

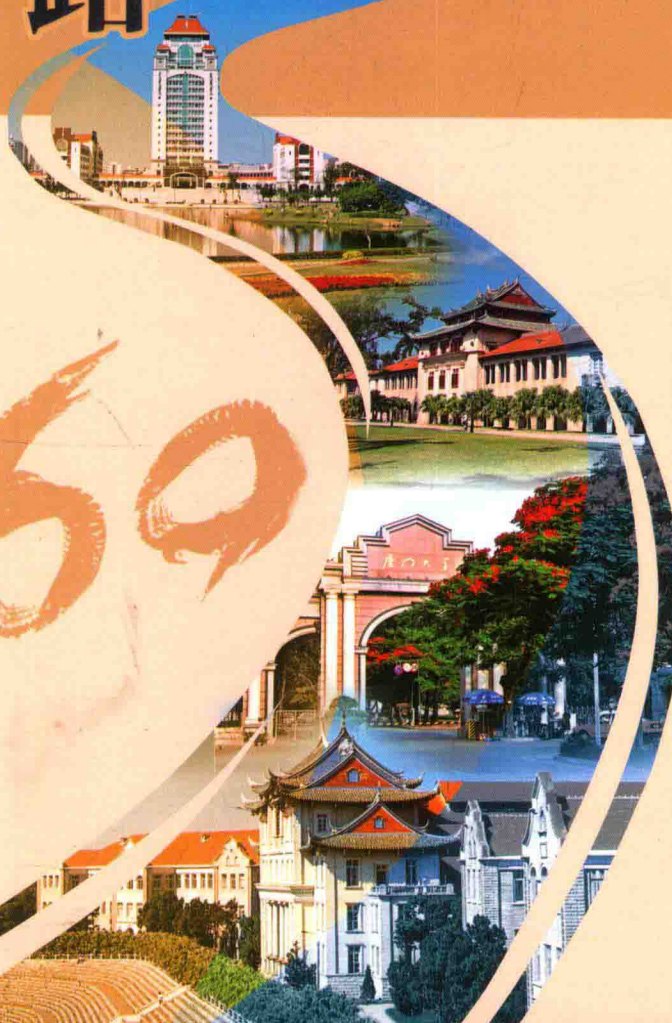
半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心
厦门大学物理学系

笃行

南强路

——纪念厦门大学半导体学科
建设六十周年

60



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS
国家
全国百佳



笃行南强路

——纪念厦门大学半导体学科建设六十周年

半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心

厦门大学物理学系



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

笃行南强路:纪念厦门大学半导体学科建设六十周年/半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心,厦门大学物理学系. —厦门:厦门大学出版社,2017.10
ISBN 978-7-5615-6693-0

I. ①笃… II. ①半…②厦… III. ①半导体物理学-文集 IV. ①O47-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 257966 号

出 版 人 蒋东明

责任编辑 睦 蔚

封面设计 蒋卓群

技术编辑 许克华

出版发行 厦门大学出版社

社 址 厦门市软件园二期望海路 39 号

邮政编码 361008

总 编 办 0592-2182177 0592-2181406(传真)

营销中心 0592-2184458 0592-2181365

网 址 <http://www.xmupress.com>

邮 箱 xmup@xmupress.com

印 刷 厦门市明亮彩印有限公司

开本 720mm×1000mm 1/16

印张 12.75

插页 2

字数 243 千字

版次 2017 年 10 月第 1 版

印次 2017 年 10 月第 1 次印刷

定价 60.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社
微信二维码



厦门大学出版社
微博二维码



本书编委会

主 编：康俊勇

编 委：李书平 李金钗 蔡伟伟 吴晨旭 赖虹凯

序

人类文明发展的不同阶段,通常以其生产材料和工具特征加以命名,如石器时代、青铜器时代、铁器时代。在当今信息时代,人们都会体会到生活方式日益便捷,生活丰富多彩。如果有人问,我们这个时代最具代表性的生产材料是什么?人们可能会不约而同地回答是半导体。不难想象,在憧憬美好生活的驱使下,一代代半导体人前赴后继,不断开发出新的半导体材料、器件以及系统,以应对瞬息万变的时代需求。然而,厦门大学地处台湾海峡前沿,由于特殊的地理环境,改革开放前百业待兴。尽管1956年秋,厦门大学就与北京大学、复旦大学、南京大学、东北人民大学(现吉林大学)五校联合创办我国半导体学科,但一直到改革开放后,厦门大学半导体学科的教学科研条件仍然极其简陋。然而,厦大半导体人造福人类、服务社会的抱负从没有泯灭过。21世纪伊始,在校友积极倡导下,时任厦大校长陈传鸿教授通过“985”工程一期,毅然启动了萨本栋微机电研究中心的建设,并邀请中科院王启明院士在厦大组建半导体光子学研究中心,以期振



兴半导体学科。在我国半导体学科创建 50 周年的 2006 年,正式拉开了新的一幕,重新点燃了厦大半导体人的南强梦。

怀揣着蓝色的南强梦,在强烈的社会责任感和使命感的推动下,十年来,执着的厦大半导体人风雨兼程,在自强不息的南强路上砥砺前行。在现实社会中,大学不再是象牙塔,笃行南强路仍然需要抓铁有痕的实干精神。半导体晶体生长的规律告诉我们,若要萌芽状态的胚芽能“劫后余生”,其规模尺度必须大于一定的临界值,方能抗击各种外力的猛烈冲击而成为核心。聚集半导体教学和科研人才的“核心”,可以小至科研设备大至研究中心。为了搭建厦大半导体教学和科研高地,我们在厦门大学分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)/扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)超高真空联合系统等建设经验基础上,进一步研发原位半导体纳米结构综合测试系统、强磁场下半导体外延及原位检测系统,得到国家自然科学基金重点专项的资金支持;建立了液氮制备系统和自然极限的低温实验条件,完成几代厦大半导体人的诸多夙愿。同时,厦大半导体人凝聚共识,经各级竞争与协调,建设了福建省重点实验室;紧接着整合半导体应用的研发力量,披荆斩棘,建成教育部工程研究中心。面对各种院系机构调整、人员变动,厦大半导体学科不但没有消失,而且与半导体光电材料及其高效转换器件的高新企业、高校及中科院研究机构联合创建的协同创新中心获得福建省教育厅认定,呈现出发展壮大良好势头。值此我国半导体学科创建 60 周年之时,盛邀共襄盛举的人们,回顾这段艰辛而光荣的峥嵘岁月,见证这

一代厦大半导体人自强不息践行南强梦的历程。

十年来,厦大半导体人在创新开拓、引领行业的时代背景下,披星戴月,在南强路上快步前行。我们秉承物理为先导,材料为基础,应用为目标的原则,协同各个方向的才俊,共同谱写半导体研发的新篇章。当多数人还在用传统的方法来设计和构造 GaN 基半导体有源结构时,厦大半导体人一次次搭建计算机集群新系统,用第一性原理设计和模拟数百个原子高 Al 组分 AlGaIn 半导体超大原胞,首次引入能带空间结构图示方法,探索极强极化特性、局域应变及其调控措施;用精湛的金属有机气相外延技术,生长出可观测到 200 nm 深紫外激子极化激元光发射的高纯度 AlN 半导体,攻克了制备单原子层、维度和掺杂位置可控等难题;实现了对深紫外光波段不同波长的窄带光电探测,引领深紫外光成像从黑白进入彩色时代;拓展紫外 LED 光发射波长至 200 nm,引领三安光电参与厦大牵头的国家“863”计划课题,步入了 AlGaIn 紫外 LED 产品的开发;开拓了光学各向同性深紫外光波导材料,为深紫外光电子集成打下坚实基础。当许多人还在为如何实现 P 型 ZnO 半导体而苦恼时,厦大半导体人已利用 ZnO 与 ZnSe 间的 II 型异质界面,将通常仅在 PN 结中才能发生的光生电子和空穴分离在界面的两侧;开发出赝晶 ZnO 纳米线,有效地容纳了极大的失配应力,通过控制直径的线度调控晶格常数乃至禁带宽度,将异质界面的带隙从紫外拓展到红外,神奇地将 ZnO 宽带隙半导体应用于可吸收全太阳光谱的光伏器件。当人们还在摸索如何减少器件表面的光反射时,厦大半导体人已跳出该框架,将



特殊的金属结构镀于半导体器件表面，巧妙地利用金属表面感应出等离子激元，将器件向侧面发射的紫外光从正面引出，并开创性地应用于深紫外 LED 器件。厦大半导体人甚至用金属的全同团簇，在半导体表面大面积地构建出有序的二维晶格，实现了人们期冀已久用金属材料控制电子传播宛如半导体晶体的梦想，并进一步构造出超原子晶格，揭开金属中电子可控传播崭新的一页。正当科学家们面对信息社会对半导体的高要求而感到“山重水复疑无路”时，厦大半导体人也悄然开启石墨烯二维新材料的探索，揭示单晶生长的规律，长出大面积单晶膜，并开拓其新应用；同时，开辟了探索电子自旋特性的先进实验手段，为未来核心电子材料的制备奠定了基础。回顾近十年的历程，厦大半导体人不但努力，而且巧妙地利用物理学的规律，无论在材料还是应用方面，均唱响了以往国内并不擅长的晶体生长主旋律。厦大熠熠生辉的半导体晶体生长事业，无论是借助“囊萤”和“映雪”，还是厦大半导体人发光和发热，都值得我们细细品味，为笃行南强路提供借鉴。

“终身之计，莫如树人。”为了造就厦大半导体事业的葱郁，十年来，厦大半导体人始终把培养人才放在首位。为夯实学生专业基础，在课堂上处处可见教师与学生互动的身影。甚至不计工作强度大、难度高，根据学生的研究方向，在同一课程中选用不同的国际著名英文新专著作教材，以拓展学生的视野。为获得研发的真谛，在课堂外常常响起老师与年轻学子们热论的和声。为杜绝急功近利的浮躁心态，实验室里都留下师生携手共建半导体材料

生长和表征设备的印记。多少个不眠夜,师生们揣摩着攻克难题的方法,不懈尝试,迎接突破性进展的曙光。年轻的厦大半导体学子们在材料和器件及其应用方面纷纷生根、开花、结果。有得到国内外同行们广泛认可的学术论文,也有企业产品中采纳的材料、器件、方案等;有入选 ESI 全球最有影响力论文,也有入选十二大太阳能光伏电池新技术;有被提名全国物理学优秀博士论文,也有入选全国百篇优秀博士论文,开创了厦大工科博士论文获此殊荣的先河。他们许多已成长为教授、专家或高级工程师和企业骨干。在满园桃李芬芳时,让我们重温十年勤业寒窗苦,以此铭记师长无私奉献之品德,激励新一代园丁肩负起振兴半导体事业的重任,勇于创新,引领未来。

康俊勇

2016 年 12 月

目 录

一 毕至群贤 协同创新

协同行业龙头 引领产业发展

——记半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心建设

..... 李书平 吴志明 李金钗(2)

立足研发基础 构筑技术高地

——记教育部微纳光电子材料与器件工程研究中心建设

..... 李书平 陈金灿(9)

发挥学科优势 构建创新高地

——记福建省半导体材料及应用重点实验室建设

..... 李书平 李金钗(14)

完善发光管测试条件 助力半导体固态照明

——记福建省半导体照明工程技术研究中心和福建省 LED 照明与显示
行业技术开发基地创新平台建设

..... 高玉琳 吕毅军 朱丽虹 陈忠(18)

紫色的远方

——记厦门大学高温 MOCVD 系统建设

..... 陈航洋 刘达艺 李书平(24)

打造半导体“万能”精确测试的利刃

..... 李孔翌 张纯森 陈荔 李恒 杨旭 李书平 詹华瀚 蔡端俊(29)

建强磁场条件 拓半导体疆土

——强磁场下半导体外延及原位检测系统

..... 陈婷 吴志明 李金钗 郑同场(38)

构筑超越自然极限的冷窖 李恒 吴雅苹 吴志明 张纯森(43)

构筑洁净室 铺垫新征程 杨旭 李书平(49)



二 囊萤映雪 晶工生辉

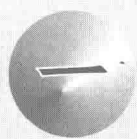
信步半导体科学天际线	康俊勇(56)
原子层面的精工细活	
——记高 Al 组分 AlGa _N 结构材料外延	李金钗 陈航洋 李书平 林伟 杨伟煌 郑同场 高娜 刘达艺 蔡端俊(68)
紫外驾电驭光芒	林伟(77)
II 型异质结构量子同轴线及其光伏应用	
.....	吴志明 曹艺严 倪建超 王伟平 Zhang Yong Waseem Ahmed Bhutto 罗强 孔丽晶 郑暄丽(86)
电光石火 增光紫外	
——记表面等离激元增强紫外隐秘光芒开拓工作	黄凯 李静 高娜 李书平(96)
纤丝如织网如纱	
——超细铜纳米丝网络的大千世界	蔡端俊(106)
打开金属导电的带隙	吴雅苹 张纯森 李孔翌 周颖慧(111)
追光的梦想	陈理想(119)
单芯片无荧光粉白光 LED 研究	
.....	方志来 申栖阳 吴征远 林友熙 宋鹏宇 陈航洋 刘达艺 李金钗 李书平(124)
当六方遇见立方	
——氧化锌与其他功能氧化物的界面耦合研究	王惠琼(130)
新型有机—无机杂化钙钛矿——光伏半导体材料的新星	尹君 李静(139)
收聚阳光 点亮世界	
——记高效多结太阳能电池研发历程	孔丽晶 张永(148)
探测痕量物质 保护环境安全	
——分级结构纳米线阵列的可控制备及传感应用研究	黄胜利 晏晓岚 何冰 李书平(153)
GaN 基 LED 工作时晶格伸缩的直接探测	郑锦坚(163)
Si 上 Mg 和 Zn 原子的针尖细活	陈晓航(174)

三 勤业博学 桃李芬芳

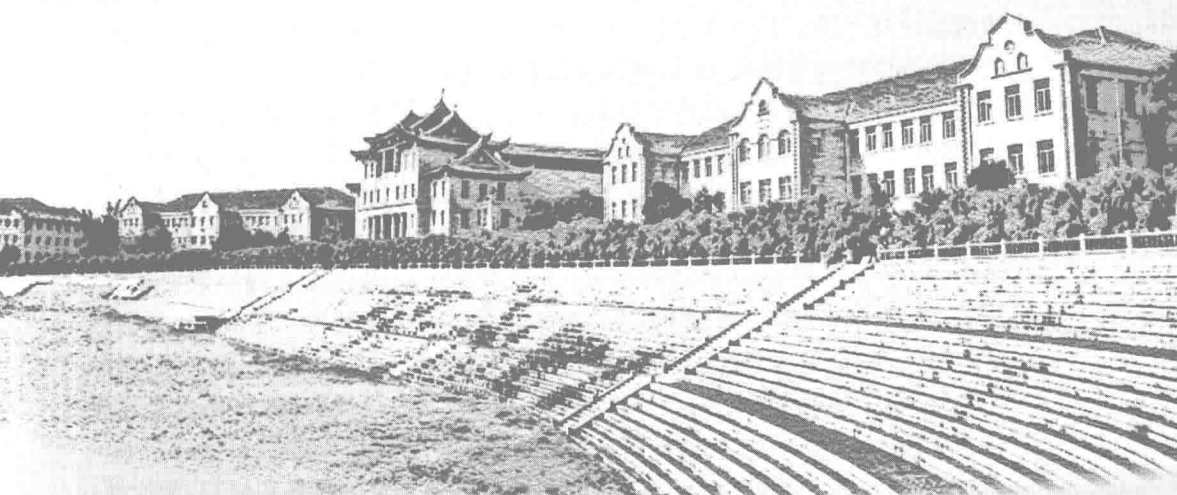
不忘初心 勇敢追梦 陈珊珊(184)

LED 技术日新月异 半导体人才继往开来
.....钟志白 郑锦坚 藏雅姝(188)

聚焦企业需求 服务行业发展
——记物理系工程硕士研究生教育的发展历程
.....蔡加法 陈主荣(191)



毕至群贤 协同创新





协同行业龙头 引领产业发展

——记半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心建设

李书平 吴志明 李金钗

半导体光电材料与器件的发展与应用是当代科技发展的重要标志之一,其渗透于半导体照明、太阳能光伏、激光、信息获取与显示、光输入/输出、光存储、光通信等应用产品。在当今节能环保的时代背景下,半导体光电材料与器件,包括光转换成电和电转换成光,已成为两大高技术、高附加值产品,并且光与电之间的高效转换成为此类产品的发展趋势。全球光电产业多层次的竞争格局日益明显,掌握核心技术、标准与品牌的发达国家牢牢控制着产业发展的主导权,而发展中国家的低成本优势随着更多新的发展中国家对跨国产业转移的争夺而逐渐弱化,产业可持续发展的压力日益加大。近年来,我国和半导体光电材料与器件相关的光电产业已具有相当的规模,正逐步成为我国经济发展的重要支柱。尤其是光电显示背光源、半导体照明、光伏等技术的发展速度明显加快,与国际水平差距相对较小。然而,我国半导体光电材料和器件产业规模大而不强,产品利润率低,产业发展仍然面临着技术相对落后、研发力量分散、低水平重复建设严重、“市场需求、材料研制、器件研制、产品工程化”链条断节等诸多挑战。

为此,国家出台了多项政策,在光电领域提出了重大的需求和规划,相应地,福建省设立六大千亿元产业链集群,大力推动经济区发展。因此,集合我省优质资源,建设半导体光电材料及其高效转换器件协同创新中心,将有利于加快技术和产品的更新换代,完善产业链,提高产品国际竞争力。厦门大学向来为我省光电材料和器件研究的重镇,为了进一步协同最强力量,集中最大优势,构筑海西半导体光电新高地,牵头联合乾照光电股份有限公司、福建师范大学、福建物质结构研究所三大优势资源单位,组成核心层;联合厦门三安光电股份有限公司、厦门华联电子有限公司、瀚天天成电子科技(厦门)有限公司、福建省艾而丹光电科技有限公司、青岛杰生电气有限公司、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院半导体研究所、台湾大学、台湾交通大学等企业 with 科研院所,形成放射型协同网络;强化体制革新和产学研协作,于2014年初正式建立了半导

体光电材料及其高效转换器件协同创新中心,并于2015年9月被认定为省级协同创新中心。

一、协同创新中心发展目标

中心从我省经济社会发展需要出发,按照“高起点、高水准、有特色”“国家急需、世界一流”的要求,主动对接区域光电产业发展的重大需求,通过校校、校企、校地创新力量的深度融合,围绕科技创新、人才培养和学科建设3条主线,强化机制体制改革与产学研紧密结合两大保障,实现中心的发展目标,具体如下:

(1)通过体制机制创新,开展多学科的协同攻关,构筑海西半导体光电材料及其高效转换器件创新产学研高地,以突破一批关键共性技术,形成一批优势产品,全面提升我省在光电产业的竞争力。

(2)围绕重大需求,以任务为牵引,集聚一批光电领域高水平优秀人才,打造多支海西半导体光电材料及其高效转换器件创新团队,以解决区域产业重大问题,提升产品性能。

(3)通过构建创新人才协同培养体系,有效集成协同单位优质教育资源,建立科研反哺教学机制,建设人才、学科、科研三位一体的创新科技体制示范基地,培养一批光电产业新锐人才,为区域光电产业关键科技提供支撑。

(4)建设福建省光电产业科技创新、人才培养和国际、国内学术交流的重要平台。

二、协同创新中心体制机制改革

各协同单位已签署协同中心共建合作协议,从组织管理、人事聘任、人才培养、科研管理、师资配置5个方面持续协同推进机制体制的综合系统改革,建立“校、所、企”三重驱动的协同创新体制机制。

组织管理:中心设立理事会,理事长由校、所、企分管领导组成,实行理事长(包括副理事长)并行协商制和轮值召集制的运行模式,以利于组织管理新机制的优势互补。理事会下设学术委员会、管理委员会及中心主任,负责监督中心的各项工作。根据发展方向,中心设置4个研究方向,每个研究方向下设研究团队。研究团队实行首席科学家负责制,统筹科研任务分工,负责研究人员、经费、实验室等资源配置。中心定期邀请国内外同行对中心运行情况及专项工作进行评估。目前,相关管理团队已聘任到位。

人事聘任:中心打破各自单位界限,建立校、所、企统一的人事聘任新制度,着力构建以科研、技术和行政管理三者协同的高水平人才队伍。科研和技术支撑队伍建设坚持培养与引进并重,以各单位所聘优秀人才为骨干,并积极招聘吸收海内外科技人才(团队)作为补充。扩大博士后招收规模,面向海内外招收优



秀博士进站从事博士后工作,根据研究任务需要,博士后在站工作期限可不受限制。

人才培养:中心根据“人格定位高起点、学术活动高层次、文化活动高品位”的目标定位,建立“寓教于研、创新主导、协同培养”新模式,着力于培养学术、专业和工程三类人才。实施青年学术带头人和学术骨干支持计划、青年教师海外支持计划;依托地方工作站、实践基地,对本行业各类技术人员进行分批培训,提高行业工艺操作水平和工程实践能力;为企业骨干技术人员继续深造提供机会;实施研究生、本科生成长导师制,分别在主要协同单位建立多个校外学生创新基地和实践基地,设立课外科技创新基金和科研助手制度,开放所有科研实验平台,开展“互换生涯”活动,完善科技创新鼓励办法等,以较好地培养学生的创新精神和实践能力。

科研管理:中心建立以新产品开发为导向的首席科学家项目负责制。中心的科学研究活动在总体研究发展方向下,由中心主任主持领导,接受学术委员会的评议、咨询和监督。坚持以科学前沿问题为导向,以国家重大需求为牵引,在协同创新中不断发现和解决重大科学问题,形成可持续发展、充满活力的科研组织模式。中心各研究方向的科学研究活动由首席科学家组织实施,对中心主任负责。中心科学研究实行科研团队制,科学研究项目实行协同申请制。

资源配置与共享:中心经费按照实施方案和年度计划统一规划使用。整合各单位相关学科仪器设备,建立各单位大型仪器一体化共享平台,设立统一信息网站和仪器使用预约系统,实行统一管理,有偿使用。按照仪器的用途和性能对其进行分类,成立各单位统一的相关仪器专家组,负责对相应的大型仪器进行评估、咨询与建议。大型仪器专家组包含了主任工程师、责任教授、主干用户等。专家组同时负责新方法的建立和对仪器进行有效的改进,以适应特定的研究需求,全面提升共享平台的仪器使用效率和水平。

三、实施成效

1. 构筑海西半导体光电材料及其高效转换器件创新产学研高地

(1) 协同创新任务实施成效

协同创新中心紧密围绕核心研究方向,在国家光电重大研究方面,在既有课题协同攻关的基础上,联合申报了新的国家重大科研攻关项目。自协同创新中心成立以来,核心协同单位承担科研项目更为多元化,不仅申请并承担了一批“973”和“863”计划、国家自然科学基金等国家、地区和企业重大科研任务,2016年更是获得了多项“十三五”规划的重点研发计划项目立项资助,总经费比协同前增加近6000余万元,共发表SCI、EI收录论文数百篇,为牵头单位物理学、工程学和材料科学进入全球ESI前1%做出了较大的贡献;产生国家发明专

利近百项、新产品数十个、省市科技奖 4 个,为地方经济发展做出了重要贡献。

在协同中心全体成员的共同努力下,经过近两年的努力,在发光二极管(light-emitting diode,LED)研发方面,攻克高 Al 组分 AlGaIn 材料 P 型掺杂困难问题,取得了突破性进展,将空穴浓度由 10^{15} cm^{-3} 提高至 10^{18} cm^{-3} 。研发出单芯片功率高达 46 mW 的深紫外 LED,为国际领先水平。在 LED 相关检测方法与技术研发方面,开发出独具特色,拥有自主知识产权的测试设备 and 应用软件。与厦门强力巨彩光电科技有限公司合作的“LED 全彩屏模组在线自动检测及产业化应用”和“高可靠性超薄灯驱合一 LED 大屏幕全彩显示屏在线自动测试系统及产业化技术”获得可喜成果并实现产业化。项目技术在技术工艺等多方面创新,技术水平达到国内领先水平。在新型太阳能电池研发方面,首次将宽禁带半导体光吸收范围突破至 0.9 eV 以下的短波红外区域,实现了对 94% 太阳光谱的吸收,位列国际同类器件最高水平,为宽禁带半导体在太阳能电池中的应用提供了新的研究思路。在高效太阳能电池研发方面,开发四结太阳能电池,解决了子电池间电流匹配问题,效率高达 34%,达国际最高水平,为进一步提升我国天宫等航天器性能奠定了坚实的基础。

(2) 核心平台构筑

中心围绕建设目标建立了多元化经费汇聚机制,基本实现了资源围绕任务的资源调度和配置机制。依托厦门大学“福建省半导体及应用重点实验室”,整合“国家光电子晶体材料工程技术研究中心”“教育部微纳光电子材料与器件工程研究中心”“福建省半导体照明工程技术研究中心”“福建省省级企业技术中心”“厦门市光电信息材料与器件工程技术研究中心”等科研平台,构筑了国内一流的半导体光电材料及其高效转换器件的研发平台。2014—2015 年,中心落实 5000 m^2 创新平台;2016 年,在厦门大学物理机电航空新大楼建设了近 700 m^2 的超净实验室空间,用于实现半导体光电材料及器件的中试线。2014 年以来,中心新增了用于开展半导体材料生长的 MOCVD 系统、强磁场分子束外延设备、ALD 以及用于表征半导体材料形貌、电子结构等特性的强磁场 STM、SEM、Raman、XRD 设备和太阳能发电系统中试线等,总价值近 4000 万元。目前,中心总体用房面积 30700 m^2 ,仪器设备总资产超 7 亿元,为后续协同中心成果进一步应用与转化奠定了扎实的基础。

2. 打造海西半导体光电材料及其高效转换器件创新团队

(1) 汇聚领军人才

借助灵活的机制体制,通过积极的培育和成功的运作,协同创新中心不仅汇聚了数十位光电领域的高端人才,共同推进协同创新中心在科研、人才、学科等方面的发展,还确立了持续引领半导体光电材料及其高效转换器件研究的领军地位。中心建立实施了首席科学家、访问学者、人才柔性聘用、岗位聘任、绩效评