

高能量密度的LED紫外光源模组中的散热问题

麦科勒（滁州）新材料科技有限公司

成立于2016年7月。安徽滁州，靠南京70公里

1. LED封装: emitters, special lamps.
2. LED封装材料: thermal conductive, persistent luminescent, silver epoxy replacement。

www.maxlumtech.com

梅泽群

总经理。手机：158 5180 6867， 微信：zequn_mei

王峰

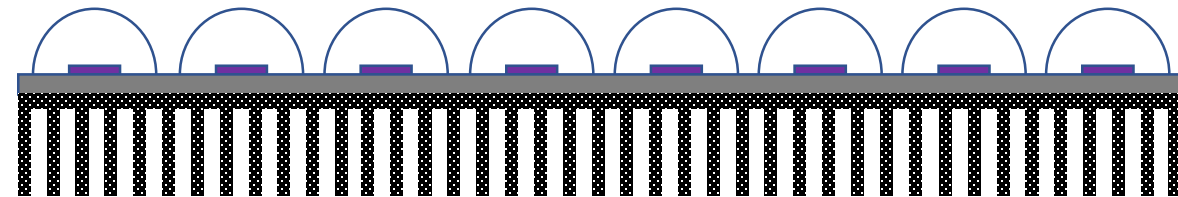
紫外产品总监。手机：186 2038 6805， 微信：UVLED_Nick)

背景介绍

- LED紫外光源模组：一种在导热电路板上将许多紫外LED芯片紧密地排列成行列矩阵的封装模式。
- LED芯片电能转光能30-40%，大部转成热能。散热不好，芯片节点升高：（1）发光效率下降，（2）寿命减少。
- 散热途径：热传导：芯片 => 陶瓷电路基板 => 散热器
界面：芯片/基板；基板/散热器
热对流：散热器 => 环境
- 封装的设计：增加横向热流；降低各层热阻。



40芯LED紫外光源模组



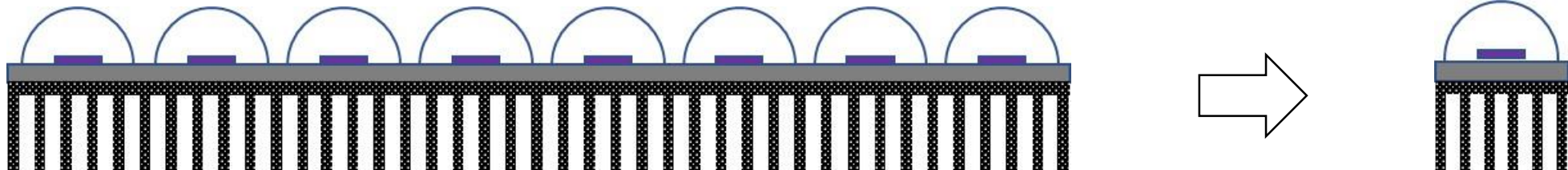
40芯LED紫外光源模组，横截面示意图

散热计算模型

- 目地：优化陶瓷电路板尺寸；发现散热瓶颈；估计热阻。
- 简单：EXCEL

第一步：multi-chip => single chip

假设除了地处边缘位置的芯片外，其它芯片的散热途径类似。这样，整块模组的散热计算简化成一个单颗芯片的散热问题。



散热计算模型 (continue)

第二步：Lee's 解析解，园柱形的热源和热通量管 (ASME/JSME Thermal Engineering Conf., V.4, ASME 1995, p199)

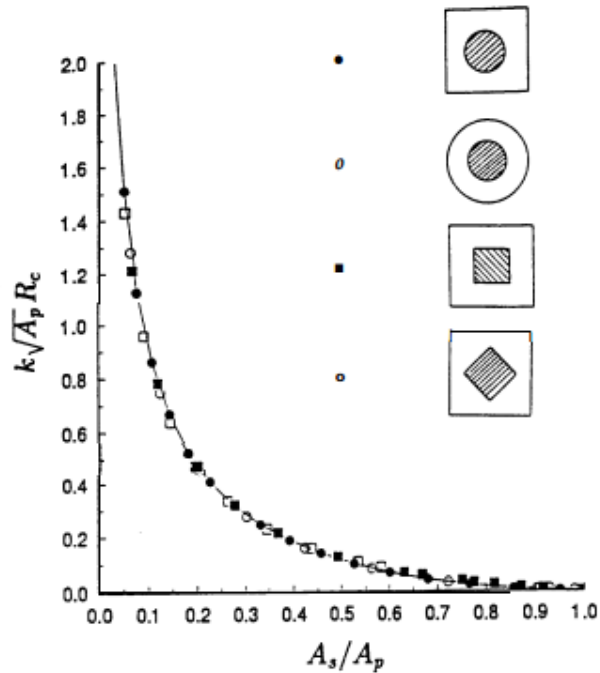
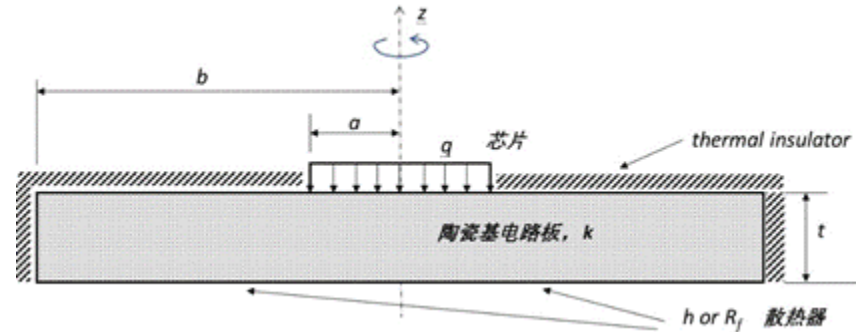


Figure 2: Dimensionless Resistance versus Dimensionless Source Area for Different Source Contours and Flux-Tubes (Naraghi and Antonetti, 1993)

用园柱代替方块求解热阻是准确的。



Lee's 园柱体模型，计算扩散热流热阻(spreading resistance)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

$$T = \frac{qa}{k} \left[\epsilon \left(\frac{1}{Bi} + \zeta \right) \right] \tag{9}$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n \epsilon) J_0(\lambda_n \gamma) \cosh(\lambda_n \zeta) \tanh(\lambda_n \zeta) + \frac{\lambda_n}{Bi}}{\lambda_n^2 J_0^2(\lambda_n) \cosh(\lambda_n \tau) \left(1 + \frac{\lambda_n}{Bi} \tanh(\lambda_n \tau) \right)}$$

$$\Psi_{max} = k\sqrt{A_s} R_{c,max} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n \epsilon)}{\lambda_n^2 J_0^2(\lambda_n)} \Phi_n \tag{20}$$

where

$$\Phi_n = \frac{\tanh(\lambda_n \tau) + \frac{\lambda_n}{Bi}}{1 + \frac{\lambda_n}{Bi} \tanh(\lambda_n \tau)} \tag{21}$$

详细见参考文献

散热计算模型 (continue)

第三步：Lee's 近似解，园柱形的热源和热通量管（ASME/JSME Thermal Engineering Conf., V.4, ASME 1995, p199）。Error < 10%, b/a < 4; underestimation of spreading R.

$$a = \frac{\sqrt{As}}{\sqrt{\pi}} \quad b = \frac{\sqrt{Ap}}{\sqrt{\pi}} \quad \epsilon = \frac{a}{b}$$

As为热源的接触面积， Ap为陶瓷基板的面积

$$\tau = \frac{t}{b} \quad Bi = \frac{h * b}{k}$$

k 和 t 为陶瓷基板的热传导系数和厚度， h 陶瓷基板底部的热交换系数

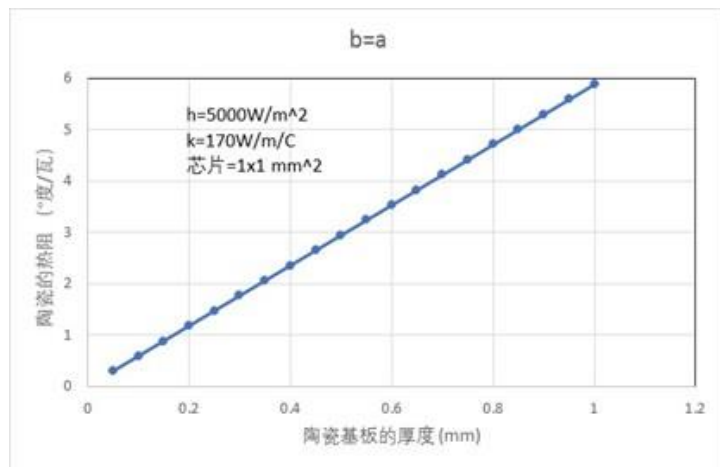
$$\Phi = \frac{\tanh(\lambda * \tau) + \frac{\lambda}{Bi}}{1 + \frac{\lambda}{Bi} * \tanh(\lambda * \tau)} \quad \lambda = \pi + \frac{1}{\epsilon \sqrt{\pi}}$$

$$\Psi_{max} = \frac{\epsilon * \tau}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - \epsilon) * \Phi \quad R_{陶瓷基} = \frac{\Psi_{max}}{k * a * \sqrt{\pi}}$$

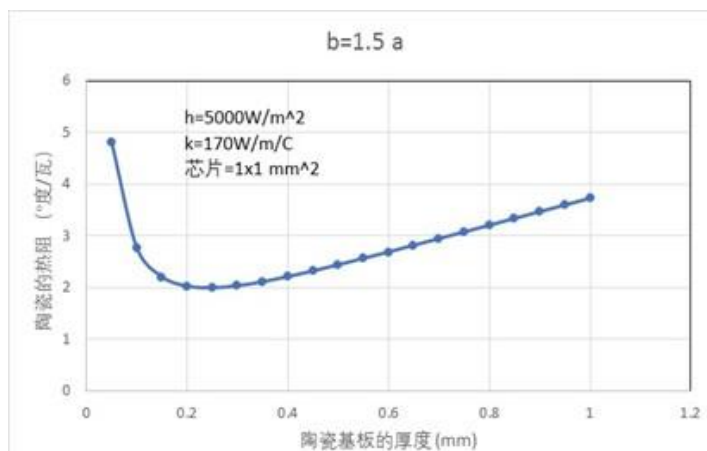
thickness, mm	τ	λ _c * τ =	Φ _c	Ψ _{max}	Ψ _{wave}	R _m	R _f	R _{sp}	R _{m+Rsp}	R _{total}
0.05	0.0354	0	5.923	2.0049	1.3763	0.0471	32	11.793	11.840	43.84
0.10	0.0709	0	3.123	1.0573	0.7258	0.0941	32	6.219	6.313	38.31
0.15	0.1063	0	2.189	0.7411	0.5088	0.1412	32	4.360	4.501	36.50
0.20	0.1418	1	1.740	0.5890	0.4043	0.1882	32	3.465	3.653	35.65
0.25	0.1772	1	1.486	0.5031	0.3454	0.2353	32	2.959	3.195	35.19
0.30	0.2127	1	1.330	0.4502	0.3091	0.2824	32	2.648	2.931	34.93
0.35	0.2481	1	1.229	0.4159	0.2855	0.3294	32	2.446	2.776	34.78
0.40	0.2836	1	1.160	0.3928	0.2697	0.3765	32	2.311	2.687	34.69
0.45	0.3190	1	1.114	0.3770	0.2588	0.4235	32	2.218	2.641	34.64
0.50	0.3545	2	1.081	0.3660	0.2512	0.4706	32	2.153	2.623	34.62
0.55	0.3899	2	1.058	0.3582	0.2459	0.5176	32	2.107	2.624	34.62
0.60	0.4254	2	1.042	0.3526	0.2421	0.5647	32	2.074	2.639	34.64
0.65	0.4608	2	1.030	0.3487	0.2394	0.6118	32	2.051	2.663	34.66
0.70	0.4963	2	1.022	0.3458	0.2374	0.6588	32	2.034	2.693	34.69
0.75	0.5317	2	1.016	0.3438	0.2360	0.7059	32	2.022	2.728	34.73
0.80	0.5672	3	1.011	0.3423	0.2350	0.7529	32	2.014	2.767	34.77
0.85	0.6026	3	1.008	0.3413	0.2343	0.8000	32	2.008	2.808	34.81
0.90	0.6381	3	1.006	0.3405	0.2338	0.8471	32	2.003	2.850	34.85
0.95	0.6735	3	1.004	0.3400	0.2334	0.8941	32	2.000	2.894	34.89
1.00	0.7090	3	1.003	0.3396	0.2331	0.9412	32	1.997	2.939	34.94

陶瓷基板的最佳厚度

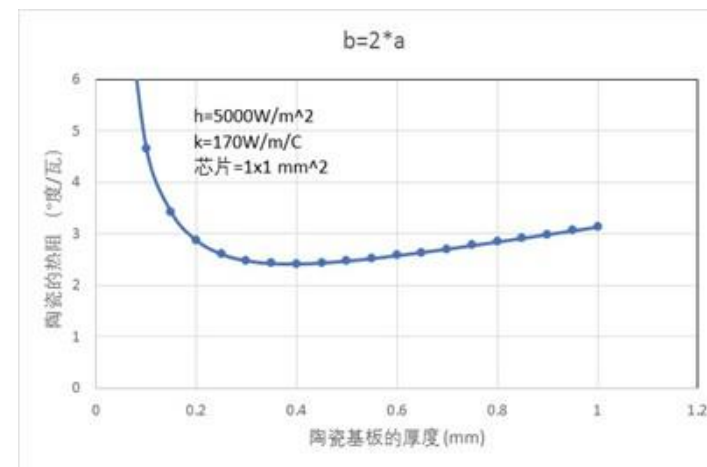
假设：AIN陶瓷($k=170$ 瓦/米/度)，热交换系数 $h=5000$ 瓦/平方米， $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 芯片。



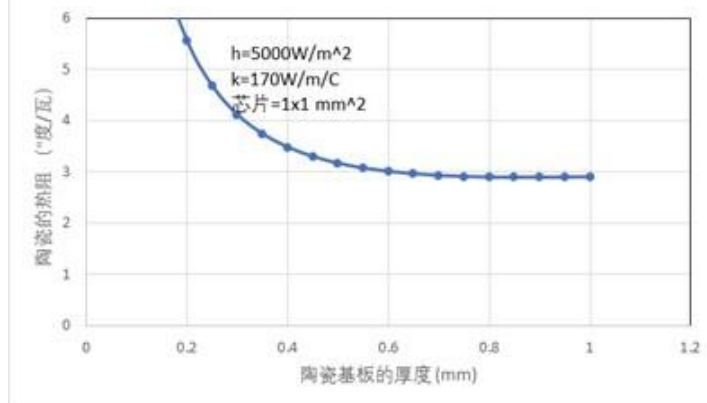
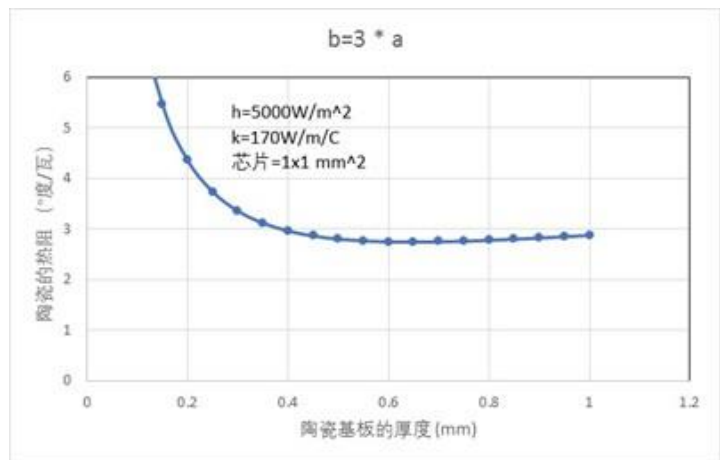
芯片和陶瓷板面积相同，无横向热流，陶瓷基板的热阻与其厚度成正比。



陶瓷基板的半径是芯片的 1.5 倍，其面积是芯片的 2.25 倍。陶瓷基板厚度增加，横向热流增加，热阻下降。进一步增加厚度，横向热流逐渐饱和，陶瓷基板的热阻与其厚度成正比。存在最佳厚度 ($=0.25 \text{ mm}$)，在此厚度陶瓷热阻最小。



陶瓷基板的半径是芯片的 2 倍，其面积是芯片的 4 倍。类似图五，存在最佳厚度 ($=0.4 \text{ mm}$)，在此厚度，陶瓷热阻最小。



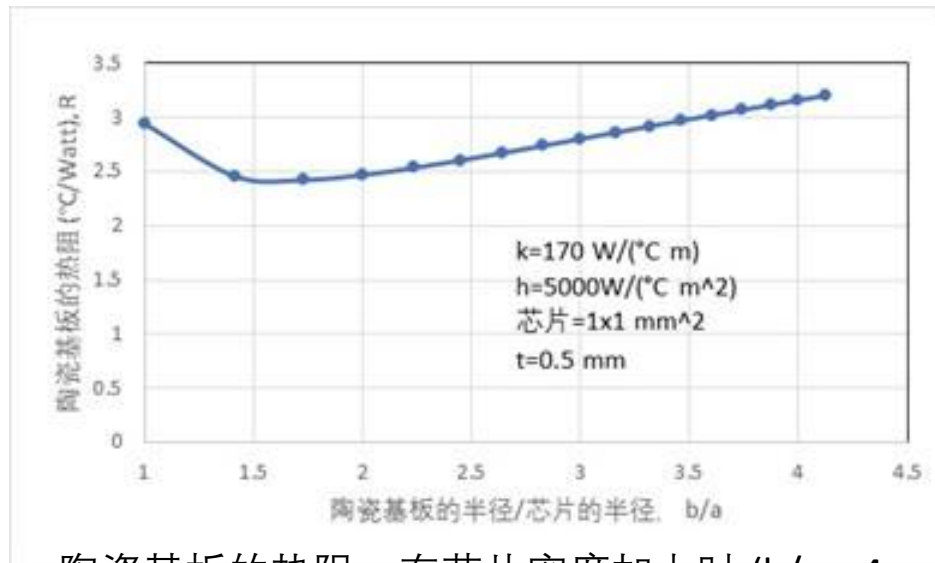
最佳厚度和其相关的陶瓷热阻。

Thickness, b	最佳厚度, mm	最小热阻, W/(°C m)
b=1.5 a	0.25	1.99
b=2.0 a	0.4	2.41
b=2.5 a	0.5	2.62
b=3.0 a	0.65	2.75
b=3.5 a	0.75	2.83

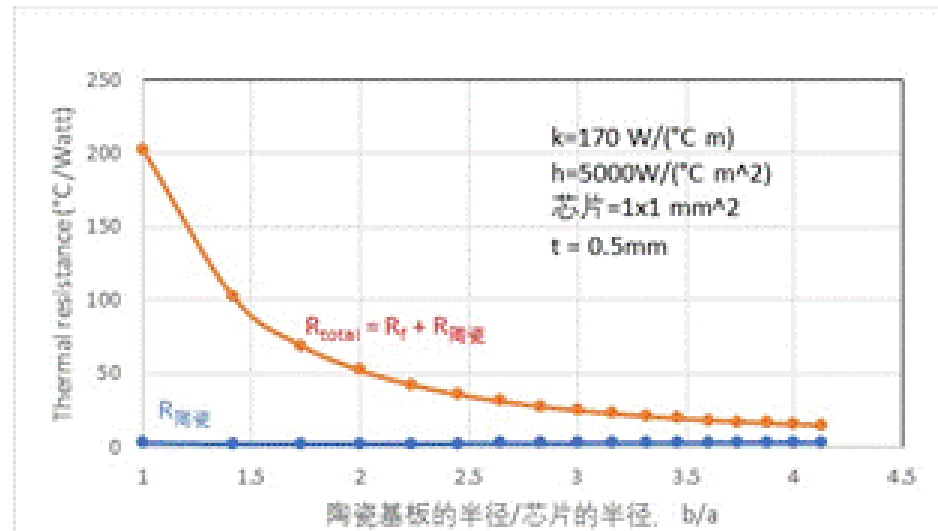
$a = \sqrt{1/\pi} = 0.564$

增加芯片密度？

假设：AlN陶瓷(k=170瓦/米/度)，热交换系数h=5000瓦/平方米，1x1 mm² 芯片，t=0.5 mm



陶瓷基板的热阻，在芯片密度加大时 (b/a = 4, => b/a = 1)，变化不大，2.4 W/°C – 3.2 W/°C。



总热阻，在芯片密度加大时 (b/a = 4, => b/a = 1)，急剧上升。而陶瓷基板部分的热阻显得忽略不计

$$R_{total} = R_{陶瓷基} + R_{散热器} \quad R_{散热器} = 1 / (h * A_p)$$

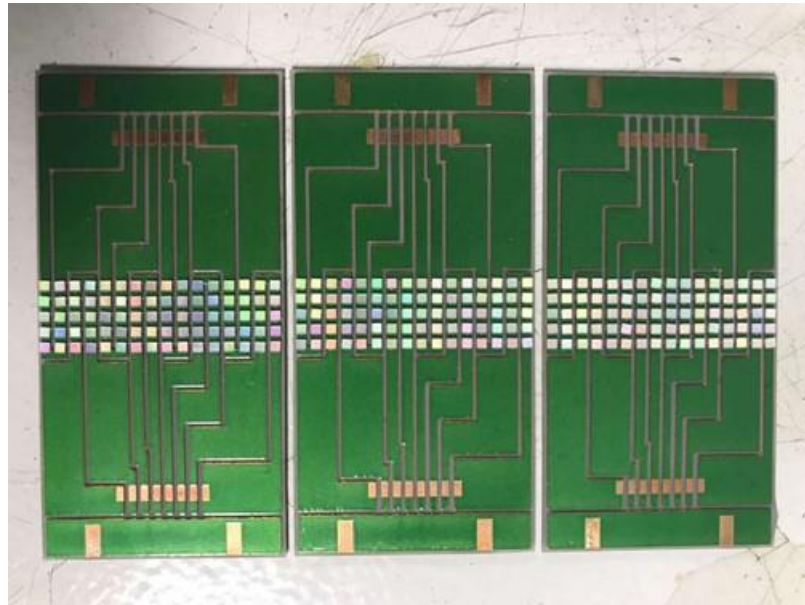
h 是水冷的热交换系数，A_p是水冷的热交换面积。对于强制对流，水冷的热交换系数一般在1000 – 15000 Watt / (°C m²)之间。

增大水冷散热面积

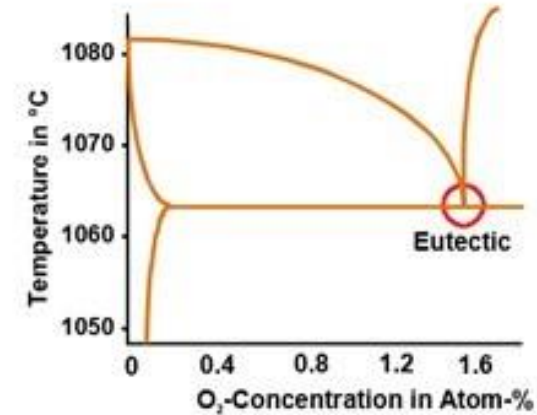
DBC(Direct Bonded Copper) 基板和 Flip Chip 模组



DBC 基板的截面。上铜片与芯片粘贴，促进芯片发热的横向流动。下铜片与水冷散热器粘贴，扩大水冷热交换的面积



DBC上的 Flip-chip 模组: 芯片中心间距是1.5 mm。



铜-氧相图的共晶点：1065 °C / 1.5 at%

加热到1065°C- 1080°区间，在铜和陶瓷接合的表面通氧气，铜的表面氧化，由于共晶反应而熔化，和陶瓷面粘在一起

界面粘接方法对热阻的影响

两个界面：(1) 芯片和陶瓷基板；(2) 陶瓷板和水冷散热器
两种粘接方法：(1) 银胶；(2) 焊锡

	热传导系数,瓦/米/°C
银胶	2
焊锡(SAC)	60
焊锡(80Au20Sn)	58

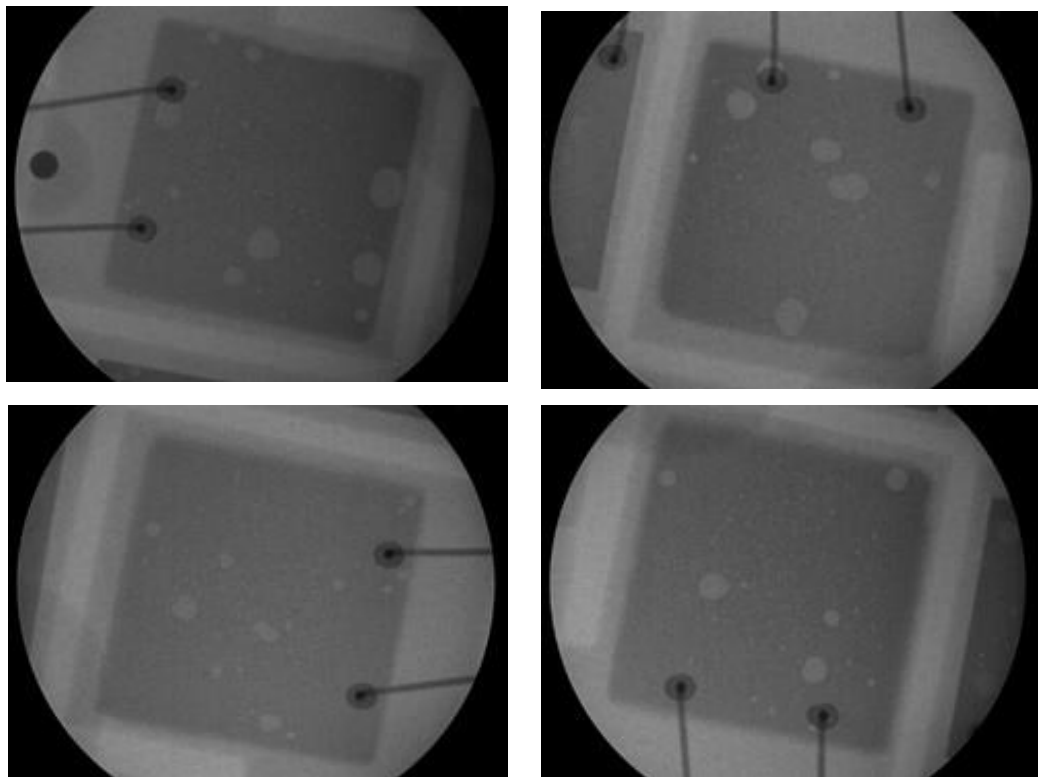
焊锡的粘结层厚度是银胶的一半。这是因为焊锡膏的体积，约一半是树脂，另一半是焊锡金属。当焊锡膏加热到焊锡金属的熔点温度以上时，部分树脂挥发，没有挥发的被融化成团的焊锡金属挤出粘接层。银胶则不同，在银胶固化温度，银粉和树脂始终混在一起。

$$\frac{R_{\text{银胶}}}{R_{\text{焊锡}}} = \frac{\frac{t_{\text{银胶}}}{k_{\text{银胶}} A_{\text{银胶}}}}{\frac{t_{\text{焊锡}}}{k_{\text{焊锡}} A_{\text{焊锡}}}} = \frac{k_{\text{焊锡}} t_{\text{银胶}}}{k_{\text{银胶}} t_{\text{焊锡}}} = \frac{60 \cdot 2}{2 \cdot 1} = 60$$

银胶界面的热阻可以是焊锡界面热阻的60倍

界面粘接方法对热阻的影响 (continue)

芯片 / 陶瓷基板界面



减少空洞是焊接工艺的关键

陶瓷基板 / 散热器 界面



US patent: 8587019, Nov 19 2013

总结

1. 建立了一个计算陶瓷基电路板热阻的模型。计算公式之简单，可用EXCLE 软件完成。
2. 根据模型计算我们发现，一般情况下，陶瓷基电路板存在一最佳厚度，在此厚度，其热阻最低。这是因为，厚度开始增加时，热的横向流动增加，热阻降低；随着厚度的进一步增大，热的横流逐渐充分，热通量管长度引起的热阻增加成为主导。
3. 通过热分析，我们还发现，增加芯片密度后，陶瓷基电路板的热阻变化不大，但水冷散热器的热阻增大，成为总热阻中的主要贡献因子。这是因为水冷热交换面积随着芯片密度的增加而减少。
4. 我们公司推出DBC 陶瓷基电路板，和用此基板做的高芯片密度的紫外光模组。此基板的结构是两层0.2mm厚的铜片中夹一片0.5mm 厚的氮化铝。上下两层厚铜片，增大了热的横向流动。
5. LED芯片/陶瓷的界面和 陶瓷/水冷散热器的界面的两种粘结方法：银胶和焊锡。简单数值分析显示，银胶界面的热组约是焊锡界面热阻的60倍。我们公司的产品中，主要用焊锡。