

材料发展报告

——新型与前沿材料

中国科学院武汉文献情报中心 / 编著
材料科学战略情报研究中心



LANDSCAPE OF MATERIAL
DEVELOPMENT



科学出版社

材料发展报告

——新型与前沿材料

中国科学院武汉文献情报中心 / 编著
材料科学战略情报研究中心



LANDSCAPE OF MATERIAL
DEVELOPMENT

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是中国科学院武汉文献情报中心、材料科学战略情报研究中心出版的第二本材料科学发展报告。本书详细解读了全球材料科技相关政策与重大研究计划和项目部署,重点分析了前沿性新材料的发展态势,并专章介绍了中国科学院在材料科学领域的研究进展和在产业化方面取得的重要成果。

本书可供各级行政和科技部门、发展规划部门、科技政策和管理研究部门,以及高校和研发机构研究人员、各材料行业企业相关人士阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料发展报告:新型与前沿材料 / 中国科学院武汉文献情报中心, 材料科学战略情报研究中心编著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041077-1

I. ①材… II. ①中… ②材… III. ①材料科学—研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127702 号

责任编辑:石 卉 王茜艳 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:赵德静 / 封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 246 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《材料发展报告——新型与前沿材料》

总 策 划

钟永恒 冯瑞华 张 军

编 写 组

组 长：冯瑞华

撰稿人：（以姓氏拼音为序）

冯瑞华 黄 健 姜 山

万 勇 王桂芳

“材料发展报告”系列由中国科学院武汉文献情报中心、材料科学战略情报研究中心精心策划。报告在对材料科技的政策规划、技术发展趋势进行跟踪的基础上,旨在通过全面系统地分析,使关心材料科学发展的广大公众了解全球材料科学与技术的发展状况,为决策层提供咨询建议。

2013年出版的《材料发展报告》,系统梳理了材料科技的历史发展以及材料科学研究在世界主要科技强国中的地位,并分析了稀土材料、碳纤维材料等战略性和关键性材料的发展趋势。《材料发展报告——新型与前沿材料》则详细解读了全球材料科技相关政策与重大研究计划和项目部署,重点分析了部分新型和前沿材料的发展态势,并专章介绍了中国科学院在材料科学领域的研究进展和在产业化方面取得的重要成果。

从世界各主要国家的材料政策和计划,可以看出该国近期的材料技术发展重点、投资力度、未来发展方向。美国政府每年的财政预算都确保了材料科技的强劲投入,并实施了材料基因组计划,建立先进材料计算设计中心,重点资助和研发战略性稀土材料、轻质高效的能源材料、纳米科技与安全、航空航天材料、半导体信息材料等。欧盟则重点发展石墨烯、绿色材料、纳米薄膜太阳能电池材料等。日本在碳纤维复合材料、稀土原材料等方面占据了领先地位。

材料的发展日新月异,每年都不断有新的材料涌现。新型材料是指新近发展的或正在研发的、性能超群的一些材料,具有比传统材料更为优异的性能。本书选取了新型信息材料、新型照明与显示材料、新型金属材料、交叉前沿材料等进行发展趋势的分析。在新型信息材料领域,硅芯片制造工艺正逼近其物理极限,为了满足摩尔定律的增长要求,多年来人们一直期望找到新材料,可以替代传统芯片中的硅,从而更深入地推进半导体制造工艺,获得更小、更快、更强的计算机芯片,石墨烯、辉钼将成为替代硅的新型二维半导体材料。在新型照明与显示领域,传统照明材料正逐渐被更高效、更清洁的LED材料替代,传统的显示材料

正在被更人性化、更便携的柔性显示材料替代。在新型金属材料领域,新金属合金、纳米结构钢等正逐渐应用到工程领域。在交叉前沿材料领域,计算材料是在虚拟环境下对材料进行建模、仿真和预测等研究,不仅省材节能,而且缩短了研究-应用进程。

中国科学院是我国在科学技术研究方面的最高学术机构和全国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心,为我国科技进步、经济社会发展和国家安全做出了不可替代的重要贡献。材料是科技发展的基石,中国科学院在材料研究和产业化方面取得了很多重要的成果,对我国社会经济和相关产业发展起到了极大的促进作用,本书介绍了其中的部分代表性成果。

本书在撰写和出版过程中得到了中国科学院多个研究所各位领导、专家学者的大力支持,在此表示衷心的感谢!其中特别向李秀艳(金属研究所科技处)、董德文(长春应用化学研究所科研一处)、赵小龙(上海有机化学研究所科研管理处)、宁聪琴(上海硅酸盐研究所科技一处)、鞠维刚(理化技术研究所业务处)、侯相林(山西煤炭化学研究所科技开发处)、陈亮(宁波材料技术与工程研究所科技发展部)、樊志军(半导体研究所成果管理与转化处)、郑发鲲(福建物质结构研究所科技处)、陈骁(青岛生物能源与过程研究所科技处)、马炘(深圳先进技术研究院科研管理与支撑处)等科技管理专家表示诚挚的谢意!

中国科学院武汉文献情报中心
材料科学战略情报研究中心

2014年1月

前言

第一章 2012~2013 年世界材料科技政策与计划发展 / 1

- 第一节 美国重点材料领域政策和计划 / 2
- 第二节 欧盟材料研究政策和计划 / 17
- 第三节 英国材料研究政策和计划 / 24
- 第四节 德国材料研究政策和计划 / 29
- 第五节 日本材料研究政策和计划 / 32
- 第六节 俄罗斯材料研究政策和计划 / 35

第二章 新型信息材料发展趋势研究 / 37

- 第一节 石墨烯制备与应用路线图 / 38
- 第二节 辉钼半导体材料发展趋势 / 46
- 第三节 高密度磁记录材料发展趋势 / 50

第三章 新型照明与显示材料发展趋势研究 / 59

- 第一节 新一代固态照明材料发展趋势 / 60
- 第二节 柔性显示材料发展趋势 / 73

第四章 新型金属材料发展趋势研究 / 87

- 第一节 纳米结构钢制造工艺与产业化现状研究 / 88

第二节 金属合金材料发展趋势 / 94

第五章 交叉前沿材料发展趋势研究 / 105

第一节 材料计算发展趋势 / 106

第二节 纳米生物传感器发展趋势 / 126

第六章 中国科学院材料科技新进展 / 133

第一节 金属材料与合金科技进展 / 134

第二节 生物医用材料科技进展 / 140

第三节 环保材料科技进展 / 143

第四节 新能源材料科技进展 / 146

第五节 半导体材料科技进展 / 149

第六节 复合材料科技进展 / 152

第七节 晶体材料科技进展 / 154

第八节 稀土材料科技进展 / 155

第九节 化工材料科技进展 / 158

第十节 材料性质研究进展 / 160

第十一节 中国科学院材料科技计量分析 / 164

参考文献 / 169

图 1-1	欧盟清洁技术领域 9 个创新集群分布	23
图 2-1	几种大批量制备石墨烯方法的比较	39
图 2-2	石墨烯电子应用时间节点	41
图 2-3	石墨烯实现光子器件应用的可能时间节点	43
图 2-4	单层辉钼数字晶体管	47
图 2-5	辉钼晶体芯片	48
图 2-6	融合石墨烯与辉钼矿优点的创新闪存原型 (Phy.Org, 2013)	48
图 2-7	垂直磁记录层与水平磁记录层磁畴分布比较	51
图 3-1	LED 照明市场发展情况	66
图 3-2	各种照明技术的能耗比较	70
图 3-3	微胶囊型电子纸显示原理	74
图 3-4	微杯型电子纸显示器原理示意图	76
图 3-5	OLED 基本结构示意图	79
图 3-6	反射式双稳态胆甾型液晶的两种稳态显示原理	83
图 3-7	PDLC 的显示工作原理	85
图 4-1	NanoSteel 公司 SHS 合金性能示意图	91
图 5-1	材料基因组计划通过材料创新基础设施实现目标	107
图 5-2	“冶金欧洲”项目概览	112
图 5-3	铝合金压铸制造工艺-微结构-性能联系和关键节点	123
图 6-1	梯度纳米铜拉伸样品和截面微观结构示意图	135
图 6-2	大规模分子动力学模拟表明,位错形核可主导塑性变形过程	136
图 6-3	Ti2448 钛合金医用器件	137
图 6-4	采用低偏析微缺陷大型钢锭制造技生产的 100 吨 30Ni4MoV 钢锭	138
图 6-5	在锻造机上进行锻造的宽厚板坯	138
图 6-6	多尺度复合耐磨钢样件	138

图 6-7 三种材料耐磨性能曲线	138
图 6-8 由新材料制备的医用产品	140
图 6-9 微孔滤膜生产工艺	141
图 6-10 金刚石微纳无痛针透皮给药技术	142
图 6-11 豆粕聚氨酯包装	143
图 6-12 豆粕聚氨酯保温用样品	143
图 6-13 应化所与浙江台州邦丰塑料公司合作建设的万吨级 CO ₂ 基塑料生产线	145
图 6-14 5000 吨/年聚乳酸树脂工业示范线	146
图 6-15 NaS 电池模块	147
图 6-16 Cu _{2-x} Se 化合物结构示意图	149
图 6-17 Cu _{2-x} Se 低温相 (α) 和高温相 (β) 热电性能	149
图 6-18 器件埋入基板技术	151
图 6-19 硅通孔绝缘材料	152
图 6-20 应用于汽车部件	153
图 6-21 应用于文物保护	153
图 6-22 在介孔孔道中装载体材料的设计思路	154
图 6-23 介孔氧化锆 (铈) 纳米复合材料金属载体上的涂覆与封装	154
图 6-24 交流 LED 材料	157
图 6-25 交流 LED 产品	157
图 6-26 稀土异戊橡胶轮胎	158
图 6-27 生物基异戊二烯	159
图 6-28 高性能聚烯烃催化剂	159
图 6-29 SEBF 系列高性能环氧复合涂层现场一次涂覆成功 (2003 年)	160
图 6-30 已完成沉桩防腐钢管桩 (2004 年)	160
图 6-31 纳米金属铝各个晶体在三维空间的形状、大小和位置	162
图 6-32 煤化所石墨烯产学研结硕果	163
图 6-33 发文量年度变化	165
图 6-34 Top10 学科研究领域	165
图 6-35 主要国家发文数量与 h 指数	166
图 6-36 2008 ~ 2013 年主要国家高被引论文数量占比	167
图 6-37 主要机构发文量与 h 指数	167
图 6-38 主要机构高被引论文占比分析	168

表目录

表 1-1	获得资助的公司与研发方向	9
表 1-2	微电子研究中心	15
表 1-3	NMP 2013 年优先项目	17
表 1-4	NMP 2013 年工作计划创新措施相关计划	18
表 1-5	单独面向中小企业的项目	19
表 1-6	欧盟清洁技术领域 9 个创新集群和部分中小企业	24
表 1-7	2013~2014 年高价值制造行动计划	25
表 1-8	2013~2014 年使能技术行动计划	25
表 1-9	德国卓越计划第二阶段资助情况	30
表 2-1	不同方法制备的石墨烯的性质比较	40
表 2-2	石墨烯电子应用	42
表 2-3	石墨烯光子应用	43
表 2-4	辉钼半导体材料主要研发机构及其进展	47
表 2-5	有潜力应用于超高密度磁记录的介质材料	52
表 3-1	主要半导体材料优越性比较	62
表 3-2	国外固态照明材料研究进展	62
表 3-3	国内固态照明材料研究进展	63
表 4-1	纳米结构钢主要制造工艺	89
表 4-2	纳米结构钢领域主要制造企业及其技术现状	90
表 4-3	NanoSteel 公司产业化的 SHS 合金	91
表 4-4	纳米结构钢主要专利技术	93
表 4-5	稀土镁合金分类	95
表 4-6	定向凝固技术路线比较	97
表 4-7	各国高温合金研发现状	98
表 4-8	稀土储氢合金的处理方法	99

表 4-9 金属合金材料面临的关键问题	103
表 5-1 美欧中材料基因组研究概况对比	116
表 5-2 计算层次，典型的计算模式、方法及相关的参数和软件	117
表 5-3 Ferrium S53 钢材料研究历程	122
表 5-4 计算材料方法嵌入设计与制造流案例	124



第一章

2012 ~ 2013 年世界材料 科技政策与计划发展

第一节 美国重点材料领域政策和计划

一、从美国 2014 财年预算看材料发展

美国政府及其重要职能机构都对科研技术和活动，尤其是促进社会可持续发展、制造业复兴的新材料、先进制造技术、清洁能源技术、网络基础设施等进行优先资助和发展，以增强美国未来的科技领先地位和竞争力。

2013年4月10日，美国奥巴马政府向国会提交了2014财年联邦政府预算报告，该报告体现了美国对科研的重视，提出将缓慢地重建联邦科学支持与青睐的领域，包括清洁能源技术、先进制造、生物技术、新材料等重点方向。奥巴马政府2014财年支出计划中，332亿美元用于基础研究，同比2012年增长约4%；2014财年研究和发展总支出预算为1430亿美元，同比2012年增长约1.3%（Basken，2013）。

美国对能源问题高度重视，在清洁能源和先进制造业方面的定位是世界领先的竞争者。美国能源部（DOE）2014 财年预算为 284 亿美元，较 2012 年提高 8%。DOE 还增加对清洁能源技术活动的资金，较 2012 年水平提高逾 40%。DOE 表示，6.15 亿美元预算用于提高太阳能、风能、地热能和水能等清洁能源的利用并降低其成本；3.65 亿美元预算投资于先进制造技术研发；5.75 亿美元预算用于尖端汽车技术，增加国内先进车辆和可再生能源的承受能力；2.82 亿美元预算研发新一代先进生物燃料等。另外，科学办公室的预算超过 50 亿美元，同比 2012 年增长 5.7%，重点资助基础研究机构。

美国国家科学基金会（NSF）2014 财年预算为 76 亿美元，同比 2012 财

年增长 8.4%，预算请求优先投资于基础研究和相关的活动。NSF 的投资重点领域包括最近成立的阿塔卡马大型毫米波天线阵望远镜、新材料、先进制造工艺、智能系统、先进的网络基础设施，以及可持续发展的科学和工程（NSF，2013）。

美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）规模相对较小，2014财年预算为9.28亿美元，同比2012财年增长23%。新增预算主要包括一个新的研究基金（1.27亿美元）、帮助中小制造商采用创新技术的新区域中心（2500万美元）、优先研究需求的新联盟（2140万美元）。NIST 的预算主要包括科学和技术研究和服务（6.94亿美元），其优先研究领域包括先进制造技术（5000万美元）、网络安全（2400万美元）、高级通信（1000万美元）、网络物理系统（1000万美元）等；工业技术服务（1.745亿美元），其优先研究领域包括霍林斯制造业扩展伙伴关系（MEP）（1.531亿美元，包括新 MEP 制造技术加速中心的2500万美元）、先进制造技术联盟（Amtech）（2140万美元）等；另外还有研究设施建设（6000万美元）（Huergo，2013）。

二、政府、企业关注稀土等关键原材料研发和产业化

1. 稀土等关键原材料由战略政策走向研发执行

受中国稀土限产、限出口等因素影响，国际稀土价格迅速上涨，2010 年以来增长超 10 倍；尽管美、日、澳等国有开新矿计划，但仍解决不了民用的稀土短缺问题，因为矿商为追求利益最大化肯定与中国形成价格同盟。

DOE 于 2010 年 12 月首次发布《关键材料战略》，2011 年 12 月又进行更新，5 种稀土元素——镝（Dy）、钕（Nd）、铽（Tb）、铕（Eu）、钇（Y），以及铟（In）被评定为最关键的材料，并提出将重点关注风力发电机、电动汽车、太阳能电池和高效照明等清洁领域的稀土供给和应用。研究发现，短期内有几种清洁能源技术用材料面临供给风险，而从中长期来看，这种风险将会逐渐降低（DOE，2011）。2012 年 5 月，DOE 建立“关键材料创新中心”，促进技术转移转化，推向产业应用。未来 5 年，这个中心将投入 1.2 亿美元，开展材料的“减量、替代、循环（3R）”研究，旨在减轻美国对关键材料的依赖程度，确保国内能源技术的发展不再受制于未来材料供应短缺的掣肘。该中心将会解决每一种关键材料在全生命周期中面临的挑战，即从选矿、加工、有效使用到循环等。因此，稀土等关键材料将从“战略政策”阶段走向“研发执行”阶段，由“分散式”研究转向建立研究实体的“集

中式”研究。

2. 确保稀土供应链，重塑国防安全

2012年4月25日和30日，美国国会研究服务局（Congressional Research Service, CRS）先后发布了专题报告《国防中的稀土元素：背景、监督问题和国会选择》（*Rare Earth Elements in National Defense: Background, Oversight Issues, and Options for Congress*）和《中国的稀土产业和出口制度：对美国的经济和贸易影响》（*China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States*）。

根据相关法案，美国国会指派国防部就稀土供应链展开评估，制订应对计划，并要求国防部评定哪些稀土元素符合以下标准：①对美国重大军事装备的生产、维持、运转有关键作用；②受到不在美国政府控制范围之内的战争或事件的影响，供应可能中断。美国国会将鼓励国防部制定合作的、长期的战略，旨在甄别与稀土相关的任何材料薄弱环节，并维护美国的长远国家安全利益。报告指出，国会对稀土问题的关注主要出于以下原因：①目前全球几乎完全依靠一个国家——中国——来提供稀土；②美国国内不能生产铽、镨（Lu）、钕等重元素；③美国稀土金属、稀土粉体以及钕铁硼磁体的产量很低；④一旦美国无法获得这些材料，商业和国防工业将会受到影响；⑤稀土供应链的脆弱性将会对美国国家安全战略规划产生消极的影响。因此，报告建议，国会应要求美国政府进行稀土战略储备。

《中国的稀土产业和出口制度：对美国的经济和贸易影响》则就中国的稀土政策对美国的经济和贸易影响，展开了论述。报告回顾了美国与中国就其稀土出口限制的争端，探讨了美中稀土贸易级别、中国政策如何影响美企的稀土价格、中国限制稀土出口背后可能的动机、美国及其他主要稀土消费大国如何回应等。此外，报告还审视了中国稀土产业和政府政策，包括演化、进展，以及完成政府目标（如整合生产、应对污染、整治非法开采等）的效力。

2013年5月8日，美国制造业联盟发布《重塑美国安全：美国国防工业基地的供应链漏洞和国家安全风险》（*Remaking American Security: Supply Chain Vulnerabilities & National Security Risks Across the U.S. Defense Industrial Base*）报告，欲完善国防供应链重塑国防安全。报告指出，美国国防受到国外原材料、零部件和成品等重要国防物资供应方面的威胁日益增加，呼吁采取行动增加美国军事装备所需的天然资源和制成品的国内产量。

报告详细分析了一些案例。例如，美国“地狱火”导弹所需的固体火箭化学

燃料完全依赖于单一的中国公司生产；美国目前在锂（Li）离子电池生产的竞争中处于劣势，依靠外国供应商提供产品和下一代电池；美国夜视设备所需的稀土元素镧几乎完全依赖从中国进口，占 91%，具有很大的风险；美国国内没有钕铁硼磁体生产商，中国制造的钕铁硼磁体占 75%。

该报告提出了以下 10 项建议，以提高美国的制造能力，减少美军对进口产品的依赖（Lisa McTigue Pierce, 2013; Adams, 2013）：

（1）增加高科技产业的长期联邦投资，特别是涉及先进研究和制造能力的产业；

（2）适当更新、应用和执行现有的法律和法规，支持美国的国防工业基地；

（3）开发美军所需的国内主要天然资源；

（4）在制定美国国家军事战略、国家安全战略和进行四年防务评估时，确保国防工业基地被认定为最高级别；

（5）在政府、工业界、国防工业基地职员以及军队之间建立共识，更好地加强国防工业基地；

（6）增强联邦机构，以及政府和行业之间合作，建立健康的国防工业基地；

（7）加强政府、行业和学术研究机构间的合作，教育、培训和留住的关键国防工业基地行业具有专业技能的工人；

（8）制定法律以支持具有广泛代表性的国防工业基地战略；

（9）通过网络确保主要承包商和所依赖的供应链之间的持续沟通，使国防供应链适应现代需要，并得以保护；

（10）确定潜在国防供应链的瓶颈，制订计划以防止干扰。

3. 美日展开一系列合作计划

2012 年 4 月，美日发表了“美日联合声明：面向未来的共同愿景”（U.S.-Japan Joint Statement: A Shared Vision for the Future）的联合声明，还宣布了一系列合作计划，旨在加强和拓展美日在国防、经济、文化与人员交流方面的合作关系。

新清洁能源合作计划是此次宣布的众多计划之一，作为该计划的一部分，美日双方提出要加强关键材料研发合作。其具体内容包括：在美日双方现有关键材料政策对话的基础上，针对回收稀土元素及其他领域研发展开新的合作。美国国家实验室、日本研究机构及双方大学将参与这些合作。美国与日本还将在稀土元素及其他关键材料的生产和使用方面加强双方研究机构之间的信息共享，以推动对市场条件和技术需求的了解。这一合作将促进实现双方在关键材料供应多样化、替代材料研发以及完善回收工艺方面的共同目标（The White