

X-ray Microdiffraction을 이용한 구리 Interconnect의 Texture 분석

정진석

승실대학교 자연과학대학 물리학과

Texture Analysis of Cu Interconnects Using X-ray Microdiffraction

Jin-Seok Chung

Department of Physics, Soongsil University

요약

1 μm 이하로 집속된 방사광원으로부터의 x-선을 이용하는 새로운 분석기법인 x-선 미세회절(x-ray microdiffraction)을 사용하면 다결정시료 내 grain들의 방위나 strain의 국지적 분포를 정밀하게 측정할 수 있다. 포항가속기연구소 방사광원의 x-ray microbeam 실험 장치를 사용하여 찍은 Laue 사진을, 특별히 쓰여진 분석 software를 이용하여 분석함으로써 고집적회로에 쓰이는 것과 같은 방법으로 제작된 Si wafer 상의 다른 선폭의 구리 도선들이 가지는 texture를 밝혀내었다. 실험 시 x-ray 빔의 크기는 $2 \times 3 \mu\text{m}^2$ 정도이었으며, 분석 결과에 의하면, 선폭 1 μm 도선에서는 grain들의 방위가 특정한 방향성이 없는 반면, 선폭 20 μm 도선의 중앙부분에서는 $\langle 111 \rangle$ fiber texture가 관측되었다. Grain들의 크기는 선폭 1 μm 의 도선에서 2~5 μm , 선폭 20 μm 의 도선에서는 6~8 μm 로 측정되었다.

Abstract

X-ray microdiffraction, which uses x-ray beam focused down to a micron size from synchrotron radiation sources allow precision measurements of local orientation and strain variations in polycrystalline materials. Using x-ray microdiffraction setup at Pohang Light Source, we investigated the texture of Cu interconnects with various widths on Si wafer by collecting Laue images and analyzing them with a specially written analysis software. At the time of measurements, the beam was focused to about $2 \times 3 \mu\text{m}^2$ in size. Our results show that 1 μm wide Cu interconnect had grains in rather random orientations. On the other hand, the 20 μm wide interconnect showed a $\langle 111 \rangle$ fiber texture near the center. The grains were 2~5 μm long at the 1 μm wide interconnect and 6~8 μm in size at the 20 μm wide interconnect.

1. 서론

최근 들어 나노기술에 대한 관심이 커지면서 미시적(microscopic) 시각과 거시적(macroscopic) 시각의 중간 영역인 중시적(mesosopic) scale (수십 nm~수십 μm)에 대한 중요성이 재인식되고 있는데 이는 중시적 scale에서 주로 볼 수 있는 grain boundary나 texture, defects 등이 그 물질의 특성에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다.

중시적 scale에서 물질의 특성을 연구하기 위해서는 크기가 아주 작은 probe가 필요한데, 현재까지는 주로 전자빔이나 이온빔이 사용되어왔고, x-선은 여러 가지 장점에도 불구하고 별로 사용되지 못했다. 그 주된 이유는 x-선의 집속이 어려웠기 때문에, 1 μm 정도로 작게 만드는 경우 flux가 너무 약해져서 유용한 signal을 얻기 힘든 점 때문이었다. 하지만 x-선 회절은 재료분석에서 결정구조나 특성을 측정하기 위하여 가장 광범위하고도

유용하게 사용되어온 분석방법이며, 전자나 이온빔에 비해 장점으로, x-선은 같은 detectable limit을 얻기 위한 power가 10^{-4} 정도로 작아도 되기 때문에 비파괴적이라는 점,¹⁾ 그리고 표면 밑으로 깊이 투과하기 때문에 전자빔의 경우처럼 고진공이나 시료 표면의 cleaning이 필요 없고 분석 software만 뒷받침이 된다면 3차원 분포를 영상을 재생하는 것도 가능하다는 점, 등이다. 또 결정학적 strain을 측정하는 경우 x-선은 전자빔에 비해 100배 이상 감도가 좋다는 것이 밝혀져 있으며,¹⁾ texture 분석에서도 Electron Backscatter Diffraction (EBSD)에 비해 해상도가 100배 이상 좋아, 한 grain 내에서의 미세한 orientation 변화도 측정할 수 있다.²⁾

최근 국내외 제3세대 방사광원의 건설과, 이에 따른 x-ray optics component 제작 기술의 발전으로 $1\ \mu\text{m}$ 이하까지 x-선을 집속할 수 있는 Kirkpatrick-Baez mirror나 x-ray Fresnel zone plate 등의 신기술이 활발히 개발되어, 제3세대 방사광원에서는 submicron 크기의 x-선도 전자빔에 견줄 만한 flux를 얻을 수 있게 되어 중시계의 현상들을 연구하기 위한 유용한 도구로 쓰일 수 있게 되었다.

방사광원으로부터의 x-선을 $1\ \mu\text{m}$ 까지 집속하더라도 기존의 x-선 회절 분석법을 그대로 사용할 수 있는 것은 아니다. 기존의 회절 장치에서는 rocking curve를 측정하기 위하여 시료를 회전시키게 되는데, 이때 회전 중심과 x-ray beam의 위치간의 오차를 항상 $1\ \mu\text{m}$ 이하로 유지하기는 실제적으로 불가능하다. 또한 각 점에서 rocking curve를 다 얻으려면 시간이 너무 많이 걸려 grain의 orientation이나 strain의 위치에 따른 변화를 관측하는 데에는 많은 어려움이 따를 것이다.

이런 어려움들을 극복할 수 있는 새로운 방법이 white beam과 CCD를 사용한 x-ray microdiffraction²⁻⁷⁾이다. 하지만, 이 방법은 CCD에 기록된 Laue image의 분석이 컴퓨터를 이용한 복잡한 software가 아니고는 불가능하기 때문에 널리 사용되지 못했었다. 최근 저자와 공동연구자들의 노력으로 분석 Program이 개발되면서 Laue image의 분석에 사용될 수 있게 되어 x-ray microdiffraction은 실제로 유용한 측정방법으로 발전하게 되었다.⁴⁾

최근 반도체소자의 소형화 추세에 따라 소자 내부에서 발생하는 열을 최소화시키기 위하여 제조공정이 더 어려움에도 불구하고 금속 도선(interconnect)으로 전기전도도가 좋은 구리가 더 많이 쓰이고 있다. 그러나 구리에 대해서는 다결정 박막의 기계적 특성과 오랜 동안 전류가 흘렀을 때의 신뢰성에 대한 연구가 기존의 Aluminum 도선에 비해 상대적으로 많지 않다. 이번 연구에서는 포항 방사광 가속기에서 백색광(white beam)을 이용한 x-ray microdiffraction 분석의 한 예로써 최신 반도체소자에 들어가는 구리도선의 texture와 그 특성을 살펴보았다.

2. 실험

이번 연구의 실험은 포항 가속기 연구소의 1B2 빔라인에서 이루어졌다. 포항 방사광원(Pohang Light Source, PAL)은 제3세대 방사광원으로, 광원의 크기가 이전 세대보다 훨씬 작고, 저장링 내 전자의 에너지가 2.5 GeV이기 때문에 hard x-ray undulator는 사용할 수 없지만, bending magnet에서 나오는 x-선의 세기가 매우 밝아 x-ray microdiffraction 실험의 광원으로 적합하다.

1B2 빔라인에 설치된 x-ray microbeam 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 그려져 있다. Bending magnet에서 전자의 궤도가 휘 때 나오는 방사광을, 광원으로부터 약 25 m 지점에서 slit으로 잘라, $300 \times 300\ \mu\text{m}^2$ 정도로 만든 후 Kirkpatrick-Baez mirror 쌍으로 약 $3 \times 2\ \mu\text{m}^2$ 정도의 크기로 집속하였다. 이때 사용된 K-B mirror쌍은 미국 Advanced

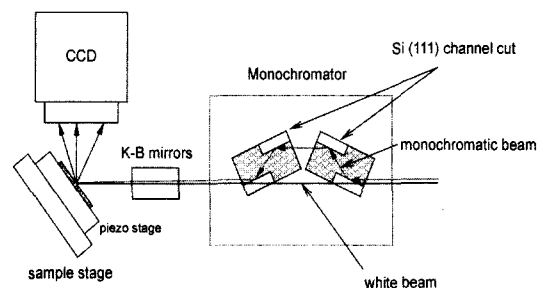


Fig. 1. X-ray microbeam experiment setup at beamline 1B2 of Pohang Light Source.

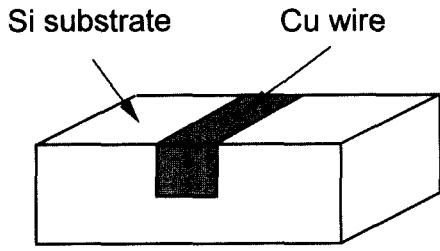


Fig. 2. Electroplated Cu interconnect lines on Si wafer made by damascene -processing method.

Light Source에서 제작된 것으로 평면경을 bender로 휘어 타원이 되도록 하여 구면수차를 줄였다.

시편은 1/100 μm 분해능을 가지는 piezo x-y stage에 의해 구동되었으며 시료로부터 회절된 빔들은 Roper Scientific사의 CCD에 의해 기록되었다. CCD는 1242x1152 pixel을 가지며, 각 pixel의 크기는 약 $22.5 \times 22.5 \mu\text{m}^2$ 이다.

측정에 사용된 구리도선은 Si wafer의 <001> 면에 damascene 공정으로 electroplating에 의해 제작되었다. Damascene 공정이란 submicron의 가는 구리도선 제작을 위해 개발된 기법으로, 먼저 Si wafer에 도선 폭 만큼의 홈을 photolithographic patterning과 reactive ion etching으로 만든 후 이를 증착이나 electroplating으로 구리로 채우고, 홈이 아닌 곳에 입혀진 구리막은 chemical-mechanical polishing (CMP)에 의해 제거되어, Fig. 2에서와 같이 홈 속의 구리도선만 남게 하는 기법이다.

Fig. 3은 실제 측정된 1 μm 와 20 μm 선폭의 구

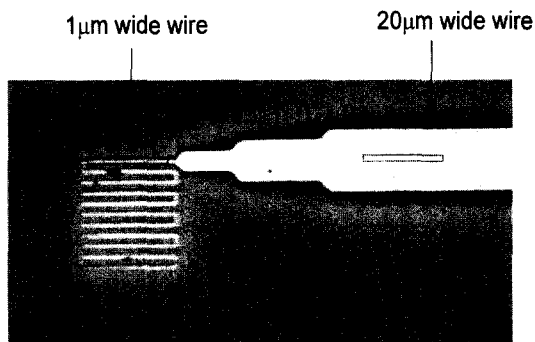


Fig. 3. Picture of Cu interconnect lines with various thicknesses. Two boxed areas in the wires represent the scanned areas.

리도선을 광학 현미경으로 찍은 실제 사진이다. Si wafer 상의 도선은 모두 증착에 의해 만들어진 shunt barrier와 구리 seed layer 위에 1 μm 정도의 두께로 제작되었다. 1 μm 선폭 도선의 경우, Fig. 3에서 사각형 영역으로 나타낸 것처럼 도선의 길이 방향을 따라 변화를 측정했으며, 20 μm 선폭 도선은 중심 부분을 측정하였다. 집속된 빔의 크기가 2 μm 인 방향과 도선의 길이 방향이 일치하게 하였으므로 도선을 따라 2 μm 의 분해능을 가진다고 볼 수 있다.

3. 분석 및 결과

단색광이 아닌 백색광을 회절에 사용하였기 때문에 Fig. 4에 보여진 것과 같이 여러 개의 reflection이 동시에 Bragg의 법칙 $2d \sin\theta = \lambda$ 를 만족하여, 이들이 동시에 관측되며 이를 CCD로 기록하게 된다. CCD에 기록된 reflection들의 index만 알 수 있다면, 시료를 회전시키지 않고도 회절기에서 얻을 수 있는 격자상수에 관한 정보를 거의 모두 알 수 있다. 물론 x-선의 파장을 모르기 때문에 격자상수의 절대값은 알 수 없어, 이를 필요로 하는 경우 집속된 단색광을 이용한 microdiffraction을 따로 측정하여야 한다.

X-ray microdiffraction이 지금까지 널리 사용되

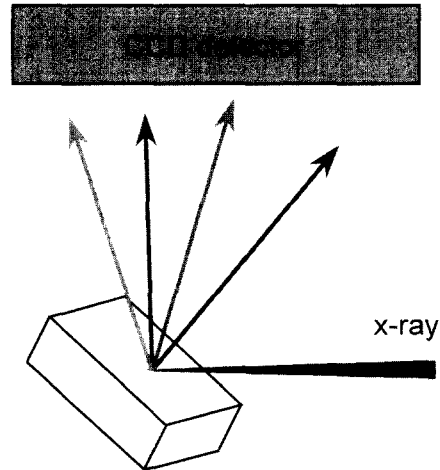


Fig. 4. X-ray microdiffraction using CCD and white beam from synchrotron radiation. Several reflections are excited at the same time and recorded by CCD.

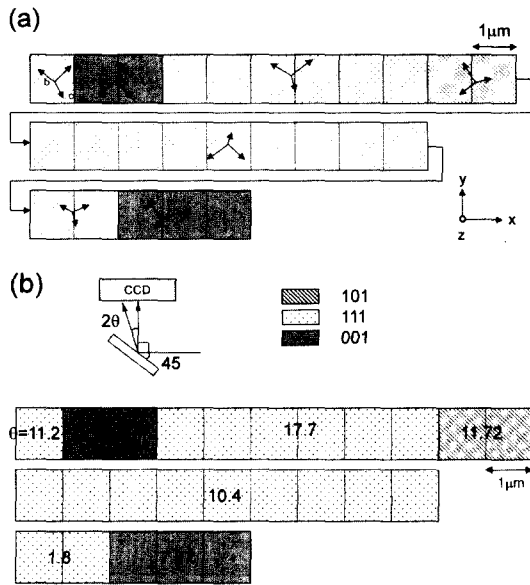


Fig. 7. Results for 20 μm wide Cu wire. (a) The orientations of Cu unit cells. (b) The angles between the sample surface normal and the given reflection.

서 <111>축이 시료 표면에 수직인 방향에 대해 20° 이내로 정렬되어 있어 <111> fiber texture에 가깝다고 볼 수 있겠다.

두 가지 선폭의 구리도선에 대한 texture의 측정 결과를 종합해보면 두께와 폭의 비가 1:1인 1 μm 선폭의 도선에서는 texture가 잘 형성되지 않았고, 비가 1:20인 20 μm 선폭의 도선에서 비교적 <111> fiber texture에 가까운 것으로 보아, damascene 공정 상의 특징인 side wall effect가 나타난 것 같다. 즉 substrate에 흠을 먼저 판 후 구리 박막을 입히기 때문에 박막이 성장할 때, Fig. 8에 보여진 것과 같이 흠의 바닥 뿐 아니라 옆면에서도 박막이 성장하는 현상이 일어난 것 같다. 옆면에서는 박막이 <111> 면으로 성장하더라도 위에서 보면 <111>이 아닌 다른 면으로 보이게 되며, 이러한

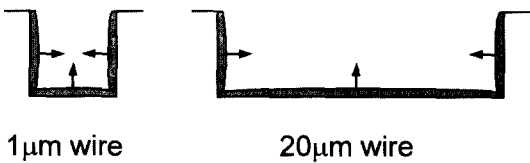


Fig. 8. Growth of Cu films in the trenches of different widths.

경우 옆면으로부터 자란 부분과 바닥으로부터 자란 부분이 만나 도선을 형성하기 때문에 subgrain들이 형성되어, 도선의 길이에 수직인 방향으로 한 쪽 끝에서 반대쪽 끝까지 한 grain이 되는 bamboo structure가 형성되는 것을 방해하는 것으로 보인다. 따라서 side wall effect가 강한 가는 구리도선과 같은 경우에는 electromigration에 잘 견디는 것으로 알려진 bamboo structure의 도선을 얻기 위하여서는 추가적인 annealing 과정 같은 것이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 포항 방사광 가속기 연구소의 장치를 이용하여 새로운 분석기술로 주목을 받고있는 x-ray microdiffraction 분석의 한 예로써 고집적 회로에 쓰이는 구리도선의 texture를 분석하여 보았다.

20 μm 선폭의 넓은 도선에서는 <111> texture가 형성된 반면, 가는 도선에서는 texture가 잘 형성되지 않은 것으로 보아 side wall로부터 자라는 sub-grain이 일관된 texture의 형성을 방해한 것으로 보인다.

구리 도선 내에서 electromigration을 최소화하기 위하여서는 강한 <111> texture와 bamboo structure가 형성되어야 하는 것으로 알려져 있는데,⁹⁾ 본 연구의 결과는 annealing 공정의 추가 등, 박막 제작 공정의 조건들을 최적화하여야 할 필요성을 제시하며, x-ray microdiffraction은 이 과정에서 구리 도선의 특성을 밝혀내는 중요한 측정 도구로 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

이번 실험에 사용된 CCD는 direct detection 방식으로 쉽게 포화되는 단점이 있어 정밀한 peak의 위치 측정이 이루어지지 못했다. Dynamic range가 더 넓은, 형광 screen을 이용한 CCD를 사용하고, CCD에 대한 좀 더 정밀한 보정이 이루어진다면 구리도선 내의 strain 측정도 가능하여 electromigration과 strain과의 상관관계를 이해하는데 도움이 되리라 여겨진다.

또 이번 실험에서는 bender를 사용하는 K-B mirror로부터 3x2 μm² 정도의 크기로 밖에서 x-선을

집속하지 못했지만, 곡률을 design model이 된 Advanced Light Source가 아닌, 포항 방사광원에 최적화시킨다면 $1 \mu\text{m}^2$ 이하의 beam을 얻을 수 있을 것이다.

이번 연구 결과를 통하여 국내에서도 새로운 분석기술인 x-ray microdiffraction 실험이 가능하며 반도체 칩 상의 구리 도선 같이 작은 grain들로 이루어진 다결정 시편의 특성 분석에 매우 유용하게 쓰일 수 있음을 보여주었다.

감사의 말

본 실험을 할 수 있게 도와주신 포항 가속기연구소의 윤화식 박사님, 포항산업과학연구소의 장창환 박사님, 포항공과대학의 주형돈 씨에게 감사를 드린다. 시편을 구해주신 서울대학교 재료공학부 주형창 교수님과 과학기술연구원 (KIST)의 박영준 박사님께도 감사 드린다. 본 연구는 숭실대학교 교내학술연구비에 의해 지원되었다.

참고문헌

- 1) Rebonato, R., Ice, G. E., Habenschuss, A. and Bilello, J. C., *Phil. Mag. A*, **60**, 571 (1989).
- 2) Nobumichi Tamura, J.-S. Chung, G. E. Ice, B. C. Larson, J. D. Budai, J. Z. Tischler, M. Yoon, E. L. Williams, W. P. Lowe, *Strain and Texture in Al-Interconnect Wires Measured by X-ray Microbeam Diffraction*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 563, "Materials Reliability in Microelectronics IX" (1999).
- 3) Ice, G. E., Chung, J.-S., Tischler, J. Z. and Lunt, A., *Rev. Sci. Instr.*, **71(7)**, 2635 (2000).
- 4) Chung, Jin-Seok and Ice, Gene E., *Appl. Phys.*, **86**, 5249 (1999).
- 5) Mirang Yoon, B. C. Larson, Jon Z. Tischler, Tony E. Haynes, Jin-Seok Chung, Gene E. Ice, Paul Zschack, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2791 (1999)
- 6) Chung, Jin-Seok, Gene, E., Ice, N., Tamura, B. C., Larson, Walter Lowe, *X-ray microbeam Measurement of Local Texture and Strain in Thin Films*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 563, "Materials Reliability in Microelectronics IX" (1999).
- 7) Jin-Seok Chung and Gene E. Ice, *Automated Indexing of Laue Images from Polycrystalline Materials*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 524, "Application of Synchrotron Radiation Techniques to Materials Science IV", 49 (1998).
- 8) Grovener, C. R. M., Hentzell, H. T. G. and Smith, D. A., *Acta Metall.*, **32(5)**, 773 (1984).
- 9) Vanasupa, L., Joo, Y.-C., Besser, P. R. and Pramanick, S., *J. Appl. Phys.*, **85**, 2583 (1999).