

# 台湾 LED/OLED 光电材料与组件技术的发展

陈泽澎, 林晋声

(晶元光电股份有限公司 工业技术研究院材料化工研究所, 台湾 新竹 30059)



陈泽澎

**摘要:** 台湾发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的产量已达到世界第一, 产值则居世界第二。将回顾台湾发光二极管产业的发展历史, 并探讨产业界及研发单位在发光二极管效率提升与质量改善方面的一些重要技术发展历程。有机电激发光(OLED)组件的发展过程, 除了显示器的应用发展优势之外, 固态照明也是台湾近期的研发重点之一, 文中将探讨磷光有机材料、组件结构技术的开发及 OLED 的发展趋势。

**关键词:** 发光二极管; 磷砷化镓; 磷化铝镓铟; 氮化铝镓铟; 液相磊晶成长; 有机金属气相磊晶成长; 有机电激发光组件

**中图分类号:** TN204      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2010)12-0052-07

## Development of LED/OLED Photoelectric Materials and Assembly Technology in Taiwan

CHEN Zepeng, LIN Jinsheng

(Material & Chemical Research Lab, Industrial Technology Research Institute, Epistar Co. Ltd., Xinzhu 30059, China)

**Abstract:** Taiwan is positioned as number one in worldwide LED chips supply. The sales revenue is ranking number 2. In this paper, we have reviewed the development history of Taiwan LED industry. Some of the important technologies developed by Taiwan LED industry and research organizations that improved LED efficiency and quality were also highlighted. The development of organic light-emitting diode in Taiwan was shown in the applications of display industry proven to be standing in some advantageous position. Solid-state lighting is also going to be one of the key areas recently and will be discussed in details including phosphorescent organic materials, the exploitation of device technology and the developing tendency of OLED.

**Key words:** light emitting diode (LED); GaAsP; AlGaInP; AlGaInN; liquid phase epitaxy (LPE); metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE); organic light-emitting diode(OLED)

### 1 前言

自从 1962 年美国 GE 公司的 Holonyak<sup>[1]</sup> 等人开发出首颗 GaAsP p-n 接面(Junction)红光发光二极管至今, 各种不同波长的发光二极管材料陆续被开发出来, 目前 LED 发光光谱已涵盖从紫外线、可见光至红外线。而利用短波长的紫外光或蓝光发光二极管晶粒与荧光粉搭配, 还可以制造出各种颜色的发光二极管, 甚至是白光发光二极管。发光二极管的发光效率, 在小功率的白光发光二极管方面, 日本日亚公司于 2009 年初的 SPIE Photonic West 会议已发布达到 249 lm/W; 而 1 W 的高功率白光发光二极管, 美国的 Cree 公司在 2008 年 11 月

便已达到 161 lm/W, 从早期小于 0.15 lm/W 的发光效率, 大幅提升到大于 150 lm/W 以上, LED 发光效率的改善超过了 1 000 倍。而单一颗发光二极管的流明数也从小于 1 lm, 增加到大于 1 000 lm, 美国的 Luminus Devices 于 2009 年初发表一系列高功率白光发光二极管, 在单一颗大晶粒面积是 9 mm<sup>2</sup>, 在 10 W 的输入功率下, 总输出流明数大于 1 000 lm, 远超过赫芝定律(Hertz's Law)的预期(如图 1)。而每 lm 的价格也从大于 10 美元下降至低于 0.01 美元。由于效率的提升及成本的降低, 使得发光二极管的应用范围更加广泛及多样化, 从早期的指示应用如电子仪表的指示灯、计算器与手表的数字显示、到显示应用如 LED 电子显示屏、交通信号灯、液晶显示器的背光光源, 而进一步开始进入到照明的应用如汽车头灯、路灯及一般照明。

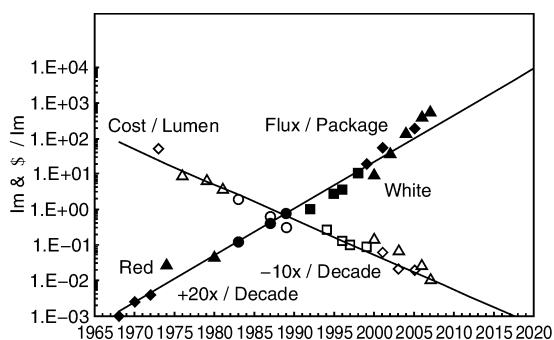


图 1 赫芝定律预测 LED 流明及价格的趋势

Fig. 1 Tendency of lumen and price of LED predicted by Hertz law

自从 Kodak 公司的邓青云博士在 1987 年发表全球第 1 篇报导小分子、双层式结构的有机电激发光组件 (Organic Light-Emitting Diode, OLED) 的文章后, 由于 OLED 本身具有自发光性、高对比、广视角、高应答速度和近乎厘米厚度的轻薄等特性, 使 OLED 很快成为众所瞩目的新型显示器之一。另外, 近年来 OLED 在有机发光材料与组件技术方面进展迅速, 特别是发光效率已经可以超越传统的钨丝灯泡, 使得 OLED 不仅可应用于显示器, 更可应用于照明光源, 因此和 LED 并列为下一代的新兴固态照明 (Solid-State Lighting, SSL)。

## 2 台湾发光二极管产业

LED 产业结构大致上可区分为为上游的磊芯片成长、中游的晶粒制作及下游的封装。台湾的 LED 公司大致上可以分为二类, 一类主要以自行生长磊芯片并使用自行生长的磊芯片来制作晶粒; 另一类公司则是外购晶粒来进行封装。与欧美日的 LED 大厂如德国的 Osram、荷兰 Philips 的 Lumileds、美国的 Cree 以及日本的日亚从磊芯片、晶粒到封装都在同一家公司内垂直整合完成有显著的不同。

台湾的发光二极管产业是由下游的封装先开始, 早在 1972 年德州仪器便在台北县设立了发光二极管封装生产线, 开启了台湾发光二极管产业的契机。1975 年, 光宝在中和成立第一座发光二极管工厂, 从封装开始做起, 为台湾 LED 产业埋下第 1 颗种子。之后 10 年里, 兴华、菱生、佰鸿与亿光等十数家封装厂陆续成立, 2008 年台湾发光二极体产业 40 多家封装厂的产值已达 400 亿台币以上。

当封装产业在台湾刚开始萌芽时, 台湾的万邦电子也开始跨入发光二极管的晶粒制作, 由日本的住友、三菱、昭和电工、信越等公司进口磊芯片来制成品粒。之后光磊于 1983 年成立, 而工研院技术移转的台湾科技

与鼎元也分别于 1984 及 1987 年成立, 光磊公司的发光二极管晶粒产量在 1990 年代甚至达到世界第 1。

在上游的磊芯片生长方面, 虽然在 1980 年代工研院先后将以液相磊晶法 (Liquid Phase Epitaxy) 成长的 695 nm 磷化镓红光发光二极管磊晶, 以及将 940 nm 砷化镓红外线发光二极体磊晶技术移转给两家厂商。与日商技术差距大竞争很艰辛, 直到以有机金属气相磊晶 (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) 技术成长磷化铝镓铟发光二极管的技术成熟后, 始让台湾的上游磊晶产业再现生机。

在 1990 年代初期美国的 HP 及日本的东芝才刚上市磷化铝镓铟红、橙、黄发光二极管不久, 国联光电便于 1993 年 9 月成立, 成为全世界继美国 HP 及日本的东芝之后, 第 3 家具有以 MOVPE 技术生产磷化铝镓铟发光二极管的公司。国联光电的磷化铝镓铟发光二极管晶粒推出后, 很快便营销至欧洲及日本的 LED 大厂, 由于国联光电的成功, 也鼓舞了全新及博达公司的成立, 分别以 MOVPE 及 MBE 技术来生产异质界面双载子晶体管 (Heterojunction Bipolar Transistor, HBT) 及假型高速电子移动晶体管 (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor, PHEMT) 等高频微波磊芯片。之后晶元光电于 1996 年成立, 随后又有十家公司陆续成立。目前台湾的 MOVPE 设备已超过 400 台, 以 MOVPE 设备生产的发光二极管磊芯片产量更是世界最大。

自 1997 年开始, 台湾工业技术研究院 (ITRI) 首先开始了 OLED 技术的研究与开发, 接着许多国内厂商也纷纷加入开发行列, 曾经让 OLED 产业在台湾引起风潮, 但是随着材料、技术与良率迟迟没有显著的进展, 同时制造成本也无法迅速下降, 导致 OLED 在台湾市场无法开拓成一个新的局面。

2006 年 10 月奇晶光电与奇美电子共同开发出 25 吋主动式有机电激发光二极管电视面板, 并且于日本横滨平面显示器展展出, 主要是采用奇美电子最新低温多晶硅薄膜晶体管 (Low Temperature Poly-Silicon Thin Film Transistor, LTPS TFT) 制程技术, 结合奇晶光电的有机电激发光组件技术, 在当时是世界最大的 AMOLED 显示器面板。此后日本 SONY 急起直追, 于 2007 年 10 月 SONY 公司发表了全世界第 1 款可以量产的 11 吋 OLED 的电视, 这也代表着对 OLED 材料寿命存疑的问题得到了解决。

## 3 发光二极管技术

台湾的发光二极管产业发展成功的主要因素之一, 是开发出许多发光效率及质量改善的独特技术, 如透明

导电电极及较低温的芯片接合技术, 这些技术不只改善了发光二极管的效率及质量, 且由于生产工艺简单, 使得台湾生产的发光二极管在市场上极具竞争力, 兹将这些重要的技术发展历程详述如下。

### 3.1 量子井(Quantum Well, QW)结构

目前高亮度红、橙、黄到黄绿光 LED 主要是以磷化铝镓铟为主, 而紫外光、蓝、绿以及白光则是采用氮化铝镓铟材料。最早 LED 的结构是同质的 p-n 接面结构, 接着异质 p-n 接面结构被采用。异质结构(Heterostructure)是利用能隙小的半导体当作发光层, 又被称为活性层(Active Layer), 被夹在二边能隙较大的半导体限制层(Confining Layer)之间的一个三明治结构, 由于具有二个异质接面, 又被称为双异质结构(Double Heterostructure)<sup>[2]</sup>如图 2 所示。采用异质结构的发光二极管, 由于载子被注入发光层后, 电子及电洞结合发光的效率高, 且产生的光不会被二边高能隙的限制层所吸收, 取光效率比较好, 因此, 目前高亮度发光二极管都采用双异质结构。台湾从工研院开发磷化铝镓铟发光二极管便导入多重量子井结构, 由于磷化铝镓铟材料随着铝含量增加, 发光效率显著的降低。利用量子尺寸效应(Quantum Size Effect, QSE)的多重量子井结构 LED, 相对于双异质结构 LED, 在相同的铝含量下, 可以成长出较短波长的磷化铝镓铟发光二极管; 或成长相同波长的 LED, 由于铝含量较低, 发光效率会较好。此外, 由于所有量子井层的厚度加起来比双异质结构的活性层来得薄, 而通常光子逃离晶粒前会在内部来回反射几次, 较薄的活性层可以减少光子被再吸收的机会。虽然在 1990 年代初期量子井结构使用于雷射二极管已经非常普遍, 但在发光二极管的生产则仍然是采用双异质结构。主要原因是发光二极管价格较低, 必须多片磊芯片大量生产, 才符合经济效益, 但要在大型的 MOVPE 生产设备上成长厚度只有几 nm 的薄层, 且厚度均匀性良好并不容易。国联光电是全世界第 1 家生产量子井结构磷化铝镓铟发光二极管的公司, 目前不论是磷化铝镓铟或是氮化铝镓铟 LED, 全世界几乎所有的 LED 公司都是采用多重量子井结构。

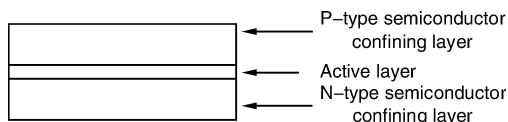


图 2 双异质结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double heterostructure

### 3.2 氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)透明电极

在发光二极管结构通常是使用金属当作欧姆接触(Ohmic Contact)电极材料, 在传统的发光二极管结构由

于发光层上面的窗户层(Window Layer)厚度非常厚, 因此, 最简单的设计便是欧姆接触电极的大小与打线垫(Wire Bonding Pad)相当。当发光二极管顺向偏压(Forward Bias)后, 电流便经由电极流入窗户层, 并藉由窗户层将电流横向传导, 然后再均匀分布地流入发光层。但在高亮度磷化铝镓铟或氮化铝镓铟发光二极管, 由于采用 MOVPE 来成长磊晶层, 相较于传统的液相磊晶成长法(Liquid Phase Epitaxy), 成长速度小了一个数量级。因此, 从生产成本来考虑并不适合将窗户层成长得太厚, 但窗户层太薄又降低了电流均匀分布的能力。在磷化铝镓铟发光二极管方面, 美国的 HP 公司便采用气相磊晶成长法(Vapor Phase Epitaxy), 成长一约 50  $\mu\text{m}$  厚的磷化镓窗户层, 来改善电流的分布; 日本的东芝公司则采用一较厚的砷化铝镓窗户层来帮助电流的均匀分布。另外也可以使用网状或树枝状的电极图案来改善电流的分布, 但采用树枝状的电极, 虽然解决了电流均匀分布的问题, 但也带来了金属遮光的问题。为了解决此一电流拥塞的现象, 而又不会有金属遮光的负面效应产生, 工业技术研究院提出了以氧化铟锡作为透明电极材料的解决办法<sup>[3]</sup>。最早提出以氧化铟锡来当作透明电极的是美国的伊斯特曼柯达(Eastman Kodak)公司<sup>[4]</sup>, 将其应用在磷砷化镓 LED 来解决电流拥塞的问题。然由于 ITO 无法与磷砷化镓表面形成欧姆接触, 柯达公司便利用一非常薄的铬金属层与磷砷化镓表面形成低的欧姆接触电阻, 然后在其上镀上一层 ITO 来帮助电流的横向传导分布。由于氧化铟锡透明电极与大部份的 III-V 族化合物半导体材料并不容易形成良好的欧姆接触, 而需要先在发光二极管结构上成长一层高掺杂的半导体接触层, 其载子浓度要大于  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  以上, 才能够形成低的欧姆接触电阻。但一般能隙大的半导体如磷化镓并不容易掺杂到高浓度, 而容易掺杂至高浓度的半导体如砷化镓或砷化铟镓能隙又太小, 无可避免的又会有吸光的问题产生。为了减少光在高掺杂的半导体接触层的吸收, 工研院首先提出利用化学蚀刻法, 将高掺杂的半导体接触层蚀刻成网状结构, 接着再镀上氧化铟锡透明电极, 如此便可以藉由 ITO 先将电流横向传导后, 再经由网状结构的高掺杂的半导体接触层, 将电流均匀的注入发光层。利用此一方法所制造的磷化铝镓铟发光二极管晶粒, 不仅构造上与美国的 HP 及日本东芝公司需要使用厚的窗户层不同, 由于生产的工艺较为简单, 因此, 产品的竞争力大为提升。之后, 台湾的晶元光电更进一步解决了在高能隙半导体的高掺杂问题, 使得 ITO 可以直接和高掺杂的磷化镓窗户层形成低的欧姆接触电阻, 由于完全没有使用到低能隙的半导体接触层, 因此发光二

极管的效率又进一步的被提升。

同理, ITO 使用在氮化镓发光二极管也可以改善电流的分布, 并提升发光二极管的发光效率。但是一开始与磷化铝镓铟发光二极管面临相同的问题, 即无法与最表层的 p - 型氮化镓层形成良好的欧姆接触。因此, 早期的日亚的蓝光发光二极管都是采用镍金 (Ni/Au) 的薄金属层来当作透明电极。但 Ni/Au 透明电极为了要有良好的电流横向传导功能, 需要有一定的厚度, 但厚度太厚又会造成吸光严重, 因此, 商用的氮化镓发光二极管都将 Ni/Au 透明电极的厚度控制在 15 nm 左右, 但在此一厚度下, Ni/Au 透明电极在蓝光波段只有不到 40% 的透光率, 大大减损了发光二极管的发光效率。为了改善透明电极的透光率, 工研院在 1999 年发表 Ni/Au 透明电极于空气环境下进行热处理, 相对于在氮气环境下热处理, 透光率有明显的改善。2003 年晶元光电利用 MOVPE 长晶技术于 p - 型氮化镓上成长一很薄的高掺杂 N 型氮化镓层, 来形成一穿隧的界面 (Tunnel Junction), 如此 ITO 便能够与最表面的高掺杂 N 型氮化镓层形成良好的欧姆接触。由于 ITO 的透光性较佳, 且其折射率处于空气与氮化镓材料之间, 更可以提高出光角度, 增加发光二极管的取光效率。目前几乎大部份以蓝宝石为基板的氮化铝镓铟 LED 都是采用 ITO 当透明电极, 包括日本的日亚公司亦采用 ITO 透明电极来提升发光二极管的效率。

### 3.3 表面粗化

发光二极管发光层产生的光, 由于受到临界角的限制, 大部份的光线到达晶粒与空气的界面又被反射回晶粒的内部, 而无法逃逸到晶粒的外面, 这是发光二极体的光取出效率低的主要原因之一。为了提高光的取出效率, 美国的 HP 公司将其磷化铝镓铟发光二极体晶粒利用切割工艺切割成倒梯形结构, 使得光射向正面, 且入射角大于临界角的光, 在正面被反射后, 由梯形侧面的斜面逃逸出来。此一结构也被美国的 Cree 公司及德国的 Osram 公司应用于氮化铝镓铟发光二极管, 来提高光的取出效率。但采用这种晶粒切割工艺, 技术上较为困难, 且会牺牲掉部份发光面积, 并不是一种经济有效的生产技艺。

在光取出效率的改善方面, 台湾的发光二极管厂商大部份都是采化表面粗化的技术。关于表面粗化的技术, 其实美国贝尔实验室在其美国专利 US3739217<sup>[5]</sup> 早就已经揭露利用表面粗化的技艺来提升磷化镓发光二极管晶粒的光取出效率。大部份的传统发光二极体晶粒如 695 nm GaP 红光 LED 晶粒、940 nm 砷化镓红外线 LED 晶粒以及 660 nm AlGaAs 红光 LED 晶粒也都是采用表面

粗化的工艺来改善 LED 的光取出效率。但同样的工艺要使用在高亮度磷化铝镓铟或氮化铝镓铟发光二极管, 却遭遇到许多困难。在不同的 III-V 族化合物半导体材料, 在不同的晶格面, 必须找到适合的化学蚀刻溶液才能达到表面粗化的效果。此外, 利用蚀刻溶液将磊晶层表面腐蚀出凹凸的粗化效果, 也同时会将表面的磊晶层蚀刻掉几  $\mu\text{m}$  的厚度, 这对于传统的发光二极管晶粒, 其最上层的磊晶层厚度有几十  $\mu\text{m}$  厚, 少掉几  $\mu\text{m}$  厚, 并不会影响其横向电流传导的能力。但是对于以 MOVPE 成长的磷化铝镓铟发光二极管其表层只有几  $\mu\text{m}$  厚, 甚至氮化铝镓铟发光二极管, 其表层不到 1  $\mu\text{m}$  厚, 如果利用蚀刻工艺形成粗化的表面, 便会腐蚀掉几  $\mu\text{m}$  厚的磊晶层厚度, 将严重的影响表层磊晶层的横向电流传导能力。因此, 在磷化铝镓铟发光二极管必须开发出一种蚀刻溶液, 只蚀刻掉不到 1  $\mu\text{m}$  厚的磊晶层厚度, 便能够形成表面高低差在 0.5  $\mu\text{m}$  厚左右的粗化效果, 才能达到高光取出效率及较佳的电流均匀分布注入发光层的目地。在氮化铝镓铟发光二极管方面, 由于 p - 型氮化镓磊晶层太薄, 无法以蚀刻的方式在表层形成粗化的效果, 台湾的发光二极管厂商, 大都是以磊晶成长的方式, 成长出有高低差凹凸结构的表层, 来达到光取出效率提升的效果。

### 3.4 芯片黏合型发光二极管

以 MOVPE 成长的磷化铝镓铟发光二极管磊芯片通常是以晶格常数匹配的砷化镓基板来当作衬底。但砷化镓基板由于能隙较磷化铝镓铟半导体材料来得小, 因此, 磷化铝镓铟发光二极管发出的光射向基板方向将会被吸收。为此, 美国的 HP 公司最先采用芯片黏合技术, 来解决此一基板吸光造成发光效率降低的问题。先利用 HVPE 技术成长一层大于 50  $\mu\text{m}$  厚的窗户层当作支撑, 接着将砷化镓基板以化学蚀刻方式移除, 然后将基板移除后的发光二极管磊晶结构与另一片磷化镓透明基板在高温高压下融合在一起。但这种芯片直接融合的方式, 需要在高温高压下进行, 融合的温度要高达 750  $^{\circ}\text{C}$  以上, 几乎与磊晶成长的温度相当。在此高温条件下, 掺杂 (Dopant) 在磊晶层内会扩散移动, 而影响发光二极管的发光效率及可靠性。此外半导体与半导体直接融合的技术, 必须二片芯片有相同的晶格方向融合在一起, 才能够避免在融合面产生一高电阻区<sup>[6]</sup>, 而导致顺向偏压 (Forward Voltage) 变高的问题。而且芯片表面平整度的要求非常高, 才能够整片芯片融合接着良好。台湾最早研究芯片接合技术的是全新光电公司与中兴大学, 利用热压方式将发光二极体磊芯片与一镀有金属反射层的玻璃片接合在一起, 利用热压方式虽然可以将接合的温

度降低至 350 ℃, 但磊芯片的表面仍需要非常平整, 才能够有良好的接合良率, 是此一技术的主要缺点。台湾的厂商目前大部份是采用间接接合的方式, 也就是需要一层黏着层来将发光二极管磊芯片及一永久性基板接合在一起。采用黏着层的好处是可以放宽对于磊芯片表面平整度之要求, 且芯片接合的温度也较低, 如国联的 MB (Metal Bonding) 型磷化铝镓铟发光二极管是采用一层 AuIn 焊料来黏合磊芯片与另一永久性衬底如硅基板或氮化铝 (AlN) 基板, 由于硅基板会吸光, 因此必须在磊芯片与硅基板接合的那一面, 在接合前先镀上一薄金属层或透明导电金属氧化物层, 来当作欧姆接触层, 接着再镀上另一层光反射层, 来避免光被基板所吸收; 而 GB (Glue Bonding) 型磷化铝镓铟发光二极管则是以胶来黏合, 而制造出透明基板的发光二极管。目前全世界有荷兰 Philips 的 Lumileds、德国的 Osram、日本的昭和电工 (Showa Denko) 及东芝 (Toshiba)、以及台湾的晶电、华上、联胜等多家公司在生产芯片黏合型磷化铝镓铟发光二极管。

目前高功率的氮化铝镓铟发光二极管也大部份是采用芯片接合的结构, 主要原因是蓝宝石基板的热传导只有约 30 W/mK, 散热性能不佳, 因此, 需要将蓝宝石基板移除, 再将发光二极管的磊晶结构置放到一高热传导率的基板上, 来改善高功率氮化铝镓铟发光二极管的散热问题。制造方法与前面所介绍的芯片黏合型磷化铝镓铟发光二极管类似, 主要的差别是在衬底的移除是用激光剥离 (Laser Lift-off) 的方式而不是用湿式蚀刻方法。

### 3.5 AC LED

目前大部份的 LED 都是 DC 直流操作、且是低电压高电流的条件下操作, 但日常我们使用的却是高压交流电, 通常是 AC 100 ~ 240 V 的电压。因此, 需要一电源供应器做直流、交流的转换, 提供所需要的直流电流给 LED 才能正常发光。此一电源供应器主要包含降压、整流及恒流源三部份、整个模块体积有一定大小, 并不容易放入如 E27 标准接头的灯泡。且将高压交流转换为低压直流会有一定的功率损耗, 采用高压交流直接驱动便可以减少能源消耗的损失。高压使用 LED 组件的观念很早就被提出, 但早期的做法是将多颗 LED 串连在一起。制作方式可以将多颗封装好的 LED 以电路板连结在一起, 或是将多颗 LED 晶粒置放于一基板上, 再以金属打线方式串连在一起等二种方式, 但不管那一种方式, 皆有体积过大、良率不佳及成本高等缺点。韩国的 Seoul、美国的 III-N 公司及日本的 Nitride Semiconductor 先后发布了单晶粒的交流发光二极管, 所谓的单晶粒交流发光二极管最早的设计仅仅是由二串微晶粒反向并联而成。当通入交流电压, 随着电压输入的方向改变,

AC LED 中的二串微晶粒会轮流被点亮。由于在正半周或负半周期同一时间只有一半的微晶粒被点亮发光, 因此, 晶粒面积的使用率祇有 50%, 从成本考虑是一不利的因素。为了改善上述的缺点, 台湾工业技术研究院开发了惠斯登电桥 ((Wheatstone Bridge) 式 AC-LED 设计<sup>[7]</sup>如图 3 所示, 利用部份微晶粒形成桥式整流电路, 而使得大部份的微晶粒在正负向均能够发光, 增加了晶粒面积的使用率。

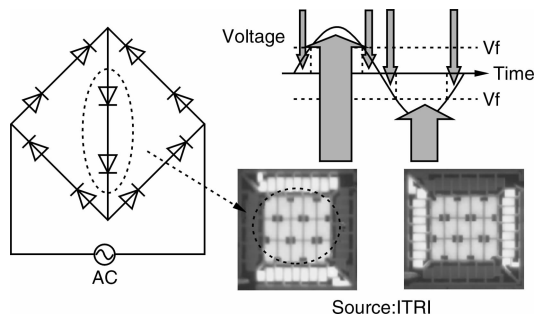


图 3 惠斯登电桥式 AC-LED 设计及其在正负半周期点亮之情形

Fig. 3 Condition of Wheatstone Bridge AC-LED and lighting in positive and negative half-cycle

工研院的 AC LED, 由于设计创新, 于 2008 年赢得 R&D100 研发大奖, 且掌握超过 25 案 80 余件的关键基础专利, 从磊芯片、晶粒、封装至应用的专利布局十分完整。目前也正与国外的验证公司 UL、美国国家标准与技术研究院 (NIST) 合作, 希望主导 AC LED 国际规格之制定, 让台湾业者在全球照明市场取得优势。

### 3.6 OLED 照明的新型应用

根据美国市调公司 Nano Markets 在 2008 年 9 月的报告中, OLED 照明市场规模可望在 2013 年成长到 45 亿美元。各国之间无不卯足全力来开发这一块大饼, 因此 OLED 照明近年来成为相当热门的研究重点之一。台湾除了致力于发展 OLED 显示器面板之外, 在工研院也进行着白光 OLED 的材料与组件及照明应用等技术开发。

#### 3.6.1 磷光有机材料开发

磷光有机材料近来已成为 OLED 材料极重要的发展方向。由于传统荧光有机材料预计只有 25% 的内部量子效率 (Internal Quantum Efficiency, IQE), 因此大部分的能量以不放光的形式损失, 而磷光有机材料结构中具有过渡金属原子 (如: Ir, Pt, Os), 使得原本会以热运动将三重态能量释放的情况, 经由过渡金属产生的重原子效应而得以放光回到基态, 在学理上, 有机磷光材料发光效率是有机荧光材料的 4 倍, 所以理论上使用磷光有机材料可以达到 100% 的内部量子效率, 对有机电激发光组件在发光效率上有突破性的进展。

在磷光有机材料方面，绿色与红色磷光材料已经达到目前业界的规格，而蓝色磷光材料则是落后许多，同时在寿命上也差强人意，所以开发新型蓝色磷光有机材料是让 OLED 照明成功的关键。一般最常使用的蓝色磷光有机材料 Flrpic (Iridium (III) bis(4, 6-difluorophenylpyridinato)picolate)，由于光色不够饱和，其  $x, y$  色度坐标只有 (0.17, 0.34)，因此只能定义为天空蓝色系。近几年来，国内外陆续有新型的蓝色磷光有机材料发表与报导，但却没有显著进展，而在台湾，中央研究院陈锦地教授所带领的实验团队成功开发出 Flrtaz 与 FlrN4 两个磷光有机材料<sup>[8]</sup>。两化合物的最大发光波长约 460 nm 左右 (Flrpic 发光波长为 470 nm)，因此将 Flrtaz 与 FlrN4 两者拿来制作蓝色有机电激发光组件时，组件所发光的 CIE 色度坐标分别为 (0.14, 0.18) 与 (0.14, 0.24)，皆比 Flrpic 所构成的组件要偏蓝色系。

清华大学季昀教授实验团队则是开发出红色磷光材料 Os(fptz)<sub>2</sub>(PPh<sub>2</sub>Me)<sub>2</sub>，制作成有机电激发光组件时，

在亮度 1 000 cd/m<sup>2</sup> 下，有高达 22.2 lm/W 的发光功率，同时 CIE 色度坐标为 (0.64, 0.36)，是一个相当纯红色的材料<sup>[9]</sup>。工研院则开发出相当不错的黄橘色磷光有机材料 PO-01，在同样亮度 1 000 cd/m<sup>2</sup> 下，发光功率高达 33.8 lm/W，若是与蓝色磷光材料 Firpic 搭配形成双波段的白光 OLED，也有不错的表现。

3.6.2 组件制作技术开发

关于 OLED 照明组件制作，工研院在这一方面着力甚多，包括提出新的发光层架构来改善组件的发光效率。在真空蒸镀方式下，利用「双层发光层系统」，搭配一般常用的蓝色磷光材料 Flrpic 与工研院自行开发的黄橘色磷光材料 PO-01，同时在膜层厚度最佳化之后，可以得到一个 OLED 照明组件在亮度 1 000 cd/m<sup>2</sup> 下，电流效率 40.3 cd/A，发光功率 32 lm/W，操作电压为 4 V 和色度坐标为 (0.33, 0.45)<sup>[10]</sup>。值得注意的是在这个组件结构下，即使操作电压与亮度升高，也不会有产生色偏的现象，如图 4 所示。

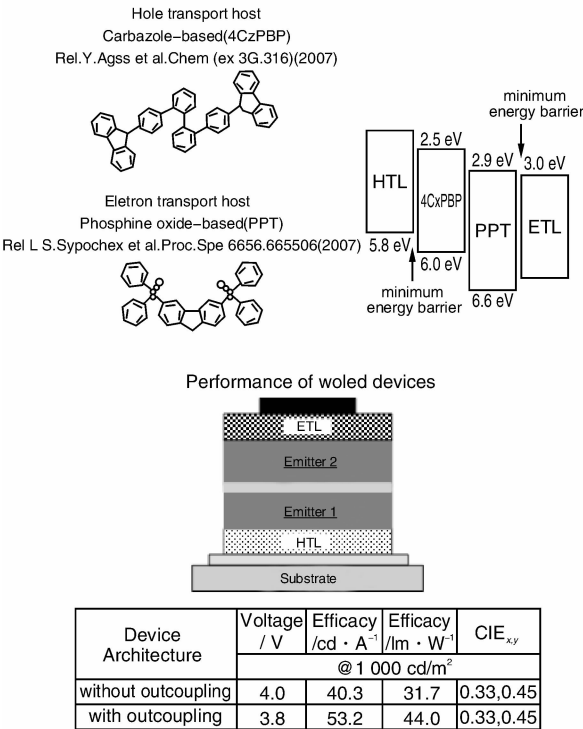
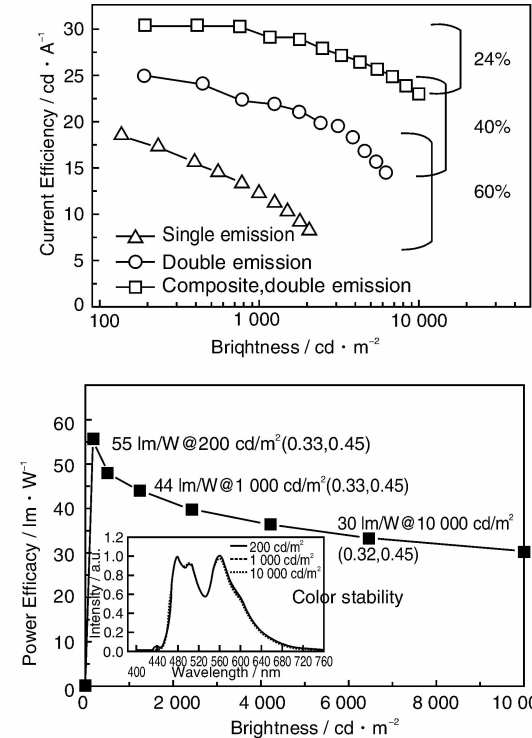


图 4 工业技术研究院开发的白光 OLED 组件特性

Fig. 4 Property of white light OLED module developed by Industrial Technology Research Institute

除了以上的真空蒸镀制程，现在关于湿式制程也相当热门，交通大学孟心飞教授研究团队所开发的刮刀涂布法，可以轻易制作出大面积及多层结构的有机电激发光组件<sup>[11]</sup>，同时有机材料的使用几乎可以达到 100%，生产成本可以大幅降低，成为有潜力的研究方向之一。



4 发展方向

在磷化铝镓铟发光二极管方面，美国 Lumileds 的截顶倒金字塔形 (Truncated Inverted Pyramid, TIP) 结构发光二极管，德国 Osram 公司的薄膜型发光二极管 (Thin-film LED) 以及晶元光电的金属接合型 PN 及 PE 系列发

光二极管在红色波长部份都可以达到 100 lm/W 以上的效率, 由于磷化铝镓铟红色发光二极管的内部量子效率已大于 90% 甚至接近 100%, 但目前最佳的外部量子效率约在 50% ~ 60% 左右, 也就是目前光的取出效率还不到 60%, 因此在磷化铝镓铟红色发光二极管方面未来努力的方向将是如何提高光的取出效率。但在波长较短的磷化铝镓铟黄色发光二极管, 由于发光层的铝含量增多, 导致发光层材料的质量变差, 内部量子效率因而显著的降低。且由于异质界面导电带 (Conduction Band) 的能带偏移 (Band-Offset) 变小, 在高温或高电流条件下电子逸流情形严重, 导致发光亮度对温度较为敏感。2009 年 6 月荷兰 Philips 的 Lumileds 公司推出荧光粉转换的黄色 LED, 利用蓝色的氮化铝镓铟发光二极管激发黄色荧光粉来产生黄光, 由于氮化铝镓铟发光二极管的温度稳定性较佳, 此一黄色 LED 在温度特性方面较目前的黄色磷化铝镓铟发光二极管来得稳定。因此, 台湾厂商必须进一步改善短波长磷化铝镓铟发光二极管的特性, 才能够在市场上取得竞争优势。在氮化铝镓铟发光二极管方面, 虽然日亚化学的小功率氮化铝镓铟蓝色发光二极管在实验室已达到 84.3% 的外部量子效率, 且内部量子效率高达 95%。但大部份台湾 LED 公司的氮化铝镓铟蓝色发光二极管的外部量子效率约 50% 左右, 也就是内部量子效率只有 60% ~ 70%, 因此未来氮化铝镓铟蓝色发光二极管努力的方向是在于如何提升内部量子效率。此外, 照明将是 LED 的最大市场, 但要取代传统照明, 价格性能比是非常重要的, 也就是每流明的价格要达到 0.1 美分的目标。要达到此一目标, 一方面除了要进一步改善氮化铝镓铟发光二极管的外部量子效率外, 还要大幅降低晶粒的生产成本。但要每流明的价格由目前的 1 美分降至 0.1 美分, 氮化铝镓铟发光二极管效率的改善, 即便从目前的 100 lm/W 提升至 200 lm/W, 也只能将每流明的价格降低至一半即约 0.5 美分, 剩下的部份要靠晶粒生产成本的降低来达成并不容易。因此, 目前较为可行的方式, 是将同样面积的晶粒操作在较高的电流密度, 可以得到较高的流明输出。以目前 1 W 晶粒面积 1 mm<sup>2</sup> 的高功率发光二极管为例, 如果能将操作电流由 350 mA 增加至 2 A, 且能维持在高电流密度下的外部量子效率, 将可以得到较高的流明输出, 并显著的降低每流明的价格。但目前氮化铝镓铟发光二极管在高电流的条件下操作, 外部量子效率

会显著的衰减, 如何改善在高电流操作下效率显著降低的现象, 将是氮化铝镓铟发光二极管未来最大的挑战。

此外未来要能够有效的普及化 OLED 显示器或是照明应用, 成本是唯一的考虑, 成本的降低主要则是以下三点: 一、组件制程良率的提升, 如何开发出具有信赖性、稳定性的制程技术将是良率提升的重点, 二、材料成本的降低, 此点有赖于加速开发高效率及高稳定性的材料, 并且让材料的使用率提升, 三、组件成本的降低, 真空蒸镀是 AMOLED 目前唯一的制作方法, 如何开发新一代设备让真空制程减少 (如: 开发湿式制程), 即有机会让组件制作的成本有效的降低。前述三点达成后, OLED 才能真正走出自己的路。

## 参考文献 References

- [1] Holonyak N Jr. Coherent (Visible) Light Emission from Ga (As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) Junctions[J]. *Appl Phys Lett*, 1962(1): 82-83.
- [2] Fred Schubert E. *Light-Emitting Diodes*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 113-126.
- [3] Biing Jye Lee. *Light-Emitting Diodes and Method of Manufacturing the Same*; US 5 717 226[P]. 1998.
- [4] Lawrence David J. *Transparent Electrode Light Emitting Diode and Method of Manufacture*; US 4 495 514[P]. 1985.
- [5] Bergh Arpad A. *Surface Roughening of Electroluminescent Diodes*; US 3 739 217[P]. 1973.
- [6] Stringfellow G B. *High Brightness Light Emitting Diodes: Semiconductors and Semimetals* [M]. San Diego: Academic Press, 1997: 199-204.
- [7] Yan Xixuan(颜玺钊), Ye Wenying(叶文勇). AC-LED 的发展与未来[J]. *Industrial Materials* (工业材料). 2009 (270): 196.
- [8] Chen Chin-Ti. New Dopant and Host Materials for Blue-Light-Emitting Phosphorescent Organic Electroluminescent Devices[J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(3): 285-289.
- [9] Chi Yun. Highly Efficient Red Organic Light-Emitting Devices Based on a Fluorene-Triphenylamine Host Doped with an Os(II) Phosphor[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92: 233 303-1-3.
- [10] Lee Meng-Ting. Improvement in Carrier Transport and Recombination of White Phosphorescent Organic Light-Emitting Devices Using a Composite Blue Emitter[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93: 133 306-1-3.
- [11] Meng Hsin-Fei. *Manufacturing Method of Multilayer Organic Molecule Electro-Optic Devices* (光电组件的多层有机分子制造技术); TW283083[P]. 2007-06-21.