접합 소재에 따른 고출력 플립칩 LED 패키지 특성 연구

이태영¹ · 김미송¹ · 고은수² · 최종현² · 장명기² · 김목순³ · 유세훈^{1,†}

¹한국생산기술연구원 용접접합기술센터, ²이아이라이팅, ³인하대학교 금속공학과

Properties of High Power Flip Chip LED Package with Bonding Materials

Tae-Young Lee¹, Mi-Song Kim¹, Eun-Soo Ko², Jong-Hyun Choi², Myoung-Gi Jang²,
Mok-Soon Kim³, Sehoon Yoo^{1,†}

¹Welding and Joining Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

²EI Lighting, Incheon 404-170, Korea

³Dept. of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(2013년 12월 17일 접수: 2014년 3월 13일 수정: 2014년 3월 17일 게재확정)

초 록: 고출력 LED 패키지의 열적 경로(thermal path)를 줄이기 위해 플립칩 본딩법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 Au-Sn 열압착 본딩 및 Sn-Ag-Cu(SAC) 리플로우 본딩을 이용하여 본딩 특성 및 열적특성을 비교 평가 하였다. Au-Sn 열압착 본딩은 50 N에서 300°C의 접합온도로 본딩하였고, SAC 솔더는 솔더페이스트를 인쇄한 후 리플로우법으로 피크온도 255°C에서 30 sec에서 본딩하였다. SAC 솔더를 사용한 LED 패키지의 전단강도는 5798.5 gf/mm²로 Au-Sn 열압착 본딩의 3508.5 gf/mm²에 비해 1.6배 높았다. 파단면과 단면분석 결과 Au-Sn, SAC 솔더 모두 LED 칩 내부에서 파단이 일어나는 것을 관찰하였다. 반면 Au-Sn 열압착 본딩 샘플의 열저항은 SAC솔더 접합 샘플에 비해 낮았으며, SAC 솔더 접합부 내부의 기공에 의해 열저항이 커짐을 알 수 있었다.

Abstract: Flip chip bonded LED packages possess lower thermal resistance than wire bonded LED packages because of short thermal path. In this study, thermal and bonding properties of flip chip bonded high brightness LED were evaluated for Au-Sn thermo-compression bonded LEDs and Sn-Ag-Cu reflow bonded LEDs. For the Au-Sn thermo-compression bonding, bonding pressure and bonding temperature were 50 N and 300°C, respectively. For the SAC solder reflow bonding, peak temperature was 255°C for 30 sec. The shear strength of the Au-Sn thermo-compression joint was 3508.5 gf/mm² and that of the SAC reflow joint was 5798.5 gf/mm. After the shear test, the fracture occurred at the isolation layer in the LED chip for both Au-Sn and SAC joints. Thermal resistance of Au-Sn sample was lower than that of SAC bonded sample due to the void formation in the SAC solder.

Keywords: LED, Flip-chip bonding, Au-Sn, Sn-Ag-Cu, Thermal resistance

1. 서 론

최근 전 세계적으로 수은등의 중금속 사용에 대한 환경규제 뿐만 아니라 전 세계적으로 에너지 절감 및 온실가스 감축 정책을 추진하고 있는 가운데 전체 전력 소비량의 약 20%를 차지하고 있는 조명 분야에서도 기존 조명을 대체할 친환경, 저 전력, 고효율의 LED 조명이 각광 받고 있다. LED 패키지는 열에 대한 의존도가 매우 크며, 이 열을 효과적으로 패키지 밖으로 방출하지 못하면 10°C 온도 차이만으로도 LED의 수명은 반으로 줄어

들게 된다.¹⁻⁴⁾ 따라서, LED 패키지의 열관리는 고효율 LED 패키지를 개발 하는데 있어서 매우 중요하다. 일반적인 전자패키지와 같이 LED패키지도 와이어본딩 또는 플립칩 본딩으로 칩본딩을 실시하게 된다. 플립칩 본딩은 p-n 접합부에서 발생된 열의 이동경로가 와이어본딩에 비해 짧기 때문에 열저항이 낮은 칩본딩 방법으로 알려져 있다.⁵⁻⁹⁾ 플립칩 LED 패키지에 사용되고 있는 접합소재는 Au-Sn, Sn-Ag-Cu(SAC), 접착제 등이 있다. Au-Sn(Au-20wt%Sn) 솔더는 융점이 278°C로 높은 열전도도 및 우수한 강도를 갖고 있어 광전자소자에 많이 사용되

[†]Corresponding author
E-mail: yoos@kitech.re.kr

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1. (a) Optical micrograph of LED chip, (b) Schematic view of LED chip.

고 있다.¹⁰⁾ SAC 솔더는 전자패키지에서 많이 사용되고 있는 접합소재 중 하나이며, 융점이 217~220°C로 Au-Sn 보다 낮은 온도에서 접합할 수 있어 공정 중 열에 의한 결함이 줄어든다는 장점이 있다. 접착제는 낮은 열전도도 때문에 LED에서 사용되지 않고 있으나, 최근 높은 열전도도를 갖는 소재들이 개발되고 있어, 향후 플립칩 LED에 사용될 것으로 전망되고 있다.

본 연구에서는 플립칩 LED에 사용될 것으로 전망되고 있는 Au-Sn 솔더와 SAC 솔더 2종의 접합 소재를 사용하여 플립칩 LED 패키지를 제조하였다. Au-Sn은 열압착 플립칩법을 사용하였고, SAC솔더는 솔더페이스트 인쇄후 리플로우법을 사용하였다. 제조된 LED 패키지로 접합강도 및 파단면을 비교 분석하였고, 열저항을 측정하여 방열특성을 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 LED 칩은 CHIMEI사의 2W LED 칩이다. Fig. 1은 LED 칩의 평면 및 단면 이미지를 보여주고 있다. LED칩의 패드는 3-5 μm 의 Au-20wt%Sn이 증착되어 있으며, 열압착 플립칩 접합시 LED칩 패드의 Au-Sn이 용융되어 접합이 이루어지게 된다. LED칩을 실장하기 위한 패키지 기판은 알루미늄 베이스의 금속 기판을 사용하였고, Fig. 2에 이미지를 나타내었다. 패키지 기판 위의 패드 표면처리는 electroless nickel immersion gold (ENIG)이었다. Au-Sn 플립칩 접합시에는 열압착 플립칩법으로 LED칩의 패드와 기판의 ENIG층을 직접 접합하였고, SAC 솔더 본딩시에는 기판 패드 위에 Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu 솔더페이스트를 인쇄한 후 LED칩을 솔더페이스트 위에 마운팅하고 리플로우를 실시하여 접합하였다. 두 접합소재가 적용되어 접합된 LED 패키지의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. Au-Sn 열압착 플립칩 본딩은 50 N의 접합하중을 사용하였고, 플립칩 접합 툴의 온도는 390°C, 기판의 온도는 150°C이었고, 이 때 접합부의 실측 온도는 300°C였다. Si 또는 폴리머 베이스의 기판을 사용

Fig. 2. (a) Schematic view and (b) optical micrograph of metal substrate.

Fig. 3. Schematic diagram of fabricated flip chip LED package. (a) Au-Sn and (b) SAC solder.

하는 일반적인 열압착 플립칩의 경우 툴과 접합부의 온도는 최대 10°C 정도 밖에 차이가 나지 않는다. 하지만, 본 연구에서 사용되어진 Al 금속기판의 경우 기판의 높은 열전도도에 의해서 접합시 열이 금속기판으로 쉽게 빠져나가 열손실이 발생하게 됨을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 따라서, 금속 기판을 사용하였을 경우 툴과 접합부의 온도는 60~120°C까지 차이가 나며, 또한 본딩 압력이 낮을

Fig. 4. Schematic view of thermocompression bonding.

Fig. 5. Reflow profile of SAC reflow process.

수록 톨과 접합부의 온도차이는 커지게 된다. 하지만 본딩압력이 50 N 이상일 경우 LED 칩이 파손되므로, 본 연구에서는 접합압력 50 N에서 본딩을 진행하였다. SAC 솔더 리플로우의 피크 온도는 250°C이었고, 사용된 리플로우 프로파일을 Fig. 5에 나타내었다.

칩의 접합강도는 전단강도시험기(Dage 4000)를 사용하여 분석하였다. 전단 조건은 전단 높이가 40 μm 이었고 전단속도는 200 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이었다. 전단강도 시험후 파단면은 Scanning electron microscope(SEM)을 사용하여 관찰하였다. LED의 열저항 측정은 다이오드 순방향 전압 방법, 피크 파장 방법등 여러 가지가 있는데,¹¹⁻¹⁵⁾ 본 연구에서 열저항의 측정은 LED의 순방향 전압, V_F 를 측정하여 관찰하였다.¹¹⁾

3. 결과 및 토론

3.1. 접합소재의 따른 접합강도 비교

Au-Sn 열압착 본딩의 경우 본딩 하중 및 온도를 가해주면 LED칩 패드의 Au-Sn이 용융되고, ENIG표면처리층과 반응이 되면서 본딩이 된다. Fig. 6(a)는 Au-Sn 열압착 본딩 후 접합부의 단면사진이다. LED칩과 Au-Sn솔더 사이 계면은 조대한 $(\text{Ni,Au})_3\text{Sn}_2$ 금속간 화합물이 관찰되었다. 마찬가지로 Au-Sn솔더와 ENIG 표면처리 사이에도 $(\text{Ni,Au})_3\text{Sn}_2$ 금속간 화합물이 형성되었다. 다만, 기판쪽의 금속간 화합물은 칩쪽의 금속간 화합물과는 달리 0.7 μm 정도의 얇고 layer형태의 금속간 화합물을 형성하였다. 열

(a)

(b)

Fig. 6. Cross sectional SEM micrographs of (a) 20000X Au-Sn, (b) 3000X SAC solder.

압착 플립칩 본딩시 LED쪽의 온도는 300°C이고, 기판의 온도는 150°C로 유지되었으므로, 온도가 높은 LED쪽의 계면에서 금속간화합물의 두께가 두꺼운 것으로 사려된다. Au-20wt%Sn과 ENIG간 계면반응을 관찰하였으며, 계면에 $(\text{Au,Ni})_3\text{Sn}_2$ 와 Au_5Sn 이 형성됨을 확인하였다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 $(\text{Au,Ni})_3\text{Sn}_2$ 만이 관찰되었는데, 열압착본딩의 짧은 본딩시간 때문에 Au_5Sn 이 형성되지 않는 것으로 판단된다.

SAC 솔더 리플로우 본딩후 접합부 단면사진은 Fig. 6(b)에 나타내었다. 일반적으로 Au와 Sn 반응시 IMC는 Sn함량이 증가하는 순으로 Au_5Sn , AuSn , AuSn_2 , AuSn_4 이 형성된다. 본 연구에서는 LED chip과 솔더 계면에서 생성된 IMC는 layer타입의 AuSn 이며 솔더 내부는 침상의 AuSn_4 가 형성되었다. 일반적으로 AuSn_4 상은 Au와 용융 Sn 간에 가장 먼저 생성되는 상이며,¹⁷⁾ 솔더링시 Au가 용융 솔더에 용해, 과포화되고, 이 Au가 Sn과 반응하여 침상의 AuSn_4 상으로 형성되는 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾

Table 1. Shear strength of Au-Sn and SAC solder joints of LED PKG

	Shear strength [gf/mm ²]	Standard deviation
Au-Sn	3508.5	69.1
SAC	5798.3	271.6

Fig. 7. Fracture surface micrographs at substrate side. (a) 200x Au-Sn, (b) 2000x Au-Sn, (c) 5000x Au-Sn, (d) 200x SAC solder, (e) 2000x SAC solder, and (f) 5000x SAC solder.

각 접합재료의 접합 특성평가를 위해서 전단강도 시험을 실시하였고, 결과를 Table 1에 나타내었다. Au-Sn 열압착본딩과 SAC 솔더 본딩은 각각 3508.5 gf/mm², 5798.3 gf/mm² 으로, SAC 솔더의 전단강도가 Au-Sn보다 더 높았다. 전단강도 후 기판쪽의 파단면 이미지를 Fig. 7에 나타내었고, Fig. 8은 전단강도 측정시 파단이 어떻게 일어나는지를 모식도로 나타내었다. Fig. 7에서 Au-Sn과 SAC솔더의 파단은 대부분 LED 칩의 절연층인 SiO₂층에서 일어남을 알 수 있었다. 이때, Au-Sn과 SAC솔더 접합강도의 차이는 n패드와 p패드에 형성되어 있는 네모형태의 trench와 접합소재의 접합력에서 기인하는 것으로 보인다. Fig. 7(b), (e)는 Au-Sn, SAC 솔더 샘플에서 파단후 네모형태에 trench를 SEM 으로 확대하여 관찰한 것이다. Fig. 7(b)를 보면 Au-Sn trench안에서 파단은 주로 Au-20wt%Sn과 ENIG 사이에서 형성된 금속간 화합물

Fig. 8. Schematic diagram of crack path for (a) Au-Sn and (b) SAC solder joints.

(Au,Ni)₃Sn₂ 층을 따라 취성파괴가 일어난 것을 확인할 수 있었다. 반면 Fig. 7(e)에서 SAC 솔더의 trench 안에서 파단은 주로 SAC 솔더 내부에서 연성파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다. 따라서 전단강도 시험시 trench 내부에서 연성파괴를 보인 SAC 솔더가 취성파괴를 보인 Au-Sn 보다 접합강도가 높게 된 것으로 판단된다.

3.2. 접합소재의 따른 열저항 비교

LED는 온도에 따라 순방향 전압이 변화하게 되고, 이를 측정하여 p-n 접합부 온도를 파악할 수 있다. 아주 작은 전류 인가시에는 p-n 접합부에서 온도와 주위 온도와 같게 되며, 따라서, 아주 작은 전류 인가시에 주위 온도를 변화하면서 순방향 전압을 측정하게 되면 LED패키지의 p-n 접합부 온도와 순방향전압간 관계를 알 수 있다.¹¹⁾ 이 때 온도와 순방향 전압간에는 일차원 관계식을 얻을 수 있고, 기울기를 K-factor라고 한다. Fig. 9는 LED에서 온도와 순방향 전압간의 관계를 보여주는 그래프이고, 순방향전압과 온도와의 관계는 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\Delta V_F = K_{factor} \cdot \Delta T_J \quad (1)$$

여기서 ΔV_F 는 인가전류변화에 따른 LED의 순방향전압차이며, ΔT_J 는 인가전류변화에 따른 LED의 온도변화이다. 따라서, Fig. 9의 기울기로 부터 얻은 K-factor와 인가 전류 변화에 따른 순방향전압차 ΔV_F 를 구하면, 식 (1)로부터 LED p-n 접합부의 온도변화, ΔT_J 를 얻을 수 있다. 따라서, LED p-n 접합부의 온도 T_J 는 식 (2)와 같이 초기 온도 T_{J0} 에 온도변화 ΔT_J 를 더하면 구해진다.

Fig. 9. Forward voltage change with junction temperature of LED.

Table 2. Thermal resistances of Au-Sn and SAC solder joints.

	K-factor [V/°C]	T_j [°C]	T_B [°C]	R_{JB} [°C/W]
Au-Sn	-0.00133	94.9	69.8	3.3
SAC	-0.00127	89.0	111.1	9.3

$$T_j = T_{j0} + \Delta T_j \quad (2)$$

p-n 접합부에서 기판까지의 열저항 R_{JB} 는 아래 식과 같이 표현된다.

$$R_{JB} = \frac{T_j - T_B}{V_{F, I_H} \times I_H} \quad (3)$$

여기서 T_B 는 기판의 온도, I_H 는 입력전류를 나타낸다.

Au-Sn 열압착 본딩과 SAC솔더 리플로우 본딩후 LED의 열저항은 각각 3.3, 9.3°C/W로 측정되었다(Table 2). 즉, Au-Sn 열압착 본딩에 의한 LED 패키지가 SAC 접합보다 높은 방열효과를 갖는 것으로 확인되었다. Au-Sn의 열전도도는 57 W/mK¹⁹⁾이며, SAC솔더의 열전도도는 ~60 W/mK²⁰⁾으로 열전도도만으로 비교했을 경우에는 오히려 SAC솔더가 높은 열전도도를 갖고 있다. 하지만, SAC솔더가 Au-Sn에 비해 열저항이 높은 이유는 솔더페이스트를 사용하는 SAC솔더 특성상 접합부의 기공이 발생하기 때문이다. Fig. 10는 SAC솔더 접합부의 X-ray 사진이며, 접합부에 기공이 있음을 보여주고 있다. 이 기공의 분율은 25.3%로 이미지 분석 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 실제 공정시 솔더페이스트내의 플럭스 기화로 인해 솔더 내 기공이 발생하며, IPC-A-610 규격에서는 솔더 접합부의 기공이 25% 이하이면 양품으로 규정하고 있다.²¹⁾ 이와 같은 접합부의 기공은 LED의 열전도되는 단면적을 줄이게 되고, 이에 따라 열저항이 증가할 것으로 예상된다.¹²⁾ 접촉면적이 열저항에 미치는 영향은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$R_{Th} = \frac{L}{kA} \quad (4)$$

(a)

(b)

Fig. 10. X-ray image of (a)Au-Sn joint, and (b)SAC solder joint..

여기서 k 는 열전도도, L 은 접촉 길이, A 는 접촉 면적을 나타낸다. 열저항은 접촉면적에 반비례하며 접촉면적이 커질수록 열저항이 감소하는 것을 의미한다. 열전도도가 SAC에 비해 약간 높은 Au-Sn접합부의 경우 기공이 없는 균일한 접합을 이루고 있어 SAC솔더 접합부에 비해 열저항이 낮음을 알 수 있다. SAC은 Au-Sn보다 접촉길이가 약 3배 높으며, 접합부 접촉 면적이 약 3/4에 면적을 갖고 있다. 이때 Au-Sn의 열저항은 다음식과 같다.

$$R_{Th, AuSn} = \frac{L_{AuSn}}{kA_{AuSn}} \quad (5)$$

SAC을 AuSn과의 관계를 대입하면 다음식과 같다.

$$R_{Th, SAC} = \frac{3L_{AuSn}}{\frac{3}{4}kA_{AuSn}} \quad (6)$$

식 (6)을 식(5)를 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R_{Th, SAC} = 4R_{Th, AuSn} \quad (7)$$

즉, SAC에 열저항은 AuSn보다 4배 높다는 것을 의미한다. 이는 본 연구에서 측정한 데이터와 유사한 것을 확인할 수 있다. 솔더페이스트를 사용하는 접합공정에서 기공의 존재는 열저항에 영향을 주며, 이를 개선하기 위

해서는 진공 리플로우를 통한 기공의 제거가 필요하다. 또한, 솔더 접합부 두께가 증가할수록 열저항이 증가하기 때문에 얇은 메탈마스크의 사용 등으로 접합부 높이를 최소화 할 수 있는 방안이 필요하다.

4. 결 론

LED 플립칩 패키지에서 Au-Sn과 SAC솔더의 두가지 접합소재를 적용하였고, LED 패키지의 본딩 특성 및 방열특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. Au-Sn 열압착 접합부는 SAC솔더에 비해 낮은 접합강도를 가졌고, LED 칩 내부에서 파단이 일어남을 확인하였다. 열저항은 Au-Sn이 SAC솔더보다 우수하였으며, SAC솔더는 열전도도가 Au-Sn에 비해 높으나, 솔더페이스트의 리플로우시 발생하는 기공 때문에 접촉면적이 작아져 열저항이 높아짐을 확인하였다. 따라서, SAC솔더를 LED에 적용하기 위해서는 진공 리플로우 등 기공을 줄일 수 있는 대안이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 국제공동기술개발사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. N. Narendran, Y. Gu, J. P. Freyssonier, H. Yu and L. Deng, "Solid-state lighting: Failure analysis of white LEDs", *J. Cryst. Growth*, 268(3-4), 449 (2004).
2. S. Ishizaki, H. Kimura and M. Sugimoto, "Lifetime estimation of high power white LEDs", *J. Light & Vis. Env.*, 31(1), 11 (2007).
3. M. Meneghini, S. Podda, A. Morelli, R. Pintus, L. Trevisanello, G. Meneghesso, M. Vanzi and E. Zanoni, "High brightness GaN LEDs degradation during dc and pulsed stress", *Microelectron. Reliab.*, 46(9-11), 1720 (2006).
4. G. Meneghesso, S. Levada, R. Pierobon, F. Rampazzo, E. Zanoni, A. Cavallini, A. Castaldini, G. Scamarcio, S. Du and I. Eliashevich, "Degradation mechanisms of GaN-based LEDs after accelerated DC current aging", *Proc. 2002 International Electron Devices Meeting(IEDM)*, San Francisco, 103, IEEE Components, (2005).
5. J. H. Lau, *Low Cost Flip chip Technologies*, pp.1-17, McGraw-Hill, New York (2000).
6. R. R. Tummala, "SOP: What is it and why? A new micro-system-integration technology paradigm-Moore's law for system integration of miniaturized convergent systems of the next decade", *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 27(2), 241 (2004).
7. R. R. Tummala, and M. Swaminathan, *Introduction to System-on-Package(SOP)*, pp.7-8, McGraw-Hill, New York (2008).
8. H. Ye, C. basaran and D. C. Hopkins, "Damage mechanics of microelectronics solder joints under high current densities", *Int. J. Solids Struct.*, 40, 4021 (2003).
9. J. W. Uoon, W. C. Moon and S. B. Jung, "Core technology of electronic packaging", *J. Kor. Weld. Soc.*, 23(2), 10 (2005).
10. B. Djurfors and D. G. Ivey, "Microstructural characterization of pulsed electrodeposited Au/Sn alloy thin films", *Mater. Sci. Eng. B(90)*, 309 (2002).
11. Z. Ma, X. Zheng, W. Liu, X. Lin and X. lin, "Fast thermal resistance measurement of high brightness LED", *Proc. 6th International Conference on Electronic Packaging Technology(ICEPT)*, Shenzhen, 1, IEEE Components, (2005).
12. T. Ayodha, H. S. Han, S. Y. Kim and S. W. Kang, "Thermal resistance measurement of high Power LEDs". *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, 158 (2012).
13. M. W. Shin and J. P. Kim, *Introduction to LED Packaging Technology*, pp.192-195, Bookshill, Seoul (2009).
14. H. H. Kim, S. H. Choi, S. H. Shin, Y. G. Lee, S. M. Choi and Y. S. Oh, "Thermal Transient Characteristics of Die Attach in High Power LED Package", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 12(4), 331 (2005).
15. "A Study on the Thermal Behaviour of Via Design in the Ceramic Package", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 10(1), 39 (2003).
16. H. G. Song, J. P. Ahn and J. W. Morris, "The Microstructure of Eutectic Au-Sn Solder Bumps on Cu/Electroless Ni/Au", *J. Electron. Mater.*, 30(9), 1083 (2001).
17. T. Laurila, V. Vuorinen and J. K. Kivilahti, "Interfacial reactions between lead-free solders and commonbase materials", *Mater. Sci. Eng. R*, 49(1-2), 1 (2005).
18. P. G. Kim and K. N. Tu, "Fast dissolution and soldering reactions on Au foils", *Mater. Chem. Phys.*, 53, 165 (1998).
19. J. A. King, *Material Handbook for Hybrid Microelectronics*, Artec House, Norwood, MA (1988).
20. J. Bilek, J. K. Atkinson and W. A. Wakeham, "Thermal Conductivity of Molten Lead-Free Solders", *Inter. J. Thermophys.*, 27, (2006).
21. IPC-A-610D, "Acceptability of Electronic Assemblies", IPC, Bannockburn (2000).