

硅材料科学与工程现状及我国的对策

Present State of Silico — material Science & Engineering and China's Strategy

李玉增

(北京有色金属研究总院,高级工程师 北京 100088)

一、硅材料的发展趋势

为满足微电子和电力电子器件制造的需要,现代半导体硅材料产品已进入以优质大直径高精度加工硅片为主体的新阶段,这种高精密度、高洁净度和无尘防静电包装的抛光硅片,已达到可以直接进入集成电路生产线的水平。发展趋势主要有三个方面:

其一是研制和生产大直径直拉硅单晶(CZ—Si)的切磨抛光片,用作微电子集成电路或分立器件生产的芯片材料。目前日本、美国和德国等都在生产直径150~200毫米的精细抛光硅片,实验室中已能控制直径300~400毫米的CZ硅单晶。我国国家半导体材料工程研究中心也已拉制出直径150毫米的CZ硅单晶,已能生产75~100毫米的CZ硅单晶棒及其切磨抛光片,其电阻率均匀性、氧碳含量控制水平、缺陷密度等方面也与国外相同直径产品相当,但在硅片加工特别是超净清洗和无尘防静电包装方面,尚有明显差距。

其二是中子嬗变掺杂区熔硅单晶(NTDFZ—Si)棒及其切磨片广泛用作电力电子分立器件、组件和高压集成电路的芯片材料。日、美、德等国家,FZ硅单晶的生产水平已达到直径75~125毫米,实验室水平为直径150~200毫米,多为NTD—FZ硅单晶切磨片。我国FZ硅单晶生产是以直径50~65毫米以下者为主产品,虽然也有小批量直径75毫米棒及其切磨片供应,但其电阻率均匀性和缺陷密度水平等方面与国外相比差距较大。目前,我国已引进较大直径FZ单晶炉,直径100毫米FZ硅单晶及其加工片可望近期投产,供应国内市场。

其三是研制和生产薄层和厚层外延硅片,其中薄层外延硅片主要用作微电子集成电路芯片,而厚层外延硅片则主要用作电力电子器件、组件和高压

集成电路的芯片。日、美、德等国外延片的研制开发已经达到生产实用阶段。我国近年来硅材料专业厂和器件制造厂陆续引进硅外延炉,也有部分硅外延片投入生产。

全世界半导体硅单晶产量,按硅片折合约为4500~5000吨,日、美、德为硅片生产大国,特别是日本,其硅片产量约占世界总产量的一半。而我国硅材料总产量在50~60吨之间,仅占世界总产量的1.2%。值得注意的是,我国硅材料产量不高,国内市场更小,因为多数引进器件生产线和合资企业没有全面采用国产硅材料。

二、我国硅材料生产现状

1. 多晶硅生产能力萎缩、产量锐减、质量下降,与世界先进水平的差距逐渐拉大

世界多晶硅生产能力约每年9760吨。我国多晶硅生产能力仅为世界的1.1%,即每年100吨左右,见表1。我国多晶硅生产不能满足国内单晶硅生产的需要。

表1 90年代初世界多晶硅产能、产量比较

国家	企业名称	产能 (吨/年)	产量(吨)		备注
			1990	1991	
德国	瓦克化学电子公司	2400	1950	2000	
美国	赫姆洛克半导体公司	2000	1400	2000	
日本	德山曹达公司	1200	900	1100	
日本	高纯硅公司	1100	800	1050	
美国	先进硅材料公司	1000	960	900	
美国	埃西尔公司	1250	650	750	
意大利	HULS(MEMC)	400	400	400	
日本	大阪钛公司	360	350	350	《金属时评》注 其产能为600
日本	小松电子金属公司	50	30	20	《金属时评》注 其产能为150
国外	小计	9760	7410	8570	
中国	总量	92	55.9	69.6	

我国多晶硅产品质量曾一度与世界硅材料产业发达国家接近或相当,但近些年来由于技术进步缓慢,多晶硅产品的一级品率普遍下降,与世界先

进生产水平的差距明显拉大,特别是同国外电阻率的大幅度提高形成鲜明的反差,见表 2。

表 2 我国多晶硅质量与美日产品的比较

企业名称		N 型电阻度 (欧·厘米)	硼 (ppba)	磷 (ppba)	砷 (ppba)	碳 (ppba)	寿命 (微秒)	直径×长度 (毫米)	备注
中国		500~1000 一级品率 60% 以下				0.2 ~0.6	300 ~800	Φ40~60 Φmax~75 总长 1100	各企业产品电阻率相差 很大,≥300 欧·厘米 者为 30~85%
日本: 高纯硅公司	FZ 用硅棒	≥1000(保证)	≤0.03	≤0.15	≤0.10	≤0.40	≥200	Φ75±0.5×1000 Φ100±0.5×1000	弯曲度≤0.5 毫米
		≥1500(典型)	≤0.01	≤0.10	≤0.04	≤0.20	≥500	Φmax110×1200	
	CZ 用硅块	≥300(保证)	≤0.03	≤0.30	≤0.10	≤0.40	≥2000		
		≥1000(典型)	≤0.01	≤0.10	≤0.04	≤0.20	≥500		
美国: 先进硅材料 公司	超纯级 多晶硅	5000~30000+ (最大)	<0.025	<0.025	<0.010	<0.10			系用 SiH ₄ 超高频 热分解法生产的 多晶硅。
		>20000 (典型)	0.009	0.010	<0.002	0.10			
	标准级 多晶硅	>10000 (最大)	0.060	<0.140	<0.020	<0.20			
		2200(典型)	0.020	0.060	<0.005	0.12			

我国多晶硅生产企业,由于技术水平低、生产规模小,所以大都微利经营。硅材料专业生产厂,为了提高多晶硅自给率,不得不亏本生产多晶硅来满足单晶硅生产所必需的原料。

2. 我国生产的硅单晶直径较小、硅片产量偏低

我国半导体硅单晶材料生产受制于电子器件生产乃至整个电子工业发展,曾经历了徘徊和起落。90 年代初虽已恢复了增长势头,但与西方和日本的硅单晶产量相比,仍相当低,见表 3。

表 3 我国硅单晶产量与西方国家和日本的比较(吨)

年份	西方国家	日本	中国
1990	4,000	1,933	51.7
1991	4,300	2,130	53.7

1990 年,我国硅片总产量为 12 386 万平方厘米,仅为同年世界硅片需求量 111.28 亿平方厘米的 1.1%。我国硅单晶棒、片的市场规模约 7 000~8 000 万元,也只有同年世界硅片市场规模 18.83 亿美元的 0.8%,见表 4。

表 4 我国同美、日工业化国家硅片消费比较

直径 (毫米)	美国			日本			中国	
	片数 (百万)	面积 (百万平方厘米)	%	片数 (百万)	面积 (百万平方厘米)	%	面积 (百万平方厘米)	%
≤50							50.89	41.6
≤75	2.5	116.1	3.3				60.95	49.2
≤100	17.1	1386.75	38.9	14.2	1154.55	21.0	11.35	9.2
125	7.1	903	25.3	16.5	2089.8	37.9		
150	6.0	1096.5	30.7	12.1	2205.9	40.0		
200	0.2	64.5	1.8	0.17	58.05	1.1		
合计		3566.85			5508.3		123.19	

CZ 硅比 FZ 硅有明显的优势。CZ 硅单晶(特别是大直径单晶)拉制比较容易,生产成本低,其塑性极限却比 FZ 硅高(FZ 硅片在高温下强度变小,对热应力敏感性高于 CZ 硅片,位错的产生与增殖也

比 CZ 硅更容易),因而微电子集成电路的制造几乎全部采用 CZ 硅片。

在世界半导体市场中,集成电路与分立器件之比大约为 8:2。90 年代,集成电路的比重继续增

大,据日本通产省预测,到 1995 年集成电路与分立器件之比将达到 8.8 : 1.2,到 2000 年将为 9.1 : 0.9。然而,我国硅材料产品中,多年来 FZ 硅单晶约占硅材料总产量的 1/3,即 CZ 硅与 FZ 硅产量之比为 2 : 1,说明我国半导体集成电路产业一直未占据主导地位。1991 年国产集成电路仅占国内市场的 15%。

目前,我国已能控制 CZ 直径 75~100 毫米的 P 型<111>和<100>、直径 75 毫米 P 型掺硼、N 型<100>低缺陷密度、N 型<111>重掺锑或砷、N 型<100>重掺锑等规格的硅单晶。其电阻率均匀性、氧碳含量控制水平和缺陷密度等质量指标与国外相当,即相当于德国瓦克公司 80 年代中期水平。FZ 硅单晶均为中子嬗变掺杂材料,但其电阻率均匀性和漩涡缺陷水平同国外相比尚有一定差距。

在硅片加工方面,我国缺乏完整的工艺技术,至今不能摆脱繁琐的手工操作,并且尚未建立起规模生产线。特别是抛光硅片的表面质量,诸如平整度、雾缺陷和尘埃污染,以及真空包装等,远未达到国际硅工业发达国家那样抛光片可以直接进入器件生产线的水平。

3. 硅外延片的研制和生产有所进步,产能和产量稳步增长

外延生长的硅片材料是制造高质量器件所必须的芯片材料,近年来我国已能生产直径 50、75、100 毫米甚至更大的硅外延片,见表 5。

表 5 我国 1990~1991 年外延硅片产量及销售统计					
	直径(毫米)	1990 年		1991 年	
		产量(万平方厘米)	%	产量(万平方厘米)	%
产量	<50	221.88	13.4	202.53	11.6
	50	252.20	15.3	266.39	15.2
	64	39.99	2.4	49.67	2.8
	76	1137.78	68.9	1231.95	70.4
	合计	1651.85	100	1750.54	100
	比上年增长	11.9%		5.9%	
销售 (万元)	材料厂	347.3			
	器件厂	255.7			
	合计	603			

三、国内外硅材料科学(工程)研究与技术开发

80 年代中期以来,半导体硅材料领域的科学(工程)研究和技术开发有如下几方面的突破性进展。

1. 高质量、大直径硅单晶技术开发迅速发展,与之相应的单晶和多晶制备工艺均有重大突破

直径 150~200 毫米,甚至 250~300 毫米硅单晶棒和硅片切、磨、抛光设备和工艺均已投入或准备投入规模生产。实验室已经拉制出直径 400 毫米的硅单晶。

高质量、颗粒状多晶硅制备工艺已投入规模生产。1984 年美国联合碳化物公司(UCC)推出新硅烷法制备多晶硅的工艺,并于 1985 年建成并投产年产 1 200 吨多晶硅的新厂,1990 年设备转卖给日本小松电子金属公司。美国埃西尔(Ethyl)公司于 1988 年建成年产 1 250 吨颗粒状多晶硅生产厂,并开始销售产品,1989 年生产和销售约 600 吨,1990 年上升到 800 吨。其产品电阻率大幅度提高,为单晶硅质量的提高奠定了基础。

磁场控制拉晶法(MCZ)已基本成熟,开始进入实用阶段;连续供料直拉法(FCCZ,从坩埚连续加料直拉法和隔壁坩埚连续加料直拉法)也已进入工业化生产。

2. 杂质、缺陷以及“杂质—缺陷工程”的研究和应用取得新进展

近十几年,关于半导体硅材料中杂质与杂质、杂质与缺陷以及缺陷与缺陷之间的相互作用及其行为的研究取得了一些新的认识,并在硅片表面加工实践中得以证实,形成“杂质—缺陷工程”的新研究领域,使硅片表面洁净层或有源区的制备获得新的进展,为大功率电力电子器件、组件以及超大规模集成电路的制造提供了有利条件。关于杂质与缺陷的研究,特别是吸杂机制与行为的研究,有可能导致新的半导体应用基础理论体系的形成和建立,当然还有待于更深层次的探讨。目前杂质和缺陷笼统地归结于“对半导体有百害无一利”的观点已被“通过有效的吸除过程可将其变害为利”的新概念所取代,并得到人们的普遍认同。

3. 硅片表层洁净层(有源区)制备或加工过程中的吸杂技术与抛光技术有了重要突破

吸杂是指将引入到硅片中的杂质“封锁”于有源区之外的过程,因此它属于硅片表面层洁净处理的辅助手段,也可以认为是一种硅片加工工艺的保障措施。被吸除的杂质一般是公认对器件特性有严重不良影响的元素,诸如钠、钾、锂等碱金属元素,以及铁、铜、金、铬等重金属和变价元素。据称,前者对 MOS 器件特性有不良影响;而后者则是少数载流子寿命降低和堆垛层错产生的主要起因。

吸杂技术一般分为内吸杂(IG)、外吸杂(EG)和内外联合吸杂,它已被证实的效果是将有害杂质吸除在有源区之外,从而改善和提高硅器件特性,诸如增大少数载流子寿命(重金属),改善 MOS 器件读写性能(重金属),降低氧化膜的本征电荷(碱金

属),降低P-N结漏电流,减少双极晶体管C-E极短路,减少图像传感器的自伤等。

高精密度、高洁净度、高真空包装的抛光硅片已达到能直接进入集成电路生产的水平。

四、我国硅材料工业存在的问题和对策

我国硅材料的研制起步于50年代,60年代实现了工业化生产。进入80年代,硅材料生产企业却从原来的300多家锐减到今天的18家,其年总产量还赶不上硅工业发达国家的一个小厂。在这种严峻的现实面前,我国本来就生产能力不足的硅材料企业,还要停工限产,而器件生产厂家所需用的材料却主要依靠进口。这种极不正常的局面,亟待扭转。

为摆脱困境,重点硅材料厂和有关科研院所,进行了技术改造,“六五”期间先后从国外引进了大型直拉单晶炉、区熔单晶炉、外延炉、硅片加工和检测设备,建立了直径60~75毫米硅单晶和硅片加工生产线以及直径75~100毫米硅片和外延片批量生产试制线。“七五”期间,再度引进设备,进行整体改造。但至今尚未配置齐全,加之缺乏管理大规模现代化生产的经验,特别是高技术产业发展的经验,致使硅材料产业的经济技术指标难以同硅工业发达国家抗衡,因此反倒带来新的困难。

目前,我国直拉硅单晶生产仍以直径60~75毫米为主,直径100毫米硅单晶只有小批量供应。这相当于国外70年代中后期的生产水平。预计到2000年我国直拉硅单晶直径125~150毫米的将占总量的40~50%,然而,与硅工业发达国家相比,差距仍然甚远。

鉴于国外半导体硅材料科学与工程,或硅材料高技术产业的发展趋势和我国硅材料产业所面临的困境,如何推进我国硅材料的科学研究、技术开发和规模化国际化生产,迅速缩小与国外先进水平的差距,以适应我国电子工业和各种高新技术产业发展的需要,特对我国半导体硅材料工业的发展提出如下几点建议:

1. 按高技术产业机制发展硅材料产品生产,走产业国际化道路,以满足国内市场、挤占部分国际市场(含取代进口)为目标,最终走上硅材料—器件—整机生产销售一体化

硅材料产业必须与国际市场接轨,才能走出低谷,摆脱困境。我国硅材料生产能力不足、产品质量不高、市场徘徊不前、技术进步不快的窘迫局面,是我国高技术产业特别是电子工业发展缓慢的反映,单从材料方面入手,很难改变总的形势。国际半导体市场是材料—器件—整机生产销售一体化商品

市场,预计1995年将达到900~920亿美元,2000年将达1300~1500亿美元,甚至2000亿美元。市场虽然很大,但进一步增大也很困难,关键是谁能挤占其中一定份额。我国硅材料产业发展目标应是走规模经营、提高质量、降低成本、与器件和整机生产联手,使产品直接打入国际市场,或者是引进外资,高起点引进先进技术、设备或生产线,直接参与国际大市场循环(这里应肯定,替代进口就等于进入国际市场,我国半导体硅技术受制于国外进口货的冲击);或者与国外著名半导体公司联营,发展我国的半导体工业,从而带动起硅材料产业的振兴,同时也免受器件应用消长的制约和走私的冲击。

硅材料产业近几年应首先满足国内市场不断变化和增长的需要。国内器件生产的需要1993年有明显的增长,要使国产硅材料完全占领这个市场,难度相当大,因为国产的硅材料质量、规格和价格都不占优势,抵挡不住进口产品的冲击,这要引起硅材料界的普遍重视。

2. 建议近期内主要抓以下工作

——作为高技术产业,半导体硅材料应纳入半导体技术产业之中,即材料—器件—整机生产销售一体化体系,开展科研机构—高等院校—生产企业联合攻关,共同进行科学研究与技术开发,使其成果商品化、商品产业化和产业国际化,改变我国材料、器件、整机互相分离、互为市场、互相制约的不能协调发展的局面。

——近期应扩大硅单晶及其加工的生产规模,强化大生产技术及其管理,向半导体技术一体化方向转移,特别要重视向硅材料产品两头延伸的集约化方向转移或开拓,挤占现有的市场。目前,我国的硅材料生产装备落后,规模小,硅片直径不能完全满足器件生产需要;成本高,在国际市场上没有竞争力。硅材料的发展又受到国内器件产业兴衰的制约。今后几年要首先在满足国内市场需求的前提下,下大力量开拓国际市场需要的直径150~200毫米硅片的生产,以解决国内硅材料市场窄小和无资金来源的困境。只有产品进入国际市场,才能搞活企业,促进硅材料产业的发展,缩小与国外水平的差距。只有占领一定份额的国际市场,有了创汇能力,才能形成我国硅材料发展的良性循环。

——引进先进技术和设备,或高起点地引进先进生产线,不断消化吸收,提高生产技术水平。目前,世界工业发达国家以及韩国、台湾等亚洲新兴工业化国家或地区,均已生产和使用CZ直径150~200毫米直径的硅片,预计到2000年将发展为直径250~300毫米。我国今后应进口大直径的硅片生产技术和设备。

——扩大多晶硅生产规模,满足国内市场的急

(下转第15页)

养思维方法上也着重训练逻辑思维。在西方国家如果孩子言语能力较差,常为家庭、学校乃至社会所歧视。诵读困难的儿童被看作智能上残疾者。公众领袖人物,政界要员个个都口才雄辩,出口成章。实际上这是人类对自己左脑的偏爱,对右脑的误解。上面已举出一些例子说明右脑在进行创造性思维时的天才作用。可惜因为右脑是“哑脑”,不易于显露出潜在的特定功能而被人类自己所忽视。有鉴于此,教育界中的有识之士呼吁要锻炼和开发右脑的智力,培养象达芬奇那样兼有科学家和艺术家才能的全面发展人才。日本品川嘉也教授竭力提倡加强右脑的使用和开发。国内已翻译出版了他的三本著作。他认为,应从幼儿开始加强右脑的训练,设计一系列的方法来贯彻这种教育,然后在中小学中深化这种教育。他还提出“左脑型的人今后将会被淘汰”,“不会使用右脑的人将被计算机取代”……等等引人注目的论点。前些年我国教育方法也有所偏颇,只重视语文和数理化,而绘画、手工、体育、音乐、制图等科目成为可有可无的陪衬。从神经生理的角度看,这种教学方式只能使右脑得不到充分的训练,忽视右脑形象思维和创造性思维的发展。这也许是我国近半个世纪以来在科学和艺术上没有产生世界性伟人的因素之一。

汉字是象形文字，中国的文化是建立在中国文字的基础上的。在中文的学习和使用过程中比拼音文字更多地调动和涉及到右脑的功能。国人从小用筷子吃饭，用毛笔写字，需要手的精巧动作和许多肌肉的协调配合。这样既直接训练了右脑的运动和感觉皮层，又由于汉字的认知和写作而调动了右脑的空间定位、整体概念和图像认识能力。所以，从文字的角度讲，中国人比起使用拼音文字的民族来说，大脑受到更多的训练。拼音文字容易实现机械化，也好实现输入计算机。中国的文字工作者曾一度呼吁汉字拼音化。80年代中后期一批汉字输入软、硬件的推出，汉字输入计算机的速度大大提高，有的甚至超过英文。这样一来，古老的中国文化就能够与现代信息技术接轨，在今后的文化发展史上将会如虎添翼。

从认识论的哲学观点来看,以中国为代表的东方思想更偏重于整体论(Holism),西方文明偏重于分析方法。诺贝尔奖获得者普利高津几次来华演讲

中都提到这一点。西方科学家依据实验,使用分析方法,寻求事物的深层次的原因,推断下一步的发展趋向。这在认识论上称为“还原论”(reductionism)。还原论在人类的认识发展史上确实起过重大作用。但是,世间事物是复杂的,许多事务需要用系统论、整体论加以解释。而从思维的规律的角度来看,左脑擅长使用言语、逻辑的分析性思维,而右脑擅长使用图象、景物和事物关系的整体性思维。所以,在有的文献中认为东方文明建立在右脑上,而西方文明建立在左脑上。这种说法当然过于简单化。不过在认识客观事物过程中,整体论与还原论、分析和综合应当相辅相成。实际上,大脑左右两半球也一定是协调起来工作的。斯佩利在获诺贝尔奖时,难怪他所在大学的校长向他发的贺信中幽默地说“谨向阁下大脑左右两半球一并致贺”。

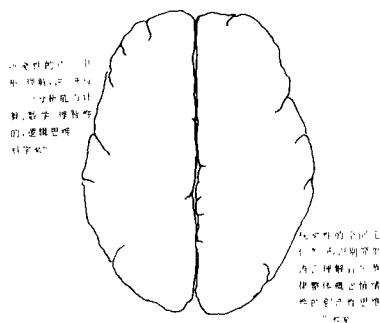


图5 左右两半球在感知、认知能力上的不同特长和风格

结 论

大脑两半球在结构和功能上虽有差异,但统一于同一个个体之中。它们是在适应客观世界不同信息源的环境中发展起来的。两半球在接受、处理和存储信息中具有各自的风格和特色,但又互相配合和依存。大脑两半球在信息处理上的差别,对计算机的设计无疑是有启发的。在教育 and 人才培养方面必须考虑到这些重要因素。大脑的结构和功能是社会文明的产物,反过来对文明的发展起着极其重要的作用。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 19 页)

需。世界多晶硅生产能力约 10 000 吨,我国仅 100 吨左右,预计“八五”期间,多晶硅改造工程投产后可达到 180~220 吨,比国外一个厂的产能都小,如德国瓦克化学电子公司的多晶硅年产量为 3 000

吨。因此可先建一个年产 200 吨多晶硅的工厂,以满足国内单晶硅生产厂的急需,然后至少应发展成 1 000 吨级的大厂,非此不能缓解我国硅单晶生产原料短缺的困难。 (责任编辑 刘先曙)