

固态照明光源的基石 ——氮化镓基白光发光二极管*

张国义[†] 陈志忠

(北京大学物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室 北京大学宽禁带半导体研究中心 北京 100871)

摘要 首先回顾了照明光源的简单历史,然后介绍了发光二极管(LED)发展到大功率白光LED的历史,接着简述了国内外发展现状,主要技术路线及其特点.最后阐述了作者在这方面的研究工作进展状况,对其发展趋势提出了一些看法.

关键词 固态照明, GaN, 白光发光二极管, 发光效率

The basis of solid state lighting-GaN white light emitting diodes

ZHANG Guo-Yi[†] CHEN Zhi-Zhong

(School of Physics State, State Key Laboratory for Mesoscopic Physics,
Research Center for Wide-gap Semiconductors, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The history of light sources is briefly reviewed. The evolution of light emitting diodes (LEDs) is traced from the earliest red LED to the high power white LED. The development of solid state lighting throughout the world (including China) is described briefly, as well as the main fabrication techniques and their features. The status of the GaN based LED program in Peking University and the outlook for solid state lighting are discussed.

Key words solid state lighting, GaN, white LED, luminous efficacy

1 引言

固态照明(solid-state lighting, SSL)通常是指应用无机半导体发光二极管产生白光,作为普通照明光源,因此有时也称为半导体照明.我们首先回顾一下照明光源的历史.

1.1 照明光源的历史.

照明一直与人类社会文明和进步紧密联系在一起.原始社会火的发明,使人类从半黑暗(一半白天,一半黑夜)的世界里得以解脱,夜间的照明从燃烧木柴到油灯,蜡烛,不断进步,它留下的历史痕迹是亮度的度量以烛光(candela)为单位.1886年,爱

迪生发明了白炽灯,历经10余年的努力,终于在1902年由于钨丝灯泡的发明而进入实用化阶段(见图1^[1]),白炽灯的发明使人类的生产、社会活动时间延续至全天,极大地推动了人类的文明进程.但是,白炽灯发明也带来了能源、环保等一系列问题.在白炽灯泡发明的100多年里,其发光效率仅增加至约15 lm/W.白炽灯消耗了大量能量发热,电光转换效率只有10%左右.其消耗的电能所燃烧的煤、

* 国家自然科学基金(批准号:60376005,60276010)、国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA313140,2001AA313060,2003AA31g020)资助项目

2004-03-04收到初稿,2004-08-12修回

[†] 通讯联系人. E-mail: gyzhang@pku.edu.cn

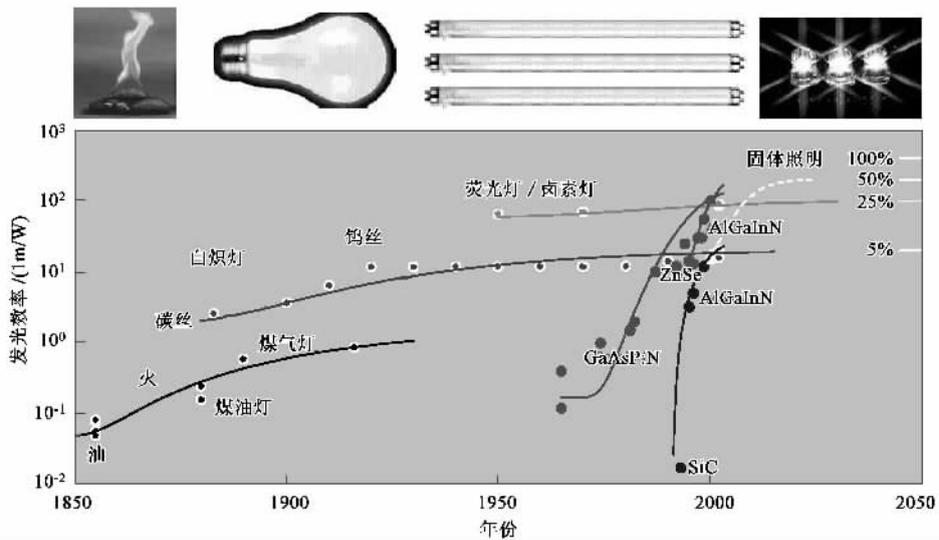


图1 200年各种照明技术的发光效率的进步的进程

石油每年产生数以亿吨的 CO_2 气体. 1936年, 荧光灯和节能灯的发明使得发光效率得到有效的提高, 半个世纪以来, 其发光效率已提高到 $80-100\text{lm/W}$. 同时, 它把人们的照明理念从亮度的需求提升到色温、显色指数的需求, 极大地提高了人们的生活品质. 但是, 它的发光效率已经基本饱和, 进一步提高的速度很慢. 而且荧光灯仍存在许多问题需要解决, 汞等有毒废弃物给环保带来了很大的压力; 同时其寿命较短, 有频闪, 有紫外和红外辐射, 其显色指数相对也较低. 这些缺点急待一个全新的照明光源加以解决. 1986年, 人们提出绿色照明的概念, 表明照明光源革命的风暴已经在开始酝酿、发展. 人的视觉系统最适应的光环境是自然光, 最理想的照明光源, 应当是在室内建立模拟自然光的光源; 电光转换效率 100% , 显色指数接近 100 , 辐射能量全在可见光区, 无红外和紫外辐射, 无频闪.

到本世纪初, 由于以氮化镓为基础的白光发光二极管(LED)的出现, 照明光源的革命才初现端倪, 固态照明光源, 即半导体照明光源, 它效率高、寿命长, 克服了传统照明光源的许多缺点, 有可能取代或部分取代当前的真空管的照明光源. 这种状况, 极其类似于信息产业在20世纪的革命, 由电子管向晶体管、集成电路的变革, 由此给人们生活带来的巨大变化, 毋庸赘述. 照明光源革命的道路如何走, 所需时间有多长, 目前断言尚早, 但是由真空管向固态照明, 向集成方式发展的趋势, 已是确定无疑的了.

1.2 固态照明的优点

白光LED照明具有三个最为重要的优点: 节

能、环保、绿色照明. 低耗电量节能: 预计白光LED照明的耗电量是同等照明亮度白炽灯的 $1/8$, 日光灯的 $1/2$. 据统计, 在1998年, 全球照明消耗2300亿美元, 在发电过程中, 产生4.1亿吨 CO_2 气体, 其中美国照明用电消耗630亿美元, 占能源的 20% , 在发电中产生1.12亿吨 CO_2 气体, 日本也有类似的统计. 环保主要是在减少日光灯的汞污染和减少 CO_2 排放量方面. 1997年第三次缔约国会议(COP3)京都协议书确定的联合国气候变化纲要公约, 要求各国承诺在2008—2012年间, 将室温气体如 CO_2 的排放量减到1990年的 95% , 美国减到1990年的 93% , 日本减到1990年的 94% , 欧盟减到1990年的 92% . 因此 CO_2 排放权将成为限制、影响各国能源分配、产业结构和经济发展的重要因素. 白光LED照明可以节能, 少建电厂, 减少 CO_2 排放量, 防止温室效应. 绿色照明的概念源于健康的原因, 白光LED没有频闪、无红外和紫外辐射、光色度纯, 这些都是白炽灯和日光灯永远也达不到的. 另外, 白光LED还具有小型化、长寿命、平面化、可设计性强等优点. 可以预言白光LED作为照明光源, 就像晶体管取代电子管一样, 大势所趋, 不可阻挡.

面对固态照明的凶猛的发展势头, 本文试图对这些大家共同关心的问题作一系统介绍, 并对其发展趋势提出了一些不成熟的看法. 之所以说是不成熟的看法, 是因为现在固态照明发展太快, 许多新的思想、新的概念不断被提出, 新的技术、新的结果不断涌现, 对上述这些问题现在还很难下结论.

2 发光二极管的发展简史

第一只 LED 是 1962 年由 Holonyak 等人利用 GaAsP 材料制得的红光 LED,其发光效率近似为 $0.1\text{lm/W}^{[2]}$. 1968 年因为其长寿命、抗电击、抗震而作为指示灯实现了商业化. 20 世纪 70 年代,随着材料生长和器件制备技术的改进,LED 的颜色从红光扩展到黄绿光. 80 年代,AlGaAs 新材料的生长技术的发展,使得高质量 AlGaAs/GaAs 量子阱应用于 LED 结构中,载流子在量子阱中的限制效应大大地提高了 LED 的发光效率,使之达到 10lm/W . 90 年代,四元系 AlGaInP/GaAs 晶格匹配材料的使用,使得 LED 的发光效率提高到几十 lm/W . 美国惠普公司利用截角倒金字塔(TIP)管芯结构得到的桔红光的效率达到 $100\text{lm/W}^{[3]}$.

相对于红绿光 LED,蓝光 LED 的发展相对较晚. 1969 年,Maruska 和 Tietjen 等人利用化学气相沉积(CVD)方法在蓝宝石衬底上制得大面积的 GaN 薄膜^[4]. 此时的 GaN 膜非故意掺杂,呈现很强的 n 型. Maruska 和 Tietjen 等人极大地推动了 GaN 的研究,1971 年,美国 RCA 实验室的 Pankove 研究发现了氮化物材料中形成高效蓝色发光中心的杂质原子,并研制出 MIS 结构的 GaN 蓝光 LED 器件^[5]. 但是限于当时的生长技术,难于长出高质量的 GaN 薄膜材料,同时 p 型掺杂也未能解决,GaN 研究陷于较长时间的停滞期. 直到 1986 年,Amano 等人应用 AlN 作为缓冲层,制备出表面平整且没有裂缝的 GaN 薄膜^[6],1988 年 p 型掺杂问题首先在 Akasaki 的研究小组取得了突破,他们用低能电子辐照(LEEBI)方法处理已经掺 Mg 的样品,得到了较好的 p 型^[7],而 Nakamura 更进一步,他把掺 Mg 的样品在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,在 N_2 或真空中退火,也得到了 p 型,当把 p 型样品在 NH_3 气氛下退火又回到了高阻^[8],并于 1994 年底研制出高亮度的蓝光 LED^[9]. 在 20 世纪 90 年代末,新的生长技术,如缓冲层技术,侧向外延技术,柔性衬底技术等^[10-12]不断在氮化物研究领域推出,蓝光 LED 的效率达到 20lm/W .

1997 年,Schlotter 等人^[13]和 Nakamura 等人^[14]先后发明了用蓝光管芯加黄光荧光粉封装成白光 LED. 2001 年 Kafmann 等人用 UV LED 激发三基色荧光粉得到白光 LED^[15]. 过去的几年中,白光 LED 引起了 LED 产业界和学术界的广泛重视. 日本日亚

公司利用蓝光 LED 激发黄粉和红粉得到白光 LED,发光效率达到 60lm/W ;美国 Cree 公司用 SiC 衬底生长的 GaN 基 LED 制备的白光 LED 发光效率达到 70lm/W (2003 年 12 月). 同时功率型白光 LED 的封装也被许多厂商所重视,尤以美国的 Lumileds 公司的进展最为迅速,他们已经使用 flip-chip 工艺研制出 4 组 $1 \times 1\text{mm}^2$ 蓝光芯片用黄光荧光粉封装的 LED 灯,1400mA 电流下的光通量达到 187lm. 许多国家都制订了基于白光 LED 照明的国家计划.

3 国内外固态照明研究发展现状

3.1 世界各国的国家照明计划

面对 LED 的迅速发展,各发达国家先后制定了基于固态照明的国家级研究项目. 如日本的《21 世纪照明技术》(The light for 21st century)研究发展计划. 图 2 所示为该计划的技术路线图,其核心在于高质量材料的生长,高功率管芯的制备以及高效率白光荧光粉的获得. 计划解决的问题包括(1)GaN 基化合物半导体发光机理研究(2)UV LEDs 的外延生长方法的改进(3)大尺寸同质衬底生长(4)开发近紫外激发的白光荧光粉,实现使用白光 LED 的照明光源. 预期目标 2010 年达到 120lm/W ,发光波长在 399nm 处发光的 LED 量子效率达 31%. 参加计划的有 13 个公司和 4 所大学. 该计划由日本“新能源和新兴工业技术开发组织”与日本“金属研究开发中心”联合执行,由日本国际贸易与工业省提供资助. 美国能源部设立了“固态照明国家研究项目”(National research program on solid state lighting),共有 13 个国家重点实验室、公司和大学参加,由国家能源部、国防先进研究计划总署和光电工业发展协会联合资助执行. 计划如表 1 所示. 欧共体设立了“彩虹”计划(Rainbow project-AllnGaIn for multi-color sources),成立了执行研究总署,委托 6 个大公司和 2 个大学执行;台湾地区也设立了“次世纪照明光源开发计划”,有 16 个生产、科研机构 and 大学参加.

3.2 国际上白光 LED 的进展

与此同时,国际上氮化物 LED 制造商和传统的照明行业纷纷加入这一领域,投入到大功率 LED 管芯和高效率的荧光粉的研制之中,制定白光 LED 的照明标准,抢占市场. 目前日本日亚公司开发出蓝光 LED + 黄光荧光粉 + 红粉制备白光 LED 的技术,其发光效率高达 60lm/W 在 20mA 电流下 蓝光(460nm)

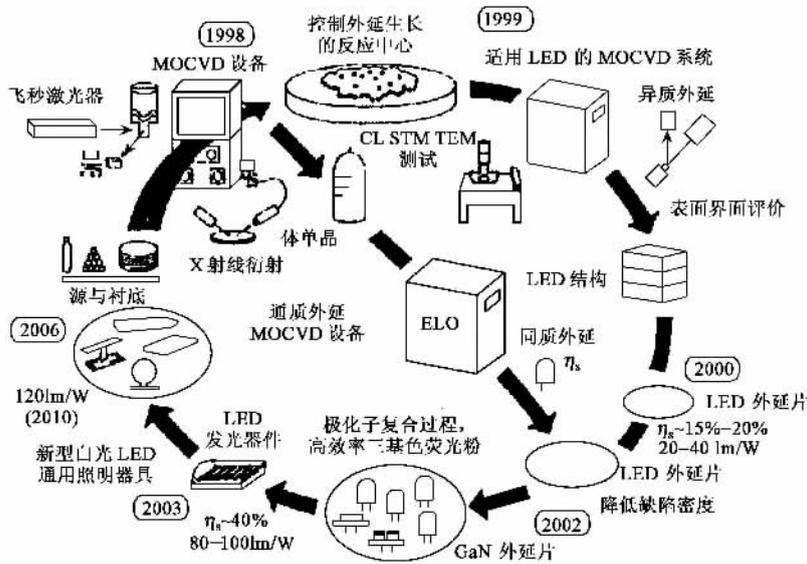


图2 日本“21世纪照明”计划技术路线图

表1 美国能源部白光照明的目标图(和表右边传统光源比较)^[16]

| LED灯性能指标 | LED2002 | LED2007 | LED2012 | LED2020 | 白炽灯 | 荧光灯 | HID灯 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|------|------|-------|
| 发光效率(lm/W) | 20 | 75 | 150 | 200 | 16 | 85 | 90 |
| 寿命(hr) | 20k | 20k | 100k | 100k | 1k | 10k | 20k |
| 光通量(lm/lamp) | 25 | 200 | 1000 | 1500 | 1200 | 3400 | 36000 |
| 电功率(W/lamp) | 1.3 | 2.7 | 6.7 | 7.5 | 75 | 40 | 400 |
| 流明成本(in \$ /lkm) | 200 | 20 | 5 | 2 | 0.4 | 1.5 | 1 |
| 灯成本(in \$ /lamp) | 5 | 4 | 5 | 3 | 0.5 | 5 | 35 |
| 显色指数(CRI) | 70 | 80 | 80 | 80 | 100 | 75 | 80 |
| 导出照明费用 | | | | | | | |
| 灯具费用 [\$ /Mlmh] | 12 | 1.25 | 0.3 | 0.13 | 1.25 | 0.18 | 0.05 |
| 电力费用 [\$ /Mlmh] | 3.5 | 0.93 | 0.47 | 0.35 | 4.38 | 0.82 | 0.78 |
| 总费用 [\$ /Mlmh] | 15.5 | 2.18 | 0.77 | 0.48 | 5.63 | 1 | 0.83 |

和紫光(400nm)的功率分别达到18.8和20mW,功率效率约为30%。Gelcore公司用紫外光LED+RGB三色荧光粉封装白光LED,发光效率达到21lm/W。德国Osram公司发明了InGaN量子阱富In区生长控制和SiC衬底腐蚀技术,使GaN基LED的发光效率和取光效率得到提高,最近他们又宣称建立了世界上首条激光剥离技术生产蓝光LED的生产线,发光效率达到75%。在大功率LED研制方面,美国HP公司采用晶片键合工艺生产的透明衬底倒梯形LED管芯,Osram公司利用芯片表面纹理结构,均把出光效率提高了数倍。美国LumiLeds照明公司最近利用插指形电极和倒装焊工艺研制出4组1×1mm²蓝光芯片用黄光荧光粉封装的LED灯,光通量在

1400mA电流下达到187lm,其白光LED发光效率研究水平达到30—40lm/W。美国Cree公司则效仿红光大功率LED的制备方法,在导热较好的导电SiC衬底上做AlGaInN LED,采用“米”字型电极,其400nm处的外量子效率高达32%,0.9mm×0.9mm管芯400mA下405nm发光波长的发光强度高达250mW。

3.3 我国的“国家半导体照明工程”

2003年6月,我国正式设立了“国家半导体照明工程项目”的国家级计划。该计划由科技部牵头,国家发展和改革委员会、信息产业部等参与,对氮化镓基蓝、绿光LED的研究和产业化,都给予了大力支持,并取得了重大进展。如专门从事氮化镓基蓝、

绿光 LED 生产的上海北大蓝光科技有限公司、上海蓝宝石电子有限公司、深圳方大电子有限公司、厦门三安、大连路美等都得到了国家科技部和国家计委的支持,产品相继上市,并正在增资扩股,扩大生产规模.这些进展,为我国白光 LED 照明光源的研究和产业化奠定了基础.

4 基于固体照明光源的主要技术及其特点

4.1 几种白光 LED 的制备方法

固态照明,可能的制备方法很多.原则上说,能够发光的固体材料都可能形成固态照明,如无机半导体材料、有机半导体材料、稀土荧光粉材料、场发射材料等;发光方式可以有电注入发光、场发射发光、荧光发光、光致发光等等.就目前来说,最有希望的方式是无机半导体 LED 发光作为照明光源,其研究和进展最为迅速,应用最为广泛,是世界各国关注的焦点.目前制备白光 LED 的方法主要可以分为三种:红、绿、蓝(RGB)多芯片组合白光技术,单芯片加荧光粉合成白光技术,以及 MOCVD 直接生长多有源区的白光 LED 技术. RGB 多管芯技术是分别利用 RGB 单色管芯组合而成白光 LED,其优点是显色率高、寿命长,由于不需要荧光粉进行波长转换,发光效率高.但其缺点也较多:由于分别受单个芯片的性能影响,其色稳定性较差,由于有电流配置的问题,常常需要 IC 芯片控制,加上其光学方面的设计,其封装难度较大,且成本很高,目前一个单元需要 2—3 元,是普通白光 LED 的数倍. MOCVD 直接生长多有源区的白光 LED 是利用不同有源区发出不同颜色光混合成白光,目前处于探索、研究阶段.单芯片加荧光粉的技术是目前白光 LED 的主流技术,它又分为蓝光芯片加黄光 YAG 荧光粉技术和近紫外光芯片加 RGB 三基色荧光粉技术.单管芯技术成本也较低,其色稳定性较好,工艺重复性好.其中近

紫外光芯片加 RGB 三基色荧光粉技术克服了 Halo 效应(有方向性的 LED 出光和荧光粉的散射光角分布不一样)以及显色率低的单芯片封装的缺点,是最有希望获得照明效果的 LED 光源.表 2 是几条技术路线的白光 LED 性能比较.

4.2 提高 LED 发光效率的方法

目前的外延技术可以使得 InGaN 有源层常温,普通注入电流条件下的内量子效率达到 90%—95%^[17].当温度升高时,内量子效率会有比较大的下降.因此要提高发光效率必须控制结温和提高出光效率.基于这点,目前发展了许多技术.

(1)衬底剥离技术(lift-off)这项技术首先由美国惠普公司在 AlGaInP/GaAs LED 上实现,因为 GaAs 衬底的吸收,使得 LED 内部光损失非常大.通过剥离 GaAs 衬底,然后粘接在 GaP 衬底上,可以提高近 2 倍的发光效率.而 GaN 基 LED 的衬底一般为蓝宝石.蓝宝石为绝缘体,散热性能较差.因此 LED 的电极都在上表面,又因为 p 型欧姆接触电极制备的困难,p 型透明电极制备成了必须的同时又比较困难的工艺,必须同时保证低接触电阻和高透射率.这些没有透射的光被吸收在 LED 内产生热,这样对 LED 的光学效率和内量子效率两个方面的提高都造成了难以克服的困难. InGaN - LED/蓝宝石衬底激光剥离技术(LLO)是 20 世纪末提出来的,利用紫外激光照射衬底,熔化缓冲层而实现衬底的剥离^[18].2002 年 12 月,日亚正式把它用于 UV LED 的工艺上,使得其发光效率得到了很大的提高^[19].2003 年 2 月,德国 OSRAM 公司用 LLO 工艺将蓝宝石去除,将 LED 出光效率提至 75%,是传统 LED 的 3 倍,目前他们已建立了第一条 LLO 生产线.

(2)Flip-Chip 技术,解决电极挡光和蓝宝石不良散热的另一个技术方案是把芯片倒封装,从蓝宝石衬底面出光.在 p 电极上做上厚层的银反射器,然后通过电极凸点与 Submount 上的凸点键合. Submount

表 2 三条主要的白光 LED 制备路线比较

| | 紫外 LED + RGB 荧光粉 | 蓝光 LED + 黄光荧光粉 | 二元互补色 LED 组合 | RGB 多芯片组合 | 白光 LED CHIP |
|--------|------------------|----------------|--------------|-----------|-------------|
| 显色率 | 最好 | 一般 | 一般 | 好 | 一般 |
| 色稳定性 | 最好 | 好 | 一般 | 一般 | 好 |
| Lm 保持率 | 未有数据 | 一般 | 好 | 好 | 好 |
| 荧光材料 | 在研究中 | 较成熟 | — | — | — |
| 效率 | 最好 | 好 | 一般 | 一般 | 好 |
| 应用 | 白光灯 | 背光源 | 特殊照明 | 显示 | 背光源 |

用散热良好的 Si 材料制得,并在上面做好防静电电路.根据美国 Lumileds 公司的结果,flip-chip 约增加出光效率 1.6 倍^[20].

(3) 由于 GaN 折射率(2.3)与空气折射率(1)相差较大,因此全反射实际出光率不足 10%.通过把 p-GaN 表面粗化,可以提高出光效率,但直接粗化容易对有源层造成损伤,同时透明电极更难制备.目前通过改变外延片生长条件得到表面粗化是一个较为可行的工艺.考虑光的波动特性,制备基于二元光学和光子晶体的微结构也是提高出光效率的一个途径.2003 年 9 月日本松下电器制备出光子晶体的 LED.其直径 $1.5\mu\text{m}$,高 $0.5\mu\text{m}$ 的凹凸可以增加 60% 的出光. HP 公司所开发的 TIP 技术目前被美国 Cree 公司用于 GaN 的 LED,Cree 公司的衬底是 SiC,容易加工成斜面,其 400nm 处外量子效率高达 32%.日亚公司利用图形衬底的技术(lateral epitaxy on patterned substrate,LEPS),用六角衬底图形改变 GaN 与蓝宝石之间的全反射,同时利用网状的 p 型电极,外量子效率达到 35%^[21].

4.3 提高 LED 的发光功率的技术

对于照明的 LED 发光单元,需要 1500lm 的光通量,发光效率为 200lm/W.这需要传统的 $\phi 3$, $\phi 5$ 封装的 LED1000 只以上,这在光源和灯具制作方面的成本都相当高,因此它不能满足照明的需要.目前白光 LED 主要应用于手机的背光源和汽车仪表照明,以及亮度要求不高的特殊照明和景观照明上^[22-24].如果不研发出高效大功率白光 LED,将使得狭窄的白光 LED 应用市场竞争更加激烈^[24].目前大功率的 LED 制备的路线大致有三条:一是大尺寸芯片封装,二是高注入电流密度的封装,三是普通尺寸芯片高密度的封装.

在过去的几年中,一个趋势是用 $1 \times 1\text{mm}^2$ 的大尺寸芯片取代现有的 $0.3 \times 0.3\text{mm}^2$ 的小芯片封装.目前的 4 个 $1 \times 1\text{mm}^2$ 芯片的单元已经能够得到 187lm 的光通量[如图 3(a)为 Lumileds 的 LuxeonTM 系列 1W 大功率 LED].在目前的发光效率较低的情况下,大尺寸芯片是一个暂时的趋势,根据 Tsao 的报道^[1] 2020 年的 LED 的性能应当达到 1.5klm/chip,相当于 100W 白炽灯.发光效率达到 200lm/W,所需电功率为 7.5W,成本为 0.75\$/chip(见表 1).要实现这一目标,有两种方法可供选择:一是类似于成本较低的红光 LED,采用大尺寸芯片,低电流密度的方式,其芯片成本为 30\$/ cm^2 ;二是类似于成本较高的 AlGaInAs/GaAs LD,采用小芯片、高注入电流

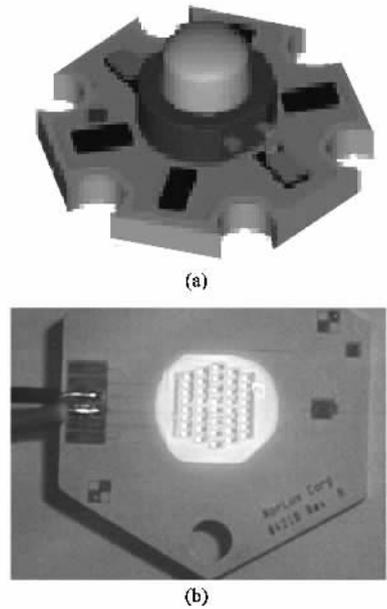


图 3 (a) Lumileds 公司的 LuxeonTM 系列 1W 大芯片 LED (2001) (b) UOE 公司的 Norlux 系列多芯片 LED 封装

密度的方式,其芯片成本为 300\$/ cm^2 .按这样的成本计算,对于芯片成本为 0.75\$ 的目标,对于方法一,可用芯片尺寸为 2.5mm^2 ,其功率密度为 $300\text{W}/\text{cm}^2$;而对方法二,可用芯片尺寸仅为 0.25mm^2 ,其功率密度则必须达到 $3000\text{W}/\text{cm}^2$.就目前 LD 的制作水平来说,其功率密度达到 $3000\text{W}/\text{cm}^2$ 不是很高,是可以达到的.另外,对小面积的 LED,其工作温度约为 425K,而大面积 LED 则为 375K,要保持稳定的较高内量子效率,其位错密度应当低于 10^7cm^{-2} ,这对目前的外延片生长技术也不是很难的问题.以上讨论都是基于 LED 发光效率为 200lm/W 为前提的,而目前的发光效率不超过 60lm/W.如果提高发光效率,则小尺寸芯片的成本压力就不会大,相比较而言,大尺寸芯片的成本压力反而大.因此大功率 LED 的路线是大尺寸还是高注入密度取决于以下两个方面哪个占优势(1)辐射复合的效率的提高(2)取光效率的提高.如果是前者,则对高注入密度小尺寸芯片有利,后者则对大尺寸芯片有利.

目前大尺寸芯片封装还存在发光的均匀性^[25,26]和散热^[27]等问题,亟待解决.与此同时,普通芯片的高密度封装也是制备大功率 LED 的一个方向.如图 3(b),UOE 公司的 Norlux 系列封装结构采用六角形铝衬底的直径为 1.25 英寸,位于其中央部位发光区直径约为 0.375 英寸,可容纳 40 个 LED

芯片. 根据所需输出光功率的大小来确定衬底上排列管芯的数目, 这种采用常规芯片进行高密度组合封装的功率型 LED 可以获得较高发光通量, 是一种切实可行很有推广前景的功率型 LED 固体光源. 平面模块化封装是其另一个方向, 这种封装的好处是由模块组成光源, 其形状、大小具有很大的灵活性, 非常适合于室内光源设计, 其热沉也是与上述结构类似的 Al 板. 对于倒封装的小尺寸芯片阵列结合的大功率 LED 也在研制之中, 芯片之间的级联和通断保护是一个难点. 采用 110/220V 电压驱动的功率达到 5W 的大功率 LED 也有报道, 其技术尚为公开^[28].

对于散热封装除了使用热沉之外, 还有封装材料的选择问题. 目前由于传统的环氧树脂热阻高, 抗紫外老化性能差, Stanley 公司正积极研究抗紫外的散热封装, 日亚则不使用环氧树脂等有机材料, 而改用充满 N_2 的金属封装, 除了减少树脂所产生的吸收外, 还把热阻降低至原来的 1/10.

5 我们的工作

5.1 LED 大管芯的新型结构研究

众所周知, 由于缺少 GaN 衬底, 通常 GaN 基材料和器件的外延膜主要是生长在蓝宝石衬底上. 蓝宝石衬底有很多优点: 生产技术成熟、晶体质量较好, 同时蓝宝石热稳定性很好, 能运用在高温生长过程中, 蓝宝石化学稳定性好, 机械强度高, 易于处理和清洗. 蓝宝石的这些优点在 GaN 基外延膜的生长过程中很重要, 但是它也存在很多问题. 目前, 蓝宝石衬底的 LED 结构通常用图 4 表示, 其主要问题有以下几点:

由于 GaN 和蓝宝石之间有较大的晶格失配和热应力失配, 通常采用两步生长法, GaN 和 AlN 过度层的方法都是日本专利. 并且由此造成 10^9cm^{-2} 的失配位错, 严重降低了晶体质量, 影响着 LED 的发光效率.

蓝宝石是绝缘体, 常温下电阻率大于 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, 这样就无法制作垂直结构的器件, 通常只能在外延层上表面制作 n 型和 p 型电极. 因此使有效发光面积减小, 增加了器件制备中的光刻和刻蚀工艺过程, 使材料的利用率降低, 成本增加.

由于 p 型 GaN 掺杂的困难, 当前普遍采用在 p 型 GaN 上制备金属透明电极的方法, 使电流扩散, 以达到均匀发光的目的. 这也是日本日亚化学工业

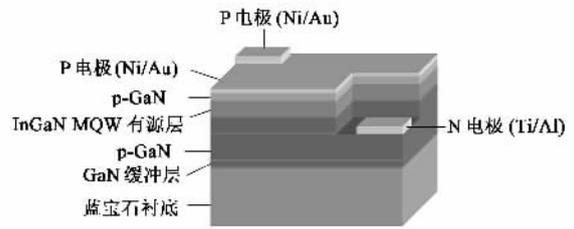


图 4 常规 GaN 基 LED 的结构

公司的最为重要的基本专利之一. 同时, 金属透明电极一般要由于吸收而损耗 30%—40% 的光, 而且增加了制备工艺过程, 增加了生产成本, 降低了成品率.

GaN 基材料的化学性能稳定, 机械强度较高, 不容易刻蚀. 通常必须采用干法刻蚀设备, 如: 反应离子刻蚀 (RIE) 设备、诱导耦合等离子刻蚀 (ICP) 设备等, 这些设备一般在 30 到 40 万美元之间.

蓝宝石硬度太高, 在自然界材料中仅次于金刚石, 所以在器件制作过程中切割困难. 通常是对蓝宝石减薄, 从 400 多 μm 磨薄到 $100\mu\text{m}$ 左右, 然后才能切割. 这样需要增加减薄、抛光设备和工艺, 划片、裂片设备和工艺. 这两项约占芯片制备设备和成本的一半.

蓝宝石的导热性能不好, 在 100°C 约为 $0.25(\text{W}/\text{cm}) \cdot \text{K}$, 而在 GaN 基发光器件运用中, 都有很强的热能散发, 这对于器件的性能影响很大. 特别是在大面积大功率器件中, 散热问题非常突出. Lumileds 公司的实验表明, 传统的 AlInGaIn LED (0.07mm^2) 在 200mA 时即不能工作, 在 150mA 电流下, 工作几个小时后性能就显著下降, 其 5mm 封装管的热阻为 $140^\circ\text{C}/\text{W}$.

在 InGaIn LD 的制作中, 由于蓝宝石硬度很高, 并且蓝宝石晶格与 GaN 晶格之间存在一个 30° 的夹角, 所以难于获得 InGaIn LD 外延层的解理面, 也就不能通过解理的方法得到 InGaIn LD 的腔面. 使用 RIE、ICP 制作解理面时又很容易引起晶格损伤.

为了克服以上困难, 很多人试图将 GaN 基光电器件直接生长在 Si 衬底上以改善电导和热导性能, 但是主要由于晶体质量的原因, 这些器件的性能目前还无法和生长在蓝宝石衬底上的相比. 所以, 如果能将蓝宝石衬底和 GaN 基外延层分离, 将能很好地解决这些问题. 通过和高导热、高导电的材料结合, 会极大地改善器件的导热、导电性能. 并且蓝宝石衬底被剥离之后, 可以制作上下电极结构的器件, 如图 5

表3 现有 GaN 基 LED 制备与激光剥离技术制备技术过程的比较

| | 激光剥离 | 台面光刻 | 台面刻蚀 | N 电极光刻 | N 电极镀膜 | N 电极合金 | 透明电极光刻 | 透明电极镀膜 | 透明电极合金 |
|------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 现有技术 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 剥离技术 | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| 所需设备 | 激光器 | 光刻机 | RIE/ICP | 光刻机 | 蒸发台 | 合金炉 | 光刻机 | 蒸发台 | 合金炉 |
| | P 电极光刻 | P 电极镀膜 | P 电极合金 | 衬底减薄 | 衬底抛光 | 划片 | 裂片 | 切割 | 测试分类 |
| 现有技术 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| 剥离技术 | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ |
| 所需设备 | 光刻机 | 蒸发台 | 合金炉 | 减薄机 | 抛光机 | 划片机 | 裂片机 | 切割机 | 测试分类机 |

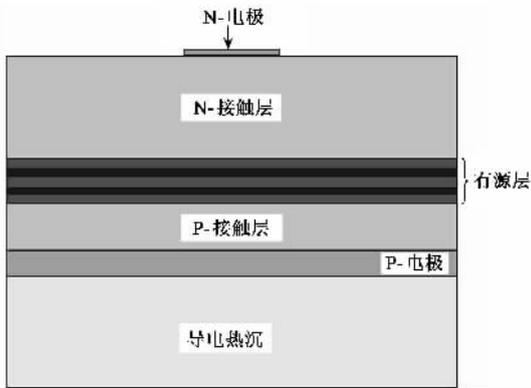


图5 上下电极 LED 结构

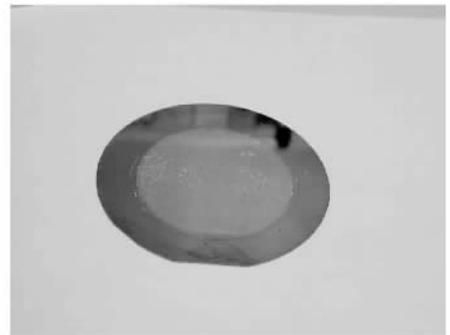


图6 激光剥离移置到 3 英寸硅片上的 2 英寸 LED 结构

所示. 可以提高材料的利用率, 改善电学性能, 减少工艺复杂性. 同时该方法还能很好地解决器件切割和 InGaN LD 的解理等问题.

两种不同的工艺路线对比, 如表 3 所示. 相对现有技术, 采用激光剥离技术, 制备 GaN 基的 LED, 要增加两道新的工艺过程, 但是可以减少 10 道原有的工艺过程, 相当于减少 8 道工艺过程. 减少工艺过程, 相当于减少材料消耗, 提高成品率, 减少工时, 节省人员, 降低成本. 另外, 由于蓝宝石衬底片可以重复使用, 也降低了外延片的成本. 综合评价, 大约可以降低成本 50%. 设备上, 要增加一套激光剥离系统, 一个普通切割机, 可以减少减薄机、抛光机、划片机、裂片机、反应离子刻蚀机. 设备成本也有极大的降低. 与用现有技术方法制备的 LED 器件性能相比较, 还有以下几个方面的优点 (1) 可以提高出光效率 (2) 散热性能提高, 适用于大功率器件 (3) 消除了失配压力, 光谱变窄 (4) 导电衬底有利于消除静电损伤 (5) 有利于封装.

目前我们已经整片剥离, 得到完整无损的 2 英寸外延片, 如图 6 所示. 图 7 是上下电极的 LED 的电致发光照片.

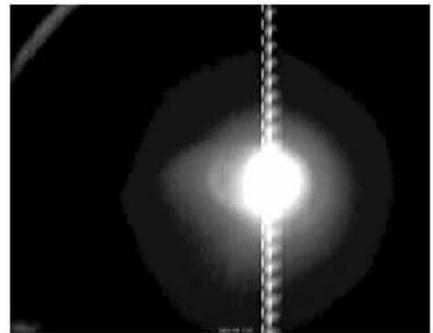


图7 上下电极 LED 电致发光照片

5.2 GaN 基材料的侧向外延生长

进行了以 SiO₂ 为生长掩膜的侧向外延生长研究, 生长出多种占空比和不同生长条件的高质量 GaN 外延片; 图 8 是侧向外延生长的 GaN 外延片剖面的 SEM 照片. 图 9 为经过腐蚀后的侧向外延生长的 GaN 外延片表面 SEM 照片, 掩膜/窗口尺寸为 10μm/5μm, 掩膜区的腐蚀坑密度大幅度降低, 表明侧向外延生长成功地降低了掩膜区的缺陷密度.

5.3 高效荧光粉的研制

5.3.1 二组分的三基色荧光粉

该二组分白光荧光粉是由不同发射波长和不同

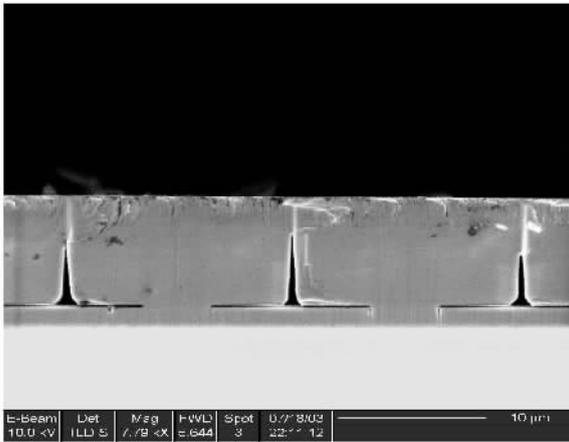


图8 侧向外延生长的 GaN 外延层 SEM 照片

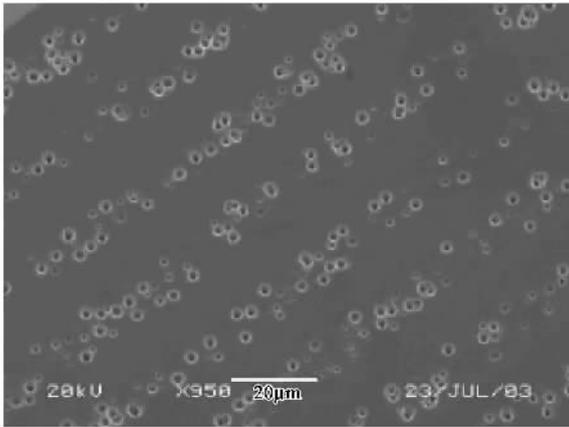


图9 侧向外延生长的 GaN 外延片腐蚀坑 SEM 照片

吸收波长的两种荧光粉组成,即蓝绿粉(主要发射峰在蓝光区和绿光区)和红粉(主要发射峰在红光区)组成。蓝绿粉为二价铕和二价锰共激活的铝酸钡镁(BAM),主要成分的化学式为 $Ba_{1-x}Mg_{1-y}Al_{10}O_{17}:xEu^{2+},yMn^{2+}$,其中 $x = 0.01-0.20$, $y = 0.01-0.25$,改变其中的铕和锰的比例,蓝绿粉的蓝色和绿色发光峰的强度比例变化,因此得到具有不同色坐标的蓝绿粉。把制得的蓝绿粉、红粉 $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ 以一定的重量比混合得到白光荧光粉。

5.3.2 三组分的三基色荧光粉

紫光激发的三种不同荧光粉组成的白光荧光粉,包括主要发射峰在绿光区的绿粉、主要发射峰在蓝光区的蓝粉和主要发射峰在红光区的红粉。绿粉为二价铕激活的氯硅酸钙镁,主要成分的化学式为 $Ca_{8-x}Mg(SiO_4)_4Cl_2:xEu^{2+}$, $x = 0.01-3.00$;红粉为三价铕激活的硫氧化钇,主要成分的化学式为 $Y_{2-x}O_2S:xEu^{3+}$, $x = 0.06-0.40$;蓝粉为二价铕激

活的氯磷酸锶/钙,主要成分的化学式为 $(Sr/Ca)_{10-x}(PO_4)_6Cl_2:xEu^{2+}$,其中 $x = 0.01-0.08$ 。红、绿、蓝三种荧光粉的重量比为 $(5.0-25.0):(1.0-2.0):(0.5-1.0)$ 。

5.4 白光 LED 的封装研究

目前采用蓝光芯片加黄色的荧光粉的封装白光 LED 已形成成熟工艺,年生产能力达到 10kk 的规模。能够封装出紫光 LED 芯片加 RGB 三基色荧光粉的白光 LED。对荧光粉在溶剂里的分散剂进行了试验,使得荧光粉在溶剂中均匀混合,在芯片上涂层均匀。在树脂中添加散射剂,增加白光 LED 的柔和度。

大功率 LED 的封装。用食人鱼的支架封装出大功率的 LED,工作电流达到 200mA,发光功率达到 14mW(如图 10)。单管芯的白光 LED 封装,将正面出光的 LED 芯片直接焊接在热沉上,或者将背面出光的 LED 芯片先倒装在具有焊料凸点的硅载体上,然后再将其焊接在在热沉上。寻找热阻低的、抗热老化和紫外线的柔性的封装胶体,不会因温度骤变产生的内应力使金丝和框架引线断开。综合设计反射杯和透镜的光学结构,增加发光效率和发射功率。图 11 是蓝光 LED 芯片加黄光荧光粉封装的白光 LED 电致发光谱随注入电流变化的关系,在 5—60mA 时,色温从 8000K 变为 8900K,表明荧光粉与封装胶体的热稳定性都比较好。

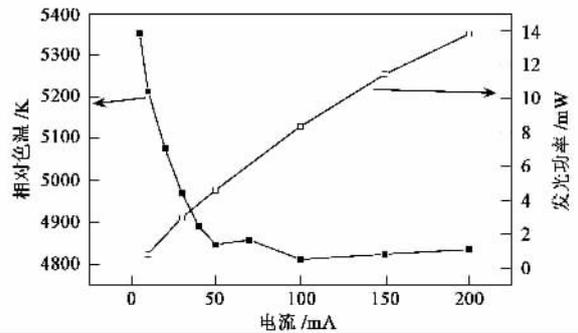


图 10 大功率白光 LED 色温和光功率随着电流变化关系

多管芯的 LED 的封装是为了增强照明亮度和制做出多彩的照明器具。目前采用铝板作为热沉,并使它不导电,制备出了大功率的 LED 灯。目前已经做出了 LED 封装支架的原型,在完成散热、出光效率等实验后,开始出模和标准化工艺。采用常规芯片进行高密度组合封装的功率型 LED,获得较高发光通量。

