

## \*공정 조성 SnPb 솔더의 배선 길이에 따른 electromigration 특성

이용덕 · 이장희 · 윤민승\* · 주영창\* · 박영배†  
안동대학교 신소재공학부, \*서울대학교 재료공학부

### Line Length Effect on Electromigration Characteristics of Eutectic SnPb Solder

Yong-Duk Lee, Jang-Hee Lee, Min-Seung Yoon\*, Young-Chang Joo\* and Young-Bae Park†

School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea  
\*School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

( 2007년 6월 8일 받음, 2007년 7월 11일 최종수정본 받음)

**Abstract** In-situ observation of electromigration behavior of eutectic SnPb solder was performed as a function of line length at 100°C,  $6 \times 10^4$  A/cm condition in a scanning electron microscope chamber. The incubation time for edge drift and the edge drift velocity increase as line length increases, which are discussed with the void nucleation stage of solder bump and the electromigration back flux force, respectively. Finally, the existence of electromigration product (jL) and its line length dependency are also discussed

**Key words** electromigration, eutectic SnPb, line length dependency, jL product.

#### 1. 서 론

전자·정보기기산업의 급속한 발전에 따라 전자정보기에 사용되는 부품들의 고기능화, 소형화 및 고집적화가 요구되고 있다. 이러한 추세를 따라 칩과 PCB를 연결하는 솔더 범프의 크기가 작아지고 있으며 그에 따라 실제 인가되는 전류밀도가 증가하면서 electromigration 현상이 매우 큰 이슈가 되고 있다.<sup>1,2)</sup> 실제 사용되는 솔더 범프는 electromigration 현상뿐만 아니라, Joule 열, 전류집중현상, 금속간 화합물(Intermetallic compound)의 생성 및 변화 등 다양한 요인들이 솔더 범프의 파괴 원인으로 작용하므로 순수한 electromigration에 의한 파괴 원인 규명이 어렵다. 따라서 electromigration 외의 다른 요인들을 최소화 할 수 있는 박막형 edge 이동 선형 시편을 제작하여 순수한 electromigration에 의한 파괴기구를 규명할 필요성이 있다.

공정조성 SnPb 솔더는 80°C를 경계로 80°C 이상의 온도에서는 Pb가 우선적으로 확산하며, 80°C 이하의 온도에서는 Sn이 우선적으로 확산을 한다.<sup>3,4,5)</sup> 따라서 공정조성 SnPb 솔더에서의 electromigration 현상은 우세확산원소의 이동 후, 비 우세확산원소가 이동하는 잠복기

가 존재하며 이러한 잠복기 기간에는 음극에서의 edge 이동현상이 관찰되지 않는다.<sup>6,7)</sup> 이러한 선형시편에서의 잠복기는 솔더 범프에서의 보이드 생성기간과 유사한 것으로 보고되었으며, 우세확산원소의 거동에 관한 분석이 솔더 범프에서 보이드의 진전 및 파괴 기구 규명에 중요한 역할을 할 것이라고 판단된다.

Electromigration에 의한 원자의 유동( $J_{flux}$ )에서 전자가 움직이는 방향으로 작용하는 electron wind force와 이동된 원자의 농도 기울기에 의해 반대 방향으로 존재하게 되는 back flux force가 같으면 원자의 이동은 발생하지 않게 된다. 정방향의 힘과 역방향의 힘이 같다고 가정하면 전류밀도와 길이의 곱은 상수가 되므로 electromigration이 발생하지 않는 임계전류밀도 및 임계길이를 가지게 된다. 알루미늄과 같은 순수한 금속은 electromigration이 발생하지 않는 임계전류밀도와 임계 길이를 가진다고 보고된 바 있다.<sup>6)</sup> 그러나, 공정조성 SnPb의 경우 배선길이에 따른 전류밀도와와의 관계에 대해 좀 더 세밀한 연구가 필요하다.<sup>11)</sup>

따라서, 본 연구에서는 공정조성 SnPb 박막형 edge 이동 선형 시편을 제작하여 선 길이에 따른 electromigration 거동을 분석하기 위해 100°C,  $6 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>의 조건에서 미세구조의 변화를 주사전자현미경을 이용하여 실시간 관찰하였으며, 시간과 선 길이에 따른 Pb상의 분율을 Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)와 실시간 관찰된 Scanning Electron Microscope(SEM) 이미지를 통하여 분석하였다.

\*심포지엄 발표논문

†Corresponding author

E-Mail : ybpark@andong.ac.kr (Y. - B. Park)

2. 실험 방법

SnPb 솔더라인의 길이에 따른 electromigration 거동을 분석하기 위하여 박막형 edge 이동 선형 시편을 제작하였다. P형 <100> Si 웨이퍼 위에 UBM으로 Cu를 3000Å 증착 후, 반도체의 사진, 식각 공정을 통하여 폭 100 μm, 길이가 각각 100 μm, 200 μm, 500 μm인 패드 패턴을 형성하였고, electromigration 실험 동안 발생하는 라인과 패드 사이의 원자 공급 효과를 없애기 위해서 SiO<sub>2</sub>를 화학기상증착(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 방법으로 1 μm 증착하여 라인과 패드를 분리하였다. 패턴이 형성된 시편에 공정조성 SnPb 솔더 페이스트를 도포한 후 200°C에서 3초간 리플로우 하였으며, 리플로우 후 100 μm, 200 μm, 500 μm의 각 패턴에 일정한 전류밀도를 인가하기 위해 솔더의 두께를 4 μm로 연마하여 박막형 edge 이동 선형 시편을 제작하였다. Fig. 1은 배선의 길이가 100, 200, 500 μm인 시편의 주사전자현미경 사진이다. 전류밀도는 가해진 전류에 Cu UBM과 SnPb 솔더의 두께를 합한 단면적으로 나누어 나타내었다. 온도 및 전류를 시편에 인가하여 시간에 따른 저항의 변화를 실시간 측정할 수 있는 시스템을 주사전자현미경(Hitachi 2500C) 내에 장착하여 electromigration에 의한 미세구조의 변화를 관찰하였다. 박막형 edge 이동 선형 시편을 주사전자현미경 내에 탑재하기 위하여 Kyocera 24pin 패키지에 Ag 페이스트를 이용하여 부착하였으며, 시편에 전류를 인가하기 위해서 시편과 패키지 사이를 Au 와이어 본딩하여 전기적인 연결을 하였다. Electromigration 현상의 용이한 관찰을 위해 실제 플립칩 솔더 범프에서의 동작조건보다 가속화된 100°C, 6 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>의 조건에서 공정조성 SnPb 솔더의 길이에 따른 electromigration 거동을 실시간 촬영된 SEM 이미지 및 EDS로 분석하였다. Electromigration에 의한 솔더의 이동속도를 구하기 위해서 각 시간에서의 이동 면적을 image analyzer로 측정한 뒤, 길이로 환산하여 평가하였으며, 특정 상의 면적 분율 또한 image analyzer로 평가하였다.

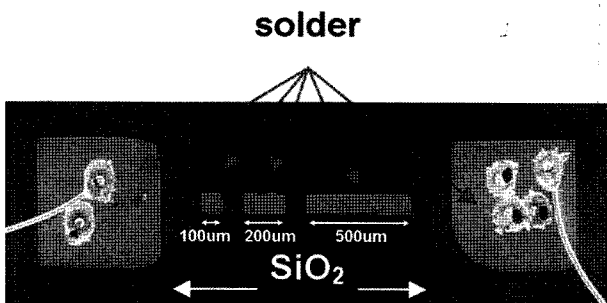


Fig. 1. SEM image of eutectic SnPb edge drift stripe with different line length segments.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 100°C, 6 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>의 조건에서 100 μm, 200 μm, 500 μm의 각 길이에서 electromigration 실험 전과 24시간 실험 후의 SEM 이미지이다. 시간이 지남에 따라 SnPb 솔더가 음극에서 양극으로 이동하여 음극에서는 보이드, 양극에서는 힐락이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서의 실험 온도인 100°C는 공정조성 SnPb 솔더의 우세확산원소가 바뀌는 80°C 이상의 온도이기 때문에 Pb 원자가 먼저 이동할 것으로 예상되었으며, 실험결과에서 Pb 원자가 우선적으로 이동한 후 Sn 원자가 이동하여 보이드를 형성하는 잠복기를 가지는 것으로 나타나 기 연구결과와 같은 기구를 가진다고 판단된다.<sup>7,8)</sup>

Figure 3은 공정조성 SnPb 선 길이에 따른 잠복기와 edge 이동 속도를 나타낸 그래프이며 table 1에 그 값을 나타내었다. 100 μm, 200 μm, 500 μm의 선 길이에서 잠복기는 각각 1.5, 2, 2.5시간으로 나타났으며, edge 이동 속도는 각각 1.25, 1.53, 1.92 × 10<sup>-10</sup>m/s로 평가되어 선 길이가 길어짐에 따라 잠복기 및 edge 이동 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 선 길이에 따라 잠복기가 일정하게 증가하는 것은 우세확산원소인 Pb 원자가 electromigration

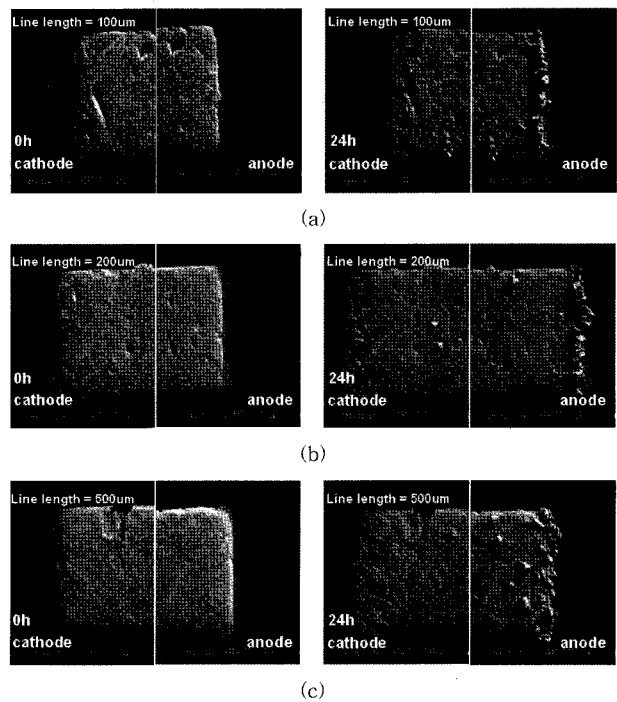


Fig. 2. SEM images near cathode and anode edges during electromigration at 100°C, 6 × 10<sup>4</sup>A/cm condition as a function of line length; (a) 100 μm, (b) 200 μm, and (c) 500 μm. The left column shows SEM image before electromigration test and the right column shows the SEM image after current stressing for 24 hrs.

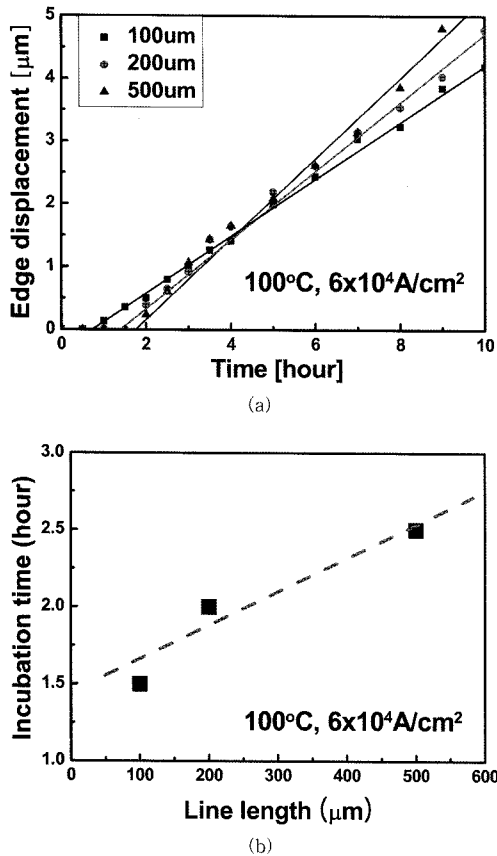


Fig. 3. (a) Edge displacement as a function of stressing time for 100 μm, 200 μm, and 500 μm line length, respectively, and (b) incubation time as a function of line length.

Table 1. Incubation time for edge drift and edge drift velocity of eutectic SnPb solder as a function of line length.

Line length (μm)	Incubation time (hr)	Edge drift velocity (m/s)
100	1.5	1.25×10 <sup>-10</sup>
200	2	1.53×10 <sup>-10</sup>
500	2.5	1.92×10 <sup>-10</sup>

에 의해서 먼저 이동할 때 선 길이가 길어짐에 따라 그 이동되는 길이가 길어지기 때문이라고 판단된다. 이러한 현상을 솔더 범프에서의 보이드 생성 및 진전에 의한 파괴 현상과 비교해 볼 때 솔더 범프에서의 보이드 생성 기간은 선형시편에서의 잠복기로 가정할 수 있다. 솔더 범프에서의 파괴시간은 보이드 생성에 걸리는 시간이 전체 파괴시간의 90%를 차지하므로 보이드의 생성시간이 곧 솔더 범프의 파괴시간으로 간주되고 있다.<sup>9,10</sup> 따라서, 선형시편에서의 잠복기는 솔더 범프에서의 보이드 생성시간으로 보고 선형시편의 길이를 솔더범프에서 보이드가 형성되는 솔더/UBM 계면의 길이라고 가정하면, 선형시편에서의 잠복기가 선 길이에 따라 증가하는 것은 솔더 범프에서의 솔더/UBM 계면의 길이가 커질수록 보이드

의 생성시간이 길어지는 것과 같으므로 솔더 범프의 파괴시간이 증가할 것으로 예상할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 일정한 조건 및 솔더 범프의 구조에서 솔더/UBM 계면의 길이 즉, UBM의 길이가 솔더 범프의 electromigration에 대한 신뢰성 향상에 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

선 길이가 증가함에 따라 edge 이동 속도가 일정하게 증가하는 것은 선 길이가 감소함에 따라 electromigration에 의한 원자이동에 대한 역방향으로의 힘이 증가하기 때문이라고 사료된다. Electromigration에 의해 원자가 음극에서 양극으로 이동 하면 음극에서는 원자의 이동으로 인한 인장응력을 느끼게 되고, 양극에서는 원자의 축적으로 인한 압축응력을 받게 된다. 이러한 배선 양 끝단에서의 응력은 전체 배선에서 응력구배를 발생하게 되고 이러한 응력구배를 해소하기 위하여 electromigration에 의한 원자의 이동방향에 반대방향으로의 힘(back flux force)이 가해지게 된다. 이러한 응력구배는 배선의 길이가 길어짐에 따라 감소하기 때문에 electromigration에 의한 원자의 이동속도는 배선의 길이가 길어짐에 따라 증가하는 경향을 가지는 것으로 사료된다. Electromigration에 의한 원자의 유동( $J_{flux}$ )은 운동량과 구동력의 곱으로 나타낼 수 있으며,<sup>6)</sup> 식 (1)은 electromigration에 의한 원자의 유동을 정리한 식이다.

$$J_{flux} = \frac{DC}{kT} Z^* e \rho j \quad (1)$$

D는 확산계수, C는 농도, k는 볼츠만 상수, T는 온도,  $Z^*e$ 는 전기장 내의 유효전자 수,  $\rho$ 는 비저항, j는 전류 밀도이다. 이러한 electromigration에 의한 원자 유동식에서 electromigration에 의한 back flux force에 관한 인자를 포함하여 다시 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서  $\Omega$ 는 원자의 체적,  $\sigma$ 는 응력, x는 선 길이이다.

$$J_{flux} = \frac{DC}{kT} \left\{ Z^* e \rho j - \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right\} \quad (2)$$

또한, 식 (2)에서 electron wind force ( $Z^*e\rho j$ )와 back flux force의 값이 같아지면 electromigration에 의한 원자의 이동이 0의 값을 가지므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 가해진 전류밀도와 배선의 길이의 곱(jL product)이 일정한 상수 값을 가지기 때문에 배선에서의 electromigration 현상에는 임계전류밀도 및 임계길이를 가지며 이러한 임계 값 이하의 조건에서는 electromigration 현상이 나타나지 않는다는 것을 의미하게 된다.

$$(jL)_{cr} = \frac{\Delta \sigma \Omega}{e Z^* \rho} \quad (3)$$

Figure 4(a) 는 100°C, 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>의 조건에서 electromigration 실험 후 500 μm 길이의 시편에서 시간에 따른 Pb 원자의 조성을 관찰한 것이다. 실험 초기에 Pb 원자의 조성은 공정조성 SnPb 솔더에서의 농도 분포와 비슷한 값을 가지지만 시간이 지남에 따라 음극에서의 Pb 농도가 점점 감소하였으며, 100 μm 내외의 길이에서 Pb 원자의 농도구배가 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 양극에서의 Pb 원자의 조성은 실험 초기의 것과 유사한 것으로 나타났다. Fig. 4(b) 는 500 μm 길이의 시편에서 시간에 따른 Pb 상의 면적분율을 나타낸 것이다. 음극에서의 Pb 상은 점점 감소하는 경향을 보이는 반면에 양극에서 Pb 상의 면적분율은 음극에서의 Pb 상이 감소한 만큼의 증가를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 electromigration에 의해 Pb 원자가 음극에서 양극으로 이동할 때, 음극에서의 Pb 원자가 양극에서의 Pb-rich 상으로 녹아 들어가 100 μm 내외의 구간에서 Pb 원자의 농도구배가 형성되어 Pb 원자의 농도구배를 해소하기 위해 electromigration에 의한 원자이동방향에 반대되는 방향으로의 화학적 구동력(chemical

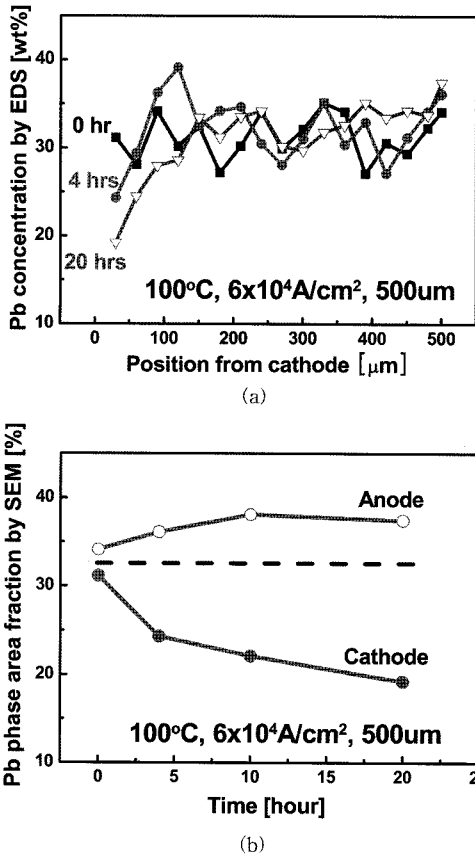


Fig. 4. (a) Pb concentration by EDX along the line from cathode edge, and (b) Pb phase area fraction at cathode and anode edges by in-situ SEM image as a function of stressing time at 500 μm long line.

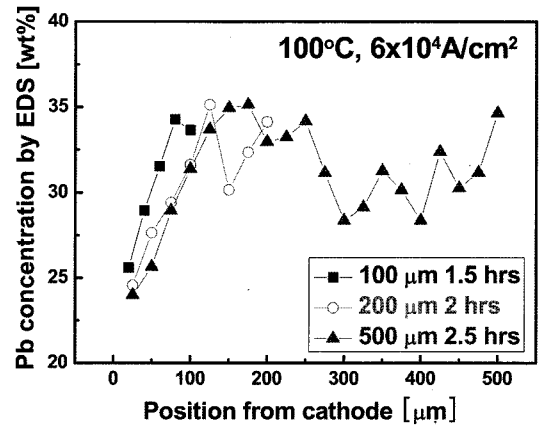


Fig. 5. Pb concentration by EDX along the line from cathode edge at incubation time for 100 μm, 200 μm, and 500 μm long line, respectively.

driving force)이 작용하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 각 배선길이의 잠복기 시점에서 Pb 원자의 조성을 관찰한 것이다. 잠복기에서도 각 배선길이에 Pb 원자의 농도구배는 확연히 나타났으며, 농도구배에 의한 화학적 구동력은 배선 길이에 무관하게 존재하는 것으로 나타났다. 식 (4)는 화학적 구동력이 존재할 때의 electromigration에 의한 원자 유동식을 나타낸 것이다.

$$J_{flux} = \frac{DC}{kT} \left( Z^* e \rho j - \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \Delta \mu_{chemical} \right) \quad (4)$$

기 연구결과에 의하면 Al과 같은 순금속 배선에서의 electromigration에서는 jL product가 존재하는 것으로 나타났다.<sup>6)</sup> 하지만 본 연구결과에서는 공정조성 SnPb 솔더의 두 가지 금속이 순차적으로 이동하기 때문에 우세 확산원소의 이동으로 인한 추가적인 농도구배에 의한 화학적 구동력이 작용하여 electromigration에 의한 원자의 유동이 배선의 길이에 의존하지 않으며, 식 (3)과 같은 순금속에서의 jL product를 만족하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 공정조성 SnPb 솔더에서의 electromigration에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 농도구배에 의한 화학적 구동력의 명확한 규명이 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

공정 조성 SnPb 박막형 edge 이동 선형 시편을 제작하여 100°C, 6×10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>의 조건에서 선 길이에 따른 electromigration 거동을 실시간 관찰하였다. 선 길이에 따라서 잠복기 시간 및 edge 이동 속도가 증가하였다. 선형 시편에서의 잠복기를 솔더 범프에서의 보이드 생성기간으로 가정할 경우, UBM의 길이가 길어짐에 따라 솔더 범프의 파괴시간이 증가할 것으로 사료된다. 또한, 선

길이가 증가할수록 edge 이동 속도가 증가하는 것은 선 길이에 따른 응력구배에 의한 back flux force가 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 공정 조성 SnPb 솔더에서는 두 금속의 순차적인 이동으로 인한 농도구배에 의하여 화학적 구동력이 존재하기 때문에 순금속에서의 경우와 달리  $jL$  product가 배선 길이에 무관한 것으로 판단되며, 화학적 구동력의 명확한 규명이 공정조성 SnPb와 같은 합금화된 솔더의 electromigration 신뢰성 확보에 매우 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. International Technology Roadmap for Semiconductors 2005 Edition, Assembly and Packaging (2005).
2. T. Y. Lee, K. N. Tu, S. M. Kuo and D. R. Frear, J. Appl. Phys., **89**(6), 3189 (2001).
3. G. A. Rinne, Microelectron. Reliab., **43**, 1975 (2003).
4. J. Y. Choi, S. S. Lee and Y. C. Joo, J. Appl. Phys., **41**, 7487 (2002).
5. D. Gupta, K. Vieregge and W. Gust, Acta Mater., **47**(1), 5 (1999).
6. I. A. Blech, J. Appl. Phys., **47**(4), (1976).
7. O. H. Kim, M. S. Yoon, Y. C. Joo and Y. B. Park, J. Microelectronics & Packaging Soc., **13**(1), 7-15 (2006).
8. O. H. Kim, M. S. Yoon, Y. C. Joo and Y. B. Park, J. Microelectronics & Packaging Soc., **12**(4), 281-287 (2005).
9. W. J. Choi, E. C. C. Yeh, and K. N. Tu, J. Appl. Phys., **94**(9), 5665 (2003).
10. T. Y. Lee, K. N. Tu and D. R. Frear, J. Appl. Phys., **90**, 4502 (2001).
11. B. N. Kim, M. S. Yoon and B. J. Kim, Y. B. Park and Y. C. Joo, In; Presented at Mater. Res. Soc. Symp. Fall Meeting, Boston, MA (2006).