

수직하중에 의한 응력이 CMP 공정의 디싱에 미치는 영향

김형구*·김승현*·김민우**·임익태*†

*† 전북대학교 기계설계공학부, ** 전북대학교 대학원 기계설계공학과

Investigation of the Relationship Between Dishing and Mechanical Stress During CMP Process

Hyeong Gu Kim*, Seung Hyun Kim*, Min Woo Kim** and Ik-Tae Im*†

*† Dept. of Mechanical Design Engineering, College of Engineering, Jeonbuk National Univ.,

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Jeonbuk National Univ.

ABSTRACT

Since dishing in the CMP process is a major factor that hinders the uniformity of the semiconductor thin film, many studies have focused this issue to improve the non-uniformity of the film due to dishing. In the metal layer, the dishing mainly occurs in the central part of the metal due to a difference in a selection ratio between the metal and the dielectric, thereby generating a step on the surface of the metal layer. Factors that cause dishing include the shape of the thin film, the chemical reaction of the slurry, thermal deformation, and the rotational speed of the pad and head, and dishing occurs due to complex interactions between them. This study analyzed the stress generated on the metal layer surface in the CMP process using ANSYS software, a commercial structure analysis program. The stress caused by the vertical load applied from the pad was analyzed by changing the area density and line width of the dummy metal. As a result of the analysis, the stress in the active region decreased as the pattern density and line width of the dummy metal increased, and it was verified that it was valid compared with the previous study that studied the dishing according to the dummy pattern density and line width of the metal layer. In conclusion, it was confirmed that there is a relationship between dishing and normal stress.

Key Words : Dishing, Chemical-Mechanical Polishing(CMP), Finite Element Analysis(FEA), Normal Stress

1. 서 론

반도체 소자의 고집적화를 위해서는 미세 선 폭 구현과 고적층 기술이 요구되고, 이에 박막(Thin film)의 균일도(Uniformity)는 해당 기술을 달성하기 위한 핵심 요소이다. 따라서 화학적 반응과 기계적 힘을 이용하여 웨이퍼 박막을 평탄화 시키는 CMP (Chemical-Mechanical Polishing) 공정이 매우 중요하게 되었다[1]. CMP 공정에서는 디싱, 부식(Erosion)과 같은 결함이 발생하는데, 이러한 결함은 박

막의 균일도 및 후 공정에 영향을 미치게 된다. 따라서 박막의 우수한 균일도를 이루기 위해서는 CMP 공정에서 발생하는 결함을 감소시켜야 한다[2].

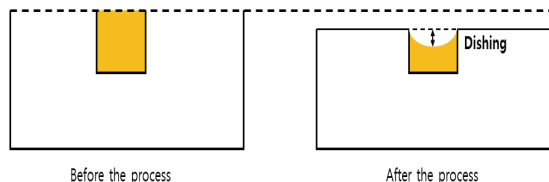


Fig. 1. Example of dishing after CMP process.

†E-mail: itim@jbnu.ac.kr

디싱은 서로 다른 재료의 물리적, 화학적 물성 차이로 인한 연마속도의 차이로 발생하며 Fig. 1에 나타난 것처럼 특정 재료의 표면이 접시처럼 움푹 패이는 현상을 말한다. 디싱은 박막의 형상, 슬러리의 화학반응, 열 변형, 패드 및 헤드의 회전속도 등 여러 요인에 따라 달라지며, 이는 슬러리 및 연마 패드의 최적화, 연마 파라미터의 조정, 첨단 연마 도구 및 모니터링 기법의 사용 등 여러 실험적인 방법으로 개선하고 있다[3-8].

금속층에서 디싱에 의한 단차는 공정 후 절연층의 높이와 트렌치(Trench)에서 금속의 높이와의 차이를 말한다. 이와 같이 단차가 발생하게 되면 후속 포토 공정에서 포토레지스트가 고르게 분포되지 않으며, 적층 시 공간이 발생해 층간 본딩(Bonding)이 원활히 이루어지지 않는 등의 문제가 발생하게 된다.

더미 금속 형성은 금속부분에서의 디싱에 의한 단차를 감소시키는 방법 중 하나로 회로를 이루는 금속과 같은 재료로 실제 회로로는 사용되지 않는 금속부분을 형성하는 것을 말한다. 더미 금속 형성에 따른 디싱의 정도는 밀도, 선 폭 등 물리적 변수에 의존적이기 때문에 이는 재료 간 물성 차이(특히 탄성계수)에 의한 응력 집중을 주된 원인으로 고려해 볼 수 있다[3,4]. 더미 금속의 효과에 대한 기존의 연구[3]에서는 금속의 패턴 밀도가 증가할수록, 또 금속의 선 폭이 감소할수록 디싱이 감소하는 결과를 보였다. 본 연구에서는 더미 금속의 패턴 밀도와, 선 폭을 변경하였을 때 활성 금속의 표면의 중심부에서 집중되는 응력에 대해 전산해석을 실시하고, 기존의 연구와 비교하여 응력과 디싱 간의 관계를 보이고자 한다. 이를 통해 디싱이 발생하는 원인을 좀 더 명확히 규명하여 CMP 공정에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 해 석

2.1 해석 대상

CMP 공정은 불균일한 웨이퍼 표면의 산화막, 금속막 등을 평탄화하는 공정으로 Fig. 2에 나타난 것과 같이 그 장비는 슬러리, 연마패드, 헤드, 로드 등으로 구성되어 있다. 로드에서 웨이퍼가 부착된 헤드로 수직하중을 가하면서 헤드와 패드를 각각 회전시키면 패드의 연마입자에 의한 기계적 연마가 진행되고, 화학반응을 유발하는 슬러리를 패드에 투입하여 화학적 연마를 동시에 진행한다.

본 연구는 디싱을 일으키는 여러 요인 중 웨이퍼에 가해지는 수직하중에 의한 응력의 집중과 디싱 간의 관계를 분석하는 것으로, 슬러리의 유동 및 패드와 헤드 간의 회전마찰에 의한 전단응력은 해석에서 배제하였다. Fig. 3에 해석을 위한 단위영역이 웨이퍼 상에서 임의로 선정

된 것을 도식적으로 나타내었다. 좀 더 자세한 해석대상 영역을 Fig. 4에 나타내었다. 응력과 디싱 사이의 관계를 파악하는 것이 연구의 목적이므로 해석 영역은 웨이퍼 금속층의 일부로 한정하였으며 본 연구에서는 이를 단위 영역으로 정의하였다.

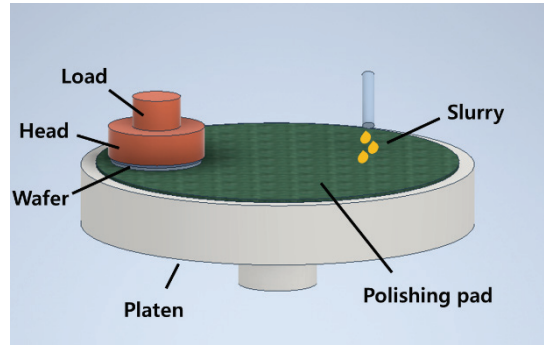


Fig. 2. Schematic illustration of a CMP process equipment.

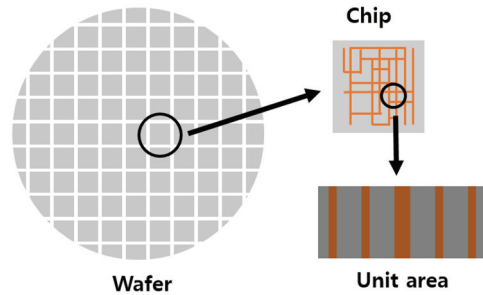


Fig. 3. Concept of the unit area used in simulations.

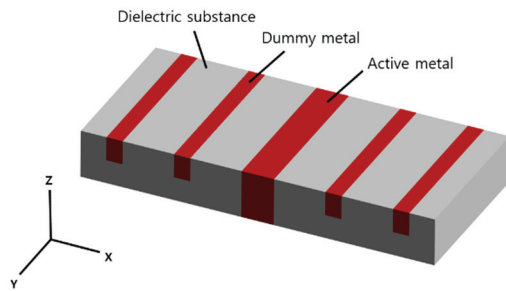


Fig. 4. Unit volume model for analyses.

단위 영역은 실제 공정 조건을 고려하여 3 μm의 두께와, 1.5 μm의 더미 금속 두께를 갖는 한 층의 금속층으로 구성하였다. 또한 계산의 편의를 위해 활성 금속 표면의 면적을 제외한 나머지 면적이 200 μm²이 되도록 x방향 길이는 22 μm, y방향 길이는 10 μm, 모델 중앙에 위치

한 활성 금속의 폭은 $2\ \mu\text{m}$ 로 형성하였다. Fig. 4의 모델은 더미 금속 패턴 밀도가 20%인 경우의 모델로 활성 금속의 양 옆으로 폭 $1\ \mu\text{m}$ 의 구리 더미 금속이 등 간격으로 형성되어 있다.

공정 시 패드와 맞닿는 단위영역의 윗면에서 유전체 (Dielectric substance)의 면적을 S_d , 더미 금속의 면적을 S_m 라 할 때 더미금속 패턴의 밀도 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{S_m}{S_d + S_m} \times 100\% \quad (1)$$

유전체와 금속의 재료는 현재 공정에서 많이 사용되는 실리콘(SiO_2)과 구리로 선정하였다. 유한요소법으로 정적 구조해석 진행 시 요구되는 물성치는 탄성계수와 포아송 비로 이는 Table 1에 나타내었다. 재료는 결합이 없고 금속과 유전체의 접촉은 견고한 것으로 가정하였다.

Table 1. Material of properties of cooper and silica

Property	Cu	SiO_2
Young's modulus (GPa)	135	70
Poisson's ratio	0.34	0.17

2.2 해석

해석은 유한요소 상용 구조해석 프로그램인 Ansys로 진행하였다. 해석을 위해 Fig. 3에 나타난 단위영역에 대해 유한요소로 이루어진 격자계를 Fig. 5와 같이 형성하였다. 몇 가지 격자계에 대해 해석 결과를 검토하면서 요소의 크기를 축소하였으며 최종적으로 25230개의 요소로 이루어진 격자계를 형성하여 사용하였다. 응력의 집중이 예상되는 금속 부분에서는 보다 정확한 응력의 분포를 얻기 위해 유전체 보다 작은 요소를 형성하였다. 모든 경우에서 금속의 요소 사이즈는 $0.25\ \mu\text{m}$ 이지만, 유전체의 요소 사이즈는 $0.325\text{--}0.36\ \mu\text{m}$ 로 모델마다 약간의 차이가 있다.

CMP 공정의 유한요소해석에서는 연구목적에 따라 패드와 웨이퍼가 밀착된 직접 접촉의 경우와 슬러리에 의해 이격되어 있는 간접 접촉의 경우로 구분할 수 있다. 본 연구는 수직 하중에 의한 박막의 물리적 거동만을 관찰하기 때문에 패드와 웨이퍼의 직접 접촉으로 가정하여, 하중조건으로 단위영역 윗면에 직접 압력을 가하였으며 실제 공정 조건을 고려하여 그 크기는 $42,000\ \text{Pa}$ 로 하였다. 이 때 회전에 의한 영향은 고려하지 않았다. 밑면은 모든 방향으로 고정되어 있다고 하였다. 또한 단위영역의 크기를 고려할 때 웨이퍼의 크기가 상대적으로 매우 크기 때문에 단위영역의 모든 측면에 대칭조건(Symmetry periodic)을 적용하여 가장자리 효과(Edge effect)를 제거하였다.

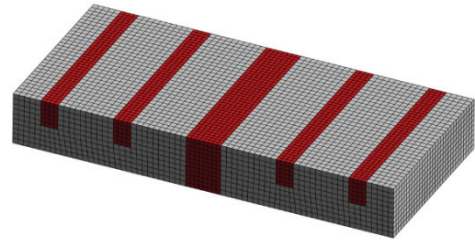


Fig. 5. Example mesh system for the unit volume.

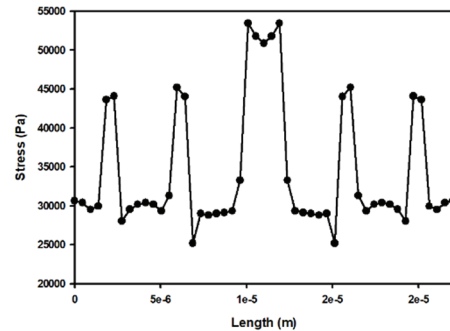


Fig. 6. Normal stress at the center of the active metal.

활성금속표면의 중심 응력 값을 확인하기 위해 Linearized Stress 모드를 사용했으며 이는 Fig. 6에 나타내었다. 또한 응력은 정적 구조해석에서 가장 일반적으로 사용되는 Von-Mises 응력으로 해석을 진행하였으며 Fig. 3 모델의 활성금속 표면 중심에서의 응력은 $50850\ \text{Pa}$ 이다.

2.3 변수에 따른 모델링

본 실험은 더미 금속 선 폭을 $1\ \mu\text{m}$ 로 유지하고 금속 간 거리를 일정하게 유지한 채 더미 금속 패턴 밀도를 변경하며 활성 금속 표면의 응력을 해석하는 실험 1과 더미 금속의 패턴 밀도를 40%로 유지하고 활성 금속과 더미 금속 간 간격을 유지한 채 더미 금속 선 폭을 변경하며 활성 금속 표면의 응력을 해석하는 실험 2로 구성된다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 더미 금속의 패턴 밀도가 각각 20%와 40%로 형성된 선 폭이 $1\ \mu\text{m}$ 인 모델을 나타내며 Fig. 8의 (a)와 (b)는 선 폭이 각각 $1\ \mu\text{m}$ 와 $2\ \mu\text{m}$ 로 형성된 더미 금속 패턴 밀도가 40%인 모델을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 더미 패턴의 면적비의 영향

더미 금속 패턴의 밀도와 디싱의 관계를 나타내기 위하여 패턴의 면적밀도와 선 폭의 크기를 바꾸며 해석을

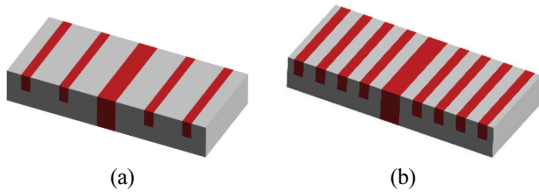


Fig. 7. Dummy pattern model with the line width of 1 μm (a) 20% pattern density and (b) 40% pattern density.

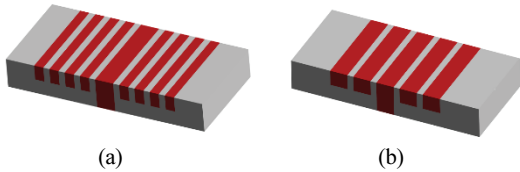


Fig. 8. Dummy pattern model with a 40% pattern density with different line density, (a) 1 μm line width and (b) 2 μm line width.

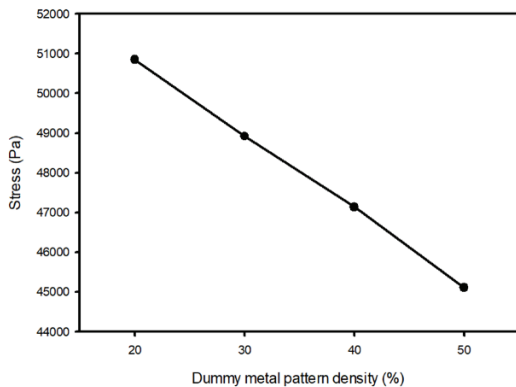


Fig. 9. Stress at active center according to dummy metal pattern density.

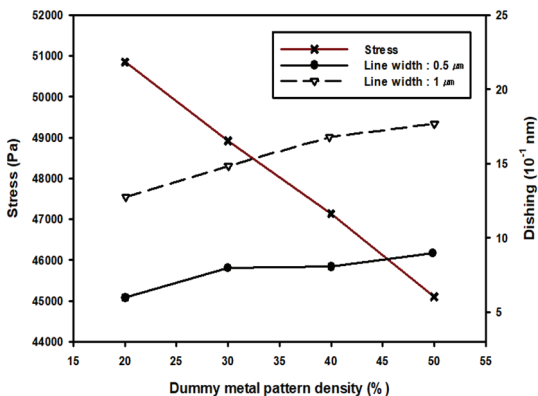


Fig. 10. Comparison of stress on the active metal center surface with density and dishing according to the line width.

진행하였다. 더미 금속의 패턴 밀도를 20~50% 범위에서 변경하며 해석한 활성 금속 중심부 표면에서의 응력과 Zhou 등[3]의 연구에서 더미 패턴 밀도에 따른 디싱 연구 결과를 비교해보았다. 더미 금속 패턴 밀도에 따른 활성 금속층 중심의 응력을 Fig. 9에 나타내었다. 더미 금속의 패턴 밀도가 증가할수록 활성 금속에서의 응력은 감소하였다. 더미 패턴의 비활성 영역의 밀도와 선 폭이 증가할수록 디싱이 증가하는 기존 연구[3]의 해석결과와 본 연구에서 더미 패턴의 활성 영역의 밀도가 증가할수록 응력이 감소하는 해석결과를 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Line width와 디싱의 관계를 나타낸 기존 연구(역삼각형과 원)에서는 더미 패턴 면적비가 증가할수록 디싱은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 더미패턴의 면적비는 더미 패턴 밀도의 역수이므로 본 연구와 마찬가지로 결과를 보여준다는 것을 확인할 수 있다. 기존 연구[3]에서 언급된 더미 패턴 밀도는 박막의 전체 면적 대비 비활성 영역의 면적으로 본 논문에서 언급한 더미 금속 패턴 밀도와는 상반된 단어이므로 결과 역시 반대로 나타남을 볼 수 있다. 따라서 활성 금속에서 더미 금속 패턴의 밀도에 따른 응력과 디싱은 비례 관계가 있음을 알 수 있다.

3.2 더미 패턴 선 폭의 영향

더미 금속의 면적비를 일정하게 한 상태에서 더미 금속의 선 폭이 디싱에 미치는 영향을 분석하였다. 더미 금속의 선 폭을 0.5~2 μm로 변경하며 해석한 활성 금속 중심 표면에서의 선 폭에 따른 응력은 Fig. 11에 나타내었다. 더미 금속의 선 폭이 증가할수록 더미 금속에서의 응력이 증가하고 활성금속에 작용하는 응력이 분산되는 결과가 되어 활성 금속에서의 응력은 감소하는 결과를 보인다. 이에 따라 활성금속의 디싱은 감소하게 된다.

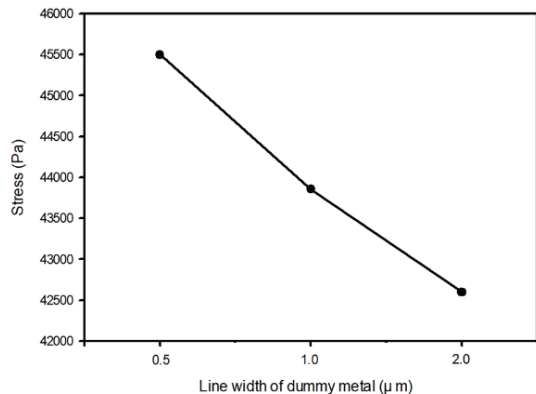


Fig. 11. Stress at active metal center according to dummy line width.

4. 결 론

본 연구에서는 반도체를 이루는 박막의 형상에 집중하여 재료 간 물성 차이에 의한 응력의 집중을 해석하고 이를 기존의 연구와 비교하여 활성 금속에 집중되는 응력과 디싱의 비례 관계를 나타내었다.

상용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 더미 금속의 패턴 밀도와 선 폭을 변경시키며 활성 금속의 중심 표면에서의 응력을 해석하였으며, 그 결과 더미 금속의 패턴 밀도, 더미 금속의 선 폭이 증가할수록 하중이 더미 금속으로 분산되어 활성 영역에서의 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이를 기존 연구에서 알려진 더미 패턴의 밀도와 금속 선 폭에 따른 디싱과 비교 해보았을 때, 디싱 현상은 응력과 비례하는 것을 확인할 수 있었으며, 집중되는 응력은 더미 금속 패턴 밀도와 선폭에 따라 다르게 집중되는 양상을 보였다. 결과적으로 물리적 형상과 재료 간의 물성 차이에 의해 집중되는 응력과 디싱은 밀접한 관계에 있는 것으로 해석할 수 있다.

참고문헌

1. Nanz, G., Camelletti, L.E. "Modeling of chemical-mechanical polishing: a review", IEEE Trans. of Semiconductor Manufacturing, Vol. 8(4), pp. 382-389, (1995).
2. Luo, J., Dornfeld, D.A., "material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling", IEEE Trans. of Semiconductor Manufacturing, Vol. 14(2), pp. 112-133, (2001).
3. Junxiong, Z., Lan, C., Zhigang, L., Weixiang, S., and Tianchun, Y., "Dummy fill effect on CMP planarity," Chinese Journal of Semiconductors, Vol. 31, p. 106003, (2010).
4. Wang, D., Lee, J., Holland, K., Bibby, T., Beaudin, S., Cale, T., "Von Mises stress in chemical-mechanical polishing process", J. of Electrochemical Society, Vol. 144(3), p. 1121 (1997).
5. Kwark, H., and Sung, I. H., "Analysis of CMP process using a particle-scale finite element model," Proceedings of the Spring Conference of Korean Tribology Society, pp. 81-82, 2012.
6. Park, B. Y., Kim, H. Y., Kim, G. Y., Kim, H. J., and Jung, H. D., "A Study on the reduction of dishing and erosion defects in tungsten CMP," J. of the KSPE, Vol. 22, pp. 38-45, (2005).
7. Kahng, A. B., and Samadi, K., "CMP fill synthesis: A survey of recent studies," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 27, pp. 3-19, (2008).
8. Cho, C. H., Park, S. S., and Ahn, Y. M., "Hydrodynamic pressure and shear stress in chemical mechanical polishing," J. of the KSPE, Vol.17, pp. 179-184, (2000).

접수일: 2023년 5월 9일, 심사일: 2023년 6월 13일,
게재확정일: 2023년 6월 21일