

大功率氮化镓基 LED 关键技术研究

马 龙 伊晓燕 郭金霞 王良臣 王国宏 李晋闽

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 对大功率氮化镓基 LED 的关键技术, 尤其是大芯片 LED 的结构设计, p 电极的选择与制备, 提取效率的提高以及倒装焊技术做了重点的介绍与讨论.

关键词: 功率; 氮化镓; 发光二极管; 倒装焊

EEACC: 4260D; 7260; 0170J

中图分类号: TN312+.8 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0165-05

1 前言

自 1962 年第一只 GaAsP 红光 LED^[1] 问世以来, LED 得到了迅速的发展. 20 世纪 90 年代初, 以氮化物为代表的蓝、绿色 LED, 在短短几年时间里其亮度就接近并赶上红光 LED. 与著名的摩尔定律^[2] 相类似, LED 的发展也正遵循着一个定律, 即 Haitz 定律: 在过去三十多年的时间里, 每隔 18~24 个月, LED 亮度就会提高一倍.

随着高亮度蓝、绿 LED 的发展, 新一代照明光源——白光 LED 又成为人们关注的焦点. LED 属于固态照明, 有三个最突出的优点: 一是节约能源, 比传统光源节能 80% 以上; 二是工作电压低, 使用寿命长; 三是利于环保, 属于绿色照明, 无辐射, 不含汞元素. 高亮度、大功率的 LED 可用于室内和景观照明, 以及可用在装饰灯、交通信号灯、背光源、汽车用灯等方面, 具有广阔的应用前景, 倍受国内外产业界的关注. 本文就大功率 GaN 基 LED 的关键技术进行分析和讨论.

2 版图的优化设计——实现电流的均匀分布

传统正装小尺寸 LED 结构, 采用半透明 Ni/Au 电极作为电流扩展层, 电流分布模型^[3] 如图 1 所示. 可以看出 GaN 的 p 层到 n 层的电压降主要由四部

分组成, 即 p 金属电极压降 V_c , p-GaN 压降 V_p , p-n 结压降 V_j , n-GaN 压降 V_n . 由于 n 电极接触电阻很小, 其压降可以忽略不计, 可近似表示如下:

$$V = V_c + V_p + V_j + V_n = J\rho_c(l + t_c) + J\rho_p(l + t_p) + V_j + J\rho_n(L + t_n) \quad (1)$$

其中 J 表示电流密度; ρ_c, ρ_p, ρ_n 分别表示透明电极, p-GaN 及 n-GaN 的电阻率; t_c, t_p, t_n 分别表示透明电极, p-GaN 及 n-GaN 各层的厚度; l 则是电流横向扩展的长度. 由于 ρ_p 远大于 ρ_c 和 ρ_n , 所以器件内部的电流路径可简化为 A 和 B, 忽略 $J\rho_c t_c$ 和 $J\rho_n t_n$ 后用公式表示如下:

$$\begin{aligned} V_A &= J\rho_c l + J\rho_p t_p + V_j + J\rho_n(L - l) \\ V_B &= J\rho_p t_p + V_j + J\rho_n L \end{aligned} \quad (2)$$

由(2)式可以看出若要实现均匀的电流分布, 则必须满足:

$$J(\rho_c - \rho_n)l \approx 0 \quad (3)$$

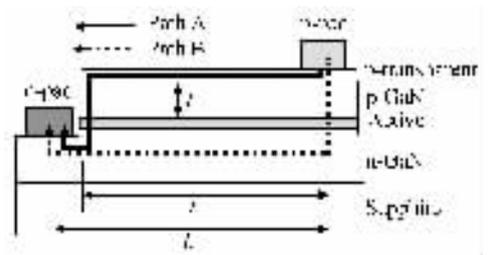


图 1 传统小尺寸 LED 电流分布及路径

Fig. 1 Small size LED current distribution and path

在理论上, 只要 ρ_c 与 ρ_n 相当就可以实现相对均

匀的电流分布,而一般情况下 ρ_c 要小于 ρ_n ,所以 p-pad 下方仍然存在电流密集现象,难以实现均匀的电流分布.从减小 l 的角度出发,增大 p-pad 面积可改善电流扩展,然而对于正面出光的正装结构 LED 来说,这势必会造成出光效率的降低.在倒装结构 LED 设计中,由于是背面出光,p 电极采用厚电极,外加电压在整个 p 区上均匀分布,即相当于 l 减为零,满足(3)式,所以在纵向上可以实现均匀的电流分布.然而,当 LED 尺寸与电流密度进一步加大之后,由图 2^[4]可以看出,在这种情况下 n-GaN 电阻不可忽略,造成了横向电流分布不均匀.以条状电极为例,在 LED 内部某点的电流密度可以定义为:

$$J(x) = J(0)\exp(-x/L_s) \quad (4)$$

其中 $J(0)$ 表示 p 台面边缘处的电流密度; L_s 表示电流横向扩展的最大距离,即电流密度为 $J(0)$ 的 $1/e$ 时 x 的值.该值的计算可以由下式给出:

$$L_s = \sqrt{(\rho_c t_c + \rho_p t_p) t_n / \rho_n} \quad (5)$$

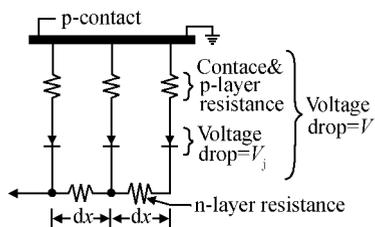
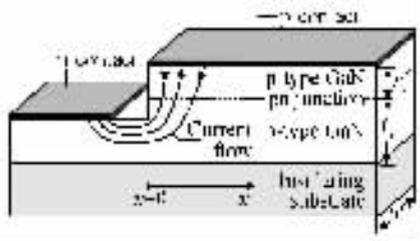


图 2 LED 横向电流扩展 (a) 电流分布;(b) 等效电路

Fig. 2 LED lateral current spread (a) Current distribution;(b) Equivalent circuit

由(4)式可以看出电流密度随离开台面边缘的距离增加而呈指数衰减,对于大尺寸、大功率 LED 而言这一特点将显得尤为突出.为得到均匀的电流分布,则要求减缓这一衰减趋势,即要加大 L_s .由公式(5)综合考虑器件的电学和光学参数,加大 L_s 只能从减小 n-GaN 的电阻率,即提高其掺杂浓度来考虑.

倒装 LED 多插丝状电极结构相当于多个 p-n

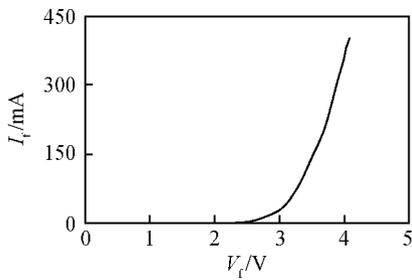
金属电极单胞并联,由图 2(b) 给出的等效电路可以看出采用多单胞并联结构后可以有效地降低串联电阻(使开启电压减少),实验表明其扩展电阻值与单胞数的平方成反比^[5].但是插丝数也不能无限制地增加,因为这势必将以牺牲有源区面积为代价(影响器件的光学特性),因此二者必须均衡加以考虑.

3 p 电极体系的选择与优化——降低电极接触电阻,提高出光效率

目前有多种金属体系用于 p 电极制备,诸如 Ni/Au, Pd/Au, Pt/Au, Ni/Cr/Au, Pd/Mg/Pd/Au, ITO 等,其中对 Ni/Au 体系的研究最多,这种电极在氧气氛围下合金后可以形成优良的欧姆接触.从以上的分析我们可以看出,采用半透明的 Ni/Au 作为正装结构大功率 LED 的 p 电极,更不易于电流充分扩展,而电极的加厚势必会造成对光的进一步吸收,从而限制了器件的出光效率.倒装结构的引入,使光通过透明的蓝宝石衬底发出.对 p 电极的要求则由高透光率转换为高反射率,在设计过程中要兼顾低的欧姆接触电阻与高的光反射率.

制约 p 电极欧姆接触的因素有两个:一是 p-GaN 掺杂浓度难以达到空穴可以隧穿肖特基势垒的水平;二是缺少功函数比 p-GaN 功函数(7.5eV)更高的金属或金属体系.从第一个角度出发,在制作器件之前首先对 p-GaN 激活,750°C 退火使 Mg-H 键断裂,提高 p-GaN 载流子浓度.同时通过 GaN 表面处理及湿法钝化技术减小表面态的影响,进一步降低金属-半导体接触势垒.从第二个角度出发则需要对多种金属体系、尤其是功函数较高的金属进行试验,寻求最佳方案.

提高反射率是对大功率 LED p 电极设计的另一要求.一般来讲,在可见光波长范围内 Ag 和 Al 是最好的反射镜.对 470~520nm 波长的光,120nm 厚的 Ag 和 Al 反射率约为 96% 和 84%^[6],采用薄层的 Ni/Au 做 p-GaN 的欧姆接触层,可形成 Ni/Au/Ag(Al)/Ni/Ag 的 p 电极金属化体系.实验证明,兼有高的反射率与低的接触电阻.我们采用上述金属体系制作的 LED 在 350mA 的电流下工作电压稳定在 3.6~4V 之间,其正向 I-V 特性曲线如图 3 所示.

图 3 LED 正向 $I-V$ 特性曲线Fig. 3 LED forward $I-V$ characteristic curve

4 提高提取效率的手段

4.1 表面粗化技术

即通过内部及外部的几何形状粗化,减少光线在材料体内的全反射,提高提取效率,这种方法最早是由日亚化学提出的.粗化方式依形成的规则凹凸形状所在位置的不同分为两种形式:一种是在内部设置凹凸形状,另一种方式是在出光表面制作规则的凹凸形状,并在背面设置反射层.

韩国光州的一个研究小组以 Pt 为掩蔽,在出光面 p-GaN 上形成图 4 所示的表面平均粗造度为 $6\sim 7\text{nm}$ 的表面^[7].其功率效率(输出功率与输入功率之比)比粗化前提高 62%.但这种方式的主要缺点是容易造成 p-GaN 表面缺陷增多,甚至破坏有源区或增加反向漏电流,降低内量子效率.

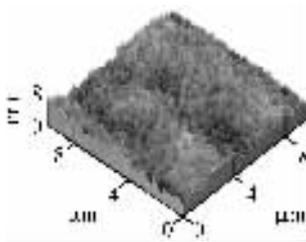


图 4 粗化后的 p 型 GaN 表面

Fig. 4 p-GaN surface after roughness

最近 UCSB 的研究小组^[8]运用激光剥离的方法首先去除蓝宝石的衬底,然后利用光增强湿法刻蚀(PEC)的方法在 n-GaN 表面进行粗化,使提取效率提高了 $2\sim 3$ 倍,不同的刻蚀时间后的 n-GaN 表面如图 5 所示.

4.2 微结构 LED

利用微尺寸效应,在 p-GaN 上制作直径为 $4\sim$

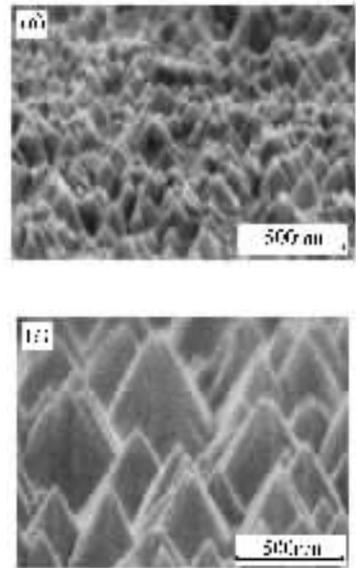


图 5 不同刻蚀时间后形成的 n-GaN 粗化表面 (a) 2min; (b) 10min

Fig. 5 n-GaN surface after etch of different time (a) 2min; (b) 10min

$12\mu\text{m}$ 的如图 6 所示的微盘或微环阵列结构^[9,10],使电流限制在垂直方向,这样可以保证注入载流子的有效利用.这种结构不同于传统的 BA-LED 的设计思路,减少光在平面波导内的损耗,增加了侧面出光效率.由于共振腔模式(尤其是 WG 模式)^[11]的存在,增加了光的输出.另外这些微结构通常用于干法刻蚀来实现,因此侧面相对比较粗糙,有利于减少全反射,使更多的光线从晶体内部逸出.470nm 的蓝光在 GaN 中的吸收系数为 $10^3/\text{cm}$ ^[12],对应平均吸收长度为 $10\mu\text{m}$.因此过大尺寸(直径大于 $10\mu\text{m}$)的微盘结构会导致较多的光在到达侧面之前被吸收.

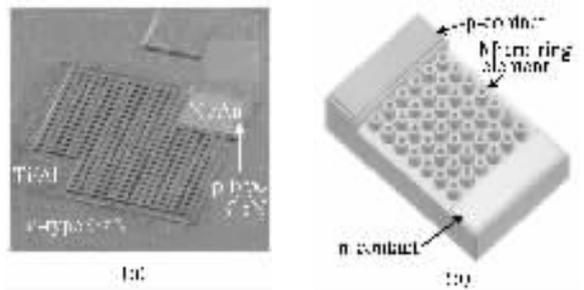


图 6 微结构 LED (a)微盘结构;(b)微环结构

Fig. 6 Micro structure LED (a) Micro-disk; (b) Micro-ring

由于 p 电极接触面积减少,微盘(环)结构 LED 的 $I-V$ 特性与大面积 LED(BA-LED)相比正向开启有

所增加,但其光学特性显著增强:在相同器件面积的前提下,其外量子效率提高近 60%。在相同发光面积的情况下,电流为 100mA 时,微盘结构 LED 要比 BA-LED 外量子效率提高 30%,微环结构 LED 则要比 BA-LED 提高 1 倍。考虑不同微结构尺寸对外量子效率的影响,随着器件尺寸越小,单位面积光功率增加,而当器件尺寸为 $20\mu\text{m}$ 时,光功率密度接近 BA-LED,这是因为光沿水平方向吸收作用加强的缘故。

4.3 倒装焊技术

传统正面出光结构 LED,载流子复合发出的光需要通过半透明的 Ni/Au 电极,导致较低的出光效率。因此,作为电流扩散层的透明电极(Ni/Au)厚度需要控制在几 nm 的范围内,影响了大电流情况下 p 型 GaN 表面电流分布的均匀性。

如图 7 所示,倒装焊结构采用具有高反射率的厚 p 电极,同时以透明的蓝宝石作为出光面,则能有效地解决上述问题,使大电流、大功率的 LED 成为可能。

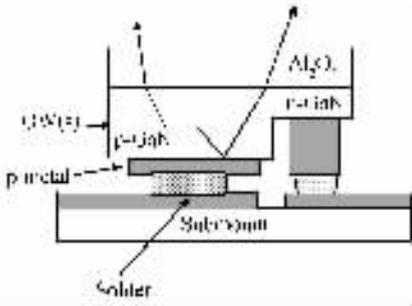


图 7 倒装焊结构 LED

Fig. 7 Flip chip LED

考虑芯片封装后正装和倒装两种情况下的取光效率,正装结构可以视为光线是从 GaN 中进入外包封材料。倒装结构中,光线则是从蓝宝石进入外包封材料。由于蓝宝石的折射率为 1.75,外包封材料环氧树脂的折射率为 1.56,GaN 的折射率为 2.3,相比之下,蓝宝石与环氧树脂的折射率差距较小,界面处发生全反射的临界角较大,光的提取效率较高。全反射临界角

$$\theta_c = \arcsin(n_{\text{gel}}/n_s) \quad (6)$$

出光效率为

$$\eta_e = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta} T(\theta) \sin\theta \quad (7)$$

其中 $T(\theta)$ 是 sapphire/gel 或 GaN/gel 界面处的透射系数,它是角度的函数。在忽略吸收的前提下,

$T(\theta) \approx T_{\perp} = \frac{4n_s n_{\text{gel}}}{(n_s + n_{\text{gel}})^2}$ 。通过计算可以得出封装前后正装结构的光提取效率分别为 4.2% 和 12.8%,而倒装结构的光提取效率分别为 8.3% 和 27.3%,相同条件下倒装结构的光提取效率大约为正装情况下的两倍以上。

散热方面,正装结构封装时上面通常涂敷一层环氧树脂,而环氧树脂的导热能力很差,并且下面衬底(蓝宝石)也是热的不良导体,因此前后两方面都造成散热的难题,影响了器件的性能参数和可靠性。采用倒装结构,将芯片通过凸点连接硅 submount 上,以硅作为芯片与散热片的过渡导热体。采用低熔点合金在硅 submount 的 p,n 区分别制备大量凸点,与倒装芯片上的 p,n 电极依靠变形相连,这些凸点同时实现导电和导热的功能,提高了焊接的可靠性和 LED 结构的散热能力。考虑到多管芯互联的更大功率 LED 结构,在硅 submount 制备过程中同时实现各 p,n 电极的连接,统一引出压焊点,更易于封装。

倒装焊凸点制备首先在二氧化硅上溅射 Cr/Au 作为互连电极,光刻胶采用十几微米的厚胶,最后选择性电镀 Au/Sn(或 Pb/Sn)凸点。另外可根据需要设计和制作多种不同级联方式的 Submount 互连结构,如四管芯串联、并联等。我们自行设计的单管芯的 submount 结构如图 8 所示,图 9 是将单管芯芯片倒装焊在 Si submount 后的照片。

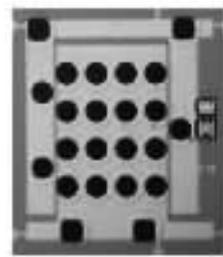


图 8 单管芯的 submount 版图

Fig. 8 Single chip submount



图 9 倒装焊的照片

Fig. 9 Flip chip LED photo

5 结论

本文对大功率氮化镓基 LED 的几个关键技术做了介绍与讨论. 在进行芯片的结构设计时, 要兼顾有源区面积与电流的均匀分布问题. 倒装结构的电极金属化体系的选择也要同时实现低的欧姆接触电阻与高的反射率(对正装结构来说就是高的透射率). 本文同时从减少光在材料内部的损耗和在界面处的全反射入手, 对提高光的提取效率的几种方法进行了讨论. 最后从改善散热和提高出光效率的角度分析了倒装焊技术的优势以及具体的实现方式.

参考文献

- [1] Holonyak N Jr, Bevacqua S F. Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions. *Appl Phys Lett*, 1962, 1: 82
- [2] Moore G E. Cramming more components onto integrated circuits. *Electron*, 1965, 38(8): 114
- [3] Kim H, Lee J M, Huh C, et al. Modeling of a GaN-based light-emitting diode for uniform current spreading. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 1903
- [4] Guo X, Schubert E F. Current crowding and optical saturation effects in GaInN/GaN light-emitting diodes grown on insula-

- ting substrates. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 3337
- [5] steranka F M, Bhat J, Collins D, et al. High power LEDs-technology status and market applications. *Phys Status Solidi C*, 2002, 194(2): 380
- [6] Hibbard D L, Jung S P, Wang C, et al. Low resistance high reflectance contacts to p-GaN using oxidized Ni/Au and Al or Ag. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 311
- [7] Huh C, Slee K, Kang E J, et al. Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diode by microroughening of the p-GaN surface. *J Appl Phys*, 2003, 93: 9383
- [8] Fujii T, Gao Y, Sharma R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 855
- [9] Jin S X, Li J, Lin J Y, et al. InGaN/GaN quantum well interconnected microdisk light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 3236
- [10] Choi H W, Dawson M D, Edwards P R, et al. High extraction efficiency InGaN micro-ring light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 4483
- [11] Choi H W, Jeon C W, Dawson M D, et al. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes. *J Appl Phys*, 2003, 93: 5978
- [12] Ambacher O, Rieger W, Ansmann P, et al. Sub-bandgap absorption of gallium nitride determined by photothermal deflection spectroscopy. *Solid State Commun*, 1996, 97(5): 365

Research on Key Technologies of High Power GaN-Based LED

Ma Long, Yi Xiaoyan, Guo Jinxia, Wang Liangchen, Wang Guohong, and Li Jinmin

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The key technologies of high power GaN-based LED especially the design of large size LED chip, the selection and preparation of p electrode, the improvement of extract efficiency, and the flip chip technology are introduced and discussed.

Key words: power; gallium nitride; light emitting diode; flip chip

EEACC: 4260D; 7260; 0170J

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0165-05