

中国集成电路材料产业发展现状分析

冯黎^{*1}, 朱雷²

(1. 上海新微技术研发中心有限公司, 上海 201800; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 集成电路材料是集成电路产业发展的基础。集成电路技术每前进一步都会对材料提出新的要求, 而材料技术的每一次发展也都为集成电路新结构和新技术提供基础。全球每年约 500 亿美元的集成电路材料, 支撑了全球每年超过 4000 亿美元的集成电路。中国集成电路材料经过十多年发展初步取得成效, 但由于起步晚, 发展仍然落后, 高端产品严重依赖进口。本文全面梳理了中国集成电路材料各细分领域发展状况, 并对产业现存问题进行扼要分析, 为我国集成电路材料产业体系自主可控、安全可靠发展提供一定的参考。

关键词: 集成电路; 集成电路材料; 产业概况

中图分类号: TN04/TN47

文献标志码: A

Analysis of the Development Status of Integrated Circuit Material Industry in China

FENG Li^{*1}, ZHU Lei²

(1. Shanghai Industrial μ Technology Research Institute Co., Ltd, Shanghai 201800, China; 2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;)

Abstract: Integrated circuit (IC) materials are the foundation of IC industry. Each major progress in IC technology will rise new requirements for materials, and every development of material technology will also provide the basis for new IC structures and new technologies. A global market of \$50 billion of IC materials supports more than \$400 billion of IC market each year. After many years of development, China has made some initial achievements in IC materials. However, China still lies behind in the development of IC materials and relies heavily on imports for high-end products. This article comprehensively sorts out the development status of China's IC materials in various subsectors, and makes a brief analysis of the existing problems in the industry, aiming to provide a certain reference for the independent and controllable, safe and reliable development of China's IC materials industry ecosystem.

收稿日期: 2020-05-02; 修订日期: 2020-06-03

作者简介: 冯黎 (1972-), 女, 上海, 硕士, 现任上海新微技术研发中心有限公司副总经理, 有 20 年集成电路领域技术与管理经验, 曾任职于东京电子与上海新阳 (E-mail: flora.feng@sitrigroup.com); 朱雷 (1988-), 男, 上海, 博士, 长期从事高端硅基材料研发和产业化。

Key words: Integrated circuit; Integrated circuit materials; Industry overview

0 引言

集成电路产业是战略性、基础性和先导性产业,是信息社会以及高新技术产业的基石,日益成为当前国际科技竞争的重要战场。集成电路中使用的材料种类繁多,主要包括硅片、绝缘体上硅(SOI)、化合物半导体等衬底材料,光刻胶和配套材料、掩模版、湿化学品、电子气体和源、抛光材料、靶材及蒸发材料等工艺材料,以及芯片级/晶圆级封装材料、电磁屏蔽材料等封装材料。集成电路材料处在制造业的上游,是支撑制造技术发展的关键环节,全球约500亿美元的集成电路材料业支撑起4000亿美元的集成电路产业以及上万亿美元规模的电子应用系统产业的发展,是电子信息产业基础中的基础,核心中的核心。

集成电路制造技术的不断升级和产业的持续创新也愈发依赖材料技术的底层突破。后摩尔时代,集成电路技术每前进一步都对材料的性能提出新的要求,材料技术的每一次发展也都为集成电路新结构、新器件的开发创造新的空间。据估算,材料对先进制程逻辑芯片性能提升的贡献已超过六成,掌握集成电路材料核心技术与知识产权就占领了集成电路技术高地。美国 DARPA 通过“电子复兴”计划,对集成电路材料创新加强投入。

1 中国集成电路产业发展态势

长期以来,中国是世界上最大的集成电路消费市场,但是由于核心技术落后,大部分产品严重依赖进口。据海关总署统计,我国集成电路芯片进口额连续五年远超原油的进口额,已经突破3000亿美元,位列我国进口最大大宗商品中。集成电路贸易逆差持续扩大,阻碍我国国民经济的快速发展;高端核心芯片几乎全部依赖进口,直接威胁我国国防系统的信息安全和通讯、能源、工业、汽车、消费电子等支柱产业的产业安全。

近年来,中国政府通过实施国家科技重大专项,颁布国家和地方政策,成立产业基金等多种方式大力支持集成电路产业的发展,特别是从2014年《国家集成电路产业发展推进纲要》颁布实施以来,各地发展集成电路产业的热情高涨,纷纷兴建新工厂。

据统计,截止2020年初,我国12英寸晶圆产线已投产逾24条,10条宣布在建并预计2020年后投产,届时全国12英寸晶圆厂产能将超过253万片/月,总投资规模超过15000亿元。各地产线兴建不停,国内产能的集中释放,为集成电路产业提供了巨大的发展空间。然而,产业链上游的材料环节依然薄弱,产业整体严重受制于人,使得我国集成电路制造业发展机遇和风险并存。



图1 中国集成电路与原油进口额对比

Fig. 1 Comparison of China's IC imports and crude oil imports

2 中国集成电路材料产业概况

根据SEMI数据,2018年全球集成电路材料市场首次突破500亿美元,创下历史新高。受存储市场疲软影响,2019年全球集成电路材料市场同比小幅下滑1.1%,但仍高达521.2亿美元,其中衬底材料、工艺材料和封装材料比例约为1:2:2。中国台湾地区已连续第十年蝉联全球最大集成电路材料消费地区,总市场达113亿美元。中国大陆市场规模为86.9亿美元,与韩国并列第二,全球占比17%(图2),是2019年唯一成长的材料市场,显示出巨大的市场需求潜能。

在供给侧,尽管中国集成电路材料产业持续壮大,但相对市场的需求和发展,材料自给能力还远远不够。近几年,受国家政策支持以及中国市场需求的驱动,中国集成电路材料发展到了一个新的高度,关键材料实现从无到有,产业增长进一步加快,培育了一批富有创新活力,具备一定国际竞争力的骨干企业。中国集成电路材料营收十年翻两番,江丰电子、安集微电子、上海新阳等公司的溅射靶

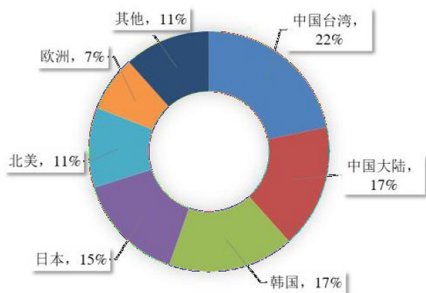


图2 全球集成电路材料市场区域结构

Fig.2 Global IC materials market by region

材、抛光液和电镀液等上百种关键材料通过大生产线认证进入批量销售,跻身国内外先进芯片厂供应链。但是,中国集成电路材料还很弱小,自给率不足20%,自主可控和参与国际竞争能力远远不足(图3)。

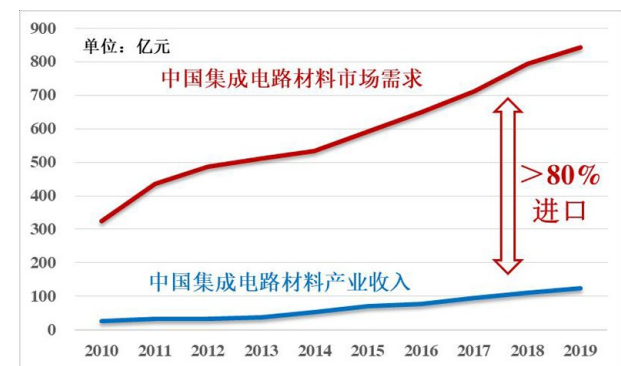


图3 中国集成电路材料市场需求及产业销售收入对比

Fig.3 Comparison of market demand and industrial sales revenue of IC materials in China

2.1 衬底材料

衬底材料主要包括硅片和以砷化镓、氮化镓和碳化硅等为代表的化合物半导体材料。目前全球99%以上的集成电路采用硅作为衬底。本文重点分析中国硅片材料的技术水平和产业化能力。

全球硅片市场被日本、韩国、中国台湾地区垄断。目前硅片的供应商主要有日本的信越化学和胜高、德国的世创、台湾的环球晶圆以及韩国的SK Siltron,全球前五大公司的市场份额约92%,其中12英寸硅片市场的份额约98%。

相比之下,我国硅片生产商分布零散,主要产品集中在6-8英寸,12英寸硅片的研发和生产处于起步阶段。在8英寸硅片方面,浙江金瑞泓、有研半导

体、重庆超硅、中环领先等公司的8英寸硅片已经批量进入国内外市场。其中,外延片用重掺杂衬底抛光片已实现自主供应,部分产品能够达到0.13 μm 集成电路工艺要求。在12英寸硅片方面,截止2019年底,硅产业集团旗下上海新昇实现了12英寸硅片量产,65nm、55nm、40nm等先进节点用硅片正片已经出货。有研半导体、重庆超硅等公司的12英寸硅片产品正在给用户送样评估。除此之外,其他大硅片项目仍处于规划建厂或产品开发的早期阶段。

在硅片原材料供应链方面,我国尚未建立起支持硅片产业发展的供应链体系。目前国内电子级多晶硅研发生产企业仅有江苏鑫华、黄河水电、洛阳中硅等几家,但产品在掺杂和金属污染等关键指标上与世界一流水平公司还存在较大差距,高纯多晶硅原材料依然依赖进口,且没有形成长期稳定供应的战略合作关系,产业发展尚需培育;单晶硅生长用高品质石英坩埚、石墨热场、硅片盒、硅片专用包装盒等均依赖进口,国内尚未形成配套能力。

2.2 光刻胶和配套材料

光刻材料包括光刻胶、光刻胶辅助材料、光刻胶专用试剂。光刻胶是由成膜树脂、感光组分、微量添加剂和溶剂等成分组成的对光敏感的混合液体;光刻胶辅助材料包括增粘剂、抗反射层、碳膜涂层等;光刻胶专用试剂是在集成电路制造中与光刻胶配套使用的化学试剂,包括稀释剂/去边剂、显影液和剥离液等。

目前,全球芯片工艺水平已跨入微纳米级别,光刻胶的波长由紫外宽谱逐步至G线、I线、KrF、ArF,以及最先进的EUV水平。目前高端光刻胶市场份额最大,其中G/I线光刻胶占比为24%,KrF光刻胶占比为22%,ArF光刻胶占比为41%。全球光刻胶市场基本被日本JSR、东京应化、住友化学、信越化学、日本TOK、美国陶氏杜邦、德国默克等几家大型企业所垄断。市场份额占比前7家公司均拥有I线光刻胶、KrF光刻胶和ArF干法/ArF湿法光刻胶等,占国际光刻胶90%以上市场份额。日本JSR、芬兰Pibond、美国Inpria等公司均在不同程度地开发EUV光刻胶。国内芯片制造厂向28nm以下更小节点不断发展,先进工艺对高端光刻胶的需求不断增大。但高端光刻胶始终依赖进口。目前仅有北京科华、苏州瑞红能够批量供应I线光刻胶和少量几支

KrF 光刻胶;北京科华、上海新阳、苏州瑞红、南大光电等正在研发 KrF 和 ArF 光刻胶。

光刻胶辅助材料主要为抗反射涂层和增粘剂。其中抗反射涂层主要供应商包括日本 JSR、信越化学、日产化学,美国陶氏杜邦,德国默克等公司。增粘剂主要是 HMDS,产品供应商主要有美国陶氏杜邦、德国默克、亚什兰和中国台湾地区 AUECC。国内电子化学品企业缺乏开发该类材料的动力,针对抗反射层的开发尚处于初期产品研发阶段,代表企业有上海新阳、厦门恒坤和徐州博康。

全球从事光刻胶专用试剂的国际公司包括日本东京应化、日本关东化学、德国默克等。此外,日本德山化工、美国陶氏杜邦、三开化学、摩西湖等也提供显影液产品。目前,国内光刻胶专用试剂生产商主要有上海飞凯、江苏艾森、北京科华、苏州晶瑞、徐州博康,但产品大都只能应用于 8 英寸及以下尺寸晶圆产品生产,在金属杂质与颗粒含量控制方面距 12 英寸晶圆制造还有一定差距。

2.3 掩模版

掩模版在集成电路行业中的作用就像照相行业中的胶卷底片,行业地位特殊。对于芯片制造,掩模版的设计和制造需要与集成电路工艺紧密衔接,因此,芯片制造厂一般都有配套的专业掩模版工厂,先进的掩模版技术也因此掌握在先进芯片制造厂商手中。目前,英特尔、三星、台积电、Global Foundries 等全球最先进的芯片制造厂所用的掩模版大部分由自己的专业工厂生产,外购量较少。对于非先进制程,特别是一些 55nm 以上制程产品,掩模版外包的趋势非常明显,独立掩模版制造厂的市场比较高。目前全球独立的掩模版厂商包括美国 Photronic、日本 DNP、日本 Toppan、台湾光罩以及 SK-Electronics 等。这类企业的特点在于专业经营能力强,服务业务范围广泛,竞争性集中度高,前三家公司占据 90% 以上的市场份额。

我国掩模版生产公司以外资为主,美国 Photronics 和日本 Toppan 都在上海建有生产基地,占据我国高档光掩模版市场。我国本土的掩模版厂按经营模式分为三类:第一类是芯片厂配套的掩模厂,以中芯国际和华润上华掩模厂为代表,技术水平分别为 $0.25\mu\text{m}$ – 14nm 和 $0.8\mu\text{m}$ – $0.13\mu\text{m}$ 。第二类是独立掩模版制造厂商,主要有无锡中微,技术水平为

$0.25\mu\text{m}$ 。第三类是科研院所,包括中科院微电子所,中国电科 13 所、24 所、47 所、55 所等研究机构。受限于核心设备—光刻机的进口管制及关键核心原材料的依赖进口,国内独立掩模版生产厂的水平与国际先进水平相比仍有较大差距。

2.4 湿化学品

湿化学品主要包括无机酸类、无机碱类、有机溶剂类等通用化学品以及刻蚀液、电镀液、清洗液等功能型化学品,通常用于芯片生产中的清洗、光刻、刻蚀、显影、互联及表面处理等工艺。当前,全球湿化学品的市场格局呈现三大板块:一是欧美传统老牌企业占据 35% 的市场份额,主要公司包括德国巴斯夫、美国陶氏杜邦、德国默克、应特格等;二是日本企业拥有 28% 的市场份额,代表性公司包括关东化学、三菱化学、三菱瓦斯、东京应化等;三是中国台湾地区、韩国、中国大陆企业约占 32% 的市场份额。

经过十几年的努力,国内湿化学品产业技术已取得一定突破,通用化学品已初步形成一定的产业规模。其中,湖北兴福电子级磷酸产品已经成功应用于国内外先进生产线;中巨芯电子级硝酸产品在国内市场占有率达到 50% 以上,电子级氢氟酸达到 30% 以上;苏州晶瑞双氧水已经批量应用于 8 英寸晶圆生产线,应用于 12 英寸产线的产品正在评估中。在功能化学品方面,上海新阳铜互联超高纯电镀液、铜刻蚀后清洗液已经实现产业化应用,产品覆盖 65–28nm 技术节点,铝刻蚀液、铝/铜工艺刻蚀后清洗液也于近年在量产线上批量应用;安集微铜抛光后清洗液已经成功应用于 55nm 技术节点,铜刻蚀后清洗液已在存储器生产中实现量产应用。整体上,我国 8 英寸晶圆制造和先进封装用湿化学品已基本成熟,能够批量供货。12 英寸 28nm 以上技术节点晶圆制造用湿化学品基本处于产业化和体系认证阶段;28nm 以下技术节点用湿化学品还比较薄弱,基本处于实验室研发和小试开发阶段。

2.5 电子气体和源

在集成电路工业中应用的有 110 余种气体和源,其中常用的有超过 30 种,按在集成电路中不同应用途径可分为大宗气体、离子注入气体、薄膜沉积气体(CVD、ALD 气体和前驱体)、刻蚀清洗气体等。电子气体和源从生产到分离提纯以及运输供应阶段都存

在较高的技术壁垒,市场准入条件高,国际上从事电子气体和源业务的公司有 30 余家,主要分布在美国、日本、欧洲、韩国等,占据 90% 以上的市场份额。

目前中国已有 20 余家企业涉及电子气体和源业务,主要有中船重工 718 所、广东华特、南大光电、天津绿菱、江苏雅克、福建博纯、贵州威顿等。其中一些企业已经开始崭露头角。718 所已经全面掌握了 NF₃、WF₆ 等气体的制备、充装、分析、运输、安全应用以及质量控制等成套产业化技术,生产规模国际领先;718 所、广东华特等公司已经基本掌握了氟碳类气体中试规模生产技术;南大光电突破了磷烷、砷烷和安全离子源产品的制备、充装、安全生产、质量控制、安全输运等系列成套技术,对多个品种 ALD/CVD 前驱体产品的开发取得进展,部分产品已通过用户评估,开始进入市场。尽管国内电子气体和源产业已经取得了长足的进步,但整体成熟度依然需要提升,产品技术水平和品质稳定性及对制造企业的技术支持和服务能力尚有待大批量市场应用的考验,针对先进技术节点的产品开发能力亟待加强。

2.6 抛光材料

抛光液、抛光垫和修整盘是化学机械抛光 (CMP) 工艺关键的消耗性材料,其中抛光液与抛光垫分别约占 60% 和 30%。

集成电路用抛光液市场主要被美日欧企业垄断,主要企业有美国的 Cabot、陶氏化学、德国默克,日本的 Hitachi、Asahi、JSR、Fujimi、Fujifilm、Kao,韩国的 Dongjin、Cheil、KC Tech、Soulbrain,德国的 BASF 等。美日韩公司占据全球 90% 以上的市场份额,仅 Cabot 一家就占有全球抛光液 30% 以上的市场份额。

国内从事抛光液研发与生产的企业有安集微、上海新安纳、天津晶岭微等。其中安集微生产的铜/铜阻挡层抛光液、二氧化硅抛光液、TSV 抛光液、硅抛光液、铜抛光后清洗液等产品已成功进入国内外 8 英寸和 12 英寸客户芯片生产线,铜/铜阻挡层抛光液产品已经进入国内外领先技术节点,产品涵盖 130nm~28nm 技术节点;上海新安纳研发出的硅片粗抛抛光液成功应用在 8 英寸和 12 英寸硅片抛光上。整体上我国抛光液主要为铜及其阻挡层抛光液、TSV 抛光液和硅的粗抛液等,其它抛光液(硅片精抛液、化合物半导体抛光液,14nm 以下 FinFET 工

艺抛光液,钴、铷等新金属互联材料的抛光,STI 抛光液等)及其抛光磨料还是依赖进口。

CMP 工艺中的另一个重要工艺耗材为抛光垫。目前,国际上抛光垫市场由陶氏化学一家独大,占整个市场份额的 80%,Cabot 次之,约占 10% 的市场份额。CMP 修整盘也是 CMP 工艺材料中的关键组成部分,其作用是将金刚石颗粒镶嵌在金属胎体上,在抛光过程中对抛光垫进行修正,以保证抛光工艺的稳定性 and 重复性。美国的 3M、韩国的 Saesol、中国台湾地区的中砂三家公司占有超过 90% 的 CMP 修整盘市场份额。我国生产抛光垫的企业主要有鼎龙股份、苏州观胜、江丰电子,目前产品处于认证和小批量生产阶段。宁波江丰电子的金刚石修整盘和保持环已进入评价验证阶段。就抛光垫修整盘整体而言,我国本土企业仍处于尝试突破阶段,国产化率很低,高端产品依然空白。

2.7 靶材及蒸发材料

高纯溅射靶材(包括蒸发材料)主要用于金属化工工艺中互连线、阻挡层、通孔、背面金属化层等薄膜的制备。使用的靶材原材料主要有超高纯铝及其合金、铜、钛、钽、钨、钨钛合金以及镍及合金、钴、金、银、铂及合金等。全球靶材制造行业呈现寡头垄断格局,少数日美化工与制造集团主导了全球靶材制造行业,其中霍尼韦尔、日矿金属、东曹、普莱克斯等跨国集团合计占据全球 80% 的市场份额。

目前我国靶材行业已经初具规模,出现了具备和日美跨国集团竞争的本土靶材企业,代表性企业包括江丰电子、有研亿金、江西睿宁、河南四丰。江丰电子、有研亿金等公司已经全面掌握靶材微观组织控制、焊接与结合、清洗与净化、品质控制等成套工艺技术,在高纯金属提纯与合金化及熔铸技术方面也取得了一定进展,铝、钛、钽、铜及相关合金等系列靶材的产业化能力大幅度提升,在 8 英寸以下晶圆制造用靶材国内市场占有率超过 70%,12 英寸制造用靶材产品能够基本满足国内 28nm 技术节点的量产需求,并正在逐渐增加市场份额。江丰电子等国产品牌靶材已成功进入众多世界著名芯片制造公司,在 14/16nm 技术节点实现批量供货,部分产品已进入 7/10nm 等先进工艺制程中。

2.8 封装材料

封装材料主要包括封装基板、引线框架、键合丝、塑封料、黏结材料、底部填充料、液体密封剂、贴片材料、焊球、晶圆级封装电介质等。其中封装基板、引线框架、键合丝是三大主要封装材料。

全球封装基板的主要生产厂商集中在我国台湾地区、韩国和日本三地,其市场占有率在 90% 以上。国内封装基板生产企业虽然仍与先进水平存在差距,但已经具备了基板加工工艺能力,并正在向领先技术靠近。目前国内主流基板厂有深南电路、珠海越亚、兴森科技和丹邦科技等。

目前国际引线框架的供货仍以日韩及台湾企业为主。外资企业一直占据着国内引线框架的中高端市场,其份额约占 3/5 左右。目前中国本土引线框架企业较分散,没有形成像封装企业那样的产业集群格局,企业方面仅宁波康强一家独大。

目前日本、德国、韩国等是全球键合丝主要生产国,主要生产企业包括日本田中贵金属、日本新日铁、德国贺利氏、韩国 MKE、韩国 Heesung 及台湾乐金、台湾钰成金属等。国内具有一定影响力的键合丝生产企业主要为国际独资或合资企业,占据高端金丝和铜丝产品市场;本土企业达博等目前只能在低端领域进行激烈竞争。

3 中国集成电路材料产业现存问题

一是集成电路先进工艺存在材料供货风险。

中芯国际 14nm 工艺已经量产并开始贡献营收,合肥长鑫 19nm DRAM 产能稳定提升。但是先进工艺所需的国产 12 英寸硅片尚未满足量产需求;光刻胶仅能满足 0.25 μm 节点以上非先进制程应用;独立掩模板厂的产品线宽在 0.13 μm 水平;抛光液、功能化学品的量产水平在 28nm 工艺节点以上;包装材料、过滤器等几近空白;部分高端材料的研发尚未开始。短期内我国高端材料严重依赖进口的局面难以改变,国际局势及新冠疫情背景下材料供应链安全无法保障,制约先进工艺发展。

二是集成电路材料产业缺乏规模优势形成的竞争力和创新力。

国外材料龙头企业规模巨大,横跨多个材料细分领域。经过多年发展,我国目前已形成有上百家企业的集成电路材料产业,在各细分领域也都培育出一批领军企业。然而企业规模与国际领先企业仍

相去甚远,我国集成电路材料产业总销售额约 125 亿元,仅与日本信越公司的硅片业务相当。我国集成电路材料企业基础弱、产品单一、分布散、质量管理水平低,缺乏规模优势,体量及创新力无法与国际龙头抗衡,受行业景气度等外界环境因素的影响较大,所能承受的系统风险高。

三是集成电路材料认证体系不健全,国产材料应用认证困难重重。

集成电路材料产品在进入芯片厂之前要经过严谨漫长的认证阶段。国外材料公司携手设备和下游芯片厂通过合作开发,成为每个技术节点的优先供应商,占据先发优势。我国材料公司作为后进者,要取代国外产品,必须经过芯片厂严格认证,但是由于缺乏认证环境,无法快速获得单工艺验证和电性测试等关键数据反馈,试错机会少,产品验证门槛高,难度大。这阻碍了我国集成电路材料产业的发展,加剧我国芯片厂对国外材料产品的依赖。

4 总结与展望

国内集成电路材料企业、科研单位和产业上下游经过多年不懈努力,为我国集成电路材料产业发展打下了坚实的产业基础,积累了丰富的技术经验、建立了雄厚的人才储备,集成电路材料的部分细分领域已经取得突破性进展。但是,就我国集成电路材料产业整体而言,还存在着整体技术水平偏低,产业布局分散,缺乏市场竞争力,材料国产化率不高等问题。这些都是建设我国自主可控、安全可靠集成电路材料产业体系中需要解决的关键问题。未来需要加强顶层设计,深化产学研用协同创新,继续坚持国际开放合作,努力打通全产业链,才能在短时期内突破核心技术,提升创新能级。希望更多国产材料公司,通过自身努力与开放合作,尽快成为全球产业合作体系的重要组成部分!

参考文献:

- [1] 王阳元. 集成电路产业全书(2018 版)[M]. 北京:电子工业出版社,2018.
- [2] 石瑛. 中国集成电路材料产业技术发展路线图(2019 版)[M]. 北京:电子工业出版社,2019.
- [3] 江苏省半导体行业协会. 江苏省集成电路产业发展研究报告(2017 版)[M]. 江苏:电子工业出版社,2017.