.2\mu\text{m}$ 技术, $1.0\mu\text{m}$ 技术, $0.8\mu\text{m}$ 技术,每一次微细光刻工艺技术上的突破又带来了新一代大规模集成电路产品的诞生.拿现在通用的微型计算机的CPU芯片来讲,286芯片用到 $3-5\mu\text{m}$ 光刻,486和586就用到 $2-0.8\mu\text{m}$ 技术,而Pentium II已用到 $0.35\mu\text{m}$ 技术.

目前制备芯片的工艺条件主要是采用可见

光或紫外光光刻技术,它们受到衍射极限的限制,紫外光刻线宽度不低于 $0.2\mu\text{m}$ ,即使采用了移相掩模等一系列新措施,线宽不可能小到 $0.1\mu\text{m}$ .光刻工艺的生命线是缩小光刻的线度以提高单位面积的集成度,这样才能使芯片尺寸越来越微小,而功能却越来越强且全,为了使芯片上的线路更密集更复杂,就必须使芯片上的线条以及线条之间的空隙做得更细(例如 $0.3\mu\text{m}$ 以下,甚至小于 $0.1\mu\text{m}$ ),为此势必采用波长更短的(例如X光)光刻系统.

这里要提到X射线光源的重大进展.1895年伦琴在做阴极射线实验时发现了X射线,由于X射线有很强的贯穿力,一百年来它被广泛用于医学和工业的透视检测技术,成了一门影响深远的现代产业,记录所成像的方法如荧光屏、照相底片的感光乳胶层以及各种新技术也有了很大发展.随着现代同步回旋加速器的建立,利用高能电子的韧致辐射产生“同步辐射”X射线的技术在近20年来得到了飞速的发展,目前世界各国正在建设的已是第三代的“同步辐射储存环”加速器,它能发射极宽广频谱的、功率强大的、方向准直性极好的(主要是X)光束.

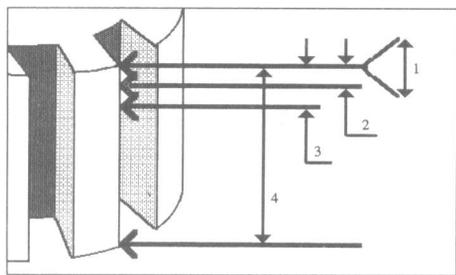
目前,先进各国都在利用同步软X光源(常用波段 $\lambda = 4-25\text{\AA}$ ,相应X光子能量 $e = 0.5-3\text{keV}$ )极力发展高精度的光刻技术, $0.1\mu\text{m}$ 光刻批量生产线可在本世纪末实现.另一方面,传统光源多只能光刻 $\phi 1$ ”内外的Si基片,它能包含的集成电路IC单元数已不能满足需求,在同步光源的光束线上对 $\phi 5-6$ ”以上的光刻胶(基片)实现大面积均匀曝光是方便的,从而有利于大大提高光刻生产的效率,降低了其成本.

所以同步辐射X光光刻技术的研究和发展

工作受到许多国家政府的高度重视,除在通用同步辐射装置上进行研究之外,还积极探索建立用于规模生产的专用化和小型化的同步辐射光源.今天一个十分重要的趋向,集成芯片最发达的国家(微电子垄断集团)正在加紧投资建立公司独用于同步辐射X光光刻微电子技术研究发展的专用储存环或光束线站,日本已有十几个同步光源,美国也有好几个同步光源(包括第三代)的多条光束线专门为微电子光刻进行有关的应用和基础研究.

## 二、LIGA 微机械应运而生

新世纪即将来临,工业、通讯、医学各领域的最新发展,对所用的工具、仪器、器件和工艺提出了向微小型发展的迫切要求,继集成电路芯片微电子学带动计算机取得巨大成功后,又一具有重要发展前景的高科技工业已开始露头,这就是光刻微机械元件,近十多年来涌现出各种各样的大小尺寸在微米量级的微机械装置.但目前已经制成的微机械部件大都是用表面(“二维”)微机械工艺制造的,即用常规的光刻工艺加上薄膜沉积或刻蚀完成的,这种工艺制得的厚度只有十几个微米,产品脆弱不大实用,人们正在追求深层光刻的新工艺以获得厚



不同厚度量级的齿轮——从平面图形(二维)到立体结构(三维)的三步光刻掩模厚度比较:

1. 预置掩模,图形厚度 $\sim 0.1$ 微米,用掩模图形机来制备;
2. 中间掩模,吸收体厚度 $\sim 1$ 微米,类似计算机芯片光刻术,用激光光刻机制;
3. 高反差掩模,吸收体厚度 $\sim 10$ 微米,用B束线同步软X光光刻制备;
4. 深度光刻胶三维机械,厚度 $\sim 1$ 毫米到1厘米,A束线同步较硬X光光刻.

图1用同步X光深度光刻高精度微器件(齿轮、马达、传感器、执行器、显微外科手术工具、微喷嘴、波带板、光通讯滤波器、接插件、微型质谱计等),具有高精度和坚固的特征.

度达 $1000\mu\text{m}$ 的较坚固耐用的三维微结构产品,以具有真正实用价值.于是,LIGA这种用同步较硬X光波段作光刻来加工三维立体微细结构的新技术就应运而生于80年代中期的德国Karlsruhe核研究所在同步光源上的开发研究.由于同步辐射光源具有高度的准直性(平行性),很强的辐射功率以及合适的波长( $2-4\text{\AA}$ ),因而可获得比普通软X光( $4-25\text{\AA}$ )光刻(最深不过数十微米)深得多、达毫米量级的穿透深度,对样品的加工才能不停留于表面而是真正深入到三维.可见图1的说明.

LIGA是德文Lithographie(光刻),Galvanoformung(电镀铸造),Abformung(塑料注模)三个词的词头简写拼成,这种新技术将同步辐射深层(达毫米量级)光刻、电铸成型、塑料注模复制三个工艺步骤巧妙结合起来,制造新型三维立体微细结构,得到了金属、塑料以及陶瓷等各种微机械产品,并可批量生产,从而形成工业性的生产规模,成本也大为降低.90年代以来,德、美、日、俄、法各国纷纷投入大量人力、物力和财力,已研制出齿轮、电机、蜗轮发动机、连杆、钳子、线圈、电连接器、滤波器、单色器、光纤连接器、滤网、喷嘴、泵、阀、质谱计、加速度传感器、传动器、磁头等多种微结构和元器件,其中不少已应用到实际仪器设备中.

这种全新的微器件加工方法的主要特长是:极高的“深宽比”( $\sim 100$ )、微结构厚度大( $\sim 1\text{mm}$ )、侧壁加工精度高( $\leq 1\mu\text{m}$ )、可以作套刻、应用面广、可将机电光多功能集成、而且有大规模生产的巨大潜力.1997年底报载美国新墨西哥州的桑迪亚国立实验室的同步光源用LIGA工艺研制成功世界上第一个毫微米机械传动装置,该实验室利用这一技术制造的微型动力装置虽然只有一个砂粒大小,却可以带动半公斤重的物体,恰如一句俗语:半两拨千斤!桑迪亚实验室的研究人员称,这一微型动力装置可望作为在病人体内进行手术的微型器械的理想动力.1999年1月7日报纸头版以200倍显微照片对比了一粒芝麻和体积只有它 $1/8$ 大小的由上海交大研制成的世界上最轻的(只

有 12.5 毫克)电磁型微马达,他们也利用了高能物理所的同步 X 光作了准 LIGA 研制,这种微马达最大转速可达每分钟 1.8 万转,输出力矩(推力)1.5 微牛顿米,其性能优越,被安装在直肠内窥镜作医学检查,提高了诊病准确率,减轻了损伤和病人的痛苦,功能通过了专家鉴定.这类微电机在航空航天、微型机器人、生物医疗等许多尖端技术领域用途广泛.

### 三、LIGA 技术特有的工艺过程

LIGA 这种方法是利用波长  $2-4\text{\AA}$ (对应 X 光子能量  $3-7\text{keV}$ )的高度准直的同步辐射较硬 X 光波段进行近毫米深度的光刻,利用套刻的技术和电铸的方法,得到真正的三维微结构.以下介绍 LIGA 的工艺“三部曲”:

1) X 光深度光刻:使用同步光源来的较硬 X 光,利用其良好的平行性,和极高的辐射光强,可将掩模上的图形转换到有几百  $\mu\text{m}$ (乃至毫米)厚的光刻胶上(光刻胶涂在有很好导电性能的金属膜上,这一金属膜衬底用作电镀的电极).图型转换是靠掩模上的图形吸收体(厚度  $\leq 20\mu\text{m}$ )将 X 光吸收掉,从而起到阻挡 X 光作用,以同掩模基底的高 X 光透过形成强烈的光强对比,在 X 光经过掩模基底所照射到的光刻胶部分,显影后就被溶解掉;而在掩模图形吸收体下面的光刻胶没有被照射到,显影后仍然存在,这样就得到了一个与掩模吸收体(如上述,厚十几微米)图形结构相同、而厚度却达几百微米(乃至毫米)、最小横向宽度可达 1 微米的三维立体胶质图形结构.整个光刻工艺都必须在双重超净室内进行.

2) 电铸:在显影后的光刻胶图形间隙中沉积填充金属,以制造出凹凸结构的金属图形.利用光刻胶下面的衬底金属层作电极进行电镀,用沉积的金属填充光刻胶形成的间隙,直到电镀的金属将光刻胶完全覆盖住,并有一定的厚度和强度.这样就形成了一个与光刻胶图形凹凸互补的稳定金属凸凹版图,然后将光刻胶及原来附着的衬底等材料除掉,从而完成了电铸过程,这样得到的沉积金属结构的图形(与原来光刻胶的图形相反),用作下一步塑铸所需金

属模具.电铸金属结构的材料大多用镍或其合金.电铸完成后,还需抛光.

3) 塑铸:是为了大批量生产电铸产品提供塑料铸模.首先须将上一步电铸过程制备成的塑铸模金属微结构上面再密封盖上一层特制的金属板称为注塑板,它上面分布着许多小孔分别对着塑铸模的凹槽称为注塑孔;注塑前将盖了注塑板的塑铸模抽真空,这样就可将注塑液通过注塑孔压注入到微结构腔内(模具内的微型腔体与较大的腔体相连通),然后加压(防止注塑体收缩)、硬化.由于在注塑孔上保留了注塑材料,使得硬化后的微结构能够固定在注塑板上,然后须脱模.由于 LIGA 技术生产出的微结构的横向尺寸极小( $\sim$ 微米)、纵向尺寸却很高( $\sim$ 毫米),要用塑铸工艺来复制出所需的塑料结构,脱模会是一项困难的工作吗?塑铸脱模的前提条件是,这种微结构侧壁有非常好的平行性,和非常光滑的表面,这只有采用同步辐射,其配套光刻工艺当然有许多讲究.塑注材料用甲基丙烯酸甲酯,再加一些脱塑剂,使塑

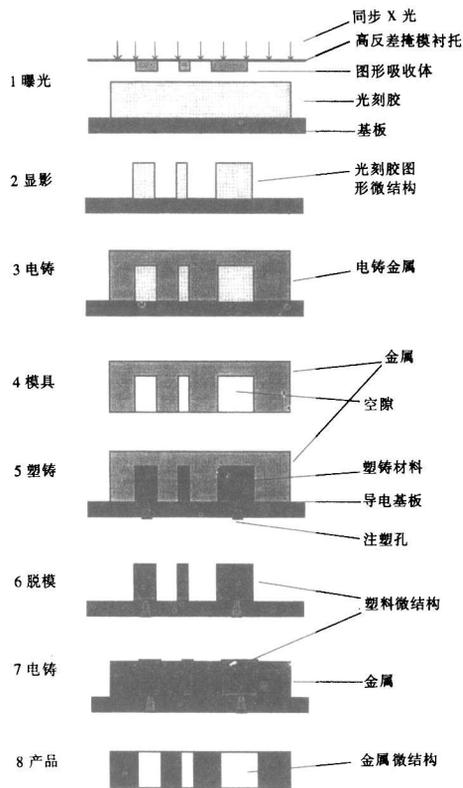


图2 LIGA工艺流程

铸体与塑注模容易脱离。脱模后的塑铸体仍附在原来的注塑板上,用这一注塑板作电极,在塑料微结构的间隙中电铸金属,这样就得到金属器件,大批量生产电铸微结构产品;也可将注塑板上的塑铸微结构剪下,从而加工出所要的塑料微器件。

LIGA 工艺过程示于图 2。

在一个现代化的同步光源上,可以引出几十上百条光束线,每根光束线都(采用 X 光学手段)对输出光的立体角、光谱段窗口、光通量等参数加以确定,以满足它后面的实验站的具体需求。从上面分析可见,LIGA 需用较硬 X 光束(波长  $2\text{--}4\text{\AA}$ ,对应 X 光子能量  $3\text{--}7\text{keV}$ ),来作高“深宽比”的光刻(光刻胶  $\sim 500$  微米),所用光束线可称为 A 束线;而作微电子等的 X 光刻需求的深度要小一、二个数量级,不可用 A 束线,这需要用软 X 光束(常用波段  $\lambda = 4\text{--}25\text{\AA}$ ,相应 X 光子能量  $\varepsilon = 0.5\text{--}3\text{keV}$ ),它的目标主要在于光刻线的精度要好,例如  $0.2$  微米,所用光束线称为 B 束线;这两种光束线采用了不同的 X 光学元件,给出不同的 X 光束,以进行表层的(B 线)和深层的(A 线)光刻,在一个现代同步光源上往往可开出多条这类光刻束线,以满足多家用户的需求。由于光刻束线末端的光刻实验站必须包围在双重超净室内,有关设备昂贵,所以光刻束线多并列在靠近区域,形成同步光源实验大厅的一角,以共用超净室,当然每个光刻站的“掩模-光刻胶”组件的对光设备是有不同的。

由图 1 可见,作深度光刻的 LIGA 工艺采用较硬 X 光(A 束线)曝光,其所用掩模的图形吸收体较厚  $\sim 10\text{--}20$  微米,称为高反差掩模,这种掩模难以用其他方法制造,正好可用同步辐射中的软 X 光波段(B 束线)来光刻制备。就是说,用(B 束线)软 X 光线站光刻制备高反差 X 光掩模,以配合(A 束线)LIGA 线站较硬 X 光深度光刻微机械零件。

B 束线的软 X 光刻的第一步目的物高反差掩模(配合 A 束线做 LIGA 深度光刻),它的图形吸收体厚  $10\text{--}20\mu\text{m}$ ,这相对普通光刻的深度

( $\sim 1\mu\text{m}$  量级)而言属较深,当然远比不上 LIGA(A 束线)要求的  $500\mu\text{m}$  以上的深度,所以得分开两条光束线,为此目的(光刻制备高反差掩模吸收体),在起初阶段 B 束线 X 光刻的分辨率达到  $\sim 1\mu\text{m}$  量级已可着手工作。

B 束线 X 光刻需用的掩模称为中间掩模(因 B 束线光刻是作为整个 LIGA 深度光刻过程的一个中间环节),其图形吸收体厚  $\sim 1$  微米左右,需用普通光刻机制备。在用普通光刻机(常用激光紫外光源)制备(中间)掩模的光刻中,需用的是预置掩模(即为后面用同步光源的 B 束线和 A 束线的二步光刻作准备的光刻过程),图形吸收层很薄  $\sim 0.1$  微米,现有各种商售高级掩模制备机产品,多配备了复杂的计算机软件来加工修饰预置掩模吸收体的图形。

#### 四、在同步光源上形成 21 世纪的一个高新技术产业

1. 计算机行业有极广阔的市场前景和丰厚的商业利润,其发展方向是要在小面积芯片上用光刻蚀的方法集成更多(数量级倍增)的微电路使计算机更紧凑、功能更强,一句话,提高集成度,这就是国际垄断计算机生产商竞争的主要目标。当今世界上更新换代最快的龙头产品就是芯片这种光刻高科技的产物,它正以每三年换一代(上一个技术台阶),集成度提高四倍,相应功能提高四倍多,而其单位价格每三年降到  $1/4$ ,市场规模则每一代扩大三倍,这样指数式的高速度飞快发展,是任何其他产业和技术所无法比拟的,而这正代表着光刻工艺、特别是光刻精度,或称分辨率的改进速度。据不完全统计,1995 年前后微电子芯片在国际上的年盈利已近 800 亿美元,目前更大大超过此数。在世纪交替之际,现代世界正在进入信息社会,在千头万绪的变化中,光刻大规模集成电路工艺,不愧为科技和经济发展的火车头。

同步辐射以其独特的光强和高度的准直性而成为最理想的软 X 光刻辐照光源,随着集成电路的集成度越来越高,同步辐射 X 光光刻将逐步成为 IC 芯片主要的光刻手段。正由于同步光源在光刻 IC 芯片上的巨大潜力,国外已采

用超导技术制造小型专用同步存储环,专用于光刻 IC 的大规模生产:例如德国 BESSY 和 IMT 公司共同开发的小 COZY 光源,直径只有 2 米多,除了有 8 个光刻站外,还有好几个其他线站,占地才 30m<sup>2</sup>。又如:日本 NTT、松下和东芝共同开发了十个直径 5m 内外的小型环,而 IBM 公司的 ALF 光刻中心的 Helios 环直径只有 1 米多,这些同步环目前都忙于 X 射线光刻微电子的研究和开发。预计 1—2 年内商品化的专用于光刻的小型存储环将上市。

我国市场集成电路和各种计算机及元、部件多由国外厂、商占支配地位,我国民族电子工业还比不上像南韩那样去占领部分欧、美、日市场,我国目前与国际上差距仍在 15 年左右。不仅是集成电路,我国在磁性存储元器件等相关领域的发展上情况也类似。归根结底,微细加工技术,主要是光刻技术跟不上,成为发展的瓶颈,拖了整个科技和经济领域的后腿,这是牵涉到整个科技基础的大问题。1998 年国家已批准在上海建立一个第三代光源 SSRF(预研制阶段),这是在跨世纪时期由中央和地方集资共建的最大的大科学工程,其同步储存环电子能量达 3.5GeV,这将是一个世界级的科技中心,对多个领域的科技发挥带头作用。面对各国同步 X 光光刻蓬勃发展的今天,在考虑我国新一代同步光源线站建设时,不应忽略(软)X 光光刻工艺的发展,上海光源的光刻线站也将为国家微电子工业现代化作大贡献。

近年来美、日、德竞相开展用同步 X 光刻来开发 1—16GDRAM 芯片,据称这是 21 世纪初计算机行业占统治地位的芯片。预计在下一世纪这种高速发展会广泛地改变人们的生活方式,并对工业和社会结构产生重要影响,带来一场深刻的信息革命。美国 NSLS 和法国 LURE 等同步光源的光刻线站已报道了试验 50nm 光刻线技术的结果,其中既有用投影式成像的,也有用贴近式成像的,国外前列的同步 X 光刻技术正带头逐步实现从“微”电子学到“纳”电子学的过渡。

在进入新世纪后,随着我国综合国力的增

强,原有同步光源技术水平的提高,和新一代 SSRF 光源的建立,将光刻精度提高到 0.1 $\mu$ m 量级,突破精密光学仪器(包括曝光设备、和检测设备两方面)的衍射极限,并攻克 50nm 以下所谓“纳米光刻”工艺,将能为我国微电子工业赶超世界水平发挥龙头作用,并成为促进我国新的信息产业革命的重要举措。

2. 90 年代以来微机械部件(主要还是二维的,即“深宽比”不高的平面型,多数厚度不过几十微米)的市场估计每年已有 5 亿美元,到 2000 年潜在市场(其中 LIGA 份额已大增)估计可望超过数十亿美元。采用同步辐射 X 光光刻的 LIGA 技术在(三维立体的,即具有高的“深宽比”的,厚度近毫米量级的)微机械器件加工、集成光学和微传感器、传动器等领域已显示出强大的生命力。

90 年代许多国家的同步辐射光源上多建立 LIGA 实验线站,大力开展深度大于 500 $\mu$ m 的微结构的 LIGA 深度光刻技术研究,并与电铸、塑铸等技术结合,全面实现了制作侧壁陡直、表面平整的标准 LIGA 微部件的系统工艺。近年来 LIGA 工艺水平又有了很快提高,研制出二次和多次曝光套刻、牺牲层等技术,套刻用的对准设备也越来越准确,可制备的范围扩大到多种特殊结构的微部件,例如多层次的台阶结构、倾斜的侧壁结构、以及活动部件等越来越复杂,功能也越来越强,并研制出一些标准系列的单元微器件。

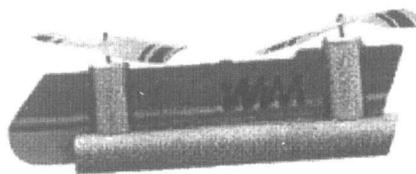


图 3 微型直升飞机在展览厅人群中飞了上去!这是全世界最轻型的直升飞机,它的机身长度只有 2.4 厘米,重 0.4 克,它的螺旋桨转速达每分钟 4 万转。

利用 LIGA 技术已经开发出多种微型探测器、微泵浦、微型光电元部件、微型马达、微型齿轮和为合成材料抽丝工艺用的高级微型喷嘴等新产品投放市场。国外 LIGA 工艺有迅速成熟

的势头,十年内可生产出商业产品,这是一个有着极为重要前景和广阔市场的新兴工业.科学家预言 20 年后 LIGA 技术形成的社会和经济效益其规模将相当于今天的微电子技术所产生的效益,它将对 21 世纪初的工业技术带来深远影响,我国绝对不能丧失把握它的时机.

我国已在现有的北京和合肥的同步辐射装置上进行了准 LIGA 的研究和探索,获得了几十微米深的微型齿轮等准三维结构的光刻图形.但是,对比国际先进水平,如果要得到毫米深度和微米线宽的微型器件,必需准直更好、亮度更高的第三代同步辐射光.将要建设的上海同步光源 SSRF 的波长范围和提供的光子功率密度是非常适合发展 LIGA 技术——光刻制备坚固实用的三维微型机械和微器件,上海光源的 LIGA 束线也将为新世纪的理想增添光彩.

3. 在微电子大规模集成技术的启发下,人们将微传感器、微处理器、微执行器等集成在一极小的体积内组成微型机电系统(MEMS),它一问世就在医疗、生物、精密仪器、环境保护、航空航天、通讯、军事等方面带来广阔的应用前景.这种微机电控制一体化系统,并进而集光机电于一身,能像光刻集成电路一样大批量、廉价生产.同步光源上的 X 射线光刻线站和 LIGA 线站(较硬 X 光深度光刻, A 束线)技术的实现,势必带来 21 世纪空前的产业革命,这就是世界各国竞相发展同步光源的主要背景.

在广谱高亮度的同步光源的光刻线站(B 束线)可用比 LIGA 的 A 束线较长波段的软 X 光束或极短的紫外光 EUV 光束,它的作用不同于 LIGA,又是对 LIGA 的必要互补:

第一,须为 LIGA 技术制备高反差掩模板:这可用  $2\mu\text{m}$  厚的钛基片镀上  $10\text{--}20\mu\text{m}$  的金(用作较硬 X 光曝光时的吸收体),先用预制的、吸收体厚约  $2\mu\text{m}$  的中间掩模,在此软 X 光(例如  $4\text{--}25\text{\AA}$ )光刻线站上曝光、刻蚀加工制成.

第二,把 LIGA 制成的微机械,在配有高精度套刻机的软 X 光刻线站(B 束线)上套刻微电子集成电路,这对于开发当今在多种复杂工作条件的应用中最有潜力的机电光一体化的微系

统(MEMS),将成为主要途径.为达此阶段目标,当时 B 束线光刻分辨率应达到亚半微米,即  $\leq 0.5\mu\text{m}$ .

在微电子技术基础上,将传感器、处理器、动力系统等微型化,构成功能与通常大型机电系统相同的这种微型机电系统,已在机械、光学、交通、通讯等领域迅速得到应用,逐渐发展成一门新兴的产业.例如为恶劣环境的工作现场提供(微型)机器人这一特殊设备,这种微型机电系统的开发关键取决于是否能够大规模和廉价地进行生产,同步光源的发展为此提供了广阔前景.

任何高新技术的成功,都是高新技术本身的积累成熟与市场或人的需求适时结合的结果,例如汽车安全气囊系统的成功就是如此.全世界每年死于车祸的人不少,目前还有上升趋势.因此采取安全措施亟待解决,而在汽车中安装安全气囊是一个很好的措施.在美国,到 1997 年所有汽车都必须安装安全气囊.汽车安全气囊发展至今的关键核心单元系统是微型加速度计,它是典型的 LIGA 微机械器件,再与测量、传输电讯号的微电子电路集成的产物.这种集成的单元系统与汽车安全气囊基础结构相结合后便形成一个很成功的有益于社会和人的微型机电系统.国际上正在用这种尖端技术来推出许多新一代产品,例如全球定位系统(GPS)微芯片、多参数环境监测器(TSMD)微仪器、数字微镜投影显示器(DMD)这种光处理微系统、乃至纳米卫星等,我国应该迎头赶上.在同步辐射光源上也将孕育并诞生我国的 LIGA 和 MEMS 产业.

