

半导体照明技术的发展现状和展望

王鹏飞¹, 褚明辉², 刘学彦², 蒋大鹏²

(1.海军驻沪东(中华)造船集团有限公司军事代表室, 上海 200129;

2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

1 前 言

自20世纪60年代初首只GaAsP红色发光二极管(以下简称LED)问世以来,经过40年的努力,LED的研究和生产得到迅速发展。从GaAsP、GaAlAs到InGaAlP,红色LED的发光效率提高了近1 000倍。20世纪90年代初,以氮化物为代表的宽禁带半导体材料获得了突破,在GaN基材料上实现了蓝色和纯绿色发光,填补了半导体短波发光的空白,经过短短的几年,其效率已经接近或赶上红色LED,使得LED成为三基色完备的发光体系。LED正在逐步由传统的信息显示和指示向照明领域扩展。专家预计,LED将成为继白炽灯、荧光灯之后的第3代照明光

源。巨大的市场潜力引起各国政府的高度重视,美国专门制订了“国家半导体照明计划”,日本制订了“21世纪光计划”,欧共体制订了“彩虹计划”,韩国制订了“GaN半导体开发计划”。我国政府也十分关注半导体照明技术的发展,于2003年6月成立了“国家半导体照明工程协调领导小组”,并于2003年底紧急启动了国家科技攻关计划“半导体照明产业化技术开发”。

美国在半导体照明发展规划中明确提出了到2020年的发展目标(见表1),发展目标预期到2020年白光LED的效率将达到200 lm/W,这是一个十分诱人的数字。我国也制订了“十一五”的发展目标,预期到“十一五”结束,白光LED的效率将达到130 lm/W,蓝光芯片的效率达到350 mW/W。国际上掀起了一

表1 美国半导体照明工程发展规划预期到2020年发展目标

Technology	SSL-LED 2002年	SSL-LED 2007年	SSL-LED 2012年	SSL-LED 2020年	Incandescent	Fluorescent
Luminous Efficacy (lm/W)	25	75	150	200	16	85
Lifetime (khr)	20	>20	>100	>100	1	10
Flux (lm/lamp)	25	200	1 000	1 500	1 200	3 400
Input Power (W/lamp)	1	2.7	6.7	7.5	75	40
Lumens Cost (\$/lm)	200	20	<5	<2	0.4	1.5
Lamp Cost (\$/lamp)	5	4	<5	<3	0.5	5
Color Rendering Index (CRI)	75	80	>80	>80	95	75
Lighting Markets Penetrated	Low- flux	Incandescent	Fluorescent	All		

股半导体照明的热潮，在热潮来临时我们应该科学分析、冷静面对半导体照明光源带来的历史机遇。半导体照明光源到底发展空间有多大？它的理论极限是多少？

2 实现白色发光的主要方法和荧光粉的作用

半导体发光进入照明领域的关键是实现白色发

光，利用半导体发光技术实现白色发光的方法主要有3种，一是利用红、绿、蓝三基色LED发光组合成白光；二是利用紫光芯片发光作为基础光源，通过紫光激发红、绿、蓝三基色荧光粉实现白色发光；三是利用蓝光LED芯片发出的蓝光作为基础光源，一部分蓝光激发荧光粉，使荧光粉发出黄光，一部分蓝光透过荧光粉发射出来，透过荧光粉的蓝光和荧光粉发出的黄光混合成白光(见图1)。

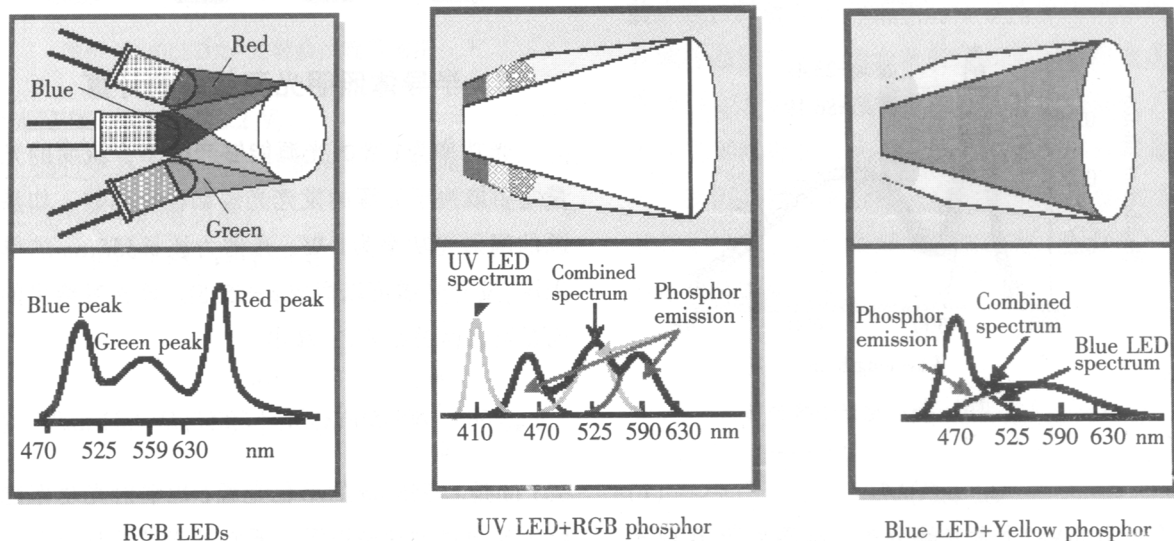


图1 实现白色发光的3种方法

世界普遍认为，最有发展前景的是第3种方法，该方法现在已经得到了商业应用。在这种方法中的2个关键材料是GaN基发光芯片和荧光粉，通常GaN基芯片发射的是光谱峰值在460~470 nm的蓝光，蓝光激发荧光粉(YAGCe³⁺)，荧光粉发出峰值在560 nm的黄光，蓝光和黄光混合成白光。图2给出了白光LED的结构示意图，GaN基芯片是发光基础，也是最重要的原材料，芯片的效率直接影响白光LED的流明效率，这一点已经得到广泛认同。在白光LED中，另一个主要原材料是荧光粉，荧光粉主要起到光转换作用，这里我们重点分析荧光粉的作用。

荧光粉在白光LED中主要起光转换的作用，本文通过一个接近标准白光LED的发光光谱来分析荧光

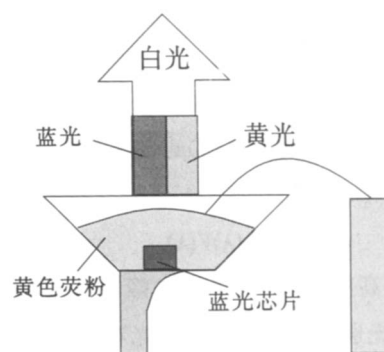


图2 白光LED的结构

粉的作用(光谱见图3)，该光谱对应的白光二极管的色坐标为 $x=0.325$ ， $y=0.332$ ，显色指数为81.5，色温为5 914 K。用 $\varphi_e(\lambda)$ 表示这个白光LED的发光光谱，通过关系式(1)，我们可以将能量分布转换成光子数分布(见图4)。

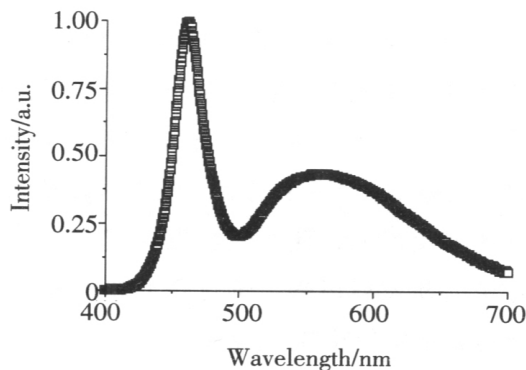


图3 归一化白光LED发光光谱

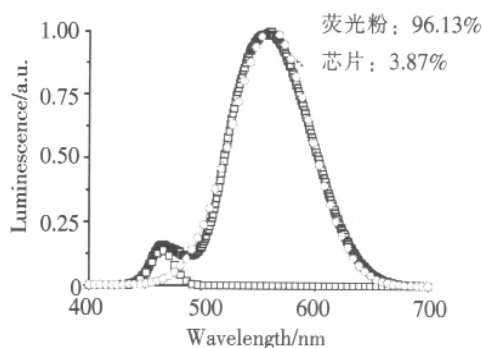


图5 归一化白光LED流明分布

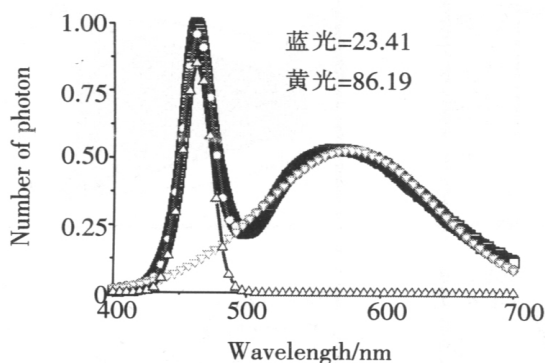


图4 归一化光子数分布

$$\varphi_{\text{pr}} = \varphi_{\text{E}}(\lambda) \lambda / hc \quad (1)$$

利用高斯分布将2个发光峰分离。结果显示,在白光LED发光中,荧光粉光子数占86.6%以上,蓝光芯片光子数占不到23.4%,蓝光芯片发光的86.6%需要通过荧光粉的转换。

流明效率应考虑到视觉函数 $V(\lambda)$ 的修正,通过关系式(2)我们可以将白光LED的发光光谱 $\varphi_{\text{E}}(\lambda)$ 转换成流明分布 $\varphi_{\text{lm}}(\lambda)$ (见图5)。

$$\varphi_{\text{lm}}(\lambda) = \varphi_{\text{E}}(\lambda) V(\lambda) \quad (2)$$

同样,利用高斯分布将2个发光峰分离。结果表明,在白光LED光通量中,荧光粉发光对光通量的贡献率占96%以上,而蓝光芯片发光所占比例不到4%。

上述结果可以看出,白光LED与荧光灯具有类似之处,荧光灯中流明效率100%来自荧光粉。而白光LED的流明效率96%来自荧光粉。另外,要制备出不同色温的白光LED,荧光粉将起到不可替代的作用。

3 半导体照明光源效率的计算

光功率为1 W的光源能够产生多少流明的光通量主要取决于光源的发光光谱和视觉函数,如果光源的辐射光功率为1 W、光谱为波长555 nm的单一光源,发光光谱可以写成 $\varphi = \delta(555)$ 。该光源给出的光通量可以由关系式(3)算出:

$$\varphi_{\text{max}} = 683 \int_{400}^{700} \delta(555) V(\lambda) d\lambda \int_{400}^{700} \delta(555) d\lambda = 683 \text{ lm/W} \quad (3)$$

683 lm是 $\lambda=555 \text{ nm}$ 的单一光源1 W辐射光功率能够给出光通量的理论极限,通常的光源要远小于这个值。

本文采用的白光二极管的发光光谱如图3所示,每1 W白光LED辐射光功率产生的光通量可以通过关系式(4)得出:

$$\eta_{\text{lm}} = 683 \int_{400}^{700} \varphi_{\text{w}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \int_{400}^{700} \varphi_{\text{w}}(\lambda) d\lambda = 298.7 \text{ lm/W} \quad (4)$$

其中 φ_{w} 为白光LED发光光谱。

利用关系式(5)可以计算出白光发光二极管发射的总白光光子数 N_{w} :

$$N_{\text{w}} = K_{\text{w}} \int_{400}^{700} \frac{\varphi_{\text{w}}(\lambda) \lambda}{hc} d\lambda = 2.7 \times 10^{18} \quad (5)$$

理想情况下(芯片光电转换效率为100%),注入1个电子-空穴对产生1个蓝光光子,荧光粉的量子效率为100%,因此,注入的电子-空穴对数等于白光光子数。注入电子-空穴对需要的电功率为3.2 eV

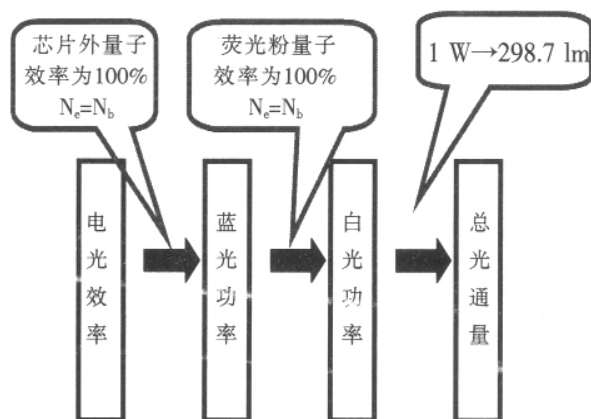


图6 白光LED光-光转换过程示意图

(白光LED工作电压为3.2 V)。

通过关系式(6)可以计算出白光LED每辐射1 W的光功率所需的电功率:

$$W = 3.2 \text{ eV } N_{\text{W}} = 1.38 \text{ W} \quad (6)$$

其中 e 为电子电量, V 为工作电压。

图4所示的发光光谱对应的白光LED的电-光转换的极限流明效率为216.4 lm/W。如果到2020年, 半导体照明真正达到美国提出的200 lm/W, 整个光电转换效率应达到92.4%。130 lm的白光对应的白光辐射功率应达到435 mW。

4 结论和展望

半导体照明光源是一个具有巨大市场发展潜力的产业。随着技术的进步, 半导体照明光源的应用领域将迅速扩大。在未来的5~10年, 它将成为照明产业的主力军, 它将改变人们对照明的认识。发展个性化照明理念, 无疑是照明领域的一次革命。同时, 我们必须科学分析、冷静面对半导体照明带来的历史机遇, 制订科学的发展规划, 使得半导体照明得到健康的发展。(No.11)