

上海第三代同步辐射装置及其在微电子、微机械中的应用

Shanghai Third Generation Synchrotron Radiation Facility and Its Application in Microelectronics and Micromachine

谢常青

(中国科学院微电子中心三室, 工程师 北京 100010)

叶甜春

(中国科学院微电子中心, 研究员 北京 100029)

为了跟踪世界先进同步辐射装置的研究水平, 继北京第一代同步辐射装置和合肥第二代同步辐射装置相继建成后, 我国决定建造储存环运行能量为 3.5GeV 的上海第三代同步辐射装置(SSRF)。作为我国“九五”期间和“十五”前期最大的科学工程, SSRF 预计将于 2004 年建成投入使用, 其性能将居世界同类装置的第四位, 预计耗资 10 多亿人民币, 中央政府将承担预算的 2/3, 上海市政府则将承担预算的 1/3, 这样的投资方式对于我国大科学装置建设而言尚属首次。本着科学、客观、民主的精神, 从我国的实际情况出发, 经来自全国各大学、研究所的 100 多名专家的深入讨论论证, 初步决定将在 SSRF 上首批择优建设 7 个具有国际先进水平并具有一定显示度的实验站。为了促使我国集成电路光刻和微机械技术的发展, 微光刻、微机械实验站也名列其中。本文将介绍同步辐射装置的一些发展情况和它在先进集成电路光刻和微机械技术上的应用背景。

一、同步辐射装置

捷径。相反地, 若发展 LCD, 就会面临我国目前仍较为落后的半导体技术, 并面临着强有力的竞争对手, 且 LCD 本身的弱点也会限制它的进一步发展。优先着手发展 FED, 有可能使我们跻身于国际先进行列。

第三, 根据我国的国情, 中央政府和经济相对发达地区的政府对发展新型显示器件技术应给予足够的资金投入。国际上发达国家为了发展该项技术, 政府和企业都在作巨额投入。对我国来说, 一般企业的经济实力还不够雄厚。对这样投资数额较大、资金沉积时间较长又具有一定风险的项目主要应依靠政府的投入。

1895 年 11 月 8 日, 德国物理学家伦琴(W. C. Roentgen)发现了 X 射线, 由此他荣获了 1901 年的诺贝尔物理学奖。其后 50 多年里, 人们对 X 射线的产生机制进行了深入研究。1947 年, 美国纽约州 Schenectady 市通用电器公司的研究人员在一台 70MeV 的同步加速器上首次发现可见光范围内的强烈辐射, 即同步辐射。同步辐射是环型加速器中做循环运动的以接近光速速度运动的电子在经过辐射引出部件(可以是弯转磁铁或波荡器或扭摆器)时, 由于向心加速度的存在, 沿电子轨道切线方向发出的强烈电磁辐射。同步辐射具有高光强(其亮度可比普通实验室用的 60KW 转靶的 X 光亮度高 1 万倍以上)、高准直性、波谱宽而连续(可以覆盖从红外一直到硬 X 射线波段)、线偏振、亚纳秒级时间结构、高真空、高洁净环境等诸多优点, 是目前为止最理想的 X 射线光源。目前有近 50 座同步辐射装置运行于世界各地, 近万名来自物理、化学、材料、生物、医学、工业检测、微电子、微机械等各个领域的科学家在同步辐射装置上开展他们的研究与应用工作。有人称这是大科学装置与各种小科学完美

第四, 发展该项技术应走产学研相结合的道路。由于发展该技术最终目的在于实现新型显示器件的产业化。因此, 必须有实力雄厚的企业介入。同时, 又由于该项技术尚未成熟, 必须有专门的科技队伍攻关, 而我国相关企业在这方面的攻关力量不足, 在目前的条件下只能走产学研相结合的道路。

只有依靠自己的技术, 才能形成自己的新型显示器件产业。我们认为, 这一目标是可以达到的。如果我们选择的技术路线正确, 投资到位, 所采取的措施得力, 我们是有可能抢回落后 10 年的时间的。

(责任编辑 蔡德诚)

结合的一个典型例子。

同步辐射装置正在朝着高功率、小型化、低成本、高稳定性方向发展。目前为止,同步辐射装置已经经历了3代的发展,具体情况如下:

第一代同步辐射装置(如北京同步辐射装置)往往寄生在那些专为作高能物理研究而建造的储存环上,尽管如此,其高强度、从远红外到硬X射线的广谱等优良特性已经令人瞩目;第二代同步辐射装置(如合肥同步辐射装置)是专门为同步辐射应用而设计的,它将储存环结构进行了优化;第三代同步辐射装置(如即将建造的上海同步辐射装置)在第二代的基础上,同步辐射光源的发射度更小,插入件更多,亮度更高。

同步辐射X射线光源无论应用于集成电路光刻还是微机械,都有许多优点,主要表现在:(1)良好的平行性;(2)高辐射强度;(3)光谱连续,有利于降低菲涅尔衍射效应;(4)时间上准均匀辐射,有利于消除热形变;(5)高效率,对于一个 50×25 毫米像场的光刻时间仅为几秒,而微机械深光刻工艺时间也不过几分钟;(6)高穿透性,这对于微机械深光刻而言是至关重要的;(7)高真空、高洁净曝光环境,受外界干扰小。

严格说来,同步辐射光源的成本并没有人们想象的那么高,但是同步辐射光源最致命的问题是,一旦储存环出了毛病,储存环上所有的实验站都将不能工作,这无论对于微光刻产业还是微机械产业而言都是很难接受的。

二、同步辐射在集成电路微光刻中的应用

自从1958年第一块集成电路问世以来,近40年来集成电路技术取得了令人瞩目的发展。1965年,美国仙童半导体公司的戈登·摩尔发现一个芯片上所集成的元器件数量每3年增加4倍,这就是著名的摩尔定律。对于动态随机存储器(DRAM),从1969年英特尔研制出1K DRAM,到今天的256M DRAM成为主流产品,摩尔定律证实了它的正确性;对于微处理器,从1969年问世的4位10kHz处理器,到今天的450MHz奔腾II微处理器,摩尔定律也证实了它的正确性。

摩尔定律之确立,毫无疑问首先是因为集成电路微光刻技术的迅猛发展。光刻技术的作用是把集成电路设计者所设计的集成电路微图形转移到硅片上去,它的思路起源于印刷技术中的照相制版。光刻分辨率越高(即芯片上加工的元器件尺寸越小),不仅意味着一个芯片上所集成的元器件数量越多,芯片制造商所获得的利润越大,也意味着晶体管中电子运行的距离变得越小,电路功能提高。

可以说,高分辨率光刻技术是集成电路制造业中最重要的也是最困难的环节。摩尔定律是否会在未来10年中终结将取决于高分辨率光刻技术的发展状况。

高分辨率光刻技术不仅对集成电路来说是至关重要的,对于基础科学研究而言,它也是不可缺少的。对介观物理而言,只有制作出与一个现象的特征长度相对应的微细结构,才可能在一个全新的实验系统中观察到诸如量子干涉、量子传输等宏观世界中无法观察到的现象,而对这种现象的深入研究很有可能研制出实用的量子器件,从而有可能导致电子学的一场新革命。

近几十年来光刻技术的发展令人瞩目,10年前的286微机中的微处理器芯片采用的还是10微米光刻技术,含有75万个晶体管;今天的奔腾II微处理器芯片含有570万个晶体管,采用的是0.25微米光刻技术;预计新一代Merced(A-64)将含有750万个晶体管,将采用0.18微米光刻技术。目前0.18微米光刻技术基本成熟,正处于试生产阶段,据美国半导体工业协会预测将于2001年进入集成电路生产,而0.13微米光刻技术将于2004年进入集成电路生产,0.1微米光刻技术将于2007年进入集成电路生产。

光学光刻一直是集成电路光刻中的主流技术,但是目前看来光学光刻面临很大的技术困难,其最致命的问题是它必须遵守瑞利法则,即光刻分辨率 = 工艺因子 $\times$ 光波长/镜头数值孔径,而景深 = 工艺因子 $\times$ 光波长/镜头数值孔径的平方。要提高光刻分辨率,必须缩短光学光源波长和增大镜头数值孔径,实际上,近10年来集成电路工业中采用的光源波长从436纳米降至365纳米,再降至248纳米,预计不久将降至193纳米,镜头数值孔径从0.3提高到0.65。但是光学光源波长的缩短和镜头数值孔径的增大都不可避免地导致景深的急剧减小,这是光刻工艺所不能接受的。尽管目前还无法预测光学光刻的寿命,但是,光学光刻每前进一步都要付出巨大的代价,为此人们提出了X射线光刻技术并把它作为后光学光刻时代最重要的候选者。

那么,同步辐射X射线为什么能应用于集成电路光刻呢?这是因为它除了具备普通X射线的短波长、高分辨率、强穿透能力等优点外,还具有高强度、良好平行性、光谱连续可调等优点,利用它制作的芯片比光学光刻制作的芯片尺寸更小、速度更快。具体来说,同步辐射X射线光刻应用于集成电路制造有如下优点:(1)高分辨率,可达70纳米,这是光学光刻所无法比拟的;(2)曝光系统相当简单,不需要昂贵而精密的透镜,不存在透镜像差、形变、散热、装配等令光学光刻技术工作者头痛的问题,平行入射的X射线透过1:1式的X射线掩模直接

入射到光刻胶表面, 景深控制容易; (3) X 射线方向性好, 穿透环境中尘埃的能力强, 缺陷将不像光学光刻那样易被复印到硅片上, 可以大大地提高曝光质量、可靠性和成品率; (4) 特征尺寸控制能力强, 有利于小尺寸器件的加工; (5) 可以很方便地采用单层胶工艺, 并可以对胶的厚度进行精确的控制; (6) 曝光视场很大, 可达到 50×50 平方毫米, 可以大大减小光学光刻中引起的图形拼接误差; (7) 成本较低, 接近 248 纳米光学光刻的成本; (8) 生产效率非常高, 考虑到套刻对准时间, 200 毫米硅片的曝光效率每小时超过 20 片, 而且 1 台同步辐射 X 射线装置可以同时安置近 20 台 X 射线光刻机。

美国国际商用电器公司 (IBM)、日本电报电话公司 (NTT) 等许多著名国际公司多年来一直致力于 X 射线光刻技术的研究工作, 从而使 X 射线光刻中大部分技术问题都已经解决, 强大的 X 射线光刻支撑系统的建立条件也已经成熟。近几年来 X 射线光刻技术较为突出的进展有: 1996 年日本东芝公司与 NTT 联合研制了 4Gbit DRAM 测试器件, 美国摩托罗拉公司 (Motorola) 开发了全功能的 1Mbit 静态随机存储器 (SRAM); 1997 年 IBM 的 0.13 微米 X 射线光刻技术已经成熟; 1998 年 IBM 也试制了 4Gbit DRAM。

三、同步辐射在微机械中的应用

可以说, 微机械技术的发展是高分辨率光刻发展的必然结果。与采用高分辨率光刻制作的更快、更小的计算和信号处理元件相对应, 一个完整的机电系统的其它部件也必然需要朝微型化、集成化、多功能化的方向发展, 也就是说, 要求实现信号产生功能的各种敏感元器件和实现执行信号功能的各种执行机构也要求更快、更小。如果能够把敏感元器件、微处理器、执行机构、产生能源的机构、光学传输系统等部分集成于一个很小的几何空间内, 就形成了所谓的微机电系统 (MEMS)。比如美国德州仪器公司研制的以高分辨显示系统所使用的微机械芯片就拥有 4 万多个可移动的微小镜子, 而每个镜子的大小仅为 17 微米。尽管目前 MEMS 技术还远谈不上成熟, 但是 MEMS 目前的发展相当迅速, 正在成为一个新兴的产业。微机械部件的市场现在是每年大约 5 亿美元, 预计到 2000 年可望超过数十亿美元, 而微仪器也很有可能在不久的将来进入商业市场。可以预料, MEMS 将广泛应用于医疗诊断和治疗、航空航天、仪器制造、自动化、生物、国防等诸多领域, 将渗入到人们的工作、生活以及生产活动中去, 极大地提高我们的生活质量和改变生产方式。比如用于大脑皮层电刺激和电信号采集的脑电极阵列, 可以使医生动手术时的定位精度从

传统的厘米量级升到微米量级, 从而使外科医生精确地对病灶部位进行治疗, 大大降低手术风险; 又比如微型机电系统应用于卫星制造, 不仅可以使卫星重量大大降低 (卫星重量每减少 1 公斤可以节省火箭发射费用几十万美元), 而且可以使卫星研制周期缩短, 可靠性更高, 更适合于批量生产。

同步辐射在微机械中的主要应用是深层 X 射线光刻, 即 LIGA。LIGA 是德文 Lithografie Galvanoformung Abformung 的简称, 是在 1987 年由前西德卡尔斯鲁核中心的研究人员提出的, 主要包括深层光刻、电铸成形及铸塑 3 部分, 是 MEMS 制造中最关键的技术之一, 而深光刻则是 LIGA 工艺中最重要也是最困难的环节。集成电路生产中采用的常规硅平面加工技术只能用于二维图形的加工, 体硅微加工技术虽然也能加工三维微细结构, 但它仅限于硅材料。而 LIGA 则不同, 它不仅可以用来制作任意三维极高高宽比几何图形的, 结构高度可达几百微米至 1 毫米的, 侧壁陡峭、表面平整而横向尺寸仅为几微米的硅材料, 而且它还可以加工多种金属材料、玻璃、有机高分子材料、陶瓷等, 并且还可以进行大批量复制以降低生产成本, 是一种非常具有前途的微机械零件加工工艺。

常规光学深光刻遇到许多问题, 主要表现在较难获得高高宽比的微细图形。这主要是常规光学光源中的光子能量往往不足以渗透到深层光刻胶里面。而同步辐射 X 射线深光刻则不同, 由于它采用的 X 射线波长仅为 1~6 埃, 具有强穿透性, 并且同步辐射 X 射线的光强也很高, 故可以在短短几分钟内就轻而易举地获得侧壁陡峭的高高宽比微细图形。实际上, 目前为止同步辐射 X 射线深光刻获得的实验结果是最好的。

在微机械方面, 目前利用 LIGA 技术已经研制出微齿轮、微马达、微弹簧阀门、微射流器、微加速度传感器, 乃至更复杂的微型泵和各种致动器。在应用微机械、微仪器方面, 微质谱仪、医学用的微手术刀等仪器方面, 目前已经取得很大进展。

四、结 语

建造 SSRF 这样一个跨世纪的大科学工程对我国科技界来说是一个巨大的挑战, 是衡量我国当前科技实力的一个重要标志。建造 SSRF 的主要目的是将其应用到各个需要它的科学技术领域, 服务于各个需要它的科学技术领域。总之, 一流的 SSRF 需要一流的实验站, 一流的实验站需要作出一流的成果。SSRF 光刻、微机械实验站的建立将为我国在这两个领域的技术发展提供一个较好的机遇。但是必须清醒地看到, 无论对于同步辐射 X 射线光刻技术

(下转第 43 页)

累计规模很可能达到难以控制的程度,甚至有可能赶上有几百举债历史的西方发达国家,很有可能陷入恶性的循环。

3 “准国债”筹资无统一规划,对国家财政安全极为不利

“准国债”指政府部门、政府机构所发生的由政府来担保的债务,如行业主管部门、政府性银行发行的债券等。行业性经济组织,如铁道、煤炭、石油、石化等,它们发行的债券,实际上也属于“准国债”范畴。因为无论发生什么情况,这些行业都不能破产,一旦偿债出现困难,最终负担的还是国家财政。据粗略估算,目前“准国债”余额已达到5000多亿元,其中政策性银行金融债券余额2000多亿元,行业主管部门发行的企业债券余额3000亿元。若按这个口径来计算,早在1996年,政府债务余额占GDP的比重已达13.5%。另外,“准国债”的利率都高于同期的国债利率,这实际上是政府自己内部的竞争,大大增加了政府筹措资金的总成本。更重要的是,这容易使人们对政府的债务规模产生错觉,淡化了公众对国家债务的风险意识。

4 外债风险不容忽视

相对于国债来讲,我国的外债问题并不突出,这反映了我国在举借外债问题上比较审慎。1985~1998年是我国举借外债的高峰期,外债余额的年均增长速度超过了同期GDP增长速度18个百分点。“八五”期间,我国外债余额增幅回落到年均15.2%的水平,低于同期GDP增长速度和出口增长速度,这说明此间我国举借外债已进入了相对稳定的发展阶段。从衡量外债状况的各项指标来看,1996年偿债率、负债率、债务率分别为6.7%、14.3%、75.6%,均低于国际公认的安全线25%、20%、100%的水平。我国外债的期限结构也较合理,1996年长短期外债余额比为87.9:12.1。

目前,我国外债的主要风险是“外债的来源结构和外债的币种结构”。从来源结构看,成本较高的国际商业银行贷款仍占主导地位,约占近50%,筹资成本较高必然直接危及到偿债能力。我国外债的币种结构还较为单一,美元和日元占了绝大部分比重,汇率的细微变化都会对外债余额和外债还本付息产生重大影响。

我国要防范外债风险,首先要控制外债总量。根据外债规模与国民经济同步等速增长的预测,有

的学者测算2005年我国外债规模应控制在2400~2800亿美元之间。其次,从外债结构看,一些学者认为应增加欧元债务比重,降低日元债务比重,美元债务比重应提高至60~70%。在外债来源上,应努力降低国际商业银行的份额,并应更多采用发行国际债券的形式融资。这些都是应注意的建议。

四、基础财政信息严重失实

基础财政信息严重失实是危害国家财政安全的恶性问题,但多年来被一些管理部门所忽视;而信息失真,就无法进行科学的财政决策。

1 国企报表普遍弄虚作假

在我国,占GDP43%的国有经济承担着65%以上的财政收入,但国有企业报表普遍弄虚作假。据1998年审计部门的审计结果,当前国企弄虚作假,会计核算不实,记假帐和掩盖帐外资产,负债、损益不实等现象相当普遍,甚至十分严重。例如,审计署组织对23户国有大中型企业进行审计,发现资产不实数额占10.39%,负债不实占7.89%;企业财务报表反映的利润总额38.87亿元,竟有36.92亿元是虚报,而另有隐瞒利润20.53亿元未在报表中反映;呆帐、待处理财产损失和不良资产等形成的潜亏36.06亿元。对河北、内蒙、山东等7个省、自治区162户国有重点亏损企业财务收支进行审计发现,这些企业帐面反映亏损24.28亿元,审计核实为48.26亿元,查出少报23.98亿元,相当于帐面亏损的98.76%,此外还有潜亏31.8亿元。对石油石化行业56户企业财务收支进行审计发现,石化企业多报利润59.1亿元,石油企业少报利润20.66亿元,部分石化企业从事境外原油套期保值业务,损失达14.77亿元。

2 证券机构上报信息具有相当的虚假性

1998年,审计署组织对88家证券公司及所属79家分公司和1200多家证券交易营业部的1997年度资产、负债、损益情况进行审计,发现证券公司帐外经营、隐瞒利润、会计报表不实、挪用客户保证金、违规融资、利用他人名义自营股票业务、非法设立经营机构等问题也甚为普遍。这些问题都导致或说明证券机构上报信息具有相当的虚假性。

(责任编辑 王宏章)

(上接第38页)

还是对于LIGA技术而言,我国与世界先进发达国家的差距是较大的;而且由于这两个领域涉及的学科都非常多,需要机械、光电、真空、同步辐射、光刻等诸多领域的科技工作者紧密配合,刻苦攻关,才

能缩短我们与先进发达国家的差距,才能更好地服务于我国集成电路产业和微机械产业,从而更好地证明建造SSRF的必要性。(责任编辑 肖庆山)