

# 激光与光电子学进展

## 光刻技术科学知识图谱和多维主题分析

李兵<sup>1</sup>, 车尧<sup>2</sup>, 徐辉<sup>1</sup>, 张志刚<sup>1</sup>, 周洪<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>科学技术部科技人才交流开发服务中心, 北京 100045;

<sup>2</sup>中国科学技术信息研究所, 北京 100038;

<sup>3</sup>中国科学院武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430071;

<sup>4</sup>中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100191

**摘要** 基于光刻技术领域相关论文和全球“高被引科学家”名单, 分析了光刻技术领域的研究时间和国家、研究机构、研究资助机构及高水平基础研究人才的分布特征, 并在此基础上开展光刻领域论文的文献计量分析, 分析光刻领域的研究方向、主题和发展趋势。结果表明, 目前光刻技术论文产出呈现下降趋势, 美国在该研究领域具有领先优势, 光学光刻及掩模、光刻胶及电子束光刻、极紫外(EUV)光刻等技术主题研究仍以国外机构为主。我国已开展布局高数值孔径 EUV 光刻、导向自组装光刻、石墨烯基材料、机器学习的应用等新兴主题。本文提出光刻技术研发的总体布局、研究机构、企业力量、人才机制的建议, 以期为相关领域决策和研究提供科学依据。

**关键词** 光刻技术; 科学知识图谱; 多维主题分析; 基础研究; 高被引科学家

中图分类号 G316 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231551

## Lithography Technical Science Knowledge Map and Multidimensional Theme Analysis

Li Bing<sup>1</sup>, Che Yao<sup>2</sup>, Xu Hui<sup>1</sup>, Zhang Zhigang<sup>1</sup>, Zhou Hong<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Exchange & Development & Service Center of Science & Technology Talents of The Ministry of Science & Technology, Beijing 100045, China;

<sup>2</sup>Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China;

<sup>3</sup>Wuhan Document and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

<sup>4</sup>Department of Information Resources Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China

**Abstract** Based on earlier reports in the lithography technology field and global list of “highly-cited scientists”, the research time and distribution characteristics of countries, research institutions, research funding institutions, and high-level basic research talents in the lithography technology are analyzed. Based on these two aspects, a bibliometric analysis of published works in the lithography technology field was performed to investigate the research direction, themes, and development trends in this field. The results show that the output of lithography technology papers is currently declining, and the United States has a leading edge in this research field. Research on optical lithography and masking, photoresist and electron beam lithography, extreme ultraviolet (EUV) lithography, and other technical topics is still dominated by foreign institutions. China has launched research on emerging themes, including high-numerical-aperture EUV lithography, guided self-assembly lithography, graphene-based materials, and machine learning applications. This study proposes suggestions for improving the overall layout, involved research institutions, enterprise strength, and talent mechanism of lithography technology research and development to provide a scientific basis for decision-making and research directions in related fields.

**Key words** lithography technology; science knowledge map; multidimensional thematic analysis; basic research, highly cited scientists

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-07-28; 录用日期: 2023-09-06; 网络首发日期: 2023-09-19

通信作者: \*zhouh@mail.whlib.ac.cn

# 1 引 言

基础研究是科技创新的源头,是建设世界科技强国的基石。当前,新一轮科技革命和产业革命加速变革,世界各主要科技强国都重点布局基础科学研究,将科技创新链条的布局前移到基础研究。在科技创新领域,我国基础科学研究相对薄弱的短板日益突出。光刻技术是微电子与集成电路制备的关键工艺技术,同样也存在缺乏自主掌握的核心技术、严重依赖国外技术的短板,已经成为制约我国高端芯片等相关制造业发展的瓶颈,掌握包括光刻技术等关键核心技术对于我国建设创新型国家和世界科技强国至关重要。

目前,对于光刻技术领域的研究主要集中在技术本身,国外的研究起步于 20 世纪 70 年代,在 21 世纪初达到研究的最高峰期<sup>[1-5]</sup>。我国的研究相对较晚,主要的研究起步于 20 世纪 90 年代左右<sup>[6-10]</sup>,在 21 世纪初开始快速增长<sup>[11-13]</sup>。除了具体的技术领域研究之外,国内学者对光刻技术的发展现状、趋势和核心技术识别和预测等方面也进行了研究。姜军等<sup>[14]</sup>从涂胶、曝光、光刻胶和深度光刻等方面介绍了光刻技术的现状和发展趋势。毛荐其等<sup>[15]</sup>以光刻领域专利共类为基础识别关键核心技术,构建关键核心技术识别模型,对光刻技术发展趋势进行预测。杨武等<sup>[16]</sup>以光刻技术为例,构建核心特征测度指标模型对光刻核心技术动态趋势进行识别分析。张子南等<sup>[17]</sup>结合在 EUV 光刻三维掩模成像领域的研究,介绍了相关技术的研究进展,并对该领域的发展趋势进行了展望。另外,国内学者也对具体领域如何取得关键核心技术的突破进行研究<sup>[18-21]</sup>。综上所述,目前对于光刻技术领域的研究主要集中在具体技术领域,以及对技术的现状、趋势和如何在核心技术上取得突破等方面,对于光刻技术领域研究的分布特征和研究主题分析方面的文章还很鲜见。

本文通过使用 Web of Science 核心库获取光刻技术领域相关论文,结合科睿唯安 Essential Science Indicators(ESI)全球“高被引科学家”名单,分析了光刻技术领域的时间、国家、研究机构、资助机构和高水平基础研究人才的分布特征,并在此基础上开展光刻领域论文的文献计量分析,剖析光刻技术领域的研究方向、主题和发展趋势,提出政策建议,以期为我国光刻技术领域的决策、研究及应用发展提供科学理论依据。

## 2 研究设计与方法

### 2.1 数据获取及预处理

本文分析数据来自 Web of Science 核心库 SCI-E、SSCI、A&HCI,光刻技术检索式为 TS=((“lithograph\*” OR “microlithograph\*” OR “photolithograph\*” OR stepper OR scanner OR “step-and-repeat” OR “step-and-scan”) and (mask OR photomask OR lens OR

resist OR photoresist OR DUV OR EUV OR “Extreme UV” OR “extreme ultraviolet” OR “Surface plasma”)),数据检索时间 2023 年 5 月 20 日,语言选择英语(English),文献类型为期刊论文和会议录论文。本研究共检索得到光刻技术领域的相关研究论文 37891 篇。

### 2.2 分析工具和方法

本文使用 R 语言工具对数据进行清洗,使用 bibliometrix 软件包<sup>[22]</sup>开展科学计量分析,使用 VOSviewer 构建光刻技术研究领域的主题聚类分析、主题演化等科学知识图谱,对国内外光刻技术领域研究进行全面深入分析。

## 3 全球光刻技术研究分布特征分析

### 3.1 研究时间和国家分布特征

光刻技术领域相关论文的发展趋势如图 1 所示,2007 年之前快速增长,但 2008 年之后呈现下降趋势。相关论文发表最早起始于 1965 年,Ingraham RC 在《Semiconductor Products and Solid State Technology》上发表《用于集成和薄膜电路的光刻掩模》(Photolithographic masks for integrated and thin film circuitry)。在 1965 年至 1978 年,相关研究较少,年发文量在 10 篇以下。在 1979 年至 1989 年增长缓慢,年发文量从 1979 年的 12 篇增长至 1989 年的 49 篇。1990 年开始,光刻技术相关研究进入快速增长阶段,从 1990 年的 110 篇增长至 1999 年的 1131 篇,在 2007 年论文数量达到历史高峰 1802 篇。2008 年至今,光刻技术相关研究论文整体呈现下降趋势。

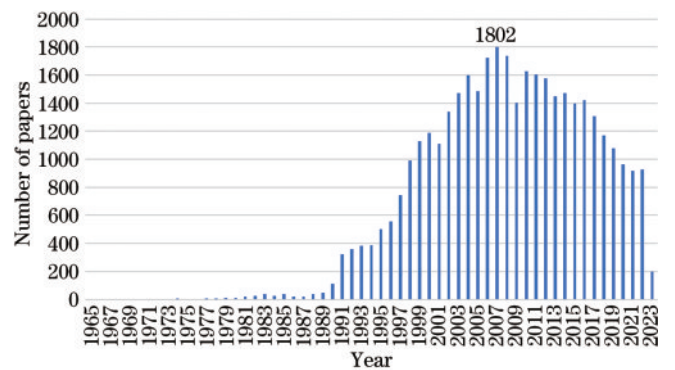


图 1 光刻技术研究领域论文发表趋势

Fig. 1 Trends in publications in the field of photolithography research

从光刻技术领域的论文发表国家来看,开展相关研究最多的国家是美国,发表相关论文 12732 篇,占国际论文总量的 33.6%,其次是日本(6539 篇)、德国(3896 篇)、中国(3709 篇)、韩国(2866 篇),如图 2 所示。美国早在 1973 年就开展相关研究,1990 年至 2007 年期间论文数量快速增长,但 2008 年之后出现下降趋势。日本从 20 世纪 70 年代末开展相关研究,德

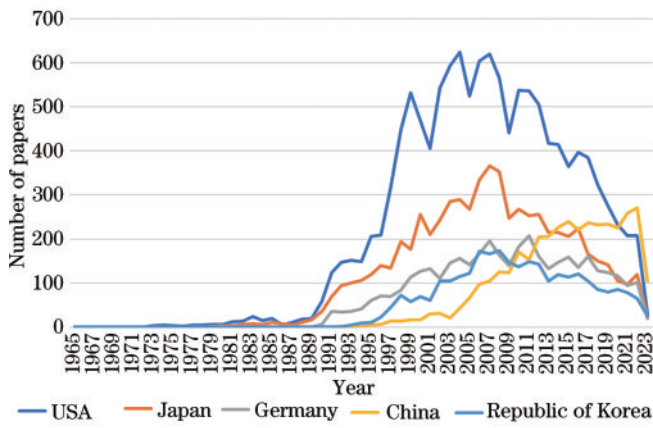


图 2 光刻技术研究领域主要国家的论文发表趋势

Fig. 2 Trends in publications in major countries in the field of photolithography research

国、韩国从 20 世纪 90 年代开展相关研究,其论文数量变化趋势与美国相似。中国也是从 20 世纪 90 年代开始开展相关研究,但相关研究论文在 2004 年之前增长缓慢,2005 年至 2015 年呈现快速增长,但 2015 年之后增长趋势有所减缓但仍保持增长。与光刻领域的论文出现拐点不同,国外相关的高端光刻技术却还在一直保持快速发展,究其原因可能是光刻技术摩尔定律逼近物理极限使得理论的研究相对停滞,也可能是行业

巨头的垄断、研究和技术门槛的不断提升使得相对应的年度论文数量呈现下降趋势。

### 3.2 研究机构分布特征

光刻技术研究领域发文数量最多的 15 家机构,主要来自欧美国家,如表 1 所示。中国科学院位居第一,发表相关论文 1199 篇,占光刻技术研究领域论文总量的 3.16%,主要来自中国科学院大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院光电技术研究所、中国科学院微电子研究所、中国科学技术大学等直属机构。美国能源部排名第二,发表相关论文 1103 篇,主要来自劳伦斯-伯克利国家实验室、桑迪亚国家实验室、劳伦斯-利弗莫尔国家实验室、阿贡国家实验室等。美国 IBM 公司排名第三位,发表相关论文 1000 篇,是美国在光刻技术研究领域实力较强的研究机构。

从机构类型来看,15 家机构中有 11 家为科研机构或高校,大多是国家级科研机构,如中国科学院、美国能源部、法国国家科学研究中心、瑞士联邦理工学院及研究所联合体、德国弗劳恩霍夫协会等。4 家为大型高科技巨头,包括美国 IBM 公司、荷兰 ASML 公司、韩国三星公司、美国英特尔公司,高度重视科研经费投入,独立开展光刻技术领域的基础研究和技术应用,并与科研机构建立合作关系。这表明以企业为主导开展基础研究,已成为光刻技术领域重要的创新模式之一。

表 1 光刻技术研究领域发文数量最多的 15 家机构

Table 1 Top 15 institutions with the highest number of publications in lithography research

No.	Institution	Number of papers	H index	Average cited times	Average number of other citations	Citation frequency	Frequency of citation
1	Chinese Academy of Sciences	1199	41	8.21	7.37	9846	8835
2	United States Department of Energy	1103	66	20.22	18.24	22306	20121
3	IBM Company	1000	61	18.64	17.25	18638	17254
4	Belgian Interuniversity Microelectronic Center(IMEC)	755	29	7.48	6.33	5645	4780
5	ASML Company	723	34	8.79	7.50	6352	5421
6	Samsung	703	33	8.52	8.04	5993	5655
7	France Centre National de la Recherche Scientifique	691	44	17.59	16.93	12157	11700
8	Swiss Federal Institute of Technology and Research Institute Consortium	656	62	22.64	20.55	14852	13478
9	University of California, Berkeley	656	58	23.85	22.71	15648	14900
10	Osaka University	562	50	16.20	8.26	9107	4641
11	Fraunhofer Association of Germany	544	38	12.31	11.26	6697	6126
12	Intel Corporation in the United States	472	35	11.26	10.30	5317	4862
13	Massachusetts Institute of Technology	462	60	29.60	28.23	13674	13043
14	Helmholtz Federation of Germany	441	44	21.95	20.84	9682	9192
15	University of Wisconsin	408	37	17.13	15.79	6988	6444

从发文影响力来看,美国能源部、瑞士联邦理工学院及研究所联合体、美国 IBM 公司、美国麻省理工学院、美国加利福尼亚大学伯克利分校的 H 指数达到 58 以上,平均被引次数达到 17.25 以上,具有较高的影响

力。中国科学院的 H 指数为 41,平均他引次数为 7.37,与影响力较高的机构仍存在一定差距。

### 3.3 研究资助机构分布特征

从资助机构来看,主要国家的国家层面和相关科

技管理部门对光刻技术研究高度重视,如表 2 所示。中国科学院光刻技术相关研究的资金资助主要来自中国国家自然科学基金委员会、国家重点基础研究发展计划、中国科学院等。美国机构资金资助来源较为

广泛,既包括美国国家科学基金会以及政府部门资助,如美国能源部、美国国防部、美国卫生与公众服务部、美国国防高级研究计划局等,还包括来自英特尔公司等企业的资助,以及欧盟委员会、英国科研创新

表 2 光刻技术研究领域论文的主要资助机构  
Table 2 Major grants fund in the field of photolithography research

No.	Institution	Research main funding institutions (note: number in parentheses represents number of sponsored publications)
1	Chinese Academy of Sciences	National Natural Science Foundation of China (592), National Key Basic Research and Development Program (139), Chinese Academy of Sciences (69), National High tech Research and Development Program of China (42), National Science and Technology Major Project of China (40)
2	United States Department of Energy	Department of Energy (272), National Science Foundation (82), Semiconductor Manufacturing Technology Strategic Alliance (40), National Nuclear Safety Administration (30), Department of Defense (22)
3	IBM Company	UK Office for Research and Innovation (289), UK Council for Engineering and Physical Sciences (262), European Commission (92), Irish Science Foundation (40), European Research Council (27)
4	Belgian Interuniversity Microelectronic Center (IMEC)	European Commission (29), Flanders Research Foundation (17), European Leadership Electronics and Systems (12), Horizon 2020 Research and Innovation Program (10), National Science Foundation of the United States (9)
5	ASML Company	ASML (20), Dutch National Organization for Scientific Research (15), German Federal Ministry of Education and Research (9), Zeiss Group (5), European Commission (5)
6	Samsung	Samsung Corporation (29), National Research Foundation of Korea (26), Strategic Alliance for Conductor Manufacturing Technology (20), Ministry of Education, Science and Technology of Korea (19), Samsung Electronics Co., Ltd. (18)
7	France Centre National de la Recherche Scientifique	French National Research Agency (93), European Commission (33), Renatech Network (30), National Center for Scientific Research (12), National Science Foundation (10)
8	Swiss Federal Institute of Technology and Research Institute Consortium	Swiss National Science Foundation (80), European Commission (79), European Commission Joint Research Center (21), UK Engineering and Physical Science Research Council (14), UK Office for Research and Innovation (14)
9	University of California, Berkeley	Department of Energy (106), National Science Foundation (55), Semiconductor Manufacturing Technology Strategic Alliance (28), Intel Corporation (27), Department of Defense (14)
10	Osaka University	Ministry of Education, Culture, Science and Technology of Japan (134), Japan Academic Revitalization Association (116), Japan KAKENHI Foundation (112), Japan New Energy Industry Technology Comprehensive Development Agency (36), Japan Science and Technology Revitalization Agency (10)
11	Fraunhofer Association of Germany	German Federal Ministry of Education and Research (34), German Science Foundation (32), European Commission (25), European Commission Joint Research Center (8), China National Natural Science Foundation (8)
12	Intel Corporation in the United States	Intel Corporation (46), US Department of Energy (17), National Institute of Standards and Technology (10), National Science Foundation (10), Australian Research Council (8)
13	Massachusetts Institute of Technology	National Science Foundation (36), Department of Defense (23), Department of Energy (16), Defense Advanced Research Projects Agency (13), Department of Health and Human Services (13)
14	Helmholtz Federation of Germany	German Science Foundation (61), European Commission (27), Karlsruhe Institute of Optics and Photonics (23), German Federal Ministry of Education and Research (20), Karlsruhe Nanofacilities (15)
15	University of Wisconsin	National Science Foundation (33), Mathematical and Physical Sciences Bureau (14), Intel Corporation (12), Semiconductor Manufacturing Technology Strategic Alliance (12), Semiconductor Research Alliance (9)

办公室、英国工程与物理科学研究委员会、澳大利亚研究理事会等其他国家资金的资助。比利时微电子研究中心、荷兰 ASML 公司为代表的欧洲研究机构, 资金资助主要来自欧盟委员会、各国国家科学基金会、欧洲领导力电子元件和系统、美国国家科学基金会等。

### 3.4 高水平基础研究人才分布特征

高水平的基础研究人才是推进原始创新、提升基础研究水平、赢得国际竞争主动的战略资源。自 2014 年起, 科睿唯安每年会通过 ESI 发布“高被引科学家”名单, 遴选全球最具影响力的科研精英, 并在 2018 年增加交叉学科领域。鉴于光刻技术领域交叉学科的特点, 本文分析了入选 2019 至 2022 年度 ESI “高被引科学家”名单的光刻技术领域科学家, 筛选了发文量在 5 篇以上的科学家, 共 66 位, 作为研究该领域高水平基础研究人才的对象。这些科学家来自全球 18 个国家或地区, 涉及 80 个机构。

2022 年美国光刻技术领域高水平基础研究人才共有 11 人, 位居全球第一; 中国位居第二, 共有 7 人, 如表 3 所示。由于美国等国家发文量在 2010 年后呈现下降趋势, 中国 2010 年保持增长趋势, 而 ESI “高被引科学家”名单主要计算近年来的论文数据, 可能会导致发文较多、但近期不活跃的学者不在名单中。

表 3 2019 年—2022 年光刻技术领域高水平基础研究人才的国家排名分析

Table 3 Country ranking analysis of high-level basic research talent in lithography from 2019 to 2022

Country	2019	2020	2021	2022
USA	7	9	12	11
China	3	4	6	7
Singapore	1	1	1	1
Germany	1	2	2	0
UK	1	1	0	0

通过对 2019—2022 年“全球高被引科学家”名单进行汇总分析发现, 光刻技术领域高水平基础研究人才大多数集中在交叉学科, 并呈上涨的趋势, 从 2019 年的 6 人次增长到 2022 年的 14 人次, 如表 4 所示。除了交叉学科, 高水平基础研究人才还分布在物理学、材料科学、化学等领域。

表 4 光刻技术领域高水平基础研究人才的学科领域分布  
Table 4 Distribution of high-level basic research talents in the field of lithography by subject area

Field	2019	2020	2021	2022
Crossing field	6	23	16	14
Physics	1	1	2	4
Materials science	2	1	1	1
Chemistry	4	3	1	0

## 4 全球光刻技术研究主题分析

### 4.1 研究方向分析

从研究方向来看, 光刻技术研究领域属于多学科交叉领域, 涉及光学、物理学、工程学、材料科学、化学、影像科学 (imaging science photographic technology) 等多个研究方向, 如图 3 所示。其中, 光学相关研究最多, 达到 17201 篇, 约占论文总数的 45.39%, 其次是物理学和工程学, 分别达到 16148 篇和 14959 篇。

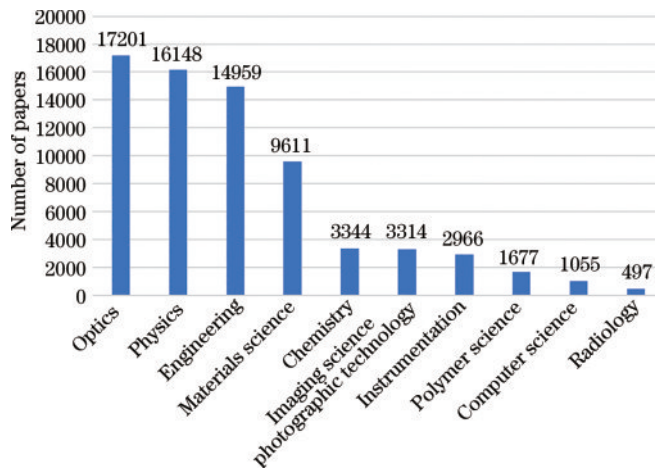


图 3 光刻技术研究领域的主要研究方向  
Fig. 3 Main research directions in the field of photolithography

### 4.2 研究主题分析

本研究使用 VOSviewer 提取共现词频为 10 次以上的高频关键词 2856 个, 构建关键词共现网络聚类图谱, 展示光刻技术研究领域的研究主题情况, 如图 4 所示。地图上的集群类型是由集群存在的词的类型决定的, 每个节点代表地图中的一个关键词, 而关键词之间的弧线表示两者之间的关系。节点的大小表示关键词的权重, 节点越大, 表示相关研究就越多。节点之间的边也有权重, 权重越高, 意味着对它们之间关系的研究越多。

在此基础上, 明确各个聚类所涵盖的高频关键词, 结合关键参考文献分析解读, 对各个聚类主题进行归纳, 大体可以分为六大研究主题, 如表 5 所示。红色集群 (聚类 1) 包括制造、膜、硅、纳米结构等关键词, 以薄膜制备和薄膜沉积等薄膜研究为主, 还与纳米结构、光刻阵列、纳米光刻等领域交叉。绿色集群 (聚类 2) 包括光刻技术、显微镜、微结构、微加工、光源、透镜等关键词, 表示光源、透镜、显微镜、微结构、微细加工等相关技术。蓝色集群 (聚类 3) 包括光刻 (lithography)、掩模 (mask)、仿真、设计等关键词, 表示光学光刻及掩模。黄色集群 (聚类 4) 包括抗蚀剂、光刻胶、分辨率、电子束光刻等关键词, 表示光刻胶及电子束光刻。紫色集群 (聚类 5) 包括极紫外光刻技术 (EUVL)、极紫外 (EUV)、极紫外投影光刻技术及掩模制造技术、光

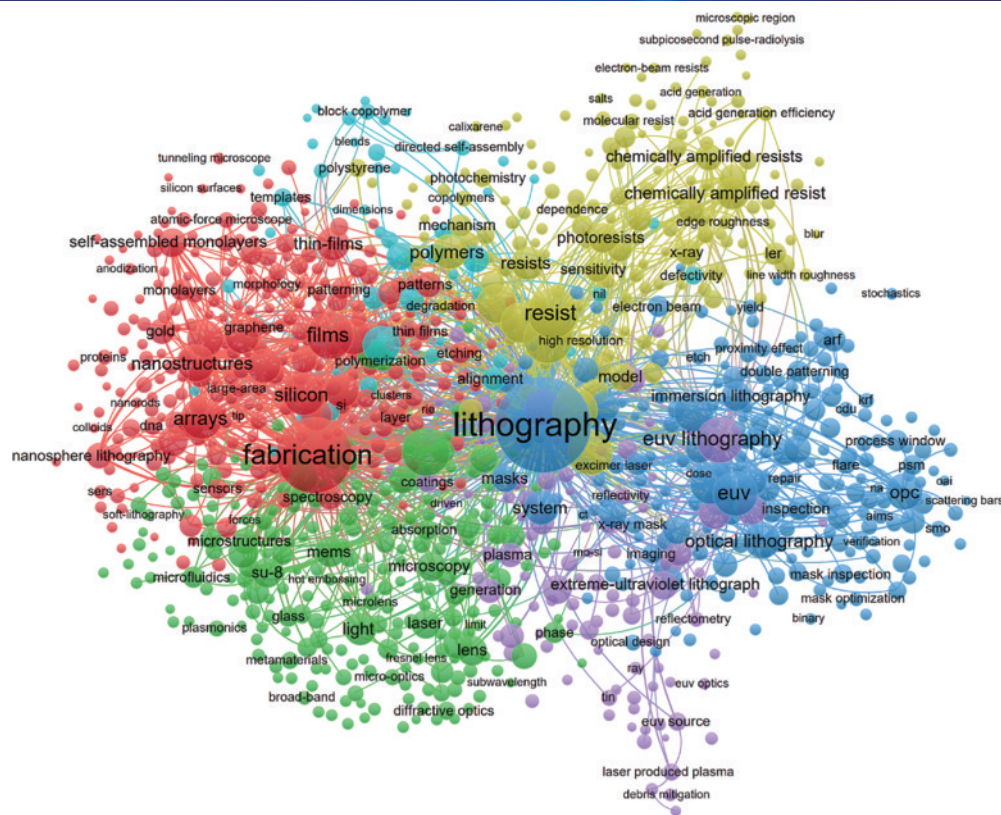


图 4 光刻技术研究领域的主题聚类分析

Fig. 4 Theme clustering analysis of lithography research areas

学等关键词,表示极紫外光刻。浅蓝色集群(聚类6)包括纳米压印光刻、压印光刻、纳米压印、图形转移等关键词,表示纳米压印光刻。

结合光刻技术检索式和各聚类的高频关键词,分析六大研究主题的代表性研究机构,如表5所示。中国科学院在薄膜制备和薄膜沉积、光源、透镜、显微镜、微结构、维纳加工等主题上发表较多论文,但在掩模、光刻胶、极紫外光刻等主题上,论文数量少于美国能源部、IBM公司、荷兰ASML公司等机构。光学光刻及掩模主题上,荷兰ASML公司、三星公司、IBM公司、英特尔公司等企业开展较多研究,是商业化关注的重点。纳米压印光刻主题上,法国国家科学研究中心、法国原子能委员会、格勒诺布尔-阿尔卑斯大学等法国机构开展较多研究。

#### 4.3 研究趋势分析

图5展示了光刻技术研究领域的发展趋势,通过给节点和边分配颜色,可以分析每个讨论的关键词与哪个时期有关。从图中颜色条可以看出,深蓝色表示较早的主题,例如X射线光刻、步进式光刻、X射线掩模在2000年或之前就已出现;绿色表示2010年左右时期的主题,大多主题为该颜色,这与光刻技术研究领域的论文发表趋势相一致;黄色表示较新的主题,例如石墨烯、机器学习、超表面(Metasurface)、双光子光刻、随机效应则是2020以来关注的热点主题。本文结合领域著作、专家判断、主题聚类的时间分布、代表机构的

主要论文,重点分析光刻技术研究领域的最新发展趋势。

高数值孔径EUV光刻是当前半导体制造领域光刻技术的重要方向,即将数值孔径(NA)由0.33提高到0.55。ASML公司设计了一种独特的NA高达0.55的EUV光刻机,可在一次曝光中打印出半周期为8 nm的线条,开展了Fringe-Tatian基函数如何描述遮挡(obscuration)和波前(wavefront)、确定最适合高数值孔径衍射成像的光学参数等研究,并与蔡司集团等开展合作;比利时微电子研究中心关注掩模粗糙度对高数值孔径EUV成像随机性的影响、光刻胶减薄和底层薄膜对使用eP5(ASML的电子束系统)进行高数值孔径图案化的电子束的影响等;中国科学院也开展了相关研究,关注实现高效率超高数值孔径自由曲面金属膜、利用物理辅助人工神经网络对高数值孔径透镜进行聚焦整形等。

面向未来更小节点,基于不同工作原理的导向自组装、纳米压印、多电子束等高分辨率光刻技术正在通往量产研究的道路上。<sup>[23]</sup>导向自组装(DSA)光刻是基于嵌段共聚物(BCP)自组装构建高分辨图案,具有高通量、低成本和延续性好等显著优势,已有研究关注将DSA与深紫外光刻技术相结合,作为EUV光刻的潜在替代技术,用于制造10 nm以下的微电子器件。多电子束光刻作为目前推进更小节点掩模写入速度提升的唯一选择,是近年来进展较快的光刻技术,荷兰

表 5 光刻技术研究领域论文的主题聚类分析结果

Table 5 Thematic cluster analysis of papers in the field of photolithography research

Cluster	Theme induction	High-frequency keywords	Representative research institutions
1	Thin film preparation and deposition	Fabrication, films, silicon, nanostructures, arrays, nanofabrication, thin-films, surface, deposition, growth	Chinese Academy of Sciences (386), U. S. Department of Energy (216), French National Center for Scientific Research (213), Swiss Federal Institute of Technology and Research Institute Consortium (179), IBM (132)
2	Light source, lens, microscope, microstructure, microfabrication	Photolithography, microscopy, microstructures, microfabrication, mems, light, laser, lens, system, diffraction	Chinese Academy of Sciences (330), U. S. Department of Energy (164), Swiss Federal Institute of Technology and Research Institute Consortium (124), Russian Academy of Sciences (122), German Fraunhofer Association (117)
3	Optical lithography and mask	Lithography, mask, simulation, design, EUV, exposure, optical lithography, OPC, photomask, lithography simulation, ARF	Swiss Federal Institute of Technology and Research Consortium (362), US Department of Energy (351), Dutch ASML (325), Samsung (301), IBM (295)
4	Photoresist and electron beam lithography	Resist, resolution, photoresist, electron-beam lithography, polymers, resists, chemically amplified resist, line edge roughness, chemically amplified resists, electron-beam	IBM (342), Osaka University (341), US Department of Energy (178), Belgian Microelectronics Research Center (170), Swiss Federal Institute of Technology and Research Consortium (168)
5	Extreme ultraviolet lithography	EUV lithography, extreme ultraviolet, extreme ultraviolet lithography, optics, generation, scattering, interference lithography, contamination, radiation, plasma	US Department of Energy (383), Osaka University (227), ASML Netherlands (182), University of California, Berkeley (169), Belgian Microelectronics Research Center (155)
6	Nanoimprint lithography	Nanoimprint lithography, imprint lithography, nanoimprint, pattern transfer, step, template, block-copolymers, mold, thin polymer-films, directed self-assembly	French National Center for Scientific Research (86), French Atomic Energy Commission (58), University of Texas at Austin (55), University of Grenoble Alps (51), University of Osaka (50)

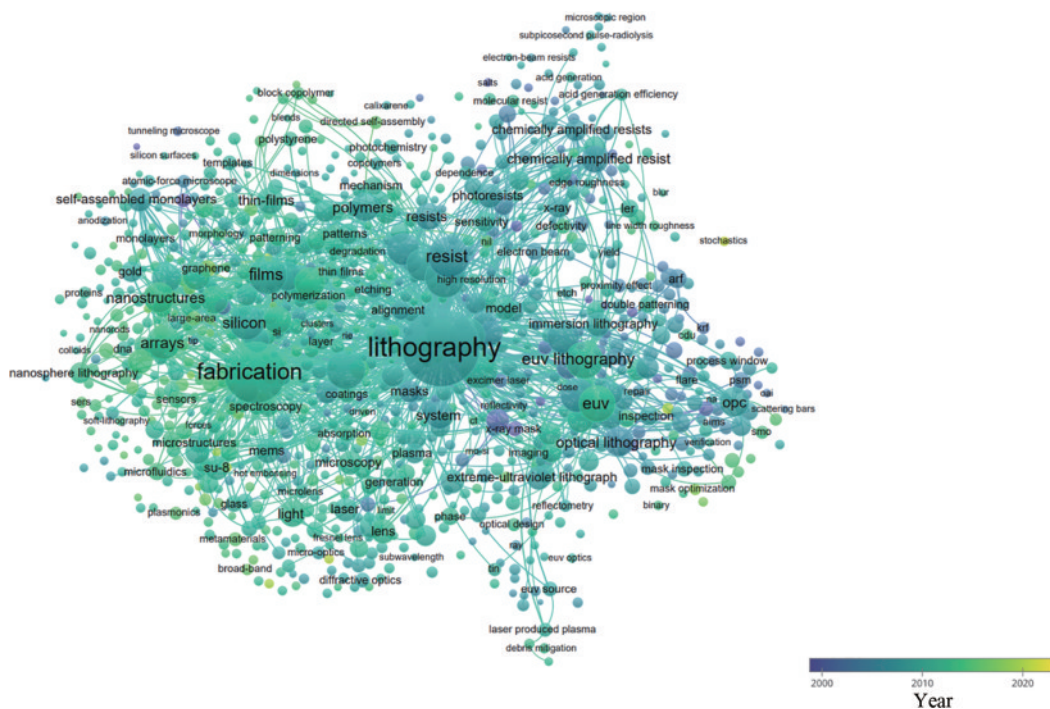


图 5 光刻技术研究领域的主题演化  
Fig. 5 Thematic evolution of lithography research areas

MAPPER 公司、奥地利 IMS Nanofabrication 公司、日本 Nuflare 公司、美国 KLA 公司等已开发出多电子束光刻设备,并关注提高快速曝光高保真的光学邻近效应修正(OPC)和逆向光刻技术(ILT)图形能力、孔径阵列(aperture array)的制备、高通量的数据传输等。

机器学习在光刻技术领域显示出应用潜力,可以快速测试和优化各种设计,确定哪些设计最适合光刻工艺的需要。中国科学院采用机器学习方法,开展了极紫外光刻工艺优化、最佳工艺参数确定、掩模近场计算、光刻热点检测(lithography hotspot detection)、快速光学邻近效应修正、多层膜缺陷表征、光刻布局图分类(lithography layout classification)等研究,并构建了基于分解机器学习方法的等离子体光刻快速成像模型、高精度光刻厚掩模模型。大阪大学利用机器学习分析极紫外光刻技术中分辨率、线边缘粗糙度(line edge roughness)和灵敏度之间的权衡关系、扫描电子显微镜图像中抗蚀图案的边缘分类、电子束光刻过程中产生的线边缘粗糙度的缓解因素等。新思科技关注光学邻近效应修正的重定向问题、逆向光刻技术,利用机器学习方法开展了逆向光刻技术流程建立、全芯片 EUV 光刻的曲线型掩模解决方案、在机器学习生成的概率图上放置亚分辨率辅助图形(SRAF)的新方法、掩模合成流程中重定向的运行时间改善等研究。得克萨斯大学奥斯汀分校也开展较多研究,包括基于机器学习的光刻热点检测、光学邻近效应修正的重定向、先进光刻技术的超快光源优化、端到端光刻建模等研究。

石墨烯基材料具有出色机械强度、高电导率和高热导率,其制备、石墨烯膜是当前光刻技术研究的热点。中国科学院开展较多石墨烯相关研究,关注用于光电子领域的单层石墨烯结构的原位生长、利用亚衍射质子光刻技术制作的石墨烯-银纳米孔阵列、用于氯化镓薄膜外延横向生长的自消失石墨烯掩模、石墨烯上进行表面增强拉曼光谱表征、用于电磁干扰屏蔽的高光学透明石墨烯网状物等;韩国成均馆大学和三星公司合作紧密,关注用于极紫外光刻的纳米石墨颗粒、无电子束光刻胶的化学气相沉积石墨烯装置、在多晶 Ni 基材上合成的纳米厚度石墨薄膜、用于高功率 EUVL 粒子的纳米石墨薄膜等研究,认为纳米厚度的石墨薄膜是制造防护膜的理想材料;丹麦技术大学也开展了相关研究,关注用作蚀刻掩模的纳米结构二维材料、石墨烯基底图案(graphene substrate patterning)去除方法、光刻法制备高质量的亚 10 nm 石墨烯纳米带(sub-10 nm graphene nanoribbons)等。

光刻技术中的关键挑战之一是光源随机波动、抗蚀剂化学成分变化等随机因素对图案质量和产量的影响。大阪大学开展了减少随机缺陷的备选 EUVL 抗蚀剂工艺、抗蚀剂随机效应分析、化学放大抗蚀剂分辨率模糊和随机缺陷之间关系等研究,指出光刻胶随机缺陷的产生取决于烷基链的长度和显影剂中四烷基氢

氧化铵的浓度,并将机器学习应用于 EUV 光刻所用化学放大抗蚀剂的随机效应分析中。比利时微电子研究中心使用建模来预测和补偿随机误差,如高斯随机场随机 EUV 模型的校准、EUV 光刻的随机缺陷检测、随机局部关键尺寸(CD)均匀性的经验相关性分析器、光刻仿真预测 EUV 随机微桥(stochastic microbridge)的概率、抗蚀剂-曝光随机性(resist-exposure stochastic)导致的 EUV 工艺失效的概率预测、随机缺陷的可印刷性和传播性等研究。美国 KLA 公司也开展较多研究,关注 EUV 光刻随机旁瓣印刷、宽带等离子体光学系统检测 EUV 光刻随机缺陷、面向 5 nm 节点的随机工艺变化对套刻标记(overlay mark)保真度影响等,并与比利时微电子研究中心开展合作。

此外,基于超表面的光刻技术、双光子光刻技术等近年来也备受关注。基于超表面的光刻技术涉及在薄膜上使用专门设计的纳米结构图案来操纵光与材料的相互作用,从而实现对衍射系统中光场的精确控制,中国科学院开展了超表面的电磁波原理、数位光学的超表面波、菲涅耳衍射光刻技术等研究,哈佛大学研究关注可见光波长的超透镜、大规模制造大面积元透镜的方法等,加州理工学院研究关注超表面全息光刻技术、紧凑型折叠式超表面光谱仪等。双光子光刻技术使用两个光子来选择性地曝光和固化光敏树脂,能提供更高的分辨率,并能以亚微米的精度制造功能性三维微结构,德国亥姆霍兹联合会及卡尔斯鲁厄理工学院、瑞士联邦理工学院及研究所联合体、法国国家科学研究中心围绕双光子光刻技术中的施瓦茨柴尔德效应、3D 打印的衍射菲涅耳透镜等开展相关研究。

## 5 结 论

光刻技术是芯片制造的核心,是集成电路中的关键工艺。因此,开展光刻技术领域的分析十分必要。本文以 bibliometrix 和 VOSviewer 为分析工具,通过文献计量分析和科学知识图谱构建,对全球光刻技术研究领域的研究分布特征、研究主题和发展趋势进行了分析和总结。本文的建议如下。

1) 关注光刻最新技术的发展趋势,加强光刻核心技术的总体布局。随着科技的不断发展,光刻技术也在不断变革和升级。建议重视国内外最新的技术发展动态,及时调整技术研发布局,加强技术创新和研发能力。加快光刻机研制周边设备的全方位投入和产业升级换代,比如高端的光学加工设备、光学镀膜设备、光学检测设备、机械加工设备等等。虽然国内有这些类型的设备,但与国外相比,在精度、稳定性等指标上仍存在差距,制约我国光刻机发展。同时,还需要加强信息技术、材料技术等新技术与光刻技术的融合,如利用石墨烯和机器学习等前沿技术来推动光刻技术的发展。这些新技术的应用和发展将为光刻技术的创新和升级提供更多的可能性和机遇。加大光学原材料等基础研



究的力度及持续投入,保持国内对基础研究的阶段性和连续性,努力缩小与国外工艺水平的差距。

2) 构建建制化光刻技术开发体系,组建国家级的光刻技术研究机构。国外主要的光刻技术研究机构大多为国家级的机构,能够集中多家单位的力量进行协调研究,并重视国家层面的资金资助。目前,我国光刻技术的研究还没有系统化和建制化的机构和队伍,建立系统化建制化的光刻技术研究和开发体系、组建国家级的光刻技术研究机构,构建高能级的创新联合体,系统地探索和开展相关研究,对于我国光刻领域技术的发展至关重要,有助于我们在光刻技术领域取得更多突破和进步,提高我国在国际竞争中的地位。完善和优化光刻技术领域任务的设置、验收和评价方法,建议国家在设置项目的时候更加具象到光刻机等产品本身,而不是某一项研究课题。

3) 支持大型企业组建顶级的研究力量,开展光刻领域最前沿技术研发与应用。国外大型企业大多依靠内部研发力量,而不太依赖外部科研机构或高校的成果转化。企业不仅要关注市场需求,也要着眼于技术研发,大型企业更是如此,需要打造、具备自主创新能力,加强企业内部的技术攻关和创新能力,建立高水平的光刻技术研发团队,为光刻技术发展注入重要动力,这种模式有助于企业掌握核心技术和主动权,提升企业的市场竞争力。因此,我们需要全方位支持和推动大型企业加大光刻技术的研发方面的投入,自建高水平研究团队,关注光刻领域未来研发人员在大学阶段的校企联合培养,建立国家级的科技领军企业,开展相关光刻领域最前沿的技术研发和应用。

4) 建立更为灵活的用人机制,统筹使用光刻领域体制内外的优秀人才。强化光刻领域高校、科研机构和企业之间的交流与合作,建立企业、高校和科研机构之间的人才旋转门机制,加强光刻技术领域研发人员的培养,在高校中设置对应学科和强化技术的培训,探索更加科学合理和有效的人才发现、培养、评价、激励、服务机制,使得体制内外的科研人员能够自由流动和充分使用,各方能够共享技术和人才资源,提高技术创新能力和研发实力,从根本上解决企业的研发力量不足、高校和研究机构研究成果不关注应用与不落地的问题。此外,企业还可以与科研机构合作开展成果转化,通过技术的转化和应用,将科研成果转化为市场价值,同时研发人员获得科技成果转移转化方面的收入,促进光刻技术的可持续进步与发展。

文中的数据和结论是在所采用的分析方法和检索格式的基础上给出的,信息可能不完全充分,希望结论和建议能够为有关部门制定政策和新进入该领域的研究者提供参考。

#### 参 考 文 献

[1] Smith H I, Spears D L, Bernacki S E. X-ray

lithography: a complementary technique to electron beam lithography[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1973, 10(6): 913-917.

- [2] Dunn J C. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions[J]. Journal of Cybernetics, 1974, 4(1): 95-104.
- [3] Maystre D, Petit R. Brewster incidence for metallic gratings[J]. Optics Communications, 1976, 17(2): 196-200.
- [4] Maldonado J R, Poulsen M E, Saunders T E, et al. X-ray lithography source using a stationary solid Pd target[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1979, 16(6): 1942-1945.
- [5] Saleh B E A, Sayegh S I. Reduction of errors of microphotographic reproductions by optimal corrections of original masks[J]. Optical Engineering, 1981, 20(5): 781-784.
- [6] 童志义. 国外光刻设备市场概况及发展趋势(续)[J]. 半导体技术, 1991, 16(4): 18-21.  
Tong Z Y. General situation and development trend of foreign lithography equipment market (continued) [J]. Semiconductor Technology, 1991, 16(4): 18-21.
- [7] 崔锋. VLSI曝光技术的现状与未来[J]. 微细加工技术, 1995(3): 1-7.  
Cui Z. Present and future of VLSI lithography technology [J]. Microfabrication Technology, 1995(3): 1-7.
- [8] 谢中生. 光学光刻的极限[J]. 电子工业专用设备, 1999, 28(1): 54-59.  
Xie Z S. The limits of optical lithography[J]. Electronic Industry Specific Equipment, 1999, 28(1): 54-59.
- [9] 周崇喜, 胡松. 光学光刻的现状与未来[J]. 电子工业专用设备, 1999, 28(2): 2-4.  
Zhou C X, Hu S. Present situation and future of optical lithography[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 1999, 28(2): 2-4.
- [10] 冯伯儒. 光学光刻和射线光刻技术的发展:参加 ICO—17 述评[J]. 微细加工技术, 1997(1): 1-7.  
Feng B R. Development of optical microlithography and X-ray lithography: ICO — 17 review[J]. Microfabrication Technology, 1997(1): 1-7.
- [11] 姚汉民. 21 世纪的光刻技术[J]. 世界产品与技术, 2000 (1): 15-17.  
Yao H M. Lithography technology in the 21 ST century [J]. Electronic Component News, 2000(1): 15-17.
- [12] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 66-70.  
Jin C S, Wang Z S, Cao J L. Development of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1): 66-70.
- [13] 袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.  
Yuan Q Y, Wang X Z. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 57-64.
- [14] 姜军, 周芳, 曾俊英, 等. 光刻技术的现状和发展[J]. 红外技术, 2002, 24(6): 8-13, 36.  
Jiang J, Zhou F, Zeng J Y, et al. The status and developments of lithography technology[J]. Infrared Technology, 2002, 24(6): 8-13, 36.

- [15] 毛荐其, 杜艳婷, 苗成林, 等. 基于专利共类的关键核心技术识别模型构建及应用: 以光刻技术为例[J]. 情报杂志, 2022, 41(11): 48-54.  
Mao J Q, Du Y T, Miao C L, et al. Construction and application of identification model of key core technologies based on patent co-classification: taking lithography as an example[J]. Journal of Intelligence, 2022, 41(11): 48-54.
- [16] 杨武, 王爽. 特征分析视角下核心技术动态趋势识别: 以光刻技术为例[J]. 情报杂志, 2021, 40(12): 36-44.  
Yang W, Wang S. Dynamic trend identification of core technology from the perspective of feature analysis: taking lithography technology as an example[J]. Journal of Intelligence, 2021, 40(12): 36-44.
- [17] 张子南, 李思坤, 王向朝. EUV 光刻三维掩模成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922021.  
Zhang Z N, Li S K, Wang X Z. Research progress on the imaging of three-dimensional mask for extreme ultraviolet lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922021.
- [18] 余江, 陈凤, 张越, 等. 铸造强国重器: 关键核心技术突破的规律探索与体系构建[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 339-343.  
Yu J, Chen F, Zhang Y, et al. Forging Pillars of scientific and technological power: mechanism exploration and system construction for breakthrough of core and key technologies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 339-343.
- [19] 罗吉利, 李孟军, 姜江, 等. 基于证据推理的核心技术识别方法研究[J]. 情报杂志, 2015, 34(1): 38-43, 31.  
Luo J L, Li M J, Jiang J, et al. On recognition of the core technology using evidential reasoning[J]. Journal of Intelligence, 2015, 34(1): 38-43, 31.
- [20] 马瑞敏, 尉心渊. 技术领域细分视角下核心专利预测研究[J]. 情报学报, 2017, 36(12): 1279-1289.  
Ma R M, Yu X Y. Core patents prediction from the perspective of technosphere subdivision[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2017, 36(12): 1279-1289.
- [21] 李兵, 周洪, 王丽平, 等. 全球储能领域高水平基础研究人才结构特征和研究主题分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1738-1746.  
Li B, Zhou H, Wang L P, et al. Analysis of the talent structure characteristics and high-level basic research themes in global energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1738-1746.
- [22] Derviş H. Bibliometric analysis using bibliometrix an R package[J]. Journal of Scientometric Research, 2020, 8(3): 156-160.
- [23] 安德里亚斯·爱德曼. 半导体先进光刻理论与技术[M]. 李思坤, 译. 北京: 化学工业出版社, 2023: 1-2.  
Erdmann A. Optical and EUV lithography: a modeling perspective[M]. Li S K, Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2023: 1-2.