

石墨烯及功能产品标准体系现状分析与对策

李茂东^{1,2} 潘 锋³ 黄国家^{1,2} 尹宗杰^{1,2}

(1.广州特种承压设备检测研究院,广州 510663;2.国家石墨烯产品质量监督检验中心(广东),
广州 510663;3.中国合格评定国家认可委员会,北京 100062)

摘 要 石墨烯及其功能产品展现出优越的性能已成为当前研究热点。从国际、国内两方面介绍了石墨烯产业技术发展现状,重点概述了国际上承担石墨烯及其功能产品的标准化组织和国际标准研究进展,总结了中国在石墨烯及其功能产品国际标准、国家标准、地方标准和团体标准制定现状,提出了石墨烯及其功能产品标准体系建设措施。

关键词 标准体系,石墨烯,功能产品

Current situation analysis and countermeasure of standard system for graphene and its functional products

Li Maodong^{1,2} Pan Feng³ Huang Guojia^{1,2} Yin Zongjie^{1,2}

(1.Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute,Guangzhou 510663;
2.National Graphene Product Quality Supervision and Inspection Center (Guangdong),Guangzhou
510663;3.China National Accreditation Service for Conformity Assessment,Beijing 100062)

Abstract Graphene and its functional products exhibit superior performance, which has become a research hotspot at present. Firstly, the development status of graphene industry technology from both international and domestic aspects was introduced. The international standardization organizations and international standards for graphene and its functional products were reviewed. The current situation of the revision of national, local and group standards for graphene and its functional products in China were also summarized. The construction measures of standard system for graphene and its functional products were put forward.

Key words standard system, graphene, functional product

石墨烯作为仅有单层原子厚、最坚硬的二维材料,具有导热率高、电子迁移率高、力学强度高和透光率高等优点,已广泛应用于聚合物复合材料、导热材料、电子信息、传感、生物医药和防腐等多个领域,是未来高科技竞争的超级材料和战略新型材料^[1-5]。我国是世界上石墨烯领域研究与应用最活跃的国家之一,很多方面处于国际领先水平。但我国石墨烯及功能产品质量检测评价方法和标准研究相对滞后,这给产业发展和技术进步造成了障碍。标准是强化质量技术、推动制造业高质量发展的技术支撑^[6]。石墨烯及其功能产品的标准制定工作十分重要和紧迫。笔者在分析国内外石墨烯及功能产品产业与技术标准现状的基础上,对我国石墨烯标准体

系建设发展提出了具体的对策和建议。

1 国内外石墨烯技术及产业化发展现状

1.1 国际石墨烯产业研发现状

目前全球约 80 多个国家涉及石墨烯研究。全球石墨烯市场规模呈现快速增长态势,2017 年市场规模达到 1346 万美元,2025 年有望达到 21 亿美元^[7]。欧洲、美国、日本和韩国等许多国家和地区都制定了一系列支持石墨烯产业发展的政策,纷纷从战略层面对石墨烯产业进行布局^[7-8],欧美企业占据产业链关键环节。欧盟于 2013 年 1 月将石墨烯定为“未来新兴技术旗舰项目”。英国把石墨烯作为该国未来 4 个重点发展的方向,英国政府建立了国家

基金项目:广东省软科学研究计划资助项目(2019A101002036);广东省质监局科技项目(2018CT31 和 2018PT05);广州市质监局科技项目(2017KJ18);广州市市场监督管理局科技项目(2019KJ12)

作者简介:李茂东(1972-),男,硕士,教授级高级工程师,长期从事检验检测技术与标准化研究。

石墨烯研究院,该研究院由多所大学和科研机构共同组成,处于世界领先水平。美国石墨烯领域的研究及产业化布局主要由国家自然科学基金、美国能源部和美国国防部等机构负责,资助了大量石墨烯在能源领域的研究。德国科学基金会从石墨烯材料基础与理论开展了前沿研究。韩国政府近年来已提供 2.5 亿美元用于促进石墨烯产品和技术的商业化加速发展,同时石墨烯硅材料、器件的技术得到了科学技术振兴机构重点支持。许多国际知名企业(如英特尔、杜邦、华为、索尼)也布局了石墨应用技术,积极发展石墨烯功能产品核心技术。

1.2 我国石墨烯产业的发展现状

我国石墨烯产业发展大致经历了 3 个阶段,2009—2013 年石墨烯材料从中试走向规模化生产;2013—2018 年,石墨烯材料应用逐渐扩大,且受资本市场疯狂追捧;2018 年至今,石墨烯产业发展趋于理性,市场竞争日趋激烈,企业出现分化。我国石墨烯产业的发展政府发挥了关键性引导作用,在产业化方面已经走在了国际前列^[9]。目前国内以中国科学院宁波材料所、北京大学、山西煤碳研究所、浙江大学、中国科学院沈阳金属所、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、清华大学和复旦大学等为代表的高校科研院所开展了大量的石墨烯制备技术及其功能应用的基础研究和应用研发^[10]。2013 年 7 月,中国石墨烯产业技术创新战略联盟成立。同时,江苏、山东等多地建立了石墨烯产业技术联盟,促进高校科研院所与企业的资源优化组合、推动产学研融合发展^[11]。2013 年,中国石墨烯研究及检测公共服务平台成立,专业从事石墨烯结构与性能检测。

2018 年 12 月,石墨烯改性防腐涂料等 6 种材料入选国家《重点新材料首批次应用示范指导目录(2018 年版)》^[12-13]。工业和信息化部、商务部、市场监管总局和科技部联合印发《原材料工业质量提升三年行动方案(2018—2020 年)》,明确提出石墨烯材料生产需要达到国际先进水平。原国家质检总局相继在江苏、广东、山东批筹了 3 个国家石墨烯产品质量监督检验中心,支持我国石墨烯检测产业发展。

地方政策层面,广西相继发布了《广西石墨烯产业发展工作方案》和《广西石墨烯产业协同创新发展实施方案》^[11]。江苏无锡发布了《无锡石墨烯产业发展规划纲要》,提出打造国际一流、国内领先、具有鲜明特色的无锡石墨烯产业集群。福建泉州发布了《泉州市石墨烯产业发展路线图(2018—2028)》。山

东青岛发布了《青岛市石墨烯产业发展规划(2018—2025)》。2013 年 6 月,内蒙古石墨烯材料研究院成立,主要从事石墨烯材料的新品种、新技术和新工艺的研究开发、标准制订及质量检测^[14]。2015 年,青岛成立了青岛国际石墨烯创新中心。2019 年上半年,江苏省石墨烯创新中心、广东省石墨烯创新中心成立,主要采用“公司+联盟”的模式运行。

石墨烯产业链分上、中、下游,上游为制备石墨烯原材料,中游为石墨烯薄膜或粉体制备关键技术与设备行业,下游为石墨烯产品应用领域,如涂料、器件、复合材料等,产业链中,下游公司居多^[9]。目前,我国石墨烯企业数量已超过 5000 家。其中大部分企业依然处于发展初级阶段,产品和商场都不稳定,石墨烯规模化制备技术和下游产品商业化应用是目前石墨烯产品行业的主要竞争点。

目前我国石墨烯产业还存在石墨烯规模制备技术不成熟、应用市场有待拓展、标准体系建设滞后等瓶颈问题。石墨烯产业发展存在问题的原因是科技与产业结合不够,创新转化渠道不畅通,缺乏高端技术牵引,石墨烯规模化低成本制备仍旧面临诸多挑战。

2 国际石墨烯及功能产品标准化现状

国际上石墨烯标准制定工作处于起步阶段。目前从事石墨烯标准研制工作的主要有国际标准化组织纳米技术标准化委员会(ISO/TC 229)、欧洲电工委员会(CENELEC)、国际电工委员会电工产品及系统的纳米技术标准化委员会(IEC/TC 113)等 3 个组织在石墨烯领域都有良好合作和协调,均有相应石墨烯材料规范研讨组^[15]。目前,ISO/TC 229 与 IEC/TC 113 就石墨烯标准制定成立了联合工作组,统筹协调石墨烯的国际标准制定。其中 IEC/TC 113 就石墨烯的标准化制定了路线图以及工作框架。截至目前,这两大国际标准组织正在研制 20 余项石墨烯标准,其中以中国、韩国和欧盟提出的最多。几年来,德国、日本、美国也开始在石墨烯标准化方面加强了工作力度。

ISO/TC 229 和 IEC/TC 113 在石墨烯标准化领域做了很多工作。ISO/TC 229 纳米技术委员会是 2005 年成立的国际标准化组织与专门负责纳米材料标准化方面的技术委员会,由 31 个国家的正式成员、8 个国家的观察员组成,包括 20 个相关的联络组织^[16]。IEC/TC 113 是国际电工委员会下设的

电工和电子产品及系统的纳米标准化技术委员会,该技术委员会有两个工作组已与 ISO/TC 229 成立了石墨烯联合工作组^[16]。ISO/TC229 主要是针对石墨烯材料的命名、毒理性等参数制定相关的标准。IEC/TC113 将原材料生产和组件或终端产品全生产链纳入到标准化路线图中,针对石墨烯材料的关键控制参数的测量开展了大量的工作,并形成了相应的国际标准。针对石墨烯新材料技术发展快的特点,IEC/TC113 提出了空白详细规范和关键控制特性两个概念,并形成了 IEC 62565 和 IEC 62607 两个系列标准^[7-18]。目前制定的 IEC 62565-3-1 石墨烯空白详细规范总共规定了 6 大类 36 个需要建立测量表征方法的关键控制特性,目的是为了提高石墨烯技术发展水平,鼓励企业在此基础上提出特殊应用的材料规范,所以这个标准也是在不断地更新当中。

ISO/TC 229 和 IEC/TC113 已经发布的石墨烯相关标准 2 项,另外有 25 项提案正在研制^[18]。通过分析石墨烯国际标准提出国的分布,可以看出韩国和欧盟在标准化工作方面走在了前列,其参与提案的企业的规模大、研发实力高,并且和高校、研究机构有着非常紧密的产学研合作,在石墨烯产业化的近期、中期、长期战略有着清晰的布局。

2014 年,欧盟提出对石墨烯材料的技术评估和分类进行标准化,能通过制定标准来明确材料的属性,以此保证不同应用场景中石墨烯材料质量的一致性和可重复性,从而达到规范石墨烯产品行业发展的目的^[16,19]。欧盟委员会已与 IEC/TC 113 合作,计划在石墨烯关键控制特性,包括石墨烯层数、薄膜电阻、石墨烯基可伸缩电极测试、结构质量等几个方面制定相关标准^[16]。

IEC/TS 62607-6-4(纳米制造.关键控制特性.第 6-4 部分:石墨烯·利用谐振腔的表面电导测量)于 2016 年 9 月以技术规范的形式发表,成为全球出台的首个石墨烯国际标准。

由英国国家物理实验室领导制定的标准 ISO/TS 80004-13(纳米技术词汇-第 13 部分:石墨烯及其相关二维材料)于 2017 年 9 月发布。该标准定义了用于描述许多不同类型的石墨烯和相关 2D 材料的术语,为石墨烯的测试和验证提供了指引^[16]。

在我国,国家纳米科学中心、中国科学院山西煤炭化学研究所和深圳粤网节能技术服务有限公司等共在 IEC/TC113 提出了 8 项国际标准,目前这些标

准正在研制阶段^[20],见表 1。

表 1 我国提出的石墨烯国际标准

计划号	标准名称	提出单位
IEC/TS 62607-6-13	Bohem 滴定法测量石墨烯表面含氧官能团	中国科学院山西煤炭化学研究所
IEC/TS 62607-6-14	拉曼光谱法表征石墨烯粉体材料的缺陷等级	深圳粤网节能技术服务有限公司
IEC/TS 62607-6-17	石墨烯粉体有序度分析	深圳粤网节能技术服务有限公司
IEC/TS 62607-6-18	FTIR-TGA 联用法测石墨烯粉体官能团含量	深圳粤网节能技术服务有限公司
IEC/TS 62607-6-19	CS/ONH 分析仪测石墨烯粉体化学组成	深圳粤网节能技术服务有限公司
IEC/TS 62607-6-20	ICP-MS 法测量石墨烯片金属杂质	国家纳米科学中心
IEC/TS 62607-6-21	XPS 法测量石墨烯片 C/O 比	国家纳米科学中心
IEC/TS 62607-6-22	燃烧法测量石墨烯材料的灰分含量	中国科学院山西煤炭化学研究所

3 我国石墨烯及功能产品标准化现状

我国在石墨烯产品标准制定方面起步较晚。中国石墨烯产业技术创新战略联盟于 2013 年提出制定石墨烯联盟标准。2017 年,国家层面发布了《国家基础标准体系建设指南》,提出了要开展石墨烯及制品相关标准制定要求^[21]。2017 年 6 月,国家标准化管理委员会与英国国家标准化机构签署石墨烯标准化合作备忘录,成立中英石墨烯标准化合作工作组,共同推进石墨烯国际标准的制定^[22]。国家市场监督管理总局标准技术司牵头成立了石墨烯标准化推进工作组。该工作组由政府部门、石墨烯研发企业、经营单位、使用单位、科研院所等单位的 53 名成员组成,秘书处由冶金工业信息标准研究院承担,下设 4 个专业组(通用基础专业组、表征与测量专业组、环境安全健康专业组、产品规范专业组)。

2018 年 12 月我国第一个石墨烯国家标准《纳米科技术语 第 13 部分:石墨烯及相关二维材料》(GB/T 30544.13—2018)正式发布^[23]。但对于这个标准行业内也有一些不同的声音,主要集中在标准全盘照搬 ISO 标准,没有结合我国的产业实际情况等。2019 年,国家标准《纳米技术 石墨烯材料表面含氧官能团的定量分析 化学滴定法》(GB/T

38114—2019)和国家标准化指导性技术文件《纳米技术 石墨烯材料比表面积的测试 亚甲基蓝吸附法》(GB/Z 38062—2019)相继发布。行业标准《石墨烯锌粉涂料》也已基本研制完成。全国纳米技术标准化技术委员会(SAC/TC 279)目前正在开展研制的主要石墨烯国家标准见表 2。

表 2 我国石墨烯国家标准立项研制汇总

计划号	标准名称
20170324-T-491	石墨烯薄膜的性能测试方法
20160465-T-491	石墨烯材料的导电性能测试
20140890-T-491	拉曼光谱法表征石墨烯层数
20140894-T-491	石墨烯层数测定 扫描探针显微镜法
20140889-T-491	光学法测定石墨烯层数
20191895-T-491	纳米技术 氩气吸附静态容量法(BET)测量石墨烯材料的比表面积
20191896-T-491	石墨烯材料的化学性质表征 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)

此外,2014年,全国标准化技术委员会在碳素材料分技术委员会下组建了薄层石墨材料工作组(SAC/TC 183/SC 15/WG 1),工作组由江南石墨烯研究院担任组长单位并承担秘书处工作,主要负责薄层石墨材料基础标准、方法标准、产品标准的调研,制(修)订石墨烯材料标准,构建我国薄层石墨材料标准体系。

地方标准化委员会建设方面,江苏、广东、广西、河北、重庆等地相继成立了地方标准化技术委员会。2016年,广西成立国内首个地方石墨烯标准化技术委员会。2017年,江苏省相继成立了江苏省石墨烯标准化技术委员会和江苏省石墨烯检测标准化委员会,秘书处分别设在石墨烯产业集聚的常州和无锡^[24]。广东省2018年成立了广东省石墨烯标准化技术委员会,秘书处设在国家石墨烯产品质量监督检验中心(广东)。目前国内已经发布实施的与石墨烯相关的地方标准见表 3。

表 3 我国已发布的石墨烯相关地方标准

标准名称	发布省份
石墨烯三维构造粉体材料的检测与表征方法	广西
石墨烯三维构造粉体材料名词术语和定义	广西
石墨烯三维构造粉体材料生产用高温反应炉的设计规范	广西
石墨烯三维构造粉体材料生产用聚合物	广西
石墨烯三维构造粉体材料生产技术	广西

续表

标准名称	发布省份
石墨烯薄膜微区覆盖度测试 扫描电子显微镜法	江苏
石墨烯材料 碳、氢、氮、硫、氧含量的测定 元素分析法	江苏
石墨烯材料 热扩散系数及导热系数的测定 闪光法	江苏
石墨烯粉体材料检测方法 第 1 部分:灰分的测定	河北
石墨烯粉体材料检测方法 第 2 部分:碳、氮、氢、硫、氧元素的测定	河北
石墨烯粉体材料检测方法 第 3 部分:电导率的测定	河北
石墨烯粉体材料检测方法 第 4 部分:比表面积、孔容和孔径的测定	河北
石墨烯粉体材料检测方法 第 5 部分:热扩散系数的测定 闪光法	河北

新《标准化法》的实施确定了团体标准的法律地位。中关村石墨烯产业技术创新联盟、中国石墨烯产业技术创新战略联盟、国际石墨烯资源产业技术创新联盟等石墨烯技术联盟都积极开展石墨烯团体标准研制工作。至目前为止,中国石墨烯产业技术创新战略联盟发布了石墨烯团体标准,立项在研的标准超过 20 个^[16]。2017年6月,由中国工程院牵头成立了“中国材料与试验团体标准(CSTM)委员会”。该委员会是政府支持的标准化组织,也在积极开展石墨烯相关标准研制工作并陆续发布了若干石墨烯领域标准。这些机构的标准化工作有效地弥补了石墨烯标准供给不足的问题。目前,国内已经发布的部分石墨烯团体标准和立项在研的团体标准见表 4、表 5。

表 4 我国已发布的部分石墨烯团体标准

标准名称	标准号	发布机构
石墨烯材料术语和代号	T/CGIA 001—2018	
含有石墨烯材料的产品命名指南	T/CGIA 002—2018	
石墨烯印刷油墨型红外辐射电热膜	T/CGIA 030—2017	
工程机械用石墨烯增强极压锂基润滑油	T/CGIA 001—2019	中国石墨烯产业技术创新战略联盟
石墨烯材料中金属元素含量的测定 电感耦合等离子体发射光谱法	T/CGIA 012—2019	
石墨烯材料碘吸附值的测定方法	T/CGIA 011—2019	
石墨烯材料中硅含量的测定 硅钼蓝分光光度法	T/CGIA 013—2019	
[60]和[70]富勒烯的纯度测定 高效液相色谱法	T/CSTM 00009—2019	中关村材料试验技术联盟
石墨烯改性无溶剂导电涂料	T/CSTM 00028—2019	
二维材料厚度测量 原子力显微镜法	T/CSTM 00003—2019	

表5 我国已立项的部分石墨烯团体标准

标准名称	立项机构
二维材料厚度测量 原子力显微镜法	
单壁碳纳米管分散性测量 紫外-可见红外光谱法	
SiO ₂ /Si 基底石墨烯层数测量 拉曼光谱温度曲线方法	
[60]富勒烯的纯度测定 高效液相色谱法	
石墨烯防腐油管涂层质量检验及试验方法	中关村材
石墨烯改性水泥基保温板	料试验技
涂料中石墨烯的测定	术联盟
石墨烯材料测试方法 X射线衍射法	
石墨烯材料测试方法 透射电子显微镜法	
石墨烯材料测试方法 拉曼光谱法	
锂离子电池用石墨烯导电浆料	
石墨烯导电浆料分散稳定性评价方法	
石墨烯防静电地坪涂料	
煤矿井下用石墨烯增强聚乙烯管材	中国石墨
石墨烯材料技术成熟度评价及分类	烯产业技
石墨烯增强聚乙烯双抗(抗静电阻燃)母粒	术创新战
地暖用石墨烯增强导热耐热聚乙烯(PE-RT)母粒	略联盟
石墨烯改性沥青废轮胎自粘防水卷材	
石墨烯电加热供暖应用技术规程	

4 推动我国石墨烯及功能产品标准措施与建议

标准是产业质量水平的标杆,也是促进产业规模化的重要途径,具有规范、支撑、引领产业发展的积极作用。建立一套符合中国石墨烯产业发展特点的产品评价标准体系,对规范产品性能,促进高品质石墨烯的中高端供给,提振市场对石墨烯应用的信心十分关键。对于我国石墨烯及功能产品的标准体系的发展对策,可从如下几个方面着手:

(1)尽快制定与国际接轨的我国石墨烯及功能产品标准体系及建设路线图。石墨烯属于新材料,石墨烯产业属于新兴产业,其应用范围之广和技术发展速度之快是标准化工作的难点。因此,应结合我国石墨烯优势产业发展现状,制定国家石墨烯产业标准化战略,建立包括石墨烯及功能材料基础标准、材料结构和性能、材料制备方法和石墨烯产品标准等在内的全面成套、层次清晰的石墨烯标准体系,同时制定标准研制路线图,为当前及今后一段时间我国石墨烯标准化工作提供顶层文件。我国涉及到石墨烯的各级标准研制就按照这个体系和路线图进行。针对石墨烯涉及环境、健康、安全等方面的标准应在国家层面制定,能快速反映市场需求的标准则

应交由行业、地方和市场主体负责,及时提供标准有效供给。

(2)加快国内石墨烯领域标准立项和研发力度,不断满足产业和市场需求。对于石墨烯领域的国家标准制订赋予相关标委会更大的自主权,采取特事特办方式加快立项审批速度,改变目前标准立项周期长、立项难的现状。推动标准融合发展,紧跟国际石墨烯标准化技术前沿以及我国石墨烯产业技术需求,做到产品研发与标准研制同步,推动专利与标准深度融合,加快行业亟需的石墨烯标准的研制,积极引导石墨烯行业大企业的深度参与,特别是下游应用企业参与关键技术标准攻关,促进高校、科研院所、企业在标准研究中的深度融合、广泛参与,打通创新链和产业链,实现两链的环环相扣。加快石墨烯及功能产品检测方法标准的研制,引导下游应用,为上下游产业提供统一的评价方法。同时,国家标准、行业标准、地方标准、团体标准和企业标准研制同步推进,对于成熟的企业、行业、地方或团体标准及时转化为国家标准,主动参与国际标准化工作,推动中国标准走向国际,提高我国产品的国际竞争力。

(3)加快石墨烯标准化人才队伍建设,为行业提供智力支撑。发挥国家石墨烯质检中心、区域石墨烯产业创新中心、高等院校、科研机构等平台的人才集聚作用,建立国际标准化人才培养基地,通过培训、研发、国际交流等途径重点培养石墨烯标准化创新人才,既培养技术水平高、熟悉标准化体系的一线标准化人才,也要培养熟悉外语、懂技术和国际规则的国际标准化高端人才,以满足国内石墨烯行业不同层次、不同领域的标准化人才需求,为我国石墨烯标准国际化提供人才支撑。

参考文献

- [1] Geim K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nat Mater, 2007, 6: 183-191.
- [2] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [3] 林奎鑫, 李多生, 叶寅, 等. 扭转双层石墨烯物理性质、制备方法及其应用的研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(24): 19-31.
- [4] Tang Chunmei, Wu Jiaren, Wan Yimin, et al. Geometric structure, electronic property, and hydrogen storage capacity of the Sc atoms decorated expanded sandwich type structure graphene-Sc-graphene[J]. Acta Chim Sinica, 2015, 73(11): 1189-1195.
- [5] 黄国家, 陈志刚, 李茂东, 等. 石墨烯和氧化石墨烯的表面功能

化改性[J].化学学报,2016,74(10):789-799.

[6] 马中东,王肖利.团体标准推进我国制造业高质量发展的对策分析[J].中国标准化,2018,529(17):92-96.

[7] 王健.西太湖科技园石墨烯产业优化管理的战略研究[D].桂林:广西师范大学,2015.

[8] 肖劲松.石墨烯产业:现状·问题·对策[J].新经济导刊,2018(5):60-64.

[9] 刘彦红.我国石墨烯产业发展路径[J].工业经济论坛,2016,3(5):538-542.

[10] 刘瑞营.搭建国内外合作桥梁推动石墨烯产业发展——2015中国国际石墨烯创新大会侧记[J].中国科技产业,2015(11):38-39.

[11] 2018 全球石墨烯产业研究报告[R].北京:中国石墨烯产业技术创新战略联盟,2018.

[12] 张颖.我国石墨烯产业化发展研究[D].唐山:华北理工大学,2017.

[13] 刘金金,赵公民,马丹丹.国际石墨烯制备技术研究热点和前沿态势分析[J].合成材料老化与应用,2018,47(6):70-73,112.

[14] 汪丽.少层石墨烯电学性能的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017.

[15] 苏东艳,高岩,王薇,等.石墨烯国际标准研发及启示[J].信息与标准化,2017(10):51-55.

[16] 刘晓静.石墨烯产业国内外标准化进展研究[C].杭州:第 12 届中国标准化论坛论文集,2019.

[17] 余珊珊.石墨烯标准化研究进展及未来展望[J].新材料产业,2018(4):45-49.

[18] 李汉清,刘振宇,赵霞.石墨烯技术产业现状及发展建议[J].情报探索,2014(2):52-56.

[19] 刘彦红.我国石墨烯产业发展路径研究[J].中国科技投资,2018(22):6.

[20] 金殿臣,李媛.中国石墨烯产业发展现状及对策研究[J].湖北经济学院学报,2017,15(3):67-73.

[21] 刘颖佳,梁彦芳,刘颖.石墨烯标准化发展现状与对策分析——基于江苏实践[J].中国标准化,2018(5):127-131.

[22] 张佩玉,裴继超.深化中英标准交流,推动双边经贸发展——2018 中英标准化合作委员会会议在杭州召开[J].中国标准化,2018(9):2.

[23] 国家标准化管理委员会.中国首个石墨烯国家标准正式发布[J].粉末冶金工业,2019,29(1):12.

[24] 赵秀婷,班建伟,周静,等.我国石墨烯产业标准发展建议[J].高科技与产业化,2018(3):23-26.

收稿日期:2019-07-09

修稿日期:2019-08-26



(上接第 16 页)

[12] Chen T,Shang Y,Hao S,et al.Enhancement of dye sensitized solar cell efficiency through introducing concurrent upconversion/downconversion core/shell nanoparticles as spectral converters[J].Electrochimica Acta,2018,282:743-749.

[13] Wang H,Batentschuk M,Osvet A,et al.Rare-earth ion doped up-conversion materials for photovoltaic applications[J].Advanced Materials,2011,23(22/23):2675-2680.

[14] Wang H,Stubhan T,Osvet A,et al.Up-conversion semiconducting MoO₃:Yb/Er nanocomposites as buffer layer in organic solar cells[J].Solar Energy Materials and Solar Cells,2012,105:196-201.

[15] Wang F,Yang X,Niu M,et al.Enhancing light harvesting and charge transport in organic solar cells via integrating lanthanide-doped upconversion materials[J].Journal of Physics D-Applied Physics,2018,51:26510526.

[16] Kong M,Hu W,Cheng F,et al.Efficiency enhancement in P3HT-based polymer solar cells with a NaYF₄:2% Er³⁺,18% Yb³⁺ up-converter[J].Journal of Materials Chemistry C,2013,1(37):5872-5878.

[17] 程凡.NaYF₄:Er³⁺(2%),Yb³⁺(18%)上转换纳米粒子及其在聚合物太阳能电池中的应用[D].南京:南京邮电大学,2014.

[18] Adikaari A A D,Etchart I,Guéring P,et al.Near infrared up-conversion in organic photovoltaic devices using an efficient Yb³⁺:Ho³⁺ Co-doped Ln₂BaZnO₅ (Ln = Y, Gd) phosphor [J].Journal of Applied Physics,2012,111(9):94502.

[19] Chen W,Hou Y,Osvet A,et al.Sub-bandgap photon harvesting for organic solar cells via integrating up-conversion nanophosphors[J].Organic Electronics,2015,19:113-119.

[20] 赵兵,祁宁.提高稀土上转换发光纳米材料荧光强度的方法[J].化工新材料,2018,46(7):40-43.

[21] Wang F,Han Y,Lim C S,et al.Simultaneous phase and size control of upconversion nanocrystals through lanthanide doping[J].Nature,2010,463(7284):1061-1065.

[22] Zhao C,Kong X,Liu X,et al.Li⁺ ion doping:an approach for improving the crystallinity and upconversion emissions of NaYF₄:Yb³⁺,Tm³⁺ nanoparticles [J].Nanoscale,2013,5(17):8084-8089.

[23] Chen G,Agren H,Ohulchanskyy T Y,et al.Light upconverting core-shell nanostructures;nanophotonic control for emerging applications[J].Chemical Society Reviews,2015,44(6):1680-1713.

[24] Zhang F,Deng Y,Shi Y,et al.Photoluminescence modification in upconversion rare-earth fluoride nanocrystal array constructed photonic crystals[J].Journal of Materials Chemistry,2010,20(19):3895-3900.

[25] 赵兵,祁宁,张克勤.等离子体增强上转换发光及其应用[J].化学进展,2016,28(11):1615-1625.

收稿日期:2018-11-14

修稿日期:2019-12-02