

2014年诺贝尔物理学奖解读

沈波¹, 于彤军¹, 葛惟昆^{1,2}

1. 北京大学物理学院, 北京 100871

2. 清华大学物理系, 北京 100084

摘要 本文从半导体科学技术研究与诺贝尔物理学奖的渊源出发, 详细解读了2014年诺贝尔物理学奖成果“高效 GaN 基蓝光发光二极管”的研究背景、核心创新内容、科学意义和应用价值, 分析了氮化物宽禁带半导体的发展趋势。文章从3位诺贝尔物理学奖获得者的研究历程、诺贝尔评奖委员会的评奖标准等视角, 探讨了2014年的诺贝尔物理学奖对我国物理学科建设、如何看待应用物理研究与基础物理研究的关系以及对成果评价标准的启示和借鉴价值等问题。

关键词 氮化物宽禁带半导体; 蓝光发光二极管; 发展趋势; 启示

中图分类号 O472

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.001

Interpretation of the 2014 Nobel Prize in Physics Abstract

SHEN Bo¹, YU Tongjun¹, GE Weikun^{1,2}

1. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract This article explains in details about the background, content, academic significance and contribution to the social development of the invention of GaN-based blue light emission diode (LED), which was awarded the 2014 Nobel Prize in Physics. It also analyzes the development trend of the nitride wide bandgap semiconductors. Based on the story of assiduous research work of the three Nobel prize winners, and the evaluation standard of the Nobel prize committee, the article makes comments on the positive experiences from this awarding to our country, in terms of the construction way of physical science, the relationship between fundamental and applied physics, and the standard of evaluating the research achievements.

Keywords nitride wide bandgap semiconductors; blue light emission diode; development trend; positive experiences

基于“发明了高效 GaN 基蓝光发光二极管, 带来了明亮而节能的白色光源的贡献”(授奖公告原文), 2014年诺贝尔物理学奖授予了日本科学家赤崎勇(I.Akasaki)、天野浩(H. Amano)和美籍日裔科学家中村修二(S.Nakamura)。当瑞典皇家科学院2014年10月7日公布这项诺贝尔物理学奖时, 国内物理学界惊讶、惊叹与惊喜并存。惊讶是因为它不在前期预测的热门获奖人和获奖成果之中, 惊叹的是应用性和技术性如此之强的成果获得物理学奖, 而惊喜的则是看到在这个被认为“不很物理”的领域内拼搏的同行们获得了巨大成就并被认同。那么, 2014年诺贝尔物理学奖成果的具体内涵和意义是什么, 这个半导体领域的应用性成果获得诺贝尔物理学奖给物理界同仁什么启示, 作为该领域的物理学工作者, 谈谈我们个人的见解。

1 半导体研究与诺贝尔物理学奖

半导体物理、材料和器件的研究成果不断改变着人类的生活方式、深刻影响着人类文明的进程。以 Si、Ge 为代表的第一代半导体, 是大规模集成电路的主要材料, 已成为人类物质文明水平的代表, 广泛应用于计算机和各种电子产品。以 GaAs、InP 为代表的第二代半导体, 自 20 世纪 60 年代起用于制备各种光电子器件和射频电子器件, 如红光、绿光发光二极管(LED)、半导体激光器和微波晶体管, 支撑了通信技术的革命和高速发展, 使人类进入了光通信和移动互联网时代。20 世纪 80 年代末起, 以 GaN、SiC 为代表的第三代半导体兴起, GaN 基蓝光 LED 的发明促使半导体照明技术产生并使之迅速发展, 节能、环保、长寿命的固态光源使照明和全色显示技术发生了革命性变革。

收稿日期: 2014-12-09; 修回日期: 2015-01-31

作者简介: 沈波, 教授, 研究方向为宽禁带半导体, 电子信箱: bshen@pku.edu.cn

引用格式: 沈波, 于彤军, 葛惟昆. 2014年诺贝尔物理学奖解读[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 13-16.

回顾过去 100 年的科学史,无疑会发现半导体领域的科学技术成就一直倍受诺贝尔物理学奖的青睐。1901 年以来共颁发了 108 项诺贝尔物理学奖,其中有 9 项与半导体紧密相关,包括第一代半导体 4 项,第二代半导体 4 项,以及 2014 年颁发的第三代半导体 1 项。半导体领域的第 1 个诺贝尔物理学奖成果是 1947 年半导体晶体管的发明,美国 3 位科学家 J.Bardeen (伊利诺斯大学)、W.Brattain (贝尔实验室)和 W.Shockley (贝克曼仪器公司)为此获得 1956 年诺贝尔物理学奖。接着,美国 IBM 公司 L.Esaki 和通用电气公司 I.Giaever 因发现半导体和超导体中的隧道现象,分享 1973 年诺贝尔物理学奖;美国德州仪器公司的 J.Kilby 因发明集成电路获 2000 年诺贝尔物理学奖;美国 Bell 实验室的 W.Boyle 和 G.Smith 由于 Si 基电荷耦合器件(CCD)的发明获 2009 年诺贝尔物理学奖。

第二代半导体的 4 项获奖成果中,2 项与霍尔效应有关。德国慕尼黑工业大学的 Klaus von Klitzing 因发现量子霍尔效应于 1985 年获诺贝尔物理学奖。随后,美国斯坦福大学的 R.B.Laughlin,哥伦比亚大学的 H.L.Stormer 和普林斯顿大学的 D.C.Tsui (崔琦)又发现了分数量子霍尔效应,于 1998 年分享诺贝尔物理学奖。俄罗斯约飞物理研究所的 Z.I. Alferov 和美国加州大学圣芭芭拉分校的 H.Kroemer 与发明集成电路的 J.Kilby 分享了 2000 年诺贝尔物理学奖,他们提出与发展的化合物半导体异质结构被广泛应用于光电子器件和高速电路,奠定了现代通信技术的基础。2009 年与 Si 基 CCD 发明人 George E. Smith 分享诺贝尔物理学奖的 C.K.Kao (高锟)提出了利用石英纤维传输光信号的概念,并验证了其可行性,被誉为“光纤之父”。

2 2014 年诺贝尔物理学奖详解

LED 的基本结构是直接带隙半导体的 p-n 结,在正负极施加以电压,利用 p 型层注入的空穴与 n 型层注入的电子在 p-n 结空间电荷区复合发光,光子的能量近似等于半导体材料的禁带宽度。基于这样的原理,在已知的直接带隙半导体材料中满足红光发光的材料 GaAs 和 GaP 的混合晶体 GaP_xAs_{1-x} (x 指合金组分比)首先被美国通用电气实验室的 N. Holonyak 人等在 1962 年用于研制红光发光器件,制备出世界上第 1 只可见光波段 LED。此后,人们一直努力制备绿光和蓝光 LED,以实现三基色的半导体发光。20 世纪 70 年代日本科学家 J. Nishizawa 用蒸汽压控制液相外延高质量的 GaP 薄膜,并在 GaP 中引入 N 杂质形成等电子陷阱,实现了绿光 LED。尽管 GaP 材料是间接带隙半导体,但是等电子陷阱有效地含括了直接带电子波函数,使发光效率得以提高,同时由于绿光的视觉函数值高,降低了使用中对绿光亮度的要求,这样 GaP:N 的绿光 LED 在氮化物 LED 成功之前,成为无可替代的选择。

作为第三代半导体材料体系,III 族氮化物(又称 GaN 基)半导体,由 InN、GaN、AlN 及其三元、四元合金组成,是迄今禁带宽度调制范围最宽的直接带隙半导体,非常适合于制备短波长发光器件。20 世纪 60 年代起,GaN 作为突破蓝光 LED 的关键材料,开始受到人们的关注。然而与其他化合物半导体材料不同,GaN 缺乏天然的外延生长用单晶衬底,只能使用

其他晶体作为衬底来进行异质外延生长,得到的外延层晶体质量和导电类型都很难控制。1971 年美国无线电报公司的 J. I. Pankov 制作了采用 GaN 的 MIS(金属-绝缘体-半导体)结构蓝光发光器件,这是全球最先诞生的 GaN 基蓝绿光发光器件。但由于未实现 p 型 GaN,没有 p-n 结,器件外量子效率只有 0.1%,不具有实际应用意义^[1]。

1973 年开始,日本名古屋大学的赤崎勇把“通过 GaN 基 p-n 结实现蓝色 LED”这个挑战当成毕生的事业,先后尝试了分子束外延(MBE)、氢化物气相外延(HVPE)等生长方法,最终选择了金属有机物化学气相外延(MOCVD)方法,并确定了以蓝宝石为外延生长衬底的技术路线。20 世纪 80 年代,天野浩作为博士研究生进入赤崎勇课题组,并以研制出 GaN 基 p-n 结的蓝色 LED 作为奋斗目标,从装配 MOCVD 外延生长系统开始做起,经历了无数次失败。由于蓝宝石衬底与 GaN 之间存在较大的晶格失配,直接外延生长会在 GaN 薄膜中产生高密度缺陷。为了克服这一困难,经过多年的艰难探索,赤崎勇和天野浩发展了低温 AlN 缓冲层技术,于 1986 年成功地在蓝宝石衬底上第 1 次生长出表面完整的高晶体质量 GaN 外延薄膜^[2],为高效 GaN 基蓝光 LED 的实现攻克了第 1 个难关。随后,天野浩与赤崎勇一起确认掺杂受主杂质 Mg 的 GaN 中难以形成 p 型的主要原因是 Mg-H 键导致的杂质电离困难。在多次实验后,1989 年他们发现用低能电子束辐照掺杂 Mg 的 GaN 薄膜,可以有效去除 Mg-H 键,实现 p 型激活,成功获得了 p 型 GaN 外延薄膜^[3],为高效 GaN 基蓝光 LED 的实现攻克了又一个难关。在上述工作基础上,赤崎勇和天野浩成功研制出世界上第 1 只 GaN 基 p-n 结蓝光 LED 原型器件。

与此同时,当时在日本日亚(Nichia)化学工业株式会社做工程师的中村修二(后到美国加州大学圣芭芭拉分校任教授)从 MOCVD 装置改造开始进入了 GaN 外延生长领域。他发现当时主流的 MOCVD 系统只能用于生长采用 AlN 缓冲层的 GaN 外延薄膜,而且表面粗糙,制约了外延材料的质量和器件发光效率的提升。1991 年他设计出双流 MOCVD 系统,并用 GaN 缓冲层代替 AlN 缓冲层,生长的 GaN 外延薄膜表面平整,晶体质量有了明显改善,外延生长速度也得到提高^[4]。中村还发现用简单易行、低成本的氮气氛热退火方法代替无法用于产业化生产的低能电子束辐照,同样可以实现掺杂 Mg 的 GaN 的 p 型激活,发展了实用化的 p 型 GaN 制备技术^[5]。此外,GaN 基 p-n 结蓝光 LED 虽然较 MIS 结构 LED 发光亮度提升很多,但仍不能满足实用所需。中村提出在 p-GaN 与 n-GaN 之间插入一层 InGaN,形成了 p-GaN/n-InGaN/n-GaN 双异质结构(后发展成量子阱结构),极大地提升了 LED 的发光效率,为 GaN 基 p-n 结蓝光 LED 的商业化生产扫清了技术障碍^[6]。1993 年,Nichia 公司推出了世界上第 1 只商用 GaN 基蓝光 LED;1994 年,该公司采用蓝光激发黄光荧光粉的方法,制备出世界上第 1 只 GaN 基白光 LED,并提出了半导体照明的概念,引发了 LED 行业的暴发式发展。

半导体照明对于人类照明方式具有革命性的意义,应用 LED 发光可根据需要方便地进行调节和配色,传统的照明观念正在发生根本的改变。更重要的是,半导体照明还具有引

人瞩目的节能效果。仅以我国为例,如果LED灯光效达150 lm/W,占有50%的照明市场,则可年节电3400亿kW·h,相当于4个以上三峡电站的年发电量,可每年少用煤炭3亿多t,这正是中国科技部制定的《半导体照明发展规划》中争取2020年实现的目标。由于在研制GaN基蓝光LED上的核心贡献,以及半导体照明的巨大战略意义,赤崎勇、天野浩和中村修二分享了2014年诺贝尔物理学奖。经过20年的发展,GaN基蓝、白光LED的性能已大幅提高,美国Cree公司在2014年白光LED光效的研发水平达到303 lm/W^[7],产品水平也超过了160 lm/W,国内企业的LED芯片光效普遍达到了130 lm/W,LED的灯具和应用产品开始走进千家万户。目前,半导体照明的总体发展已由光效驱动转向成本和品质驱动,智能照明、超越照明的应用发展十分迅速。

3 GaN基宽禁带半导体的发展趋势

如果说具有很宽的直接带隙成就了GaN基半导体在短波长LED和半导体照明中的核心地位,而达到~MV/cm量级的强极化电场、高饱和电子漂移速度、高击穿场强等优越物理性质,则使其成为发展高功率电子器件不可替代的材料体系。GaN基半导体异质结构中存在很强的自发和压电极化效应,在异质界面形成密度高达 $\sim 10^{13}$ cm⁻²的二维电子气(2DEG),是迄今半导体异质结构中的最高值。由于器件输出功率与载流子密度的平方成正比,GaN基异质结构自然成为高功率电子器件最具竞争力的半导体材料之一。经过10多年的发展,GaN基微波功率器件已被美、欧等国应用于相控阵雷达、电子对抗等军事领域,我国也已开始这方面的工程应用。在民用方面,由于带宽和发射功率、效率上的明显优势,GaN基微波功率器件在移动通信基站上正在逐步代替Si基LD-MOS器件,很可能成为5G移动通信的主流技术。用于电力转换系统的GaN基电力电子器件比传统的Si器件低近千倍的导通电阻、高几十倍的开关速度,使电源的损耗比传统器件大幅度降低,而体积也明显减小,成为下一代高效高功率开关器件最有希望的竞争者之一。当前GaN基半导体异质结构材料和电子器件已成为继半导体照明后国际上半导体科学与技术新的前沿领域和研发热点。

近几年,基于高Al组分AlGaIn材料的固态紫外(UV)光源受到广泛关注。相比于传统的气态UV光源(如水银灯、He-Gd激光器等),半导体紫外光源具有无汞污染、波长可调、体积小、工作电压低、寿命长等诸多优势,在杀菌消毒、生物检测、医学、污染物快速降解、水与空气净化、大容量信息传输和存储等领域有广泛的应用前景。联合国“防治汞污染国际公约”规定2020年之前禁止一系列含汞产品的生产和贸易,用AlGaIn基固态紫外光源取代含汞气态光源成为国内外更为迫切的需求。经过10多年的发展,该领域已取得一系列突破,特别是2012年AlN单晶衬底材料制备成功后,美国SET公司波长280 nm的AlGaIn基UV-LED外量子效率超过了10%,国内该领域的研究从无到有,也取得了长足进步,已有产品上市。

此外,由于GaN基宽禁带半导体一系列优异的光电性

质,使其在蓝光、绿光、紫外激光器,全光谱光伏电池,紫外和多波长光电探测器,THz光源等方面也具有现实和潜在的应用,这些方面也已成为国内外GaN基宽禁带半导体材料和器件研究大家族的一系列分支。

当前GaN基宽禁带半导体发展的另一趋势是用GaN或AlN衬底上的同质外延取代目前属于主流技术的蓝宝石、SiC等衬底上的异质外延,从而摆脱异质外延产生高密度缺陷的材料质量瓶颈,这涉及到高质量GaN和AlN单晶衬底材料的发展。中村修二在几次重要的国际会议上都提出,实现GaN衬底,将使GaN基材料和器件跨入一个新纪元。我国该领域的学者也把视点放到了这个方向。国际著名的*Compound Semiconductor*杂志最近在“GaN Substrates fresh from China”一文中就报道了我国学者生长出位错密度低至 10^4 cm⁻²的2英寸GaN衬底。

尽管属于第三代半导体的GaN基材料在许多领域的应用潜力已被广泛了解,并形成半导体照明这样数千亿规模的高新技术产业,但人类对GaN基半导体的认识,还远没有达到对Si、GaAs等第一、二代半导体材料认识的深度,因而形成了当前GaN基器件和模块的应用研究与探寻GaN基半导体材料物理性质和生长动力学的基础研究同步进行的现状,这也是第三代半导体研究的特色。例如,在GaN基蓝光LED广泛应用的今天,我们仍然没有完全理解作为LED核心结构的InGaIn/GaN量子阱中的发光机制;氮化物材料生长于蓝宝石、SiC异质衬底上,位错密度通常在 $10^8 \sim 10^{10}$ cm⁻²量级,如此高的缺陷密度对发光过程没有造成显著影响的原因,还没有得到令人信服的解释。也许这就是GaN基半导体吸引许多物理学工作者介入其中的原因。

4 2014年诺贝尔物理学奖给我们的启示

诺贝尔物理学奖标志着物理学研究的最高成就。2014年,诺贝尔奖评审委员会把该奖授予GaN基蓝光LED的3位核心贡献者,反映了该委员会对物理学成就的评价标准。诺贝尔物理学奖既表彰具有深刻物理学意义的基础物理研究贡献(如2013年的希格斯粒子),也授予影响人类生活的重大应用物理研究成果。2014年的诺贝尔物理学奖让我们更深刻地领会到物理学是一门以实验为主的科学,它来源于实践,最终也要为实践服务。人类生活的各个层面、各个角落,都体现着物理学的成就,这是物理学的本质,也是物理学的荣耀。

从诺贝尔物理学奖多年获奖成果中可以看到,基础物理研究和应用物理研究是物理学发展的两个巨大车轮,它们的协调与互动,成就了物理学的进步,两者密切关联、不可或缺。没有应用,研究就会缺乏动力,国家和社会的支持就不可持续;没有基础,学科发展就会迷失方向,应用研究也会成为无源之水,谈不上创新和突破。在当前我国教育、科研体制正在大幅度改革,同时社会大环境日益浮躁的情况下,物理学学科的发展和建设需要追求、倡导与包容的,正是我国物理学工作者,特别是物理学学科带头人应该深入、冷静思考的问题。具体到半导体领域,应用基础研究、应用研究无疑是主流,迄今为止半导体领域的9个诺贝尔物理学获奖成果也

清晰验证了这一点。从物理学的学科划分看,半导体物理仅仅是凝聚态物理下的一个分支,或叫三级学科,但实际上半导体科学技术起源于物理学,发展到今天,已经是物理学、材料学和电子学综合的一个交叉学科,并涉及到化学和光学工程。我国由于建国后大学体制调整的历史原因,半导体科学技术研究在文理综合性大学中一般属于物理系或物理学院,少部分划入电子工程或材料系,而美国大学的物理系一般主要从事基础物理研究,规模较小。因此,在我国规模较大、基础和应研究兼具的物理院系中如何看待属于应用物理范畴与工程学科交叉较多的半导体科学技术研究,如何建立与其发展相适应的学科建设和学术评价体系,是一个很现实的问题,其他一些应用物理研究方向也有相似问题。像 GaN 基蓝光 LED 这种典型的应用物理研究,在国内一些物理院系曾不被一些学者认可,认为“没有物理”。针对这类现象,应该从物理学的内涵和我国物理学学科建设的高度做一些反思。

国内少数物理学工作者的另一误区是把应用物理研究与科技开发、技术服务划等号。他们的理解是,从事这方面工作的人就应该去创造经济效益,以经济效益的多少作为衡量工作成效的主要标准。2014年的诺贝尔物理学奖3位获奖人中,身在企业的中村修二无疑从事的是产业技术研究工作,但赤崎勇和天野浩从事的是与 GaN 基蓝光 LED 相关的材料物理研究,他们揭示了 GaN 基 LED 面临的2个关键材料科学问题的物理原因,提出了解决方法,他们的成果和方法并不能直接用于器件的产业化,但在国际上没有人因此否定他们的巨大贡献。很显然,基础物理和应用物理研究均属于科学研究的范畴,它们之间既有一些相通的研究规律和成果体现方式,也有一些不同的规律和特点。半导体科学技术经过60多年的高速发展,经历了三代半导体时代,现在的半导体科学技术前沿应用基础研究和应用研究需要很尖端的科学仪器和大量的研究经费,进入门槛很高,在国内外都集中在少数顶尖高校和研究机构,而且一般具有研究周期较长、物理与技术密不可分、一旦突破就会对国家战略需求和产业发展产生明显的推动作用等特点,这些特点无疑与基础物理研究有一定的差别。不可否认,相对于基础物理研究,应用物理研究与产业技术研究关联更加紧密、研究链的上下游关系更加明显,赤崎勇和天野浩的研究与中村修二研究很典型地体现了应用物理研究和产业技术研究的紧密关联和差异。

2014年的诺贝尔物理学奖对物理学工作者如何看待SCI论文和影响因子也可以有所启示。从20世纪90年代起,SCI论文发表数量和论文期刊的影响因子高低逐渐成为我国物理学科进行学术评价的主导性指标。论文发表和引用对科研的促进、对大学和科研机构提高国际学术地位和影响力具有重要作用。我国在改革开放、与国际接轨、建设世界一流或高水平大学的过程中,阶段性地强调SCI论文发表和影响因子的重要性无疑是必要和合理的。但任何事情都不能绝对化,过犹不及。如果我们考察2014年3位物理学诺贝尔奖得主发表的论文,就会发现他们的论文集中发表在日本的 *Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)* 和美国的 *Applied Physics Letters (APL)* 上。APL 的影响因子3.515, JJAP 更低,都不属于

高影响因子期刊。不可否认,影响因子高的期刊上发表的论文有许多非常好的工作,但值得我们深思的是:影响因子和工作水平的高低是否是线性关系?我国现时的大学和研究院所的学术评价体系是否过于看重影响因子?当前,我国建设世界一流的高水平大学已经进行了10多年,并已经成为SCI论文发表大国,这些问题值得重新思考。从半导体科学技术这样的应用物理领域看,论文发表是成果体现的主要方式之一,但不是唯一方式,所研究的材料和器件的指标、发明专利等也同样是成果体现的方式,甚至在某些情况下比论文更重要。即使在以论文发表为成果主要体现方式的基础研究领域,由于不同领域研究者人数不同、领域进入门槛不同以及发表论文的机会不同等因素,简单地比较SCI论文数量和影响因子高低也会产生很大的偏差。另外,不同研究领域学者心目中的权威杂志是不一样的, *Physical Review Letters* 在物理学工作者的心目中无疑比影响因子更高的 *Nano Letters* 更重要。赤崎勇、天野浩和中村修二发表论文比较集中的 *APL* 和 *JJAP* 杂志影响因子虽然不高,但却是全世界 GaN 基宽禁带半导体研究者心目中最重要期刊,该领域主要的研究进展几乎都发表在这2个杂志上。什么是好的学术评估体系?这是一个很复杂的问题,如果加上功利的因素就更加复杂。但有一点是肯定的,学术评估应该主要以所解决的科学问题,以及解决这个问题的科学和应用价值大小为核心标准。这次诺贝尔物理学奖无疑在这方面也给了我们提醒和启示。

一年一度的诺贝尔奖,给我们以激励和启迪。国家的高度重视、高强度资金的投入以及优秀人才的成长与回归,使我国的物理学无论是基础研究还是应用研究均取得了长足进步,做出了一些具有世界水平和国际影响的杰出工作,整体上与西方国家的差距越来越小。只要我们坚守正确的科学研究价值观,逐步改革和完善我国的科研体制,包括学术评估体系,坚持在重要基础和应用研究方向上执着努力,相信在不远的将来,中国科学家就一定会站在诺贝尔物理学奖的颁奖台上。

参考文献 (References)

- [1] Pankove J I, Miller E A, Berkeyheiser J E. GaN electroluminescent diodes[J]. *RCA Review*, 1971, 32: 383.
- [2] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48: 353.
- [3] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron-beam irradiation (LEEBI)[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [4] Nakamura S, Harada Y, Seino M. Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58: 2021.
- [5] Nakamura S, Iwasa N, Seino M, et al. Hole compensation mechanism of p-type GaN films[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(1): 1258-1266.
- [6] Nakamura S, Mukai T, Seino M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(13): 1687-1689.
- [7] Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier [EB/OL]. [2014-03-26]. <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>.

(编辑 王丽娜)