

半导体照明光源的技术进展

方志烈¹ 刘木清²

(¹ 复旦大学分析测试中心, 上海 200433; ² 复旦大学光源与照明工程系, 上海 200433)

摘要 半导体照明光源——发光二极管(LED)是近年来快速发展的光源,是光源领域的研究热点。回顾了LED的发展历史,理论分析了LED的光效,通过与其他类型光源的价格等的比较,展示了LED在光源领域未来的重要地位和光明前景。综述了LED技术的发展现状,包括LED外延技术、芯片技术、金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备、封装技术等进展,并叙述了提高LED内量子效率及光效的主要研究方向。指出,随着LED光效等的进一步提高,LED将成为照明光源的主角。

关键词 发光二极管(LED); 半导体照明光源; 半导体照明技术; 发光效率

中图分类号 TM923

OCIS 250.0250 350.0350

文献标识码 A

Technology Status of Light Emitting Diodes

Fang Zhilie¹ Liu Muqing²

(¹ *Research Center for Analysis and Measurement, Fudan University, Shanghai 200433, China*
² *Department of Illuminating Engineering and Light Sources, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Abstract LED is developing rapidly as one kind of light sources. The history of LED is reviewed, and LED's efficacy is analyzed theoretically. LED's efficacy and cost for application are compared with conventional light sources. An overview of technology status of LED's materials, chip, packaging and metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) is presented. The possible ways to increase LED's internal quantum efficiency and thus efficacy are also discussed. As a result, it is predicted that LED will dominate in light sources after LED's efficacy increases significantly.

Key words light emitting diode; semiconductor lighting light sources; semiconductor lighting technology; luminous efficacy

1 发光二极管起源及发展

1962年,美国通用电气公司的N. Jr. Holonyak等^[1]用气相外延方法研制出红色的磷砷化镓发光二极管(LED)。效率仅为0.1 lm/W,大约只有白炽灯的1/150。1963年2月,他发表了一个明确的观点——“我们坚信LED会发展成实用的白色光源”,并明确预言“将来的灯可以是铅笔尖大小的一块合金,它实用且不易破碎,决不会烧毁,比起今日的灯泡来说,其转换效率至少高10倍”^[2]。Monsanto和HP公司在其基础上改进性能并降低成本,于1968年批量生产这种GaAs_{0.60}P_{0.40}/GaAs为材料的红色LED,在大约10年的时间内,一直是市场上的主导产品。N. Jr. Holonyak后来在Illinois大学继续从事半导体光电子材料和器件的研究,曾多次获得诺贝尔奖提名。1995年日本授予他声望很高的日本奖,以表彰他早期在LED方面和其后在半导体激光器方面首创性工作的成就。1997年美国光学学会设立Holonyak奖,每年奖励一名半导体发光领域的优秀科学家。1998年首次获得Holonyak奖的是先后在Monsanto公司和HP公司从事LED新材料和新器件研究,并取得多项重要成果的M. G. Craford。

在1968年后的30余年中,建立在晶体学、半导体物理学、材料化学等学科基础上的LED技术有了长足的

收稿日期: 2009-08-14; **收到修改稿日期:** 2009-09-01

作者简介: 方志烈(1938—),男,教授,主要从事化合物半导体材料、器件及其应用等方面的研究。

E-mail: zlfang220@yahoo.com.cn

进步。先后研制成功液相外延 GaP:ZnO 红色 LED 和 GaP:N 绿色 LED,在 20 世纪 70 年代中期进入市场。20 世纪 80 年代初,由日本西泽润一教授研制成的液相外延 AlGaAs/GaAs, AlGaAs/AlGaAs 双异质结结构和透明衬底技术,使单个 $\phi 5$ mm 器件发光强度超过 $1 \text{ cd}^{[3]}$ 。20 世纪 90 年代初由 M. G. Craford 等研制的氢化物气相外延,以磷化镓为衬底(即透明衬底技术),掺有等电子陷阱发光中心 N 的 $\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}:\text{N}/\text{GaP}$ 橙红色 LED 和 $\text{GaAs}_{0.15}\text{P}_{0.85}:\text{N}/\text{GaP}$ 黄色 LED 面世,不久也成为重要商品。连续不断的科研成果使 LED 发光效率提高的速度大约达到每 10 年提高 10 倍,30 年竟提高了 1000 多倍,导致在 2000 年 LED 比传统光源白炽灯甚至卤素灯具有更高的效率^[4]。LED 性能进展如图 1 所示,首先由 M. G. Craford 提出,所以又称 Craford 定律。

表 1 各种材料 LED 的性能水平

Table 1 Performance of LED by materials

Material	Substrate	Peak value /nm	Color	Structure	External quantum efficiency /%	Luminous efficiency / (lm/W)
$\text{GaAs}_{0.60}\text{P}_{0.40}$	GaAs	650	Red	HJ	0.2	0.15
$\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}:\text{N}$	GaP	630	Red	HJ	0.7	1.00
$\text{GaAs}_{0.15}\text{P}_{0.85}:\text{N}$	GaP	585	Yellow	HJ	0.2	1.00
GaP	GaP	555	Green	HJ	0.1	0.6
GaP:N	GaP	565	Yellowish-Green	HJ	0.4	2.5
GaP:ZnO	GaP	700	Deep red	HJ	2	0.4
AlGaAs	GaAs	650	Red	SH	4	2
	GaAs	650	Red	DH	8	4
	AlGaAs	650	Red	DH-TS	16	8
AlGaInP	GaP	636	Red	DH-TS	24	35.5
	GaP	632	Red	MOW-TS	32	73.7
	GaAs	620	Orange red	DH	6	20
	GaAs	614	Orange red	BP		108,145
	GaP	610	Orange	TIP-MOW-TS	~30	102(100 mA)
	GaP	607	Orange	DH-TS		50.3
	GaP	598	Orange	TIP-MOW-TS	~35	68(100 mA)
	GaP	590	Amber	DH-TS	10	40
	GaAs	585	Yellow	DH	5	20
	GaP	570	Yellowish-green	DH-TS	21	4
InGaN		570	Green	DH-TS	2	14
	Sapphire crystal	520	Green	SQW-TS	11.6	46
	Sapphire crystal	525	Green		28.6	109
	Sapphire crystal	460	Blue white		34.9	
	Sapphire crystal		white	YAG-phosphor		249
	SiC	460	white	Phosphor	Powe LED	161(350 mA)
	Sapphire crystal	499	blue		37.3	

1990 年左右,日本赤崎勇教授经用电子束轰击制成了 GaN P 型材料,并制得了 PN 结蓝光 GaN LED。1993 年日本日亚公司的中村修二等采用双气流金属有机物化学气相沉积技术,并解决了 P 型 GaN 的氮气氮下退火工艺后,研制成功了以蓝宝石为衬底的高亮度蓝色 LED^[5],不久又推出了量子阱结构的蓝色和绿色 LED,蓝色芯片上涂敷钇铝石榴石(YAG)为主的荧光粉的白色 LED,它是由蓝光激发荧光粉产生黄绿光并与蓝光合成的白光,由于荧光光谱较宽,几乎覆盖了整个可见光范围,发光效率可达 25 lm/W ,最近已达

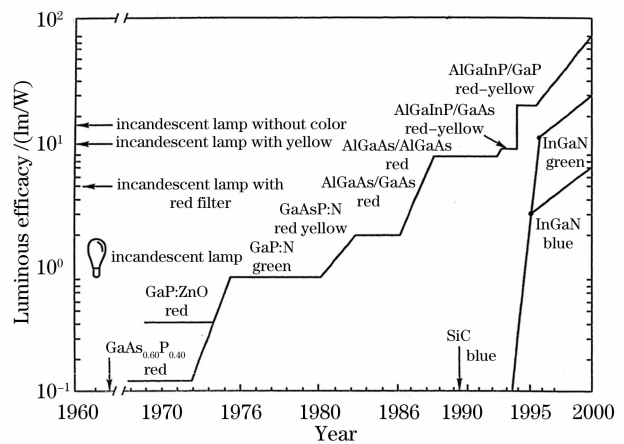


图 1 可见光 LED 的发光效率随时间的进展

Fig. 1 Progress of luminous efficacy of LED

249 lm/W^[6]。美国 Cree 公司采用 SiC 作衬底制作 InGaN 蓝光器件,具有较高的热导率[283 W/(m·k)],较小的晶格失配(3.4%)、较小的热膨胀系数失配(25%) (用蓝宝石衬底分别为 40%, 13.8% 和 -34%),其功率为 1 W 的 LED 器件,2008 年 12 月发光效率已达 161 lm/W^[7]。当前,LED 的性能水平如表 1 所示^[3](个别数据根据研究进展做了调整)。R. Haitz 在总结过去 30 多年来单个 LED 封装器件输出光通量的进展得出了 Haitz 定律:单个 LED 光通量每 18~24 个月翻一番,如图 2 所示。2000 年后,翻倍时间有缩短趋势。

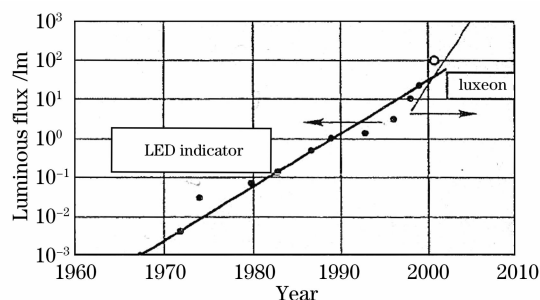


图 2 单个 LED 光通量 18~24 个月翻倍
Fig. 2 Luminous flux per lamp doubles every 18~24 months

2 半导体照明光源的兴起和技术、经济指标

20 世纪 90 年代末,照明界深感有必要开发新世纪照明光源,主要目标是:1)研究高效节能的新颖光源;2)研究照明工业新概念、新材料,防止使用有害于环境的材料;3)设计模拟自然光的理想白色光源,显色指数接近 100。美国 HP 公司的 R. Haitz 等^[8]于 1999 年提出半导体已在电子学方面完成了一次革命,第二次革命将在照明领域发生。他们预计,到 2020 年左右,半导体照明光源的发光效率将达到 200 lm/W,超过所有现有电光源,且能符合 21 世纪新光源的全部目标。实现这一目标的实际意义是可以减少用于照明的全球用电量的 50%,即减少全球总电能消耗的 10%,全球节电每年达 1000 亿美元,相应的照明灯具节省 1000 亿美元(其中相应的光源节省 200 亿美元),还可免去超过 125 GW 的发电容量,节省开支 500 亿美元,合计节省开支 2500 亿美元,并可减少二氧化碳、二氧化硫等污染废气 3.5 万吨。

国际范围内掀起了竞相成立 LED 照明公司的热潮,三大照明公司都与半导体发光器件行业中的佼佼者成立合资的半导体照明公司。美国、日本、韩国等国分别出台研发计划,投巨资启动 21 世纪新光源的研发工作。我国也于 2003 年 6 月 19 日成立了跨部门、跨行业、跨地区的“国家半导体照明工程”协调领导小组,由科技部拨专款作为引导经费,大力推进半导体照明事业的发展,并给予政策支持,建立 7 个国家半导体照明产业化基地,加快建立产业标准,形成自主知识产权,在全球范围内整合资源,加快打造产业链。经过几年努力,到 2008 年我国半导体照明产业产值已达 700 亿元,芯片国产化率接近 50%,企业总数已突破 3000 家。我国已成为 LED 全彩屏、太阳能 LED 灯、景观照明等应用产品世界最大的生产和出口国,以及国际重要的 LED 器件封装基地,形成了比较完整的研发与产业体系,进入了自主创新,实现跨越式发展的重大历史机遇期,预计 2010 年产业规模将达到 1000 亿元^[9]。

表 2 各种光源的技术和经济指标

Table 2 Technical and economic indices of light sources

Light source	Luminous efficacy /(lm/W)	Color rendering /Ra	Color temperature /K	Average life /h	Cost of 1 (Mlm·h)/dollar
Incandescent lamp	15	100	2800	1000	7.4
Halogen lamp	25	100	3000	2000	12
Fluorescent lamp	70	70	all serious	10000	1.3
Tiricolor fluorescent lamp	93	80~92	all serious	12000	1.6
Compact fluorescent lamp	60	80	all serious	8000	3.9
Metal halide lamp	75~95	65~92	3000~5600	6000~20000	2.0
High-pressure sodium lamp	80~120	23/60/85	1950/2200/2500	20000	1.3
Low-pressure sodium lamp	200	-44	1750	28000	1.6
High-frequency electrodeless lamp	50~70	85	3000~4000	40000~80000	2.0
LED(2008)	100~161	75~90	2000~7000	50000	2.44
LED(2020)	200	80~100	2000~7000	100000	0.48

表 2 总结了各种照明光源的重要数据。除了技术性能指标外,从经济的角度看,不同光源产生的光的价格也是一个很有意义的问题^[10]。光的价格可以由灯的价格和消耗电的价格除以整个寿命中所产生的流明数来粗略估计。1 Mlm·h 的价格约为

$$C_{1 \text{ Mlm}\cdot\text{h}} = 10^6 \frac{C'_L}{P_L \tau_L \eta'_L} + 10^3 \frac{C_{1 \text{ kW}\cdot\text{h}}}{\eta'_L}, \quad (1)$$

式中 C'_L 为考虑外电路价格(如果新考虑的灯需要外电路)修正的灯价格; $C_{1 \text{ kW}\cdot\text{h}}$ 为每千瓦时的电价; η'_L 为考虑镇流器损耗后的发光效率; P_L 和 τ_L 分别为灯的额定功率和寿命。右边的第一项考虑灯的价格,第二项表示 1 Mlm·h 耗电的价格。应该说明的是,在(1)式中没有考虑维护和含汞废灯的费用,及与光源匹配的镇流器(驱动器)的寿命比 LED 本身短,因而在 LED 寿命期间可能要更换驱动器。外部镇流器价格引起的修正占总价格的 25%,启辉器的价格忽略。外镇流器的损耗大约是灯额定功率的 20%。电价以 0.10 dollar/(klm·h) 计算,灯和镇流器价格用出厂价。

表 2 的数据表明,价格最低的光是钠灯产生的质量最差的光。对于有高显色性的通用照明光源,荧光灯可称是价廉物美的。紧凑型荧光灯的价格是白炽灯光的 1/3~1/2。值得一提的是,表 2 的价格与市场表现有一定的差异,如白炽灯是最贵的,但它仍被广泛应用,因为其发射的光有家居照明偏爱的高显色性。

半导体光源本质上是辐射窄光谱的,接近单色光。单色光作为信号、显示等是很好的,但作为普通照明是不合适的。因此,必须结合其他技术实现白光。现有的 LED 产生白光的方法主要有 3 种:1)由红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)3 种单色 LED 组成白光,记作 RGB-LED;2)由蓝光 LED 加黄光荧光粉产生,记作 PC-LED;3)紫外 LED 辐射 R,G,B 或其他荧光粉复合产生。目前第 2)种方法技术最成熟,是市场上最主流的产品。

作为普通照明光源,必须满足基本条件,即光效、颜色与显色指数。为了便于分析,定义了普通照明的白光包括色坐标与显色指数 2 个条件^[11, 12]:1)色坐标 x, y, z 均为 0.33 左右;2)同时显色指数 80 左右或更高。在此定义下,分析了 LED 产生白光的理论值,即:1) RGB-LED,在外量子效率为 100% 情况下,光效为 355 lm/W;2) PC-LED,在蓝光 LED 的外量子效率为 100% 和荧光粉的二次激发量子效率为 100% 的情况下,光效为 284 lm/W。以上两个光效是在一定的假设下未来白光 LED 所能实现的理论光效。而在表 2 中列出了现有 LED 光效的水平。可以看出,作为普通照明最重要指标之一的光效,LED 还有很大的提高潜力。

相比 LED,传统光源的发光原理限制了光效的提高:对于白炽灯等基于热辐射的光源,其绝大部分输入电功率都变成了红外辐射,因而其光效不容易有突破性的提高;而对于基于气体放电发光原理的光源来说,荧光灯由于受到 253.7 nm 紫外线转换成可见光的仅有 45% 左右能量效率的制约,其光效提高也有限;高压钠灯、金卤灯等光效已经接近 100 lm/W,但由于辐射体高温是必要条件,而高温导致的热传导及紫外、红外等的损失,使光效也很难有较大的提高。

3 半导体照明光源近期研究进展

3.1 LED 外延

LED 外延材料的质量在很大程度上由衬底与外延材料的晶格匹配程度有关,经过多年努力^[13, 14], InGaN/蓝宝石的外延层位错密度 10^{10} 个/平方厘米下降到 10^8 个/平方厘米,并有望下降到 10^5 个/平方厘米,因而还有较大的下降空间。

3.1.1 InGaN 外延衬底

蓝宝石:2007 年 2 英寸(1 英寸=25.4 mm)片用量为 500 万片,估计到 2010 年用量为 1000 万片,其中 2/3 是 2 英寸片,1/3 是 3 英寸片。2007 年底日本昭和电工开始采用 4 英寸片进行生产。

碳化硅(SiC):美国 Cree 公司于 2007 年 5 月展示了 4 英寸零位错单晶。山东大学晶体研究所 3 英寸直径单晶已研制成功,2 英寸片已达到“开盒即用”。中国科学院物理研究所研制成功的 2 英寸直径晶体,位错密度小于 100 个/平方厘米。

氮化镓(GaN):波兰华沙高压研究中心 TOP GaN 公司在 150 MPa 和 1600 °C 条件下获得直径 $\phi 10$ mm 的单晶,切片得 20~30 片,位错密度 100 个/平方厘米。中国科学院物理研究所用熔盐法在小于 1000 °C 和常压下制成可实用的 GaN 单晶。2003 年 4 月,日本住友电工用氢化物气相外延(HVPE)法生产 GaN 单晶

衬底。南京大学在国内首先制成 2 英寸 HVPE 法生产的低位错 GaN 衬底。2007 年 4 月,日本日立公司用间隙形成剥离法制成了 3 英寸 GaN 晶片。

氮化铝(AlN):美国华盛顿 Crystal IS 公司于 2006 年 5 月制成 2 英寸 AlN 衬底。

铝酸锂(LiAlO₂):中国科学院上海光学精密机械研究所研制成功,南京大学用其生长 InGaN,有 LED 初步结果。

氧化锌(ZnO):理论上是生长 GaN 的理想衬底,一般用水热法制备。国内中国科学院上海光学精密机械研究所等多家单位研制成功,但用于 InGaN 外延的结果尚少。

3.1.2 InGaN 金属有机化学气相沉积设备的发展

InGaN 金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备的发展如表 3 所示。两种当前容量最大的 InGaN 的 MOCVD 设备如表 3,表 4 所示,单位均为片。

表 3 InGaN 的 MOCVD 设备的发展

Table 3 Development of InGaN MOCVD equipment

Year	2003	2004	2005	2006	2007
Capacity (2 inch)	6~8	12	15	21~24	30~42~45

表 4 两种当前容量最大的 InGaN 的 MOCVD 设备

Table 4 Two InGaN MOCVD equipments with the biggest capacity at present

Year	Model number	Capacity 2 inch	Company
2007	AIX2800G4	42	AIXTRON
2007	K465	45	Veeco

6.1.3 外延工艺进展

1) 缓冲层。二步法,位错密度从 10^{10} 个/平方厘米下降到 10^9 个/平方厘米;侧面过生长外延, 10^9 个/平方厘米;悬式侧向过生长外延, 10^8 个/平方厘米,希望能降到 10^5 个/平方厘米;悬臂侧向过生长外延 10^8 个/平方厘米,希望再能降到 10^5 个/平方厘米。

2) 硅衬底 GaN 蓝光 LED。南昌大学材料研究所制得 460 nm LED, 20 mA, 6~10 mW, 已于 2008 年 4 月量产。

3) 图形衬底外延技术。先在蓝宝石衬底上凹凸状的图形加工,然后横向外延生长,使缺陷减至原来的 1/4。日本“21 世纪光源小组”用此技术使外量子效率提高 43%。中国科学院物理研究所用 SiO₂ 为掩模,在蓝宝石 C 面上湿法刻蚀图形衬底,再倒向外延生长 GaN,发光效率大为提高。中国科学院半导体研究所采用类似的方法,使 LED 光输出增加 33%。

4) 日本昭和电工公司发展了一种新工艺,它将通常的 MOCVD 和等离子体物理沉积(PPD)结合,晶体完整性提高,消除了 MOCVD 工艺产生的微粒,X 射线回摆曲线的半峰全宽从 $150''$ 降至 $50''$,提高了生产的稳定性(炉与炉和片与片之间的均匀性),大大提高了生产效率。

3.2 LED 芯片技术

1) 衬底激光剥离技术。Osram 公司发展该技术,提高出光效率 75%,达到传统的 3 倍。采用 Kr⁺ 激光器(248 nm, 25 ns)对外延材料从蓝宝石一边进行激光扫描,外延片预先用环氧树脂胶到接受晶片上。在缓冲层 GaN 处,出现 GaN→Ga+1/2 N₂ 反应,能量密度范围为 400~600 mJ/cm²。国内许多单位已掌握此法并用于生产。

2) 表面粗化或纹理化。晶元光电公司采用腐蚀工艺在 P 型层表面形成许多六角形的小坑,底为坑的尖顶,可降低总的内反射和 P 型层的吸收,提高出光效率 73%。这一技术,业界采用较为广泛。

3) 倒装芯片。Lumileds 开发,为避免蓝宝石衬底热阻较大的缺点,将外延片倒装在硅片(导热系数为蓝宝石的 5 倍)上,使蓝宝石衬底作为出光面,还避免了电极焊盘遮光的问题,增加出光 1.6 倍。也可倒装在高导热材料 AlN 上。

4) 氧化铟锡(ITO)。主要成分 In₂O₃ 具有良好的导电性和透射率。电阻率在 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下,有 96%左右的透光率。一般采用电子束轰击铟锡氧化物原料表面,使其升华,淀积到外延层表面形成 ITO 薄

膜,适于工业生产。当方块电阻为 $7.5\sim 8.0\ \Omega$ 时,经对比测量,光输出可提高 60%。

5) 光子晶体。利用光的波动性原理,配合纳米技术,提出了光子晶体 LED 技术。在具有折射率周期性变化的结构中,光子表现出波的性质,和晶格中的电子相似。二维光子晶体结构含有平行圆柱的周期阵列,例如空气中的半导体柱或者半导体层中的圆柱形孔。预测出光效率超过 90%,与平面晶片比较,出光效率提高 10 倍以上。北京大学采用阳极氧化铝作为腐蚀掩膜,以感应耦合等离子体(ICP)干法腐蚀,直径为 40 nm,间距为 100 nm 的孔,以低成本实现了表面光子晶体结构 LED,其出光效率比通常的 LED 增加了 42%。英国 Bath 大学研制了 3 种准光子晶体 LED,出光效率可增加 62%。更吸引人的是三维光子晶体,目前还待制备发展中,这对未来外量子效率接近于 1 的 LED 来说,仍是很吸引人的。

6) 微矩阵 LED。现在传统结构 LED 出光效率甚低,仅为 5%~10%,主要是由于 GaN 折射率是 2.5,而空气折射率为 1.0,这样大的差距,使 LED 内部产生的光全反射现象严重。当将出光的平面上做成 $240\ \mu\text{m}\times 240\ \mu\text{m}$ 的微矩阵 LED 结构,侧壁角度为 45° 时,方形、圆形和六角形结构出光效率均可提高 20%。

7) 金属垂直光子 LED。顾名思义,由旭明公司研发生产的这种新型结构 LED 芯片,采用金属合金衬底,具有垂直光子发射结构的新型 LED。外延层从蓝宝石衬底上剥离下来后,蒸镀上具有大于 90% 反射率的高效镜面反射层,移到金属合金衬底上,衬底 $70\sim 145\ \mu\text{m}$,芯片总高度为 $80\sim 150\ \mu\text{m}$,芯片热阻仅为 $0.22\ \text{C/W}$,而 $100\ \mu\text{m}$ 厚蓝宝石衬底正装 LED 芯片热阻达 $2.91\ \text{C/W}$, $150\ \mu\text{m}$ 厚蓝宝石的更高达 $4.57\ \text{C/W}$,相差高达 21 倍之多。加上表面粗化和侧面钝化,大大提高了出光效率。目前已能供应 $120\ \text{lm/W}$ 的功率 LED 芯片。最近又完成 4 英寸外延片的研发工作,投产后对降低成本也颇有帮助。

3.3 LED 封装技术

LED 封装技术发展分为 3 个阶段,如见表 5 所示。降低热阻(R_T)的进展情况见表 6。LED 光效的发展如表 7 所示。2009 年 8 月 5 日,Cree 新发布 XP-G 功率 LED 产品,发光效率可达 $128\ \text{lm/W}$ 。应用回路热管可以有效提升 LED 组件的散热性能,并进而提升 LED 的光效与光衰特性。据此技术国内有多家单位已经研制 50 W 以上的 LED 组件,且获得很好的光衰指标。

表 5 LED 封装技术发展

Table 5 Progress of LED packaging technology

Indicator lamp	1962~1989	$\phi 5\ \text{mm}$ LED	Current 20 mA
Signal lamp	1990s	"Piranha LED", Snap	50~150 mA
Illumination	21 century	Power LED, (Watt class)	$\geq 350\ \text{mA}$

表 6 热阻降低的进展

Table 6 Drop of thermal resistance

Year	2003	2005	2006	2007	2008
$R_T/(\text{C/W})$	$\phi 5\ \text{mm}$				
	1 W	20~25	12	9	5.5

表 7 LED 光效的发展 (lm/W)

Table 7 Progress of LED's luminous efficacy (lm/W)

Year	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2012	2020
1 W(highest value at laboratory)	25	40	57	70	100	134	161			
1 W(commercial value)	20	30	40	50	60	90	110			
1 W(highest value at home-foreign chip)			30	40	55	82	100			
1 W (highest value at home-domestic chip)				20	40	70	80			
$\phi 5\ \text{mm}$ (highest value at laboratory)	60	74	82	100	150	169	249			
America planning objective	25					75			150	200
China planning objective			20	30			60	100		200

4 提高内量子效率的主要研究方向

1) 采用非极性或半极性 GaN 衬底降低极化效应,提高辐射复合几率,从而提高内量子效率。以中村修二为代表,已有一定进展,尚待突破。

2) Lumileds 公司 M. G. Craford 研究组认为大电流下内量子效率的降低是由于俄歇效应造成的,设法降低俄歇效应有可能对 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 芯片大电流注入,从 350 mA 增加到 2 A 而较少降低发光效率,即追求高电流注入下保持较高发光效率。Osram 公司最近表示同意此观点。

3) 弗吉尼亚大学研究人员认为大电流下内量子效率的降低是由于漏电造成的^[14]。他们设计了外延结构,采用了掺杂镁 $5 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 阻挡层,取代非掺杂的 GaN 阻挡层,其 420 nm 的 LED 在 900 A/cm^2 (相当于 9 A 驱动 1 mm^2 芯片)得到最大的外量子效率。

4) 三维垂直结构芯片技术^[19]。为实现大电流驱动,提高性价比(1 m/yuan),大电流驱动的低热阻的垂直结构芯片和三维垂直结构 LED 芯片是 LED 光源的发展趋势。它没有电流拥塞现象;低热阻(小于 $1\text{ }^\circ\text{C/W}$);更高的电流密度(可达数安培);电流分布均匀;100%利用发光材料,没有打线焊盘遮光;结构紧凑、无需键合金线、省工、省料。

小太阳能公司采用“铜铝键合”技术制成原理上与三维垂直结构相似的产品,2008 年 6 月报道,已向 1 mm^2 芯片注入 5 A 的电流,得到超过 1000 lm 的光通量输出。

5 结束语

Holonyak 2000 年在美国物理学会会刊发表了“发光二极管是灯的最终形式吗?”一文,其结论是“原则上发光二极管是灯的最终形式,实际上也是如此,它的发展确实能够而且将继续到所有功率和颜色都实现为止,了解这一点极为重要。”^[15]

进入 21 世纪来的几年中半导体照明光源的发光效率取得了长足的进步,并超过了各国政府预期的计划指标,在最近三四年中,发光效率有望突破 150 lm/W 并大批量生产。各种功能照明的 LED 灯具将走进千家万户,室外照明也将进入推广阶段,真正的绿色照明——无公害且节能减排的半导体照明光源将逐渐成为照明光源的主角。

参 考 文 献

- 1 N. Jr. Holonyak, S. F. Bevacqua. Coherent (visible) light emission from $\text{Ga}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)$ junctions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1962, **1**: 82~83
- 2 Harlan Manchester. Light of hope-or terror[J]. *Readers Digest*, 1963, (2): 97~99
- 3 Fang Zhilie. LED and Its Material[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1992
方志烈. 半导体发光材料和器件[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1992
- 4 Fang Zhilie. History, today and future of LED[J]. *Physics*, 2003, **32**(5): 295~301
方志烈. 发光二极管材料和器件的历史、现状和展望[J]. *物理*, 2003, **32**(5): 295~301
- 5 S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa *et al.*. Superbright green InGaN single-quantum-well-structure light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **34**: L1332~L1335
- 6 www.china-led.net
- 7 www.semiconductor-Today.com
- 8 R. Haitz, F. Kish, J. Tsao *et al.*. Innovation in semiconductor illumination; opportunities for national impact[C]. Optoelectronics Industry Development Association, USA, 1999
- 9 Peng Hui, Zhu Liqiu. China LED almanac(2008~2009)[M]. Beijing: Publish House of Machine, 2009
彭 晖,朱立秋. 中国半导体照明产业发展年鉴(2008~2009)[M]. 北京: 机械工业出版社
- 10 Arturas Zukauskas, Michael S. Shur, Remis Gaska. Introduction to Solid State Lighting[M]. Huang Shihua transl., Beijing: Press of Chemistry of China, 2006
A·茹考斯卡斯, 迈克尔 S·舒尔, 勒米·加斯卡. 固体照明导论[M]. 黄世华译, 北京: 化学工业出版社, 2006
- 11 Muqing Liu, Bifeng Rong, Huub W. M. Salemink. Evaluation of LED application in general lighting[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(7): 0740002
- 12 Liu Muqing, Zhou Decheng, Mei Yi. The Comparison of light efficacy between LED and traditional light sources[J]. *Acta of Lighting Engineering*, 2006, **17**(4): 41~45
刘木清, 周德成, 梅 毅. LED 与传统光源光效比较分析[J]. *照明工程学报*, 2006, **17**(4): 41~45
- 13 Fang Zhilie. LED Lighting Technology[M]. Beijing: Press of Electronics of China, 2009
方志烈. 半导体照明技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009
- 14 Fang Zhilie. Development of LED application[J]. *Lighting*, 2008, **11**: 20
方志烈. LED 应用的发展[J]. *照明*, 2008, **11**: 20
- 15 N. Jr. Holonyak. Is the light emitting diode (LED) an ultimate lamp? [J]. *Am. J. Phys.*, 2000, **68**(9): 864~866