

# LED器件、光源热阻结构 与产品质量控制

深圳大学 光电工程学院

深圳市LED热管理与故障分析评估中心

柴广跃

## 目录

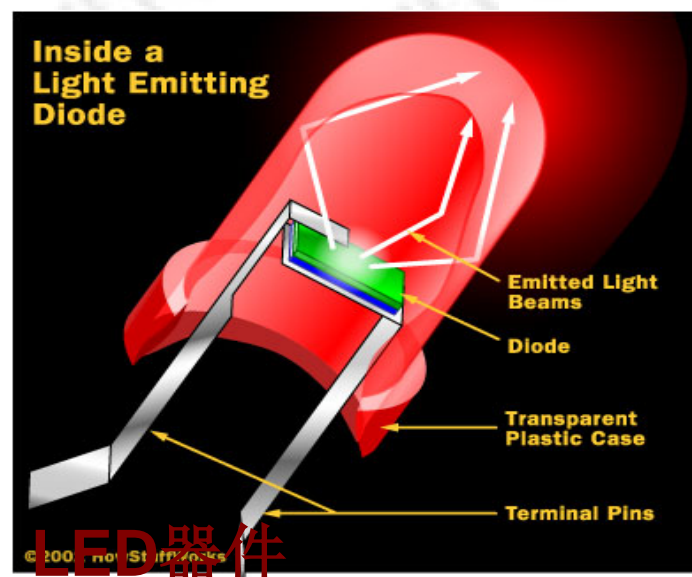
1. LED的热概念
2. 热阻与检测方法
  1. 体热阻与扩展热阻的概念与计算
  2. 热阻结构的概念
  3. 热阻与热阻结构的检测与应用
3. 双芯片封装高压LED的热特性分析
  1. 高压LED的需求背景
  2. 高压LED芯片技术与进展
  3. 双芯片封装高压LED的光电热特性分析
4. 热阻与与产品质量控制
  1. 封装质量与热阻结构
  2. 光源或灯具质量与热阻结构

# 1、LED热的概念

## LED器件与灯具基本结构

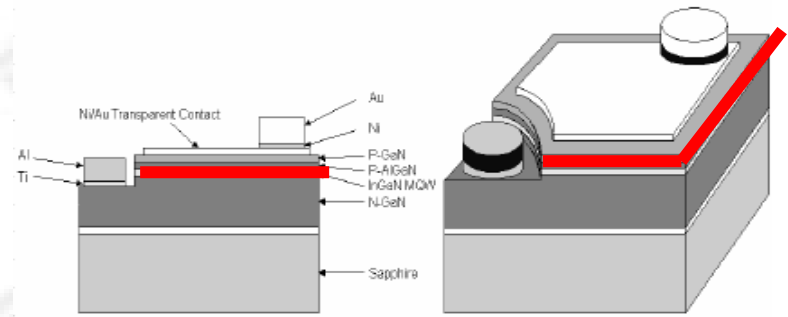


LED灯具



LED器件

Typical GaN LED Test Structure

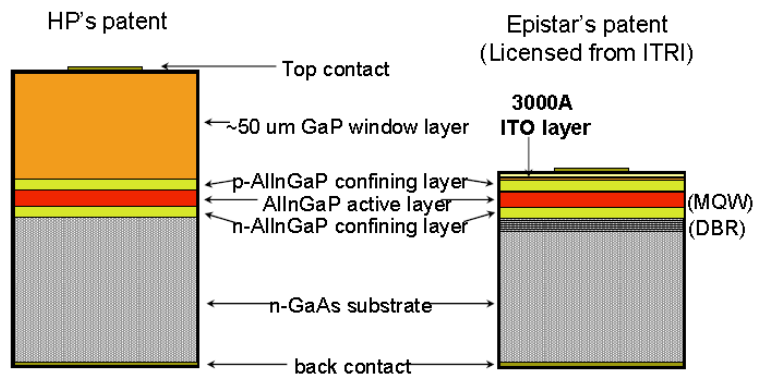


Key structure parameters:

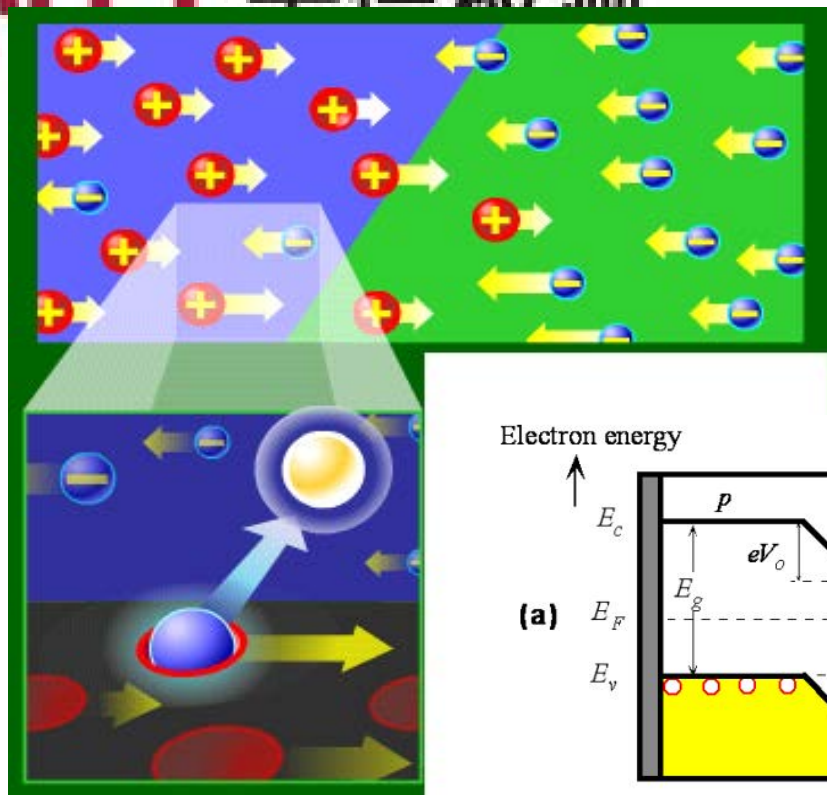
- N-GaN thickness  $\sim 4 \mu\text{m}$
- Mesa dimensions  $\sim 350 \mu\text{m}$
- Electron concentration in N-GaN from  $4 \times 10^{16}$  (undoped) to  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

LED芯片

AlInGaP LED Structure



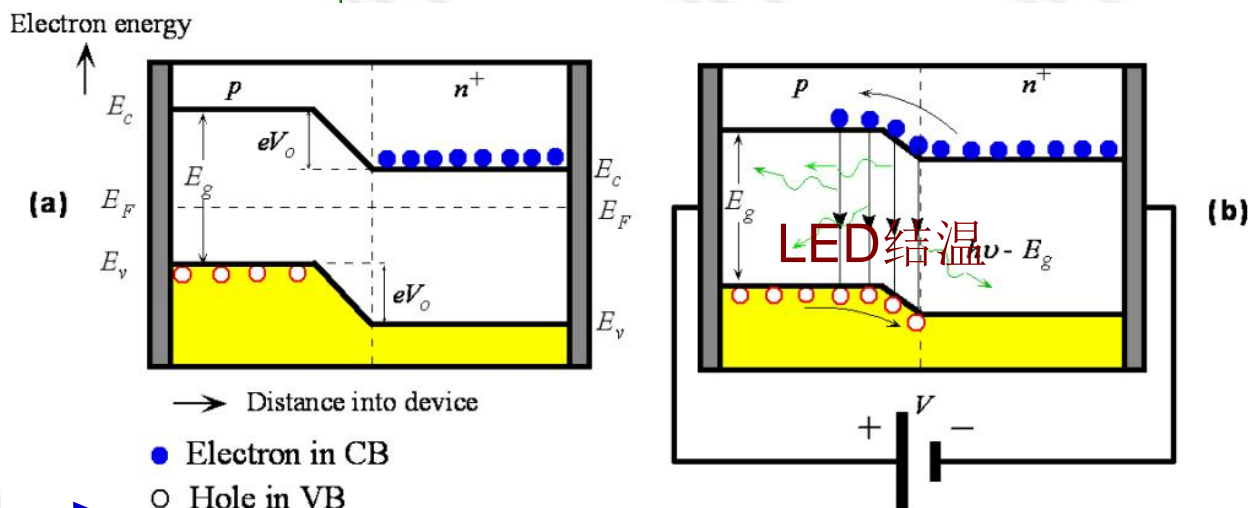
Courtesy of Epistar



②芯片材料及欧姆接触产生的焦耳热

③LED芯片电极与焊料间的接触电阻

用结温表示LED所处的热环境！



辐射复合 --- 光

非辐射复合 --- 热

结温与系统热阻与使用环境相关！

## LED生热原因

## 半导体照明光源的特点

- LED是温度敏感性器件
  - 输出光功率、中心波长、寿命均与温度相关：

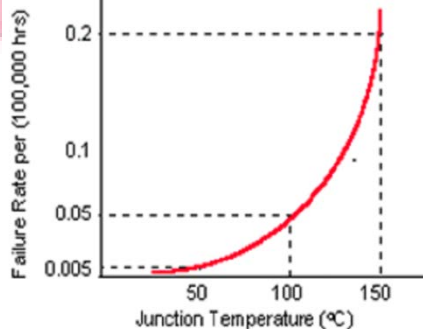
白光LED的制作方法：

- 蓝光LED+黄色荧光粉
- RGB--LED合成白光

- 将LED结温控制在合适范围内是实现半导体照明灯具稳定、高效、可靠、低成本的关键

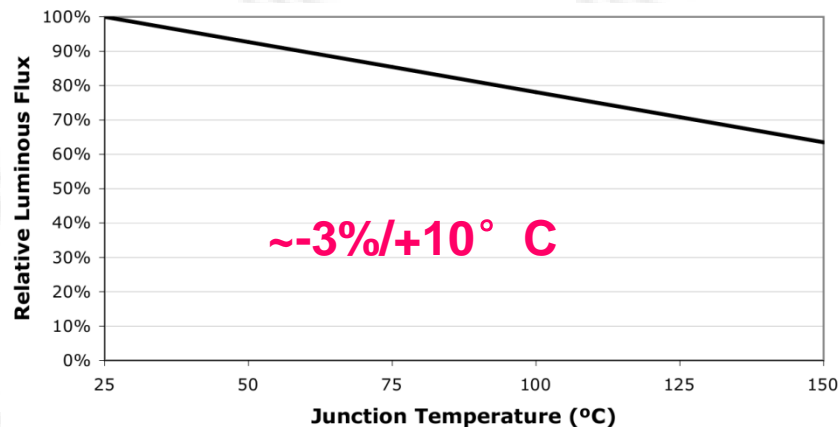


Junction Life Statistics

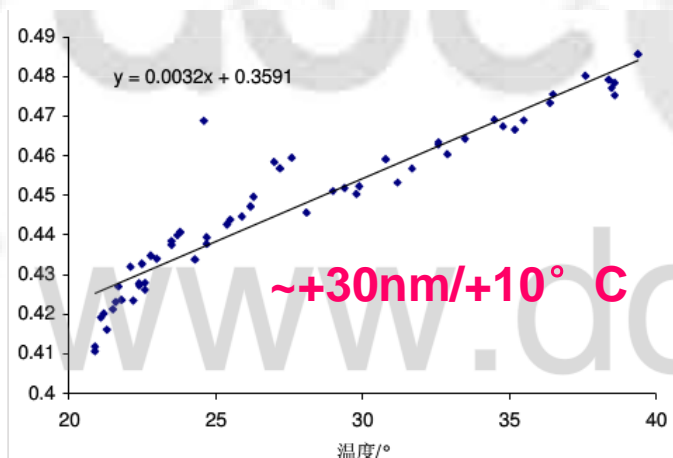
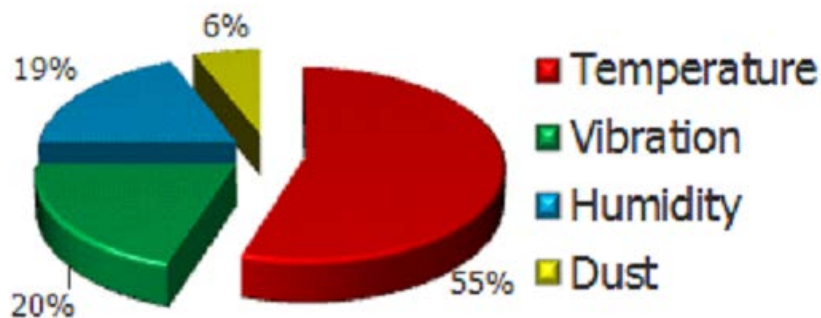


检测

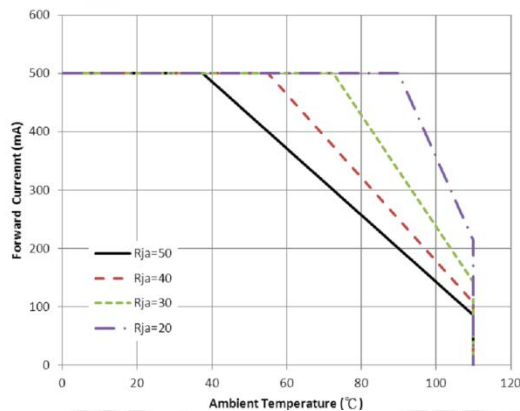
温升造成的失效率占全部的55%



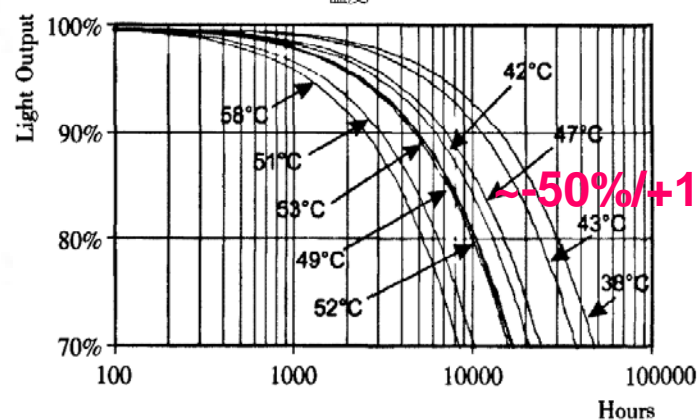
~-3%/+10° C



~+30nm/+10° C



良好的热设计至关重要！！

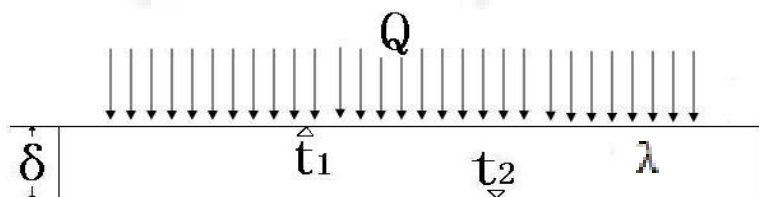


~-50%/+10° C

设计不佳的热阻使得LED在环境温度50° C时就不可以全额工作

图2 恒温控制箱中 Star LED 管脚温度与寿命的关系

## 2、热阻与检测方法



$$Q = \lambda A \frac{t_2 - t_1}{\delta} = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} = \frac{\Delta t}{R_{th}}$$

热阻公式

$$R_{th} = \frac{\delta}{\lambda A}$$

LED的热阻公式

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{Q} = \frac{T_j - T_a}{P_d} = \frac{T_j - T_a}{IV_L - P_O}$$

LED的体热阻

局限性：一维、稳态

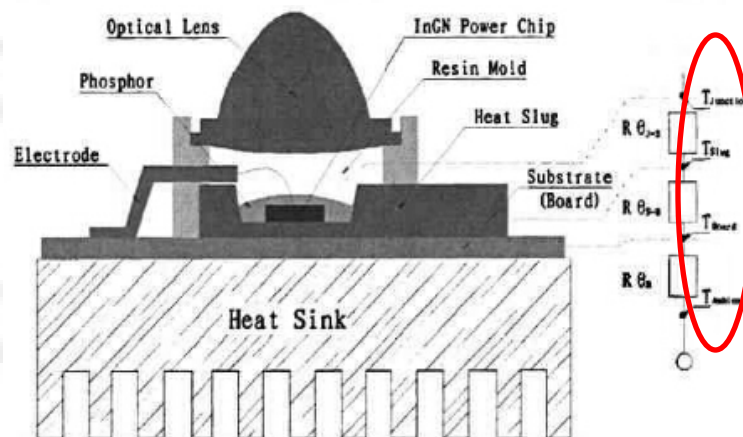
t	δ	λ	Q
t	1	1	1
2	δ	λ	Q
t	2	2	2

1、公式的精确度？

2、如何得到各层的热阻值？

$$R_{th} = \sum_{i=1}^n R_{thi}$$

$$\frac{1}{R_{th}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{thi}}$$

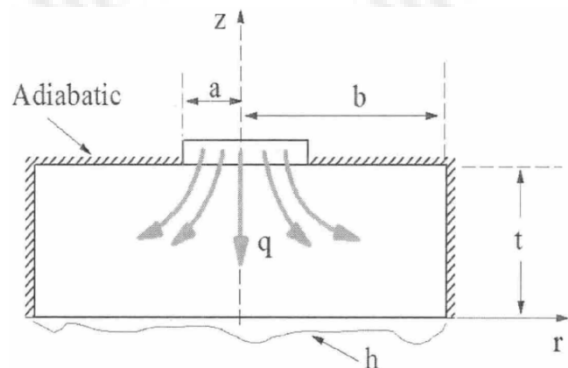




公式的精确度？

美信检测

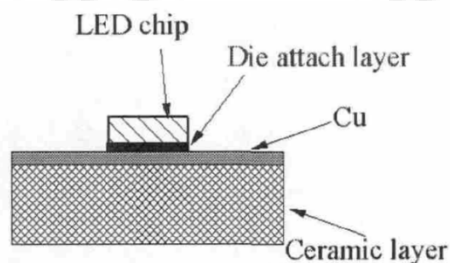
## 扩展热阻概念与处理思路



**定义：**热源尺寸小于散热器尺寸时，热源热流除在主传热方向（图中-Z方向）传导热量外，在横向（r方向）也传导热量。扩展热阻即为横向热流路径上的传热阻力分量。

泊松方程是常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程式

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0$$



陶瓷COB封装的LED器件的主要参数及体热阻值

	模型参数				体热阻 (K/W)
	长mm	宽mm	厚mm	热导率	
LED芯片	1	1	0.16	150	1.067
铜线路层	5	5	0.2	398	0.020
陶瓷基板层	18	18	1	20	0.154

陶瓷COB封装的LED器件的主要参数及扩展热阻值

参数	a (mm)	b (mm)	$\lambda$	$\Psi_m$	$R_{sp-chip}$	$R_{sp-cu}$
参数值	0.2821	1.4105	5.961	0.6496	1.632	4.239

铜电路层和陶瓷层的总扩展热阻为**5.871 K/W**，该陶瓷COB封装的LED器件的总热阻为体热阻与扩展热阻之和，为**7.11 K/W**。

一般情况下扩展热阻的影响不可忽略！



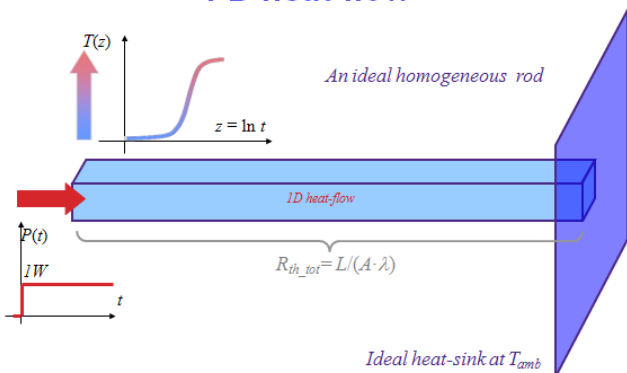
# 如何得到各层的热阻值?

## 热阻结构

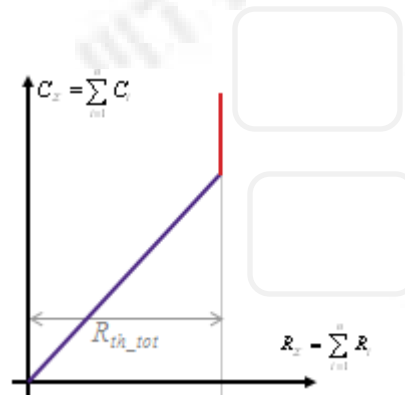
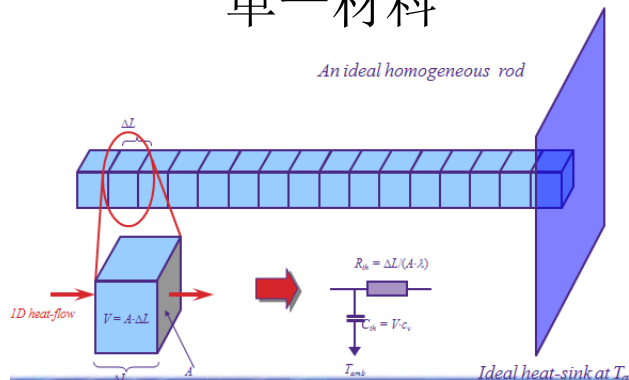
## 热阻热容结构函数!

- 目的: 获得LED器件、光源各层的热阻值
- 思路: 类似一直流电源给RC电路充电的瞬态过程

### 1 D heat-flow

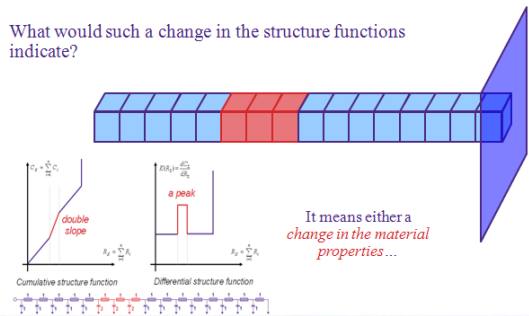


### 单一材料



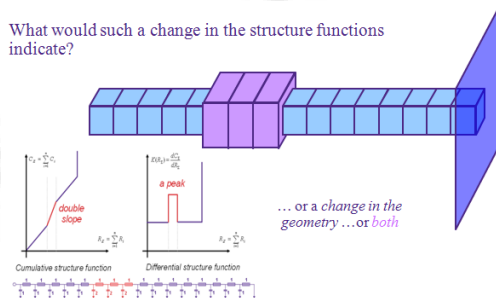
### 两种材料

What would such a change in the structure functions indicate?

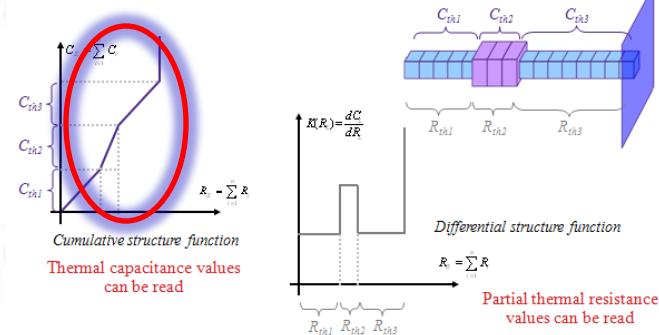


### 单一材料两种尺寸

What would such a change in the structure functions indicate?



What values can we read from the structure functions?

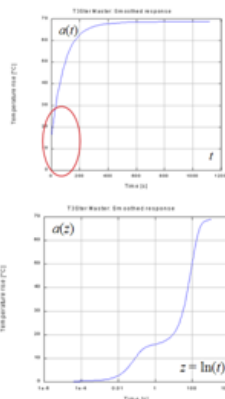


热阻-热容变化了!

- 方法：求解瞬态的方程或使用商用的流体力学仿真软件

时间轴采用对数坐标显示温度变化

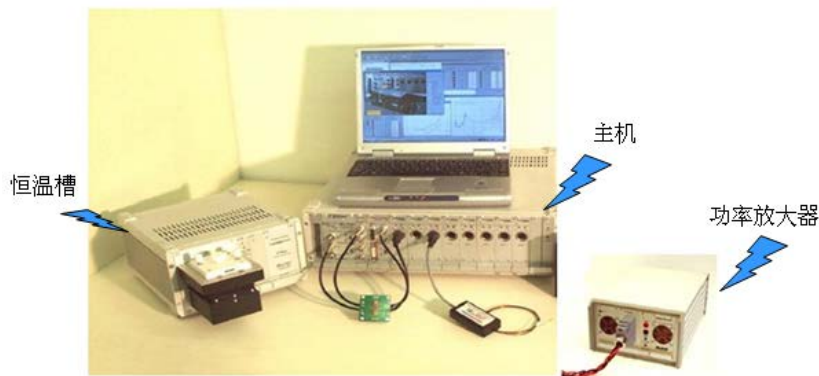
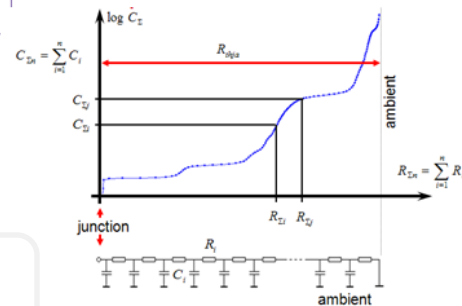
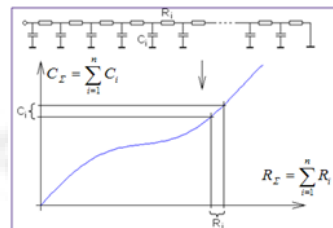
- The range of **possible time-constant values** in thermal systems spans over **5.6 decades** of time
  - 100 $\mu$ s ..10ms range: semiconductor chip / die attach
  - 10ms ..50ms range: package structures beneath the chip
  - 50ms ..1 s range: further structures of the package
  - 1s ..10s range: package body
  - 10s ..10000s range: cooling assemblies



复杂的数学处理

$$\bullet \text{ From } a(z) \text{ } R(z) \text{ is obtained as: } R(z) = \left[ \frac{d}{dz} a(z) \right] \otimes^{-1} w_z(z)$$

Cumulative Structure Function

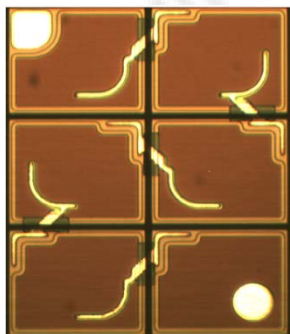


**T3ster**  
热特性测  
试仪器

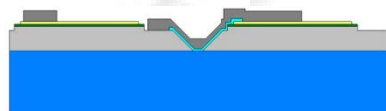
## 3、双芯片封装高压LED的热特性分析

1. 高压LED的需求背景
2. 高压LED芯片技术与进展
3. 双芯片封装高压LED的光电热特性分析

- 高压LED芯片：将LED元胞在结构片上完成电路串联的LED阵列

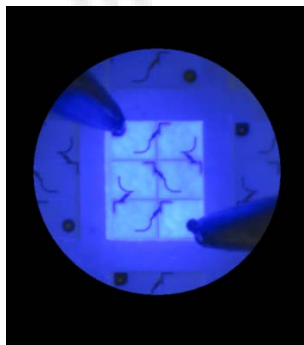


高压LED正面示意图



蓝宝石衬底  
N型GaN  
P型GaN  
绝缘层  
ITO  
焊点

高压LED剖面示意图



高压LED检测照片

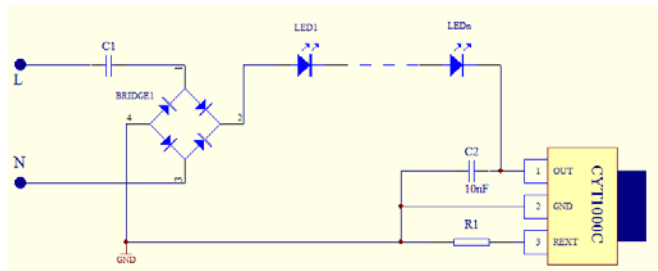
**特点：** 小电流、高电压工作模式

**优势：** 1、内量子效率；2、封装与成本；3、可靠性；4、体积小

**问题：** 热阻大、出光效率低

高压线性驱动IC的大面积应用促进了高压LED的发展！

## CYT1000A/B/C典型应用

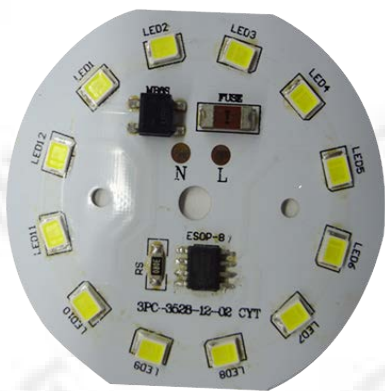


说明1：外置电阻设置电流(10-60mA)；

说明2：C1为降压时使用

## 高压线性驱动的技术优势

- 1、无电解电容、变压器等元器件，更长寿命；
- 2、外围器件精减，成本更低，可靠性更高；
- 3、内置高温降流保护单元，可靠性更高；
- 4、IC可与光源共用一个基板，适合大批量标准化作业。

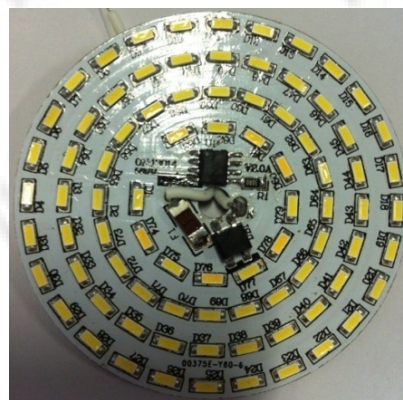


HV3528— 12PCS

## 7W球泡灯高压（18V） A与普通B的LED模组 结构示意图

### 高压LED器件：

- 1、高压芯片；
- 2、低压芯片封装一体；

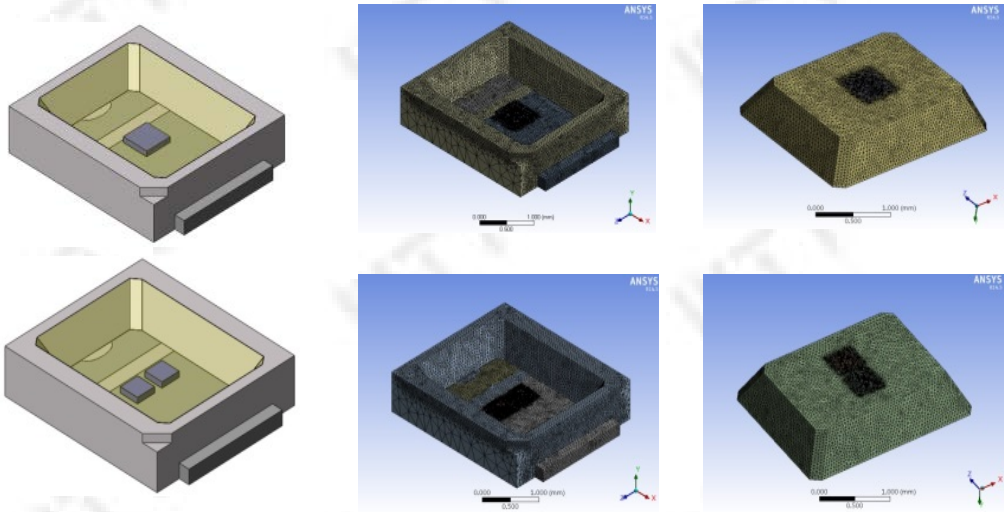


SMD3014— 83PCS

热学性能

- 单晶和双晶2835散热性能对比

前处理

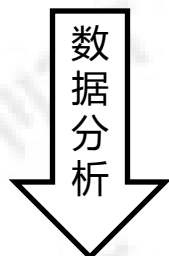
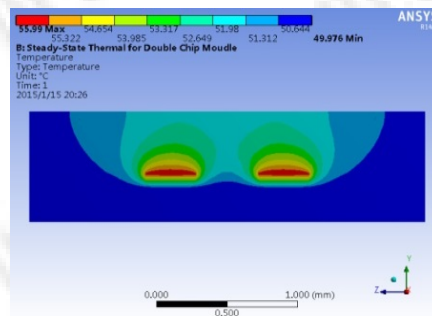
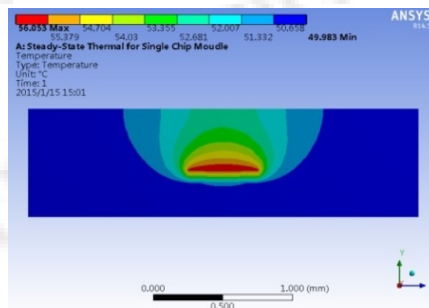


分析计算

简化模型	材料名称	导热系数 (w/mk)
	荧光粉层	0.12
	塑料支架	0.076
	Chip (蓝宝石衬底)	35
	银胶	18
	铜柱	387

### 热学性能

- 单晶和双晶2835散热性能对比



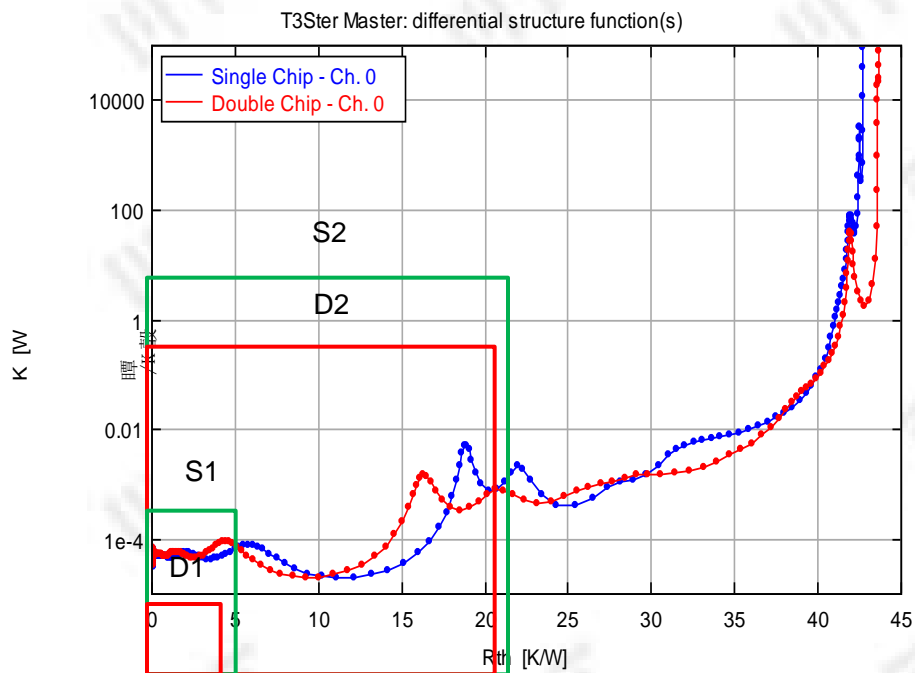
最高温度（芯片表面）：56.055°C和55.990°C；计算可知单晶芯片封装的LED模型热阻为16.147k/w，双晶芯片封装的LED模型热阻为15.973k/w；**双晶优于单晶。**

**原因分析：**将单颗芯片的热载荷平均分给尺寸上为单颗芯片一半的两颗LED芯片，只能说明双晶形式封装的2835能更充分利用该模型的散热能力。

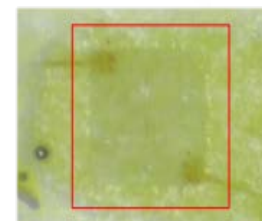
### 热学性能

- 单晶和双晶2835散热性能对比

**原因分析：**除了上述双晶封装形式能更充分利用模型本身的散热能力之外，双晶芯片较单晶芯片多出**两个光线出射面**，光线的引出效率增强，热阻减小。



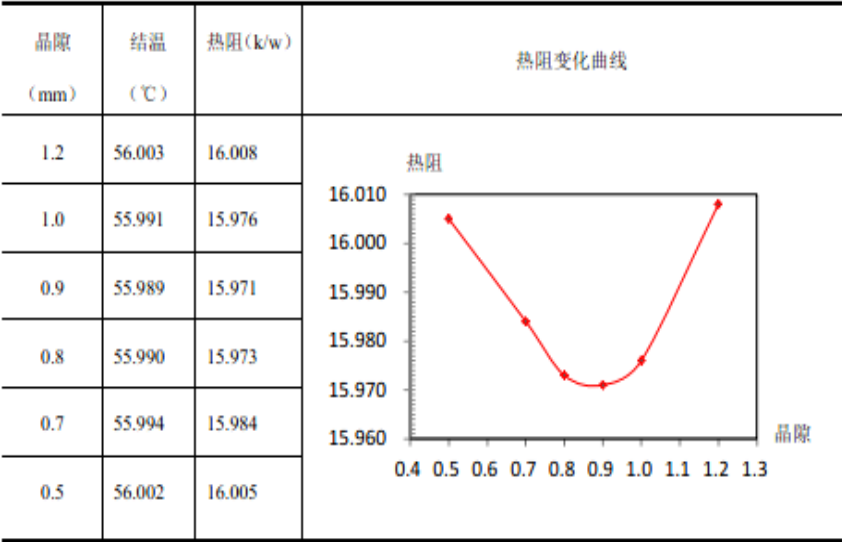
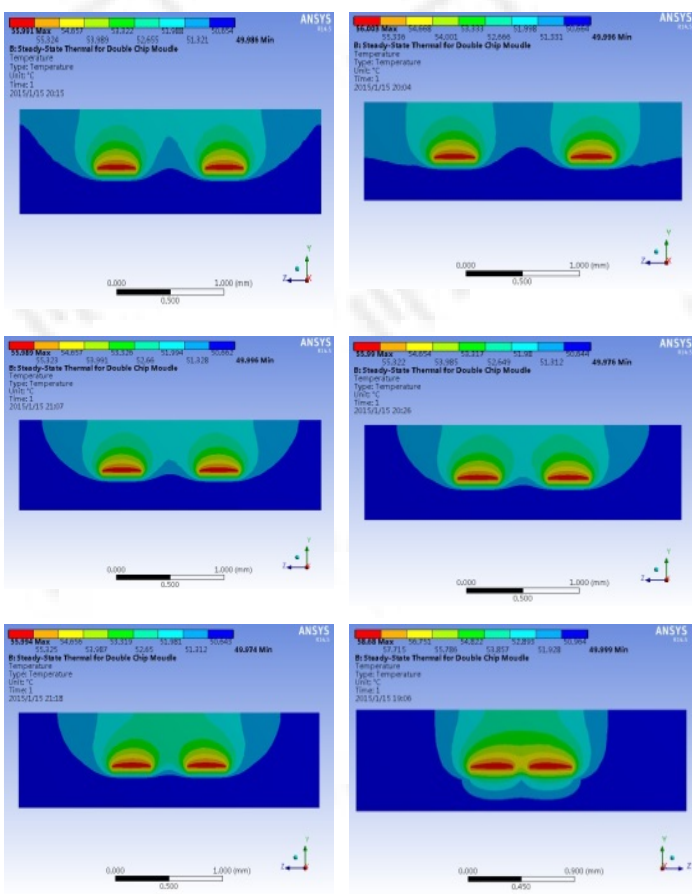
D1约为4.4K/W，S1约为5.6K/W；  
D2约为20.4K/W，S2约为21.8K/W。





热学性能-进一步研究两个芯片之间的距离（晶隙）对双晶灯珠散热能力的影响

- 晶隙对双晶2835散热性能的影响



双晶封装形式的LED灯珠可以通过控制晶隙得到器件的热阻最小值

- 单晶和双晶2835光学性能的比较

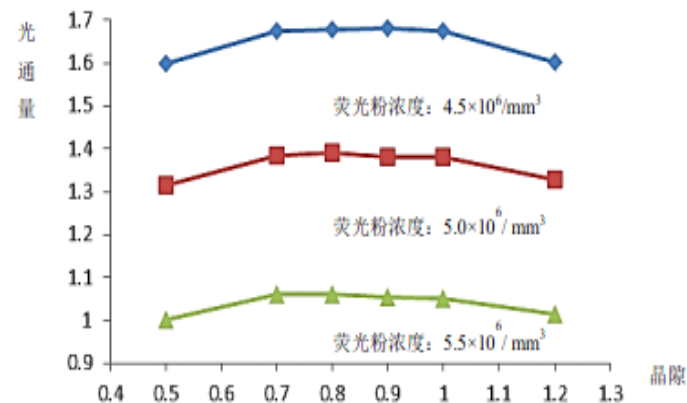
### 3. 相同色温条件下，荧光粉特性参数的变化规律

条件	色温 (K)	6000±2	5000±2	4000±2	3000±2
固定粒径550nm的密度 ( $\times 10^6/\text{mm}^3$ )	单晶	1.4446	1.6721	2.1601	3.6530
	双晶	1.5610	1.7932	2.3476	3.9310
固定密度 $3.0 \times 10^6/\text{mm}^3$ 的粒径 (nm)	单晶	394.59	415.99	463.54	655.88
	双晶	405.16	427.73	481.52	670.41

根据以上分析，得出结论：要想获得与单晶LED光源相同的色温，双晶LED光源需要**增加荧光粉的粒径或者提高荧光粉的密度**。

### • 晶隙对双晶2835光学性能的影响

荧光粉浓度 (/mm <sup>3</sup> )	晶隙 (mm)	光通量 (lm)
4.5 × 10 <sup>6</sup>	1.2	1.6033
	1.0	1.6746
	0.9	1.6801
	0.8	1.6772
	0.7	1.6754
	0.5	1.5981
5.0 × 10 <sup>6</sup>	1.2	1.3298
	1.0	1.3817
	0.9	1.3823
	0.8	1.3902
	0.7	1.3858
	0.5	1.3161
5.5 × 10 <sup>6</sup>	1.2	1.0153
	1.0	1.0523
	0.9	1.0534
	0.8	1.0612
	0.7	1.0605
	0.5	1.0023



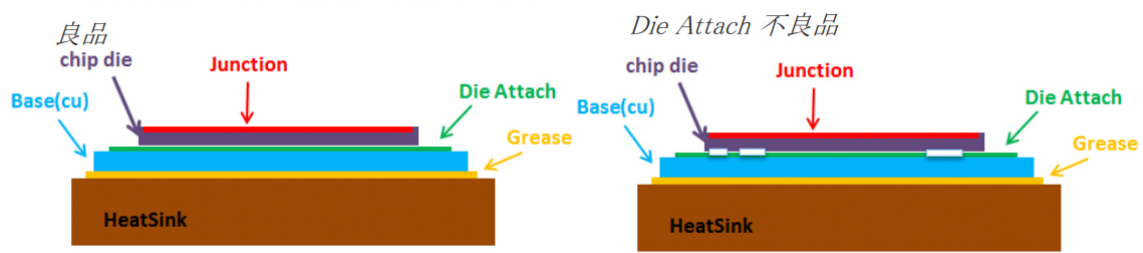
在不同的荧光粉浓度下，双晶封装形式的LED灯珠可以通过控制晶隙得到器件的光通量最大值

# 4、热阻与产品质量控制

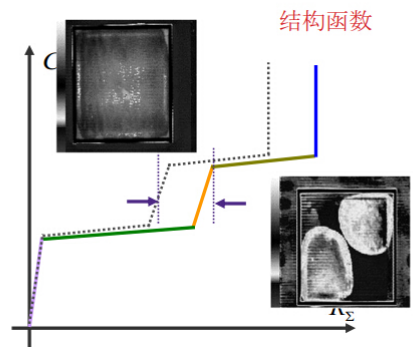
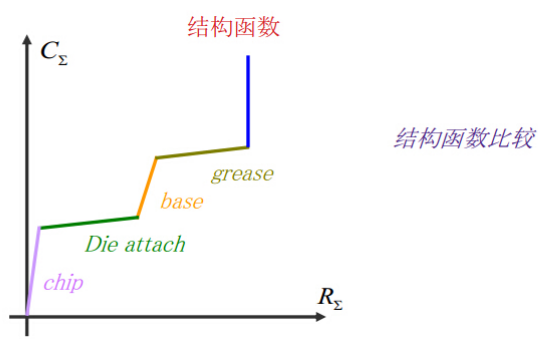
- 1. 封装质量与热阻结构
- 2. 光源或灯具质量与热阻结构

封装质量: { 来料质量  
                  工艺质量

■ 结构函数: 构造解析的有力工具



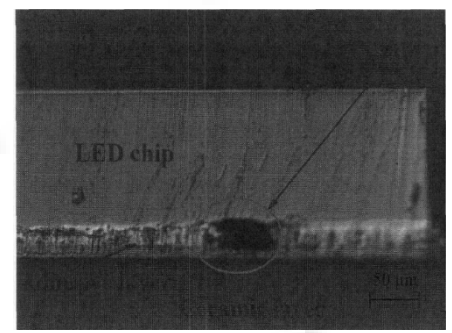
来料质量  
芯片 支架 贴片胶 光学胶



工艺质量  
焊料 (银胶) 厚度 焊料 (银胶) 孔隙率

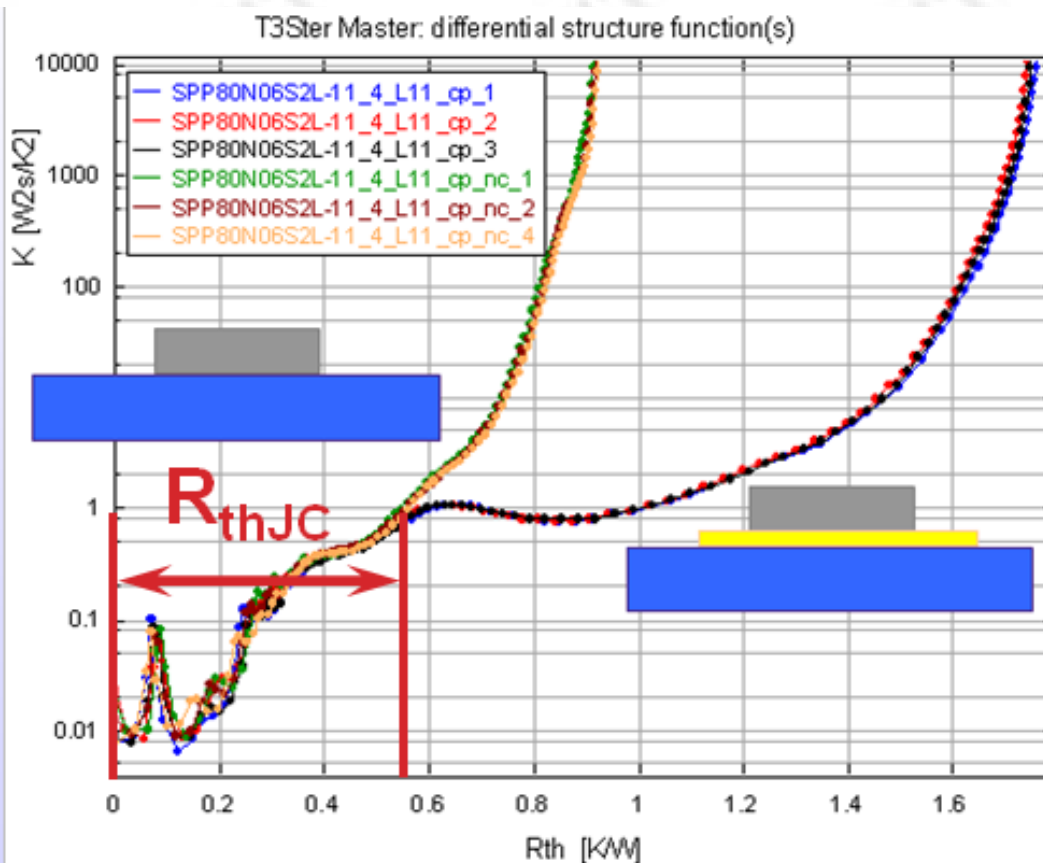
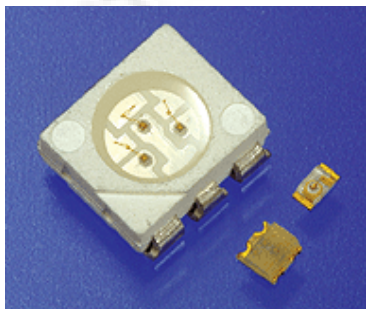
检测方法

- 1. 结构热阻检测法 (非破坏性, 综合信息);
- 2. X-RAY检测法 (非破坏性, 仅提供平面信息);
- 3. 剖面+扫描电镜 (破坏性, 仅提供剖面信息);



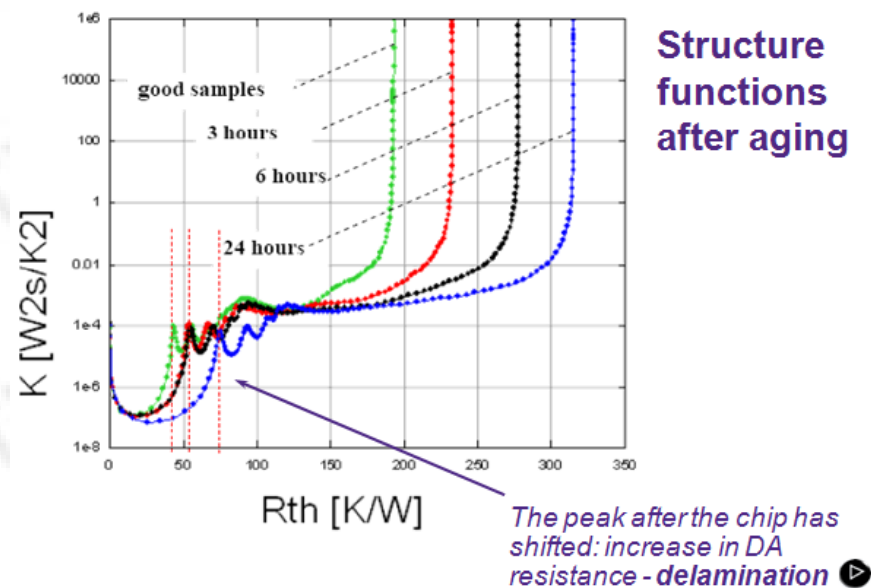
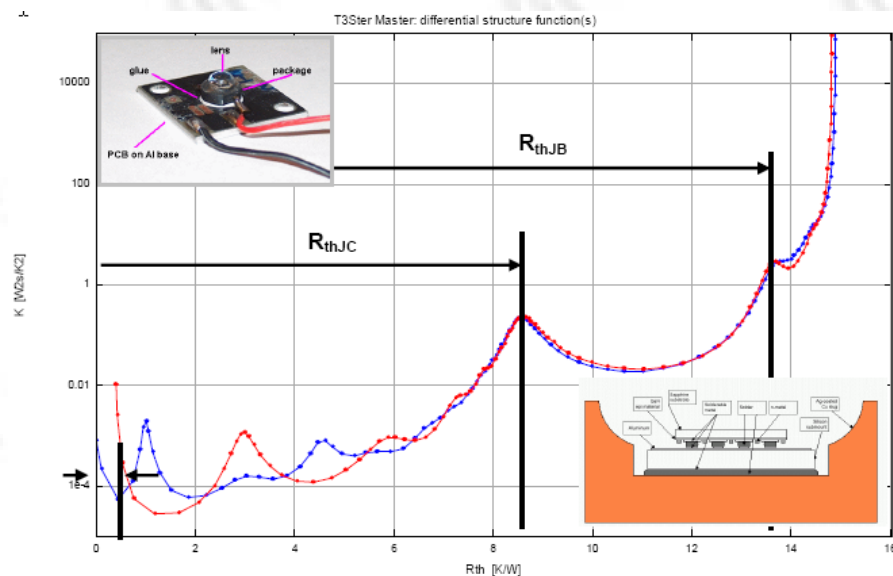
## 例一：LED贴片质量管理

同一批次LED器件热阻差异  
——银胶厚度差异



## 例二：LED贴片质量管理

同一LED器件不同时间热阻差异——导热胶？支架表面处理？



解剖后发现银胶与支架出现缝隙



# 例三：LED器件安装结构与散热质量评估

- 3 种不同的封装, TIMs 和 PCB:
  - FR4 PCB, TIM between the heat-slug and the Cu block



- FR4 PCB, heat-slug soldered to the Cu block



- MCPCB's made of Al and Cu, heat-slug soldered



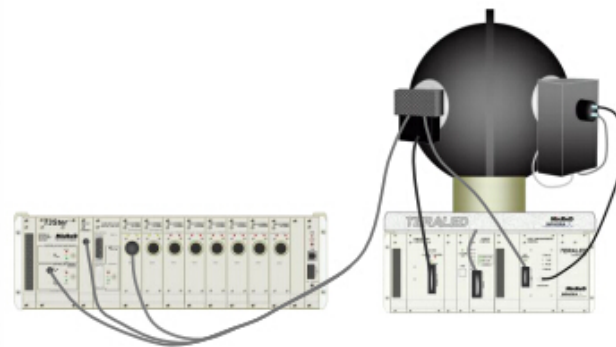
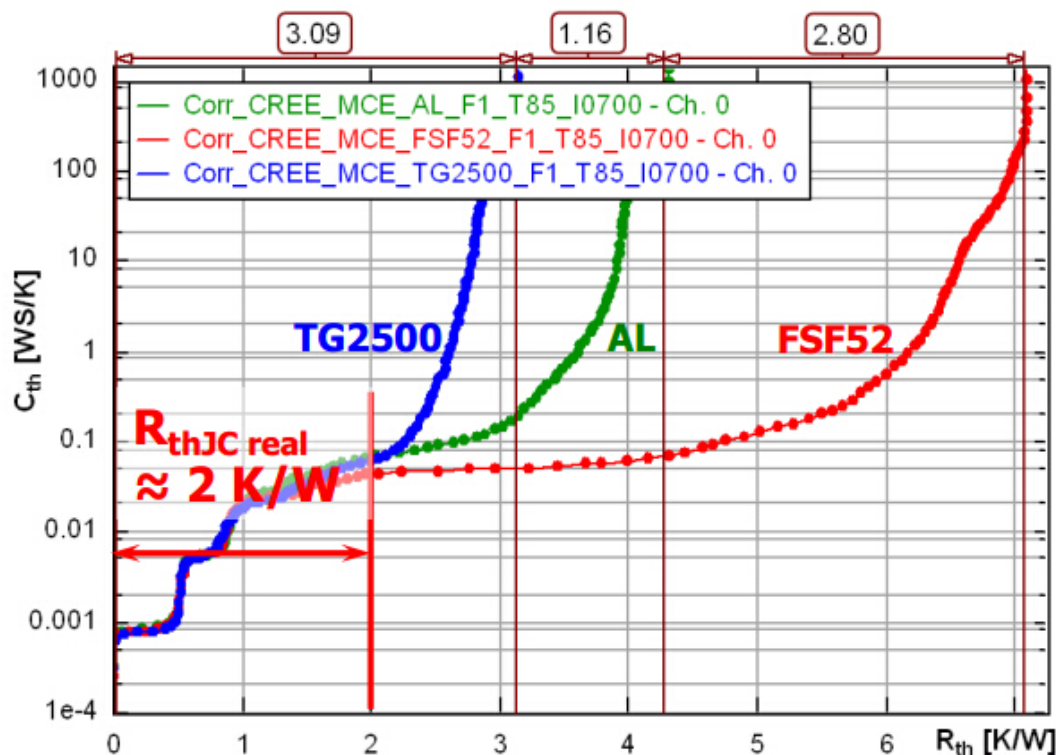
\* TIM, thermal interface material, 散热介质材料



# 美信检测

## 例三：LED器件安装结构与散热质量评估

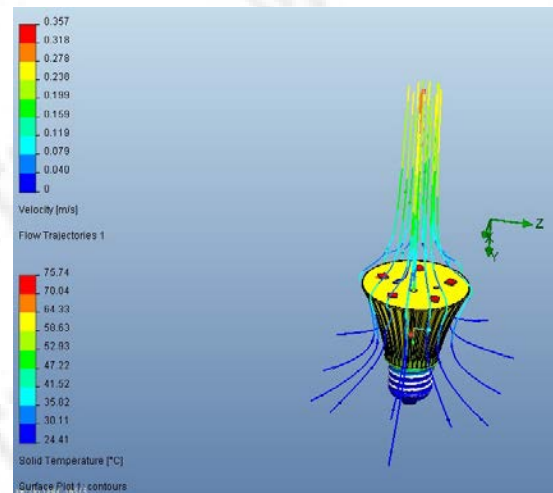
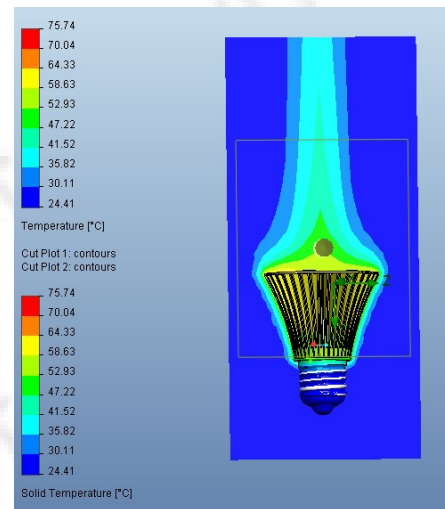
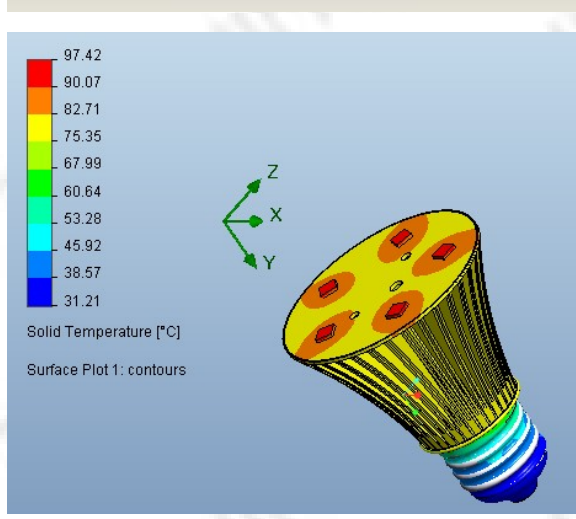
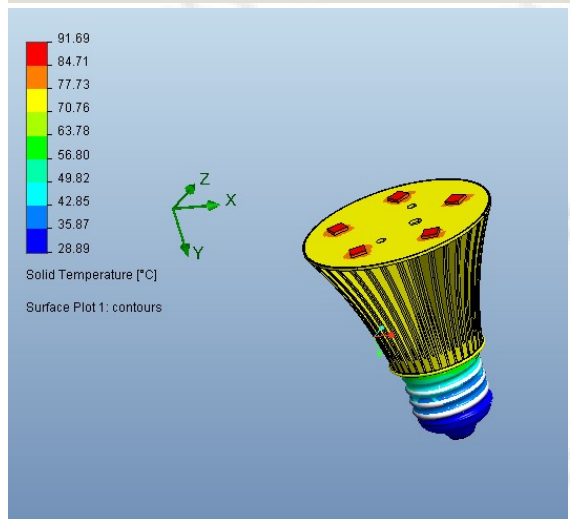
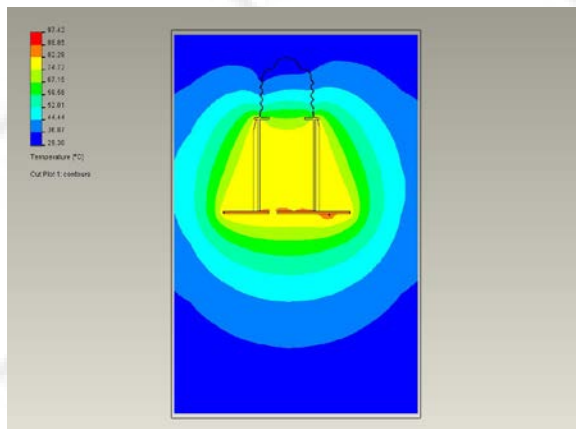
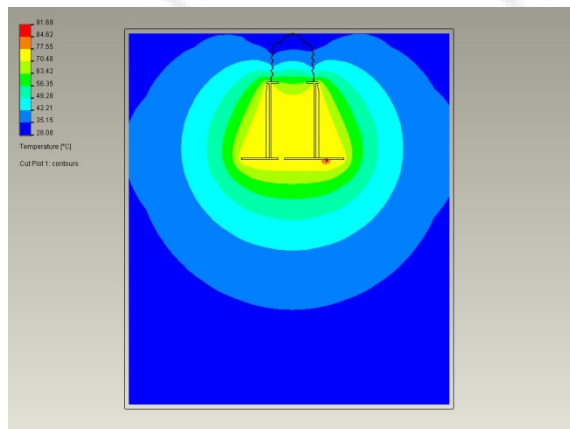
- 在700 mA和 85C进行测试
  - 3个样品的结构函数, 已经扣除光功率  $P_{opt}$
  - Datasheet上真实地  $R_{thJC}$  的确认



Test results by courtesy of Budapest University of Technology and Economics (KÖZLED Project, Hungary)

# 例四、美信检测LED球泡灯壳热阻评估测试

## ——计算机仿真法：LED球泡灯散热结构模拟研究



在室温25℃情况下，无对流，散热片辐射系数为0.9的热分析图

在室温25℃情况下，无对流散，散热片热辐射系数为0.5的热分析图

在室温为25℃情况下，有对流，散热片辐射系数为0.5的热分析图

## LED射灯灯具的热特性定量描述

- LED器件热阻 $R_d$ —
  - 热传导
  - 可测已知（供应商给出）
- LED灯盘模组热阻 $R_m$ —
  - 热传导为主，热辐射、热对流为辅
  - 可测已知
- LED灯具外壳 **外壳热阻 $R_c$** —
  - 热对流、热辐射为主、热传导为辅
  - $R_c = R_{CC}$ （对流）+  $R_{CR}$ （热辐射）
- LED灯具 **系统等效热阻 $R_s$** —
  - 测量 $R_s = R_d + R_m + R_c$ —灯具热特性的定量评估—控制质量
  - **求出 $R_c$ —灯具外壳热特性的定量评估，改进散热设计**
  - **通过 $R_s$ ，求出结温 $T_j$**

**引入外壳等效热阻  
和系统等效热阻！！**



## 初步实验:

- 使用两个底座部件:

3W—LED射灯



金属  
散热  
外壳



塑料  
散热  
外壳

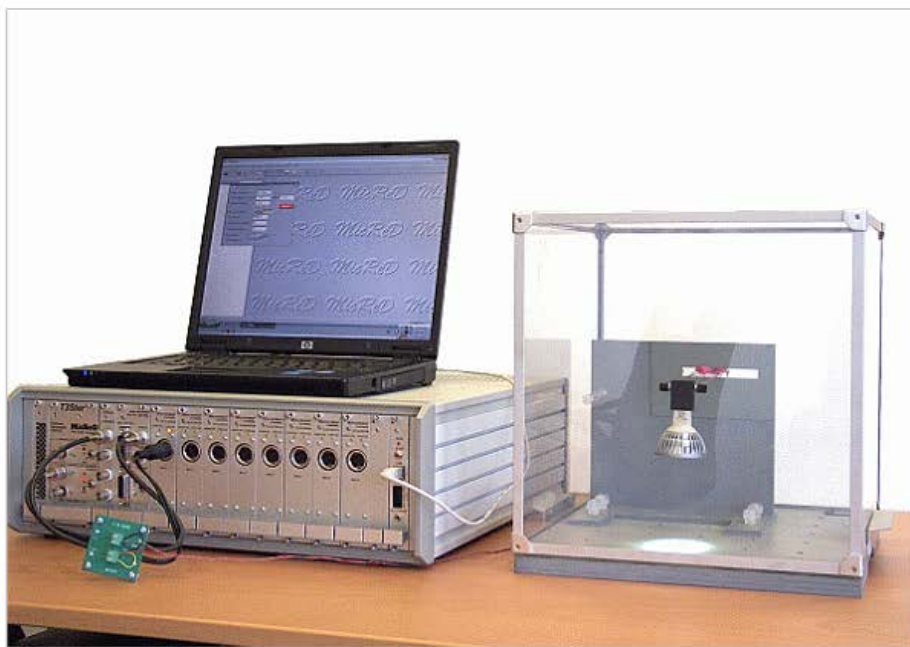


- 考察对象:  $R_{thJA}$  (结到空气中的热阻)

## 测试过程

无扰动恒温恒湿实验环境

环境温度：23° C



实验仪器：  
T3Ster热阻测试仪





# 美信检测

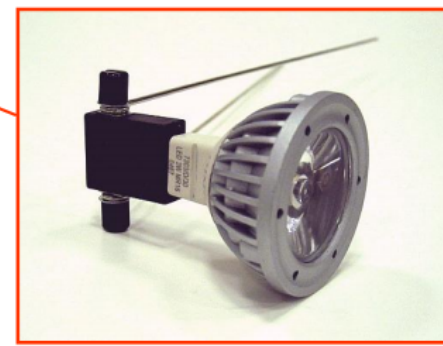
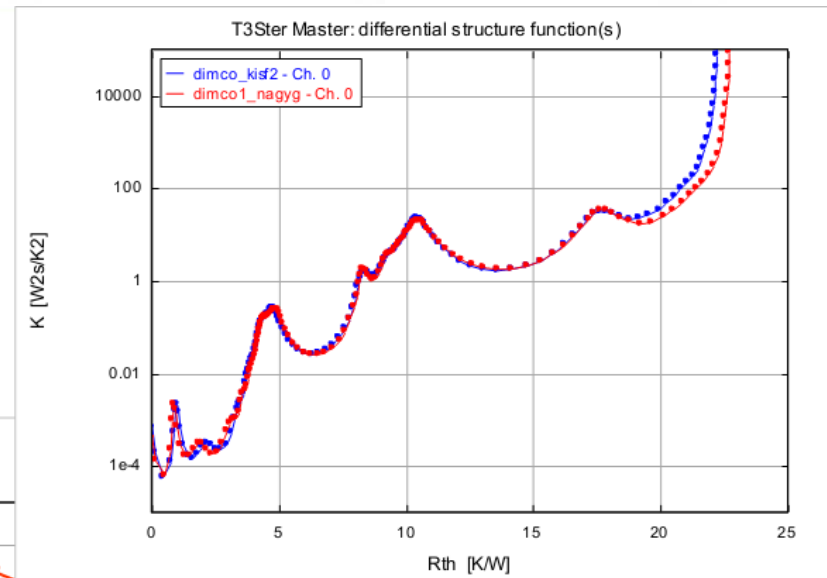
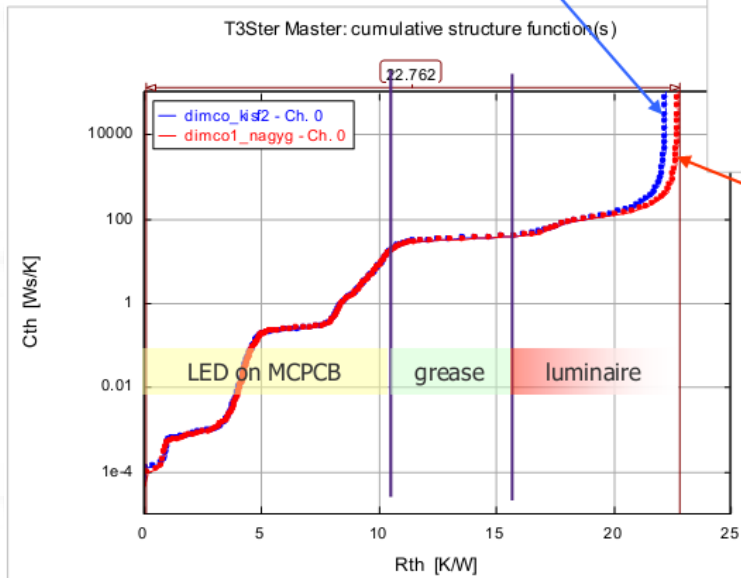
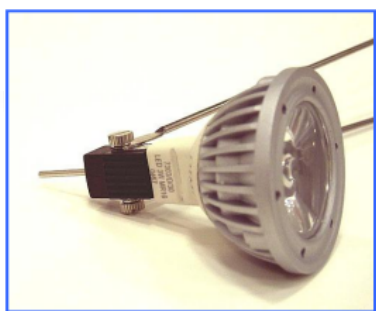
实验结果

金属散热外壳——

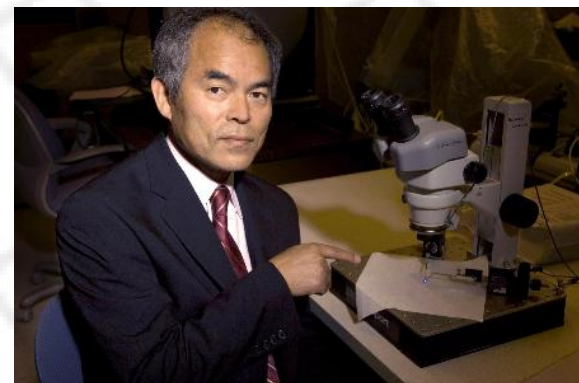
LED芯片、封装、铝基板热阻~10K/W，导热脂热阻~5K/W，外壳~7.5K/W，结温56.8℃；

塑料散热外壳——

LED芯片、封装、铝基板热阻~10K/W，导热脂热阻~5K/W，外壳~8.5K/W，结温57.8℃；

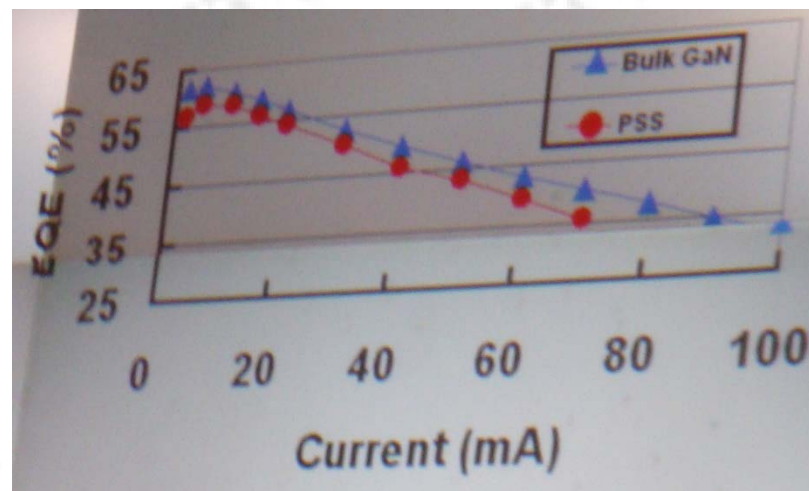


即使达到200lm/W，LED外量子效率仍不高，热管理是个长期的任务



Recent LED Progress in USCB

	LOP(mW)	EQE(%)
1、(0001)C-plane blue LED(PSS)	32.7	57.86
2、(0001)C-plane blue LED(Bulk)	33	60.4
3、(10-1-1) blue LED(Bulk)	30.6	53.73
4、(20-21) green LED(Bulk)	10.71	22.14



- 1、极性半导体外延生长+图形衬底（内量子效率90%）
  - 2、非极性材料Ga<sub>N</sub>同质衬底外延生长（内量子效率99%）
- \* 第七届中国国际半导体照明论坛  
“Shuji Nakamura报告内容”



# 国产LED器件、光源与国际一流水平的差距？

“形似”？ YES

“神似”？ NO

- 热阻与热阻网络数值？
- 封装热阻质量控制？
- 精确的光学近场模型？

LED成本控制中的寿命设计与评估？

LED成本控制中的质量设计与评估？



QCX-TB-3528

QCX-TF-5060

QCX-TF-5050



QCX-T-3528

QCX-TF-3528

QCX-T-3020

TOP\_LED



QCX-S-3806

QCX-S-3806-SD1

QCX-S-4008



QCX-S-2810-SD1

QCX-S-4008-SD1

QCX-S-2810

SIDE\_LED

谢谢