绪　论

发光二极管(light-emitting-diode,LED)是一种能够将电能转化为可见光的半导体器件。20 世纪 90 年代初期,赤崎勇(Isamu Akasaki)、天野浩(Hiroshi Amano)和中村修二(Shuji Nakamura)三名日本科学家首次实现了高亮度蓝光 LED,并因此获得了诺贝尔物理学奖。蓝光 LED 的诞生为白光 LED 的出现铺平了道路,使白光 LED 在照明和显示领域得到了迅速发展。20 世纪 90 年代末,Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体材料在蓝光芯片领域的突破带来了功率型发光二极管技术的迅猛发展。随着发光亮度、功率、效率及可靠性的不断提高,以大功率 LED 为光源的半导体照明因具有低能耗、高效率和长寿命等特点,成为取代传统照明光源的新一代绿色光源。电光源、LED、照明电光源发展历程分别如图 1、图 2 所示。

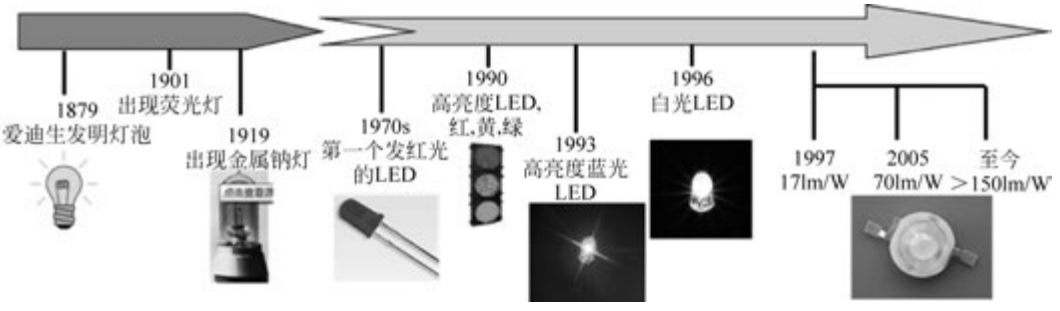


图 1　电光源及 LED 发展简史

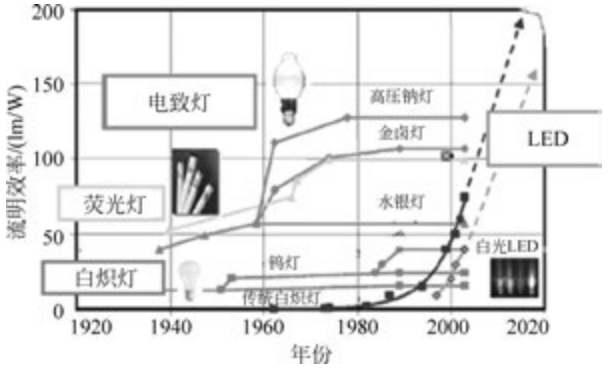


图 2　照明电光源发展路线图

一般意义上，我们把能够达到照明用途的 LED 称为“大功率 LED”，达不到照明功率的叫作“小功率 LED”。小功率 LED 的研究在 20 世纪 60 年代就已开始。1962 年，世界上第一支可见光 LED(红光 LED)被美国通用电气公司(General Electric Company，GE)、孟山都公司(Monsanto Company)和 IBM 联合实验室的 Holonyak 和 Bevecqua 通过采用气相外延在 GaAs 衬底上生长 GaAsP 异质结的方法成功制备出来。美国通用电气公司采用 GaAsP 制备的红光 LED 光通量较低，只能作为指示灯[1-2]。基于镓砷磷的商用红光 LED 也在 1968 年被惠普和孟山都先后推出。到 20 世纪 70 年代，通过掺杂氮(N)元素，基于 GaAsP 的橙光、黄光和黄绿光 LED 被 Monsanto 实验室的 George Craford 成功制备出来[3-4]，基于 GaP 的绿光 LED、基于 AlGaAs 的红光 LED 也相继研制成功[5-7]。但这些 LED 亮度普遍较低，功率较小，只能用来进行简单的显示或作为指示灯和信号灯使用[8]。

1987 年，柯达公司邓青云等成功制备了低电压、高亮度的有机发光二极管(organic light-emitting doide，OLED)，第一次向世界展示了 OLED 在商业上的应用前景。1995 年，Kido 在 *Science* 杂志上发表了白光有机发光二极管(white organic light-emitting doide，WOLED)的文章，虽然效率不高，但揭开了 OLED 照明研究的序幕。

半导体激光技术的发展也推动了相关特殊照明的应用，如半导体激光为光源的投影显示等在 21 世纪初，以日本索尼公司、三菱公司和美国 Novalux 公司为代表，研制采用半导体激光引擎发展激光投影显示。Microvision、Iljin、Symbol 等公司致力于研发应用于手机的激光投影技术，分别开发了小型化的红绿蓝三基色激光器和小型化的光学引擎系统。国内，中国科学院光电技术研究所等机构在科研领域的研究基本和国际同步，在应用领域甚至走到了国际前列。深圳光峰科技股份有限公司在 2007 年于全球率先发明了 ALPD 激光引擎技术，该技术已经成为国际激光显示领域的主流引擎技术。

随着大功率 LED 的快速发展，其在通用照明领域的应用也开始出现。路灯、隧道灯、室内照明、户外的景观照明、建筑物外观照明、汽车大灯等领域都出现了大功率 LED 的身影。相比于传统光源，大功率 LED 的优势为污染小、效率高、长寿命等。传统的日光灯管中含有汞，如果汞挥发到大气中，对环境和人体的危害会很大。LED 产品中不含汞或者铅，对环境无污染。此外，LED 光源的能量损失小，能耗在传统照明光源的$\frac{1}{3}$以下。在理论情况下，LED 的寿命可达到 10 万 h，而传统的照明光源日光灯管的寿命是它的$\frac{1}{10}$，白炽灯的使用寿命只有 1000h 左右。面对全球气候变暖、环境污染严重和能源紧缺等问题，采用绿色低能耗的新光源已成为迫切的需求。

LED 发光二极管的核心部分是由 p 型半导体和 n 型半导体组成的晶片，在 p 型半导体和 n 型半导体之间有一个过渡层，称为 pn 结。在某些半导体材料的 pn 结中，注入的少数载流子与多数载流子复合时会把多余的能量以光的形式释放出来，从而把电能直接转换为光能。给 pn 结加反向电压，少数载流子难以注入，故不发光。当它处于正向工作状态时(即两端加上正向电压)，电流从 LED 阳极流向阴极，半导体晶体就发出从紫外到红外不同颜色的光线，光的强弱与电流有关。用于照明的白光 LED 则主要由两种途径实现。一种是 R、G、B 三色的发光二极管混光实现，另一种是蓝光发光二极管与黄光荧光粉受激发出的黄光混合实现。基于这两种途径，目前主要采用多色 LED 组合和荧光粉匹配芯片方式实现白

光 LED。其中，采用多色 LED 相互组合实现的白光 LED 具有较高的光效，但由于三基色的光衰不同导致其色温不稳定，且控制电路较复杂，成本较高。而采用荧光粉匹配法实现白光 LED 具有制备方法简单、成本低、容易产业化等优点，目前已经广泛应用于制备白光 LED[9-10]。大功率 LED 制造链呈现产业链长，涉及面广，技术含量高的特点，其业界分为上游、中游和下游。如图 3 所示，上游包括衬底制备、外延生长、芯片加工（如刻蚀、镀膜、划切等），中游为封装（如芯片焊接固定、引线键合、荧光粉硅胶涂覆、硅胶透镜黏结等），下游包括灯具及可靠性测试等。大功率 LED 的性能与其制造过程密切相关，衬底材料、外延、芯片加工、封装及热管理等都会对 LED 的出光效率、可靠性、耐久性等方面产生重要影响。其中有许多关键技术难点，背后也涉及多种科学问题。

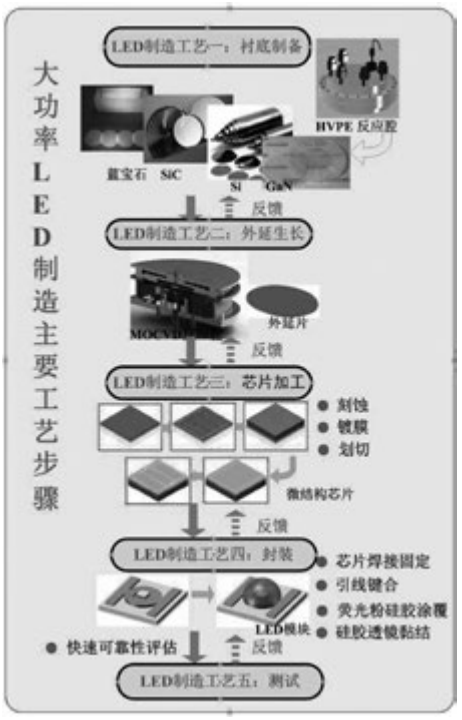


图 3 LED 制造链示意图

在制造链上游，主要工艺包括衬底制备、外延生长、芯片加工等。LED 的半导体发光材料 GaN 是通过外延工艺制备在衬底材料上的。衬底材料分为与 GaN 异质的蓝宝石衬底、SiC 衬底和硅衬底等异质衬底，以及与外延材料 GaN 相同的同质衬底。以蓝宝石衬底为代表的异质衬底虽然工艺成熟、成本低廉，但与形成发光量子阱的 GaN 外延层材料存在晶格失配和热失配，必然会导致位错、裂纹、弯曲等缺陷。这些缺陷在外延过程中会延伸、增殖，在使用中加剧光衰。同质衬底在理论上不存在晶格失配和热失配，虽然技术难度大、成本高，但被视为未来 LED 低缺陷制造的发展趋势。

讨论衬底制备及外延制备工艺必须涉及制造 GaN 衬底的关键设备氢化物气相外延（hydride vapor phase epitaxy，HVPE）和大尺寸金属有机物化学气相沉积（metal organic chemical vapor deposition，MOCVD）核心设备。这两类设备面临的主要技术挑战是超低缺陷密度晶圆的核心反应腔的设计和制造。

基于外延及芯片等制造对衬底的要求，在蓝宝石衬底、硅衬底、SiC 衬底及 GaN 衬底等的制备中，还必须应对实现超硬、难加工材料的原子级光滑表面的技术挑战。由于这些材料硬度高、化学性质稳定，如蓝宝石单晶材料（Al_2O_3）的硬度达到莫氏 9 级，仅次于金刚石（莫氏 10 级），且难以腐蚀，加工难度非常大。而且，LED 制造过程对所有衬底晶圆的表面加工质量要求都非常苛刻，要求基片具有完整晶面，无损伤层与变质层，表面粗糙度小于 0.2nm，表面翘曲度小于 0.5，表面弯曲度小于 0.5μm/50mm。表面任何微小加工缺陷都会延伸到 LED 外延层，严重影响 LED 的量子效率和发光效率，缩短 LED 的使用寿命。随着晶圆尺寸向 6 英寸（152.4mm）及以上发展，实现平坦化指标难度大大增加。尤其是 GaN 同质衬底，由于晶体性质、制备工艺等因素造成晶圆内应力大，加工性能极差，晶圆平坦化极具挑战性。因此迫切需要衬底表面平坦化新原理、新技术和新方法的突破。

在外延生长方面，大尺寸（6 英寸（152.4mm）及以上）多片 MOCVD 反应腔面临因晶圆

尺寸增大造成的外延层内部应力局部集中、晶圆边缘翘曲、缺陷增多、量子效率及阈值电压调控等新问题，直接影响 LED 外延层厚度和组分均匀性（偏差＜5％）、光波长一致性（偏差＜5nm）和生长可重复性（99％）等指标。需要通过合理的设计以达到反应腔内温度场、反应剂浓度场的均匀分布，控制预反应，在生长衬底附近保持层状气流。由于 MOCVD 晶圆表面温度的直接精确测量比较困难，无法观测反应剂在生长表面的匀相反应分布情况，所以往往需要依赖外延工艺人员的经验来跟踪和推测实际的生长温度和调节反应剂的气流分配。因此，需要建立一套精确的温度和反应剂分配测量的智能控制机构，改变外延仍过分依赖人工的状况。

大功率 LED 芯片制造工艺可分为材料生长和芯片制备两部分。

材料生长主要是指外延层的生长。LED 外延片生长的基本原理是在 MOCVD 反应腔内，反应气流被输送到衬底表面，在合适的温度下发生化学反应，然后沉淀在衬底上形成外延层。外延生长的工艺流程为：先在衬底上生成一层 GaN 作为缓冲层，然后在其上生长出 Si 掺杂形成的 n 型 GaN 层。发光层通常采用双异质结和多量子阱（multiple quantum well，MQW）结构。在有源层上，还要生长 AlGaN 作为电子阻挡层。最后，在电子阻挡层上生长出镁掺杂形成的 p 型 GaN 层。

芯片制备主要包括光刻、蒸镀、刻蚀、切割等过程。以水平结构芯片为例，它的制造工艺流程具体包括：外延片清洗→蒸镀铟锡氧化物（indium tin oxide，ITO）层→在 ITO 层上旋胶与光刻→刻蚀使露出 n 型层→去胶→退火→SiO_2 薄膜沉积→SiO_2 薄膜上旋胶与光刻→刻蚀 SiO_2→去胶→旋胶与光刻 n 型电极图形→镀膜→剥离得 n 型电极→退火→旋胶与光刻 p 型电极图形→镀膜→剥离得 p 型电极→研磨→背面镀金→划片→成品测试。垂直结构芯片和倒装芯片的制造工艺与水平结构芯片类似，均采用以下步骤进行制造：外延片→光刻→离子刻蚀→n 型电极（镀膜、退火、刻蚀）→p 型电极（镀膜、退火、刻蚀）→划片。

大功率 LED 芯片的最基本的结构是 pn 结，为了将电流引入，要分别在 p 区和 n 区镀上欧姆接触金属电极。目前，大功率 LED 芯片主要分为三类：水平结构芯片（传统芯片）、垂直结构芯片和倒装芯片，见图 4。

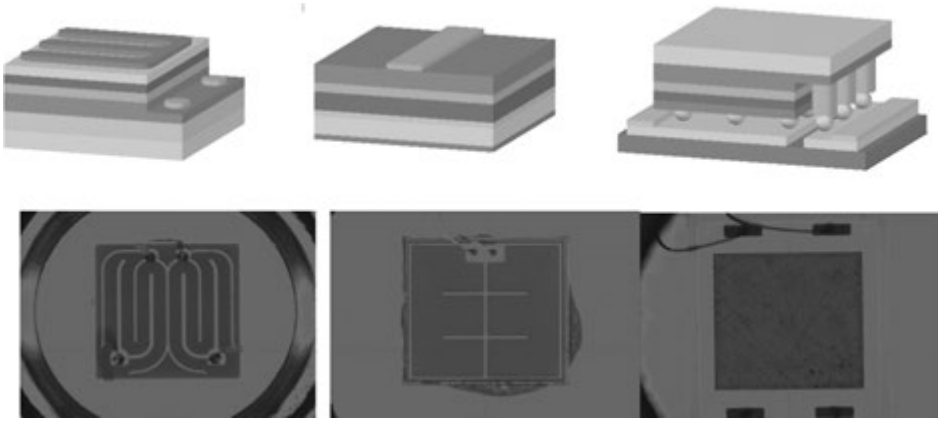


图 4　水平结构芯片、垂直结构芯片和倒装芯片

水平结构芯片主要采用蓝宝石衬底，p 型电极和 n 型电极都位于芯片顶面，如图 5 所示。为了减少占用面积，电极一般都是较细的叉状结构，由此带来了一个新的问题：极细的

电极难以实现电流在芯片中的均匀扩散。为了解决这个问题，一般要在芯片表面制备一层透明的、电阻率较低的薄层材料来增强 p 型电极对 p 型 GaN 层的电流扩散。因为电流在正极和负极之间是近似水平方向的运动，较细的电极图形使有源层不能被有效地用于电子—空穴的复合，在芯片顶面的电极也会影响芯片的出光，芯片表面的 ITO 层也会吸收一部分光，所以这种传统芯片结构限制了出光效率的提高。蓝宝石衬底的热导率较低，也使芯片的热阻较大。为了解决传统芯片结构的问题，提高 LED 的出光效率，Wierer 等在 2001 年研制出基于 AlGaInN 的大功率 LED 倒装芯片。

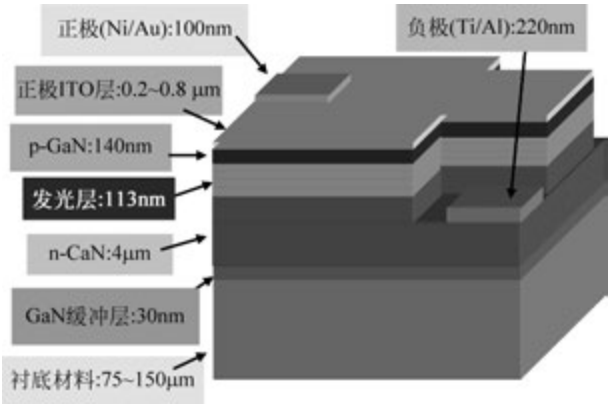


图 5　大功率 LED 芯片基本结构

倒装技术就是将传统芯片进行倒置，使电极都在底面，光从作为芯片顶面的蓝宝石衬底出射。倒装结构避免了电极金属对出光的遮挡，电极可以采用覆盖整个底面的高反射膜，使 p 极和 n 极之间实现较为均匀的电流扩散，提高有源层的利用率。另外，将蓝宝石衬底作为出光面也解决了传统芯片散热不良的问题。倒装技术使高热导率的电极可直接与封装基板直接接触，热阻较低。

垂直结构的 LED 芯片将两个电极分别放在芯片的顶面和背面。这种结构使电流分布均匀，减少了电流拥挤，并且电流几乎全部垂直流过芯片有源层，提高了有源层的利用效率，显著提高发光效率。因为垂直结构具有优异的电流分布特性，大电流垂直结构芯片已成为 LED 芯片发展的方向之一。另外，由于只有 n 极在芯片的顶面，电极对芯片出光面积的影响比水平电极芯片小。

水平芯片的结构包括蓝宝石衬底、GaN 缓冲层、Si 掺杂形成的 n 型 GaN 层、InGaN/GaN 多量子阱层、AlGaN 电子阻挡层和镁掺杂的 p 型 GaN 层等。垂直结构芯片和倒装芯片的内部结构与水平芯片类似。与水平芯片不同的是，倒装芯片的蓝宝石衬底可能要被减薄。垂直结构芯片的衬底分为剥离和不剥离两种情况。衬底剥离的垂直芯片通过分解缓冲层进行剥离，n 型 GaN 层也会进行刻蚀减薄。

在 GaN 外延片制备过程中，还涉及光致发光（photoluminescence，PL）检测、电致发光（electroluminescent，EL）检测、阴极发光（cathodoluminescence，CL）检测、原子力显微镜（atomic force microscope，AFM）检测、X 射线摇摆曲线（X-ray diffractometer-rocking curve，XRD-RC）检测等品质检测工序。

封装属于 LED 制造链的中游，是实现 LED 从芯片走向最终产品所必需的重要环节，起

着保护芯片、散热、电信号连接和增强性能等作用。对于白光 LED，封装还具有调节色温和显色性的功能。在理想条件下，LED 可以工作长达十万小时而不会出现失效，但实际情况是 LED 芯片对环境非常敏感，静电、湿气、高温、化学腐蚀、振动等都会对芯片的性能造成严重的影响。因此，发展先进的封装技术对于实现 LED 芯片长久可靠的工作至关重要。

一般而言，大功率 LED 封装技术涉及光学、热学、电学、力学、材料、工艺和设备等诸多领域。其基本目的是以封装设计为基础，开发和应用先进的封装材料，改进封装制造工艺，结合先进的封装设备，解决封装中存在的光热电力等综合问题，实现封装性能的不断提升。大功率 LED 是一种发光照明器件，光学性能是评价 LED 封装品质高低最直接的指标。对于目前的大功率白光 LED 而言，高流明效率、高显色性、色温可控、光强分布一致、空间颜色分布均匀等是封装技术研究的主要目标，也是体现 LED 能取代传统照明方式的优势所在。

封装的光学性能与封装材料的光学特性、封装结构与工艺密切相关。高折射率和高透光率的封装材料能增强芯片的出光效果，实现高流明效率。对于白光 LED 而言，荧光粉材料的激发效率和光转换效率影响着封装的流明效率，荧光粉的吸收光谱和发光光谱决定了合成的白光光谱的品质，包括色温和显色性。透镜的形貌和荧光粉涂覆的品质对封装的光强分布和空间颜色均匀性有重要影响。因此，实现封装的高光学性能，需要综合运用材料、结构和工艺等多方面的技术。此外，还必须综合考虑热学、力学和电学等影响 LED 长期可靠性的因素，才能实现高的光学性能，使 LED 成为真正可用的产品。

在大功率 LED 封装中，受芯片的内量子效率和外量子效率的影响，芯片有源层的无辐射复合过程将大部分的电功率转化成了热量，1W LED 的热流密度高达 $70W/cm^2$，比 CPU 芯片的热流密度还高。如果缺乏有效的散热途径，那么在芯片中积累的热量会大大增加芯片结温，影响芯片中的电子—空穴的复合效率，降低芯片的内量子效率，使芯片亮度在工作一段时间后显著下降。较高的温度还会加速封装材料的退化，使材料的光学、热学、力学性能等出现明显的改变，如硅胶会出现碳化现象。在高温下，材料的热膨胀系数不一致会使其产生不同的热变形，在材料的内部和界面处形成热应力，导致 LED 封装器件在长期工作之后出现界面脱层、裂纹等现象。因此，良好的散热对于大功率 LED 封装至关重要，是保障 LED 维持高光学性能的前提条件，也是实现 LED 封装高可靠性的重要内容。解决 LED 封装散热问题的最主要的方法是利用高导热的界面材料和基板材料降低芯片到外部环境的热阻，将芯片的热量快速传导到外部的散热器中。

电学和力学是大功率 LED 封装的另外两个重要技术领域。材料的力学性能是选择封装材料的一个重要依据，LED 封装的失效大多是由器件中的局部应力集中造成的。应力集中可能由高温引起的热失配、振动或冲击引起的材料变形等导致。在一些恶劣的照明应用环境中，如 LED 路灯、隧道灯、车灯等，湿热耦合引起的材料老化也会改变材料的力学性能，导致 LED 器件出现早期失效。因此，大功率 LED 的封装设计与制造必须综合运用多学科的理论和技术来解决技术发展中的难题，才能应对迅速发展的芯片技术和多种多样的照明产品的需求。

大功率 LED 封装由许多工艺组成，大致包括贴片、键合、点胶、固化、切模、分选等。其中，LED 芯片 ITO 电极上的引线键合对轻柔接触控制、高加速度一致性精确喷胶点胶，以及低封装热阻的实现都是典型的技术挑战。

LED 器件可靠性贯穿制造链始终。芯片在加热加电条件下，会逐步引起位错、缺陷、表面和周边产生电漂移及离子热扩散，导致本质失效。LED 器件失效中，大约 70％是由封装引起的从属失效，其原因复杂，与环氧、硅胶、荧光粉、基座、导电胶、固晶材料等封装材料有关，也与材料不匹配、应力、断裂、开路等封装结构设计有关，还与引线键合、点胶、装片、压焊、固化温度及时间等封装工艺有关。在可靠性试验方面，国内外还没有科学统一的做法，LED 失效机理存在争议，失效的判定标准也不一致。在加速寿命试验方面，一般采用加温度过应力的寿命试验方法，对电、热、湿、振动、高低温冲击等多应力耦合的试验方法及其相关的失效机理研究不足。准确的寿命预测模型是业界多年期盼又尚未真正解决的问题，也是公认的技术挑战。

LED 制造链的下游主要包括驱动电源、灯具、照明应用等。

驱动电源由电子元件组成。少数元部件对温度非常敏感，散热不良很可能导致其寿命大幅缩短、提前失效，致使 LED 电压出现故障，灯具失效。尤其是内置式电源（放在整灯内的电源），发热量大的电源会增加整灯的导热、散热压力，LED 的温度将升高，光效和寿命将大大降低。所以，在设计 LED 电源时，应主要考虑功率设计、元件选型、电性能设计、PCB 布板设计、防雷击损坏设计、电网电压超出电源负荷设计等因素。

灯具制造技术包括照明光学设计、光学设计应用、灯具光学制造技术等。

除了替代传统灯具，新的照明应用技术也在不断涌现。例如，Mini/MicroLED 照明主要用于显示的背光照明，比普通 LED 背光照明具有更好的光学性能，在更节能的同时将 LED 背光源微型化、矩阵化，方便制作直下式背光源。但其制造工艺更复杂，对精度要求更高，控制更精细，成本相应高很多。如果单独驱动，则可以实现直接显示。因为其由无机材料制成，比 OLED 产品寿命更长。MiniLED 和 MicroLED 的主要区别是发光芯片尺度，低于 100μm 为 MicroLED。目前二者的量产技术日趋成熟，将推动 LED 高端照明进一步发展。

随着 LED 照明技术的发展，在基本实现节能目标的基础上，又提出了对光生物安全、光品质的更高需求。尤其是近年 LED 造成的蓝光危害、人体节律紊乱、显示色差的问题日渐显现，使行业意识到高品质健康照明的普及和向健康照明及全光谱照明技术方向发展刻不容缓。健康照明，通俗来讲就是通过 LED 照明改善并提高人们工作、学习、生活的条件和质量，促进心理和生理健康。

光对人的生物效应可分为视觉效应和非视觉效应。光的视觉效应为可见光穿过角膜，通过晶状体成像在视网膜上，经感光细胞转化为生理信号，视神经接收后产生视觉，从而产生对空间中物体的颜色、形状和距离的信息的判断。视觉还可以引起人们心理机理反应，即视觉的心理效应。有两类视觉细胞，一类是锥状细胞，感觉光度和色彩；另一类是杆状细胞，只能感知光度，但敏感度是前者的一万倍。

日常生活中的许多现象属于光的视觉效应，例如，在卧室、餐厅、咖啡厅中，暖色光（如粉红色和浅紫色）会使整个空间具有温暖、轻松的气氛，还可以使人的皮肤、面容显得更健康；在夏季，蓝、绿色的光会使人感到凉爽；在冬季，红色光使人感到温暖；强烈的多彩照明可以把气氛变得活跃和生动起来，增加繁华热闹的节日气氛，现代家庭居室也常用一些红绿的装饰灯来点缀起居室和餐厅，以增加欢乐的气氛；有些餐厅既无整体照明，也无桌上吊灯，只用柔弱的星星点点的烛光照明来烘托气氛。

光的非视觉效应是指，人眼视网膜上存在第三类感光细胞——内在光敏性视网膜神经节细胞(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells，ipRGCs)，负责调节机体视觉以外的非视觉效应，如管理时间的功能，协调和控制人们在不同时段里的活动节律和幅度等。这种非视觉效应也称司辰视觉效应(citopiceffects)，是 2002 年英国布朗大学的 Berson、Dunn 和 Takao 在哺乳动物中发现的，是当年的世界十大发现之一。研究表明，家鼠的非视觉效应在 465nm 最大，但对人类来说，应在 480～485nm 为最大(锥状细胞和杆状细胞的峰值分别为 555nm 和 507nm)。

ipRGCs 在人体大脑中有自己的神经传输网络，与视觉神经传输网络有很大的不同。接收光后，ipRGCs 产生生物电信号，传递到下丘脑(hypothalamus)，之后进入视交叉上核(suprachiasmatic nucleus，SCN)和脑外神经核(paraventricular nucleus of hypothalamus，PVN)，最后到达松果体(pineal)。松果体是大脑生物钟的中枢，它会分泌褪黑素。褪黑素合成后储存在松果体内，当交感神经兴奋时，会支配松果体细胞释放褪黑素进入血液循环，并诱导自然睡眠，因此其是调节生理节律的一种最重要的激素。褪黑素的分泌具有明显的昼夜节律，白天分泌受抑制，晚上分泌活跃。但交感神经的兴奋度与达到松果体的光的能量和颜色密切相关，光色和光照强度会影响褪黑素分泌和释放。在调节生物钟的同时，ipRGCs 对人体心率、血压、警觉性、活力等都会产生影响，这些也都属于光的非视觉效应。此外，光引起的生理损伤也属于光的非视觉效应。

非视觉效应的例子有：分别在 1000lx 的红、绿、蓝 3 种色光照射下，对人体尿液中褪黑色激素的代谢产物进行检测，结果表明红光对褪黑色激素的抑制率很小，绿光最大，蓝光稍低；有研究表明，用 6500K 日光色和 3000K 的暖白色光在同样照度下，前者对褪黑色激素抑制率约为暖白色光的 1 倍；光的照射会明显增加心率，波长越短越显著，对年轻人的影响比对老年人明显；Kobayashi 等用 3 种白色光(色温分别为 3150K、5200K、6800K)进行照明实验发现，在高色温(6800K)照明环境中，人的扩张血压(即低压)高于中、低色温环境，表明高色温环境对心脏有明显的觉醒作用；中红外(middle infrared，IRB，1400～3000nm)和远红外(far infrared，IRC，＞3000nm)可被角膜、房水、晶状体、玻璃体中的水分吸收，因此，玻璃加工者、红外激光器研究者等容易患白内障眼病；当人们准备健身时，户外的光环境比室内的光环境更容易使人兴奋起来。

伴随第三代半导体技术的不断发展，LED 与 LD 在共性的照明领域得以协调发展。

半导体激光照明与 LED 照明在技术上有很多相似之处。半导体激光的特性使其在某些特殊领域的应用上有着不可替代的优势。比如，奔驰、奥迪、宝马等均推出激光大灯车型，推动汽车照明技术进入新的发展阶段。相比较于氙气大灯和 LED 大灯，激光大灯的亮度更高，可以通过一个镜片控制激光光束的方向，有指向性地照射到前方，距离也是 LED 远光灯的两倍。在智能汽车等领域，激光照明也有广阔的应用天地。激光照明的高速响应、单色性极好、方向性极强、体积小、功率密度高等特点，有助于智能驾驶上的主动安全、自适应导航等功能实现。

半导体激光为光源引擎的投影具有照明光源的属性，有更好的单色性和方向性。使用激光三基色作为显示光源显示的颜色包含了人眼所能分辨颜色的 90%，其色度三角形的面

积是传统磷显示的将近三倍。激光显示色彩丰富、饱和度高、对比度强、与各种视频信号都有较好的匹配性。日本索尼公司、三菱公司和美国 Novalux 公司等研制了采用三基色激光的引擎；Microvision、Iljin、Symbol 等开发了小型化的红绿蓝三基色激光器和小型化的光学引擎系统，其激光发射器模块如图 6 所示；欧司朗也发展了可应用于 AR/MR 智能眼镜的微型激光引擎，如图 7 所示。

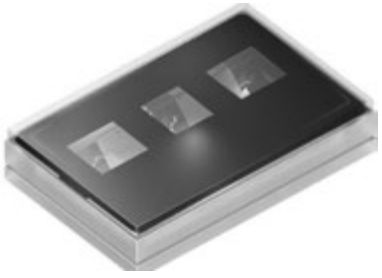


图 6　激光发射器模块原型



图 7　智能眼镜

中国科学院光电技术研究所已完成 RGB 三基色激光器显示样机，其原理如图 8(a)所示，正在进行规模化产业推广。深圳光峰科技股份有限公司在 2007 年在全球范围内率先发明了 ALPD 激光引擎技术，其原理如图 8(b)所示，采用白光激光照明＋动态荧光激发。该技术目前已经成为国际激光显示领域的主流引擎技术，并在全球范围率先实现技术产业化，成为激光影院领域的佼佼者。

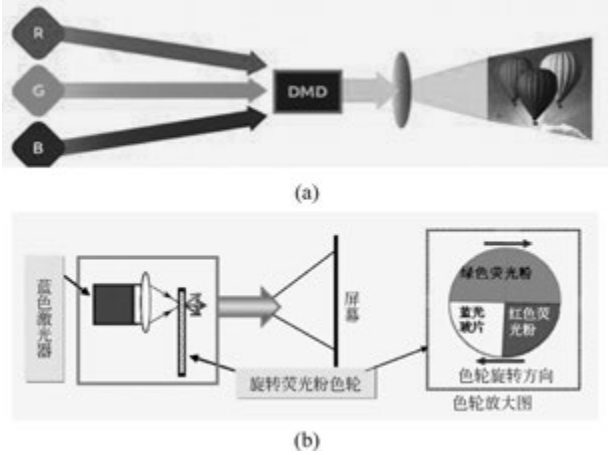


图 8　激光显示引擎原理示意图

(a) 三基色激光显示引擎原理示意图；(b) ALPD 激光显示引擎原理示意图

另外，以 GaN 为代表的第三代半导体技术也已经在大功率电力电子器件、能源、国防、新一代信息技术、人类生活等各方面产生巨大影响。微电子和光电子技术携手并进，人类将进入智能、可控、数字化的照明时代。照明的功能远远不止于“看”和“被看见”，新的应用仍将不断涌现。

参 考 文 献

[1] 张万生，布良基. 超高亮度 LED 的进展一功率 LED[J]. 国际光电与显示，2001，12：187.

[2] 刘坚斌，李培咸，郝跃. 高亮度 GaN 基蓝光与白光 LED 的研究和进展[J]. 量子电子学报，2005，22：673.

[3] CRAFORD M G，SHAW R W，Herzog A H，et，al. Radiative recombination mechanisms in GaAsP diodes with and without nitrogen doping[J]. Journal of Applied Physics，1972，43(10)：4075-4083.

[4] CRAFORD M G. Recent developments in light-emitting-diode technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，1977，24(7)：935-943.

[5] LOGAN R A，WHITE H G，WIEGMANN W. Efficient green electroluminescence in introgen-doped GaP p-n junctions[J]. Applied Physics Letters，1968，13(4)：139-141.

[6] LOGAN R A，WHITE H G，WIEGMANN W. Efficient green electroluminescence junctions in GaP[J]. Solid State Electronics，1971，14(1)：55-70.

[7] RUPPRECHT H，WOODALL J M，PETIT G D. Efficient visible electroluminescence at 300K from $Ga_{1-x}Al_xAs$ p-n junctions grown by liquid-phase epitaxy[J]. Applied Physics Letters，1967，11(3)：81-83.

[8] SCHUBERT E F. Light-emitting diodes[M]. 2nd ed. New York：Cambridge University Press，2006.

[9] 胡运生. 高显色低色温白光 LED 荧光粉的改性及光色搭配研究[D]. 北京：北京有色金属研究总院，2014.

[10] SCHUBERT E F，KIM J K. Solid-state light sources getting smart[J]. Science，2005，308：1274.