

立足产业链的中美日集成电路材料技术 布局差异分析^{*}

孙文君^{1,2} 吕璐成^{*,1,2} 张 凯^{1,2} 刘 婷^{1,2} 韩 涛^{1,2} 赵亚娟^{1,2}

(1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100190)

摘 要:为助力我国集成电路材料产业的科技决策,对集成电路材料产业链各环节进行中美日技术布局差异分析与揭示。基于论文、专利数据,采用文献计量分析方法开展技术布局差异分析研究。具体地,通过梳理集成电路材料产业链,明确产业链各环节的 7 种材料,分别从 Web of Science 和 IncoPat 数据库获取全球论文和专利数据,结合论文质量和专利价值判断标准,分析中美日三国的论文发表与专利申请趋势差异、机构数量差异、企业数量差异和技术差异。研究发现,近年来我国在集成电路材料产业链上的专利和论文情况均取得进步,高价值专利和高被引论文占比持续攀升;但在不同材料上的表现不均衡,在硅晶圆、光刻胶等领域更注重专利申请,而在电子气体、湿电子化学品等领域更注重论文发表;在专利申请机构总量上略有优势,但申请高价值专利的机构不足,呈现出论文数量多、机构少的特点;专利申请的机构中,企业占比较多,且高价值专利主要集中在企业。中美日三国的技术关注点存在差异,美日有部分共同关注点。

关键词:集成电路材料;技术布局差异;产业链;文献计量;专利分析

DOI: 10. 16507/j. issn. 1006-6055. 2023. 03. 005

Analysis of Difference between Technical Layout of Integrated Circuit Materials in China, the United States and Japan Based on Industrial Chain^{*}

SUN Wenjun^{1,2} LV Lucheng^{*,1,2} ZHANG Kai^{1,2} LIU Ting^{1,2} HAN Tao^{1,2}
ZHAO Yajuan^{1,2}

(1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Information Resources Management, School of Economics and Management,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the industrial chain of integrated circuit materials, this paper analyzes and reveals the differences in the technological layout between China, the United States, and Japan in all links of the industrial chain to help the scientific and technological decision-making of China's integrated circuit materials industry. Based on the data of papers and patents, this study adopts the bibliometric analysis method to carry out the analysis and research of technical layout

^{*} 国家科技图书文献中心(NSTL)资助项目“支撑重点产业发展的关键核心技术链识别与储备研究”(E11Z1801)

^{**} E-mail: lvlc@mail.las.ac.cn Tel: 010-82626611

differences. Specifically, by combing the industrial chain of integrated circuit materials, seven kinds of materials in each link of the industrial chain are defined, and the global papers and patent data of each material are obtained from the Web of Science and Incopat patent databases. Combined with the paper quality and patent value judgment standards, the application and publication trend difference analysis, organization number difference analysis, enterprise number difference analysis and technology difference analysis of China, the United States and Japan are carried out. In recent years, China has made progress in patents and papers in the integrated circuit materials industry chain. The proportion of high-value patents and highly cited papers continues to rise, but the performance of different materials in the industry chain could be better. China pays more attention to patent applications in the fields of silicon wafers and photoresists and pays more attention to paper publications in the fields of electronic gases and wet electronic chemicals. China has a slight advantage in the total number of patent application institutions, but there needs to be more institutions applying for high-value patents. It shows the characteristics of more papers and fewer institutions. Enterprises account for a large proportion of patent application institutions, and high-value patents are mainly concentrated in enterprises. There are differences in technical concerns between China, the United States and Japan, and the United States and Japan have some common concerns.

Keywords: Integrated Circuit Materials; Differences in Technical Layout; Industrial Chain; Bibliometrics; Patent Analysis

集成电路技术是信息领域发展的基础,半导体芯片广泛应用于信息领域各类应用当中。近年来,以人工智能、智能制造、汽车电子、物联网、5G 等为代表的新兴产业快速崛起,使我国集成电路产业得到长足的发展,逐步成为了我国技术发展的重点产业^[1]。我国在部分相关关键材料上已实现从无到有、从低端到中高端的突破,取得了令人瞩目的进步^[2]。

集成电路材料具有细分领域众多、技术跨度大、壁垒高等特点^[3]。美、日等发达国家由于起步早,对于制备的关键技术始终具有“垄断”优势,全球集成电路材料呈现出高度集中化的发展态势,产业和贸易网络主要由具备高精尖制造能力的国家和地区构成^[4]。具体而言,截至 2020 年,以市场规模占比最高的硅片为例,日本信越、日本盛高两家日本公司拥有的市场份额合计达 53%,处于绝对领先的地位,中国占 4.52%;靶材方面,美国企业占市场份额的 38.46%,中国占 6.28%^[5]。同时,日本企业基本垄断了氟化聚酰亚胺、氟化氢和光刻胶市场,对 14 种重要原材料都拥有 50% 以上的市场份额^[6]。当前,在中美贸易摩擦的背景下,集成电路领域一些至关重要的技术如光刻等,由

于自主化程度较低,面临“卡脖子”问题,对我国信息技术发展带来一定挑战^[7]。因此,选取美、日两国与我国进行技术布局差异的比较,便于准确把握我国集成电路材料领域的发展现状。

在现有技术水平下,中国想要扭转集成电路领域关键核心技术受制于人的局面、追赶国际先进水平仍面临着巨大的挑战^[8]。因此,对我国集成电路材料产业发展现状进行深入分析,揭示我国与发达国家的布局差异,为相关科技决策提供数据支撑和研究依据,对于我国集成电路材料产业发展具有重要意义。

现有研究已经关注到揭示国家间技术差异的重要性并展开探索^[9-11],然而,现有研究多侧重围绕某一技术点或细分领域开展分析。针对这一不足,本研究通过梳理集成电路材料产业链,从整体层面去分析出国家之间的差异及缺口,立足集成电路材料产业链,利用专利、论文、高价值专利、高被引论文等多源数据,同时关联机构和企业等信息,从专利和论文的质量上揭示各国之间的差异,洞察我国在集成电路材料领域技术发展的优势与不足。揭示预警我国集成电路材料产业与发达国家的布局差异,为国家战略科技力量提供战略决

策依据和技术创新指引,对于我国走出发达国家关键核心技术的包围圈、保障我国相关产业链和供应链安全具有极为重要的现实意义。

1 研究综述

1) 集成电路材料领域的研究问题。针对集成电路材料领域,李铁成^[12]、王磊^[13]、石瑛^[14]、李先军^[15]等众多学者对我国集成电路材料的发展历程和产业化现状进行了梳理,对我国的产业状况有了清晰的认识。在面向集成电路产业链细分材料的研究中,部分学者围绕某一技术点或细分领域展开分析,如闫洪波等^[16]对稀土抛光材料进行了发展趋势研判,赵飞飞等^[17]对高纯溅射靶材的专利布局进行了分析,曹燕等^[18]选择光刻胶领域分析现状并识别关键技术。选择某一个领域或者技术点能更加细致的识别技术,但是无法在产业链的整体层面去分析出国家之间的差异及缺口。余丽等^[19]依据《科技日报》推出的“卡脖子”技术,选择重点材料进行分析,得出我国存在“原始创新能力不足、核心技术积累匮乏、市场集中度不高”的结论。陶金龙^[20]对中国集成电路产业的发展战略进行探讨,提出应当“通盘考虑国家集成电路产业链布局”的策略,通过合理布局产业、规划各产业链占比和扶持重点企业,打造国内完整产业链,凸显了产业链的重要性。

2) 围绕某一产业领域差异研判的方法和数据源。目前,围绕某一产业领域的趋势及差异研判问题,国内外学者利用的数据类型主要有期刊、专利、科技规划、基金项目等。用于开展技术布局差异揭示的方法有文献计量法、关键词/主题词的共词分析法以及知识图谱等。绝大多数研究仅凭一方数据做出分析,没有进行多源数据的融合。如佟贺丰等^[21]从专利视角对中国、美国、日本锂离子

电池技术前沿及差距进行分析,陆天驰^[22]以美国商品管制清单入手分析人工智能的领域的差距,季鹏飞等^[23]通过引文情况分析集成电路领域核心专利,诸如此类的研究均只应用其中一方的数据进行分析。对于部分结合文献计量和专利分析的部分研究,如刘宇飞等^[24]从专利和论文两个角度对数控机床产业进行分析,也仅从专利和论文数量上做出分析。

综上所述,目前针对集成电路材料的研究还存在以下不足。

一是围绕某一技术点或细分领域展开分析,没有立足于产业链对产业整体进行差异分析,缺乏对整体的把握,可能造成对该产业发展态势和各国技术差异的研判过于片面。只对整体做检索,没有对各项材料单独构建检索式,检索出的文献的准确性和全面性并不能得到保障。

二是数据源单一,大多数研究只针对论文或专利等单一数据源,缺乏多数据源的综合分析。而少数综合分析论文和专利的研究存在只看重数量、忽视质量的问题,缺乏对高价值专利以及高水平论文的重点研判。

2 研究路线

随着集成电路材料行业的发展迭代,学术界形成了多种分类,分类依据并不统一。余海东等^[25]将集成电路制造环节主要使用的材料拆解为硅片、靶材、抛光材料、光刻胶、高纯化学试剂、电子特气和化合物半导体;冯黎等^[26]指出集成电路中使用的材料种类众多,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;李潇

等^[27]按照产业链逻辑,把集成电路材料主要分为衬底材料、工艺材料(包括光刻胶、掩模版、工艺化学品、电子气体、抛光材料、靶材)以及封装材料三大板块。

集成电路原材料是集成电路产业的基石,集成电路生产的各个环节均要用到。之前的学者更多是从整个集成电路制造的环节上对产业链进行拆解,而没有反映出集成电路材料的市场情况。因此本文从集成电路材料市场的维度出发,采用集成电路制造过程中最重要、市场前景最为广阔的 7 类原材料(硅晶圆、光刻胶、掩模版、电子气体、湿电子化学品、溅射靶材、化学机械抛光材料(Chemical Mechanical Polishing, CMP)),作为产业链的核心进行展开,旨在梳理集成电路材料产业链上的关键节点。研究框架如图 1 所示。

本文对于集成电路材料产业链上的材料拟定了检索策略,以此来检索并获取数据,然后形成分析用数据集,其中的专利数据来源于 Incopat 专利数据库,论文数据来源于 Web of Science 数据库。经过检索清洗后,如表 1 所示,按照产业链上的不同材料、国家和文献质量三个维度进行了数据标引,并抽取了机构、企业情况,构建了集成电路材料领域数据库。

表 1 数据情况统计

Tab.1 Statistical Tables of Data

	论文/篇		专利/件	
	发文量	高被引	专利申请	高价值
中国	27906	4645	87931	9116
美国	31481	8565	562239	26579
日本	12234	1787	207997	50239
合计	71621	14997	352167	85934

国家间技术布局差异的分析角度众多,本文综合考虑分析目标以及数据可获得性,主要从科技成果产出体量、研发机构数量、企业数量、论文技术用词和专利技术分类开展研究。主要采用文献计量与专利计量法,结合多源数据,通过分析专利申请与论文发表在时间维度上的数量分布情况,判断各类材料在中美日三国的发展趋势;通过分析机构数量差异,与论文、专利数量对比,体现机构体量水平差异,进一步通过机构和企业数量的对比反映产业落地情况;通过论文关键词和专利的 IPC 分类号,来展示中美日三国在集成电路材料研究的热点与趋势,以及对不同类别材料关注点的异同。

3 技术布局差异分析

3.1 中美日专利与论文差异分析

3.1.1 专利申请趋势

从专利申请量可以看出,中美日在各项材料

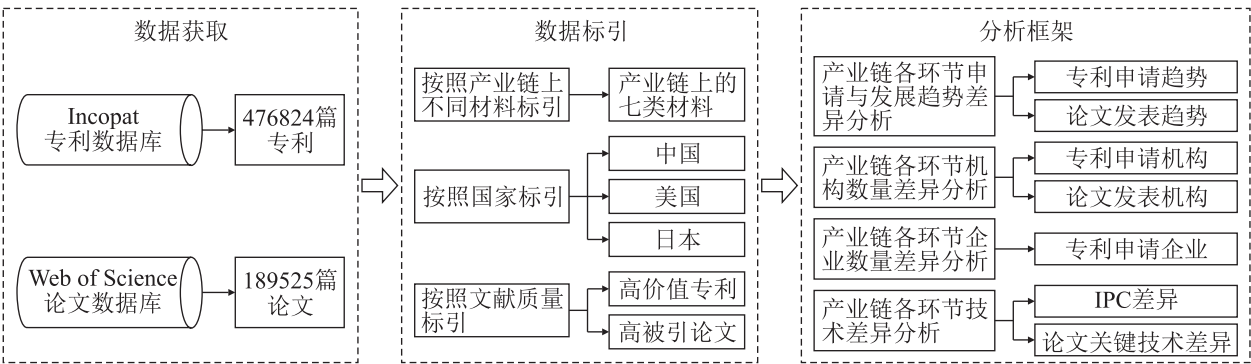


图 1 研究框架

Fig.1 Research Framework

上均存在部分差异,日本专利申请量远超中国和美国。中美日三个国家在时间维度上存在不同的特点,整体趋势分别呈现增长、先增长后衰减、衰减趋势。以光刻胶为例,具体表现为中国在 1986—1990 年间仅有 6 项专利,而在 2016—2020 年间增长至 3296 项专利;日本则恰恰相反,在 1986—1990 年间申请 6591 项专利,而在 2016—2020 年间衰减至 1816 项专利;美国的峰值在 2001—2005 年出现(图 2)。

申请海外同族专利需要付出额外的费用,

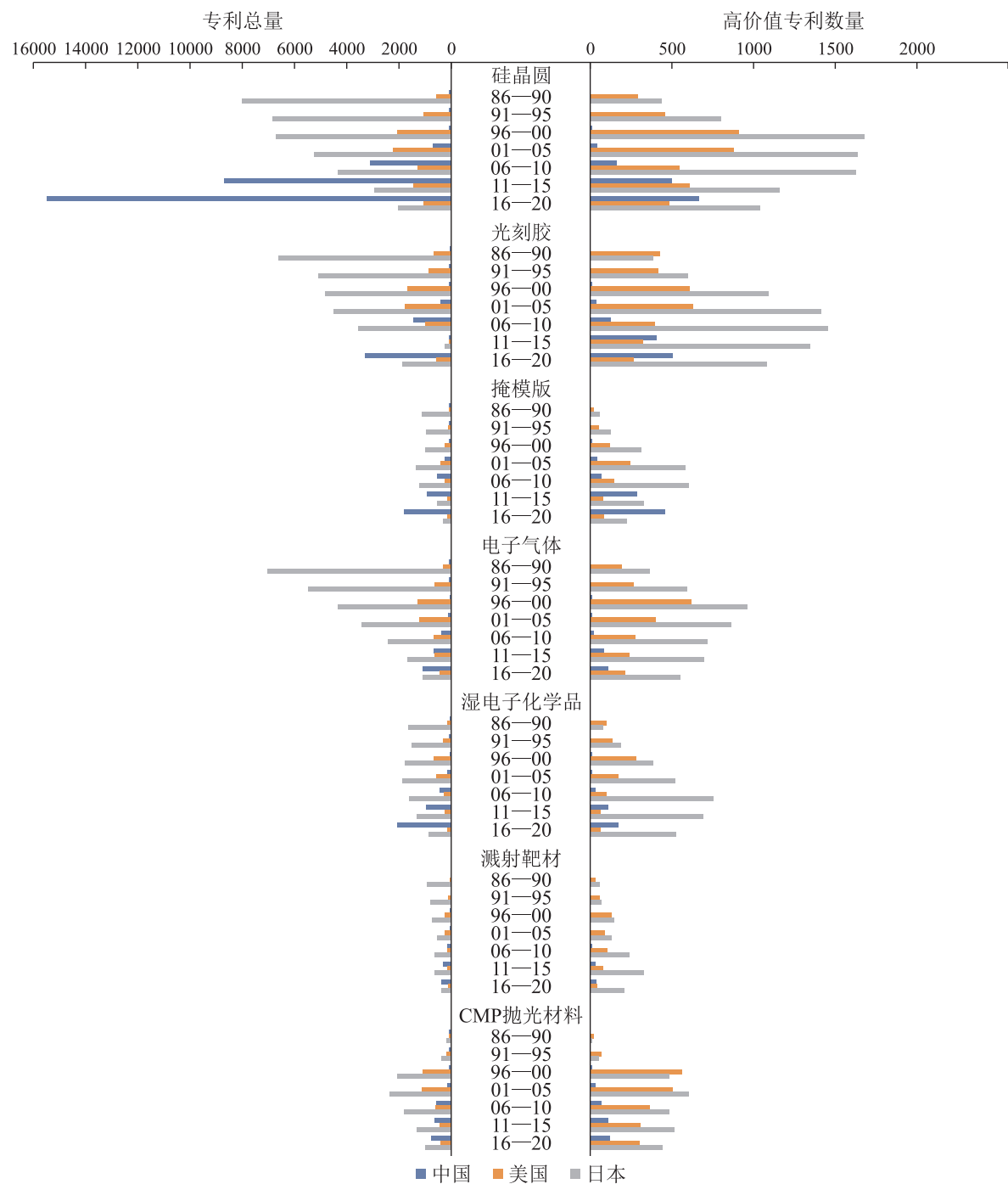


图 2 专利申请趋势对比

Fig.2 Comparison of Patent Application Trends

专利权人往往会考虑同族专利带来的经济收益,通常只有效益大于申请成本时才会进行申请,基于此,同族专利可以侧面反映出专利的技术价值,因此本文将海外同族的专利视为高价值专利^[28-30]。对集成电路材料的高价值专利申请趋势进行分析,从申请数量可以得出中国在各项材料上均与美国和日本差距明显。日本的高价值专利数量最多,对应的专利总量也大。从比重上看,美国的高价值专利占比最大,中国最少。且中国的高价值专利比重远远低于其他两个国家。以掩模版为例,中国的高价值专利数量约占其专利总量的 20%,而美国可以达到 60%。中美日三国的高价值专利数量在时间维度上存在不同的特点,美国和日本表现出先增长后衰减趋势,日本起步早,但是在 1996—2010 年间才是高质量产出的时期。中国呈现高价值专利申请的增长趋势。

在硅晶圆、光刻胶、湿电子化学品方面,中国专利申请势头迅猛,但质量有待提升。从专利总量上,中国虽然起步晚,但发展势头迅猛。高价值专利上,三个国家差异相对较小,中国的高价值专利的数量较少,与总量表现并不一致,呈现量多但质不优的特点,而日本在高价值专利上有明显优势。硅晶圆方面的专利虽然申请总量多,但是高价值数量并不突出,反而光刻胶在高价值专利上表现较好。

在掩模版方面,中国发展势头迅猛,专利申请总量和高价值专利数量均赶超美国和日本。日本在掩模版方面的表现与其他六项材料的整体趋势不一致,发展的高峰期在 2001—2010 年,之后迅速衰落。高价值专利上,三个国家差异相对较小,与专利总量趋势一致,且中国的高价值专利高于美国和日本,是产业链上唯一一个高价值专利具有优势的材料。中国在掩模版方面的高价值专利

比重相对较高(24.5%),但仍与美国(59.1%)和日本(34.7%)有差距。

在电子气体、溅射靶材方面,中国起步晚,专利申请总量与美日两国存在巨大差距,日本在这些材料上具有绝对优势。中国溅射靶材专利申请数量较少,仅有 783 件,与数量最多的硅晶圆(28053 件)相比两者相差三十余倍。但是,中国近十年的发展较快,专利总量上有超越美日的趋势。

在 CMP 抛光材料方面,中国高价值专利比重相对较高(16.4%),但仍与美(56.0%)日(28.8%)有差距。该类材料的专利申请总数较少,仅有 2048 件,但在高价值专利上表现突出。

通过对各项材料的专利申请趋势进行分析,发现中国在掩模版、硅晶圆上相对美日差距较小,溅射靶材、电子气体、CMP 抛光材料方面仍存在较大的不足,还需要做进一步专利布局,同时提升专利质量。

3.1.2 论文发表趋势

在论文总量上,相较于专利方面的差异而言,中美日相差并不大。这三个国家在时间维度上存在不同的特点,中国呈现增长趋势,美国和日本呈现先增长后衰减趋势,发展较为均衡(图 3)。

根据长尾分布效应,本文设置被引频次大于 25(即前 20%)的论文作为高被引论文。对集成电路材料相关高被引论文发表趋势进行分析可以发现,中国的高被引论文数量与总发文量不成正比,总发文量多于美日,但高被引论文数量尚未呈现明显优势;美国在论文与专利方面表现相同,更注重质量;而日本的论文数量过低,与专利表现情况不一致,主要因为日本的集成电路相关企业多,落地应用成熟,更偏向于专利申请。这三个国家的高质量论文数量在时间维度上均呈现先增长后衰减趋势,其中主要原因除论文本身可能创新性

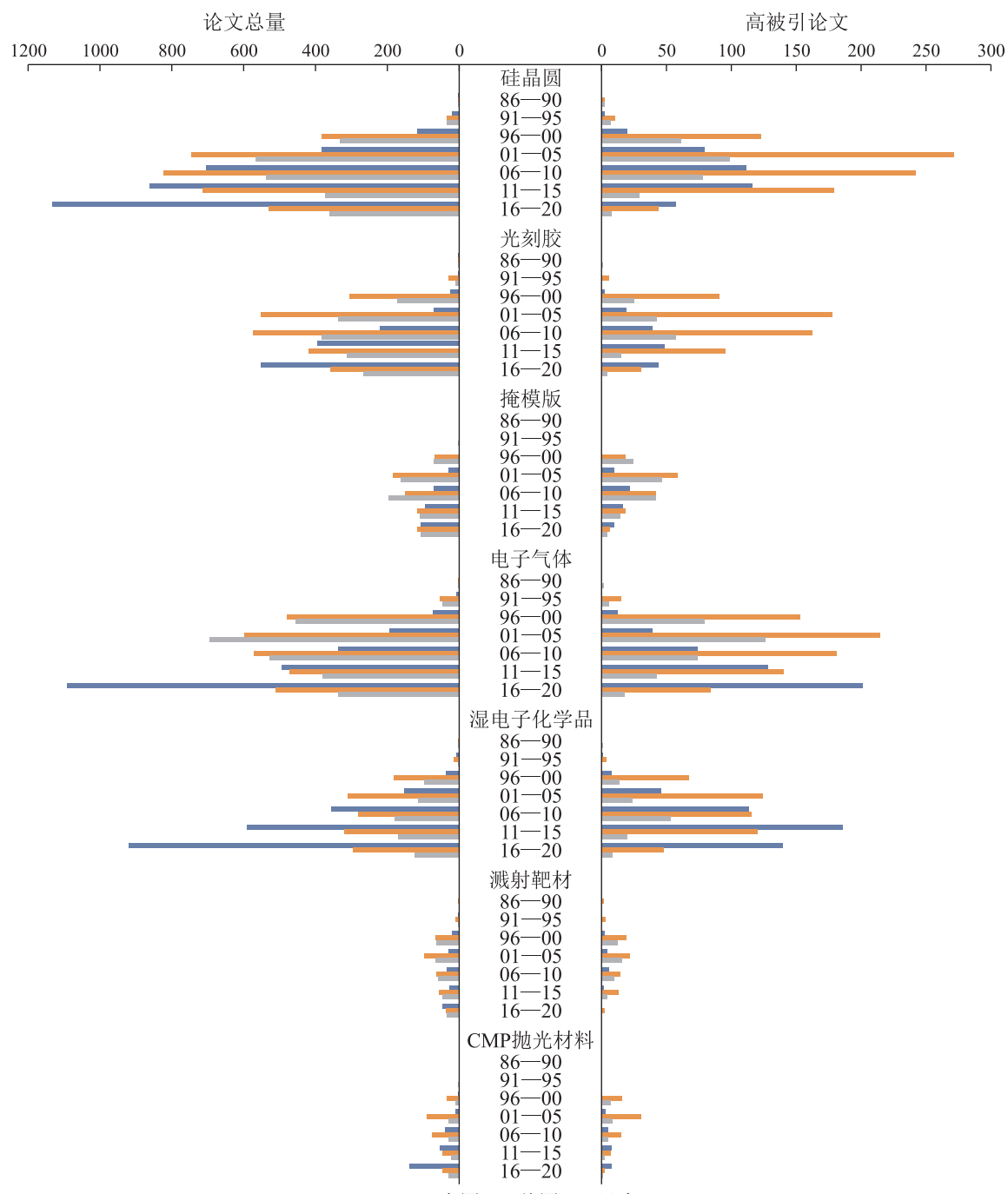


图 3 论文发表趋势对比

Fig. 3 Comparison of Paper Publication Trends

不够外,也可能是原来被引用最多的论文已经广为人知,比那些被引较少的论文更容易被看到和扩散。总体上,2000—2010 年作为集成电路材料领域发展的高峰期,高被引数量较多,论文质量较高。同时,随着所发表的论文数量增加,学者越来越

倾向引用已经被充分引用的论文,造成这一时间段内的高被引论文数量相对较多。

在硅晶圆、光刻胶方面,中国论文总量增长迅速,近年来逐步赶超美日,但是高被引论文比例仍处于较低水平;在掩模版方面,三个国家论文总量

和高被引论文数量上均基本持平,差异并不明显;在电子气体、湿电子化学品方面,中国在论文总量和高被引论文数量上均发展迅猛,实现了较大程度的超越;在溅射靶材方面,中国和日本的高被引论文数量极少,无论是论文总量还是高被引论文数量在三个国家的表现均差于其他材料;在 CMP 抛光材料方面,三个国家的论文总量都较少,中国的论文总量和高被引论文数量均远远高于美国和日本,而高被引论文比重相对较高,但仍与美日两国存在差异。

总体而言,中国在论文总量上均存在优势,且在电子气体、湿电子化学品、CMP 抛光材料等材料上的高被引论文比重相对较高,呈现出赶超趋势,在其他材料上仍与美日有差异。跟美日相比,中国在论文方面的表现情况比专利好,在硅晶圆、光刻胶等领域更注重专利申请,在电子气体、湿电子化学品等领域更注重论文发表,而掩模版、溅射靶材、CMP 抛光材料两方面数量都较少。

3.2 中美日研发机构数量差异分析

3.2.1 专利申请机构

中美日三个国家专利申请机构数量,与专利数量趋势基本一致。中国在机构总量上略有优势,但申请高价值专利的机构不足。对应到专利数量

上,中国机构的平均专利申请量低,机构数量多但是实力弱(图 4)。

在硅晶圆、掩模版、湿电子化学品方面,中国的机构数量较多,紧随日本之后,强于美国,但是高价值专利申请机构数量相对较少,体现出机构水平差异较大,其中在掩模版上,中国的专利数量没有明显优势,但是申请机构较多,且高价值专利申请机构占比高;在电子气体方面,中国的机构数量和高价值机构数量极少,且没有明显的龙头企业,日本申请专利的机构达到中国的数十倍,拥有电气株式会社、富士通株式会社、松下电器产业株式会社等多家龙头企业;在光刻胶、溅射靶材、CMP 抛光材料方面,中国的机构数量和高价值机构数量均略低于美国和日本。

3.2.2 论文发表机构

从论文发表机构上看,各个国家在产业链各个环节都相差不大,美国略多;高被引论文上,美国优势更加明显,这与论文发表总量上呈现的趋势一致(图 5)。

专利在不同材料上机构情况并不一致,而论文发表的机构情况相差并不大。中国论文总量较多,但是机构数量上反而低于美国和日本,呈现出论文数量多、机构少的趋势,而日本恰恰相反。

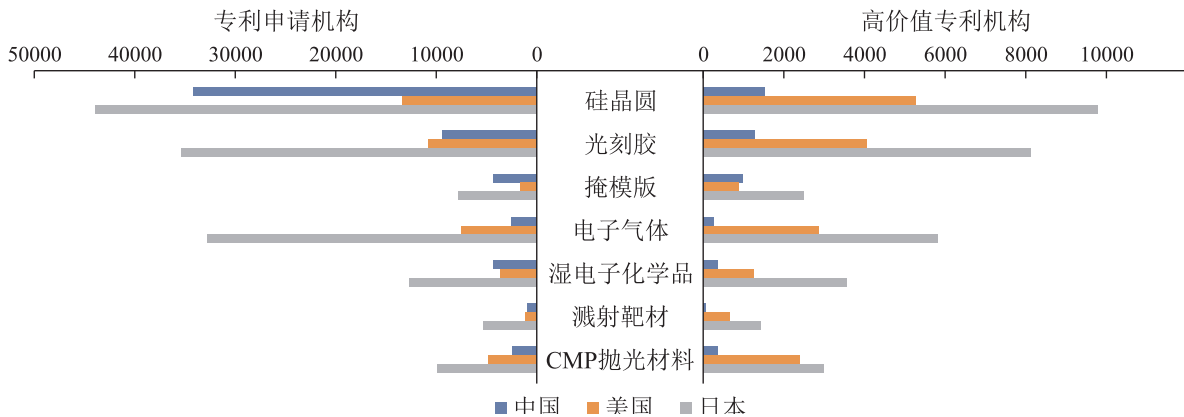


图 4 专利申请机构数量对比

Fig. 4 Comparison of the Number of Patent Application Organizations

3.3 中美日企业数量差异分析

企业的发展是产业落地情况的具体表现,可以通过产业链上申请专利的企业数量分析技术的落地情况(图 6)。本文中的企业来自于专利数据,由专利申请机构标引得到。

专利申请的机构中,企业占比较多,高价值专利更多由企业申请,企业数量与专利申请机构情况表现基本一致。日本的企业占申请机构的比例极高,企业往往更重视专利申请,也印证了日本专利量多而质优,论文却相对较少的原因。中国的占比略低于日本,美国的更少(表 2)。

以光刻胶为例,美国企业占专利申请机构比例只有 60%,这表明与中国和日本相比,美国的科

表 2 专利申请企业占专利申请机构比例

Tab.2 Proportion of Patent Applicant Enterprises to Patent Applicant Organizations

	中国	美国	日本
硅晶圆	87%	63%	91%
光刻胶	83%	60%	91%
掩模版	95%	68%	90%
电子气体	69%	60%	89%
湿电子化学品	88%	56%	87%
溅射靶材	56%	64%	90%
CMP 抛光材料	83%	69%	89%

研机构相对擅长于申请专利。而日本企业更擅长于申请专利,印证了日本在光刻胶领域产业上比较发达。截至 2020 年,全球半导体光刻胶领域主要被日本合成橡胶株式会社(JSR)、日本东京应化

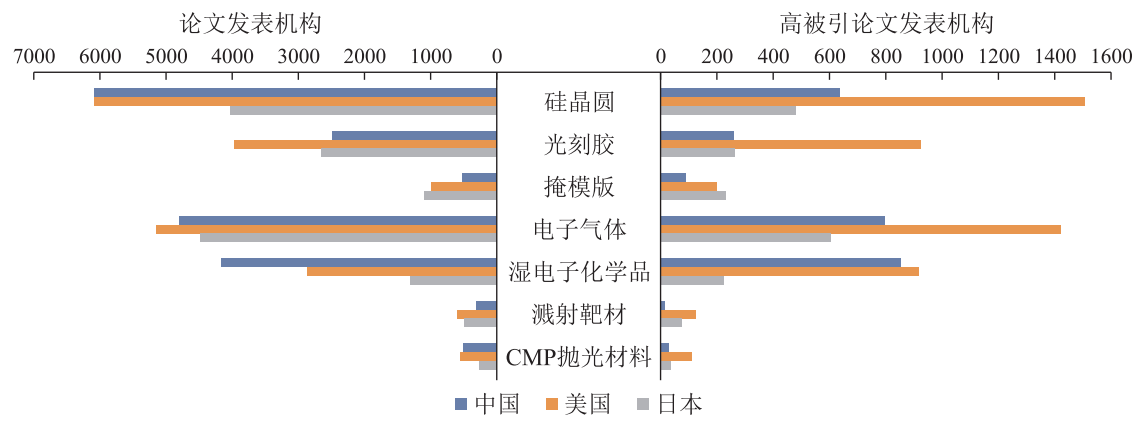


图 5 论文发表机构数量对比

Fig.5 Comparison of the Number of Paper Publication Organizations

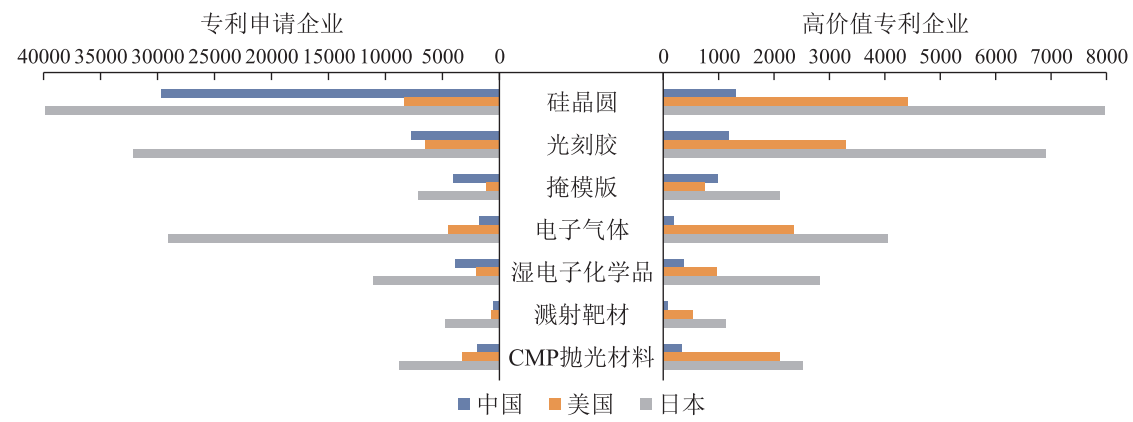


图 6 专利申请企业数量对比

Fig.6 Comparison of the Number of Patent Application Enterprises

工业株式会社(东京应化 TOK)、日本信越化学工业株式会社(信越化学)、富士胶片集团等头部厂商垄断^[31]。

3.4 中美日技术差异分析

3.4.1 IPC 差异

选取每个材料 Top20 的 IPC 分类号对三个国家数据进行分析可以得知,中美日各国在不同材料上的关注点并不一致(表 3)。

以硅晶圆为例,中国的专利保护主要集中在生产过程中的设备,重点关注 H01L31/18(专门适用于制造或处理器件或其部件的方法或设备)和 H01L21/67(专门适用于在制造或处理过程中处理半导体或电固体器件的装置;专门适合于在半导体或电固体器件或部件的制造或处理过程中处理晶片的装置)。美国的专利保护主要集中在半导体电池,重点关注 H01L21/44(在半导体材料上制造电极)和 H01L21/48(在半导体器件组装之

前制造或处理部件,例如容器)。日本的专利保护主要集中在制造过程中的制备方法和技术,重点关注 H01L21/205(应用气态化合物的还原或分解产生固态凝结物的,即化学沉积)和 H01L21/301(半导体再细分成分离部分,例如分隔)。

除此之外,美国和日本还有一些区别于中国的共同关注点,如电子气体和湿电子化学品在集成电路生产过程中的应用,代表性 IPC 为 H01L21/302(更多集中于改变半导体材料的表面物理特性或形状的,例如腐蚀、抛光、切割,以及机械处理,例如研磨、抛光、切割),而中国相关的专利较少。

3.4.2 关键技术差异

关键技术是指在一个系统或一项技术领域中起到重要作用且不可或缺的环节或技术,可以是当下的技术热点、难点或未来的技术突破点,也可以是对某个领域起到至关重要作用的知识^[32]。关

表 3 中美日优势 IPC¹⁾

Tab.3 Advantageous IPC in China, USA and Japan¹⁾

	中国	美国	日本	美日共同
硅晶圆	H01L31 / 18 (3660,79,44) H01L21 / 67 (2990,79,49)	H01L21 / 44 (4,177,32) H01L23 / 48 (74,173,65)	H01L21 / 205 (71,56,1244) H01L21 / 301 (9,56,774) H01L27 / 04 (24,25,769)	H01L21 / 302 (55,247,764) H01L21 / 20 (87,235,676) H01L21 / 76 (20,226,1435)
光刻胶	G03F7 / 16 (360,67,106) H01L21 / 77 (118,3,3) H01L31 / 18 (116,13,4)	H01L21 / 4763 (2,146,5) H01L21 / 44 (7,112,29)	H01L21 / 56 (57,11,971) H01L23 / 50 (0,1,772) H01L21 / 30 (4,14,678)	H01L21 / 302 (8,283,859)
掩模版	H01L27 / 32 (258,1,3) C23C14 / 04 (241,1,4) H01L27 / 12 (238,0,12)	—	H01L21 / 30 (1,5,266) G02B5 / 20 (6,3,133) G03F1 / 32 (10,2,88)	G03F9 / 00 (26,99,120)
电子气体	H01L21 / 67 (136,32,58) H01L31 / 18 (89,21,17)	C23C16 / 00 (3,313,134) B44C1 / 22 (0,92,28)	C23C16 / 50 (12,35,662) H01L21 / 3205 (5,27,458) H01L21 / 88 (0,0,421)	H01L21 / 302 (6,317,3669) H01L21 / 205 (12,141,3489) H01L21 / 31 (3,135,859)
湿电子化学品	H01L31 / 18 (226,15,14)	B44C1 / 22 (3,80,12) H01L21 / 311 (28,55,12)	G03F7 / 039 (9,3,374) G03F7 / 004 (24,16,308)	H01L21 / 302 (16,231,378)
溅射靶材	H01L31 / 032 (17,4,0)	H01J37 / 34 (0,43,12)	H01L21 / 3205 (2,4,86) C23C14 / 36 (0,0,73)	H01L21 / 285 (6,21,210)
CMP 抛光材料	H01L21 / 762 (65,8,10)	H01L21 / 4763 (1,62,11)	H01L21 / 3205 (1,14,253) B24B37 / 20 (1,14,154)	B24B37 / 00 (20,52,789)

1)小括号里的三个数字依次表示中美日的申请量。

关键词作为论文的核心要素,是对论文所涉及领域和所用技术的要点提炼,对于揭示论文所研究的技术路线、工艺等具有重要的指导作用。

本文利用关键词作为识别关键技术的依据,统计中美日在各个集成电路材料领域论文关键词的出现次数,选取每个材料 Top50 的关键词,针对其中各国的主要关键词作为核心关键词(表 4)。然后对照叙词表进行筛选,再对相关关键词在 Web of Science 核心合集中进行检索,得到相关领域的研究者、研究机构、研究进展等信息,进一步确定各国的优势技术。

表 4 中美日论文主要关键词

Tab.4 Main Keywords for Papers in China, USA and Japan

	中国	美国	日本
硅晶圆	硅片表面、沉积、晶体学取向	光刻技术	砷化镓、等离子体
光刻胶	涂层、微观结构	模型、细胞	X 射线光刻、EUV 光刻、化学放大胶
掩模版	显微光刻法、衍射	扩散、透镜	抗蚀、分辨率、晶体学取向
电子气体	电催化剂、碳纳米管	氮化镓、形核	硅烷、蚀刻、基底
湿电子化学品	一氧化碳、纳米复合材料	化学品、酸	强度、机械性能、多孔硅
溅射靶材	靶材、氮化物、纹理	原子、分子动力学、溅射放电	反应溅射、非晶碳、溅射淀积
CMP 抛光材料	材料去除、表面缺陷	吸附作用、化学机械抛光	溅射、钛

研究发现,中国的主要优势领域有异质晶圆键合技术、薄膜转移技术等,该领域的主要研究者有中国科学院上海微系统与信息技术研究所的 Lin 等;日本的主要优势领域有化学放大型抗蚀剂、极紫外光刻、硅烷、光催化光刻等,主要研究者有大阪大学的 Kozawa、Takahiro、Tagawa、Seiichi,兵库县立大学的 Watanabe T,日本产业技术研究

所的 Matsuda A, 东京大学的 Tatsuma T、Kubo W; 美国的主要优势领域有湿法刻蚀、化学物质平整,主要研究者有美国佛罗里达州立大学 Pearton S J、Araca 公司的 Philipossian Ara。

通过对论文关键词的分析可以发现,目前日本在全球集成电路材料领域仍然处于领先地位,有大量处于优势的前沿领域和知名学者,从学术界到业界的成果转化也非常成熟。中国目前从学术论文的总量上来看已经领先美日,但在极紫外光刻、化学放大型抗蚀剂、湿法刻蚀等技术上还未形成优势。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文构建了集成电路材料的产业链,并立足于产业链,围绕申请与发表趋势、机构、企业和技术四个维度,利用丰富的数据源——专利、论文、高价值专利、高被引论文分析了中美日在集成电路材料领域的技术布局差异。通过对以上四方面进行分析,我们得到相关结论如下。

1) 专利数据显示,总体上中国与美日在集成电路材料领域的差距正在缩小,但在某些特定材料上仍有较大差距。中国在掩模版、硅晶圆上相对美日差距较小,溅射靶材、电子气体、CMP 抛光材料上仍存在较大的不足。论文数据显示,中国在总量上均存在优势,在电子气体、湿电子化学品、CMP 抛光材料等材料上高被引比重相对较高,呈现出赶超趋势,但在其他材料上仍与其他国家有差距。总的来说,中国在论文方面的表现情况比专利好,在硅晶圆、光刻胶方面更注重专利申请,而在电子气体、湿电子化学品方面更注重论文的发表,剩下的几项材料两方面成果都较少。

2) 从专利申请机构上看,中国在机构总量上

略有优势,但申请高价值专利的机构不足,呈现出论文数量多,机构少的态势,说明某几家机构发表论文多。而日本恰恰相反,专利申请的机构中,企业占比较多,且高价值专利主要集中在企业。日本的企业占机构的比例极高,美国的占比少于中日。

3)在专利 IPC 方面,日本更关注制备方法和技术,中国更加关注生产过程中的设备,美国则关注半导体电池。美国和日本还有很多区别于中国的共同关注点,如关注电子气体和湿电子化学品在集成电路生产过程中的应用。

4)在关键技术方面,通过对论文关键词的分析可以发现,日本在全球集成电路材料领域仍然处于领先地位,有大量处于优势的前沿领域和知名学者,从学术界到业界的成果转化也非常成熟。中国目前从学术论文的总量上来看已经领先美日,但在某些关键技术上还未形成优势。

4.2 研究展望

本文立足于产业链提出的技术布局差异分析框架具有一定的科学性和实用性,可以作为产业情报分析的辅助工具,可揭示我国集成电路材料产业与发达国家的技术差异,为国家战略科技力量提供战略决策依据和技术创新指引。但还存在一些问题,未来可从以下三个方面深入探讨。

1)专利和论文的价值评判维度过于单一。本文利用是否有海外同族和论文的引用数量作为判断质量高低的依据具有片面性。事实上,目前针对高价值专利已经产生了包括技术、市场、法律、经济甚至战略层面等多维度、深层次的评价标准。同时,仅考虑论文的被引频次评估价值,也存在随着时间推移,论文数量增加时,已高度被引用的被引用量会更加巩固,形成高被引论文僵化的问题。因此,可以进一步将多维评价指标引入,对专利和

论文价值差距的评价将更为客观、真实。

2)国家间技术差距揭示框架有待进一步探索。在目前研究中,仅仅进行了中美日三国的差异分析,尚未达到揭示确切差距的目的。可以进一步研究评价指标来量化揭示各国之间的技术差距,构建可解释、可循证的产业技术差距揭示情报模型。

3)国家间技术关注点的差异原因有待细化解读。例如,通过 IPC 分类号,可以发现各国的技术关注点并不一致。美国和日本还有很多区别于中国的共同关注点,原因可能是美日两国合作交流密切,存在共同申请专利;也可能是两国在没有交流合作的情况下,对集成电路生产过程中不可忽视的关键技术恰好达成一致的共同关注点。其中原因应当引起重视,有待进一步细化解读。

致谢 感谢中国科学院宁波材料技术与工程研究所叶继春研究员和付耀耀助理研究员对于集成电路材料产业链梳理方面提供的专业建议。

参考文献

- [1] 方圆,徐小田. 集成电路技术和产业发展现状与趋势[J]. 微电子学,2014,44(1):81-84.
- [2] 国务院. 国家集成电路产业发展推进纲要[J]. 中国集成电路,2014,23(7):14-16.
- [3] 朱惠臣,孙晓光,杜黎明. 我国集成电路专用材料发展状况分析[J]. 集成电路应用,2021,38(2):22-25.
- [4] 中国半导体行业协会. 中国半导体产业发展状况报告(2020年版)[R]. 北京:国家信息中心,2020.
- [5] 方欣. 集成电路产业发展:现状、制约因素与促进政策[J]. 中国集体经济,2021(11):161-162.
- [6] 田仲他. 贸易摩擦压力下如何提升我国集成电路产业链安全[J]. 中国财政,2020(11):77-78.

- [7] 王阳元, 康晋锋. 硅集成电路光刻技术的发展与挑战[J]. 半导体学报, 2002(3):225-237.
- [8] 原帅, 贺飞. 中华人民共和国成立以来重大科技发展战略的演进与启示[J]. 科技导报, 2021, 39(12):36-44.
- [9] 余雪松. 我国半导体材料产业发展“步稳蹄急”[J]. 新材料产业, 2019(10):2-7.
- [10] 李传志. 我国集成电路产业链:国际竞争力、制约因素和发展路径[J]. 山西财经大学学报, 2020, 42(4):61-79.
- [11] 刘俊, 段方, 张子杨. 半导体集成电路先进封装技术专利战略研究[J]. 中国集成电路, 2021, 30(11):82-89.
- [12] 李铁成, 李茜楠. 全球集成电路关键材料产业发展态势与风险分析[J]. 中国集成电路, 2020, 29(10):11-17.
- [13] 王磊. 中国半导体材料业的状况分析[J]. 内燃机与配件, 2018(14):246-247.
- [14] 石瑛. 中国集成电路材料产业技术发展路线图(2019版)[M]. 电子工业出版社, 2019.
- [15] 李先军, 刘建丽. 产业基础领域强基战略:中国集成电路材料领域的竞争与发展[J]. 产业经济评论, 2023(5):19-33.
- [16] 闫洪波, 王阔, 郝宏波. 基于专利分析的稀土抛光材料技术发展趋势研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(18):146-150.
- [17] 赵飞飞, 赵勇. 高纯溅射靶材专利技术分析[J]. 中国科技信息, 2022(14):58-60.
- [18] 曹燕, 李琳珊, 毛一雷, 等. 基于专利信息的半导体光刻胶领域发展与现状分析[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(3):428-441.
- [19] 余丽, 盛莹婕, 许景龙, 等. 专利分析视角下我国集成电路产业“卡脖子”问题研究[J]. 数据与计算发展前沿, 2021, 3(5):40-54.
- [20] 陶金龙. 探讨中国集成电路产业的发展战略[J]. 集成电路应用, 2016(8):4-6.
- [21] 佟贺丰, 傅俊英, 曹燕. 基于专利耦合的中国、美国、日本锂离子电池技术前沿及差距分析[J]. 中国科技资源导刊, 2016, 48(2):27-35.
- [22] 陆天驰, 闵超, 高伊林, 等. 竞争情报视角下的中美人工智能技术领域差距分析——以美国商品管制清单为例[J]. 情报杂志, 2019, 38(11):25-33.
- [23] 季鹏飞, 华松逸, 张煜晨, 等. 基于引文分析的集成电路领域核心专利识别与分析[J]. 竞争情报, 2021, 17(6):40-48.
- [24] 刘宇飞, 刘怀兰, 伍思远. 基于专利文献计量的中外中高档数控机床技术差距分析[J]. 科技管理研究, 2021, 41(2):1-8.
- [25] 余海东. 半导体材料和新型显示材料产业链解构与市场需求预测[J]. 产城, 2022(6):44-47.
- [26] 冯黎, 朱雷. 中国集成电路材料产业发展现状分析[J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(3):191-196.
- [27] 李潇, 史筱飞, 金馨, 等. 基于协同创新的产业智库网络平台实践探析——以山东集成电路产业为例[J]. 科技智囊, 2022(3):49-59.
- [28] RUSSELL M. The Valuation of Pharmaceutical Intangibles [J]. Journal of Intellectual Capital, 2016, 17(3):484-506.
- [29] NEUHAUSLER P, FRIETSCH R. Patent families as Macro Level Patent Value Indicators:Applying Weights to Account for Market Differences [J]. Scientometrics, 2013, 96(1):27-49.
- [30] 周丽俭, 余康乾. 专利价值评估研究综述[J]. 经济研究导刊, 2021, 466(8):159-161.
- [31] 崔杰, 翟博涛. 国内外光刻胶发展及应用探讨[J]. 新材料产业, 2021(5):33-35.
- [32] 赵彦飞, 王孝炯, 王丽. 国家关键技术选择:三维综合指数方法研究[J]. 科学学研究, 2021, 39(6):1015-1025.

附录 1 论文数据情况

数据来源: WOS 数据库

检索时间: 2022 年 4 月 19 日

检索式:

((TS = resist*) and ((TS = resin*) or (TS = photoinitiator*) or (TS = ' Photoacid generator*') or (TS = photosensi*) or (TS = EUV) or (TS = ArF) or (TS = KrF) or (TS = ' g line ') or (TS = ' I line ') or (TS = ' Chemical* Amplif*') or (TS = 436nm) or (TS = 365nm) or (TS = 248nm) or (TS = 193nm) or (TS = 13.5nm) or (TS = ' deep ultraviolet ') or (TS = ' extreme ultraviolet ')))
 or((TS = Silicon) and (TS = wafer*))
 or((TS = gas*) and ((TS = " Electronic special*") or (TS = etch*) or (TS = " Chemical vapor deposit*") or (TS = epitaxial) or (TS = " ion implant*" or CVD)))
 or((TS = sputter*) and (TS = target*))
 or((TS = polish*) and ((TS = solution) or (TS = liquid) or (TS = fluid) or (TS = pad*) or (TS = powder) or (TS = slurry) or (TS = composition) or (TS = material*) or (TS = " chemical mechanical") or (TS = CMP)))
 or((TS = photoresist*) or (TS = " photoresist*") or (TS = " Silicon wafer*") or (TS = " Silicon substrate") or (TS = " polished wafer*") or (TS = " epitaxial wafer*") or (TS = Photomask*) or (TS = " Lithography mask*") or (TS = " Electronic gas*") or (TS = " doping gas*") or (TS = " dopant gas*") or (TS = " dilution gas*") or (TS = " diluent gas*") or (TS = " high purity reagent*") or (TS = " high purity solvent*") or (TS = " wet electronic chemical*") or (TS = " wet chemical*") or (TS = " Process Chemical*") or (TS = etchant*) or (TS = " Develop* solution") or (TS = " strip* solution") or (TS = " peel* solution") or (TS = " etch* solution") or (TS = " corrosion solution") or (TS = " clean* solution") or (TS = " rins* solution")

or(TS = " Develop* liquid") or(TS = " strip* liquid")
 or(TS = " peel* liquid") or(TS = " etch* liquid") or
 (TS = " corrosion liquid") or(TS = " clean* liquid")
 or(TS = " rins* liquid"))
 or(((TS = " integrat* circuit*") or
 (TS = Semiconductor*) or (TS = Chip*)) and
 ((TS = packag*) or (TS = test) or (TS = Probe)) and
 TS = (material*))
 or(((TS = " integrat* circuit*") or
 (TS = Semiconductor*) or (TS = Chip*)) and
 ((TS = leadframe*) or (TS = " lead frame*") or
 (TS = " lead wire*") or (TS = " Probe card") or
 (TS = " Packag* Substrate")))

附录 2 专利数据情况

数据来源: Incopat 数据库

检索时间: 2022 年 4 月 19 日

检索式:

((TIAB = (晶圆 OR 硅片 OR 硅衬底 OR 硅晶圆 OR 硅晶片 OR 抛光片 OR 外延片 OR 单晶硅 OR 光刻胶 OR 光致抗蚀剂 OR 掩模板 OR 光掩模 OR 光罩 OR 光刻掩膜版 OR 电子气体 OR 大宗气体 OR 惰性气体 OR 特种气体 OR 特殊气体 OR 刻蚀气体 OR CVD 气体 OR 稀释气体 OR 掺杂气体 OR 外延气体 OR 离子注入气体 OR 沉积气体 OR 蚀刻气体 OR 显影液 OR 去胶液 OR 剥离液 OR 刻蚀液 OR 蚀刻液 OR 腐蚀液 OR 清洗液 OR 漂洗液 OR 湿电子化学品 OR 湿化学品 OR 工艺化学品 OR 溅射靶 OR 靶材 OR 溅射镀膜装置 OR 抛光液 OR 抛光垫 OR 抛光粉 OR 抛光组合物 OR 抛光浆料 OR 抛光材料 OR 化学机械抛光) OR (TIAB = (半导体 OR 集成电路 OR 芯片 OR 晶圆) AND TIAB = (封装 OR 测试))) AND IPC = (H01L21* OR G03F7* OR H01L23* OR H01L51* OR H01L29* OR H01L27* OR C23C16*

OR C09K3* OR H01L31* OR C09K11*)) OR
((TIAB = (RESIST OR RESISTS) AND TIAB = (RESIN* OR PHOTOINITIATOR* OR “PHOTOACID GENERATOR*” OR PHOTOSENSI* OR EUV OR ARF OR KRF OR “G LINE” OR “I LINE” OR “CHEMICAL* AMPLIF*” OR 436NM OR 365NM OR 248NM OR 193NM OR 13.5NM OR “DEEP ULTRAVIOLET” OR “EXTREME ULTRAVIOLET”)) OR (TIAB = (SILICON AND WAFER*)) OR (TIAB = (GAS*) AND TIAB = (“ELECTRONIC SPECIAL*” OR ETCH* OR “CHEMICAL VAPOR DEPOSIT*” OR EPITAXIAL OR “ION IMPLANT*” OR CVD)) OR (TIAB = (SPUTTER* AND TARGET*)) OR (TIAB = (POLISH*) AND TIAB = (SOLUTION OR LIQUID OR FLUID OR PAD OR POWDER OR SLURRY OR COMPOSITION OR MATERIAL OR “CHEMICAL MECHANICAL” OR CMP)) OR (TIAB = (PHOTORESIST* OR “PHOTO-RESIST*” OR “PHOTOSENSITIVE RESIST*” OR “PHOTO-SENSITIVE RESIST*” OR “SILICON WAFER*” OR “SILICON SUBSTRATE” OR “POLISHED WAFER*” OR “EPITAXIAL WAFER*” OR PHOTOMASK* OR “LITHOGRAPHY MASK*” OR “ELECTRONIC GAS*” OR “DOPING GAS*” OR “DOPANT GAS*” OR “DILUTION GAS*” OR “DILUENT GAS*” OR “HIGH PURITY REAGENT*” OR “HIGH PURITY SOLVENT*” OR “WET ELECTRONIC CHEMICAL*” OR “WET CHEMICAL*” OR “PROCESS CHEMICAL*” OR ETCHANT OR “DEVELOP* SOLUTION” OR “STRIP* SOLUTION” OR “PEEL* SOLUTION” OR “ETCH* SOLUTION “ OR “CORROSION SOLUTION “ OR “CLEAN* SOLUTION” OR “RINS*

SOLUTION” OR “DEVELOP* LIQUID” OR “STRIP* LIQUID” OR “PEEL* LIQUID” OR “ETCH* LIQUID” OR “CORROSION LIQUID” OR “CLEAN* LIQUID” OR “RINS* LIQUID”)) OR ((TIAB = (“INTEGRAT* CIRCUIT*” OR SEMICONDUCTOR* OR CHIP*) AND TIAB = (PACKAG* OR TEST OR PROBE) AND TIAB = (MATERIAL*)) OR (TIAB = (“INTEGRAT* CIRCUIT*” OR SEMICONDUCTOR* OR CHIP*) AND TIAB = (LEADFRAME OR “LEAD FRAME” OR “LEAD WIRE” OR “PROBE CARD” OR “PACKAG* SUBSTRATE”)))) AND IPC = (H01L21* OR G03F7* OR H01L23* OR H01L51* OR H01L29* OR H01L27* OR C23C16* OR C09K3* OR H01L31* OR C09K11*))

作者贡献说明

孙文君:论文撰写,数据采集与加工,专利数据分析;

吕璐成:论文框架设计,论文修改;

张 凯:数据采集与加工,基于论文数据的技术分析;

刘 婷:数据采集与加工,检索策略制定;

韩 涛:分析思路整理,分析框架优化;

赵亚娟:论文选题,提出修改意见。

作者简介



吕璐成:副研究员,博士;中国科学院文献情报中心知识产权研究部副主任,知识产权大数据高级分析师;承担和参与中国科学院战略研究专项、国家科技图书文献中心专项8项;主要研究方向:知识产权

情报研究、技术挖掘。