

리플로시 가열 속도에 따른 Pb-In 합금의 솔더볼 형상 변화에 관한 연구

문종태 · 이상환 · 주관중 · 이희태 · 송민규 · 편광의

한국 전자 통신 연구원 반도체 연구단

A study on the solder ball shape variation of the Pb-In alloys on the reflowing with heating rate

Jong-Tae Moon, Sang-Hwan Lee, Gwan-Chong Joo, Hee-Tae Lee, Min-Kyu Song, and Kwang-Eui Pyun

Compound Semiconductor Department, Electronics and Telecommunications Research Institute

161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejon 305-600

(1996년 10월 8일 받음, 1997년 3월 10일 최종수정본 받음)

초 록 Pb-In 솔더를 Si기판에 증착후 리플로시 가열 속도와 플럭스 사용에 따른 솔더볼 형성 거동, 증착 솔더 이동, UBM (Under Bump Metallurgy)의 Au층과 In간의 금속간 화합물 형성에 관하여 연구하였다. 가열 속도가 1°C/min에서 10°C/min, 20°C/min로 증가하고, 플럭스를 적용한 경우 솔더볼은 용이하게 형성되었다. 특히 플럭스를 사용하여 형성시킨 솔더볼에서는 UBM Au층과 In간의 반응에 의하여 AuIn 금속간 화합물이 형성되었다.

Abstract The Pb-In solder as preforms was deposited on Si substrate by using a thermal method. During the reflowing process to make solder balls, the behavior of solder balls formation, the migration solder balls, and the intermetallic compound between the Au layer and In metal were inspected with various heating rates and the use of flux. In the case of heating rate which increased from 1°C/min to 20°C/min, the formations of solder ball was found to be more feasible. Especially, when the flux was used during the solder ball formation, the AuIn intermetallic compound was formed between the Au top layer of UBM and In metal.

1. 서 론

서로 다른 재료를 접합하는데 사용하는 솔더는 약 5000년전 Mesopotamia 고대 문명부터 사용된 것으로 알려지고 있다. 솔더는 오랜 역사만큼이나 종류 및 특성이 다양할 뿐만 아니라 동일한 조성일지라도 적용하는 방법과 촉매제로서 플럭스 사용 유무에 따라서 접합 특성이 다르게 나타난다.

일반적으로 솔더 조성은 접합온도가 낮은 Pb-, Sn-, In-계 soft 솔더와 용융점이 높은 Au-, Ag-계 hard 솔더로 구분할 수가 있으며¹⁾, 접합 강도가 높은 조성의 솔더가 가장 우수한 재료로 인식되었다. 그러나 솔더 사용량이 증가하고 있는 전기, 전자, 반도체산업에서는 소자들이 빠른 속도로 소형화, 고집적화되면서 이들 소자를 연결하는 솔더 크기도 매우 작아졌고 접합후에도 전단 강도, 피로 강도 등과 같은 기본적 접합 특성이외에 열전도도, 전기 전도도도 동시에 만족해야 한다²⁾.

최근 광통신용 모듈 패키징은 칩의 패드를 솔더를 증착한 기판 패드 위에 직접 올려 놓아 와이어의 연결등의 면적이 필요치 않은 플립칩 본딩 공정을 적용하고 있다³⁾. 이때 접합에 사용하는 솔더는 최소 지름이 25 μ m인 아주 작은 원형 증착패드를 사용하는 경우도 있다⁴⁾. LD(Laser diode), PD(photodiode) 등 광소자 접합에 사용하는 솔더는 LD의 경우 연속 발진 영역 온도가 80°C 정도로 항상 유지되고 있으므로 접합 강도 뿐 아니라 소자에서 발생하는 열을 외부

로 신속하게 전도시키기 위하여 열전도도 양호해야 한다. 또한 광소자와 기판간의 서브모듈 접합된 광 파이버와 정렬시 coupling 효과를 높이기 위해서는 광소자(LD, PD)와 기판(Si, Al₂O₃)간의 균일한 솔더 간격, 접합 형태등에 대한 고려도 해야 한다⁵⁾.

이와 같이 솔더 접합 부위가 수십 μ m로 작아짐에 따라 원하는 솔더와 조성, 형태등을 위하여 electro-deposit, thermal deposit, dipping 등의 방법으로 접합면에 직접 형성시키거나 또는 프리폼을 만들어 사용하고 있다⁶⁾. 그러나 위의 여러 방법은 전해증착시 용제의 혼입, 각원소의 증기압의 차이등에 의하여 균일한 조성, 증착 두께등을 얻기가 어렵다. 따라서 증착된 미세 솔더는 접합전 합금화등을 위하여 프리폼에 열을 가하여 균일한 성분을 만드는 리플로 공정을 거친뒤 접합을 하게 된다⁷⁾.

리플로시 평탄하게 증착된 솔더는 표면장력에 의하여 솔더볼을 형성하는데 증착 두께, 조성, 증착된 형상, 베이스 메탈과의 젖음성(wettability), 가열 방법, 가열 속도, 플럭스 사용 여부, 사용 분위기등의 공정 조건에 따라 솔더볼의 크기, 형태등이 결정된다^{8,9)}.

특히 리플로시 동일조성, 동일 두께인 경우 솔더볼 형성은 가열 속도, 플럭스 사용등의 공정 조건에 따라서 솔더볼 형성 정도가 많은 차이를 나타내는데 본 연구에서는 GaAs 칩 접합시 Sn-37wt%Pb 보다 fatigue 특성이 우수하고¹⁰⁾ Sn보다 UBM(Under Bump Metallurgy) top layer Au와 솔더성이 양호한것으로 알려진 Pb-In합금을 Si 부기판에

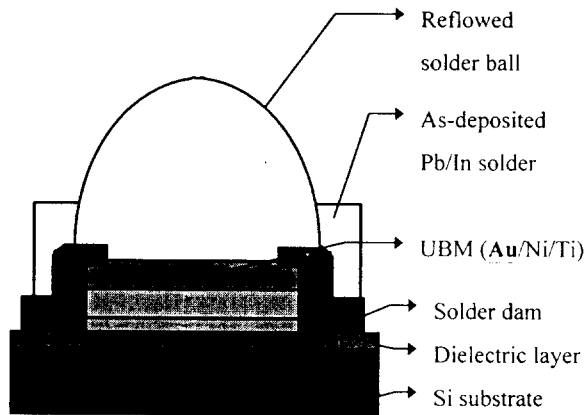


Fig. 1. The schematic diagram of the UBM, as-deposited solder and reflowed solder ball.

직접 증착하여 가열 속도, 플럭스 사용등에 따른 솔더볼 형성에 관하여 연구하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 LD, PD 광소자를 Si기판에 플립칩 본딩하기 위해서 Si기판에 Si₃N₄, 솔더담, UBM(지름100 μ m), Pb-In솔더를 직접 증착시킨 단면 모습을 나타낸 것이다. 열증착후 Pb/In솔더는 높이 5.6~5.65 μ m, 지름 160 μ m로 솔더담을 덮고있는 편평한 상태이며 리플로를 하게 되면 UBM의 Au 층위에 지름 100 μ m로 형성된다. 이때 질화물인 솔더담은 Pb-In합금과의 젖음성이 좋지 않고 약 0.6 μ m의 솔더담 높이로 인하여 리플로시 액상의 솔더가 외부로 흘러나가는 것을 방지하고 반구형의 솔더가 UBM Au층에 용이하게 형성되도록 도와준다. Pb-In 솔더 하부의 UBM은 솔더 표면부터 Au(4000Å)/Ni(1200Å)/Ti(800Å)/Si₃N₄/silicon substrate순이며 adhesive layer로는 Ti, barrier layer로는 Ni, 솔더와 만나는 표면층으로는 Au을 사용하였다.

가열 속도에 따른 솔더볼 형성 정도를 살펴보기 위하여 플립칩 접합시 사용하는 솔더가 증착되어 있는 광통신용 Si기판을 사용하였다. 각 시편은 지름 5mm인 Al홀더에 넣고 Tg-DTA장치에 부착되어 있는 저항식 가열로를 이용하였다. Ar분위기에서 In의 조성에 관계없이 가열 속도는 1 $^{\circ}$ C/min, 5 $^{\circ}$ C/min, 10 $^{\circ}$ C/min, 15 $^{\circ}$ C/min, 20 $^{\circ}$ C/min로 300 $^{\circ}$ C까지 가열 하였고 5분 유지한 뒤 냉각하였다. 또한 가열시 증착된 솔더 표면에 RMA(Rosin Mildly Activated)형태 플럭스를 도포하여 플럭스 사용 유무에 따른 변화도 관찰 하였다. 가열 속도에 따른 솔더볼 형성 정도는 광학 현미경을 이용하였으며, UBM의 Au표면층과 솔더내의 In과의 반응은 SEM/EDS를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

증착 솔더 조성 분석

Pb-In성분을 Si기판 UBM위에 증착시킬때 Pb, In의 증기압 차이가 다르기 때문에 동시에 증착을 시키면 원하는

Table 1. The SEM/EDS analysis of the thermal-deposited Pb-In solder.

Nominal composition	Pb	In
Pb-40wt%In	59.64wt%	40.36wt%
Pb-50wt%In	49.38wt%	50.62wt%

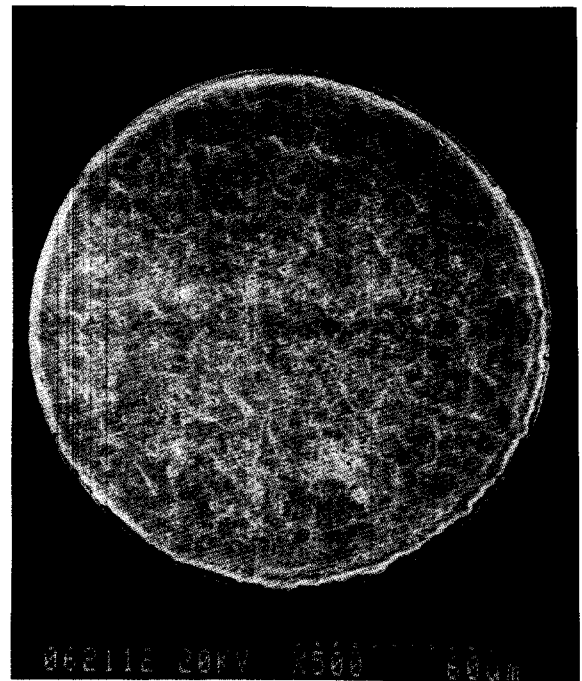
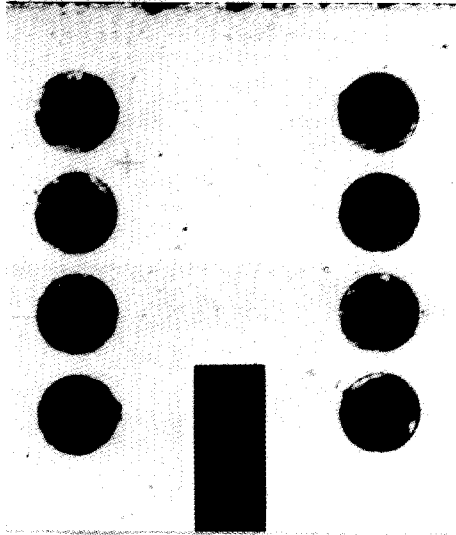


Fig. 2. The microstructure of the as-deposited solder.

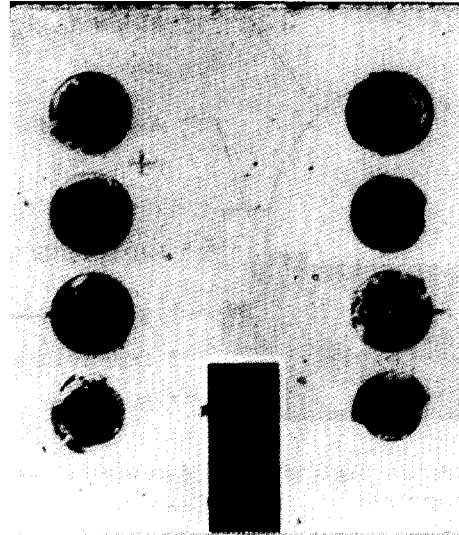
조성을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 목적 합금 조성을 위하여 Pb, In을 중량비로 측량하여 Pb를 먼저 증착 후 In을 증착하여 솔더 조성을 조절하였다. 그림 2는 지름 160 μ m로 증착된 솔더를 보여 주고 있다. 증착된 솔더 밑에는 그림 1에 나타낸 솔더담이 포함되어 있으므로 리플로를 하게 되면 지름 100 μ m의 UBM지름과 동일한 지름의 솔더볼이 형성된다. Pb와 In을 개별적으로 증착을 하였기 때문에 증착 솔더 표면 조성 분석을 위하여 SEM/EDS를 이용하였다. 증착 후 조성 분석 결과 Pb-In솔더를 합금화시키기 위한 추가의 열처리 공정이 없었음에도 목적 조성과 거의 일치하는 것을 알 수가 있다(표 1 참조). 이것은 Si 기판에 솔더 증착시 기판의 온도가 50~60 $^{\circ}$ C정도로 상승되고, 상온에서 Pb내에서 In의 상호 확산 계수는 Pb의 자기 확산계수보다 약 20배 정도 빠르기 때문에 증착시 In이 Pb층으로 확산하였기 때문으로 생각된다¹¹⁾.

가열 속도에 따른 솔더볼 형성

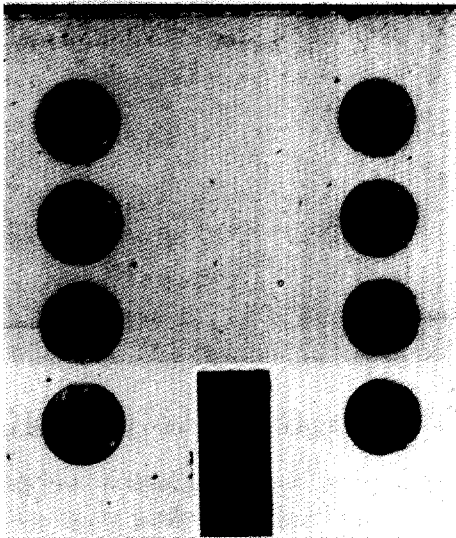
그림 3(a)(b)(c)는 조성 Pb-40wt%In로 플럭스를 도포하지 않은 상태에서 가열 속도를 1 $^{\circ}$ C/min, 10 $^{\circ}$ C/min, 20 $^{\circ}$ C/min로 리플로한 솔더볼 형상을 보여 주고 있다. 플럭스를 도포하지 않은 경우, 가열 속도 1 $^{\circ}$ C/min에서는 솔더볼이 형성되지 않고, 가열속도가 10 $^{\circ}$ C/min, 20 $^{\circ}$ C/min로 증가하면 시간당 액상 양이 증가하고 표면 장력도 증가하기



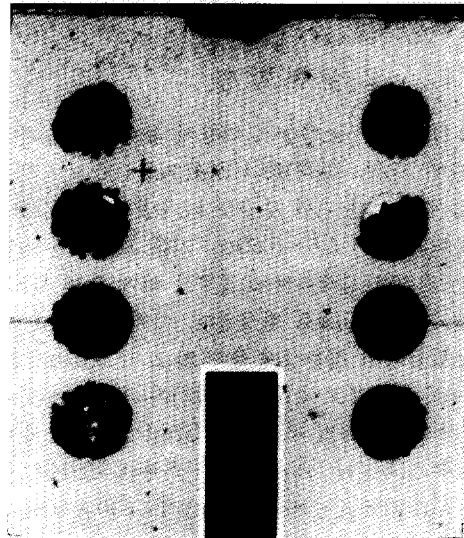
(a)



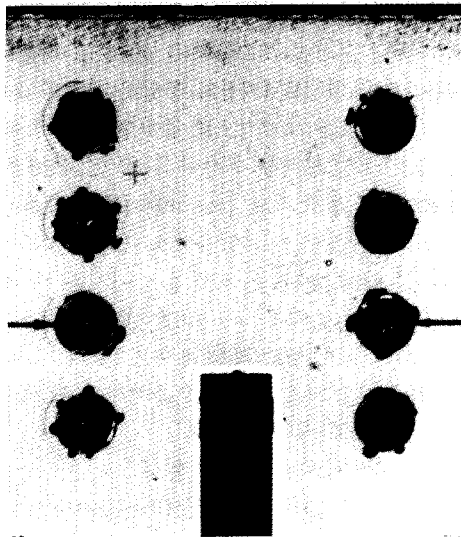
(b)



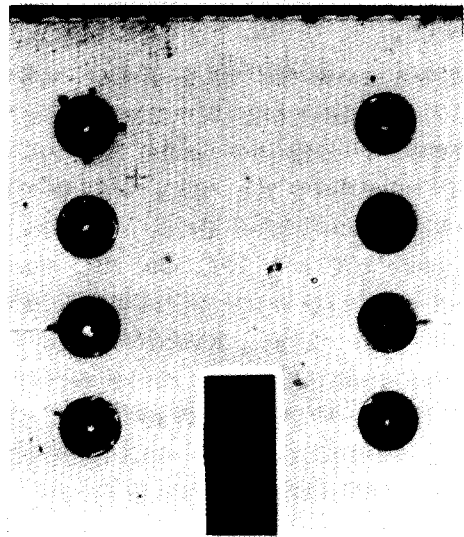
(c)



(d)



(e)



(f)

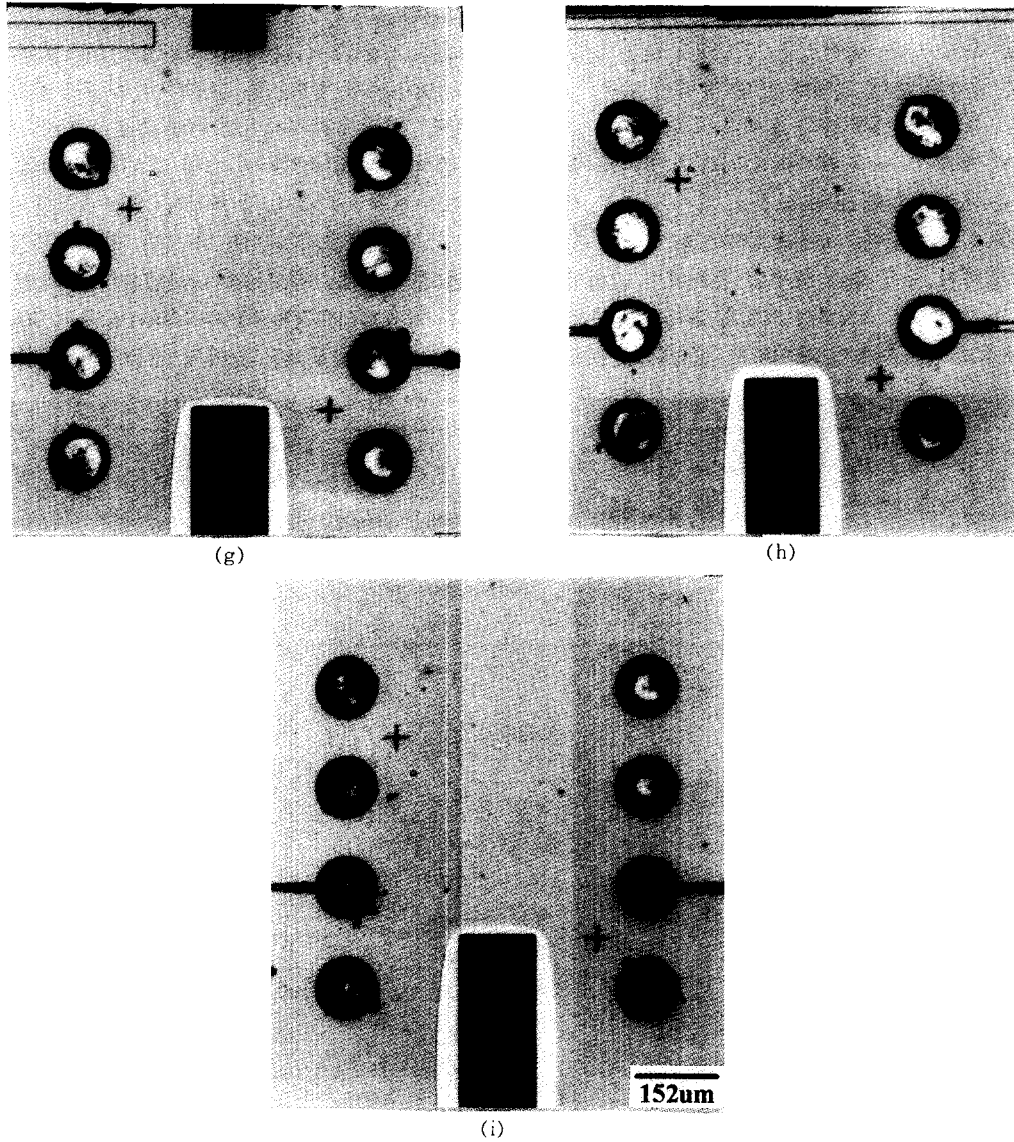


Fig. 3. The optical micrographs of the reflowed Pb-In solder ball with flux and heating rate. Pb-40wt%In : (a) without flux 1°C/min, (b) without flux 10°C/min, (c) without flux 20°C/min, (d) with flux 1°C/min, (e) with flux 10°C/min, (f) with flux 20°C/min Pb-50wt%In (g) with flux 1°C/min, (h) with flux 10°C/min, (i) with flux 20°C/min

Table 2. The surface tension, density and viscosity of the In, Pb

	Density	Surface Tension(mNm ⁻¹)	Viscosity(mNsm ⁻²)
Pb	10.51(400°C)	465(T = 350°C)	0.46(T = 350°C)
In	7.02(164°C)	538.6(T = 350°C)	0.30(T = 350°C)

때문에 증착 솔더와 젖음성이 가장 나쁜 솔더담부위인 외각 부위에서 솔더 중앙부분으로 솔더가 이동하는 것을 관찰 할 수가 있다.

그림 3(d)(e)(f)는 Pb-40wt%In조성으로 증착 솔더 표면에 플럭스를 도포한 것으로서 가열 속도가 1°C/min에서는 플럭스를 도포하지 않은 경우처럼 솔더의 국부적 용융 또는 질화 실리콘 표면에 미세 솔더볼이 형성된 것을 관찰 할 수가 있다. 가열 속도가 10°C/min로 증가하면 증착된 솔더는 반구형 솔더볼을 형성하나 원형 솔더 성분이 증착된 외각 부위에(솔더담 표면)약 15µm이하의 작은 여러개의

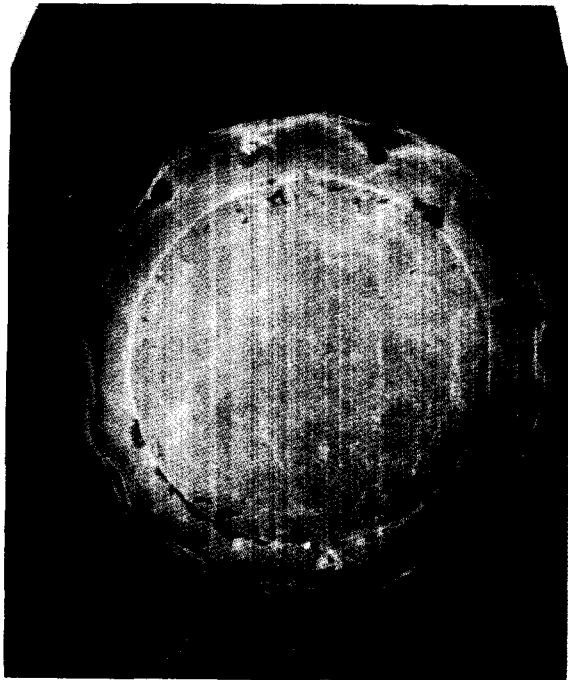
솔더볼이 잔존 형성된 것을 볼 수 있다. 가열 속도가 20°C/min로 빨라지면 증착 솔더 외각 부위에 형성되었던 작은 솔더볼 갯수도 줄어들고 증착된 솔더 모두가 UBM 위에 반구형 솔더볼을 형성한 것을 관찰 할 수가 있다. 특히 가열 속도가 10°C/min로 증가하면 총 8개의 솔더중 6개정도가 리플로되어 반구형의 솔더를 형성하며, 가열 속도가 20°C/min인 경우에는 8개 솔더 모두 반구형으로 리플로되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 Pb-40wt%In경우에 동일한 가열 속도에서 촉매제로서 플럭스를 사용하게 되면 솔더 볼이 더욱 용이하게 형성되는 것을 알 수 있다.

플렉스 영향은 가열 속도가 20°C/min인 그림 3(c)(f)를 보면 잘 알 수가 있다. 플렉스를 도포하지 않은 그림 3(c)의 경우에 증착된 솔더 표면에 표면 장력이 매우 낮은 PbO, In₂O₃ 등 산화물이 솔더볼이 용이하게 형성되는 것을 방해할 것이며, 불활성 Ar분위기를 유지하고 있어도 솔더 용융시 미량의 산소로 인한 표면 산화물 역시 솔더볼 형성을 방해할 것으로 생각된다. 그러나 플렉스를 도포하면 화학적 작용에 의하여 증착 솔더 표면에 존재하던 산화막을 고용, 제거하고 재산화를 방지하는 역할과 솔더내부의 열을 일정하게 보호함으로써 솔더볼이 용이하게 형성되는 것으로

생각된다.

그림 3(g)(h)(i)는 In 함량을 10wt% 증가시킨 Pb-50wt%In로서 플렉스를 도포하여 리플로 한 경우이다. In 함량을 10wt% 증가시키고 가열 속도가 1°C/min인 경우에는 조성 Pb-40wt%In인 그림 3(d)와 비교하여 보면 상대적으로 전체 솔더볼이 잘 형성된 것을 관찰할 수가 있다.

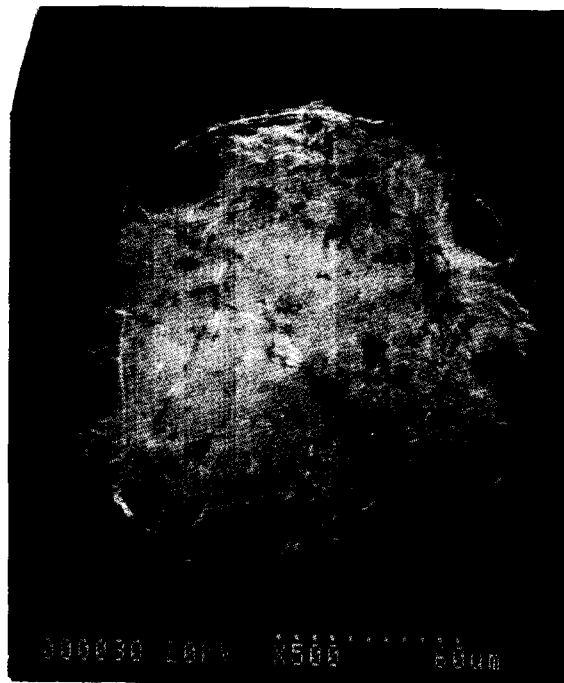
표 2에 리플로시 솔더볼 형성에 영향을 주는 Pb와 In의 표면 장력, 밀도, 점도등을 나타냈는데¹²⁾ Pb보다 표면장력이 큰 저융점(157°C) In양이 40wt%에서 50wt%로 증가함에 따라 표면장력은 높아질 것을 예상할 수 있다. 또한



(a)



(b)



(c)

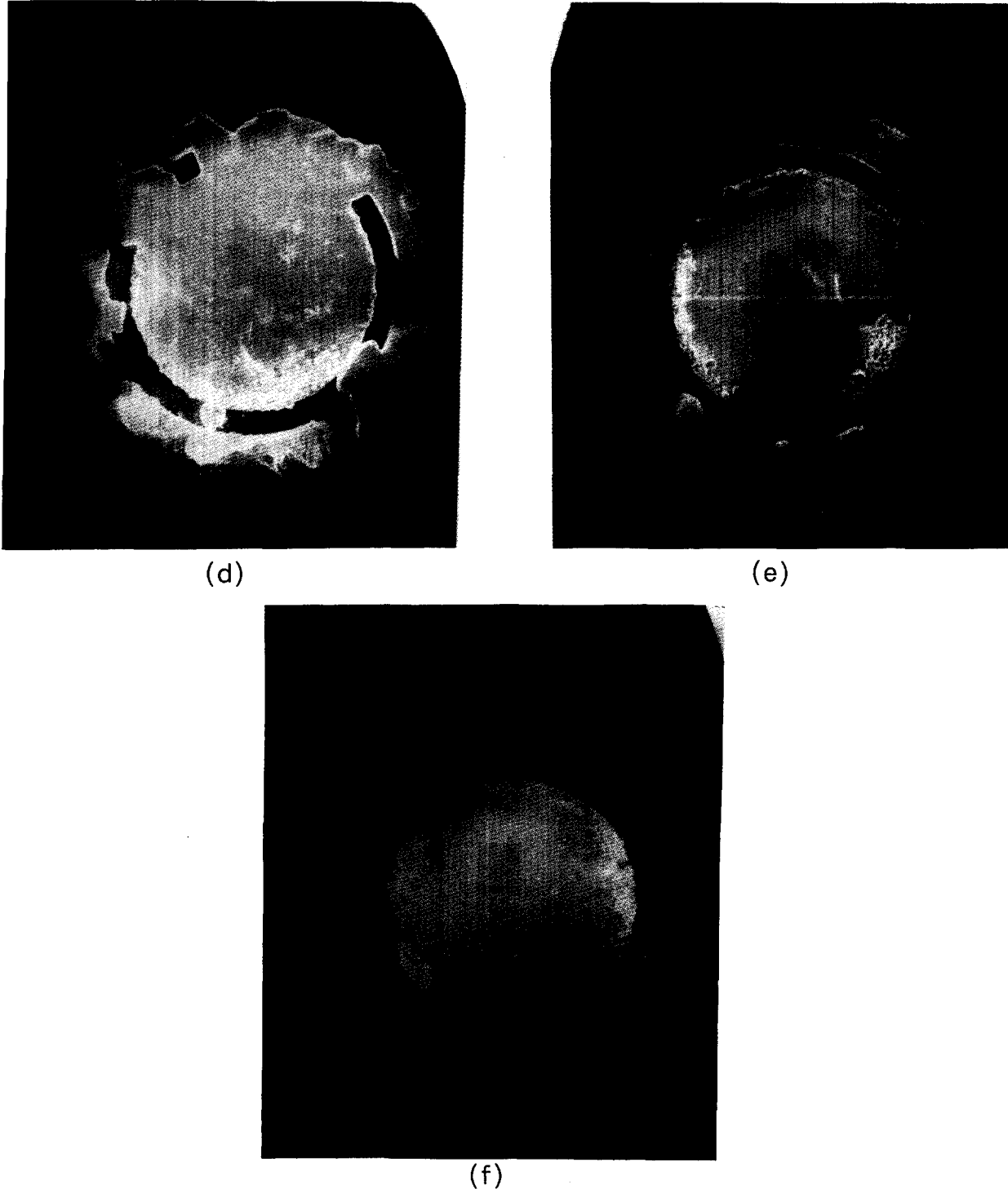


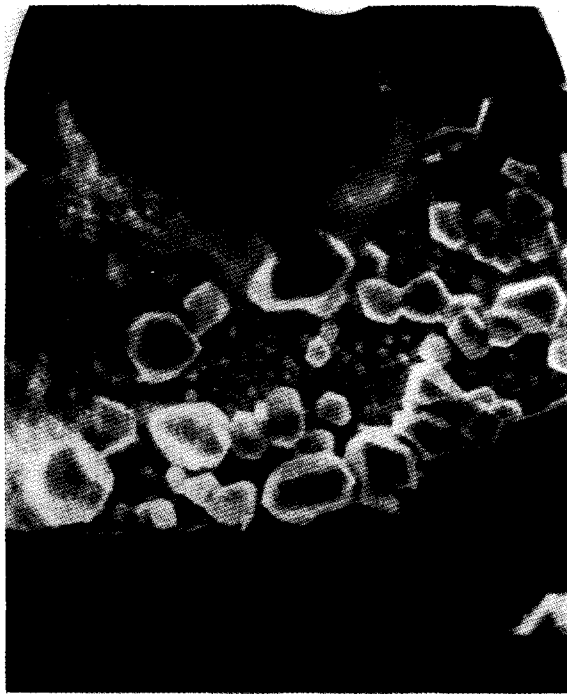
Fig. 4. The SEM micrographs of reflowed Pb-40wt%In solder ball with flux and heating rate. without flux : (a)1°C/min, (b)10°C/min, (c)20°C/min, with flux : (d)1°C/min, (e)10°C/min, (f)20°C/min.

Pb-40wt%In 경우 액상선 온도는 231°C 이고 Pb-50wt% In 경우 액상선 온도는 215°C로서 In 함량이 증가하게 되면 상대적으로 가열시 낮은 온도에서 액상이 출현함으로 솔더 볼 형성에 도움이 될 것으로 생각된다. 리플로시 솔더볼 형성 속도와 관계가 있을 것으로 예상되는 점도도 In이 Pb에 비하여 낮은 것으로 나타났다.

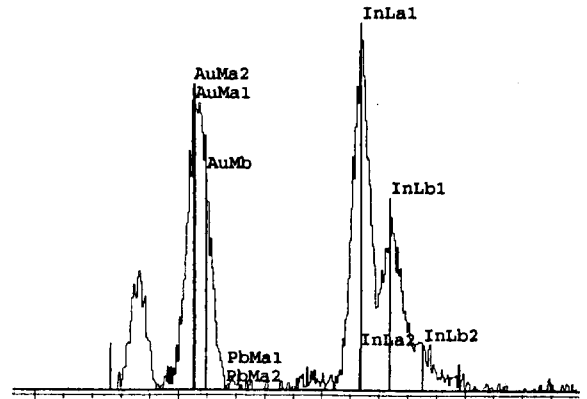
리플로시 증착 솔더 이동

그림 4는 조성Pb-40wt%In으로 가열 속도에 따라 리플로된 솔더볼중 1개를 SEM으로 관찰한 것이다. 그림4(a)

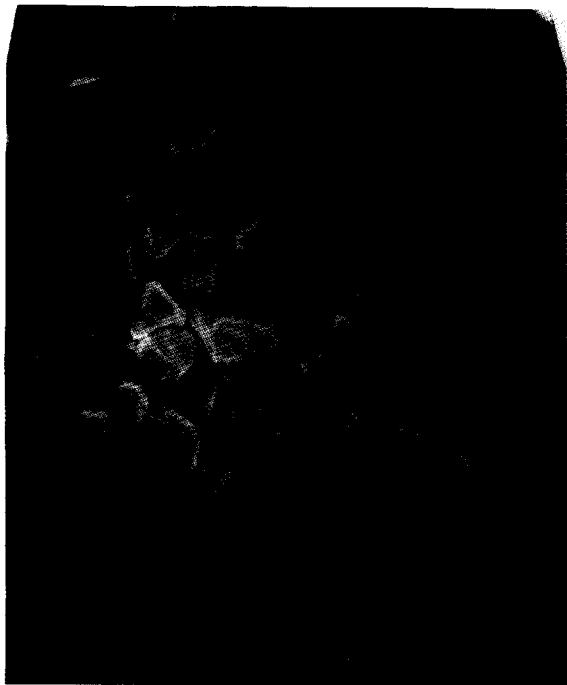
를 살펴보면 지름이 다른 원형이 3개 존재하는데 가장 작은 100 μ m인 가운데 원은 UBM의 Au층이고, 지름 120 μ m의 두번째 원은 용융 솔더가 외부로 흘러나가는 것을 방지하기 위한 높이 0.6 μ m 솔더담 안쪽이며 지름 160 μ m의 세번째 원은 Si부기관에 증착된 솔더담의 외각이다(그림 1참조). 그림 4(a)(b)(c)는 플럭스를 도포하지 않은 경우로서 가열 속도 1°C/min인 경우 솔더 이동은 솔더 성분과 젖음성이 나쁜 질화 실리콘위에서 먼저 움직여 중앙 부위로 이동하는 것을 관찰 할 수가 있다. 가열 속도가 10°C/min로 증가하



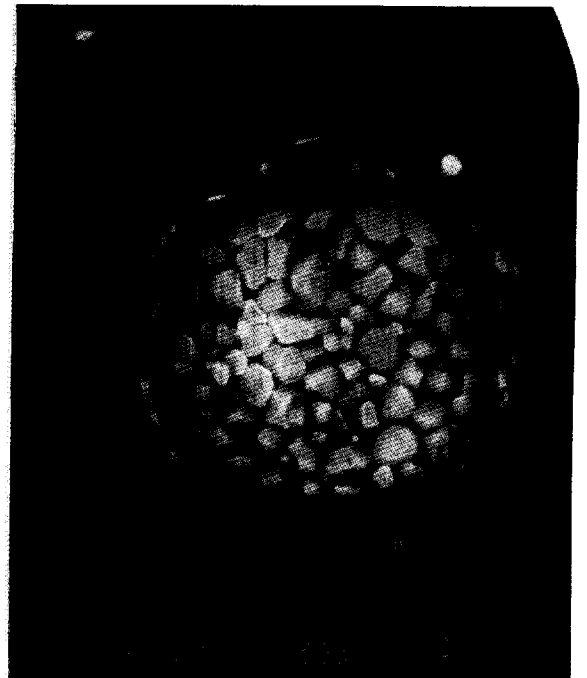
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. The SEM micrographs and the EDS data of the AuIn intermetallic compound. (a) Pb-40wt%In, (b) SEM/EDS analysis, (c), (d) solder AuIn intermetallic compound (100%In)

게 되면 질화 실리콘위에 증착된 솔더가 솔더볼을 형성하기 위하여 중앙으로 이동하다가 솔더담의 외각 부위에 정지한 것을 관찰 할 수가 있다. 가열 속도가 20°C/min로 증가하게 되면 질화 실리콘위에 증착된 솔더들이 중앙으로 이동하려고 하는 양은 증가하나 솔더볼이 완전히 형성되지 않은 것을 볼 수가 있다.

그림 4(d)(e)(f)는 조성 Pb-40wt%In으로 리플로시 플럭스를 적용한 경우이다. 가열 속도가 1°C/min 경우에

는 가열 속도가 느려도 플럭스의 영향으로 인하여 UBM Au위에 증착된 솔더는 솔더볼을 형성하였으나 질화 실리콘 위에 증착된 솔더들은 약 0.6 μ m높이의 솔더담으로 인하여 UBM 밖에서 불규칙하게 리플로 되어 있는 것을 관찰 할 수 있다. 가열 속도가 10°C/min로 증가하게 되면 UBM Au층위에 증착된 솔더들은 모두 솔더볼을 형성하고, UBM 밖 질화 실리콘위에서도 크기 15 μ m이하의 구형 솔더가 형성된것을 관찰 할 수가 있다. 가열 속도가 20°C/min

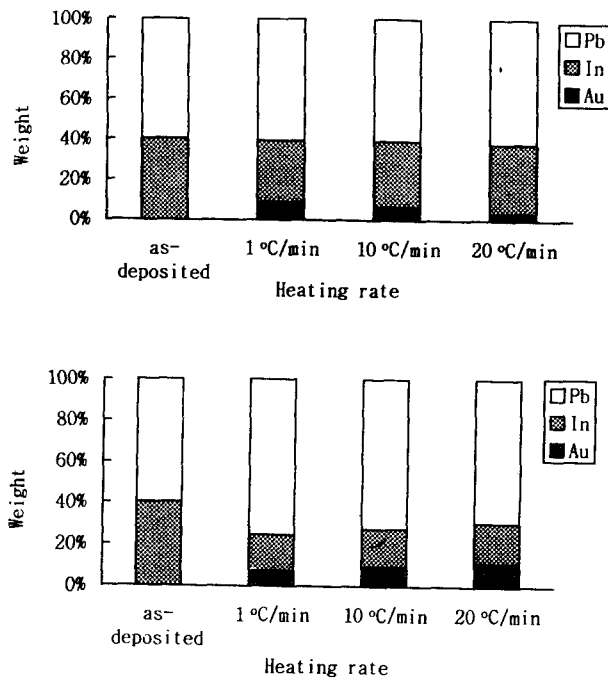


Fig. 6. SEM/EDS surface area analysis of the reflowed Pb-40wt%In solder ball. (a) without flux, (b) with flux

로 증가한 경우에는 UBM 위에 원하는 형태의 솔더볼을 형성할 수가 있었다. 그러나 플렉스를 사용하여 리플로한 경우에는 그림 4(d)(e)(f)에서처럼 UBM Au가장자리에 각형의 금속간 화합물이 관찰되었는데 이들의 형성 원인에 대해서는 아래 Au-In계면 반응에서 설명하였다.

Au-In 계면 반응

가열 최고 온도를 In용융 온도인 157°C보다도 높은 300°C로 유지하게 됨에 따라 솔더 성분중 액상 In은 Au와 반응할 것을 예상할 수 있으며 연구 결과 UBM Au 층과 질화 실리콘 경계 부위에서 최대 5μm의 각형 형태 금속간 화합물이 형성된 것을 관찰 할 수가 있다(그림 4(e)를 확대한 그림 5(a)참조). 이들 조성을 분석하여 본 결과 Au 46at%, In 54at%로서 AuIn 화합물에 근접하며 Pb는 검출되지 않았다(그림 5(b)참조).

그림 5(c)(d)는 플렉스를 적용하지 않고 UBM Au층과 In만의 반응을 살펴보기 위하여 동일한 조건에서 Pb-In 대신 In만을 증착시킨뒤 가열 속도를 10°C/min으로 하여 300°C까지 가열 후 냉각한 시편이다. 그림 5(c)(d)는 가열후로서 Au층위에 각형의 금속간 화합물이 형성된것을 관찰할 수가 있으며 특히 중앙 부위로 갈수록 성장한 것을 알 수 있다. 이들 금속간 화합물을 조성 분석하여 본결과 그림 5(a)에서 얻어진 값과 유사하였으며 AuIn형태의 금속간 화합물이 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이들 금속간 화합물이 형성되는 것에 대해서 Lewis S. Goldman 등은 Pb-50wt%In합금의 Au고용도가 280°C에서는 약 0.4wt%정도이고 상온에서는 거의 없으므로 AuIn₂ 형태의 금속간화합물이 석출한다고 보고하였다¹³⁾. 그러나 본 연구에서 얻어진 금속간 화합물은 AuIn조성에 근접하고 있는데 이것은 D.M. Jacobson 등이 Au-In계면

반응에서 먼저 생성되는 화합물은 AuIn₂이나, Au양이 충분히 제공되면 In의 고상 확산에 의해서 수일이 지나면 AuIn으로 상변화한다는 결과¹⁴⁾와 일치하는 것으로 생각된다.

SEM/EDS 솔더볼 표면 조성 분석

그림 5에서 관찰한 것처럼 플렉스를 사용한 경우 In이 UBM상부의 Au와 반응하여 금속간 화합물을 형성함으로써 솔더 표면 조성은 변화하는데 이들 조성 변화를 그림 6에 나타냈다. 조성은 Pb-40wt%In으로 플렉스를 사용하지 않은 경우(그림 6(a))에 가열 속도 1°C/min에서는 Au 양이 8.78wt%, In이 30.43wt%에서 가열 속도가 20°C/min로 증가하면 Au가 3.43wt%, In이 34.47wt%로서 Au가 감소하고 In이 증가하고 있는데 이것은 가열 속도가 빨라지게 됨으로 In이 확산하여 AuIn금속간 화합물 형성에 필요한 시간이 적기 때문으로 생각된다.

그러나 플렉스를 사용한 경우(그림 6(b))에는 가열 속도가 1°C/min에서는 Au가 7.51wt%이고 In이 17.12wt%, 가열 속도가 20°C/min경우에는 Au가 10.94wt%, In이 19.65wt%로 모두 증가를 하였다. 플렉스를 사용하지 않은 경우에 가열 속도 20°C/min에서 34.49wt%이던 표면 In 함량이 플렉스를 사용하게 되면 19.65wt%로 감소하는것으로 보아 솔더 성분중 In이 Au층으로 고상 확산하여 AuIn 금속간 화합물을 형성한 뒤 표면부위로 성장하기 때문에(솔더 성분을 In만을 사용한 사진 5(c)(d)참조) 가열 속도가 증가하여도 Au 함량이 증가하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

1) 플렉스를 사용한 조성 Pb-40wt%In의 경우 가열 속도를 10°C/min로하여 리플로하면 8개의 증착 솔더중 6개가 솔더볼을 형성하였으며 가열 속도를 20°C/min으로 증가시키면 모두 지름 100μm의 반구형 솔더볼을 형성할 수 있었다.

2) 플렉스를 사용한 조성 Pb-50wt%In의 경우 가열 속도 1°C/min에서도 반구형의 솔더볼을 형성할 수 있었다.

3) 솔더중의 In과 UBM Au층이 반응하여 UBM Au층 위에 각형의 금속간 화합물이 형성되었으며 SEM/EDS 조성 분석 결과 AuIn금속간 화합물 이었다.

4) 플렉스를 사용하지 않고 리플로한 솔더볼 표면 조성 분석한 결과, Au함량은 가열 속도 1°C/min인 경우에는 8.78wt%에서 가열 속도가 20°C/min에서는 3.43wt%로 감소하였다.

5) 플렉스를 사용하여 리플로한 솔더볼 표면 조성을 한 결과, Au함량은 가열 속도 1°C/min에서는 7.5wt%에서 가열 속도가 20°C/min이면 10.94wt%로 증가하였다.

참 고 문 헌

- Merrill L. Minges, "Electronic Materials Handbook," Vol.1., Packaging, ASM, materials park (1989)
- Michael R. Matthews, Brain M. Macdonald, and

- Keith R. Preston, "Optical Components-The New Challenge in Packaging," IEEE Trans. CHMT, Vol. **13**, No.4, pp. 798-806 (1990)
3. Lee S. H, Joo G. C, Park K. S, Kim H. M, Kim D.G, and Park H.M, "Optical Device Module Packages for Subscriber Incorporating Passive Alignment Techniques," Proc., 45th ECTC, pp. 841-844 (1995)
 4. Tsunetsugu H, Katsura K, Hayashi T, Ishitsuka F, and Hata S, "A New Packaging Technology Using Mecrosolder Bumps for High-Speed Photo-receivers," IEEE Trans. CHMT, Vol. **15**, No. 4, pp. 578-582 (1992)
 5. Joo G.C, Lee S.H, Hwang N, Park K.S, Kim H. M, Song M.K, and Pyun K.E. "Fabrication of Optical Tx/Rx Subscriber Modules Incorporating Passive Alignment Technique," Proc., 46th ECTC, pp. 37-41 (1996)
 6. R.J.Klein Wassink, "Soldering in Electronics," Electrochemical Publications Ltd. Chapter **10** (1984)
 7. Willian R. Imler, Kenneth D. Scholz, V.K.Nagesh, Clinton C. Chao, and Roland haitz, "Precision Flip-Chip Solder Bump Interconnects for Optical Packaging," IEEE Trans., CHMT, Vol. **15**, No. 6, pp. 977-982 (1992)
 8. N.Koopman, S.Bobbio, S.Nangalia, and J.Bousaba "Fluxless Soldering in Air and Nitrogen," Proc. 43rd ECTC, pp. 595-605 (1994)
 9. 이충식, 김영호, 권오경, 제9회 재료·물성 심포지엄, 대한금속학회, pp. 96-101 (1996)
 10. Kaour Hashimoto, "Flip-Chip Interconnection Technology for Packaging of VLSI Operated in Liquid Nitrogen," IEEE Trans, Vol.E 74, No 8, pp. 2362-2367 (1991)
 11. J.M. Eldridge, D.W. Dong, and K.L. Komarek "Room Temperature Oxidation of Lead-Indium Alloy Films," J. of Electronic Materials, Vol. **4**, pp. 1191-1205, June (1975)
 12. Eric A. Brandes, "Smithells metals reference book" Butterhorths Chapter 14-6 (1983)
 13. L.S. Goldmann, R.D. Herdzik, N.G. Koopman, and V.C.Marcotte, IEEE Transaction on part, Hybrids, and Packaging, Vol. PHP-13, No. 3, (1977)
 14. D.M. Jacobson and G. Humpston, "Gold Coatings for fluxless soldering," Gold Bull., Vol.22, pp. 9-18, (1989)