

Joule Heating Effects and Initial Resistance in Electromigration Test

朱哲源* · 姜亨坤** · 韓秉誠***

(Chul Won Ju · Hyung Gon Kang · Byung Sung Han)

Abstract - Joule heating effect in EM(Electromigration) test were performed on a bend test structure. EM test is done under high current densities(1.0-2.5MA/cm²), which leads to joule heating. Since joule heating is added to the controlled oven(stress) temperature, the metal line temperature is higher than the stress temperature. The increase in the stress temperature due to joule heating is important because EM phenomena and metal line failure are related to the stress temperature. In this paper, metal line was stressed with a current density of 1.0 MA/cm², 1.5 MA/cm², 2.0 MA/cm², 2.5 MA/cm² for 1200 sec and temperature increase due to joule heating was less than 10°C. Also it took 30 minutes for the metal line to equalized with oven temperature. Recommendations are given for the EM test to determine the initial resistance of EM test structure under stress temperature and current density.

Key Words :Joule heating, 초기저항값, Electromigration, TCR, Void

1. 서 론

VLSI 소자의 집적화로 칩수가 submicron으로 축소되면서 금속배선 폭이 미세화 되고, 다층 배선구조가 되면서 전자이주(EM: Electromigration)현상은 VLSI 소자의 신뢰성을 크게 감소시키는 중요한 신뢰성 저해 요소로 작용하고 있다. EM은 높은 온도(150°C 이상) 및 전류밀도(1×10^6 A/cm² 이상)에서 금속배선 물질인 Al의 원자가 이동하여 배선에 void가 형성되고, 이 void가 점차 커져 배선 폭이 감소되면서 단락(open)까지 도달하는 현상으로서, EM현상에 의한 금속배선의 고장시간 (MTF : Median Time to Failure)을 산출하는 실험식[1]은 Black에 의해 산출되었으며, 금속배선의 구조 및 재료에 따른 EM 현상[4-5][8]과 via에서의 EM 현상[7]에 관한 연구는 많이 수행되어 왔지만, EM특성을 시험할 때 중요한 시험 스트레스(stress)에 의한 주울 열(Joule

heating)과 온도구배(temperature gradient)에 관한 연구 [2-3][6]는 많이 수행되지 않았다.

현재 금속배선의 신뢰성평가 시험으로 EM 특성을 측정할 때 중요 측정 파라미터는 금속배선의 고장시간인데, 일반적으로 고장시간은 저항 상승율로 판단하고 있다. 그러나 금속배선의 EM 특성시험에서 배선의 저항증가 요인은 시험온도 및 Joule heating 에 의한 저항 증가와 순수 EM 현상으로 인한 금속배선에서의 void에 의한 저항 증가로 구분 할 수 있으며, 시험결과 저항증가율이 배선의 초기 저항값 대비 5% 이상 증가시에는 신뢰성이 낮은 것으로 판정하고 있다.

따라서 EM 시험결과 분석에서 시험온도 및 Joule heating 에 의한 저항 증가와 void 형성에 의한 저항증가를 정확히 구분하여야 하므로, EM 시험패턴 구조에 의한 온도구배와 전류에 의한 Joule heating 의 실체를 정확히 이해하고 측정하여야 하며, 실제로 EM 시험시 이들의 영향을 시험결과에 반영시켜 순수 EM 현상에 의한 저항증가율로 고장시간을 측정하여야 한다.

본 논문에서는 EM시험시 Joule heating에 의한 시편의 온도 상승 및 저항 상승값을 구하기 위하여 선폭 1 μ m, 길이 1800 μ m인 bend 시험패턴을 제작하여, 시험(챔버)온도가 시편에 전달되어 시편온도가 시험온도와 평형상태에 도달할 때까지 소요되는 시간과, 스트레스 온도인 170°C에서 Joule heating에 의한 시편의 온도 및 저항 상승을 측정하였으며

* 正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1998年 9月 30日

最終完了 : 1999年 4月 28日

EM 시험시 초기 저항값의 측정방법을 제시하였다.

2. 실험

2.1 시편제작

실험에는 기판(substrate)으로 비저항 1~25 Ω-cm, 결정면 <100>인 p형 5인치 실리콘을 사용하였으며, 시험패턴은 그림 1과 같은 선폭 1μm, 길이가 1800μm인 벤드(Bend)구조로서 다음과 같은 공정 순서로 제작하였다.

공정 시작 전에 웨이퍼 위의 모든 먼지와 불순물을 제거하기 위하여 실리콘 웨이퍼를 조성비 4:1의 H₂SO₄/H₂O₂ 용액에 담근 후 20:1 HF에 담구어 세척한 다음, 실리콘 기판과 EM 시험패턴 사이를 전기적으로 분리하고 돌출(topology) 구조를 형성시키기 위하여 저압화학증착(LPCVD:Low Pressure Chemical Vapor Deposition)방식으로 산화막을 5000Å 증착한 후, 금속배선은 스퍼터(sputter) 방법으로 온도 250℃, DC power 9.6KW인 조건에서 Al-1% Si을 0.5μm 두께로 증착하여 사진식각(photolitho graphy)공정으로 EM 시험패턴을 정의(define)하고 건식 식각(dry etch)방법으로 나머지 금속막을 제거하였다.

다음 공정으로 금속막을 420℃의 고온에서 N₂/H₂ 분위기에서 30분 동안 열처리(alloy)하였으며, EM 시험패턴을 보호하기 위하여 PECVD 산화막을 1μm 두께로 증착시킨 다음 사진식각 공정을 이용하여 와이어 본딩(wire bonding)을 위하여 패드(pad)를 형성하여 시험패턴을 제작하였다.

그 다음 EM 시험을 위하여 상기와 같이 제작된 칩(chip)은, 시험패턴에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시켜 온도 상승에 따른 측정오차를 작게하기 위하여 16핀 세라믹 패키지로 조립하여 EM 시편을 제작하였다.

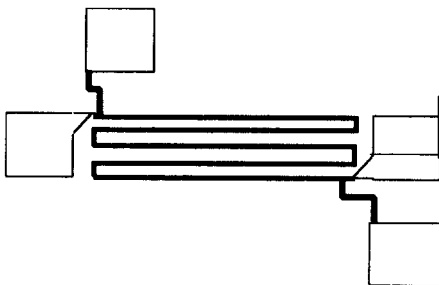


그림 1 EM 시험패턴의 구조 (선폭:1 μm, 길이:1800μm)
Fig. 1 Schematic view of a EM test structure(width:1μm, length:1800μm)

2.2 측정

상기와 같이 제작된 시편은 EM시험에 앞서, 표준공정 상태

에서 비교적 많이 벗어난 시편을 제거 함으로써 더욱 유효하고 정확한 시험결과를 얻기 위하여 패키지 된 시편의 초기 저항을 상온에서 측정하여 저항값의 분포를 조사하고, 최빈값(가장 많은 분포를 보이는 저항값)주변의 시편을 대상으로 시험에 사용할 시편들을 1차적으로 선정하였으며, 이 시편을 다시 150℃에서 48시간 저장하여 열적으로 안정화 시킨 다음 저항을 측정하여 1차 선별시와 같은 방법으로 필요한 시편을 최종적으로 결정하였다.

또한 정확한 전류밀도 인가를 위하여 EM 패턴의 실질적인 치수를 주사 전자현미경(SEM)을 사용하여 금속선의 단면을 촬영하였으며, EM 현상에 영향을 주는 Al-Si 1% 금속선의 그레인(grain)크기를 측정하였으며, 공정 완료된 EM 시편의 bend 부분을 전류인가 전과 인가 후를 구분하여 SEM으로 측정하여 EM현상을 관측하였다.

실험할 때 중요한 것은 시험온도(챔버 내부온도) 및 전류인가로 인한 시편의 온도상승을 정확히 측정해야 한다. 본 실험에서는 온도 상승과 관련된 2가지 형태의 반응시간을 다음과 같이 정의하여 구분하였다. 반응시간 1은 챔버 내부온도가 시험온도에 도달한 후 시편내부까지 열이 전달되어 시편이 평형온도에 도달할 때 까지의 시간이고, 반응시간 2는 시편에 전류를 가할 때 Joule heating에 의하여 시편온도가 상승하는데, 시편온도가 평형상태에 도달할 때까지의 시간이다.

시험온도에 의한 시편의 온도 상승은 40℃에서 시간 변화에 따른 시편의 저항 변화로 측정하였으며 저항 변화가 없을 때 시편의 온도는 평형상태에 도달하며 그때의 시간을 반응시간 1로 하였다. 전류인가로 인한 시편의 온도 상승은 170℃에서 인가 전류밀도를 각각 1 MA/cm², 1.5 MA/cm², 2 MA/cm², 2.5 MA/cm²로 할 때, 시간변화에 따른 시편 양단에서의 전압을 측정하여 시편의 저항을 산출한 후, 초기 저항값과의 차이 및 온도 변화를 산출하였으며 온도 변화가 없을 때 까지의 시간을 반응시간 2로 하였다.

온도상승에 의한 시편의 저항 변화는 다음 식(1)과 같이 산출한다.

$$R = R_0 [1 + TCR \times (T - T_0)] \quad (1)$$

여기서 R은 온도 T에서의 저항, R₀는 온도 T₀에서의 저항이며, TCR(Temperature Coefficient of Resistance)은 저항의 온도상수이다. Joule heating에 의한 시편의 온도상승은 시편 양단에서의 전압을 측정하여 저항을 구한 후 식(1)에 의해 산출하였다. 시편의 온도상승은 다음과 같은 순서로 측정 산출하였다. 시험패턴의 단면을 SEM으로 촬영하여 패턴의 폭과 두께를 측정하여 단면적을 산출한 다음, 저온(T₁)에서 시편의 초기 저항(R₁)을 측정하고, 챔버온도가 시험온도(T₂)에 도달한 후 금속배선의 온도가 평형상태에 도달할 때 까지의 반응시간 1을 결정한다. 그 다음 시험온도(T₂)에서 시편이 평형상태에 도달하면 시편의 저항(R₂)을 측정하여 식(2)를 이용하여 시편의 TCR(Temperature coefficient of resistance)을 산출한다.

$$CTCR = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

다음으로 금속배선에 전류를 가한 후 금속배선의 온도가 평형상태에 도달할 때 까지의 반응시간 2를 측정하였으며, Joule heating에 의한 온도상승을 산출하기 위하여 시험온도(T2)와 평형상태가 된 시편에 전류를 가한 후, 시편온도가 평형상태에 도달할때의 시편저항(R3)을 측정하여 다음 식(3)에 따라 Joule heating에 의한 온도상승을 산출하였다.

$$\Delta T = \frac{R3 - R2}{R2 \times TCR} \quad (3)$$

이 실험을 위하여 시편에 인가되는 전류를 정전류로 만들기 위하여 시편의 전단에 큰 외부저항을 직렬로 연결하여 정전류가 유지되고, 200℃의 고온에서도 견딜 수 있는 고온용 소켓 및 컨넥터가 실장된 챔버를 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

챔버온도와 시편온도가 평형상태에 도달할 때 까지의 반응시간 1을 구하기 위하여 40℃에서 시간변화에 따른 저항의 변화를 측정한 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 시편 1은 세라믹 패키지의 뚜껑을 제거하여 제작된 EM 패턴의 보호막이 노출된 상태이고, 시편 2는 패키지 뚜껑을 제거하지 않은 시편으로서 패키지가 시편의 온도상승에 끼치는 영향을 살펴보았다. 표 1에서 보듯이 30분이 경과될 때 까지 저항은 점차 증가하다가, 30분이 지나면 저항은 더 이상 증가하지 않았다. 따라서 챔버온도와 시편온도가 평형상태에 도달할 때 까지의 반응시간은 30분임을 알 수 있었고, 시편1과 시편 2의 저항값의 차이는 0.2 - 0.3 Ω으로 패키지의 영향은 크지 않았다.

표 1 시간변화에 따른 저항 변화 (온도:40℃)
Table 1 Resistance with time at 40℃

시험온도 (℃)	시간 (분)	저항	
		시편 1	시편 2
30	-	46.6	46.4
40	5	48.5	48.2
	10	49	48.7
	15	49.2	49
	20	49.3	49.1
	25	49.3	49.2
	30	49.4	49.2
	35	49.4	49.2
	40	49.4	49.2

EM 시편에 가하는 전류밀도를 정확하게 하기 위하여 금속배선의 단면을 측정된 SEM사진은 그림 2와 같다. 그림 2로 부터 시험패턴의 폭은 1.0μm이며, 두께는 0.53μm이었다. 또 금속선

Al-1% Si 의 그레인 측정은 그레인경계(grain boundary)면을 뚜렷하게 관찰하기 위하여 시편을 불산(10:1 HF)용액에 80초간 담구어 시편표면의 산화막을 제거한 후 SEM으로 측정된 결과는 그림 3과 같았고 그레인의 크기는 다음과 같이 산출하였다.

그림 3으로부터 그레인 개수를 합하여(168개), 사진 면적에 해당하는 실제치수를 계산하여(22.0μm X 27.3μm), 그레인 한개당 평균면적을 계산한 후 (3.57μm²) 그레인 형상을 원으로 가정하여 원의 지름을 그레인 크기로 가정하여 산출한 그레인의 평균크기는 2.13μm이었다. 따라서 패턴 폭 1.0μm에 비하여 그레인 크기가 크므로 시편의 초기 저항값은 EM현상에 의하여 패턴 폭이 좁아져서 상승될 가능성은 없으며, 순수 온도 상승에 의하여 상승될 것으로 판단된다.



그림 2 EM시험패턴의 단면 SEM 사진(선폭 1μm)
Fig. 2 Cross sectional SEM showing EM test pattern (width:1μm)



그림 3 Al-1% Si의 그레인
Fig. 3 Grain of Al-1% Si

그림 4는 시편을 챔버에 넣고 챔버온도를 23℃ 에서 170℃ 까지 10℃ 간격으로 상승시킨 후, 시편온도가 챔버온도와 평형상태가 되도록 30분 경과 후 측정된 저항값을 나타낸 것으로서 이 그림으로부터 식(2)를 이용하여 산출한 TCR은 0.00383/℃ 이다.

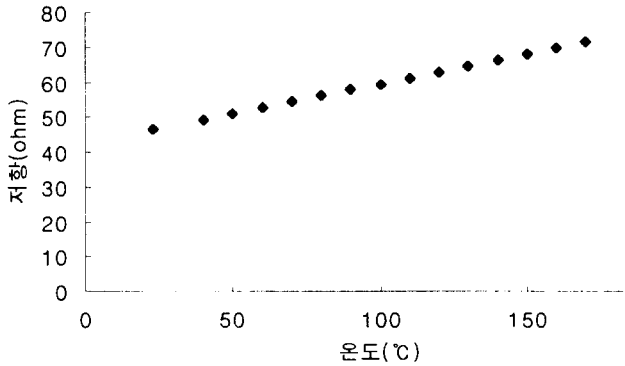


그림 4 온도에 따른 저항의 변화
Fig. 4 Temperature dependance of resistance

그림 5, 6은 시험온도 170℃에서 시편에 전류밀도를 1 MA/cm², 1.5 MA/cm², 2 MA/cm², 2.5 MA/cm²로 인가하였을 때 Joule heating에 의한 온도 변화 및 저항변화를 나타낸 것이다. 그림 5의 시간경과에 따른 시편의 온도상승은 그림 6에서 전류 인가 후 시편 양단에서 저항을 측정하여 식(2)와 같이 표현되는 TCR을 이용하여 산출하였다. TCR은 식(2)에서 보듯이 온도변화에 따른 저항변화율로 정의된다. 시편에 인가되는 전류밀도가 변하면 시편의 온도 및 저항도 변하게 되는데, TCR은 그 물질의 고유 성질이므로 전류밀도와는 관계없이 일정하다. 따라서 그림 5에서 시편의 온도 상승값은 그림 4에서 구한 TCR 값을 적용하여 산출하였다. 그림 5에서 보듯이 전류를 가한 후 시편온도는 시간경과에 따라 점차 상승하는데, 10분 정도 경과하면 시편 온도는 평형상태에 도달하게 되며, Joule heating에 의한 시편의 온도 상승은 전류밀도가 1.0 MA/cm², 1.5 MA/cm², 2.0 MA/cm² 인 경우 각각 1.1℃, 3.3℃, 6.4℃로서 10℃ 미만이고, 2.5MA/cm² 인 경우 10.3℃ 이었다.

그림 6은 인가전류에 따른 Joule heating에 의한 저항 상승을 나타낸 그래프로서, 시편온도가 챔버온도인 170℃와 평형상태에 도달한 후 인가 전류에 따른 순수한 Joule heating에 의한 저항 증가만을 나타내기 위하여 챔버온도를 170℃에 setting 한 후, 상온에서 시험시편을 챔버에 넣어 챔버온도가 170℃에 도달한 후, 시편온도가 170℃와 평형상태에 도달하도록 30분 경과한 후에 측정된 저항값을 기준저항으로 하여 전류를 인가하여 Joule heating에 의한 저항증가를 측정하였다.

그림 6에서 보는바와 같이 전류를 인가하면 Joule heating에 의하여 저항이 증가하는데 인가 전류밀도에 따라 발생하는 Joule heating의 차이가 있으므로 저항 상승값의 차이가 있게 되며, 인가전류가 높을수록 저항증가도 크게 되다가 10분이 지나면 일정하게 되는데, 이것은 시편의 온도가 평형상태에 도달

하기 때문이다. 따라서 Joule heating에 의한 온도 상승 및 저항 변화는 전류 인가 초기에 대부분 반영된다는 것을 알 수 있었으며, 시험시간 10분 경과 후 전류밀도에 따른 시편의 저항증가를 살펴보면 1MA/cm²에서 0.3Ω으로 초기저항의 0.6%, 1.5MA/cm²에서 0.9Ω으로 초기저항의 1.9%, 2MA/cm²에서 1.8Ω으로 초기저항의 3.8%, 2.5MA/cm²에서 2.7Ω으로 초기저항의 5.8%가 Joule heating에 의하여 상승함을 알 수 있다.

그림 7, 8은 EM 시험에 의하여 시편이 손상받은 것을 비교한 것으로 그림 7은 전류를 인가하기 전 EM 시편의 bend 부분을 관측한 SEM사진이고, 그림 8은 170℃에서 1200초 동안 2.5MA/cm² 인 전류밀도를 인가한 후의 bend 부분을 관측한 SEM사진으로서 EM 초기 손상 형태인 void가 형성되었음을 알 수 있다.

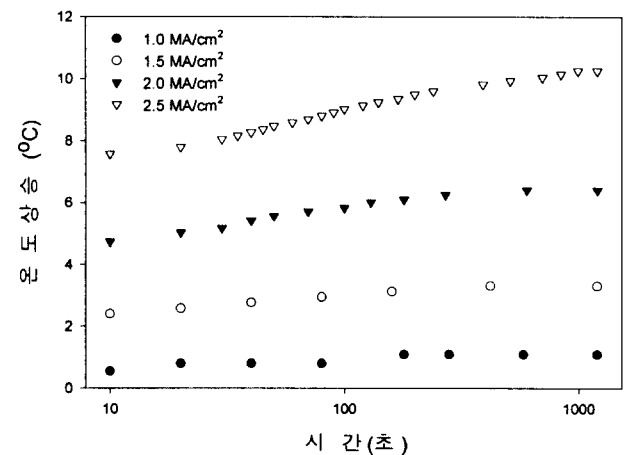


그림 5 전류밀도별 시간변화에 따른 온도상승(시험온도:170 ℃)
Fig. 5 Temperature increase as a function of stress time at several current densities(Temp.:170 ℃)

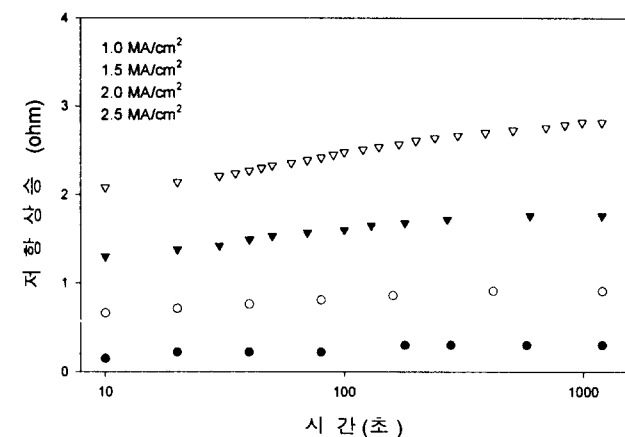


그림 6 전류밀도별 시간변화에 따른 저항상승(시험온도:170℃)
Fig. 6 Resistance increase as a function of stress time at serveral current densities(Temp.:170℃)

4. 결론

EM 시험시 시편의 온도는 시험온도와 Joule heating에 의하여 영향을 받으므로, 시편온도가 시험온도와 평형상태에 도달한 후 Joule heating 영향을 평가하여야 한다. 본 실험에서는 선폭 1 μ m인 시험패턴을 제작하여 시험한 결과 시험온도가 시편에 전달되어 평형상태에 도달하는 반응시간은 약 30분이고, Joule heating에 의하여 시편온도가 상승하는 반응시간은 약 10분 정도 되는 것을 알 수 있었으며 온도 상승에 따른 저항변화를 측정하여 산출한 Al-1% Si의 TCR은 0.00383/ $^{\circ}$ C 이었다.

170 $^{\circ}$ C에서 Joule heating에 의한 시편의 온도 및 저항은 점차 높아지다가 10분 경과 후 평형상태에 도달하는데, 전류밀도가 1 MA/ cm^2 , 1.5 MA/ cm^2 , 2 MA/ cm^2 인 경우 온도상승은 각각 1.1 $^{\circ}$ C, 3.3 $^{\circ}$ C, 6.4 $^{\circ}$ C로서 10 $^{\circ}$ C 미만이고 2.5 MA/ cm^2 인 경우 10.3 $^{\circ}$ C 임을 알 수 있었으며, 시편의 저항 증가는 1MA/ cm^2 에서 0.3 Ω 으로 초기저항의 0.6%, 1.5MA/ cm^2 에서 0.9 Ω 으로 초기저항의 1.9%, 2MA/ cm^2 에서 1.8 Ω 으로 초기저항의 3.8%, 2.5MA/ cm^2 에서 2.7 Ω 으로 초기저항의 5.8%가 Joule heating에 의하여 상승함을 알 수 있었다.

따라서 EM 시험시 초기 저항값은 시편을 챔버에 넣고 시편이 시험온도와 평형상태가 되도록 30분 경과하고, 시편에 시험전류를 인가하기 시작하여 Joule heating에 의한 온도상승이 안정화되는 10분 경과된 때의 저항값으로 정해야 한다.

참고문헌

- [1] J.R.Black, "Current Limitations of Thin Film Conductors", Proc. Reliability Phys., pp.300-306, 1982.
- [2] Yi-Shung Chaug, Huei Li Huang, "Temperature Distribution on Thin Film Metallizations", J.Appli. Phys., Vol.47, No 5, pp.1775-1778, May 1976.
- [3] H.A.Schafft, "Thermal Analysis of Electromigration Test Structures", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-34, No 3, pp 664-672, March, 1987.
- [4] H.A.Schaffet, T.C.Grant, A.N.Saxena and C.Y.Kao, "The current Density Dependence of Ectromigration", Proc. reliability Phys., pp.93-99, 1985.
- [5] C.T.Rosenmayer, F.R.Brotzen, J. W.McPherson, C.F.Dunn, Effects of Stress on Electro migration, Proc. Reliability Phys., pp.52-56, 1991.
- [6] Masanori Sakimoto, Toshiki Itov, Takako Fujii, Temperature Measurement of Al Metallization and Study of Blacks model in High Curent Density, pp333-341, 1995.
- [7] Anthony S.Dates, Electromigration Failure Distribution of Constants and Vias as a Function of Stress Conditions in Submicron IC Metallizations, Proc. Reliability Phys., pp.164-171, 1996.
- [8] Bill Baerg, Recent Problems in Electromigration Testing, Proc. Reliability Phys., pp.211-215, 1997.

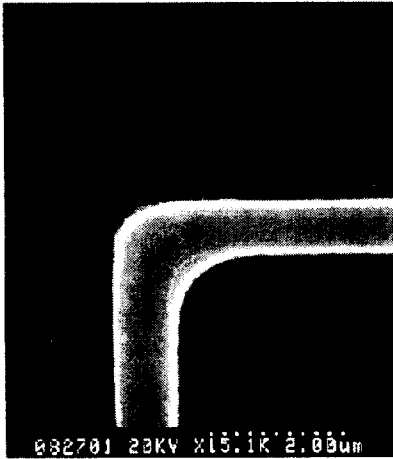


그림 7 선폭 1 μ m인 시험패턴의 bend 부위 SEM사진(전류인가전)
Fig. 7 SEM photograph of 1 μ m bend pattern before current loading

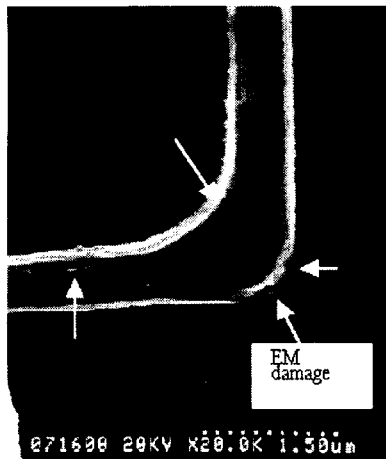


그림 8 선폭 1 μ m인 bend 패턴의 전류인가후 EM 손상 부위 SEM사진(전류밀도:2.5MA/ cm^2)
Fig. 8 SEM photograph of EM damage in 1 μ m bend pattern by current loading(J:2.5MA/ cm^2)

저 자 소 개



주철원(朱哲源)

1954년 6월 17일 생. 1977년 부산대학교 화학공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기전자과 졸업(석사), 1998년~현재 전북대학교 전기공학과 박사과정

Tel : 042-860-5738

한병성(韓秉誠)

전기학회논문지 제48C권 제4호 참조

Tel : 0652-270-2396

E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr

강형곤(姜亨坤)

전기학회논문지 제48C권 제4호 참조

Tel : 0652-270-2389

E-mail : joshuah@sinbiro.com