

努力攀登氧化锌事业的至高点

——记浙江大学半导体薄膜学科带头人叶志镇教授

文/王辉



氧化锌，别名锌白、氧锌粉，分子式 ZnO ，呈白色六角晶体或粉末，无气味，用途广泛。在化学工业上，它是催化剂、脱硫剂；在涂料工业中，它是防腐剂和发光剂；在陶瓷工业中，它是助熔剂；在印染工业中，它是防染剂；玻璃工业、橡胶和轮胎工业……氧化锌就像是一个千面女郎，活跃在工业生产的舞台上，然而最令大家刮目相看的是它在电子行业的应用，尤其是纳米氧化锌的出现，更是为其应用注入了新鲜的血液。作为一种高效廉价的半导体材料，氧化锌有望成为一种理想的短波长发光器件材料，是受到全世界科学家关注的前沿课题，我国许多重要单位参与这项重要工作。

1986年，年仅31岁的叶志镇在我国首先把 ZnO 作为半导体材料来研究，独辟蹊径地开拓了国内 ZnO 半导体材料研究的新领域。1988年，他领衔完成的“掺铟 ZnO 透明导电薄膜”获浙江省科技进步奖三等奖。这是我国 ZnO 领域首个省级奖项。自此之后，他一直致力于 ZnO 材料系统的研究工作，在 ZnO P型掺杂与室温电致发光、 ZnO 高浓度 n型掺杂与透明导电薄膜制备、 ZnO 纳米材料可控生长与场发射，以及 ZnO 薄膜制备技术自主创新等方面取得了一系列创新成果，其中多项成果荣获国家和省部级奖励，达到国内领先、世

界先进水平。他解决了国际前沿性问题—— ZnO 发光应用的重要科学与关键技术难题，从材料生长、p型掺杂到发光器件，他的研发均拥有核心技术自主知识产权，紫蓝光器件更是成为避开国际 GaN 知识产权制约，开辟新径引领未来的一个新技术；而国际上首个 $ZnO/ZnMgO$ 多量子阱结构 $ZnO-LED$ 的制成与室温下电注入发紫蓝光的实现，则为实现 $ZnO-LED$ 工业化、加快廉价节能环保的半导体照明产业发展，在材料与器件上奠定了重要基础。

二十多年以来，叶志镇在学术上的重要贡献已成为实现 ZnO 在半导体光电器件领域应用的关键。由于其研究工作

具有明显的原始创新性，取得了多项国内外首次报道的创新成果，在国际上产生了重要影响；他主持的“ ZnO 基材料生长、P型掺杂与室温电致发光研究”也荣获2007年度国家自然科学奖二等奖和2006年浙江省科技进步奖一等奖。

他让我国 ZnO 半导体材料研究登上国际舞台

“ ZnO 基材料生长、P型掺杂与室温电致发光研究”项目研究发现了 p 型掺杂新现象，建立了多个理论模型阐述了其机理，找到了若干种新方法，制备出质量良好的 p 型 ZnO 和同质 pn 结。在 ZnO 研究中形成了 40 余项发明专利，已授权 27 项，拥有一系列核心技术专利，保护了我国在 ZnO 光电器件应用方面的知识产权。在国际上第一个由 MOCVD 方法研制出同质 ZnO pn 结和 LED 原型器件，成功实现了室温电致发光，为我国 ZnO 光电器件应用奠定了基础。其中， ZnO p 型掺杂及机理研究成果具有原创性，同质 ZnO pn 结室温电致发光研究取得了重大突破。该项

目的成功研制得到了国内外同行的普遍认可,被美国ZnO研究资深专家推荐在国际重要影响的2006美国 MRS秋季会议的ZnO专题会议上作特邀报告,在国际上产生了很大影响。

ZnO p型掺杂国际难题的攻克 与LED室温电致发光的实现

梅花香自苦寒来。该项研究的成功源于叶志镇对ZnO半导体材料的长期研究。宽禁带半导体ZnO发光波长比GaN更短,从理论上其激发白光的能力更强,而且ZnO-LED成本将是传统GaN-LED的十分之一。因此他坚信,在巨大的高效节能半导体固体照明与显示市场中,ZnO在LED和激光器(LED)方面具有重要应用前景,是新一代高效廉价、节能环保固体白光照明产业的重要基础材料。而ZnO要实现光电应用,解决p型掺杂国际难题、实现室温电致发光是关键。

针对这一问题,叶志镇开展了一系列的创新性工作:他发现了非平衡态掺杂机制可提高ZnO中N固溶度、ZnO的n与p导电类型随生长温度出现互变等多个掺杂新现象,建立了N、H共激活理论模型,并合理阐述了其机理;他首创了Al-N共掺杂、NO-N₂O混合源等N替代H钝化的N掺杂和Li、Na掺杂等多种p型掺杂方法,他研制了国际上第一个由MOCVD制备出的同质ZnO-LED,实现了室温电致发光;他发展了具有知识产权的ZnO p型掺杂方法,构建了ZnO N掺杂理论体系,丰富了ZnO p型掺杂理论。为推进国际ZnO研究、自主发展我国ZnO光电技术,在解决ZnOp型掺杂的重要科学与关键技术做出了原创性贡献。

项目取得了成功,科研却没有止境,2007-2008这两年,叶志镇对ZnO研究又取得了重要性进展与新的突破。他首创出Li-N双受主共掺杂法,大大提高了ZnO的p型掺杂稳定性,并采用Li、Na元素实现ZnMgO的p型掺杂,还成功生长出10个周期优质的ZnO/ZnMgO多量子阱异质结构。他首次采用Na掺杂和ZnO/ZnMgO多量子阱结构的创新技术路线,不仅在ZnO稳定高效p型掺杂方面取得新突破,而且在室温下LED电注入紫蓝光发光纯度和强度有了质的提高而缺陷发光得到有效抑制,同时又克服了目前国际采用毒性较强的ZnBeO材料而难以工业化的难题,这为半导体ZnO

走向新一代高效廉价、节能环保半导体照明应用开辟了一条新路,研究工作居国际先进与前列,产生了重大的国际影响。

由于该项工作于国际上开展得较早,并且不单是探索与发明了几种ZnO p型掺杂的有效方法,更重要的是在p型掺杂机理上形成了具有指导意义的理论体系,因此对国际ZnO p型掺杂研究具有一定推进作用。

据ISI Web of science检索,至今叶志镇教授和他的团队在ZnO p型掺杂方面共发表了SCI论文50余篇,占全世界250余篇总数的五分之一;其中国际重要期刊《应用物理通讯》(APL)论文14篇,占全世界64篇中五分之一;而且有6篇APL论文列入APL期刊当月被全世界下载次数最多论文前20位的排行榜。

他们的ZnO p型掺杂研究工作当之无愧地受到了国际广泛关注。迄今已在15个国际学术会议和国际ZnO专题大会上作了大会报告30次,其中邀请报告15次,得到国内外同行的高度认同。2006年12月,由美国ZnO资深专家和专题会议主席推荐,叶志镇在国际最具影响的美国材料大会(MRS Fall Meeting)首个ZnO专题上作邀请报告,产生了重要的影响。2008年6月26日,国际电子材料50周年大会在美国加州圣塔芭芭拉分校举行,叶志镇又一次应邀在大会上做ZnO专题报告,将有关ZnO/ZnMgO多量子阱结构ZnO-LED室温电注入发紫蓝光的最新成果向世界宣布;在这次国际电子材料会议ZnO材料领域的6个报告者中,叶志镇是唯一受到邀请的中国学者。



自制PLD设备



透明场效应晶体管等领域具有广泛应用,并围绕这些问题进行了颇有建树的研究。1988年,由叶志镇作为第一完成人的“直流反应磁控溅射 ZnO 掺 In 透明导电薄膜研究”荣获浙江省科技进步奖三等奖。1989年,中国首次在国际重要期刊 Applied Optics 上报道了该项成果。2006年,他又首先完成了由直流反应磁控溅射制备了 ZnO 掺 Ga 可见光透射率大于 90%、近红外反射率为 70%、掺杂电子浓度为 $4 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 的高品质透明导电薄膜,其光电性能指标具有领先性。

薄膜制备的设备 与技术的自主创新

ZnO 纳米材料可控生长 与纳米场发射平板显示

ZnO 纳米材料在新一代高分辨场发射平板显示器、气敏与生物传感器、杀菌与抗辐射等方面具有重要应用前景,但前提是实现其可控生长。叶志镇教授紧扣这一关键点,不畏艰辛,几经探索,终于首次应用 MOCVD 方法在硅上实现了准直排列 ZnO 纳米管无催化可控生长,在国际上第一次发现了双壁 ZnO 纳米管。其次,由他首创的成核层法在硅上实现了尖锥状阵列 ZnO 纳米线可控生长,其场发射增强因子达到 4000,纳米场发射性能达到国际先进水平。另外,他的研制实现了 ZnO 量子点密度、大小尺寸的可控生长和光电性能裁剪,率先由两步法分阶段自组装合成了准阵列 ZnMgO 尖锥状纳米线和 ZnCdO 纳米棒,并提出了其生长机理。在此基础之上,叶志镇作为第一完成人完成的“基于纳米管、纳米线低维结构材料可控生长与应用基础研究”获 2007 年浙江省科技进步奖一等奖。

ZnO 高浓度 n 型掺杂 与优质透明导电薄膜制备

早在 1986 年叶志镇就开始开展 ZnO 掺杂研究,他是国内 ZnO 领域研究的开拓者,他强烈地意识到高品质的 ZnO 透明导电薄膜在触摸屏透明导电膜、LED 透明导电电极、太阳能电池透明电极、近红外高反射节能膜、透明除霜雾膜、

先进的薄膜材料制备的设备与技术一直是制约我国薄膜材料科技发展的瓶颈。1992 年叶志镇从美国麻省理工学院 (MIT) 回来后,针对这一薄弱环节不断进行自主创新,先后研发了数台先进的纳米薄层材料高真空 CVD 生长设备。

为解决半导体 Si 及 GeSi 纳米薄层晶体材料的可控生长难题,叶志镇发明了 RHEED 实时监控的超高真空化学气相沉积 (UHV/CVD) 系统 I 型、II 型;为解决化合物半导体 GaN 纳米薄层材料可控生长难题,他发明了磁流体密封高真空 MOCVD 系统;在此基础上发展了低温 CVD 新工艺,生长了一系列纳米薄层新材料,研制了多种先进的光电器件;其中他所研发的纳米薄层高真空 CVD 成套技术在全国 50 余家重点科研单位得到推广应用,产生了重大的经济和社会效益,在很大程度上促进了我国纳电子与光电子材料与器件的发展。由此先后获得了浙江省和教育部科技奖励 2 项。

先进的薄膜制备技术同样是 ZnO 实现光电器件应用的重要基础。2003 年,他创建了具有自主知识产权的“原子发生器高真空 MOCVD 系统”,该生长设备不仅解决了 ZnO 纳米薄层晶体材料可控生长技术难题,而且原子发生器还可以提供高密度、高离化率的掺杂源,以保证快速反应和高效 p 型掺杂。该设备投入使用后,不仅制备出了质量良好的 p-ZnO 晶体薄膜,而且在国际上第一个由 MOCVD 制备了 ZnO-LED,并实现了室温电发光。其作为第一完成人自主创新完成的生长 ZnO 薄膜专用设备——“先进的高真空

CVD 薄膜技术研发与应用”获得 2007 年教育部科技进步奖二等奖。

为半导体薄膜学科发展而奉献

在叶志镇的科研和日常工作事务中,始终贯彻着创新的理念。在自主创新被升华到民族灵魂的今天,他为我国在半导体薄膜领域的崛起,以自己的实际行动诠释着一条关于不断创新的自强自立之路。

叶志镇围绕着国家节能与信息技术的重大目标与需求,在国家“973”课题和国家自然科学基金重点项目等资助下,长期致力于半导体薄膜的研究,至今共已发表学术期刊论文 400 篇,被 SCI 收录 235 篇,影响因子大于 3.0 论文 37 篇,其中本领域国际重要期刊 Adv. Mater. 1 篇, Appl. Phys. Lett. 30 篇;论文共被他人引用 1700 余次,其中 SCI 论文他引 1000 余次;参编著作 2 本,拥有授权中国发明专利 35 项;9 项成果获得奖励,其中国家自然科学基金二等奖 1 项,浙江省科技进步奖一等奖 2 项,省部级科技进步奖二等奖 3 项。



作为浙江大学硅材料国家重点实验室主任,叶志镇为该实验室的长足进步与发展作出了重要的贡献。而自 1999 年担任浙大材料与化工学院副院长以来,叶志镇又先后负责学院的科研、人事外事和研究生管理工作,为建设一流材料与化

工学院奔波劳碌。半导体薄膜学科是浙江大学材料物理与化学国家重点学科的主要发展方向,身为半导体薄膜学科以及新型信息功能材料方向带头人的他至今共培养博士生 30 名,已毕业 19 人,其中省级优秀博士生 3 人,2008 年全国百篇优秀博士论文提名奖 1 篇;培养硕士生 100 名,已毕业 77 人,博士后 7 人,已出站 6 人。不仅如此,他还不遗余力地为本学科在 2002 年、2007 年连续两次评为国家重点学科以及教育部“985”功能材料平台建设奉献着自己的智慧和力量,而浙江大学的纳米研究能够步入世界 50 强之列,更是离不开他在纳米科技中心建设中所做的重要努力。

1994 年,叶志镇被评为国家重点实验室全国先进工作者并获“金牛奖”,1995 年被遴选为浙江省首批“中青年学术带头人”,1996 年入选教育部“跨世纪优秀人才”培养计划,1996 年硅材料国家重点实验室评为“浙江省重大贡献先进集体”,1997 年入选国家“百千万人才工程”、享受国务院特殊津贴,2006 年被聘为浙大首批求是特聘教授,2007 年荣获浙江省有突出贡献中青年专家以及浙江省优秀留学回国人员的光荣称号,2008 年遴选为浙江省特级专家。

叶志镇所获的这些荣誉固然当之无愧,但人生在世如白驹过隙,生活的价值和意义究竟在于什么?相信对他而言,科研上的不断创新才是他的追求是他的信仰,坚信在半导体薄膜研究领域这座布满了未知的山峰上,他将无畏无惧地越攀越高……

人物简介

叶志镇,1955 年 5 月出生,浙江温州人。浙江大学材料系教授、博士生导师。1977 年考入浙江大学电机系,1982 年获学士学位,1984 年获浙江大学光仪系硕士学位,1987 年获浙江大学光仪系博士学位后留校。1990~1992 年留学于美国麻省理工学院(MIT)电机系。1988 年 1 月起,进入浙江大学硅材料国家重点实验室工作,1997 年至今出任该实验室主任,1999 年起担任浙江大学材料与化工学院副院长,2002 年担任浙大纳米科技中心主任。兼任国家自然科学基金委信息科学部半导体学科评审组成员、全国电子材料委员会副主任委员、全国半导体与集成技术委员会委员、全国半导体材料委员会委员、全国半导体物理委员会委员、浙江省纳米材料应用协会副理事长以及《半导体学报》、《功能材料与器件学报》、《材料科学与工程学报》编委等职。