

基于文献计量的新型电力电子器件研究态势分析

摘要：相比传统的硅基电力电子器件，以碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）等宽禁带半导体制备的新型电力电子器件凭借其优异性能被认为是可替代硅基器件的重要选择。基于文献计量方法，本文通过分析新型电力电子器件领域在1990—2017年间发表的科技论文，发现该领域的发展态势主要表现以下特征：一是该领域的发文量至今保持稳定增长趋势，目前仍是全球科学家重点关注的研究方向；二是该领域的研究热点包括了关键材料生长制备的基础研究与核心器件创新应用两方面；三是全球国家/机构合作网络呈现出明显的区域合作特点，美日欧在该领域的科研实力处于领先地位，而中国大陆虽然研究规模不断变大，但整体质量与领先国家仍存在一定差距。针对国内外在该领域的发展态势，我国应不断加强核心技术攻关、强化高水平创新主体建设和形成多元化的研究合作机制，以此加快推动国内新型电力电子器件领域的发展。

关键词：文献计量；碳化硅；氮化镓；电力电子器件；研究态势

doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2018.08.002

1 引言

电力电子技术是对电能进行高效产生、传输、转换、存储和控制的技术。电力电子器件则是电力电子技术的“核心”，用于实现电能高效转换的开关控制，其发展经历了以晶闸管为核心的第一阶段、以金属-氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表的第二阶段，现在正进入以新型电力电子器件（第三代宽禁带半导体器件）为核心的新发展阶段。相比于传统的硅基电力电子器件，以SiC和GaN基为代表的第三代半导体功率器件因具备更高的击穿电压、热导率、电子饱和漂移速率和抗辐射能力，目前正逐步在微波射频、新一代移动通信、新能源汽车、有轨列车及国防等领域崭露头角，有望满足目前科技快速发展的技术需求并突破能源环境危机引起的技术瓶颈，已成为先进国家/地区争先布局的重点领域。技术领先国家美国、日本、德国等近期相继制定相关规划，不断加强SiC和GaN基功率器件的研发和产业化，拟从材料生长、器件制

备、封装应用等全产业链进行重点布局，全力抢占该领域的技术制高点。近年来，我国新型电力电子器件在国家大力支持下也实现了“从无到有”的突破，并在若干领域取得了重大进展，如 6 英寸硅基 GaN 晶圆生长技术及其相关器件的产业化水平现已逐步接近国际先进水平。

目前，国外先进地区在硅基功率器件领域已形成较高的技术壁垒，2018 年 4 月“中兴事件”的爆发揭示了国内在高端射频、通信等功率器件领域仍处于受制于人的困境。相比较而言，全球各主要国家在 SiC 和 GaN 基功率器件领域正处于争先发展布局的现状，仍未形成较高技术屏障。因此，国内有望在该领域突破先进地区对功率器件领域的技术封锁，并实现赶超。

科技文献是科技人员获取科技知识的捷径和政府管理部门研究科技发展规律及趋势的重要载体，可为揭示和预测技术的发展趋势及制定技术发展规划提供重要信息参考。论文和专利都是可获取的重要公开科技文献，分别反映了技术的原始性创新（基础研究和应用基础研究）和应用性创新（产业化研究）。通过论文分析可以得到技术的原始性创新态势，深入了解到技术知识的萌芽、发展及细分知识领域产生的情况，而通过专利分析可以得到技术应用创新态势，掌握技术知识进一步改善及被产业化应用的情况。可以说，技术领域的原始性创新为后续的应用型创新提供了重要的技术源支撑。因此，本论文将从原创性知识创造的角度，基于论文计量方法初步分析国内外新型电力电子领域的知识创新情况，为有关研究机构和政府机构掌握该领域的知识创新态势及完善技术研究方向与规划提供信息参考。

2 数据获取及分析

本文分析的科技文献来源于美国 ISI Web of Knowledge 平台 SCIE 数据库。检索式为 TS=(GaN OR "gallium nitride" or "siliconcarbide" or SiC) and TS=("power semiconductor" or "powerdevice" or "power electronics" or "power diode" or "thyristor" or "switch" or "transistor" or "amplifier" or "inverter" or "MOSFET" or "IGBT" or "JFET" or "HEMT")。检索时间范围为 1990—2017 年，文献类型为 Article、Letter 和 Review，语言为 English，检索时间为 2018 年 2 月 25 日，共检

索得到 6987 篇论文。检索结果将中国香港和中国澳门的统计文献纳入中国大陆的统计，而中国台湾地区的文献则单独统计。

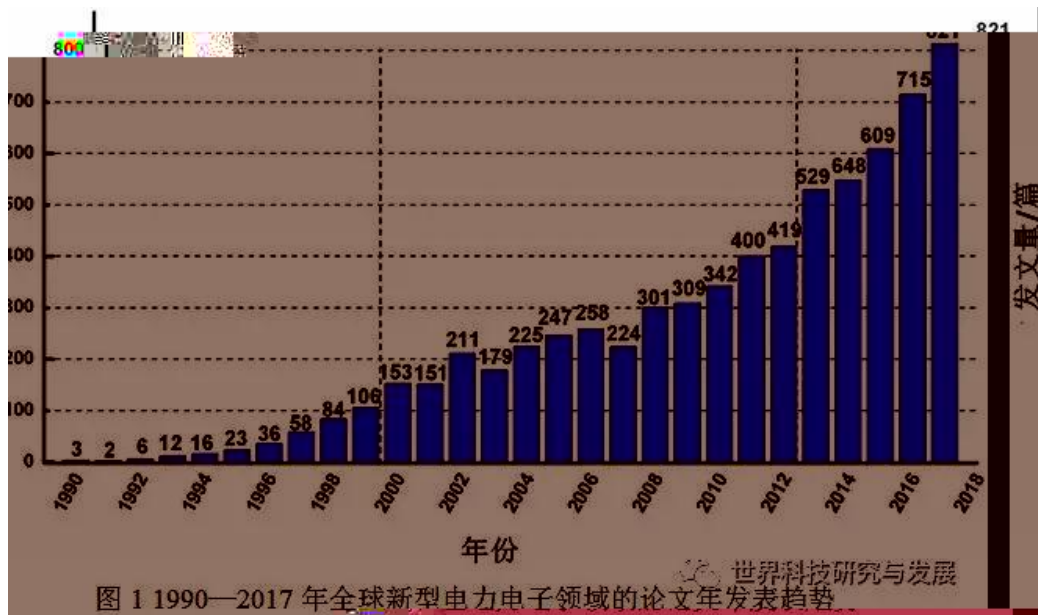
本文对科技文献采用计量分析和文本分析得到全球新型电力电子器件领域的研究态势。首先，利用 ISI web of science 统计分析功能及 Thomson DataAnalyzer (TDA)、Microsoft Excel、Origin 8.0 等软件工具对检索数据进行统计分析，得到该领域全球整体发文趋势、重点高产国家/地区态势、高产机构情况等。其次，通过 VOSviewer 软件对检索文献的内容进行共现、聚类分析，得到该领域的主要研究热点及全球国家与机构的合作情况。最后，针对全球新型电力电子器件领域主要高产国家/地区，通过选取若干重要指标进行标准化计算，初步对比了主要高产国家/地区的创新水平，从一定程度上了解该学科的布局情况。

3 结果与讨论

3.1 整体发展态势分析

3.1.1 全球论文总体概述

检索结果表明，全球新型电力电子器件领域在 1990—2017 年间共发表了 6987 篇论文，其年度发文趋势如图 1 所示。早在 20 世纪 90 年代初，国外的 Carter、Nakamura 和 Strite 等科学家在 SiC 和 GaN 宽禁带材料的生长及其在高频、高功率电子器件的应用方面取得了突破，并对材料的晶体、电子结构与器件的物理化学性能进行系统研究，由此开启了该领域的研究热潮。但 2000 年以前，因科研条件限制，仍主要处于理论研究和材料制备探索阶段，直至 1999 年，全球年发文量才突破 100 篇。进入 21 世纪以来，随着无线通信容量增加和多信道化的发展要求，以及光伏、智能电网等领域的低能耗需求，具备高频、高功率和耐高温高压的新型宽禁带半导体材料及器件受到极大关注。特别是 GaN 基光电子器件的成功应用，更是激励了各国加强对新型电力电子器件领域研究的支持力度，持续产出科研成果。其中，全球 2017 年在新型电力电子器件领域共发表了 821 篇论文，比 2013 年的发文量增加近一倍。该现象表明近几年新型电力电子器件领域仍是全球科学家重点关注的研究方向，并取得了突破性进展。



3.1.2 全球主要产出国家/地区概述

通过对新型电力电子领域检索的 6987 篇论文进行地区分析，发现全球共有 18 个国家/地区的发文量超过 100 篇（如图 2）。其中，美国和日本作为新型电力电子器件应用的发源地，一直高度重视宽禁带半导体材料生长制备和器件应用的技术积累，分别以发表 2234 篇和 947 篇论文位于全球前两位。随后，中国大陆在国家近几年的大力支持下，在该领域也取得了较多研究成果，以 894 篇论文产出排在第三位。位于四到十八位的国家/地区主要集中在欧洲、亚太、北美等地区。

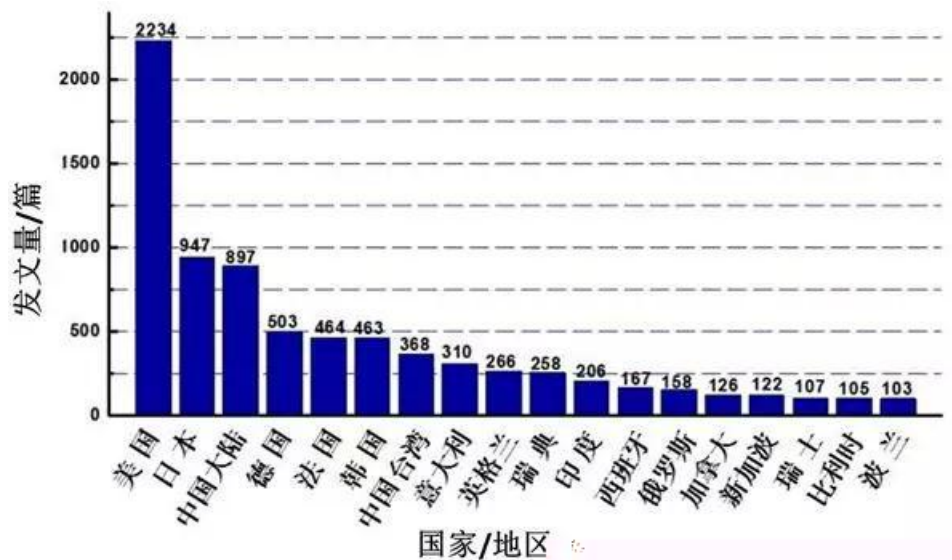


图 2 全球新电力电子领域发文量超过 100 篇的国家/地区

图 3 对比了高产国家/地区（发文量超过 400 篇）的年度发文趋势，发现美国和日本在 2010 年之前在新型电力电子领域的发文量具有明显的优势。两国在该领域的技术积累为其产业水平至今保持全球领先提供了重要原始创新支撑。在国家近期宏观政策的大力支持下，中国大陆的新型电力电子器件领域年发文量在 2010 年后得到突破性增长，超过日本位居全球第二，近几年的年均增幅超过美国排在全球第一。另外，德国、法国和韩国等国家则在该领域一直保持着持续研究趋势，年发文量也保持着稳定的增长。

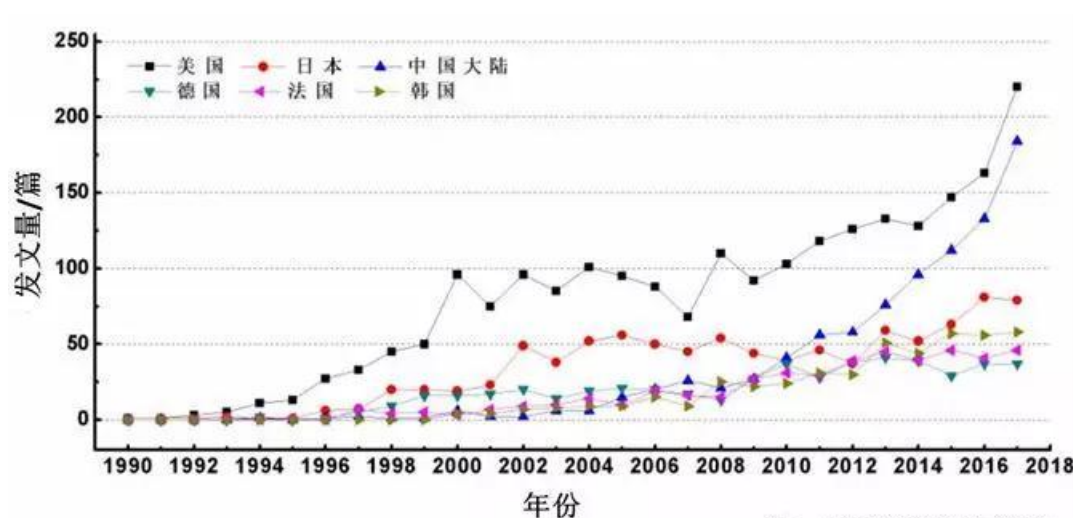


图 3 发文量超过 400 篇的主要国家/地区年发文量变化趋势

对比主要高产国家/地区的科研产出核心指标（表 1）可以看到，美国在各项指标中均遥遥领先，表明其不仅产出的科研成果（发文量）最多，而且整体质量（被引次数、h-index 因子和 ESI 高被引论文）也远高于其余五个国家/地区。日本则在各项指标中仅次于美国，位居第二。中国大陆的科研产出虽然位于全球第三，具备了一定科研规模，但整体科研产出质量要明显低于美国、日本和德国等国家，表明我国具有前沿创新性成果的积累仍与先进国家存在一定差距。

表 1 发文量超过 400 篇的国家/地区科研产出和质量核心指标对比

序号	国家/地区	发文量	全球占比	总被引频次	h-index 因子	ESI 高被引论文
1	美国	2234	32.0%	60493	101	26
2	日本	947	13.6%	16603	58	12
3	中国大陆	897	12.8%	7297	36	4
4	德国	503	7.2%	11003	45	2
5	法国	464	6.6%	5176	36	1
6	韩国	463	6.6%	3714	30	0

经过近二十年的技术积累，全球新型电力电子器件领域目前已初步具备产业化应用基础，其中美国在碳化硅领域全球独大，Cree 和道康宁等公司占据全球超过 70%的碳化硅市场规模；日本凭借雄厚的技术积累，目前也已形成较为完整的产业链，重点布局 GaN 材料及器件；而欧洲则在器件的设计和开发方面具有一定优势。相比之下，我国新型电力电子器件领域的基础技术积累不足，但在近期的政策和资金支持下，取得了快速的进步，并为产业链协同发展提供了一定基础。可以说，目前全球新型电力电子器件领域已逐步形成美国、欧洲、日本三足鼎立，中国奋力追赶的产业发展态势。

3.1.3 国内外主要机构概述

全球新型电力电子器件领域发文量超过 100 篇的高产机构共有 15 家(表 2)，主要集中在美国（7 家）、中国大陆（4 家）、法国（3 家）、俄罗斯（1 家）和日本（1 家）等国家/地区。其中，法国国家科学研究中心以 278 篇论文位居首位。另外，值得关注的是，美国高产机构中包含了国防部、能源部、美国海军实验室等国家军工研究机构，表明美国新型电力电子器件领域的研究成果相当一部分是来自于国家军工领域的科研机构，这与美国二战期间以及之后持续加强军民技术融合发展具有很大关系，这也是美国创新体系演变过程的具体表现。

表 2 全球发文量大于 100 篇的核心机构

序号	机构	发文量/篇	所在国家/地区	总发文量占比
1	法国国家科学研究中心	278	法国	3.98%
2	美国国防部	265	美国	3.79%
3	中国科学院	187	中国大陆	2.68%
4	加州大学圣塔芭芭拉分校	187	美国	2.68%
5	佛罗里达州立大学	176	美国	2.52%
6	西安电子科技大学	154	中国大陆	2.20%
7	电子科技大学	127	中国大陆	1.82%
8	香港科技大学	123	中国大陆	1.76%
9	北部大学	119	法国	1.70%
10	美国能源部	118	美国	1.69%
11	伦斯勒理工学院	117	美国	1.68%
12	里尔第一大学	113	法国	1.62%
13	俄罗斯科学院	112	俄罗斯	1.59%
14	美国海军研究实验室	103	美国	1.47%
15	科罗拉多大学	101	美国	1.45%
16	日本产业技术综合研究所	101	日本	1.45%

在新型电力电子器件领域，国内仅有 6 家机构的 SCI 发文量进入全球前一百位（表 3）。其中，中国科学院、西安电子科技大学、电子科技大学和香港科技大学的发文量均超过 100 篇，位于全球前十，共发表了 591 篇论文，占了全国论文总量的 65.9%。这表明国内开展新型电力电子器件领域基础研究的整体布局较为集中。另外，北京大学和河北半导体研究院也具备了一定的基础研究能力。

表 3 国内主要机构发文数

序号	机构	发文量/篇	国内总发文量占比	全球排名
1	中国科学院	187	20.8%	3
2	西安电子科技大学	154	17.2%	6
3	电子科技大学	127	14.2%	7
4	香港科技大学	123	13.7%	8
5	北京大学	44	4.9%	80
6	河北半导体研究院	43	4.3%	95

3.2 研究热点分析

3.2.1 全球研究热点概述

本文通过统计全球在新型电力电子器件领域发表论文中高频出现的热点词（图4），并结合其研究特点，总结了该领域科学家关注的几点重要研究方向（表4）：一是宽禁带半导体核心材料的外延生长及其动力学机理性研究；二是碳化硅基高功率电力电子器件模组的开发及其在变流器、整流器、转化器等领域应用的性能优化；三是氮化镓基高频功率供电模组器件技术的开发，包括器件性能优化机理研究和器件在功率放大器领域应用的性能优化两方面。研究热点聚类分析结果表明，该领域的研究主要包含了关键材料（氮化镓和碳化硅）外延生长的基础研究、器件性能优化及创新应用的应用基础研究两大类。

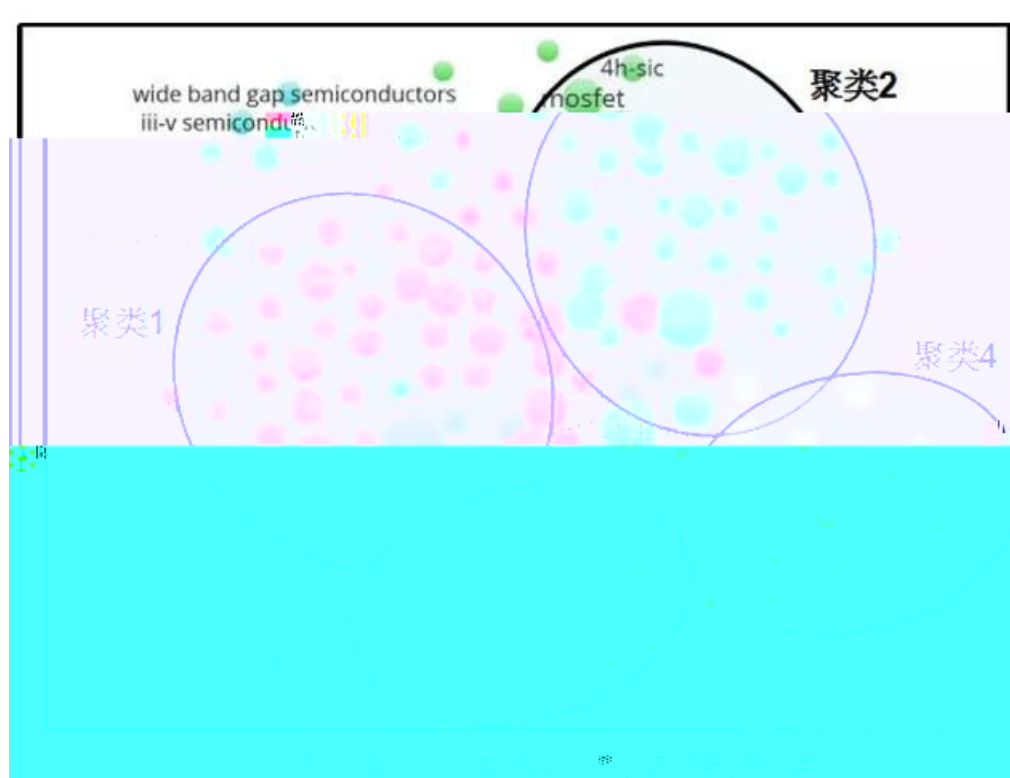


表4 全球电力电子器件领域主要研究热点及高频关键词

研究热点	主要高频关键词
新型电力电子器件核心材料外延生长动力学研究	growth、mobility、flim、molecular-beam epitaxy、MOCVD、heterostrucutre
碳化硅基功率器件性能优化及在变流器、整流器、转化器领域的应用研究	SiC devices、powder devices、rectifiers、MOSFET、transistors、converter、performance
氮化镓基高效率电子迁移率晶体管性能优化研究	GaN、electron-mobility transistors、HEMTs、HFETs、high electron mobility transis
氮化镓基器件在功率放大器中的应用及性能优化研究	GaN HEMT、efficiency、design、broadband、power amplifier

在关键材料外延生长方面，美国的碳化硅外延生长研究具有绝对领先地位，其中 Cree 公司的碳化硅单晶材料技术水平可代表国际顶尖水平，目前已实现 4~6 英寸碳化硅材料的规模化生产；而日本则在氮化镓同质外延方面具有较雄厚的技术积累，其中名古屋大学、日亚化学等机构早在 20 世纪 90 年代初便突破了氮化镓外延生长技术。在新型电力电子器件创新应用方面，美国、日本和欧洲目前具备较强创新实力，在 SiC MOSFET 及功率模块、GaN HEMT 微波功率器件等领域取得重要突破。我国开展碳化硅、氮化镓材料和器件方面的研究工作比较晚，整体研究水平相对较低，但中科院、北京大学和香港科技大学等机构近期在关键材料的制备和器件封测技术等领域取得了一定成绩。

3.2.2 主要国家研究热点对比

通过统计美国、日本和中国发表论文的高频关键词，可对比全球主要国家在该领域的研究特征（表 5）。美国能源部、佛罗里达州立大学等机构均开展了氮化镓和碳化硅材料外延技术研究，一直处于全球领先地位，并衍生 Cree、CPI 等企业；同时，美国也重点开展了碳化硅基变流器、整流器的应用研究和氮化镓场效应晶体管性能研究。日本在蓝宝石基关键材料异质外延生长及动力学研究积累了雄厚的技术基础，并在碳化硅及功率器件的界面、电子迁移性质研究和氮化镓基功率放大器性能优化、机理性研究等方面取得一定成果突破。相比之下，中国在关键材料外延生长方面仍处于优化工艺阶段，并仅在氮化镓基高电子迁移率晶体管性能优化及在功率放大器的应用研究方面取得一定成果，而对碳化硅材料外延和相关器件制备的研究较为缺乏。

表 5 美国、日本和中国大陆的主要研究热点及高频关键词

区域	研究热点	主要高频关键词
美国	关键材料分子束、气相外延生长及动力学研究	field-effect transistor、molecular-beam epitaxy、growth、chemical-vapor-deposition、heterostructures
	碳化硅基功率器件的设计及在变流器、整流器中的应用	SiC、MOSFET、power electronics、design、converter、rectifier

3.3 全球合作网络分析

3.3.1 全球主要国家/地区合作网络

全球电力电子器件领域主要高产国家/地区的合作网络，（图 5、表 6）呈现以下两个特征：一是北美与东亚主要国家/地区形成紧密合作关系，这主要是由于上述国家之间科研人员的交流较为紧密，相互之间科研项目合作也相对较多，因此逐步形成领域研究聚类。二是欧洲国家内部形成 3 个主要合作集群（表 6），而俄罗斯在该领域的研究较为独立，与其它国家/地区的合作关系并不紧密，这可能与其大学科研人员对外交流不多有关。从全球的国家/地区合作网络来看，该领域的科研合作网络主要分为“北美-亚洲”和“欧洲”两大区域分布，美国和日本为连接两大区域分布的重要节点，这与两国较为强大的科研实力相关。而美、日两国与各主要国家紧密的合作关系，也为其加快吸收该领域最新研究成果、推动本国新型电力电子器件产业快速发展提供了重要技术支撑。

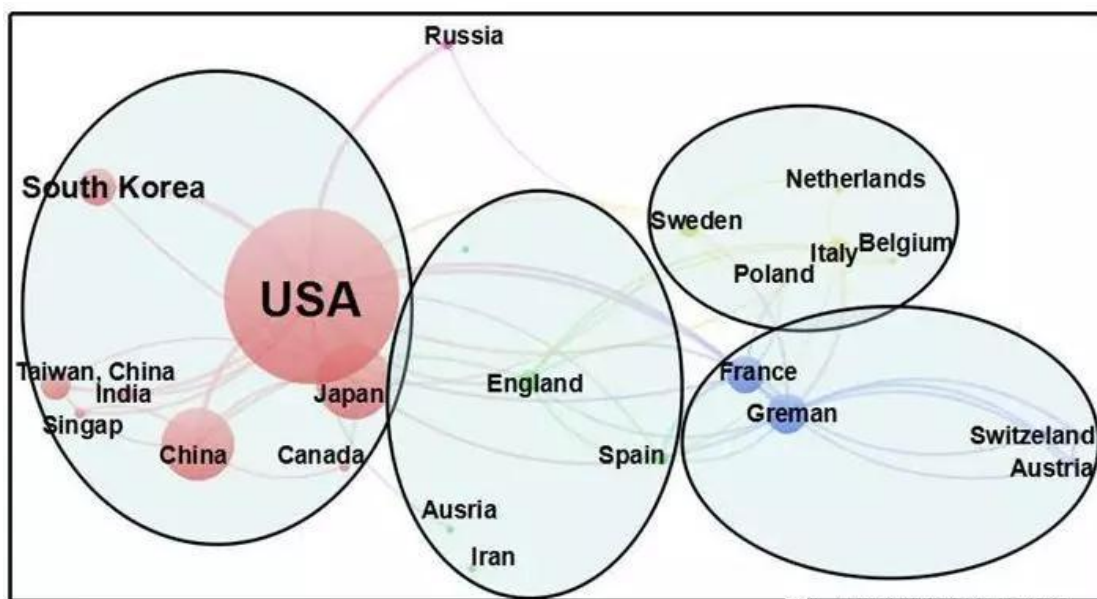


图 5 全球发文量超过 50 篇的主要国家/地区合作网络图

表 6 全球主要国家/地区合作情况

聚类	主要国家/地区
聚类 1	中国大陆、美国、日本、韩国、中国台湾、新加坡、加拿大
聚类 2	英格兰、土耳其、澳大利亚、伊朗、西班牙
聚类 3	波兰、意大利、瑞典、荷兰、比利时、奥地利
聚类 4	法国、德国、瑞士

3.3.2 全球主要机构合作网络

全球电力电子器件领域主要高产机构的合作网络（图 6、表 7）主要呈现以下特征：一是我国大陆与台湾地区的高产机构合作较为紧密；二是瑞典、法国、荷兰、俄罗斯等国主要高产机构与美国的加州大学圣塔芭芭拉分校开展了较为紧密的合作研究；三是美国本土主要高校与日本的名古屋大学、产业技术综合研究所以及新加坡的南洋理工大学交流相对比较多，形成了相应的合作网络。值得注意的是，该领域的合作网中并没有美国国防部、能源部和美国海军实验室等高产机构，说明上述机构可能因为涉密等原因较少与其它机构合作公开发表论文。

余几个国家，五项指标综合得分为 15.58，接近于第二名日本的 3 倍，表现出强大的基础研究水平，这也是其产业水平能长期领先全球的重要支撑之一。二是日本、中国大陆和德国处于第二集团，各国在该领域的研究态势各具特点。日本基于 20 世纪 80 年代快速发展起来的电力电子器件产业，以及宽禁带半导体材料在可见光等领域取得的突破，加快推动了新型宽禁带材料在电力电子领域的应用研究，并取得重要原创新研究成果。日本各项指标及综合得分均位于全球第二，在第二集团中处于明显领先地位。中国则凭借近几年政府的大力支持，以及庞大的市场需求，在发文量及 ESI 高被引论文数取得重大突破，均排在全球第三。但论文被引总数及 h-index 因子两项指标相对较低，与美国、日本等仍具有较为明显的差距。德国的论文被引总数及 h-index 因子两项指标表现较为强势，均仅次于美国和日本，但论文发表数稍微较少，仍有进一步提升空间。三是法国、韩国处于该领域基础研究实力第三集团，表现出一定的研究能力。

表 8 新型电力电子器件领域主要国家/地区的综合创新能力分析

指标	参数	美国	日本	中国大陆	德国	法国	韩国
发文量	x_{i1}	2234	947	897	503	464	463
	A_{i1}	3.12	1.05	0.66	0.33	0.27	0.27
总被引数	x_{i2}	60493	16603	7297	11003	5176	3714
	A_{i2}	3.18	0.96	0.49	0.68	0.38	0.31
h-index 因子	x_{i3}	101	58	36	46	33	30
	A_{i3}	3.07	1.30	0.40	0.81	0.27	0.15
ESI 高被引论文数	x_{i4}	26	12	4	2	1	0
	A_{i4}	3.02	1.49	0.62	0.40	0.27	0.08
高产机构数	x_{i5}	21	4	4	2	6	0
	A_{i5}	3.19	0.62	0.62	0.32	0.25	0
综合指标	A_i	15.58	5.42	2.79	2.54	1.46	1

4 结论及建议

本文基于美国 ISI Web of Knowledge 平台 SCIE 数据库，采用文献计量的方法对全球新型电力电子器件领域发表的科技论文进行系统分析，得到该领域的整体发展现状与趋势，主要结论如下：

1) 全球新型电力电子器件领域近二十年的科技论文发表量呈现出稳定增长趋势，目前仍是全球科学家重点关注的研究领域。美国、日本、中国大陆、德国和法国表现突出，发文量依次位于全球前五。同时，全球发文量超过 100 篇的高产机构主要分布在美国（7 家）、中国大陆（4 家）、法

国（3家）、俄罗斯（1家）和日本（1家），其中法国国家科学研究院以278篇论文排在全球第一。目前，全球新型电力电子器件领域已逐步形成以美国、欧洲、日本三足鼎立，中国奋力追赶的整体发展态势。

2) 新型电力电子领域的研究热点主要包括关键材料(氮化镓和碳化硅)外延生长及其动力学机理的基础性研究、器件性能优化及创新应用的应用基础研究。美国在关键材料外延生长方面整体上处于全球领先水平，并在碳化硅基变流器、整流器的应用研究和氮化镓场效应晶体管性能研究取得突破。日本则在蓝宝石基关键材料异质外延生长及动力学研究积累了雄厚的技术基础，并着重布局氮化镓基功率放大器性能优化及其机理性研究。欧洲等国家在核心器件设计及应用方面具有一定优势，而中国近期在关键材料制备和器件封测技术等领域取得一定成绩。

3) 通过分析新型电力电子器件领域的国家/地区及机构合作情况可以发现，目前全球在该领域主要形成了明显的“北美-亚洲”和“欧洲”两大地区合作网络。美国和日本为连接两大网络的重要节点，这与两国是碳化硅和氮化镓器件应用发源地，并表现出较为强大的科研实力相关。另外，通过对该领域主要国家/地区的各类创新指标进行标准化，发现美国和日本表现出较为明显的创新能力优势。而中国大陆虽然已具备了一定的科研规模和实力，但论文的整体研究质量仍需进一步提升。

对比美、日、欧等先进国家/地区，中国开展新型电力电子器件领域的研究相对较晚，在关键材料外延技术、芯片器件制备等环节的技术积累与先进地区仍存在差距。为加快弥补我国在新型电力电子器件领域的技术薄弱点，实现该领域对国外先进地区的赶超，仍需在核心技术攻关和创新能力建设等几方面取得突破：

1) 加强核心共性技术攻关。强化对新型电力电子领域技术发展的整体规划和布局，针对我国在该领域的技术薄弱点，加强技术攻关。重点突破碳化硅和氮化镓材料外延生长技术及配套设备的制造工艺，争取实现核心芯片外延生长的自主可控；加快发展碳化硅基变流器、整流器等功率器件，以及氮化镓放大器基等微波器件的制备技术及其配套材料的制造工艺，强

化国内器件封装及测试技术的优势，形成自主核心技术，突破国外的技术封锁。

2) 加强领域高水平创新主体建设。聚焦国内新型电力电子器件核心技术攻关需求，有效整合政府、高校、科研机构和龙头企业的资金、人才、技术、设备等优势资源，打造该领域重点实验室、新型产学研创新平台和工程技术中心等，并针对领域薄弱点，加强引进国外高层次人才及研究团队，完善国内新型电力电子领域各个环节的创新主体建设。同时，鼓励国内研究人员开展具有一定风险、但更具有创新性和引领性的前沿研究，产出具有国际影响力的高水平成果。

3) 形成多元化的国际研究合作机制。加强国内机构与国外先进地区的合作，针对美国在碳化硅材料外延及器件制备、日本在氮化镓材料外延及器件制备、欧洲等国在电力电子器件创新应用的技术优势，建立高效、多元化的技术研究合作机制，加快我国新型电力电子器件领域的发展。

来源：世界科技研究与发展

作者：林兴浩，尚学峰（广东省科学技术情报研究所）