

반도체 소자의 배선 및 전자 패키지 연결부에서의 파손 해석

이 글에서는 반도체 소자 배선 및 전자 패키지에서 일렉트로마이그레이션(electromigration)과 일렉트로케미컬 마이그레이션(electrochemical migration)에 의한 파괴현상에 관련된 전기적 신뢰성 문제에 대해 소개하고자 한다.

주영창 / 서울대학교 재료공학부, 교수
박영배 / 안동대학교 신소재공학부, 교수

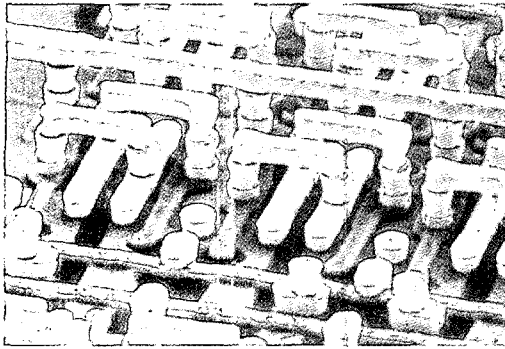
e-mail : ycjoo@plaza.snu.ac.kr
e-mail : ybpark@andong.ac.kr

현대 산업사회의 눈부신 발전 속도에 발맞추어 하루가 다르게 더욱 고성능의 반도체 즉, 집적회로(VLSI, ULSI)가 요구되고 있다. 그 선두를 달리고 있는 것은 중앙처리장치(CPU)의 용도로 쓰이는 것들은 엄청난 고성능이 요구된다. 고성능의 요건은 처리속도가 가장 중요하지만 그 밖에 고집적을 통한 기능 향상이나 저전력소모도 매우 중요하다. 이러한 요구들을 만족시키기 위해서는 공정에 있어서 여러 가지 개선이 필요한데, 그 중에서도 가장 핵심이 되는 것은 스케일(scale)을 더욱 더 작게 하는 것이다. 이렇게 CMOS FET(전계효과 트랜지스터)나 배선(interconnect)이 얼마나 작게 만들어지는가를 디자인 룰(design rule)이라고 일컫는다. 일반적으로 이것은 배선의 선폴을 지칭하는데, 주로 집적회로에서 가장 발달된 부류인 CPU에서 자주 언급되고 있다. 잘 알려진 80486DX(R)은 $0.8\mu\text{m}$, Pentium(R)의 초기작이 $0.6\mu\text{m}$ 수준의 디자인 룰이었던 것에 비해서, '90년대 후반에 출시된 CPU들은 $0.25\mu\text{m}$ 의 디자인 룰로 제작되어 있다. 더욱이 2000년을 넘어선 지금은 $0.18\mu\text{m}$ 와 $0.13\mu\text{m}$ 의 제품들이 양산되어지고 있다. 또한 소자 내부뿐만 아니라 소자의 전자 패키지 부분도 그 크기가 점차 작아지고 있다. 과거 와이어 본딩을 통해서 하던 패키지는 집적도의 증가로 인해 솔더 범프를 이용한 플립칩 범프 방식을 채택하게 되었다. 최근 플립칩 범프의 크기도 점차 작아져서 이제는 $50\mu\text{m}$ 직경의 솔더 범프가 사용되고 있다. 또한 소자의 크기 감소는 PCB 기판의 집적도를 가져오게 되고 PCB 기판은 외부 환경(습기, 온도)에 쉽게 노

출되는 구조이기 때문에 일렉트로케미컬 마이그레이션 문제가 발생하게 된다. 이 글에서는 일렉트로마이그레이션과 일렉트로케미컬 마이그레이션, 두 현상에 대해 기술하고자 한다.

일렉트로마이그레이션에 의한 연결부 배선 파괴

위에서 기술한 바와 같이 배선의 크기가 작아지면 서 배선에 흐르는 전류밀도는 증가하게 되는데 현재 소자에 인가되는 전류밀도는 $10^4 \sim 10^5 \text{A/cm}^2$ 수준이 되었다. 실생활에서 구리 전선에 흐르는 전류밀도가 수 A/cm^2 인 것을 감안할 때 반도체 소자 배선에 흐르는 전류밀도는 배선이 느끼기에 상당히 가혹한 환경인 것이다. 이렇게 배선에 고전류밀도가 흐르게 되면 높은 밀도의 전자들의 이동으로 인해 배선을 구성하고 있는 물질 원자의 이동이 일어난다. 일렉트로마이그레이션은 배선에 흐르는 전류에 의하여 배선을 형성하고 있는 원자가 움직이는 현상을 의미한다. 전자에 비하여 원자는 수천배 이상 무겁기 때문에 전자의 충돌로 고체 속에서 정지하고 있는 원자가 움직이는 것은 매우 어렵다. 그러나 사실 고체 속의 원자들은 열에너지에 의하여 임의의 방향으로 움직이고 있으며, 전자의 충돌은 이러한 움직임에 방향성을 부여하게 되는 것이다. 따라서 한 방향으로 원자 이동량이 증가하게 되어 일렉트로마이그레이션에 의한 원자 유속(flux)이 발생하게 된다. 배선을 따라서 원자의 유속이 발생하면 위치에 따라 유속의 양이 일정하지 않아서 유속의 불일치(divergence)가 발



IBM Journal of Research and Development (1996)

그림 1 반도체 소자의 알루미늄 배선 연결부

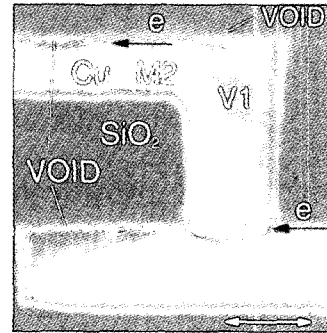
생할 수 있다. 유속의 불일치는 배선의 어느 지점에 단위 시간당 유입된 원자와 유출된 원자의 차이를 의미한다. 불일치의 정도가 0이면 들어오고 나가는 원자의 양이 같아서, 그 지점의 본질적인 변화는 없다. 그러나 들어오는 원자가 나가는 원자에 비하여 많으면, 즉 불일치의 정도가 -이면, 잉여의 원자가 쌓이게 되어 힐락(hillock)이 발생하게 되고, 그 반대의 경우에는 보이드(void)가 발생하게 되어 배선은 파손된다.

유속의 불일치에 따른 배선의 변화를 다루는 관점에는 응력 변화가 있다. 한정된 부피 내에서 원자의 이동이 발생하면 원자가 축적되는 부분은 압축 응력, 고갈되는 부분은 인장 응력이 생성된다. 일렉트로마이그레이션을 Korhonen이나 Thompson 등은 배선에 발생하는 응력의 관점에서 다루었다.

응력 관점에서 일렉트로마이그레이션에 의한 원자 유속, J 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$J = \frac{CD}{kT} \left[Z^*eE + \Omega \frac{d\sigma}{dx} \right] \quad (1)$$

여기서 C 는 단위 부피당 원자수, D 는 원자의 확산 계수, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도, Z^*e 는 유효전하량, E 는 전기장, Ω 는 원자부피, σ 는 응력이다. D/kT 항은 원자의 이동도를 나타내고, [] 속의 항은 이동에 대한 구동력을 나타내어서 이 두 항의 곱은 곧 원자의 속도이다. 이 속도에 단위 부피당의 원자수 C 를 곱하면 원자유속이 된다. 원자이동의 구동



0.3 μm

그림 2 구리 배선에서 일렉트로마이그레이션에 의한 보이드 형성

력은 두 항으로 이루어져 있는데, 첫째 항인 Z^*eE 는 원자의 충돌에 의한 순수 일렉트로마이그레이션 구동력을 나타내고, 둘째 항 $\Omega(d\sigma/dx)$ 는 일렉트로마이그레이션유속의 불일치에 의하여 발생한 응력에 의한 구동력을 나타낸다.

배선에서 유속의 불일치가 생겨 응력이 발생하는 지점에는 미세구조의 불균일점, 입계 삼중점, 선폭 변화점 등이 있으며, 이러한 원인이 없는 균일한 구조에서도 상층배선과 하층 배선을 연결하는 비아에서는 항상 응력이 발생한다. 비아 끝에서는 여러 목적으로 W, Ta, TiN 등의 이종 물질이 Al이나 Cu 배선의 사이에 삽입되게 되는데, 이러한 물질을 통한 원자의 확산은 매우 어려워져서, 상당한 유속의 불일치가 항상 존재하기 때문이다. 배선의 임의의 위치에서 응력이 발생하게 되면, 응력 발생은 시간에 따라 배선 전체에 퍼지게 되고, 결국 순수 불일치 구동력과 평형을 이루어, 전체 구동력이 0이 될 때까지 진행된다. 이때 배선이 견딜 수 있는 임계 응력이 존재하는데, 이 값에 도달하게 되면, 배선이 파손된다고 보는 것이 임계응력모델이다. 이같은 점 때문에 반도체 소자의 집적도가 증가할수록 일렉트로마이그레이션에 의한 파손현상이 중요해지는데, 일렉트로마이그레이션에 의한 파손을 궁극적으로 막을 수는 없고 다만 파손 시기를 늦춰서 소자 수명을 늘리려 하는데 목적을 두고 있다. 파손 시기를 늦춰 신뢰성이 좋은 반도체 소자를 제작하기 위해 일렉트로마이그레이션의 정확한 현상 파악과 메커니즘을 해석하여 그 해결책을 찾는 기술이 개발되고 있다.

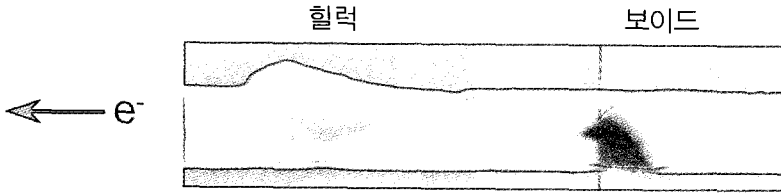


그림 3 원자 유속의 불일치로 발생한 힐릭(hillock)과 보이드(void)

일렉트로마이그레이션은 반도체 소자의 집적도가 증가하면서 고전류밀도가 반도체 연결부에 인가되어 그로 인한 물질이동으로 연결부 파손이 발생하는 현상이다. 일렉트로마이그레이션의 정확한 파손 메커니즘을 이해하여야 연결부에서의 신뢰성을 향상시켜 반도체 소자 제품 개발을 이루어 낼 수 있다.

Al, Cu 배선의 일렉트로마이그레이션

최근 40년간 반도체 소자에 있어서 알루미늄은 가장 중요한 배선 소재로 사용되어 왔다. 그동안 Al 배선이 일렉트로마이그레이션에 의한 신뢰도 문제없이 잘 사용되었지만 최근의 소자의 소형화 추세로 인해 Al 배선의 문제가 드러나고 있다. 특히 RC 딜레이 문제가 제기되면서 Cu배선에 대한 관심이 늘고 있고, Cu에서의 일렉트로마이그레이션 연구 또한 활발해지고 있다. Cu 배선을 사용한 경우 회로의 동작성능의 개선은 이미 보고되었고, 이론적인 신뢰성 향상도 예상되었다. 그러나 실제로 구리배선을 채택한 경우 신뢰성의 향상이 항상 보장되지 않는다는 것이 실험적으로 관찰되었다.

Al 배선에서의 일렉트로마이그레이션은 주로 입계를 따라서 일어난다. 따라서 입계면과 관련한 미세구조는 일렉트로마이그레이션에 매우 큰 영향을 준다. 그러나 이러한 내용을 그대로 구리 배선에 적용하는 데에는 문제가 생긴다. 예를 들어 입계면의 삼중점(triple point)은 입계 확산에서 매우 중요하지만 계면에서는 크게 중요하지 않으므로 Cu의 경우에 그대로 적용하기에는 문제가 많다. 계면확산을 제외한 입계 및 벌크확산에 대하여 Cu가 Al보다 큰 활성화 에너지를 가진다. 따라서 입계 및 벌크확산으로 일렉트로마이그레이션이 진행되는 경우 Cu는 Al에 비하여 고신뢰성을 나타낼 수 있다. 그러나 계면확산의 경우는 오히려 Al의 경우가 Cu보다 일렉트로마이그레이션에 대하여 안정하다. 그 이유는 Al은 표면에 매우 안정하고 치밀한 산화막을 형성하여 효과적으로 원자의 계면확산을 억제할 수 있는 반면, Cu는 상대적으로 취약한 구조의 계면이 형성되어 원자 확산이 쉽기 때문이다. 계면확산의 효과는 배선

의 크기가 작아질수록 증가하게 된다. 따라서, 입계나 벌크확산이 중요한, 선풍이 큰 배선의 경우에는 Cu배선의 신뢰성이 우수할 수 있지만 계면확산이 중요한 미세배선의 경우에는 Cu가 Al보다 일렉트로마이그레이션 신뢰성이 나쁠 수 있다.

녹는점이 상대적으로 Al(660℃)보다 높은 Cu(1,083℃)는 동일한 공정온도에서 원자 이동이 천천히 일어난다. 그렇기 때문에 Cu가 Al에 비해 상대적으로 일렉트로마이그레이션에 대해 강할 것으로 생각된다. 그러나 실제로는 Cu의 경우 앞서 지적한 계면 확산의 활성화 에너지가 Al만큼 크지 못한 이유로 계면 확산이 많이 발생하게 되고 따라서 일렉트로마이그레이션의 신뢰성 향상 효과는 생각보다 크지 않다.

솔더 범프 연결부 배선의 일렉트로마이그레이션

솔더 범프에 대한 연구가 최근 활발해진 것은 앞서 말한 것처럼 소자의 고집적화와 함께 더욱 빠른 처리속도를 필요로 했기 때문이다. 회로 기판과 소자를 연결하는 데 있어서 기존의 2차원 상의 와이어 본딩 구조로는 동일한 면적에서 제한된 수의 연결부밖에 만들지 못하였지만, 솔더 범프는 볼모양의 연결부를 이용하기 때문에 동일 면적에서 3차원 적으로 더욱 많은 연결 지점들을 형성하는 것이 가능하다. 그러나 솔더 범프에서도 일렉트로마이그레이션에 의한 파괴

가 발생하는 문제가 나타났다. 기존의 전자 패키지 연결부에서는 10^4A/cm^2 이하의 낮은 전류밀도가 흘렀지만 최근의 고집적화는 이보다 더 큰 전류밀도가 연결부에 흐르는 것을 필요로 하게 되었다. 현재의 솔더 범프 재료로 사용되는 SnPb의 경우 녹는점이 상대적으로 Al, Cu 등에 비해 매우 낮다. 이것은 녹는점이 높은 다른 물질로 연결부를 만들게 될 경우, 상대적으로 고온 공정이 필요한데 연결 부분은 집적 회로가 거의 완성된 후에 이루어지므로 고온 공정은 회로의 성능을 떨어뜨릴 염려가 있기 때문이다. 보통 배선에서는 10^6A/cm^2 정도의 전류밀도에서 일렉트로마이그레이션이 문제가 되지만 Sn, Pb 계열의 솔더 범프의 경우 상대적으로 낮은 녹는점 때문에 원자들의 이동도가 크기 때문에 낮은 전류 밀도에서도 일렉트로마이그레이션이 문제가 되는 것이다. 또한 앞선 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 설명할 수도 있다. 이 식은

$$J = \frac{CD}{kT} \left[Z^* e E + \Omega \frac{d\sigma}{dx} \right]$$

이때 SnPb의 비저항값이 다른 Cu나 Al보다 10배 정도 크며, 유효전하량 또한 10배 정도 크고 확산계수(D)가 Cu, Al보다 크다는 사실을 같이 고려하면, 낮은 온도, 약 100배 정도의 작은 전류 밀도에서도 원자 유속(J)가 상당히 커서 일렉트로마이그레이션의 피해가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다.

솔더 범프에서 기존 Al, Cu 배선과의 가장 큰 차이는 두 가지 이상의 물질로 이루어진 합금이라는 점이다. 솔더 범프는 솔더 종류에 따라 Sn, Pb, Ag, Cu 등이 공정 조성을 이루고 있다. 단일 금속으로 이루어진 Al, Cu 배선의 경우 각각의 원소의 이동만 고려하면 되었으나 두 가지 이상의 합금으로 이루어진 솔더 범프는 합금의 미세조직, 그리고 합금 원자의 상대적인 이동속도 등이 함께 고려되어야 전체 물질 이동의 메커니즘을 분석할 수 있다. 각각의 원자 이동이 분석되어야 솔더 범프의 파괴 현상이 규명될 수 있다는 것이 기존 Al, Cu 배선의 일렉트로마이그레이션 현상 규명보다 어려운 점이다. 이같은 어려움으로 인해 현재 솔더 범프의 일렉트로마이그레이션은 한창 연구가 진행 중이다.

이선은 한창 연구가 진행 중이다.

Eutectic SnPb

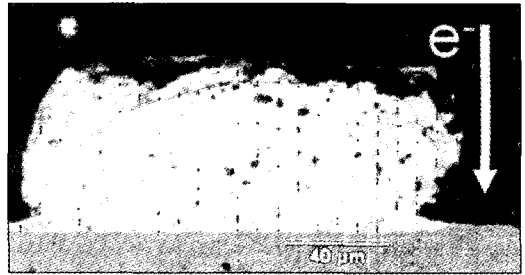
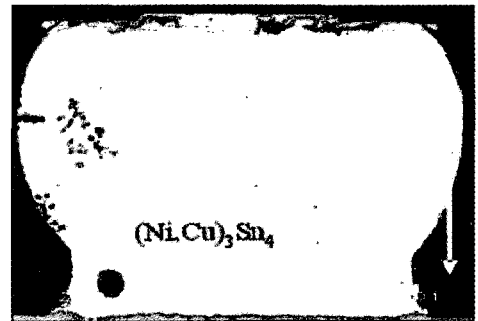


그림 4 공정조성의 SnPb 솔더 범프에서 일렉트로마이그레이션에 의한 파괴

SnAgCu



T.L. Shao, et al., JAP (2004)

그림 5 SnAgCu 솔더 범프에서 일렉트로마이그레이션에 의한 파괴

일렉트로케미컬 마이그레이션

최근 들어 인쇄회로기판(printed circuit board) 및 전자 패키지의 전기적 신뢰성에 대한 관심이 높아지고 있다. 전자부품의 소형화와 고집적화에 따라 인쇄회로기판 및 전자패키지의 금속 단자간의 간격이 점점 좁게 되었고, 절연파괴 현상에 쉽게 노출되게 되었다. 이는 금속 단자가 고온/다습의 가혹한 환경에 노출된 상태에서 전압이 인가됨에 따라 전기화학적으로 불안정해지기 때문이다. 이러한 가혹조건에서, 인가된 전압에 의해 전자 부품의 금속 단자는 전기화학적으로 이온화되게 되며 양극과 음

극 사이의 절연체상에 전도성 필라멘트를 형성한다. 이는 전자부품의 절연 파괴를 초래하게 되는데 이러한 현상을 일렉트로케미컬 마이그레이션이라고 한다.

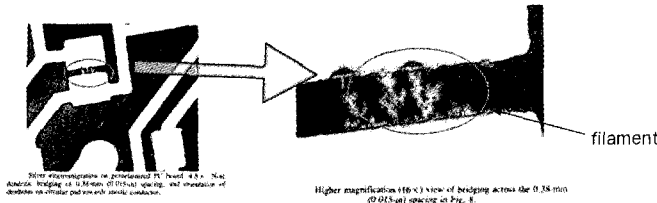


그림 6 인쇄회로기판에서의 일렉트로케미컬 마이그레이션현상

일렉트로케미컬 마이그레이션의 발생 메커니즘

일렉트로케미컬 마이그레이션 현상은 크게 나누어 두 가지 메커니즘을 통해 일어나게 되는데, 하나는 컨덕티브 에노딕 필라멘트(conductive anodic filament)이고 다른 하나는 덴드리틱 그로스(dendritic growth)이다. 컨덕티브 에노딕 필라멘트는 가해진 전기장에 의해 양극의 금속이 이온화 되고 마이그레이션 하여 양극에서 음극으로 필라멘트를 형성, 절연파괴에 이르는 메커니즘이다. 그러나 덴드리틱 그로스는 양극에서 이온화된 금속이 전기장을 따라 음극쪽으로 이동, 음극상에 환원되어 수 지상의 필라멘트를 형성하게 되며, 이렇게 형성된 필라멘트가 양극까지 자라나가 절연파괴에 이르는 메커니즘이다. 이 두 가지가 일렉트로케미컬 마이그레이션을 일으키는 주된 메커니즘이며, 전자부품, 특

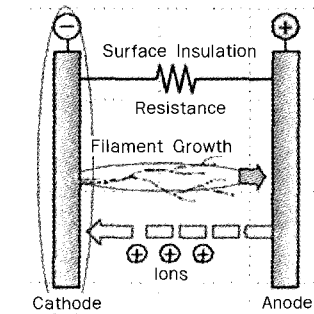


그림 7 덴드리틱 그로스의 발생 메커니즘

일렉트로케미컬 마이그레이션은 인쇄회로기판에서 고온다습한 환경에서 전기장장이 인가될 때 전기화학적 반응을 통해 물질 이동이 발생하여 연결부 파손이 발생하는 현상이다. 일렉트로케미컬 마이그레이션의 정확한 파손 메커니즘을 이해하여야 연결부에서의 신뢰성을 향상시켜 반도체 소자 제품 개발을 이루어 낼 수 있다.

히 전자패키지와 인쇄회로기판에서 일어나는 주요한 전기적 고장 메커니즘이다.

인쇄회로 기판에서 일어나는 일렉트로케미컬 마이그레이션

인쇄회로기판상에서 필라멘트의 형성으로 일어나는 절연파괴 경로는 크게 4가지로 나뉜다. 기판관통비아간, 기판관통비아와 배선간, 층간, 배선간에 절연파괴가 일어난다. 이중 가장 쉽게 절연파괴가 이루어 질 수 있는 경로는 기판표면의 기판관통 비아간이다.

인쇄회로기판의 절연파괴를 일으키는 필라멘트는 양극에서부터 발생하는 컨덕티브 에노딕 필라멘트가 주된 메커니즘으로 확인되었다. 이때 필라멘트를 구성하는 주된 성분은 Cu, Pb, Sn이다. 인쇄회로기판의 절연파괴를 일으키는 컨덕티브 에노딕 필라멘트는 양극에서부터 자라나오는 것이 아닌 양극 주변에서부터 국부적으로 아일랜드 형상을 이루면서 자라났다. 즉 인쇄회로기판의 기판관통비

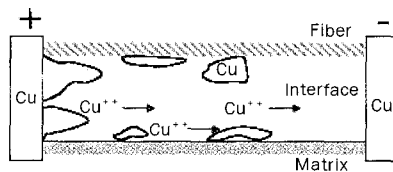


그림 8 컨덕티브 에노딕 필라멘트의 발생 메커니즘

아 사이에서 발생하는 필라멘트는 음극에서부터 필라멘트가 자라나오는 일종의 도금 과정인 덴드리틱 그로스가 아니라 부식 과정을 통해 양극 주변에서 발생하는 컨덕티브 에노딕 필라멘트이다. 컨덕티브 에노딕 필라멘트를 구성하는 주된 원소인 Cu, Sn, Pb의 조성비와 솔더를 구성하는 Sn, Pb의 조성비를 비교해 보면 Sn이 Pb보다 일렉트로케미컬 마이그레이션 저항성이 상대적으로 크다. 컨덕티브 에노딕 필라멘트부분의 Sn 비율은 양극보다 줄어드는 반면, Pb의 비율은 컨덕티브 에노딕 필라멘트에서 늘어나게 된다. 이는 일종의 부식과정으로, 상대적으로 활성금속인 Pb가 귀전위 금속인 Sn보다 부식저항성이 약한 것과 같은 경향을 보여 준다.

반도체 소자 연결부의 일렉트로마이그레이션에 신뢰성 향상

반도체 소자 연결부의 일렉트로마이그레이션에 대한 연구는 세계 유수의 반도체 회사, 그리고 대학 등을 중심으로 40~50년 동안 계속 이어져 왔다. 하지만 최근 들어 더욱더 중요도가 높아지고 있는데,

그것은 소자의 집적도가 증가되면서 고전류밀도가 연결부에 집중되고 그로 인해 일렉트로마이그레이션에 의한 파손이 급속도로 심각해졌기 때문이다. 더군다나 2000년 이후 연결부 물질이 Al에서 Cu로 대체되고 솔더 범프의 일렉트로마이그레이션 문제가 대두되면서 기존의 Al의 일렉트로마이그레이션 현상과 많은 차이점을 가진 새로운 현상들이 관찰되게 되었다. 일렉트로케미컬 마이그레이션에 의한 파손은 최근에 주목받기 시작했다. 소자의 집적도 증가가 인쇄회로기판에서의 집적도도 증가시키고 이는 예전엔 거의 문제가 없었던 일렉트로케미컬 마이그레이션에 의한 파괴가 중요해지기 시작한 것이다. 새롭게 등장하는 일렉트로마이그레이션과 일렉트로케미컬 마이그레이션 현상의 원인 규명 및 해결책을 찾지 않는다면 차세대 고집적, 고신뢰성 반도체 소자의 개발은 요원한 일이 될 것이다. 아직까지 국내에서는 신뢰성의 중요도가 널리 인식되고 있지 않은데 차세대 고부가가치 반도체 소자 개발에서는 반드시 필요한 부분으로서 많은 투자와 연구가 필요할 것으로 보인다.

기계용어해설

순차적 실험계획법의 민감도 방법

(Sensitivity Approach of Sequential Sampling)

기존의 순차적 실험계획법에서 좋은 실험계획법의 개념은 설계영역을 고르고 빈틈없이 채우는 것이었다. 그러나 이러한 순차적 실험계획법의 선택기준은 대부분 샘플링점 사이의 거리에 지배적인 영향을 받기 때문에 실제적으로 실험계획 과정에서 응답의 특성을 효과적으로 반영한다고 보기는 어렵다. 응답 특성을 결정짓는 가장 중요한 것은 함수의 극점이므로 이러한 극점의 위치를 탐색하는 방법으로 제안된 것이 순차적 실험계획법의 민감도 방법이다.

순차적 실험계획법의 민감도 방법은 메타모델의 민감도를 이용하여 기존 실험점과 일정 거리를 유지하고 있는 근사적인 극점을 탐색한 뒤, 이 점들이 가지는 응답특성에 따라 실험점을 우선적으로 선택하는 방법으로서, 극점 탐색 개념과 충전개념, 응답기반 모델링 방법이 혼합된 개념의 순차적 실험계획법이다.