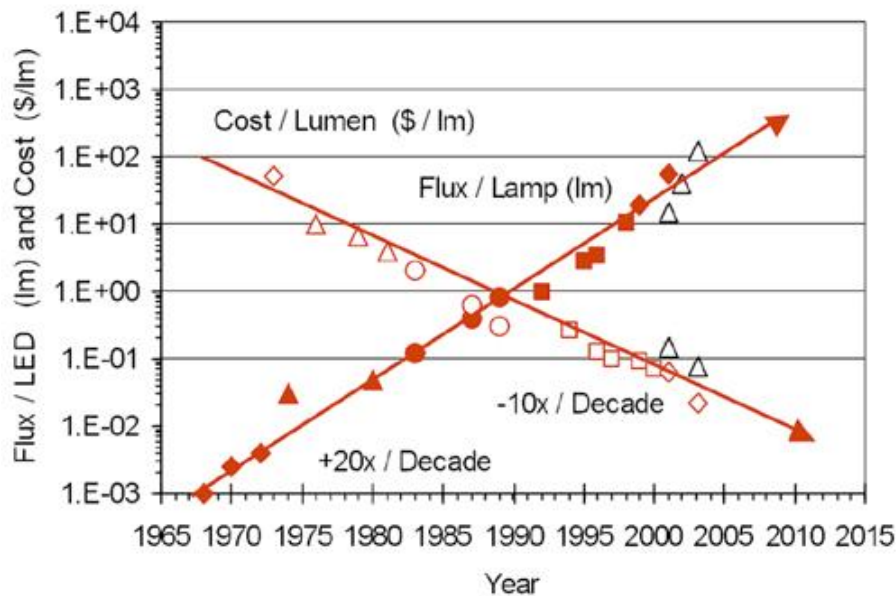


高亮度 LED 之“封装热导”原理技术探析

前言：过去 LED 只能拿来做为状态指示灯的时代，其封装散热从来就不是问题，但近年来 LED 的亮度、功率皆积极提升，并开始用于背光与电子照明等应用后，LED 的封装散热问题已悄然浮现。

上述的讲法听来有些让人疑惑，今日不是一直强调 LED 的亮度突破吗？2003 年 Lumileds Lighting 公司 Roland Haitz 先生依据过去的观察所理出的一个经验性技术推论定律，从 1965 年第一个商业化的 LED 开始算，在这 30 多年的发展中，LED 约每 18 个月 24 个月可提升一倍的亮度，而在往后的 10 年内，预计亮度可以再提升 20 倍，而成本将降至现有的 1/10，此也是近年来开始盛行的 Haitz 定律，且被认为是 LED 界的 Moore（摩尔）定律。

依据 Haitz 定律的推论，亮度达 100lm/W（每瓦发出 100 流明）的 LED 约在 2008 年 2010 年间出现，不过实际的发展似乎已比定律更超前，2006 年 6 月日亚化学工业（Nichia）已经开始提供可达 100lm/W 白光 LED 的工程样品，预计年底可正式投入量产。



备注：*Haitz 定律可说是 LED 领域界的 Moore 定律，根据 Roland Haitz 的表示，过去 30 多年来 LED 几乎每 1824 个月就能提升一倍的发光效率，也因此推估未来的 10 年（2003 年 2013 年）将会再成长 20 倍的亮度，但价格将只有现在的 1/10。*

不仅亮度不断提升，LED 的散热技术也一直在提升，1992 年一颗 LED 的热阻抗 (Thermal Resistance) 为 360°C/W，之后降至 125°C/W、75°C/W、15°C/W，而今已是到了每颗 6°C/W10°C/W 的地步，更简单说，以往 LED 每消耗 1 瓦的电能，温度就会增加 360°C，现在则是相同消耗 1 瓦电能，温度却只上升 6°C10°C。

少颗数高亮度、多颗且密集排布是增热元凶

既然亮度效率提升、散热效率提升，那不是更加矛盾？应当更加没有散热问题不是？其实，应当更严格地说，散热问题的加剧，不在高亮度，而是在高功率；不在传统封装，而在新封装、新应用上。

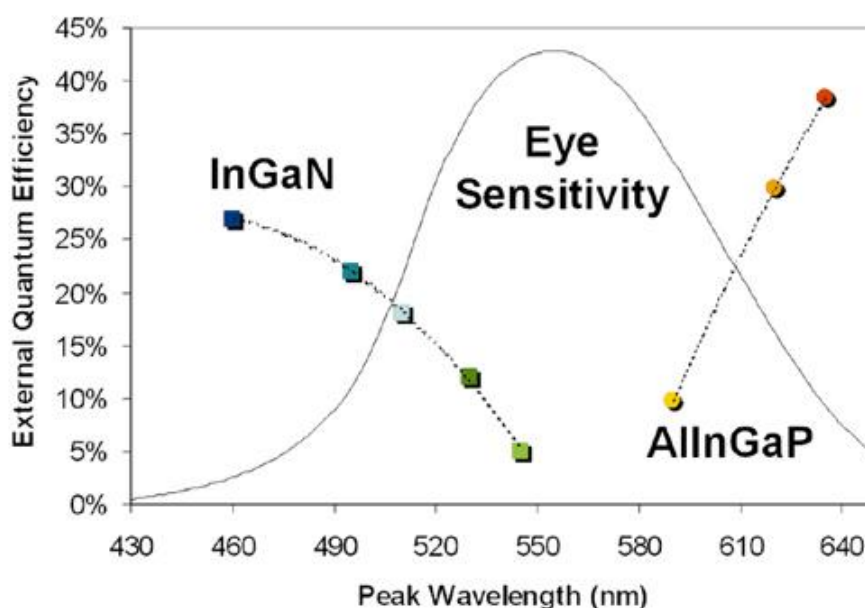
首先，过往只用来当指示灯的 LED，每单一颗的点亮（顺向导通）电流多在 5mA-30mA 间，典型而言则为 20mA，而现在的高功率型 LED（注 1），则是每单一颗就会有 330mA-1A 的电流送入，「每颗用电」增加了十倍、甚至数十倍（注 2）。

注 1：现有高功率型 LED 的作法，除了将单一发光裸晶的面积增大外，也有采用将多颗裸晶一同封装的作法。事实上有的白光 LED 即是在同一封装内放入红、绿、蓝 3 个原色的裸晶来混出白光。

注 2：虽然各种 LED 的点亮（顺向导通）电压有异，但在此暂且忽略此一差异。

在相同的单颗封装内送入倍增的电流，发热自然也会倍增，如此散热情况当然会恶化，但很不幸的，由于要将白光 LED 拿来作照相手机的闪光灯、要拿来作小型照明用灯泡、要拿来作投影机内的照明灯泡，如此只是高亮度是不够的，还要用上高功率，这时散热就成了问题。

上述的 LED 应用方式，仅是使用少数几颗高功率 LED，闪光灯约 14 颗，照明灯泡约 18 颗，投影机内 10 多颗，不过闪光灯使用机会少，点亮时间不长，单颗的照明灯泡则有较宽裕的周遭散热空间，而投影机内虽无宽裕散热空间但却可装置散热风扇。



备注：图中为 InGaN 与 AlInGaP 两种 LED 用的半导体材料，在各尖峰波长（光色）下的外部量子化效率图，虽然最理想下可逼近 40%，但若再将光取效率列入考虑，实际上都在 15%-25% 间，何况两种材料在更高效率的部分都不在人眼感受性的范畴内，范畴之下的仅有 20%。

可是，现在还有许多应用是需要高亮度，但又需要将高亮度 LED 密集排列使用的，例如交通号志灯、讯息看板的走马灯、用 LED 组凑成的电视墙等，密集排列的结果便是不易散热，这是应用所造成的散热

问题。

更有甚者，在液晶电视的背光上，既是使用高亮度 LED，也要密集排列，且为了讲究短小轻薄，使背部可用的散热设计空间更加受限，且若高标要求来看也不应使用散热风扇，因为风扇的嘈杂声会影响电视观赏的品味情绪。

散热问题不解决有哪些副作用？

好！倘若不解决散热问题，而让 LED 的热无法排解，进而使 LED 的工作温度上升，如此会有什么影响吗？关于此最主要的影响有二：(1) 发光亮度减弱、(2) 使用寿命衰减。

举例而言，当 LED 的 p-n 接面温度 (Junction Temperature) 为 25°C (典型工作温度) 时亮度为 100，而温度升高至 75°C 时亮度就减至 80，到 125°C 剩 60，到 175°C 时只剩 40。很明显的，接面温度与发光亮度是呈反比线性的关系，温度愈升高，LED 亮度就愈转暗。

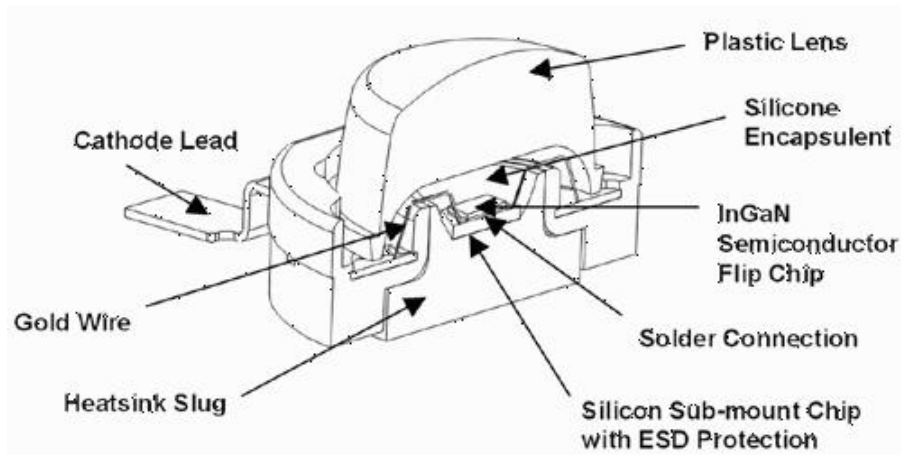
温度对亮度的影响是线性，但对寿命的影响就呈指数性，同样以接面温度为准，若一直保持在 50°C 以下使用则 LED 有近 20,000 小时的寿命，75°C 则只剩 10,000 小时，100°C 剩 5,000 小时，125°C 剩 2,000 小时，150°C 剩 1,000 小时。温度光从 50°C 变成 2 倍的 100°C，使用寿命就从 20,000 小时缩成 1/4 倍的 5,000 小时，伤害极大。

裸晶层：光热一体两面的发散源头：p-n 接面

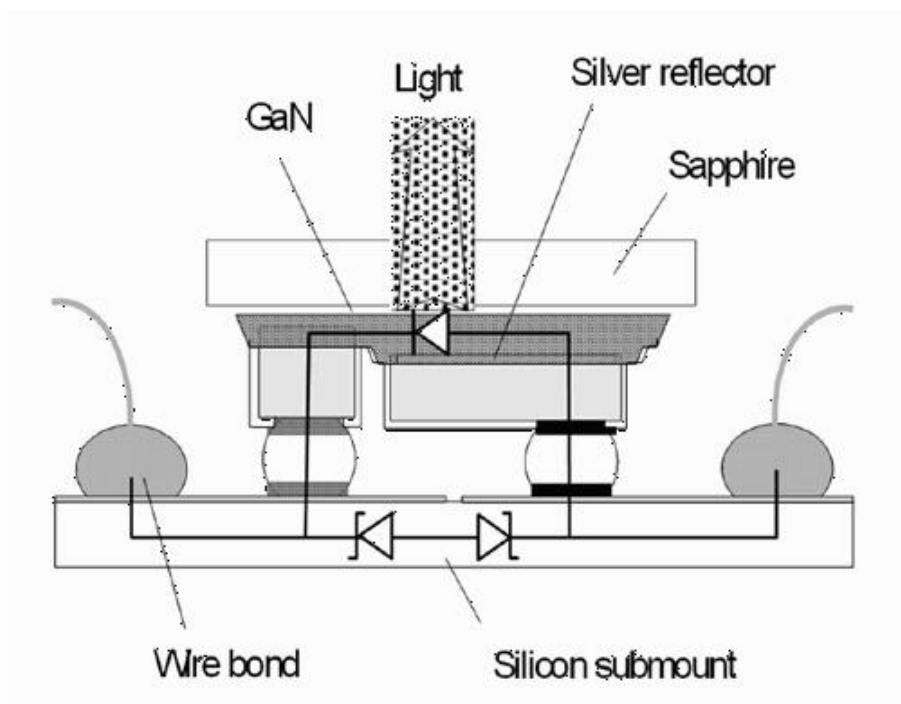
关于 LED 的散热我们同样从最核心处逐层向外讨论，一起头也是在 p-n 接面部分，解决方案一样是将电能尽可能转化成光能，而少转化成热能，也就是光能提升，热能就降低，以此来降低发热。

如果更进一步讨论，电光转换效率即是内部量子化效率 (Internal Quantum Efficiency; IQE)，今日一般而言都已有 70%~90% 的水平，真正的症结在于外部量子化效率 (External Quantum Efficiency; EQE) 的低落。

以 Lumileds Lighting 公司的 Luxeon 系列 LED 为例，T_j 接面温度为 25°C，顺向驱动电流为 350mA，如此以 InGaN 而言，随著波长 (光色) 的不同，其效率约在 5%~27% 之间，波长愈高效率愈低 (草绿色仅 5%，蓝色则可至 27%)，而 AlInGaP 方面也是随波长而有变化，但却是波长愈高效率愈高，效率大体从 8%~40% (淡黄色为低，橘红最高)。



备注: 从 Lumileds 公司 Luxeon 系列 LED 的横切面可以得知, 矽密封胶固定住 LED 裸晶与裸晶上的荧光质 (若有用上荧光质的话), 然后封胶之上才有透镜, 而裸晶下方用焊接 (或导热膏) 与矽子镶嵌芯片 (Silicon Sub-mount Chip) 连接, 此芯片也可强化 ESD 静电防护性, 往下再连接散热块, 部分 LED 也直接裸晶底部与散热块相连。 (图片来源: Lumileds.com)



备注: Lumileds 公司 Luxeon 系列 LED 的裸晶采用覆晶镶嵌法, 因此其蓝宝石基板变成在上端, 同时还加入一层银质作为光反射层, 进而增加光取出量, 此外也在 Silicon Submount 内制出两个基纳二极管 (Zener Diode), 使 LED 获得稳压效果, 使运作表现更稳定。 (图片来源: Lumileds.com)

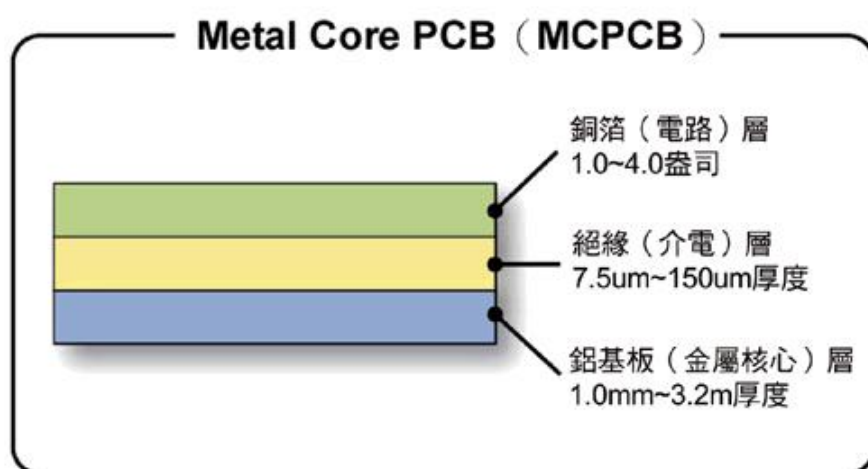
由于增加光取出率 (Extraction Efficiency, 也称: 汲光效率、光取效率) 也就等于减少热发散率, 等于是一个课题的两面, 而关于光取出率的提升请见另一篇专文: 高亮度 LED 之「封装光通」原理技术

探析。在此不再讨论。

裸晶层：基板材料、覆晶式镶嵌

如何在裸晶层面增加散热性，改变材质与几何结构再次成为必要的手段，关于此目前最常用的两种方式是：1. 换替基板（Substrate，也称：底板、衬底，有些地方也称为：Carrier）的材料。2. 经裸晶改采覆晶（Flip-Chip，也称：倒晶）方式镶嵌（mount）。

先说明基板部分，基板的材料并不是说换就能换，必须能与裸晶材料相匹配才行，现有 AlGaInP 常用的基板材料为 GaAs、Si，InGaN 则为 SiC、Sapphire（并使用 AlN 做为缓冲层）。



备注：为了强化 LED 的散热，过去的 FR4 印刷电路板已不敷应付，因此提出了内具金属核心的印刷电路板，称为 MCPCB，运用更底部的铝或铜等热传导性较佳的金属来加速散热，不过也因绝缘层的特性使其热传导受到若干限制。（制图：郭长佑）

对光而言，基板不是要够透明使其不会阻碍光，就是在发光层与基板之间再加入一个反光性的材料层，以此避免「光能」被基板所阻碍、吸收，形成浪费，例如 GaAs 基板即是不透光，因此再加入一个 DBR (Distributed Bragg Reflector) 反射层来进行反光。而 Sapphire 基板则是可直接反光，或透明的 GaP 基板可以透光。

除此之外，基板材料也必须具备良好的热传导性，负责将裸晶所释放出的热，迅速导到更下层的散热块 (Heat Slug) 上，不过基板与散热块间也必须使用热传导良好的介接物，如焊料或导热膏。同时裸晶上方的环氧树脂或矽树脂（即是指：封胶层）等也必须有一定的耐热能力，好因应从 p-n 接面开始，传导到裸晶表面的温度。

除了强化基板外，另一种作法是覆晶式镶嵌，将过去位于上方的裸晶电极转至下方，电极直接与更底部的线箔连通，如此热也能更快传导至下方，此种散热法不仅用在 LED 上，现今高热的 CPU、GPU 也早

就采行此道来加速散热。

从传统 FR4 PCB 到金属核心的 MCPCB

将热导到更下层后，就过去而言是直接运用铜箔印刷电路板（Printed Circuit Board; PCB）来散热，也就是最常见的 FR4 印刷电路基板，然而随著 LED 的发热愈来愈高，FR4 印刷电路基板已逐渐难以消受，理由是其热传导率不够（仅 0.36W/m.K）。

为了改善电路板层面的散热，因此提出了所谓的金属核心的印刷电路板（Metal Core PCB; MCPCB），即是将原有的印刷电路板附贴在另外一种热传导效果更好的金属上（如：铝、铜），以此来强化散热效果，而这片金属位在印刷电路板内，所以才称为「Metal Core」，MCPCB 的热传导效率就高于传统 FR4 PCB，达 1W/m.K2.2W/m.K。

不过，MCPCB 也有些限制，在电路系统运作时不能超过 140℃，这个主要是来自介电层（Dielectric Layer，也称 Insulated Layer，绝缘层）的特性限制，此外在制造过程中也不得超过 250℃300℃，这在过锡炉时必须事先了解。

附注：虽然铝、铜都是合适的热导热金属，不过碍于成本多半是选择铝材质。

IMS 强化 MCPCB 在绝缘层上的热传导

MCPCB 虽然比 FR4 PCB 散热效果佳，但 MCPCB 的介电层却没有太好的热传导率，大体与 FR4 PCB 相同，仅 0.3W/m.K，成为散热块与金属核心板间的传导瓶颈。

为了改善此一情形，有业者提出了 IMS（Insulated Metal Substrate，绝缘金属基板）的改善法，将高分子绝缘层及铜箔电路以环氧方式直接与铝、铜板接合，然后再将 LED 配置在绝缘基板上，此绝缘基板的热传导率就比较高，达 1.12W/m.K，比之前高出 37 倍的传导效率。

更进一步的，若绝缘层依旧被认为是导热性不佳，也有直接让 LED 底部的散热块，透过在印刷电路板上的穿孔（Through Hole）作法，使其直接与核心金属接触，以此加速散热。此作法很耐人寻味，因为过去的印刷电路板不是为插件元件焊接而凿，就是为线路绕径而凿，如今却是为散热设计而凿。

结尾

除了 MCPCB、MCPCB+IMS 法之外，也有人提出用陶瓷基板（Ceramic Substrate），或者是所谓的直接铜接合基板（Direct Copper Bonded Substrate，简称：DBC），或是金属复合材料基板。无论是陶瓷基板或直接铜接合基板都有 24170W/m.K 的高传导率，其中直接铜接合基板更允许制程温度、运作温度达 800℃以上，不过这些技术都有待更进一步的成熟观察。

