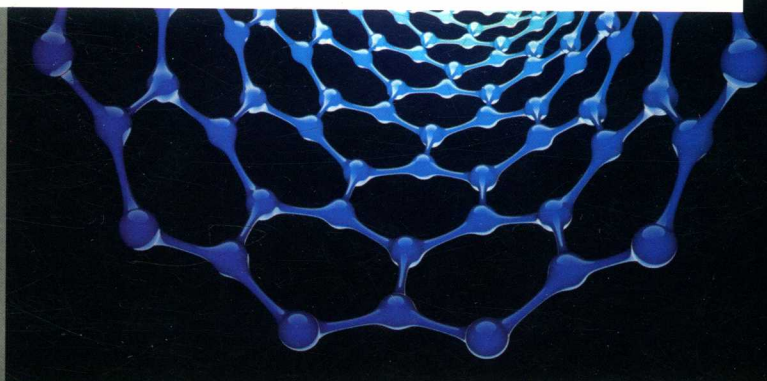


YANGHUAWU NAMI CAILIAO
HE GUINAMI CAILIAO DE ZHIBEI JI YINGYONG

氧化物纳米材料 和硅纳米材料的制备及应用

石明吉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书的撰写得到南阳理工学院青年学术骨干基金、南阳理工学院省示范校建设专项研究项目(项目号: SFX201718)和河南省科技厅科技攻关计划项目(项目号: 152102210217)资助,作者在此一并表示衷心的感谢

氧化物纳米材料 和硅纳米材料的制备及应用

石明吉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

纳米技术是 20 世纪末开始发展起来的新科技,是 21 世纪最具发展潜力的技术领域。纳米材料与纳米结构是纳米技术的核心,纳米材料是其物质基础和重要组成部分。本书对氧化物纳米材料和硅纳米材料的制备及应用进行了研究,主要内容涵盖了氧化锌材料的微结构及应用、氧化钛材料的微结构及应用、氧化钨材料的微结构及应用等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供材料科学工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

氧化物纳米材料和硅纳米材料的制备及应用/石明吉著. —北京:中国水利水电出版社,2018.9

ISBN 978-7-5170-6927-0

I. ①氧… II. ①石… III. ①氧化物—纳米材料—研究②硅—纳米材料—研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 221672 号

书 名	氧化物纳米材料和硅纳米材料的制备及应用 YANGHUAWU NAMI CAILIAO HE GUINAMI CAILIAO DE ZHIBEI JI YINGYONG
作 者	石明吉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市元兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 20.5 印张 266 千字
版 次	2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	98.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

纳米技术是 20 世纪末发展起来的新科技,是 21 世纪最具发展潜力的技术领域。纳米材料与纳米结构是纳米技术的核心,纳米材料是其物质基础和重要组成部分。纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围(小于 100 nm)或由它们作为基本单元构成的材料。20 世纪 60 年代,Feyneman 预言:如果对物体微小规模上的排列加以某种控制,我们就能使物体得到大量的异乎寻常的特性,就会看到材料的性能产生丰富的变化。纳米材料技术是在纳米尺度下探索新材料和结构在化学、电学、磁学、光学、力学、结构和生物等的特殊行为,探索其合成、制备、表征、应用的技术。进入 21 世纪以后,纳米材料的研究领域迅速拓宽,其内涵也不断扩展。薄膜材料、薄膜科学与薄膜技术一直是高新技术研究中最活跃的研究领域之一,并已取得了突飞猛进的发展。随着科技的发展,各种特殊用途对薄膜技术与薄膜材料提出了各种各样的要求,包括在尺寸、结构、表面形貌及与基底的附着性等方面。为满足这些要求,就需要开发新的薄膜工艺、薄膜设备和薄膜材料。世界各国纷纷将纳米材料技术列为发展的前沿,目标是实现基本单元在原子和分子级上的控制,由其量子效应、物质局域性、巨大的表面和界面效应,使物质的很多性能发生质变,从而最终组装成实用的材料、结构、新器件、系统,促进本国和世界纳米科技和产业的发展,引导“新的工业革命”。

氧化锌(ZnO)是一种非常重要的直接宽带隙半导体材料,被誉为第三代半导体材料。氧化锌具有六角纤锌矿晶体结构,室温下直接带隙宽度可达 3.4 eV,激子束缚能高达 60 meV。这使得

其在低温甚至在室温下都能产生基于激子复合的激光发射行为；氧化锌无毒，原料廉价易得，且具有较高的化学、机械稳定性及优异的光电学特性，有望在光发射二极管、透明电极、蓝/紫光发射器件等方面广泛应用。

1990年，Canham首次采用电化学阳极氧化方法成功地制备了纳米多孔硅结构，在室温条件下观测到了强红光发射现象，并采用量子限域效应对发光机制进行了解释。硅在微电子领域有着广泛的应用，多孔硅越来越受到重视，一个重要原因就是它在室温下具有良好的光致发光、电致发光等特性，因此很容易与现有的硅技术兼容，从而进一步提高超大规模集成电路的集成度，使硅技术的应用从微电子学领域扩展到光电子学领域。

1972年，A. Fujishima等首次发现在光电池中受辐射的氧化钛表面能持续发生水的氧化还原反应，这一发现揭开了光催化材料研究和应用的序幕。1976年，J. H. Carey等报道了氧化钛水浊液在近紫外光的照射下可使多氯联苯脱氯。1977年，S. N. Frank等用氧化钛粉末光催化降解了含 CN^- 的溶液。由此，开始了氧化钛光催化技术在环保领域的应用研究，继而引起了污水治理方面的技术革命。

作者一直以来从事纳米功能材料的结构、物性和应用方面的研究，梦想利用氧化锌的黄绿光和多孔硅的红光合成白光，在白光照明方面有所贡献；梦想利用氧化钛进行光催化降解有机污染物以治理日益严重的环境污染问题及利用氧化钛光催化电解水制氢以解决日益严重的能源问题；梦想利用纳米硅制备叠层太阳能电池隧道结以提高太阳能电池效率、解决能源需求问题。渴望将近年来的研究情况总结出版，便于和相关专业的专家、老师、同学及科研工作者交流和讨论。全书共7章：第1章介绍纳米材料与纳米科技；第2章介绍氧化锌材料的微结构及应用；第3章介绍二氧化钛的制备、性能、结构及应用；第4章介绍氧化钨材料的微结构及应用；第5章介绍多孔硅的制备及表征；第6章介绍硅和氧化锌纳米复合材料制备及光学性质研究；第7章介绍纳米硅

p^+ 层在非晶/微晶叠层电池隧道结中的应用。

本书的撰写得到南阳理工学院青年学术骨干基金、南阳理工学院省示范校建设专项研究项目(项目号:SFY201718)和河南省科技厅科技攻关计划项目(项目号:152102210217)资助出版,作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之纳米材料博大精深,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正并对我们的研究工作进行指导。

作 者

2018年6月

目 录

前言

第 1 章 纳米材料与纳米科技	1
1.1 纳米材料概述	1
1.2 纳米材料的制备	4
1.3 纳米材料的表征手段	6
1.4 纳米材料的应用	7
1.5 纳米材料的未来	11
参考文献	13
第 2 章 氧化锌材料的微结构及应用	15
2.1 氧化锌纳米棒的溶液法制备及表征	15
2.2 氧化锌纳米棒的光催化性能研究	25
2.3 氧化锌量子点的制备及其发光性能研究	32
2.4 氧化锌的掺杂及其应用	46
参考文献	65
第 3 章 二氧化钛材料的制备及应用	72
3.1 二氧化钛纳米棒的制备及应用	72
3.2 二氧化钛纳米管阵列制备及其性能研究	87
3.3 纳米二氧化钛的制备及其在染料敏化太阳能 电池中的应用	102
3.4 磁性二氧化钛材料的制备及其光催化性能研究 ..	112
3.5 二氧化钛的热氧化法制备及整流特性研究	137
参考文献	155
第 4 章 氧化钨材料的微结构及应用	162
4.1 概述	162

4.2	实验材料及试验方法	171
4.3	实验内容	175
4.4	结论	187
	参考文献	188
第5章	多孔硅的制备及表征	191
5.1	多孔硅的制备及其发光性研究	191
5.2	多孔硅的刻蚀法制备及性能研究	201
	参考文献	209
第6章	硅和氧化锌纳米复合材料制备及光学 性质研究	213
6.1	概 述	213
6.2	多孔铝模板的制备及其特点	214
6.3	脉冲激光沉积法在多孔铝衬底上制备的纳米 硅薄膜的结构与光学性质	222
6.4	脉冲激光沉积法在多孔铝衬底上生长的 ZnO 薄膜的结构与光学性质	226
	参考文献	233
第7章	纳米硅 p^+ 层在非晶/微晶叠层电池隧 道结中的应用	236
7.1	引言	236
7.2	硅基薄膜的沉积原理与测试原理	242
7.3	重掺杂纳米硅薄膜的制备与特性研究	244
7.4	叠层电池隧道结研究	261
7.5	非晶硅太阳电池和微晶硅电池	272
	参考文献	306

第 1 章 纳米材料与纳米科技

1.1 纳米材料概述

纳米材料是指在三维空间中至少有一维尺寸不超过 100 nm 的材料。它的尺寸介于原子簇和通常的晶粒之间,具有新奇的性能。纳米材料是人类为实现梦想,满足高新技术发展的需求,科学技术不断进步,认识逐渐深化,不断努力发展起来的新型材料,已被世界各国广泛关注,正在形成新兴产业,带动高新技术的发展,产生巨大的经济效益和社会影响。

1.1.1 纳米材料的研究历史

1.1.1.1 萌芽阶段

这个阶段大致为 1860—1984 年。1860 年,胶体化学诞生,人们便开始研究粒径小于 100 nm 的胶体颗粒,只是受限于研究手段,发展缓慢。1929 年,人们制作出金属氧化物溶胶。1940 年,TEM 开始用于研究金属氧化物颗粒。1959 年,Feynman 指出纳米材料具有特殊性能。1962 年,Kubo 观察到金属超微粒的独特热学性质,人们开始观测纳米材料的性能。

1.1.1.2 探索研究阶段

这个阶段大致为 1984—1993 年。1984 年,Gleiter 和 Siegel 研制出纯物质细粉。Gleiter 制备出纳米微晶块体,使纳米材料跨入新阶段。在 1990 年 7 月的首届纳米科学技术国际会议上正式

宣布纳米材料科学是材料科学的新分支。1990年,中科院固体物理所首次召开了纳米固体讨论会。此后,纳米科技逐渐成为世界各国的研究热点,各种纳米材料、纳米器件和纳米技术不断涌现。

1.1.1.3 应用开发阶段

这个阶段大致为1993年至今。1993年后,纳米科技加速发展,应用领域不断拓展,不断产业化,需求市场不断扩大,世界各国开始了竞争态势。

1.1.2 纳米材料技术研究方法的转变

纳米技术不能简单地理解为超微技术,对纳米科技的研究可以分为两种:

1.1.2.1 自上而下

“自上而下”指的是利用宏观物质制备纳米材料。这个过程需要采用物理的或者化学的方法处理宏观物质,最终得到纳米材料。该方法容易实现,但是潜力有限。

1.1.2.2 自下而上

“自下而上”指的是从原子、分子等纳米颗粒开始组装制备具有一定功能的材料或产品。该方法一般是在一定的条件下,通过自组织效应形成新型材料、薄膜、器件等。该方法代表了纳米科技发展的方向。

1.1.3 纳米科技在 20 世纪末的发展概况

从20世纪90年代开始,纳米科技发展迅速,内涵迅速扩大,领域迅速拓宽。基础研究与应用密切结合,取得重要进展和惊人成果,产业化的速度加快。

1.1.3.1 纳米科技取得的新成果

美国加州大学洛杉矶分校与惠普公司合作,在1999年研制

成功 100 nm 芯片;明尼苏达和普林斯顿大学在 1998 年制成量子罗盘;磁性纳米棒(10 nm×40 nm)组成纳米阵列体系; 10^{-1} bit 尺寸的密度达 10^9 bit/s; 1997 年制成以巨磁电阻为原理的纳米结构器件,用于磁存储、记录和计算机读写磁盘;制成颜、染料功能纳米粉体,用于橡胶、陶瓷;纳米材料在医药方面的应用成果不断出现;纳米结构的高密度接头用于集成电路,双纳米微粒制超微开关展现可调隧道的库仑堵塞效应;制成纳米结构小型激光器;IBM 公司制成超微型碳分子算盘;波士顿大学制出分子电动机,由 78 个原子构成,可让分子像马达一样工作。日本从 1992 年开始将纳米材料技术用于微型机械产品中,制造进入血管的机器人;生产米粒大小的汽车;开发纳米定位与控制、分辨测量系统;研制 10 nm 金属氧化物和生物粒子等,在纳米材料、薄膜、结构技术方面居领先地位。德国在超薄膜基础研究方面居世界领先水平,已能生产超薄金属和半导体薄膜;可以 X 射线对更小的横向结构进行分析。德国美茵兹微技术研究所制出一架黄蜂大小的直升机;制出 1 V 微型发动机,只有笔尖大小,转速达 10 万 r/min,用于外科器械的驱动器。荷、日合作制出太阳能驱动分子马达,在光照下不停旋转,用于驱动分子机械马达。英国重视纳米材料技术用于生物医学,开发生物传感器、神经细胞结构、血液流变;微电子、光学应用。

1.1.3.2 中国对纳米科技的贡献

从 1993 年到 2000 年期间,我国在纳米科技方面取得了长足的进展。中科院北京真空物理实验室利用原子书写了“中国”两个字,表明我国的纳米技术已居世界前列。范守善等研制出 GaN 纳米管,解思深合成出碳纳米管。薛增泉利用单壁碳纳米管组装出世界上最细、性能良好的扫描隧道显微镜探针。卢柯合成出碳纳米材料,使我国的储氢材料处于世界先进行列;设计和制备了复合氧化物新体系,中红外波吸收率达 92%,在红外保暖纤维上得到应用;发现纳米合金中的反常(霍尔-佩奇)Hall-petch 效应等。我国在纳米科技领域的主要成果集中在材料制备及制备方法、装置。

1.2 纳米材料的制备

1.2.1 脉冲激光沉积法

脉冲激光沉积法(Pulsed Laser Deposition, PLD)是20世纪80年代末迅速发展起来的一项全新制膜技术。由于强激光能够将固态物质瞬间熔化并蒸发,人们自然联想到将蒸发的物质沉积在基片上获得薄膜。目前,世界上半以上的高温超导薄膜均是采用脉冲激光沉积法制备的。

1.2.2 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法(Sol-Gel Method)是20世纪60年代发展起来的一种制备无机材料的新工艺,人们多用此方法来制备纳米微粒。溶胶-凝胶法的一般步骤是:利用金属醇盐或无机盐经水解直接形成溶胶或经解凝形成溶胶,然后使溶质聚合凝胶化,再将凝胶干燥、焙烧去除有机成分,最后得到无机材料的一种制备方法。

1.2.3 模板法

模板法是指以基质材料中的孔道或者具有有限阈能力的其他结构作为材料的形核生长部位,从而制备一维材料或者特定形貌材料的方法。早在19世纪70年代,模板法就已应用于制备一维纳米材料。根据所采用模板限阈能力的不同,可分为硬模板合成法和软模板合成法。硬模板合成法主要用碳纳米管、多孔氧化铝和限阈沉积位的量子阱等作模板。硬模板合成法在控制纳米材料的尺寸、形貌和分布方面,具有很大的优势。软模板合成法一

般指没有固定的组织结构而在一定空间范围内具有有限阈能力的分子体系,如胶束或反胶束模板、单分子层模板、生物分子模板、液晶模板和高分子柔性模板等。

1.2.4 水热法

水热法是在一定的高温、高压下,让物质在水溶液中发生化学反应生成纳米材料的方法。在高温高压下,水既是溶剂又是矿化剂,同时还是压力的传递介质。在高压下,绝大多数反应物均能部分溶解于水,促使反应在液相或气相中进行。水热合成的常见类型有水热氧化反应、水热还原反应、水热合成反应、水热分解反应、水热沉淀反应、水热晶化反应、水热电化学反应、微波水热法、超声水热法等。利用水热反应合成晶体材料的一般程序包括:设计反应物料并确定配方比例,配料与混料,装釜、封釜、加压,确定反应温度、时间、状态,取样,样品表征。反应物浓度、反应温度和反应时间等因素可以影响制备材料的尺寸。

1.2.5 气体刻蚀法

气体刻蚀法是制备多孔硅的方法之一。通过加热带对 NO_2 、 O_2 、 HF 酸溶液加热,产生热气流,控制气流流量,经过加热管道的传送,各种气体汇合到一起,充分混合后进入气室,再经过气流阀,混合气体到达刻蚀室,在这里制备多孔硅材料。这就是气体刻蚀法的流程。最后尾气经过溶液处理排放。该法进一步发展成蒸汽刻蚀法,将单晶硅片置于腐蚀液上方,对腐蚀液加热,产生具有腐蚀性的酸蒸汽,对单晶硅片进行腐蚀,得到性能较好的多孔硅。

1.2.6 化学气相沉积法

化学气相沉积系统是在 1968 年出现的,由罗克韦尔(Rock

Well)实验室的马纳斯维特(Manasevit)首先报道了用化学气相沉积技术生长了砷化镓(GaAs)半导体单晶薄膜,现在已成为多用途的生长技术,所用材料非常广泛。

化学气相沉积是反应物质在气态条件下发生化学反应,生成固态物质沉积在加热的固态衬底表面,进而制得固体材料的工艺技术。它本质上属于原子范畴的气态传质过程。与之相对的是物理气相沉积(PVD)。化学气相沉积是一种制备材料的气相生长方法,它是把一种或几种含有构成薄膜元素的化合物、单质气体通入放置有衬底的反应室,借助空间气相化学反应在基体表面上沉积固态薄膜的工艺技术。化学气相沉积一般包括以下过程:表面吸附;配合基(如 H、CH₃ 等)的热解或还原丢失;原子的沉积。已沉积的原子或分子可催化上述分解或还原过程,促进所需原子团簇的生长。

1.3 纳米材料的表征手段

纳米材料常用的表征手段有扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、原子力显微镜、透射电子显微镜、光致发光谱仪、透射谱和吸收谱仪、拉曼光谱仪和伏安特性测试装置等。利用扫描电子显微镜可以观察样品的表面形貌;利用 X 射线衍射仪可以分析样品的结晶情况;利用原子力显微镜可以在原子尺度观察样品的三维表面形貌;利用透射电子显微镜可以观察样品内的结晶情况;利用拉曼光谱仪可以分析样品表面的化学键;利用伏安特性测试装置可以测量样品的伏安特性曲线。当流过电学元件的电流与其两端电压不成正比时,这类电学元件叫作非线性元件,如二极管。所谓二极管的伏安($I-V$)特性曲线,是指加在 p-n 结两端的电压和流过二极管的电流之间的关系曲线。其中, $U>0$ 的部分称为正向特性;相反, $U<0$ 的部分称为反向特性。当反向电压超过一定数值后,反向电流急剧增加,称为反向击穿。

1.4 纳米材料的应用

1.4.1 纳米技术在存储方面的应用

纳米技术不仅为传统的磁性存储增添了活力,更重要的是,它开辟了新型的存储发展方向。在1954年一台电脑的体积要占满整间屋子,而如今一块硬盘只有手掌般大小。正是得益于法国科学家阿尔贝·费尔和德国科学家彼得·格林贝格尔发现巨磁阻现象,使单位面积介质存储的信息量大大增加。时隔3个月后,法国的费尔在铁、铬相间的多层膜电阻中也发现了同样的现象,他把这种效应命名为巨磁阻(Giant Magneto-Resistive, GMR)效应。二人因此荣获了2007年的诺贝尔物理学奖。

巨磁阻效应是指将铁磁性材料和非磁性金属层交替组合成的材料置于足够强的磁场中时,电阻突然巨幅下降的现象。这是一种量子力学效应,也是一项没有任何争议的纳米效应。它产生于层状的磁性薄膜结构,该结构的上下两层为铁磁材料,中间夹层是非铁磁材料。特别值得注意的是,当相邻材料中的磁化方向平行的时候,电阻会变得很低;而当磁化方向相反的时候电阻则会变得很大。电阻值的这种变化是由于不同自旋的电子在单层磁化材料中散射性质不同而造成的。铁磁材料磁矩的方向是由加到材料的外磁场控制的,因而较小的磁场也可以得到较大的电阻变化。

对于采用传统磁记录存储技术的硬盘产业来说,未来发展方向似乎永远无法预知,但是科学工作者们总能找到满足更大存储密度,更廉价存储成本的方案。存储密度的不断提高为硬盘产业带来了越来越多的更加巨大的挑战。

纳米技术使传统的磁存储技术不断突破存储极限的同时,也开辟了新型的存储发展方向,使硬盘存储密度一直保持着每年提

高 50% 的发展速度。相信不久的将来,新的硬盘技术有望带来存储密度高达 $50 \sim 100 \text{ TB} \cdot \text{in}^{-2}$ 的超大容量硬盘,将是 2007 年 5 月最高纪录 ($178.8 \text{ GB} \cdot \text{in}^{-2}$) 的 280~560 倍。据 Nano Markets 的研究结果,到 2011 年,全球采用纳米技术制作的信息存储设备市场规模将达到 657 亿美元。基于纳米技术的存储设备包括磁性随机存储器、铁电存储器、全息存储器、相变化存储器、分子存储器、纳米管随机存储器、石墨烯片状存储器、基于微电机系统的存储器和聚合物存储器等。

纳米存储技术在满足存储系统各项性能指标方面具有特有的优势。随着纳米技术的迅速发展,多样化的纳米存储技术将取得更加激动人心的突破,显现纳米存储的无限潜力。尽管 1 TB 级的硬盘已经出现,并且 1 TB 的硬盘价格已经低于 100 美元,但硬盘业界仍然没有停止脚步,普通硬盘正在面临固态硬盘的挑战,HDTV、IPTV 和 DVR 也给存储带来了更多的要求。随着纳米新材料的不断发现和应用,存储密度有望提升得更高,成本也将更低。

1.4.2 基于纳米加工技术的 LED 光源

LED 即发光二极管 (Light Emitting Diode),利用固体半导体 PN 结发光,经激发能发射出赤、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七色光以及白光。LED 之所以受到广泛重视而得以迅速发展,是因为它具有亮度高、工作电压低、耗电量小、体积小、寿命长、耐冲击和性能稳定等优点,LED 光源具有节能、寿命长、低维护、易控制等特点。此外,LED 光源不会在生产和使用中对外界产生污染。可见,与传统的白炽灯、荧光灯光源相比,LED 有着无可比拟的优越性。因此,LED 被称为第四代照明光源,即 21 世纪绿色、节能光源,是光源领域发展的必然趋势。

LED 光源大致有如下几个特点。

(1) 能耗小。目前,传统的高耗能产品仍然占据较大的照明

电器市场份额。LED光源单管功率0.03~0.06 W,同样照明效果的情况下,耗电量是白炽灯泡的1/10,荧光灯管的1/2。

(2)发光效率高。LED发光效率较高,目前最高可达 $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,而且光的单色性好、光谱窄,无须过滤可直接发出单色可见光。一盏灯由40个绿豆大小的LED灯泡组成,只要4 W功率就能发出相当于普通白炽灯40 W的亮度,而且直流供电毫无闪频,在实现节能效果的同时又保护了眼睛。这是LED光源节能的又一重要原因。

(3)工作安全性好。LED的工作电压低,工作电流小,因此工作安全性好。同时,其发热量低,属于冷光源,故可以安全触摸。

(4)绿色环保。现在广泛使用的荧光灯、汞灯含对人体健康有害的汞,使用过程中存在红外和紫外光污染,灯具废弃后仍会对人体和环境产生污染。而LED取代荧光灯与白炽灯除了可大幅节省能源之外,还具有环保特性。由于白光LED不需使用荧光灯常用的玻璃管、惰性气体、汞、变压器、升压器等材料,所以可大幅度节约资源,而且废弃物可回收,有利于环保;由于能精确控制光型及发光角度,光色柔和,无眩光,因而有利于保护视力;由于能控制不产生红外线和紫外线,因此在生产和使用中不会对外界产生光危害。

(5)体积小,质量轻。新一代LED半导体照明运用了纳米薄膜技术,所以可以做得很小。LED光源单元晶片尺寸为3~5 mm的正方形,质量比传统荧光灯、白炽灯轻很多。另一方面,由于光源体积小,所以可以随意组合,很容易开发成轻便薄短小型照明产品,也便于安装和维护。

(6)结构坚固且使用寿命长。传统的白炽灯,采用辐射发光的方式,灯丝存在热沉积、易烧断、光衰减等缺点。LED为全固态发光体,无灯丝、发热量低并且无热辐射,故耐振动、抗冲击、不易破碎。另一方面,LED灯体积小、质量轻,用环氧树脂封装,这也使之可承受高强度机械冲击和振动,不易破碎。普通白炽灯的使用寿命一般在1万h以内,而LED的平均理论寿命达10万h,是