

同步辐射在医学和工业上的应用

唐鄂生

(中国科学院高能物理研究所)



同步辐射以其优异的光学特性，在材料的化学成分、结构相变的动态过程、电子的量子能态、原子的空间位置等基础研究方面发挥着巨大的作用。

除此之外，同步辐射在应用基础研究以及在工业界的开发应用等社会效益方面也已越来越为世界各国所重视。欧、美、日本等先进工业化国家的许多公司、企业界的领导人通过在现有同步辐射装置上的一些演示性实验，看到了同步辐射对工业应用的发展前景，他们有的在现有的同步辐射光源上投资建立专用光束线有的直接投资建立同步辐射专用环。例如美国的贝尔实验室、波音公司、埃克森研究与工程、通用商业公司(IBM)研究中心以及日本的电技术研究所、日本电报电话公司、住友重工等在同步辐射装置上都投入了可观的资金用以开发研究。本文仅从几个应用的侧面介绍同步辐射在医学、生物、制药工业、材料及微加工等方面的成绩及应用前景。

一、医学应用

同步辐射冠状动脉心血管造影术及计算机断层照相是同步辐射医学应用的典型例子。

1. 心血管造影术

心血管疾病如同癌症一样是目前威胁人类生命的最可怕疾病之一。心脏的跳动是由两根冠状动脉血管供应血液来维持的。如果冠状动脉出现病变，变得狭窄甚至闭锁时，心脏便会因为严重缺血而坏死，这就是心肌梗塞，它会夺去人的生命。冠状动脉病变的死亡率是非常高的，一个重要原因是缺乏高灵敏度的诊断手段。在临床上，只有当出现问题的血管达到80%的闭塞时，才会表现比较明显的症状（如心绞痛），这时去看医生为时已晚。使用X光对心血管造影是准确诊断的有效手段，其方法就是在

血管中注入造影剂，例如碘，它对X光有高的吸收系数，能使血管在荧光屏上明显地显示出来。人们通过照相就可以诊断血管是否有狭窄的部位。由于骨骼和肌肉对X-射线也有吸收，从而在底片上给造影部位造成背影。应用常规X光源，为了得到一个反差高，图象清晰的血管造影图，只有加大碘的浓度，例如用到370mg/c.c.。这样高浓度的碘会危害人体的健康，而且它必需通过导管，从动脉插入心脏，注入造影剂后，立即进行冠状动脉造影。手术相当复杂且有很大的危险性。例如，在操作过程中的机械刺激可

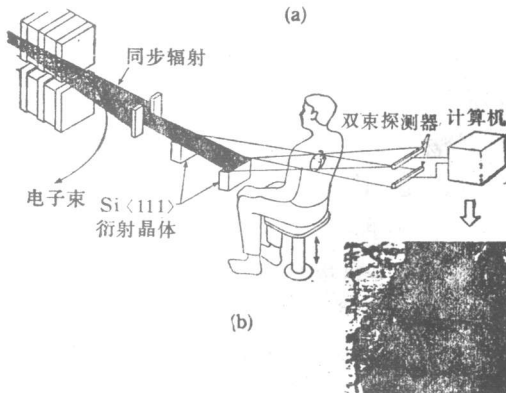
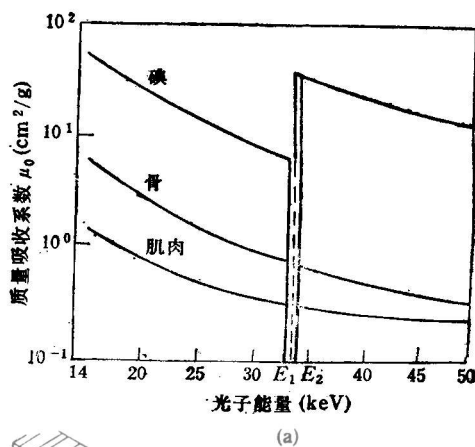


图1 同步辐射心血管造影术基本原理
(a) 碘、骨、肌肉的吸收系数 (b) 双色法心血管造影的设置

引起心搏骤停, 导管的摩擦可使附着在血管壁的动脉硬化斑脱落, 并被动脉血流冲走, 若硬化斑在脑循环中形成栓塞, 便会出现中风, 若在冠状动脉中栓塞便会引起心肌梗死。统计数字表明, 在冠状动脉造影检查过程中引起并发症的几率是 1%—4%, 引起死亡的几率是 0.1%—0.3%。利用同步辐射作冠状动脉血管造影则情况有很大改善。利用同步辐射波长连续可调的特点, 采用“双色数值减影的技术, 在较低的碘浓度(例如 20mg/c.c)条件下, 就可得到清晰的心血管图象(见图 1)。碘对 X 线的吸收系数在 $K_{\alpha}=33.16\text{keV}$ 处有一个大的改变 (K 吸收边)。设计一种专门的单色器, 调整同步辐射光的能量在碘 K 吸收边的上下各照一张相, 例如把同步辐射(SR)的能量调到 $33160 + 50\text{eV}$ 及 $33160 - 50\text{eV}$ 处各照一张图象, 在这样小的能区内, 肌肉和骨骼的吸收系数变化不大, 而碘的吸收变化剧烈。将这两张相片的图象用计算机数值化并相减, 就可以得到一张完全由碘的吸收贡献的照片, 也即是血管的图象。SR 双色造影法有以下几大优点:

(1) 注入碘液的浓度低, 因而可以从静脉注入, 从而避免了危险性很大的心导管手术。

(2) 双色减影法灵敏度高, 患者所受的辐射剂量小。

(3) 由于 SR 强度高, 只需在 ms 时间内就可以取得一张照片, 大大短于血管搏动的时间, 因而可以获得清晰的心血管造影。

心血管造影术最早从 80 年代开始在美国斯坦福同步辐射实验室(SSRL)开始研究, 92 年移到国家同步辐射光源(NSLS), 现已有多例门诊实践。欧洲的 ESRF 在总结了 NSLS 及汉堡同步辐射实验室经验的基础上设计了专门的光束线及实验探测系统, 正在建立心血管造影的立体成象系统, 预计 96 年投入运行。

2. 同步辐射微束 CT 的脑瘤诊断及治疗

100 年前即 1895 年伦琴发现了 X 射线, 并拍摄了世界上第一张 X 射线照片, 显示了人的手掌内部的骨骼形态, 开创了医学影象的新纪元。100 年后的今天, 由于超声波、核物理、计

算机、自动化技术的高度发展, 医学影象诊断技术已经有了巨大和广泛的发展。X 射线计算机断层扫描技术, 简称 X-CT, 便是其中重要的一项。

X-CT 的基本原理是由 X 射线发生器向诊断部位发射 X 射线, 位于 X 光源对侧的检测器接受透过检测部位后的 X 射线强度, X 射线的衰减系数反应了人体相应部位的吸收体密度总和。使光源和检测器围绕人体的检测部位进行线性及角度扫描, 即可得到该断层上各吸收率的数据矩阵, 经计算机运算处理即可重建断层吸收的立体图象。理想的 CT 术应该有良好的空间分辨率、好的对比度和较短的扫描时间。同步辐射微束 CT 正是在这三方面有很强的竞争力。同步辐射具有很高的准直性可将光束准直成 μm 量级的光束, 因而具有极好的空间分辨率。同步辐射微束 CT 采用平行束通过旋转和平移检测部位进行断层扫描, 这种方式比较适合于头部肿瘤疾病的诊断。在同等表面剂量的情况下, 同步辐射 CT 可以给出最佳的图象反差。CT 重建理论还假设投影数据与衰减系数沿投影方向的线积分成正比。在常规 X 光源应用中, X 射线具有连续的谱分布由于低能 X 射线比高能成分具有更大的吸收, 因此在 X 射线穿透样品时, 透射 X 射线谱会向高能方向移动, 从而表现出衰减系数 $\mu(x, y)$ 变小, 并影响图象重建的质量, 这就是 X 射线“硬化”。在同步辐射光束线上可设置专用的高分辨单色器, 可使“硬化”问题得到根本解决。利用同步辐射能谱连续扫描的特点还可以测定某一种特定元素的浓度在脑部的空间分布。其测量方法有两种, 一种是利用元素 K_{α} 吸收边减影术或是双光子吸收造影术。后者在 CT 扫描前先行注入一些高吸收系数的造影剂, 例如, 碘、镱等。由于肿瘤组织会吸收更多的造影剂, 因而可以把肿瘤部分明显突出出来。它能为肿瘤的空间分布及其病理研究提供重要信息。

微束辐射不仅可用于诊断而且可用于治疗, 这是一项最新发展起来的辐射治疗技术。放射疗法已发展多年, 成为一项比较成熟的技术,

它在癌症治疗中起着不可替代的积极作用。但在用常规的 γ 源作治疗辐照源时,存在两大缺点:一是常规的 γ 源有很大的侧向散度,使不该受到辐照的部位也同时受到 γ 辐照,造成不必要的损伤。当前发展的 γ 手术刀可以相对克服这方面的缺点,但它仍然存在着辐照剂量的深度分布无法控制的致命弱点。同步辐射微束治疗技术的特点主要有:(a)采用超硬X射线(50—150keV),并可通过调整光子能量来控制辐照深度和剂量,使不该受辐照的部位所受的剂量减到最小。(b)将X射线分割成多股平行的微束,例如单束宽 $50\mu\text{m}$,束线间隔 $100\text{—}200\mu\text{m}$,这种同步辐射的高辐射剂量率的微束可以杀死肿瘤细胞,而使辐射穿透的正常组织不受损害,其机理是因为微束在正常组织中产生的“破坏”可以通过未受射线辐照的部位的组织来“修复”,因而正常组织的坏死不会发展而肿瘤细胞因无自校正功能而被杀死。微束治疗技术是一种新概念,还需通过实践和理论逐步完善。

3. 攻克癌症

癌症的实质是什么?怎样才能攻克癌症,这是当前各国生物医学家努力研究的目标。细胞是构成生物结构和功能的基本单元,细胞核内含有的染色体是由DNA(脱氧核糖核酸)与蛋白质构成的。生物的遗传信息储存在DNA生物大分子中,DNA分子的双螺旋结构,保证了它的自我复制的机制。当前癌症的研究重点主要集中在决定人类细胞正常生长的基因上,其中之一叫ras基因。正常的ras基因掌握着“开关”信号的密码——其功能就是告诉细胞什么时候开始生长,什么时候停止生长和进行细胞分裂。但是当基因密码受到变异,变为ras肿瘤基因时,由它产生的肿瘤蛋白,不再能产生“关闭”细胞分裂的信号,从而使癌细胞无限止的生长分裂,这就引起肿瘤。SRX射线晶体学是目前研究人体复杂分子结构最有效的方法,科学家用X射线晶体衍射方法来比较正常的和变异的ras蛋白的形式,分析数据给出高精度的原子位置的信息。目前已经找到了细胞分裂中“开”和“关”的工作过程,并在原子水平上解

释了引起疾病的机制,因而也就不难找到修复的办法。例如,可以设计并合成药物分子来防治它。也许还可以通过基因工程,对DNA进行重新组合后,移入生命体,使它复制成正常细胞。人体细胞中大约有10万种蛋白,它们中的大部分都与疾病有关,ras蛋白只是其中的一种,它与人类的两种癌症,胰腺癌及结肠癌有关。由于DNA大分子的尺度很小,例如,其双螺旋结构中碱基平面的间隔仅3.4埃。螺旋直径:20埃,螺距:34埃,再加上扭曲、折叠8000—10000倍,因而基因是一个极其微小和复杂的三维空间结构。同时,要从细胞中提取DNA,是很困难的,不仅量少而且衍射信号弱,因此,必须要用高亮度的第三代SR光源和微束技术才能精确观测其结构。为了观测活体,还必须快速,否则生物体很快就会死去。这也必须用高亮度的同步辐射光源观测才有可能。

4. 促进医药工业快速发展

治病除了要有准确的诊断外,还必须施以有效的药物治疗,才能解除病痛,迅速恢复健康。医药工业的发展是关系到人类健康生存的重要产业。

目前市场上以及医院里开出的药物,其研制方法,主要是靠经验,通过大量模拟实验、动物以及临床试验后才能获准上市。为此医药师往往要从成千上万种化合物中寻找出1—2种有效成分,同时又得从上千种有效成分中找到一种可供临床试用的药品。这种传统的研制方法具有较大盲目性。通常研制一种安全有效的成药,开发周期一般至少10—12年,成本也是相当昂贵。例如一种口服的全身治疗用的合成药的研制成本有的可达2.3亿美元(1990年)。因此制药工业面临的主要问题就是寻找并开发出一种新的制药方法,以缩短研制周期降低成本。目前国外许多医药公司已从传统的广泛的药性实验方法,转向定向的药物化学结构的设计。这是一种基于分子间相互作用的设计方法。即新药的研究已不再是在细胞生物化学水平上,而已进入分子生物化学水平上进行研究。其基本设计方法是,科学家们首先找出影响疾

病的关键物质的分子三维结构,然后利用计算机去模拟并设计一种特定的药物分子,使它与靶分子(即致病分子)的活性部分相结合,从而达到抑制或改变致病分子活性的目的。这种方法如能获得成功,研制周期可缩短到4年,在世界上可获得1500亿美元的市场盈利。设计的药物分子与致病分子结合得越紧密,药效就越长久。并且一种好的药,应该只与靶分子相结合而与其他分子较少的结合,也就是使药物的侧向效应减到最小。

同步辐射X射线晶体学可以给出致病靶分子及其周围分子的结构,由此去设计药物抑制剂的分子结构。例如,以最常见的病毒感冒为例,通过同步辐射X射线晶体学的研究知道,感冒病毒KRVI4是通过与细胞表面的分子相结合而传染进去,而这结合的部位相当的小,它位于病毒表面“峡谷”的底部,药物设计师设计的药物分子与这些“峡谷”部位相结合,使健康细胞屏蔽起来,不受病毒的侵袭。又如,爱滋病是当今的不治之症,这是一种丧失免疫性的疾病,现在已经搞清楚引起爱滋病的病毒叫HIV,这种病毒粒子的准确装配和它们从细胞到细胞的传播是通过一种蛋白酶的作用来实现的,药物设计师用X射线晶体衍射数据,分析了HIV的结构,并设计出某种抑制蛋白酶生长的分子结构,将它置于HIV的周围,从而达到抑制HIV和控制AIDS病的目的。

二、材料及微机电工业

1. 材料科学: 高性能高分子聚合物及陶瓷材料的开发

金属、陶瓷、高分子聚合物是现代工程材料的三大支柱。高分子聚合物包括塑料、橡胶、薄膜、纤维、胶粘剂和涂料等。从市场上看年产值超过5000亿美元。它有着极为广泛的应用,从食品包装、汽车、航空、运动器械等等无处不用。

(1) 高分子聚合物

它一般具有长链结构,每个分子好象一条长长的线,许多分子(分子量在几百到几万之间)纠集在一起,构成一团扯不开的线团。这就是高分子化合物具有高强度可作为结构材料使

用的根本原因。聚合物的制造商们正不断地进行试验以改进材料的性能,尤其是在工程热塑方面的性能,以满足各种不同领域的不同要求。以波音公司为例,如果将波音757飞机上的铝材料用(PEEK)树脂代替的话,可以节省30%的重量,造价也可以大大降低。这里要求的物理性质主要是强度、抗冲击性、在高温高负载条件下的稳定性等。材料还必须有很强的抗腐蚀性及可塑注性。多年来的研究表明,这些材料的晶体结构与它们的强度之间有强烈的依赖关系。也即材料的晶化程度与固有的晶体结构决定了材料的物理性质。例如,由英国ICI公司发展的PEEK是一种无序的Oligmer,与许多材料一样,它只有以微晶形式才是有效的,而它的结构只能用粉末衍射来研究。但是由于它们对称性很低且晶胞单元很大,粉末衍射图形非常复杂,只有用高分辨、高亮度的同步辐射才有可能测出它的结构信息,这对理解材料的物理性质是极其重要的。高亮度SR光源提供了近边吸收结构显微术(XANES)的可能性,它可用以研究高分子聚合物中元素的化学价态以及聚合物成分的取向,例如甚至可以区分C—C, C=C, C≡C之间的不同。由于第三代光源的高亮度,这就有可能把X光斑聚得很小,能量分辨率提得很高,带宽取得很窄,而仍能在样品上获得足够的光强和合理的曝光时间,该技术还可以应用SR的线偏振性,来确定聚合物长链的取向。这对寻找性能优异的高分子聚合物是极端重要的。将空间分辨、能量分辨、偏振性能集于一体,充分发挥SR的综合优势,是第三代SR光源应用研究中的重要方向。

(2) 陶瓷

以ZrO₂为主要成分的陶瓷经常用于高温的机械装置,是一种很有发展前景的材料。英国的科学家应用同步辐射白光衍射快速能量色散法研究了ZrO₂粉末的合成。例如,将无序的Zr的氢氧化物加热到1000℃,然后有控制地冷却到室温。通过“灵敏”体积的膨胀而实现四方相向单斜晶相的转变。英国的Barnes等人用快速能量色散衍射法连续观测了从无序的

Zr 氢氧化物到四方相和单斜晶相的转换。动态的“在线”研究可以明确地知道晶化的起点，转换温度以及材料与加热、冷却以及材料的化学状态（例如 PH 值）的精确依赖关系。从而指导化学工程师如何设计进入 ZrO_2 粉末并满足其亚稳态的要求。

2. 信息科学——建造速度更快，容量更大的计算机

1946 年世界上出现了第一台电子数学计算机 ENIAC，它占地 150 平方米，重达 30 多吨，用了 18000 只电子管耗电几百 kW，而它的计算能力只相当于当今高档一点的计算器，这就是微电子技术和集成电路所创造的奇迹。1947 年 AT&T 的贝尔实验室制成了第一支晶体管，开始了晶体管代替电子管的时代。1958 年晶体管制造工艺经过了 10 年的发展出现了第一块集成电路，集成度大约在 100 个晶体管。但 36 年后的今天，由于微电子技术的发展，芯片上的集成元件已达到 10 万甚至百万以上。电子计算机已渗透到各行各业，从现代化通讯，航空航天，广播电视，医疗卫生，能源交通，自动化生产直至家庭生活等各个方面，成为一种既代表国家现代化水平又与人民生活息息相关的高新技术。显然计算机技术有着极为广阔的市场前景和丰厚的商业利润。那么什么是计算机技术进一步发展的方向呢？

(1) 进一步提高集成度

在小面积芯片上集成更多的线路使计算机更为紧凑是当前计算机生产商相互竞争的主要目标。它在国际上的盈利可达 800 亿美元/年。目前制备芯片的工艺主要是采用可见光或紫外光光刻技术，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 甚至 $0.1\mu\text{m}$ ），为此必须采用波长更短的光刻系统。同步辐射以其特有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。同步辐射光刻目前有两种主要趋向：一是接近式软 X 光刻（以 IBM 公司为代表），它将掩模上的图形直接转移到光刻胶上。X 波长通常取 $\sim 1\text{nm}$ ，线条宽度已能做到 0.1

μm ，它的主要难点在于掩模制备和高精度的对准技术等。另一发展方向是深紫外缩小投影光刻（以 AT&T 贝尔实验室为代表），它将掩模上的图形缩小 20 倍复制到光刻胶上。典型的辐照波长为 14nm ，目前也已达到 $0.1\mu\text{m}$ 的水平，并已演示了取 6.8nm 的辐照波长时，可达到 $0.075\mu\text{m}$ 的线宽。此外，当前也在发展深紫外（EUV）准分子激光光刻系统，但是 EUV 光刻系统对常规的光学系统不能发现的缺陷和疵点非常敏感，即 EUV 准分子激光光刻的成功与否在很大程度上决定于 EUV 激光光刻系统光学性能的可靠检测。例如，它包括测试反射光学效率、衍射特性、反射光学的曲率及光洁度等，而这些特性的检测也只能在同步辐射装置上才有可能，为此，美国 ALS 设置了专门的光束线进行这方面的实验。

(2) 增加磁盘信息量

为了使计算机能够储存更多的信息，具有更强的运算及智能，必需研制开发新型的磁性材料以增强信息容量。目前测到的最小数据位为 $1 \times 10\mu\text{m}$ ，以此估计，盘空间水平为 $23\text{MB}/\text{cm}^2$ 。工业界指出，今后 10 年内，盘空间的储存密度将扩大到 $1.5\text{GB}/\text{cm}^2$ ，提高 75 倍。其中最重要的关键是发展新型磁性材料，使数据位排列得更紧密，同时最为重要的是读出的磁头要有足够的灵敏度，才能读出压缩了的数码。因此新型磁性材料的选取与开发是一项重要的任务。同步辐射可提供高亮度的左旋和右旋的圆偏振光，它特别适合于研究磁性材料并对磁盘上的数据产生图象。例如，目前美国海军实验室 NRL 的科学家，正集中研究非对称的 TbFe 薄膜的结构及其磁化特性，它用于计算机中磁光储存器件。该材料的主要特点是它有固有的磁性不对称性，其磁化方向保持在垂直于薄膜平面的方向，因而可以有极高的储存密度。NRL 找到了这种磁性不对称性的原因，它是由材料结构的不对称性引起的。用偏振 XAFS 分别测量了 Fe 及 Tb 的近邻分布，发现了平行于以及垂直于薄膜平面的磁化方向的强度是不同的。经过减弱磁性不对称性的退火处理，真实地显

示出与结构不对称性之间的依赖关系。研究这种材料的结构与磁性之间的关系，将指导下一代高密度储存装置的开发。

3. 工业生产微机械

尺寸大小为微米量级的微机电装置，集光机电于一身，继集成电路块取得巨大成功后的又一具有重要发展前景的高科技工业。它将对 21 世纪的工业技术带来巨大影响力。如今微机械部件的市场估计已有 5 亿美元/年，到 2000 年潜在市场估计可望超过 80 亿美元。

现代的微机械加工是指宽度为几个到几十微米，高度为几十到几百微米（例如 $500\mu\text{m}$ ，甚至 $1000\mu\text{m}$ ）的机件加工。它们具有高宽比大的特点，并且同时具有光机电功能的潜力。目前已经制成的微机械部件大都是用表面微机械工艺制造的，即用常规的光刻工艺加上薄膜沉积或刻蚀完成的。但这种制备工艺，厚度只有十几个 μm ，产品比较脆弱不大实用。只有采用深层光刻的新工艺，才能获得厚度达 $1000\mu\text{m}$ 的三维结构产品，它坚固耐用具有实用价值。LIGA 技术最早开始于 80 年代，从德国卡尔斯鲁厄研究所发展起来，它包括深层光刻、电铸、塑铸三项工艺过程。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 埃），因而可以获得很深的穿透深度。通过电铸、塑铸过程可以制造出金属、塑料以及陶瓷等各种微机械产品并可批量生产，从而构成工业性的生产规模，成本也大为降低。

目前在欧洲、美国、日本等先进工业化国家

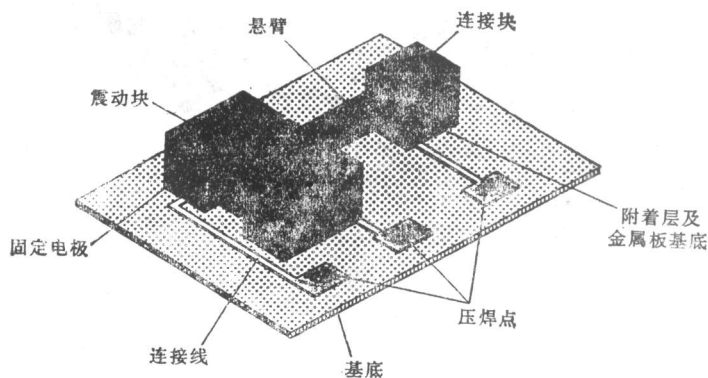


图 2 用同步辐射 LIGA 技术研制微结构加速度计

已建立有 LIGA 技术联合协作组，共同研究解决包括微机械性能的定量测试等在内的关键问题。LIGA 技术的典型产品有用于钟表、电视音响设备的多种微齿轮；用于测量心脏瓣膜压差或血液流速的流量计，用于高档集成电路块上的微型接插件（例如，130 极/cm），用于微光学通讯的光纤耦合接插件，以及微马达、微泵阀等。这里简要介绍三项已经取得成功并已投入试用的 LIGA 产品。

(1) 两维微加速度计系统：

微机械加速度计已经投入成批生产并进入试用阶段，例如，它主要用于汽车上，当发生撞车等交通事故时，加速度计给出信号，触发空气包，以产生缓冲确保人身安全，或在加速度过高时调整发动机性能使其安全行驶。其结构形式如图 2 所示，摆块长度 $3500\mu\text{m}$ ，电容间隙 $4\mu\text{m}$ ，灵敏度 250mV/g 。演示系统的大小包括电路在内为 $40 \times 60 \times 20\text{mm}^3$ 。

(2) 闪耀自聚焦反射光栅能谱仪

入射光通过光纤入射到光栅上，经衍射和反射，不同波长的光聚焦在相应的位置上，经出射光纤耦合或以光电二极管阵列读出。由于固定光纤的刻槽与光栅是同时一次用 LIGA 技术刻制出来的，因而不需要安装和调整，从而极大地降低造价，光栅的闪耀角也能进一步优化以达到最小的像差和最佳的闪耀效果。光谱范围从 400nm 到 1100nm ，能谱分辨率 $0.2\text{nm}/\mu\text{m}$ ，耦合效率达 20%。

(3) “硅片化工厂”

这是一种很薄的只有砂子粒那么大的直接刻蚀在硅片上的化学反应室。其厚度只有 0.5mm ，直径约 5.0mm ，整个系统包括一个很薄的超声泵，混合器以及电阻加热器等。该系统已成功地演示了 DNA 的复制，显示了快的反应速率及低的功耗。

LIGA 技术目前正从研究阶段逐步走向商业应用阶段。

三、NSLS 及 SRS 工业应用概况

1. NSLS 是美国典型的第二代同步辐射光源,它包括 0.8GeV 的 VUV 环及 2.5GeV 的 X-环它有 100 多条光束线及相应的实验站。

他们从 80 年代开始就发展 PRT (合作研究组)形式,将工业界和国家研究所及大学实验室结合起来共同发展专用的光束线及实验站。如今 25% 的光束线由工业界投资建造,有 70 家公司和 400 名工业科学家在 NSLS 从事科学研究,有 30 个公司与 BNL 签署合同出全资完成专门研究。他们研究的主要课题有:

(1) X 射线光刻

IBM 公司在 NSLS 建有 2 条光束线,一是用于发展技术并研究 X 光刻的实际极限,另一条是开发该技术用于大规模的工业生产。目前已能做到 0.1 μm ,已构成 MB 动态 RAM 及 0.6 μm 的 ROM 的能力。AT&T 贝尔实验室采用投影式缩小光刻技术,线条已做到 0.075 μm 。

(2) 微束 CT

要比常规 CT 技术分辨率提高 1000 倍,用以观测微米量级的不透明的非均匀物质的内部结构,如人体的关节、软骨、催化剂、陶瓷及神经细胞等。埃克森公司研究多孔砂石的内部通路,建立理论模型以考察石油开采中在多孔岩石中的流动。还与 IBM 合作研究积分电路芯片中陶瓷封装上联线的结构及缺陷。

(3) 光发射显微术

空间分辨率 0.5 μm ,通过电子能量分析给出元素及其化学价态。杜帮公司与北卡罗来纳大学合作研究,聚合物部件中空隙及搭接点与其成分及加工工艺之间的关系。

(4) EXAFS

由于严格的环境管理,石油及化学工业正面临着运行费用剧烈增加的挑战。他们正致力于研究在原料加工成精密产品的转换过程中,增加效率减少废物排放。例如埃克森公司正研究石油及煤等物质中的硫,在燃烧时可能引起污染并产生酸雨。他们研究硫的类型并跟踪液化及燃烧中的化学状态。埃克森, Mobil, Chevron 等公司合作研究催化剂系统,包括沸石金

属胶体以及由熔石英支撑的金属。实际上目前对许多实验及商业上用的催化剂的化学机制并不十分清楚,因而催化效率上的任何小的改进,对大规模的生产来说,都能获取巨大的经济效益。目前对掺入 AISi 结构中的过渡金属的结构研究很有兴趣,以期改进它们的化学性质。

(5) 半导体及通讯工业

AT&T 贝尔实验室与贝尔考合作研究了一种掺 Er 光纤,它在 1.55 μm 远程通讯窗口中可用作光纤放大器,这是具有很大吸引力的新技术。AT&T 贝尔实验组用 XAFS 方法观察了在不同品级 Si 中 Er 的荧光强度,这一信息对推动生产光纤装置有决定性意义。或者说这对光纤通讯以及光子计算机迈出了革命性的第一步。

2. 英国 Daresbury 实验室的 SRS

SRS 是 2GeV 的专用同步辐射光源,自 1980 年起投入运行,当时就引起了工业界的兴趣。最早投入应用的有壳牌石油公司及英国汽油公司。到 1989 年工业界与 Daresbury 研究服务部建立了固定的联系,并扩大了工业用户,如 Glaxo 及 Unilever 等。从 1991.1—1993.2 期间,SRS 运行了 16 个月。按工业用户的研究内容大致可以分为如下几种类型:

通用化学	汽油化学	医药工业	食品/农业
42%	21%	4%	1%
微机械	玻璃/光学	科学研究(含合同)	
8%	1%	24%	

由此可见,化学及汽油化学,占了工业应用中的很大部分。而 24% 的科学研究主要指的是由工业界委托研究所或大学完成的研究项目,这些项目通常是在商业秘密条件下完成的。

按实验方法分类:

EXAFS	粉末衍射	蛋白晶体学	非晶衍射
43%	15%	11%	9%
X 散射	光刻		
10%	8%		

以上列出的几项工业及医药应用只是诸多应用中的极少部分。诸如催化、通用化学工业、汽油、高强度水泥的开发等已有大量研究成果。