

半导体照明发光二极管(LED)芯片 制造技术及相关物理问题*

李 刚[†]

(方大集团股份有限公司 方大国科光电技术有限公司 深圳 518055)

摘 要 以化合物半导体材料为发光元件的半导体固态照明正引发人类照明史上的又一次伟大革命. 目前, 局限半导体照明广泛应用的主要技术瓶颈有: 出光效率(或外量子效率), 单管最大可发光通量(或最大可工作功率), 单位光通量的成本和发光二极管可正常使用寿命. 文章综述和分析了与芯片发光效率(或外量子效率)和单芯最大可发光通量(或最大可工作功率)相关的制造技术和相关物理问题.

关键词 发光二极管, 半导体照明, 芯片, 氮化镓

Technologies and related physics of LED chips for semiconductor lighting applications

LI Gang[†]

(China FangDa Group Co., Ltd., ShenZhen FangDa GuoKe Optronics Technical Co., Ltd., 518055, China)

Abstract Solid-state lighting based on light emitting diodes made of compound semiconductor materials has created another revolution in the history of the lighting industry. Currently, the major factors restricting broad application of semiconductor lighting devices are the low light extraction efficiency (external quantum efficiency), low light flux (maximum operational power), overall cost per lumen, and reliability or life-time. The light extraction efficiency of the chips as well as the light flux of individual devices will be discussed in connection with the chip-processing technologies and the physics involved.

Keywords Light emitting diodes, Semiconductor lighting, Chips, GaN

1 引言

爱迪生灯泡的发明, 实现了人类历史上照明方法的一次革命, 它为人类的各种活动带来了前所未有的便利, 为人类文明的发展起了巨大的推动作用. 经过近 30 多年的努力, 以化合物半导体材料为发光元件的半导体固态照明有望在未来的十几年内进入传统的以灯泡为基础的照明领域, 引发照明方法的又一次伟大革命.

与其他光源相比, 半导体照明将具有节能、长寿命、抗电击、抗震、平面化、数字化、没有频闪、无红外和紫外辐射、光色度纯、方向性、可设计性强等优点,

特别是在同等照明亮度下, 未来半导体照明的耗电量仅是白炽灯的 1/8, 日光灯的 1/2. 由于半导体照明具有体积小、可塑性非常强的特点, 人们可以根据实际空间、光线要求, 设计个性化光源, 它将完全摆脱传统照明的观念. 半导体发光二极管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.

基于三基色原理, 可以用红、绿、蓝三种光源混合得到任何一种颜色, 包括白色. 目前和未来半导体照明主要的技术途径是采用由半导体芯片产生的部分高能蓝光激发荧光粉产生黄绿光, 再与直接透过

* 2004-12-08 收到初稿, 2005-04-30 修回

[†] Email: alan@fangda.com

荧光粉层的蓝光混色产生白光,或用紫光激发三色荧光粉直接产生白光. 半导体照明的基本原理与荧光灯类似,经历了芯片内的电光转换和荧光粉内的光光转换过程.

与白炽灯和荧光灯等照明光源的通用性和光通量相比,半导体发光二极管要作为照明光源,仍存在许多技术问题有待克服. 如白色发光二极管(LEDs)目前实验室量好水平已超过 70lm/W ,但批量生产的白色发光二极管的发光效率 $<50\text{lm/W}$,虽为旧炽灯的2—3倍,但仍低于荧光灯效率,成本高许多. 为尽早开发实用的半导体照明光源,必须提高芯片内的电光转换效率和荧光粉内的光光转换效率.

当一个电子从红色发光二极管芯片的负极流到正极并发出一个 650nm 的光子时,其能量损失约为5%. 蓝色发光二极管芯片由于驱动电压较高其能量损失相对较大约为25%. 相比其他光源,半导体材料本身的电光功率转换效率已远高过其他发光光源. 进一步提升蓝色发光二极管芯片发光效率的主要途径是研究开发新的外延和芯片技术,大幅度地提高其内量子效率和外量子效率. 内量子效率主要取决于外延材料的品质,而外量子效率主要与芯片技术和封装结构相关. 随着外延生长技术和多量子阱结构的发展,超高亮度发光二极管的内量子效率已有了非常大的改善,如波长为 625nm 的AlGaInP基超高亮度发光二极管的内量子效率快达到100%. 由于AlGaInN基材料内存在的晶格失配所致的缺陷、应力和电场等,使得AlGaInN基超高亮度发光二极管的内量子效率比较低,但也在35—50%之间. 所以目前限制发光二极管应用于普通照明的主要瓶颈是:出光效率(或外量子效率)、单管最大可发光通量(或最大可工作功率)、单位光通量的成本和发光二极管可正常使用寿命.

由于半导体封装用的环氧树脂和空气间的折射率相差较大,致使内部的全反射临界角很小,半导体芯片有源区所产生的光只有极少部分能通过上述二个界面逸出而被有效利用,或发光二极管的出光效率(萃光效率)非常低. 这在很大程度上要求采用新的芯片制备技术来改善芯片出光效率,进而达到提升发光效率(或外量子效率)的目的. 另外,如常规的 5mm 环氧树脂封装的二极管散热热阻高达 $150\text{—}250^\circ\text{C/W}$,在大电流密度下工作会引起结温升高,光效急剧降低. 为在大电流下降低芯片结温,必须采用新型芯片结构设计来改善导热和散热功能,

提高单芯最大可工作功率或单管最大可发光通量. 只有发光效率(或外量子效率)的提升和单管最大可发光通量(或最大可工作功率)的提高,才能降低单位光通量的成本和改善发光二极管的可正常使用寿命. 本文将对与半导体照明LED芯片的发光效率(或外量子效率)和单芯最大可发光通量(或最大可工作功率)相关的制造技术和相关的物理问题进行简单的综叙和分析.

2 影响半导体照明LED芯片发光效率(或外量子效率)的制造技术和相关的物理问题

由于半导体材料和空气介电常数差异很大,对没有封装的半导体发光芯片,针对单面发射平滑表面,由于非常强烈的内表面全反射导致芯片的外量子效率非常低. 如半导体材料氮化镓的介电常数为2.5,空气的介电常数为1,其内全反射临界角(从法线方向到界面方向)为 23° ,忽略背面和边缘出光,大约只有4%的光可以从芯片正面射出. 虽然反射回去的光可以再反射回来,来回往复,再加上一部分光从侧面射出,但总的出光效率仍非常低($<10\%$). 由于各种芯片的内量子效率已很高,所以芯片的出光效率几乎决定了半导体照明LED芯片的发光效率. 半导体照明LED芯片技术也就主要专注于如何提升出光效率来提升芯片的发光效率(或外量子效率).

2.1 芯片外形技术和相关的物理问题

当发射点处于球的中心处时,球形芯片可以获得最佳的出光效率. 改变芯片几何形状来提升出光效率早在60年代就已经应用到二极管芯片^[1]. 在实际应用中,往往是制作特殊形状的芯片来提高侧向出光的利用效率,也可以在发光区底部(正面出光)或者对外延层材料(背面出光)进行特殊的几何规格设计,并在适当的区域涂覆高防反射层薄膜,来提高芯片的侧向出光利用率.

1999年,HP公司开发了倒金字塔形(TIP)AlInGaP芯片(见图1). TIP结构可减少光在晶体内传输距离,减少内吸收(有源区吸收和自由载流子吸收等)引起的光损耗,从而使芯片出光特性大幅度改善,发光效率达 100lm/W (100mA , 610nm),外量子效率更达到55%. 面朝下结构使p-n结更接近热

沉,改善了散热特性,提高了芯片寿命. Cree 公司通过采用将芯片截面从矩形改为正梯形,从外延层出光改为由 SiC 衬底端出光,大幅度减少 SiC 衬底厚度等技术和方法后,使标准芯片的出光功率提升达 6 倍之多. 据 2004 年最新报道,在 20mA 驱动电流下, Cree 标准芯片的出光功率已达 19mW,封成白光后达 4.7lm. 实验室样品的发光效率达 74lm/W [量子效率达 35%,电光转换(Wall - plug)效率达 29%]. 在标准芯片的基础上,通过芯片尺寸的放大来制造大功率照明芯片,在 350mA 驱动电流下,出光功率已达 250mW,制造成白光二极管后发光效率达 40lm/W.

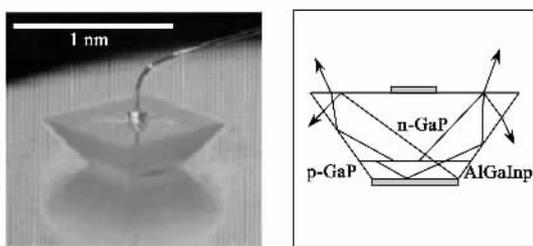


图 1 Lumileds 倒金字塔形 AlInGaP/GaP 芯片几何形成

2.2 键合剥离技术和相关的物理问题

AlGaInP 和 AlGaInN 基二极管外延片所用的衬底分别为 GaAs 和蓝宝石,它们的导热性能都较差. 为了更有效地散热和降低结温,可通过除掉原来用于生长外延层的衬底,将外延层键合转移到导电和导热性能良好的衬底上,如铜、铝、金锡合金、氮化铝等.

采用金属键合技术制备 InGaAlP/Si 衬底照明 LED 芯片是一种价廉而有效的方式^[2]. Si 衬底不仅导热良好,而且避免了 GaAs 衬底的吸光作用. 制作工艺过程主要包括以下步骤 (1)在 LED 外延片的顶部淀积栅格状的欧姆接触层和高反射率的金属层. 为了在 560—650nm 波长范围内获得较高的反射率,可以选择 Au, Al 或 Ag 金属材料 (2)将焊料层淀积在 Si 衬底上 (3)通过低温焊料层将带有金属反射层的外延片键合到硅衬底上 (4)采用化学腐蚀或机械研磨加化学腐蚀的方法将吸光的 GaAs 衬底去掉 (5)在新裸露的底部淀积欧姆接触并退火. 键合界面反射膜的反射率可能会因为在键合和后续工艺中发生的合金,互扩散等作用而减少, AlInGaP/Au/AuBe/扩散势垒/Si 可有效防止互扩散,并提供低的欧姆接触电阻,便于制备垂直型芯片,而 InGaP/Au/AuBe/SiO₂/Si 虽能阻止反射膜品

质下降,但 SiO₂ 妨碍了垂直芯片的制备. 键合界面可用合金焊料如 AuSn, PbSn, In 等.

Osram 利用外延片键合剥离技术移去具有吸光性的 GaAs 衬底材料外,又在键合界面制备倒装金字塔形微观反射结构和表面微结构或表面纹理结构 (surface texture) 化,提升界面反光效率和正面出光效率,其 618nm 芯片的发光效率可达 96—98lm/W, Wall - Plug 效率为 33%,在 70mA 驱动电流下,单芯片可发出 12 lm 的光 (见图 2).

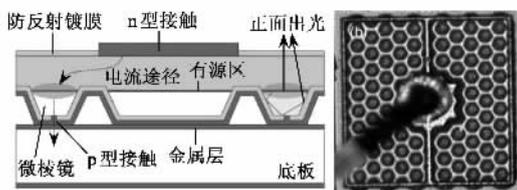


图 2 Osram 倒装金字塔形微观反射结构 AlInGaP 基芯片

相比之下,由于无法使用常规办法剥离蓝宝石衬底,使得用键合剥离技术制备 AlGaInN 基照明 LED 芯片发展较慢^[3-5]. 键合剥离技术主要由 3 个关键工艺步骤完成 (见图 3) (1)在外延表面淀积键合金属层如 Pd 100nm,以及在键合底板上如 Si 底板表面淀积一层 1000nm 的铜 (2)将外延片低温键合到底板上 (3)用 KrF 脉冲准分子激光器照射蓝宝石底面,使蓝宝石和 GaN 界面的 GaN 产生热分解,再通过加热(40℃)使蓝宝石脱离 GaN. 2003 年, Osram 运用键合、激光剥离、表面微结构化和使用全反射镜等技术途径,使其最新研发的 ThinGaN TO- PLED 芯片出光效率达到 75%,在 20mA 驱动电流下,发光功率已达 13mW(470nm),封成的白光二极管发光效率大于 50lm/W,是传统芯片的 3 倍. 大功率照明 LED 芯片在 350mA 驱动电流下,芯片的发光功率达 182mW(470nm),封成白光二极管后,产生 43 lm,发光效率约 > 40 lm/W.

如果将芯片键合到 Cu 片上,再激光剥离蓝宝石衬底,可使散热能力提高 4 倍. Si 的热导率比 GaAs 和蓝宝石都好,而且易于加工,价格便宜,是功率型芯片的首选材料.

2.3 倒装焊技术和相关的物理问题

AlGaInN 基二极管外延片一般是生长在绝缘的蓝宝石衬底上. 欧姆接触的 p 电极和 n 电极只能制备在外延表面的同一侧,正面射出的光部分将被接触电极所吸收和键合引线遮挡. 造成光吸收更主要

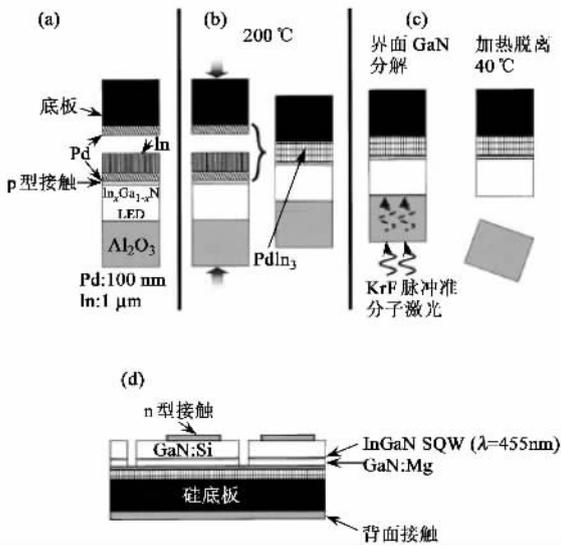


图3 AlGaInN基LED芯片键合剥离关键工艺步骤

的因素是 p 型 GaN 层电导率较低。为满足电流扩展的要求，覆盖于外延层表面的半透明 NiAu 欧姆接触层的厚度应大于 5—10nm。另一方面，为减少 Ni-Au 层的吸光效应其厚度必须非常薄。这样在透光率和扩展电阻率二者之间则要给以适当的折衷，折衷设计的结果必定使其功率转换的提高受到了限制。

倒装焊技术在大功率 AlInGaIn 基芯片上的应用，避免了电极焊点和引线对出光效率的影响，还可不必考虑 NiAu 欧姆接触层的透光性将其厚度增至 50nm 以上，改善了电流扩散性。在 NiAu 层上再覆盖银背反射膜可使传向下方的光反射回出光的蓝宝石一方，进一步提升出光效率。通过电极凸点与散热良好的 Si 底板键合，大量芯片产生的热量可通过凸点经由 Si 底板从支架上散去，大大改善了散热性。再在 Si 底板制备二极管可改善芯片的防静电能力。可见，倒装焊技术不仅能增大芯片输出功率，提高出光效率，还能降低热阻，使发光的 p-n 结靠近热沉，提高器件可靠性^[6-9]。

2001 年，Lumihds 公司研制出的 AlGaInN 功率型倒装芯片（见图 4）外量子效率达 21%，功率转换效率达 20%（200 mA，435nm），最大功率达到 400mW（驱动电流 1A，435nm，芯片尺寸 1mm × 1mm），其总体发光效率比正装芯片增加 1.6 倍。Lumileds 公司在 2004 年 8 月将向市场推出白光二极管的最大发光功率为 5W，120 lm，发光效率达到 30—40lm/W。通过在硅底板上制备二极管可使倒装焊芯片的抗静电能力提高到 16kV（human body model）和 2kV（machine model）。

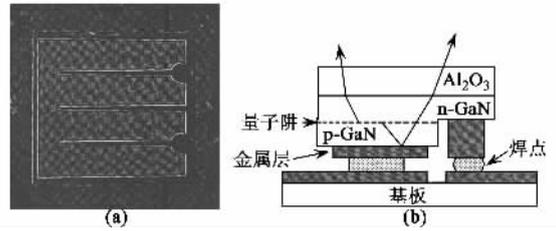


图4 倒装焊芯片正面图(a)和断面图(b)^[7]

2.4 全方位反射膜技术和相关的物理问题

金属基全方位反射膜可应用于正装芯片也可应用于倒装芯片。金属基全方位反射膜可有效提升出光效率，但必须解决如何制备低阻欧姆接触，高的全方位反射率和在后续工艺过程中反射膜不会被损害而失去低阻高反射的特性等。

对 470—520nm 可见光，120nm 厚 Ag 的反射率为 96%，Al 的反射率为 84%，Ni/Au 的反射率为 31%。Ag 具有最佳反射特性，在可见光范围内，GaN/Ag 界面的反射率达 94%，但由于 Ag 功函数低，接触电阻偏高。采用 NiO/Au/Ag 或 Al 可降低接触电阻，但反射率约为 70%^[8]。还有基于高/低/高/低介电常数的组合如 GaN/ITO/Ag 全反射结构（450nm 时， n_{Ag} 为 0.132， n_{ITO} 为 2.06 和 n_{GaN} 为 2.45），差的欧姆接触仍会导致芯片工作电压很高。采用 GaN/RuO₂/SiO₂（孔网）/Ag/Au 全反射结构，全角度反射率达到 98%，而 DBR 只有 38—49%，GaN/Ni/Au 只有 20—40%，GaN/RuO₂/SiO₂（孔网）/Ag/Au 的全角度反射率约为 Ni/Au 结构的二倍多（见图 5）。

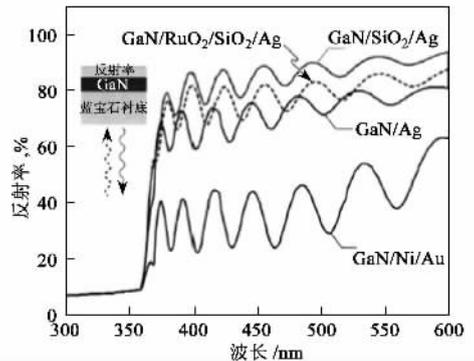


图5 不同金属基全方位反射膜反射率^[10]

2.5 表面粗糙化技术和相关的物理问题

表面粗糙化主要是将那些满足全反射定律的光改变方向，继而在另一表面或反射回原表面时不被全反射而透过界面，并能起防反射的功能^[11]。透射

率的增加被认为是表面粗糙化的主要功能,优化的表面粗糙(430nm 球状起伏表面)可使出光效率达到 54%。在表面粗糙的同时须注意不能损伤材料的电光特性。

2003 年 9 月, Nichia 报道了通过在凹凸蓝宝石衬底上生长发光二极管外延片,用六角衬底图形改变 GaN 与蓝宝石之间的全反射,并运用 Rh 金属基微结构网状透明导电薄膜,使芯片出光效率达到 50%,芯片结构见图 6。在 20mA 驱动电流下,标准芯片发光功率达 18.8 mW (460nm) 和 22 mW (400nm),外量子效率分别达到 34.9% 和 35.5%。400nm 基白光二极管发光效率在 2004 年达到 50 lm/W,预估 2005 年可达到 75 lm/W。

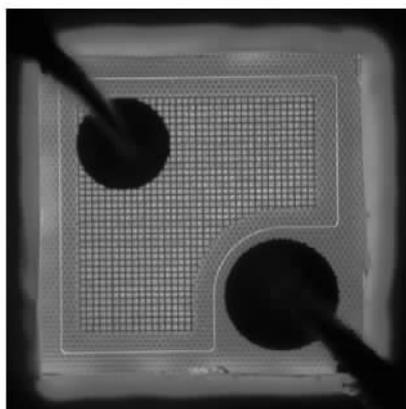


图 6 Nichia Rh 金属基微结构网状透明导电薄膜芯片

对 AlInGaN 基芯片也可通过把 p-GaN 表面粗糙化,提升出光效率,但直接粗糙容易对有源层造成损伤,透明电极更难制备。p 型 GaN 表面的微观粗糙(金属纳米束沉积辅助以湿法腐蚀)可增加出光效率 62%。采用表面粗糙化加背面反射膜结构,外量子效率可达 40%^[12]。1999 年, Fuji 报道将 AlInGaN 基芯片键合到硅基板上,再用激光剥离法去除衬底,在 n 型 GaN 表面通过光致电化学法腐蚀形成有序的锥形形状,可以增加发光强度 2.3 倍。除表面粗糙外,芯片的侧面粗糙也能进一步提升出光效率,表面粗糙后的外量子效率达 22%,侧面粗糙后可达 31%。通过在 ITO/NiO_x 上制备有规则纹理结构(3μm × 3μm),可以使芯片发光功率从 6.1 mW 提升到 7.1 mW。

Osram 公司于 2001 年研制的 AlInGaP 基芯片(结构见图 2),采用将芯片窗口层表面腐蚀成能够提高出光效率的纹理结构。芯片表面纹理的基本单元为具有斜面的三角形结构,光子的反射路线被封

闭在这样的结构之中,使有源层发出的光子能够更有效地被取出,或者通过不同的表面直接射出,或者经多次反射后通过改变入射角再射出。采用这种纹理表面结构的 AlInGaP 基芯片可以获得大于 50% 的外量子效率,芯片封装后的功率转换效率超过 30 lm/W,是常规 AlInGaP 基芯片(GaAs 衬底)的 2 倍。纹理表面结构对光束角特性没有影响,不仅可取代常规的方形芯片,而且还可以很容易按比例放大应用于功率型的大尺寸芯片,而晶片键合透明衬底的 AlInGaP 基芯片(GaP 透明衬底)由于技术复杂只能应用于 3 in(1 in = 2.54 cm)的 GaAs 衬底。在降低生产成本和实现产业化规模生产方面,纹理表面高效取光结构的 AlInGaP 基芯片(GaP 透明衬底)具有广阔的发展前景。

2.6 微芯片阵列技术和相关的物理问题

微芯片阵列可以增加发光效率,其原理尚不清楚^[14-16]。Dai 认为是应力释放导致介电电场的减弱,提升了芯片的内量子效率,但 Choj 等认为是微芯片阵列提高了外量子效率^[17]。外量子效率的提升得益于微芯片阵列中芯片周边面积的增加,一般微芯片直径约 10mm,芯片厚度约 1mm,芯片表面积与周边面积之比可达 1:1.4,显然芯片周边面积提供了更多的出光表面积。微芯片阵列可以增加出光效率,倒装后从蓝宝石一侧的出光效率可进一步通过在蓝宝石上制备微透镜提高每一颗微芯片的出光效率,采用 ICP 法在蓝宝石上制备与微芯片相对集成在一个器件上的微凹透镜,与平坦蓝宝石表面相比,微透镜可增加出光强度约 30%。^[18]

微环芯片可以提升表面积和周边面积之比到 1:1.8(外圈 φ10μm,内圈 φ5μm),锥形(tapered)微芯片更进一步提升出光效率。在相同条件下,微环芯片、微柱芯片和平面芯片的发光功率之比为 2.1:3.1。微芯片阵列如图 7 所示^[19]。

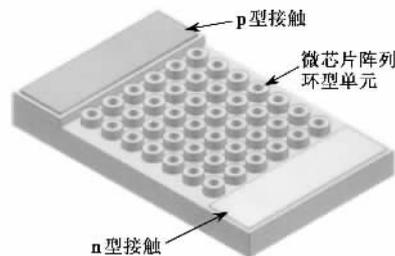


图 7 微芯片阵列^[19]

2.7 光电晶体技术和相关的物理问题

理论指出,通过合理设计光子晶体的形状和排列,即使采用常规芯片结构,并保持原有的衬底,采用表面光子晶体其出光效率可以达到40%。^[20]即使不采用键合和剥离办法,让发光区域被二维薄膜光子晶体所围绕,也可以有效地提升发光区域的出光效率。如图8所示,通过InGaN隧道二极管在p-GaN上生长厚达190nm的n-GaN,用于制备二维呈三角排列之圆形光子晶体后,其出光功率为无光子晶体芯片的1.5倍^[21]。呈三角排列二维光子晶体(晶格常数6000Å,孔位直径2000Å,孔径深度1900Å)可以将紫外发光二极管的发光功率提高2.5倍(333nm),且发光效率的提升与晶体的晶格常数孔径直径相关^[22]。

2003年9月,日本松下电器制备出光子晶体的发光二极管,其直径1.5μm,高0.5μm的凹凸可以增加60%的出光。浅二维表面栅格光子晶体可避免对有源区的损伤和在光子晶体制备过程导入太多表面损伤,引发内量子效率的下降,同时又能发挥光子晶体的衍射,改变光的入射角而提升出光效率1.7—2.7倍^[23,24],制作过程涉及用电子束光刻和刻蚀工艺来制备晶格常数级大小的栅格几何结构。

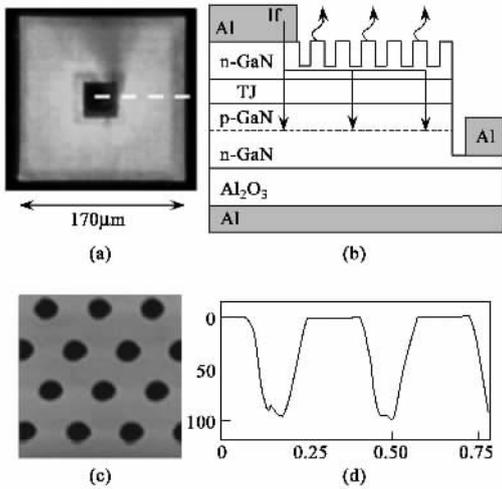


图8 (a)含表面光子晶体的芯片发光正面图 (b)芯片截面示意图 (c)光子晶体表面形貌 (d)光子晶体截面形状^[21]

3 影响半导体照明 LED 芯片最大可发光通量(或最大可工作功率)的制造技术和相关的物理问题

对于理想的半导体照明灯具,其单灯光通量最好达1500 lm。不论采用何种方式增加单芯最大可发光通量或最大可工作功率或最大可工作电流,其主要技术瓶颈是如何提升芯片散热能力,以及单位芯片面积可承受的最大工作电流和最高可容许工作结温。芯片散热能力可通过倒装和键合技术得到大幅度改善,如φ5mm标准发光二极管的热阻约220℃/W,而采用倒装技术后的大功率发光二极管的散热可达12—15℃/W。而单位芯片面积可承受的工作电流和最高可容许工作结温主要取决于外延片的品质。在相当的芯片散热能力、单位芯片面积可承受的最大工作电流和最高可容许工作结温的条件下,单芯最大可发光通量可通过增加芯片尺寸的方式增加。对固定的芯片厚度,模拟和实验发现,当芯片尺寸从210μm×210μm增加到500μm×500μm时,由于经过边缘透出的光减少和内吸收增加,可导致其外量子效率(内量子效率×出光效率)减少25%。在相同芯片尺寸条件下,电极图形的优化设计可使得电流注入和发光更加均匀,降低电功率耗散产生的热效应。

为避免大尺寸芯片导致发光效率的下降等问题,可采用小尺寸芯片集成的方法来增加单管最大可发光通量。采用正装小芯片集成,其固有的缺点(如电极引线遮光和衬底不导热等问题)反而会在多片集成时会加重而影响发光效率。采用倒装芯片集成可避免引线 and 衬底不导热问题,是提高小芯片集成光效的途径之一。应用实例见图9。芯片结构可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。组合封装的超高亮度芯片包括AlGaInN基和AlGaInP基发光二极管,它们的发射光可为单色、彩色(RGB)、白色(RGB三基色合成或蓝色黄色二元合成)。最后采用高折射率的材料按照光学设计形状进行封装,不仅出光效率高,而且还能够使芯片

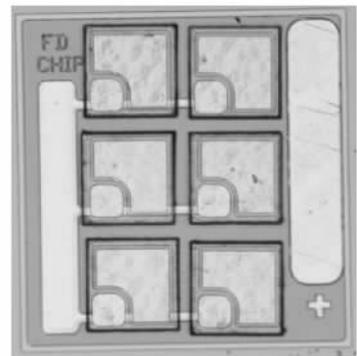


图9 方大倒装芯片集成

和键合的引线得到保护。

4 结束语

随着芯片技术中的相关物理问题的解决,芯片技术不断改进和成熟,再加上引入新的技术和工艺,特别是激光剥离和光子晶体技术的实用化,人们应该有可能也有能力在5—10年的时间内使半导体照明产品走进千家万户,实现人类历史上又一次照明革命。

致谢 感谢戚运东博士在后期定稿中的工作。

参 考 文 献

[1] Krames M R , Ochiai - Holcomb M , Hofer G E et al. Appl. Phys. Lett. ,1999 ,75(16) :2365
 [2] Horng R H , Huang S H , Wu D S et al. Appl. Phys. Lett. , 2003 ,82(23) :4011
 [3] Wong W S , Sands T , Cheung N W et al. Appl. Phys. Lett. , 2000 ,77(18) :2822
 [4] Wong W S , Cho Y , Weber E R et al. Appl. Phys. Lett. , 1999 ,75(13) :1887
 [5] Funato Mitsuru , Fujita Shizuo , Fujita Shigeo. Appl. Phys. Lett. ,2000 ,77(24) :3559
 [6] Won Jang Ho and Lee Jong - Lam. Appl. Phys. Lett. ,2004 , 85(19) :4421
 [7] Wierer J. J. , Steigerwald D. A. , Krames M R et al. Appl. Phys. Lett. ,2001 78(22) :3379
 [8] Hibbard D. Jung S P , Wang C et al. Appl. Phys. Lett. ,2003 83(2) :311

[9] Shen Y C , Wierer J J , Krames M R et al. Appl. Phys. Lett. , 2003 82(14) :2221
 [10] Jong Kyu Kim , Gessmann Thomas , Luo Hong et al. Phys. Lett. ,2004 ,84(22) :4508
 [11] Windisch R , Rooman C , Meinschmidt S et al. Appl. Phys. Lett. ,2001 ,79(15) ,2315
 [12] Windisch R. IEEE Trans. Electron. Dev. ,2000 ,47 :1492
 [13] Windisch R , Heremans P , Knobloch A et al. Appl. Phys. Lett. ,1999 ,74(16) :2256
 [14] Jin S X , Li J , Lin J Y et al. Appl. Phys. Lett. ,2000 ,77 (20) ,3236
 [15] Jin S X , Shakya J , Lin J Y et al. Appl. Phys. Lett. ,2001 , 78(22) ,3532
 [16] Jiang H X , Jin S X , Li J et al. Appl. Phys. Lett. ,2001 ,79 (9) ,1303
 [17] Dai Lun , Zhang Bei , Li J. Y et al. 2001 ,89(9) :4951
 [18] Choi H W , Liu C , Gu E et al. Appl. Phys. Lett. ,2004 ,84 (13) ,2253
 [19] Choi H W , Dawson M D , Edwards P R et al. Appl. Phys. Lett. ,2003 ,83(22) :4483
 [20] Rattier M , Benisty H , Schwoob E et al. Appl. Phys. Lett. , 2003 ,83(7) :1283
 [21] Wierer J J , Krames M R , Epler J E et al. Appl. Phys. Lett. , 2004 ,84(19) :3885
 [22] Shakya J , Kim K H , Lin J Y et al. Appl. Phys. Lett. ,2004 , 85(1) :142
 [23] Ichikawa Hiroyuki , Baba Toshihiko. Appl. Phys. Lett. , 2004 ,84(4) :457
 [24] Boroditsky M , Krauss T F , Coccioli R et al. Appl. Phys. Lett. ,1999 ,75(8) ,1036



无锡市苏威试验设备有限公司

WUXI SUWEI TESTING EQUIPMENT CO., LTD.

苏威公司是一家集科研、设计及制造各类模拟气候环境试验设备的专业性企业。本公司现已通过 ISO 9001:2000 质量管理体系认证。产品有：适于作步入式恒温、高低温、高低温湿热、高低温交变湿热、恒定湿热、高温恒温、盐雾腐蚀、滴水淋雨、紫外灯(氙灯)耐气候、砂尘、霉菌、振动、跌落等各种试验的试验设备。

<http://www.wxsuwei.com>



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



YWX/Q-系列

盐雾腐蚀试验箱

地址：无锡市山北双河大庄1号
 电话：0510-3019806(总机)
 邮编：214037

销售热线：0510-3725132 3723557
 传真：0510-3739455
 手机：0-1390619778

北京办事处：010-68633994 13671120840
 广州办事处：020-31398162 13640248003