Cu CMP 공정의 Yield Killer Defects

Overview

Cu CMP공정에서 나타나는 defects 중 일부는 실제로 CMP 이전공정에서 기인되어 발생된다. 그러므로 Cu CMP공정에서 나타나는 여러 형태의 defect 메커니즘 이해와 올바른 검사, 분석만이 전체적인 process module개선과 Cu CMP공정에서 발생되는 defects수준을 줄일 수가 있다.

Cu Dual 다마신(CuDD) 공정기술에 대하여 3년 전 IBM의 공식발표 이후 반도체 기술은 Cu Dual 다마신 기술시대에 들어섰다. 그러나, Dual 다마신(CuDD)기술은 처음에 기대한 것보다 실현과정에 있어서 많은 어려움이 있는 것으로 판명되었다. 이러한 이유 중 한 가지가 Cu기술과 관련되는 무수한 defects 발생이다. 따라서 Cu Dual 다마신 기술을 생산에 실현시키기 위해서는 defects에 대한 특별한 관심과 함께 이에 대한 해결노력이 필요하다.

CMP에 기인한 Device 수율 저하 요소

Cu CMP 공정은 metal layer에 대한 polishing 공정으로 Dual 다마신 기술이 수율에 상당히 민감하게 작용된다. 그러므로 CMP 전공정과 관련된 문제점을 조사할 수 있는 tool을 이용하여, CMP 단일공정에서 문제되는 사항을 해결하고, CMP 이전공정과 관련된 문제점을 통합하여 문제원인을 찾아 해결해야 한다.

한편 Cu Dual 다마신 기술에 있어서 CMP defects는 기존 Oxide CMP & W-CMP에서의 defects와는 다르다. 즉 CMP defects 측정방법을 blanket oxide wafer를 이용하고, 주로 "Dishing과 Erosion" 문제에 집중하였으나, Cu CMP 공정에서 수율에 영향을 주는 defects는 CMP 공정에서 발생되는 metal 찌꺼기 남음, scratch 발생, metal film에서의 pin-holes, micro-cracks, barrier metal의 damage, 배선에 발생되는 metal corrosion, pitting, oxide film 증착시 발생한 particle, oxide film 결함 등으로 주로 CMP 이전공정과 관련이 있다.

본 보고서에서는 Cu CMP 공정 module에서 나타나는 defects의 발생 원인과 제품 수율에 영향에 대해서 언급하였다.

Metal 찌꺼기 남음

metal 찌꺼기 남음은 device 회로 단락(shortage) 문제를 일으킨다. Cu film은 하부 막 oxide, barrier film과 color 차이로 쉽게 구별될 수 있어도, Cu pattern wafer 내에서의 Copper spots등은 구별하기가 매우 어렵다.

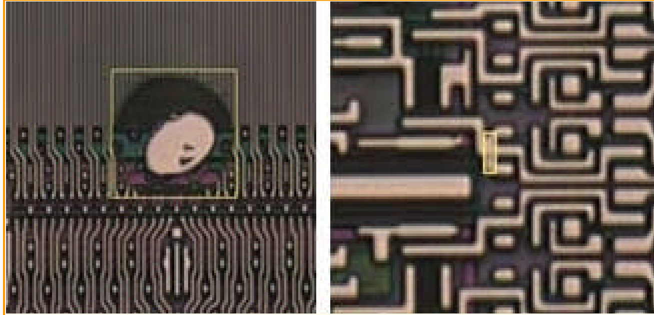
그림 1. Cu Spots 이물 Size 비교

더군다나 Copper와 barrier metal 찌꺼기는 device 수율에 직접적으로 영향을 주면서, 하부막 dielectric film의 두께에 따라 검출이 아주 어려울 수 있다. 즉 어떤 oxide 두께에서는 dark fringe이기 때문에 metal 찌꺼기 검출을 더욱 더 어렵게 한다. 또한 barrier metal 찌꺼기는 주로 surface의 평탄도 불량, 불충분한 polishing time, removal non-uniformity에서 주로 발생되는데, 이것은 CMP 이전 barrier 공정의 quality에 의해 기인된 것이다.

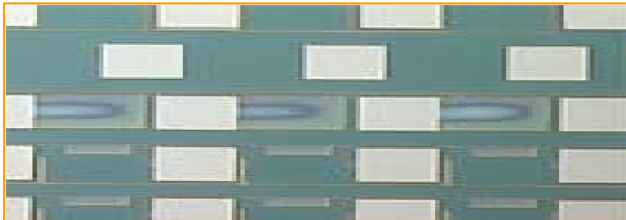
그림 2. Barrier Metal 찌꺼기 남음으로 Cu Pad 불량

이러한 Cu pad는 device 수율 저하의 요인이 된다.

Scratches

구리는 Oxide 또는 Tungsten보다 soft하기 때문에, CMP동안 scratch발생이 더 쉽게 발생된다. Cu CMP에서 발생되는 scratch는 그림과 같이

a) razor scratches, b) chatter scratches, 및 c) skipping scratches로 분류할 수 있다.

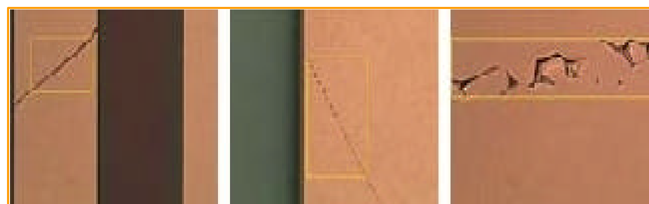
Figure 3. Copper scratch examples (detected using AIT II): a) razor scratch, b) chatter scratch, and c) skipping scratch.

Cu CMP에서의 하부막 Oxide는 Cu보다 hard하기 때문에 Cu film에 발생되는 scratch를 Oxide film이 저지할 수는 있으나, 깊게 발생되는 scratch는 CMP후에도 그대로 남아 있고, Cu removal후는 연속적인 scratch가 spots 형태로 보일 수 있다.

그림 3c에서 보여주는 scratch는 Cu 배선에 나타나지만 scratch 발생원인 step을 구분하기가 매우 어렵다. 그리고 하부막 dielectric film에서 발생한 scratch는 Cu CMP후 metal stringers을 유발 시킬 수 있다. 이를 개선하기 위해 보통 Oxide Slurry을 이용하여 Buffing 공정을 추가하기도 한다.

Pin-holes and Micro-cracks

도금된 Copper는 Polycrystalline 물질이지만 전기도금할 때에는 $CuSO_4$ / H_2SO_4 / DI Water, 촉매제(disulfides), Suppressors, N_2 혼합물, 그리고 ppm 단위의 HCl 등에 의해 도금된다. 그러므로 Cu film의 grain boundary 특히 triple-point junction에서는 기계적, 화학적으로 damage가 발생하기 쉽다. 그리고 CMP공정에서는 EP-Cu film의 grain boundary의 stress로 기인하여 crack, corrosion 등의 결함이 발생한다.

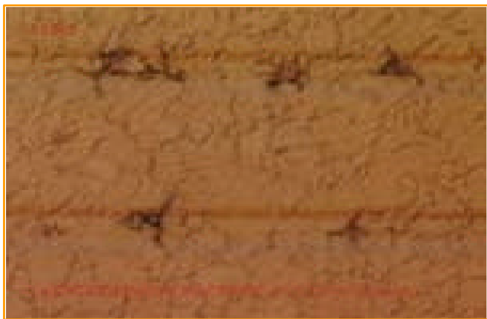

그림 4. CMP 후 EP-Cu film의 micro-crack (Optical microscope image)

EP-Cu film의 첨가물의 흡착과 grain boundary의 weak point는 Annealing공정에서 더 취약하게 된다. 즉 EP-Cu film은 As-plated 상태에서 Amorphous상태이나, Anneal공정에서는 Poly Crystalline 구조로 바뀐다. 그러므로 첨가물과 Copper 사이에서 상호작용이 일어나고, grain boundary의 취약점(micro-crack 등)이 생긴다. 이러한 micro-crack으로 CMP공정에서 화학약품이 침투하고, 이 침투된 chemical residue는 CMP후 세정공정에서도 완전히 제거되기가 어려워 grain boundary의 damage는 계속된다. 0.25 µm device 기술에 있어서의 이러한 corrosion 현상은 device의 폐기까지 야기될 수 있으며, 다른 metal공정과 비교하여 Cu CMP 기술의 더 높은 대책이 필요하다. 또한 As-electroplated film에서 스트레스에 기인된 pin hole과 crack은 CMP후 Cu corrosion 위험성을 증가시킨다. 이러한 pin-hole이 Cu line이나, bond pad 영역에서 발생되었을 때는 모세관의 작용에 의해 부식성의 chemical이 Cu film으로 침식할 수 있다. 그리고 이러한 pin hole의 원천은 현재까지 알려져 있지 않다.

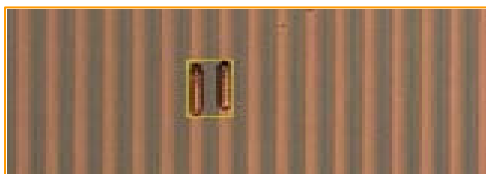

그림 5. Cu 배선 Line의 부식

Corrosion and pitting

이러한 Cu 배선 부식은 random하게 발생되기 때문에 근본적인 원인분석과 해결을 더욱 더 어렵게 한다. 비록 CMP slurry 가 부식의 원인이라고 할지라고, EP Cu film quality를 무시할 수는 없다.

위에서 언급한 corrosion 외에 발생되는 corrosion 현상은 dielectric film/barrier layer와 Cu fill 계면에서 발생되는 것인데 이것을 "Edge Corrosion"이라고 한다. 이러한 corrosion 현상은 CMP chemical이 침투되어 corrosion을 야기시킨 것인데, dielectric film /barrier metal 계면에서 Copper film이 Waviness 형태로 나타난다. 그리고 또 다른 형태의 corrosion현상은 multi-material에서 잘 발생되는 mouse-bites형태의 corrosion이다. 이러한 corrosion현상의 원인은 아직까지 잘 알려져 있지 않다.

corrosion, pitting은 Post CMP 공정에서 잘 관찰되며, pitting은 Cu면적에 따라 증가한다. thin line에 발생된 pitting과 pad에 발생된 pitting이 device에 가장 weak point로 작용한다. pitting은 EP Cu film의 grain size와 EP-Cu 증착시 첨가제 농도와 관련이 있다. 또한 grain size가 큰 Copper 표면일수록 pitting 발생에 취약하다.

그림 6. Cu Pad 영역에서 Pitting

그림 7. 불충분한 Barrier Metal 찌꺼기

이러한 pitting과 grain size는 EP Cu film의 Annealing공정에서 진화되는 데 metal etch rate에 큰 영향을 준다.

Barrier integrity damage and oxide depressions

barrier metal damage와 oxide depression은 EP Cu/CMP 혹은 CMP/barrier metal 상호작용의 결과로서 대부분 나타난다. dielectric oxide표면의 depression은 post-CMP공정 검사에서 관찰된다. 그리고 이 oxide depression의 깊이는 350-600Å으로 barrier metal 두께보다 깊다. 이것은 CMP over-polishing에 의해 원인이 되는데 깊게 발생한 depression은 scratch와 같은 문제를 야기 시킬 수 있다.

Re-deposition of by-products and fall-on particles

이러한 defects들은 film 증착시 발생한 particle과 같이 수율에 영향을 주지만 너무나 미세하기 때문에 SEM이나 AFM으로만 관측, 분석된다. 그리고 CMP공정에서 발생되는 particle, residue는 하지막에 의해서 발생될 수 있는데, 이후 Oxide Etch공정에서 제거될 수도 있지만, 여러 가지 메커니즘에 의해 CD 변형, die fail 등 불량을 유발할 수 있다.

Module interaction defects

Post-CMP 후 탐지되는 defects중 일부는 CMP공정과 관련이 없는 CMP 이전 공정에서 발생되어 CMP공정 이후에 나타날 수 있다. 그리고 Lithography 공정이나, Etch 공정에서 발생된 pattern 불량이 CMP step에서 탐지되어 CMP Over-polishing으로 잘못 해석할 수도 있다. 예를 들면 AFM에 의해서 CMP 결함을 검사하기 때문에 탐지능력의 차이가 있기 때문이다. 그러므로 이러한 defects 탐지는 CMP공정뿐만 아니라 다른 공정에도 공정개선을 위한 피드백을 할 수 있다. 또 다른 예로서 random하게 발생되는 EP Cu 두께의 non-uniformity ('swirls')는 Cu-EP후 Four-point probes의 map으로 탐지할 수 없다.

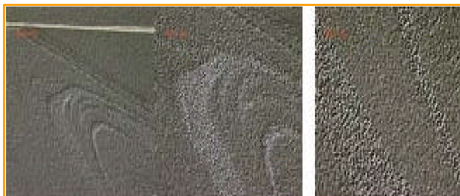

그림 8.
EP Cu 두께 Non-uniformity

이러한 Swirl은 plated 두께가 CMP범위에 들어 EP-Cu공정에서 pass 하였다고 하여도, CMP공정의 EPD System에 탐지되지 않아 metal residue발생으로 폐기된다.

Discussion

Cu CMP공정의 defects 분석 및 해결은 process engineer의 새로운 도전이다. 또한 Cu Dual 다마신 기술에 있어서 defects는 이전의 세대 기술과 비교하면 한 차원 더 중요한 요소로 부각되었다. 분명한 것은 이러한 문제를 해결하기 위해 CMP Dishing 및 Erosion 문제와 함께 defects issue를 더욱 강구해야 한다.

metal residue는 수율에 가장 큰 문제점이고 Swirl과 같은 EP film defects는 metal residue의 위험성을 한층 더 증가 시킨다. 현재까지 개발된 CMP EPD System 대부분이 Dishing이나, Erosion 같은 CMP Over-polishing 탐지를 고려했지만, 이렇게 미세한 residue를 탐지할 수 있는 EPD System은 장착되지 않았다. metal residue를 control하기 위한 방법 중 한 가지는 Swirls을 포함한 EP film의 결함을 monitor하기위해 49-point 측정대신에 wafer 전면 전수검사이다. 즉 Surfscan SP1TBI 장치의 bright-field imaging을 이용하는 방법이다. 그리고 끊임없이 EP Cu 웨이퍼를 검사하고, Cu CMP에 정보를 주는 것에 의해, 금속 남음 등의 위험을 감소시킬 수도 있다.

그리고 상업용으로 생산하는 Cu Slurries도 오늘날 충분한 Process window을 제공하지 못하는 문제점을 갖고 있다. 즉 CMP공정에서 Cu 대 Barrier Metal선택성이 100대1 이상을 가진 새로운 Slurries개발이 필요하다. 보완적인 방법으로 Dielectric Film deposit을 Final Target보다 더 두껍게 하여 CMP Buffing을 충분히 하거나, Barrier Film 증착을 종래의 조건150-200Å에서350-400Å으로 높이는 방법이다.

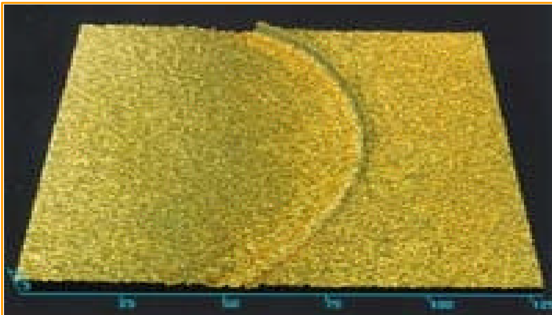

그림 9.

Surfscan SP1TBI장치로 검출한 Swirl

(Swirl step height : 2μm)

이와 같이 Cu 남김의 문제는 CMP 공정의 제1의 도전이라고 해도 과언은 아니다. 다행히도 Barrier Metal의 Dishing 과 Erosion 문제는 Cabot EPC-4200 Slurry를 이용하여 문제점을 해결할 수 있게 되었다.

그러나, 어떤 barrier metal은 active영역에서 단락 발생되는 문제점을 갖고 있기 때문에 dielectric의 두께와는 독립적인 barrier metal quality 측정, barrier residue 탐지를 위한 새로운 기술 접근이 필요하다.

금속 residue, scratch는 Yield Killer의 가장 중요한 요소이다. 또한 scratch의 근본원인은 large particle, 슬러리 응고덩어리, CMP Conditioner에서 떨어진 diamond조각, pad material (작은 조각, Groove Edge), 패드에 떨어진 by-products, chemical($CuO + Cu \rightarrow Cu_2O$)등에 의해서 CMP scratch가 유발된다.

scratch 발생을 줄일 수 있는 최선의 방법은 적절한 pad conditioning과 세정으로 pad 표면에 떨어지는 by-products를 최소화하여 scratch를 줄일 수가 있다. 그리고 barrier metal polishing에 사용되는 slurry 입자가 aggressive 하지 않고, flake가 발생 되지 않게 하여야 한다.

Cu CMP에서 pad에 의한 scratch 원인은 다음과 같은 경우이다.

(1) pad pore나 groove에 by-products나, 데브리(debries)가 축척되는 경우
(2) pad 재질에 의한 chemical 흡착의 경우
(3) pad가 오염되거나 pad pore가 열에 의해 변형되는 경우
(4) pad 재질이 침식되어 손상되는 경우

pad 사용시간(량)은 CMP 기술에서 polishing 특성을 나타내는 좋은 매개 변수이다. pad의 균일하고 적절한 면적에서 CMP polishing과 conditioning에[의하여 pad에 by-products가 쌓이는 것을 방지하고, scratch가 발생되는 것을 줄일 수 있다. 그리고 슬러리 입자가 응고되는 원인은 슬러리 자체 성질에서 기인하는 문제로 슬러리 공급배관을 짧고 단순하게 하여 슬러리가 오래 정체되지 않도록 한다. 또한 scratch 발생 원인을 관리하기 위해서 scratch 발생 깊이에 따라 수율에 영향을 주는 정도를 나누어 관리한다.

Cu CMP에서 3번째로 중요한 관리포인트는 metal corrosion이다. Post-CMP후 defect 검사에 통과한 wafer일지라도 이후 공정에서 계속해서 metal corrosion은 계속 발생할 수 있다. 즉 CMP공정은 화학적 반응과, 기계적 작용에 의해 film이 제거되는 것이기 때문에 metal 배선이 chemical 요소에 노출되면 부식이 발생한다

metal 부식현상을 줄이기 위해서는 removal 하고자 하는 material 표면에서 슬러리를 빠르게 퍼지게 하여 CMP removal rate가 부식되는 비율보다 빠른 슬러리를 사용한다. 그리고 슬러리 자체에서 산화방지제를 사용하는 대신에 Post CMP Cleaning Step에서 산화방지제를 사용하는 것에 대해서도 검토되어야 한다.

pin-hole, microcrack과 EP Cu의 grain boundary에는 부식현상이 발생하기 쉽다. 이러한 부식을 제어하는 방법 중 하나로 전기도금한 웨이퍼의 Anneal공정에서 해결할 수도 있다.

종래의 EP Cu film의 Annealing은 CMP공정시 웨이퍼 center와 edge의 removal rate의 uniformity를 고려하여 설계되었다. 그러나 As-Plated EP-Cu즉 Amorphous상태에서 CMP공정을 하고 나서 Cu film의 결정화를 위해 Anneal공정을 하게 되면 corrosion 방지에는 효과가 있을 것이다. 물론, 이러한 방법은 CMP공정에서 defect가 우선의 문제이고, dishing이나 erosion은 나중문제라는 전제하에 공정설계가 고려되었을 때만 가능하다.

Conclusion

이 논문에서는 Dual 다마신 Cu CMP기술에서 수율에 영향을 끼치는 주요 defects에 대해서 논의했다. 즉 수율에 민감하게 영향을 끼치는 metal 찌꺼기 남음, scratch 및 metal 부식 등 3가지에 대해서 언급했다.

Cu CMP performance는 macro, micro단위로 barrier metal, seed Cu, bulk Cu 3가지의 배분(비율)에 의해 영향을 받기 때문에 CMP 이전공정과 상호 연계하여 통합적으로 일관성 있는 공정설계가 이루어져야 한다.

전반적인 back-end 공정의 최적화를 위해서는 디자인룰, 증착공정, 어닐공정, CMP공정의 폭넓은 통합작업이 이루어져야만 가능하다.

* Source : Sumit Guha & Anantha Sethuraman(KLA Tencor Corp.), Yehiel Gotkis & Rodney Kistler(Lam Research Corp.), Scott Steckenrider(Cabot Corp.)