

照亮世界的“新”光

罗毅[†] 汪莱

(清华大学电子工程系 北京 100084)

New light to illuminate the world

LUO Yi[†] WANG Lai

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2014-11-12收到

[†] email: luoy@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20141203

摘要 2014年诺贝尔物理学奖授予为开发 GaN 基高亮度蓝光发光二极管(LED)而做出先驱性工作的三位科学家。作者在阐释了这三位科学家的获奖理由以及蓝光 LED 对人类社会的重要意义后, 简要回顾了获奖人在上世纪 80 年代至 90 年代针对蓝光 LED 这一技术难题, 从技术路线的选择, 到关键技术瓶颈的突破, 再到最后取得成功所做的艰苦卓绝的工作。最后, 作者还讨论了蓝光 LED 在带动产业发展和学科发展上的重要意义。

关键词 发光二极管, 氮化镓, 蓝光, 半导体照明

Abstract The Nobel Prize in Physics of 2014 was awarded to the three scientists who did the pioneering work for development of high-brightness GaN-based blue light-emitting diodes (LEDs). In this article, the award-winning grounds of the three scientists and the significance of blue LED on human society were interpreted firstly. Then, it was reviewed briefly that the arduous work did by the winners in the 1980s-1990s to develop the blue LED, including initial technical route selection, the breakthroughs of key technical bottlenecks, and the final success. Last, the significance of the blue LED to drive development of industry and academy were also discussed.

Keywords light emitting-diode, GaN, blue light, solid state lighting

1 实至名归的世纪发明

2014年10月7日, 举世瞩目的新一届诺贝尔物理学奖揭晓, 三位来自日本的科学家赤崎勇(图1(a))、天野浩(图1(b))和中村修二(图1(c)), 中村获奖的工作在日本完成, 之后加入了美国籍)因发明高亮度蓝光发光二极管(light-emitting diode, LED)而分享了这一荣誉。这一结果被许多业内人士看成实至名归, 但也有一些人觉得出乎意料。在人们的印象中, 诺贝尔物理学奖应该是颁发给在物理上有重大发现或重要创新的科学家, 而蓝光 LED 中的物理看上去似乎并没有那么

“新奇”。事实上, 诺贝尔物理学奖历史上也多次颁发给“技术发明”类的成果, 例如1986年德国和瑞士的科学家因为研制出第一台电子显微镜和扫描隧道显微镜而获奖, 又如2009年两位来自美国贝尔实验室的科学家博伊尔和史密斯因为发明了目前在数字成像领域已被广泛使用的电荷耦合器件(CCD)而获奖。因此, 只要是对人类社会具有重大贡献的发明, 即使其中的物理概念看上去不那么新奇, 也依然会受到世界的认可。不要忘了, 诺贝尔本人就是一位发明家。

那么, 蓝光 LED 为什么会显得如此重要呢?

官方的获奖理由中提到“for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources”，即基于蓝光LED可以获得高亮度且节能的白光光源。可以说，正是蓝光LED的发明，使得人类的照明历史发生了一次革命性的变化。1879年，爱迪生点燃了

第一盏具有广泛实用价值的白炽灯，在相当长的一段时间内白炽灯都是人类主要的电光源。二战以后，低压荧光灯——日光灯又作为新的照明灯具被广泛使用。人类在上世纪初就发现了半导体中的电致发光现象，60年代初，基于GaAs半导体晶体首次实现了红外光LED，后来又很快制作出红光LED和绿光LED。如果能够制作出蓝光LED，就可以利用红绿蓝三基色实现全彩显示和白光照明。蓝光在三基色中最为重要，因为它波长最短，光子能量最高。利用荧光转换材料，可以很方便地把蓝光转变为波长更长的可见光，从而也能实现白光。然而，蓝光LED的研究进展并不顺利。直到上世纪90年代，第一支商业化的蓝光LED才被中村修二研制成功。基于类似技术，后续又实现了高亮度绿光LED和蓝紫光激光器。从此以后，在世界范围内掀起了蓝光LED的研发热潮，其性能也不断提升。利用蓝光LED芯片加黄色荧光粉的方法可以制作出简单、高效的白光光源。目前，白光LED的光效最高已超过300 lm/W，远远高于白炽灯的10—15 lm/W和日光灯的70—80 lm/W。

采用高效的LED光源代替传统光源的意义是巨大的。首先，照明用电占整个社会用电量的比例为15%左右，因此，节省照明用电意味着大量节省能源。其次，用电量的减少意味着因发电产生的污染气体排放也会降低。以我国2013年的数据测算，如果照明用电节省50%，相当于每年节省4个三峡大坝的发电量，减少标准煤的消耗量

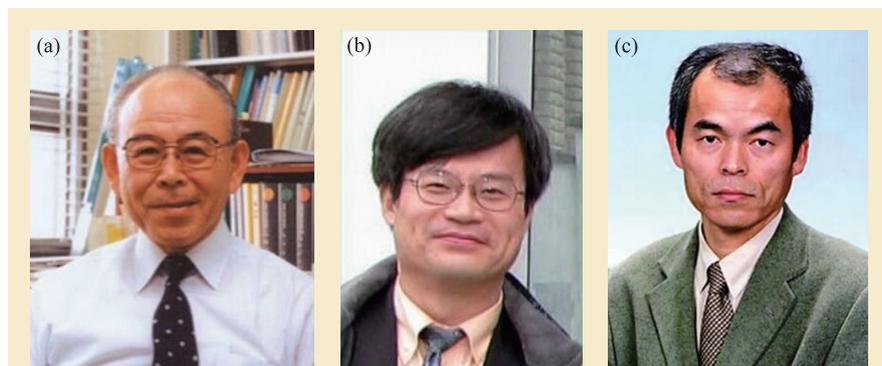


图1 2014年诺贝尔物理学奖获得者 (a)赤崎勇(Isamu Akasaki, 1929—); (b)天野浩(Hiroshi Amano, 1960—); (c)中村修二(Shuji Nakamura, 1954—)

1.28亿吨，减少二氧化碳排放量约4000万吨。此外，LED作为半导体光源，其可靠性要远高于传统的真空光源，因此更换成本也变得更低。目前，LED灯具已经大规模应用于户外照明，如路灯、隧道灯等，并逐渐开始向室内照明渗透。另一方面，LED已经几乎完全替代了传统的冷阴极荧光，成为液晶显示中不可或缺的背照明光源。由于LED体积小特点，使得手机、平板电脑等新兴移动数码设备可以做得十分轻薄，满足了人们对高品质生活的需求。可以说，今天蓝光LED已经到处使用，并已深刻地改变了人们的生活，基于蓝光LED的半导体照明技术契合了当今社会对“节能减排”的紧迫需求，当之无愧地成为人类照明历史上里程碑式的革命。如果说白炽灯照亮了20世纪，那么LED将照亮21世纪，而这一切距离蓝光LED被发明，仅仅过去了20年。也许正因为如此，诺贝尔奖才授予了蓝光LED的发明人而不是LED的发明人吧。

2 蓝光LED=“一根筋”的工匠精神+运气

虽然现在蓝光LED已经在我们日常生活中随处可见，如手机摄像头旁的闪光灯就是蓝光芯片和黄色荧光粉组成的，但是在上世纪80年代时，却被全世界公认为技术难题，甚至被认为是20世纪不可能完成的任务之一。赤崎勇、天野浩和中村修二这三位科学家正是在那个时候勇敢地选择

了这一课题并最终获得了成功。

1907年,英国马可尼电子公司的英国工程师Henry Joseph Round最早发现了半导体中的电致发光现象。我们知道,孤立原子外围存在分立的电子能级,电子从高能级往低能级跃迁,能量可以以光子的形式释放出来。半导体可以看成是一种内部原子周期性排列的晶体。原子组成晶体后,原来分立的能级扩展成了分立的能带,电子也可以从高能带(导带)往低能带(价带)跃迁,并以光子的形式将多余的能量释放出来。光子能量和这两个能带之间的能量差(禁带宽度)相当(如图2所示),因此发光波长和半导体材料密切相关。1961年,美国德州仪器公司的Bob Biard和Gary Pittman基于GaAs材料制作了最早的红外LED。但是由于所发的红外光不可见,红外LED被主要用于传感和一些光电设备中。1962年,美国通用电气公司一名34岁的普通研究人员Nick Holonyak基于GaAsP半导体制作了红光LED^[1],随即LED被广泛地用于电路板的通电指示,简单的数码显示等。1968年,美国贝尔实验室的Logan等人利用在GaP中掺入N的技术,实现了绿光LED^[2],但是出于原理上的限制,发光不强,也只能用于指示、电话按键的背光等。在红光和绿光LED突破之后,人们很自然地想到了基于新材料去实现蓝

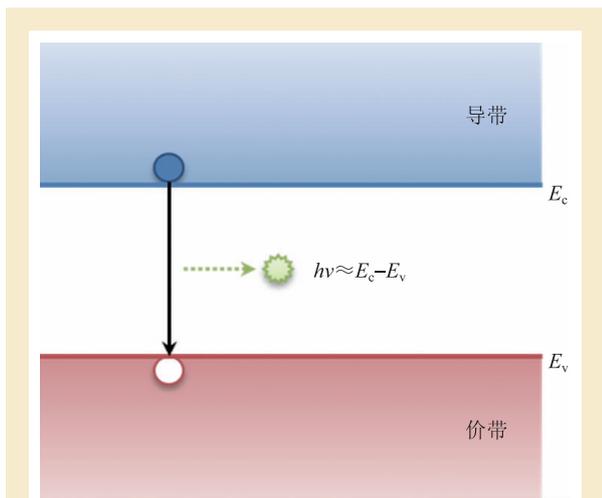


图2 半导体材料的发光示意图。导带底的电子向下跃迁到价带顶,多出的能量以光子的形式放出,光子能量和带隙(或称禁带宽度)大小相当(导带底和价带顶的能量差)

光LED。

从禁带宽度上考虑,比较合适的蓝光LED材料有三类,一类是SiC材料,属于IV-IV族半导体,一类是ZnSe基材料,属于II-VI族半导体,另外一类是GaN基材料,也就是最后成功的材料,属于III-V族半导体。一般地,要实现高效的LED,需要半导体材料满足以下一些要求:(1)直接带隙材料,即导带底和价带顶在动量空间中的位置一致;(2)晶体质量高,材料中缺陷尽可能少;(3)容易进行n型和p型掺杂,形成p-n结;(4)可以通过改变化合物半导体的组分来实现不同的禁带宽度,形成异质结。用这4条要求衡量,SiC在晶体质量和掺杂方面的问题都不大,事实上最早商品化的蓝光LED就是基于SiC的p-n结器件;然而由于SiC是间接带隙材料,从物理原理上就限制了其发光效率不可能高,所以人们很自然地把注意力转向了直接带隙的ZnSe基和GaN基材料。ZnSe基材料和GaN基材料面临的共同问题都是p型掺杂难以获得;此外,GaN的合成还十分困难,生长得到的材料具有很高的线缺陷(位错)密度($>10^{10} \text{ cm}^{-2}$),而ZnSe的晶体质量相对要好得多(位错密度 $<10^3 \text{ cm}^{-2}$)。按照传统半导体物理的认识,GaN这么高的位错密度不可能发强光。因此,当时世界上研究蓝光LED的科学家中,选择ZnSe的超过了10000人,而选择GaN的不到10人。

2.1 名古屋师生关键突破

赤崎勇是一名GaN材料的坚定支持者。上世纪70年代时他就职于松下电器产业东京研究所,在完成了红、绿光LED的研发后,他决定将蓝光LED作为毕生的事业。也许正是这种在工业界的经历使得他考虑问题的方式与众不同。他认为,和ZnSe相比,GaN材料的物理和化学性质要稳定得多,一旦解决材料质量问题,未来的实用性会更强。1981年,他转到名古屋大学当一名教授,并选择金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术开始了GaN薄膜材料的外延生长。所谓的“外延”生长是指在厚层晶体材料(衬底)的表面进行薄膜

(外延层)的“共格”生长,即外延层和衬底最好是同一种材料或晶格常数(原子间距)相近的材料。例如,在GaAs衬底上外延生长GaAs薄膜。遗憾的是,在自然界人们找不到GaN的块状晶体,人工合成也很困难,自然就没有GaN同质衬底可供使用。经过比较,赤崎勇选择了晶体结构和GaN接近但是晶格常数失配达13%的蓝宝石作为衬底材料进行GaN的异质外延。异质外延的缺点是显而易见的,由于晶格失配,GaN外延层和蓝宝石衬底之间存在失配应力,应力的释放会导致GaN内部产生大量缺陷。这样的材料无法应用于器件。

GaN晶体质量的关键突破发生在1985年。当时还是赤崎勇博士生的天野浩,在蓝宝石衬底上先生长一层AlN缓冲层(900—1000℃),再将温度升高(950—1060℃)生长GaN^[3]。由于缓冲层释放了GaN和蓝宝石之间的失配应力(如图3所示),这种“两步法”生长技术使得GaN的晶体质量显著改善,满足了器件制作的基本要求。这一发现的过程也相当具有戏剧性。当时天野浩使用的MOCVD设备是自己搭建的,有一天当他做实验时突然发现加热装置有一些问题,温度没有升到平时那么高,无法生长GaN,于是他灵光一现地决定先通入Al源生长AlN试一试,过了一会温度又升了上去,他又通入Ga源生长GaN。这样反而得到表面光滑且没有裂纹的GaN晶体,比以往的结果都要好。当然,这一偶然发现是建立在坚持不懈实验的基础上。那段时间,天野浩除了过年休息几天外,几乎每天都进行生长材料的实验,已经积累了1500多次生长的经验。

在获得高质量GaN晶体薄膜后,名古屋的这对师生开始瞄准下一个目标——LED器件。LED从本质上说是一个二极管,二极管的核心结构是半导体p-n结。p-n结是由n型半导体(内部含有大量自由电子)和p型半导体(内部含有大量带正电的自由载流子——空穴)组成的界面。一般而言,非故意掺杂的半导体更接近绝缘体,为了让半导体导电,需要在其中适当地掺入一些杂质,

根据杂质原子的种类可以使半导体材料内部含有大量的自由电子或大量的空穴。对GaN而言,n型掺杂比较容易实现,但p型掺杂却十分困难。在GaN中经常使用的p型掺杂剂是Zn或者Mg,但是掺入这些杂质后,GaN往往仍体现高阻特性,这意味着p型掺杂剂并没有被激活。到了80年代末期,临近博士毕业的天野浩去一个研究所进行为期一个月的实习,在进行样品的阴极荧光测试时发现,被低能电子束辐照过的掺Zn的GaN样品具有更高的发光强度,这一发现让他感到惊喜。他认为这是由于低能电子束使得GaN发生了变化。但是,当他测量其电学特性时,发现并没有任何变化。他又对掺Mg的GaN进行了同样的电子束辐照实验,结果成功地获得了p-GaN^[4]。在这一关键突破的基础上,他和赤崎勇在1989年顺理成章地实现了当时世界上第一支GaN基p-n结LED。尽管亮度还很低,但是这让从事氮化物蓝光LED研究的人员看到了曙光。

值得指出的是,同一时期赤崎勇和天野浩也开展过InGaN材料的外延生长。InGaN材料属于GaN基材料系的三元化合物。GaN的禁带宽度较宽(3.4 eV),发光波长较短,通过增加In的组分比例可以调节InGaN的发光波长到更长的蓝光波段,人眼会更加敏感。另一方面,当时人们已经知道,采用双异质结结构可以获得更高的发光效率。双异质结也被称为“三明治”结构,在此结

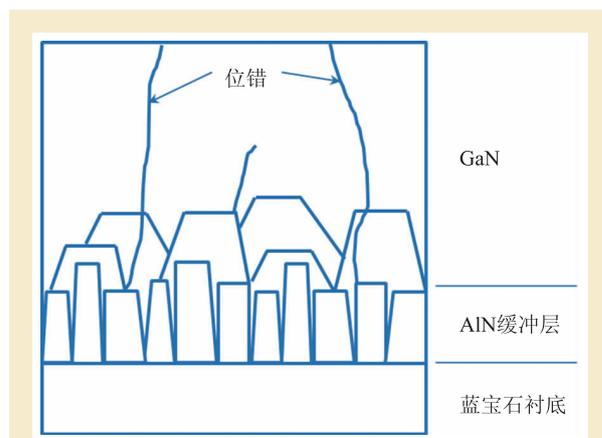


图3 “两步法”生长GaN示意图

构中, 载流子会被两边禁带宽度较宽的势垒材料限制在中间禁带宽度较窄的势阱材料中, 从而具有更高的载流子浓度和发光效率(如图4所示)。基于这两点, 理论上采用InGaN/GaN 双异质结构会制作出更亮的蓝光LED。1986年, 赤崎勇和天野浩制作出了In含量仅百分之几的InGaN单晶, 但受限于生长工艺无法添加更多的In, 他们放弃了进一步的努力。1989年, 日本NTT公司的松冈隆志通过降低生长温度, 提高氨气流量, 以及改用氮气作为载气的方法, 获得了In组分为44%的InGaN单晶, 这一方法也成为后来InGaN材料生长的标准工艺。1992年, 赤崎勇和天野浩在未使用InGaN单晶的情况下, 将p型AlGaIn和n型AlGaIn作为双势垒, 将Zn和Si共掺的GaN作为势阱, 从而形成双异质结, 制作出了比以往的p-n结型更亮的蓝光LED, 外量子效率为1.5%。

2.2 小公司的工程师震惊世界

赤崎勇和天野浩的工作, 解决了材料制备的关键问题, 为研制GaN基LED及其它器件奠定了

重要基础。中村修二正是受到他们工作的启发并加以改进, 才最终实现了具有商业价值的高亮度蓝光LED。中村在1989年才开始介入蓝光LED的研发工作, 他当时是日本德岛一所小化工厂——日亚化学的技术开发人员, 已经在日亚工作了十年。在这十年里, 他承担并完成了Ga金属提纯, GaP晶体的合成, GaAs晶体的合成, GaAlAs的液相外延等多项研发任务。由于研究经费的限制, 他几乎全凭一己之力, 从搭建设备开始, 经过2至3年的努力, 每每都能成功完成研发任务。但是由于竞争对手太多, 且日亚的生产规模较小, 缺少直接检测制备样品质量的设备, 他研发的这些产品很难在市场上为公司挣得利润。因此, 当中村提出要向蓝光LED发起挑战并获得了日亚高层的支持后, 他决定选择一条看上去竞争没那么激烈的技术路线, 这自然就是基于GaN材料的技术。

1988年3月, 中村修二去美国佛罗里达大学学习MOCVD技术。一年后回到日本, 他开始搭建生长GaN材料的MOCVD设备。他改进了传统的MOCVD反应室设计, 使其更适合GaN材料的生长。GaN材料的生长温度比传统半导体要高很多, 一般在1000℃以上。

在高温下, 衬底表面的气体会自发向上扩散, 造成外延表面的氮分压不够, GaN容易分解。中村发明了一种双束流反应室结构^[5], 即一路为水平气流携带化学反应的前驱物进入反应室, 另外一路为垂直的气流从反应室自上而下进入(如图5所示)。这一设计的优点在于, 垂直气流在外延表面提供较高的氮分压, 从而抑制了已淀积的GaN的分解。

随后, 中村修二又改进了赤崎勇和天野浩发明的在蓝宝石衬底上异质外延GaN

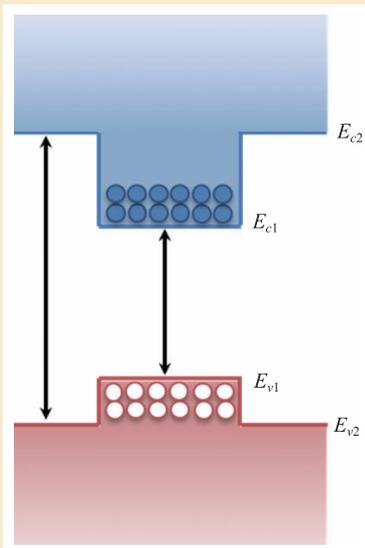


图4 双异质结(“三明治”)结构。载流子被限制在中间禁带宽度较窄的材料中, 发光效率高

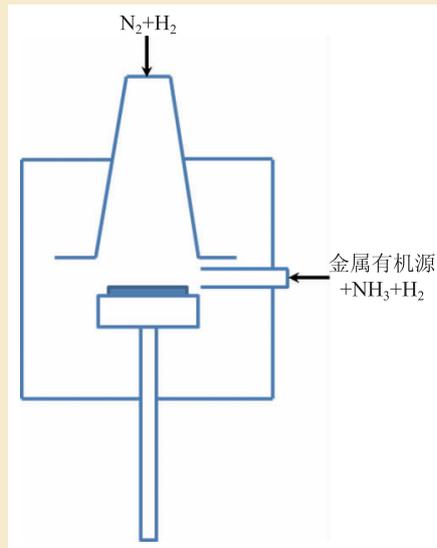


图5 双束流MOCVD反应室示意图。水平气流携带参与化学反应的金属有机源和氨气进入反应室, 垂直气流自上而下进入反应室压制向上扩散的反应源, 保证衬底表面具有足够的氮分压

的“两步法”工艺。他采用低温 GaN 缓冲层 (500 °C左右) 替代了 AlN 缓冲层, 并对 GaN 缓冲层的厚度等条件进行了优化。结果获得了晶体质量更高的 GaN 材料, 其背景载流子浓度比当时名古屋大学报道的数据还要低一个量级^[5]。这一基于低温 GaN 缓冲层的“两步法”工艺后来成为工业界生长 GaN 基 LED 的标准工艺。

中村也面临 GaN 的 p 型掺杂问题。他首先模仿了赤崎勇和天野浩发明的低能电子束辐照方法来获得 p-GaN, 发现在电子束辐照过程中, 如果在样品下面加热则可以获得更好的结果; 他进而确认, 仅仅依靠加热而不采用电子束照射样品, 也可以获得 p-GaN。最终, 他发明了更加简单实用且效果更好的在氮气中退火的方法来实现 p-GaN^[6]。后来的研究表明, p-GaN 中的 Mg 会被 MOCVD 外延过程中引入的 H 钝化, 形成 Mg-H 络合物。无论是低能电子辐照还是热退火, 都是通过借助外部能量破坏 Mg-H 键而激活 Mg 杂质的。现在, 热退火激活 p-GaN 的方法也已成为工业界制作蓝光 LED 的标准工艺。

1991 年 3 月, 中村修二试制出了 GaN 基 p-n 结 LED, 由于中心波长在紫外光范围, 所以人眼看上去仍然感觉较暗, 但是寿命超过了 1000 个小时。与此同时, 美国 3M 公司采用 ZnSe 实现了蓝光激光器, 学术杂志争相报道, 甚至预言蓝光属于 II-VI 族半导体, GaN 希望渺茫。中村此时心情很压抑, 但是当他得知 ZnSe 激光器的寿命只有秒量级时又重新振作了精神。为了获得更亮的发光, 他将下一个目标锁定为 InGaN/GaN 双异质结 LED。然而, 此时日亚的社长却执意要求中村尽快将 p-n 结 LED 产业化, 以便早日占领市场收回投资。中村在劝说社长无果后, 只能独自偷偷进行 InGaN 薄膜的研究。只花了几个月时间, 1992 年 9 月, InGaN/GaN 双异质结 LED 终于研究成功。至此, 中村的研究成果已经超过了当时所有的竞争者, 稳居世界领先地位。但是他仍不满足, 他又通过往 InGaN 中掺入杂质形成发光中心来进一步提高发光波长。最终经过优化, 中村修二实现了亮度达到 1 cd 的蓝光 LED, 日亚于 1993

年 10 月成功将其商品化, 这比当时市售的 SiC 蓝光 LED 亮了整整 100 倍。这一事件震惊了整个世界。后来, 中村又陆续发明了高亮度的绿光 LED (In 组分更多的 InGaN 发光) 和蓝紫光激光器, 也使日亚化学一跃成为 LED 领域的世界巨头。

可以看到, 赤崎勇和天野浩为蓝光 LED 做出了先驱性贡献, 解决了 GaN 异质外延和 p 型掺杂的问题, 而中村修二在他们工作的基础上进行了改良和创新, 并最终获得了成功。虽然中村只是一个小企业的普通研发人员, 但是他发明高亮度蓝光 LED, 距离他开始着手这项工作只用了短短四年时间。应该说, 他在日亚公司前十年的研发经历, 使他对材料生长设备的搭建和生长工艺掌握得很熟练, 对基本的材料和器件物理解得也很深刻, 这为他在蓝光 LED 上的成功奠定了基础。三位日本科学家充分发扬了日本人的“工匠精神”, 认准的事情“一根筋”地做到底, 不从众、不惧困难, 终于受到了幸运女神的垂青。

值得一提的是, 尽管目前异质外延的蓝光 LED 的内量子效率最高已经超过 90%, 但是 GaN 材料中的位错密度仍然在 10^8 cm^{-2} 量级。为什么蓝光 LED 的发光效率对位错不敏感? 这一原因至今仍存在一些争议。或许这也是赤崎勇、天野浩和中村修二三人的幸运之处吧。如果 GaN 真的和传统半导体一样, 那么今天历史的发展将是另外一番模样。但是历史没有如果, 由于 GaN 材料的快速发展和市场做出的选择, II-VI 族半导体发光器件的研究也逐渐黯淡下来, 越来越少的人再去关心 II-VI 族半导体材料究竟还能不能实现实用化的蓝、绿光器件了。

3 世界为之鼓舞

在日亚成功实现了蓝绿光 LED 的商品化后, 世界范围内均掀起了 GaN 基 LED 的研究和产业化热潮。全彩色大尺寸户外显示屏、白光 LED 灯具等一大批新产品应运而生。由此也带动了 LED 产业发展和宽禁带半导体材料研究两股热潮。

3.1 带动产业发展

由于LED在手机、平板电脑、笔记本电脑、显示器、液晶电视等消费类电子产品以及照明灯具上的广泛应用,世界范围内迅速发展形成了从设备、原材料,到材料外延、芯片,再到封装、应用的LED长产业链。数以千万计的就业机会被创造出来,而每年的市场规模可达几千亿美元。

我国从“十五”期间开始了相关产业的部署,发展到今天,已经成为世界上最大的LED封装产业国。半导体照明材料也已经被我国纳入战略性新兴产业。一批优秀的民族企业也得益于产业发展而站到了世界的舞台上。

3.2 促进学科发展

在LED产业发展的同时,一批相关的学科也找到了新的增长点。针对GaN基LED材料的研究,使得以GaN、SiC为代表的宽禁带半导体材料进入了科学工作者的视野,材料学、物理学和电子学的内容因此得到了丰富和发展。宽禁带半导体和传统的Si、GaAs/InP基半导体相比,禁带更宽,对应光波长更短,除了可以制作蓝绿光发

光器件,还有可能在紫外波段替代传统的真空光源和真空探测器。此外,宽禁带半导体更接近绝缘体,它们的物理化学性质稳定,适合大功率和高温工作,在实现大功率电子器件方面优势明显。有学者预测,继LED之后,电子器件将是宽禁带半导体的下一个热点应用。

基于LED的半导体照明技术也给照明这一传统学科注入了新的活力。由于LED芯片尺寸小,单位面积的光通量高,使得基于LED的照明灯具需要对光学系统进行精心的设计,以满足照明舒适度的要求。同时,经过光学系统设计后的LED灯具,在照度均匀度和光能利用率方面也比传统灯具更具优势。基于非成像光学的光学曲面构建已经成为LED照明应用中不可或缺的技术。此外,LED的光谱(较窄的蓝光峰和较宽的黄光峰)和太阳光以及传统的照明光源都不一样,随着LED大规模应用,LED光谱对人眼和生物的影响也开始受到重视,色度学、光度学和生物学可以碰撞出新的交叉学科。未来,LED照明向智能照明方向发展已经成为许多业内人士的共识。可以想象,自动感知人体情绪的色温调整、无线光通信、显示与照明一体化等叠加在LED照明上的新功能今后都有可能出现在我们的生活中。

参考文献

- [1] Nick Holonyak Jr., Bevacqua S F. *Applied Physics Letters*, 1962, 1(4):82
- [2] Logan R A, White H G, Wiegmann W. *Applied Physics Letters*, 1968, 13(4): 139
- [3] Amano H, Sawaki N, Akasaki I *et al.* *Applied Physics Letters*, 1986, 48(5):353
- [4] Amano H, Kito M, Hiramatsu K *et al.* *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(12):L2112
- [5] Nakamura S. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, 30(10A): L1705
- [6] Nakamura S, Mukai T, Senoh M *et al.* *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, 31 (2B):L139

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029

期待您的参与!

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃跃寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。被选用的封面素材提供者,

《物理》编辑部