

논문 15-11-3

반경험적인 실험설계 기법을 이용한 CMP 공정 변수의 최적화

Optimization of CMP Process Parameter using Semi-empirical DOE (Design of Experiment) Technique

이경진*, 김상용**, 서용진*
(Kyoung-Jin Lee*, Sang-Yong Kim**, and Yong-Jin Seo*)

Abstract

The rise throughput and the stability in the device fabrication can be obtained by applying chemical mechanical polishing (CMP) process in 0.18 μm semiconductor device. However, it still has various problems due to the CMP equipment. Especially, among the CMP components, process variables are very important parameters in determining the removal rate and non-uniformity. In this paper, we studied the DOE (design of experiment) method in order to get the optimized CMP equipment variables. Various process parameters, such as table and head speed, slurry flow rate and down force, have investigated in the viewpoint of removal rate and non-uniformity. Through the above DOE results, we could set-up the optimal CMP process parameters.

Key Words : CMP, DOE, Table speed, Head speed, Down force, Slurry flow rate

1. 서론

최근 반도체 소자가 스케일 다운됨에 따라 한정된 셀 영역 내에서 충분한 커패시턴스를 얻기 위해서는 커패시터 구조가 3차원으로 복잡해져서 단차 (step height)가 더욱 높아지게 되었다[1,2]. 따라서 후속 공정에서의 심한 단차 문제를 극복하기 위해서 칩 내에서의 단차를 획기적으로 감소시킬 수 있는 CMP (chemical mechanical polishing) 공정은 반드시 필요한 핵심 공정 기술이 되었다. 앞으로 CMP 공정의 중요성은 계속 증가할 전망이어서 반도체 집적회로 제조 공정 중 CMP가 차지하는 역할은 더욱 더 증가할 것이다. 지금까지 반

도체 제조 공정에서 CMP 공정은 IMD (inter-metal dielectric), ILD (inter-layer dielectric) 및 PMD (pre-metal dielectric)막의 평탄화[3-5], STI (shallow trench isolation)-CMP[6], W, Al, Cu 등과 같은 금속 CMP 공정[7-9]으로 크게 나뉘어 사용되고 있으며, 앞으로 다양한 범위에서의 차세대 소자 제작 및 다양한 물질 등에 광범위하게 응용될 전망이다[10].

CMP란 그 어원에서도 알 수 있듯이 화학적으로 연마하고자 하는 물체의 표면을 연화시키고 연화된 표면을 기계적인 힘으로 제거하는 작업으로서 무엇보다도 높은 제거속도를 가지면서 안정된 균일도를 얻기 위하여 슬러리 (화학적 작용) 및 패드 (기계적인 작용)의 선택뿐만 아니라 헤드와 연마 테이블의 속도, 연마 테이블의 온도, 연마하는 동안의 압력 그리고, 패드 콘디셔닝하는 방법 등과 같은 CMP 공정에 영향을 미치는 다양한 공정변수들을 고려해 주어야 한다. 슬러리와 패드 등과 같은 CMP 소모자재 (consumables) 제조업에

* : 대불대학교 전기공학과
(전남 영암군 삼호면 산호리 72번지 대불대학교,
Fax : 061-469-1260
E-mail : syj@mail.daebul.ac.kr)
** : 아남반도체 FAB 사업부
2002년 6월 11일 접수, 2002년 7월 3일 1차 심사완료,
2002년 8월 26일 최종 심사완료

70 %, CMP 장비 산업에 20 %, 나머지를 세정 공정이 차지하고 있는 현재의 CMP 시장을 감안한다면 무엇보다도 다양한 슬러리와 패드의 개발이 더 시급하다고 하겠다. 더구나 이들 분야가 모두 외국 특허에 묶여 있고, 아직 국산화 단계가 미흡한 실정을 고려한다면 더욱 더 그러할 것이다. 그러나 절연막 CMP 공정의 경우, 이상과 같은 소모자재 요소 외에도 고려해야 할 공정변수들이 매우 많다. CMP 공정이 주로 화학적 또는 기계적 요소에 영향을 미치는 것은 사실이지만, 이 변수들이 기계적인 요소 또는 화학적인 요소에만 영향을 미친다고 할 수가 없기 때문에 화학적 변수 또는 기계적 변수로 엄격하게 나누는 것은 매우 위험한 일이다. 예를 들면, 속도와 압력을 기계적인 변수로만 간주할 수 있겠으나, 속도와 압력에 변화를 주는 것은 웨이퍼 위에서 슬러리 이동뿐만 아니라 패드와 웨이퍼 사이의 유동층 두께에도 화학 반응 물질과 생성물의 이동에 영향을 끼쳐 결국에는 반응 속도에도 영향을 주게 된다. 즉, 화학적인 변수와 기계적인 변수를 독립적으로 생각할 수 없게 된다. 이상과 같이, CMP 기술이 반도체 칩의 제조에 필수적인 공정으로 매우 유망한 기술임에는 틀림없으나, 장비상의 문제, CMP 공정상의 문제들로 인하여 소자 불량, 수율 (yield) 저하 등이 반도체 제조 공정에 심각하게 영향을 미치고 있다.

따라서 본 논문에서는 전체적인 연마 제거율의 향상과 비균일도의 개선을 위해 반경험적인 실험 설계 (design of experiment ; DOE) 기법을 적용하여, CMP 장비 변수 (테이블 속도, 헤드 속도, 연마 압력, 슬러리 유속)들이 연마 특성에 미치는 영향을 고찰하여 CMP 공정 장비의 변수를 최적화하고자 한다. 이상과 같이 CMP 특성에 영향을 주는 여러 공정 변수들의 기초연구를 토대로 CMP 공정 실험을 최적으로 설계하는 방법인 DOE 기법을 도입함으로써 어떤 변수가 CMP 공정과 어떻게 작용하여 최종 결과에 어떠한 영향을 주는가를 도출함으로써 차세대 CMP 공정의 기반연구에 기여코자 한다.

2. 실험

2.1 DOE(design of experiment) 기법

그림 1은 CMP 공정 기술과 CMP 공정에 영향을 주는 주요한 요인들을 연관지어 나타낸 개략도이다. 크게 4개의 영역으로 나눌 수 있는데, CMP 장비 요소, CMP 소모자재 요소, post-CMP

cleaning 요소, 그리고, CMP metrology 요소 등으로 나눌 수 있다. 가장 바람직한 CMP 공정은 이상의 4개의 영역이 모두 고려되어 최적화된 경우일 것이다. 서론에서와 같이, CMP 시장에서의 수익성을 생각한다면 슬러리, 패드와 같은 소모자재에 집중하여야 하고, CMP 공정 상에 throughput 및 수율 향상, 소자의 특성개선을 위해서는 post-CMP cleaning과 CMP metrology에 신경 써야 할 것이다. 하지만, 가장 많은 비중을 차지하고 있는 소모자재는 단위공정 차원에서의 연구개발이기는 하나, 거의 모든 소모자재가 특허에 묶여 있고, 그 solution도 비공개여서, 매우 어려운 실정이다. 또한, 이 4가지 영역을 모두 만족시킬 수는 없지만, 절연막 CMP 공정의 최적화에 비교적 신뢰성 있게 접근할 수 있는 방법은 CMP 공정의 여러 변수들의 상호 의존성과 같은 기초 연구를 토대로 실험을 설계하는 방법인 DOE 기법을 통해서서는 가능할 수 있다.

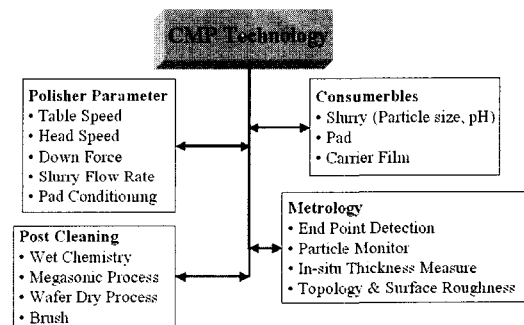


그림 1. CMP 공정 기술과 영향을 주는 주요한 요인들.

Fig. 1. CMP Technology and it's key factors.

CMP 공정을 통해 얻어야 할 특성은 높은 연마율, 낮은 비균일도, 연마후의 표면 결함의 감소, 두 가지 종류의 막에 대한 연마 선택비(selectivity) 개선 등등 다양하지만, 가장 궁극적인 목적인 평탄화 측면에서 연마율과 비균일도를 DOE의 목표 값으로 설정하고 각각의 공정 변수를 변화시켜가면서 수 차례의 반복적인 기초 공정 실험을 통해 산화막 CMP 공정을 최적화시킬 수 있는 CMP 장비의 조건을 고찰하였다.

2.2 실험방법

시료는 4인치 블랭킷 (blanket) 실리콘 웨이퍼를

사용하여 1200 ℃에서 6시간 동안 전기로에서 열산화 시켰다. 그림 2는 본 실험에서 사용된 G&P Technology의 POLI380 CMP 장비 사진을 나타낸 것으로, 본 실험의 중요한 key 파라미터인 연마 테이블은 16인치 패드를, 헤드는 4인치 웨이퍼를 장착할 수 있는 구조로, 연마시 웨이퍼 탈착 방지를 위해 retaining ring을 가지고 있으며, 헤드의 main 공압은 5 kg/cm² 이상으로 하였다. 백동식 펌프가 장착되어 있는 슬러리 공급장치를 사용하였고, silica 계열의 슬러리가 사용되었다. 패드는 Redel사의 IC 1300과 Suba IV를 PSA-II로 접착 시킨 이중 연마패드를 사용하였으며, 그림 3은 본 실험에서 사용한 이중 연마패드의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. DOE 기법에 의한 연마특성을 고찰하기 위한 공정 조건의 범위를 표 1에 요약하여 나타내었다. 테이블 속도는 10 ~ 40 rpm, 헤드 속도는 10 ~ 100 rpm으로 공정변수를 변화시켰으며, 연마 압력은 4 ~ 10 psi, 슬러리 유속은 30 ~ 150 ml/min의 범위에서 변화시키며 실험하였다. 또한, DOE 기법의 일관성을 위해 각 파라미터의 중간값(center point)인 테이블 속도는 25 rpm, 헤드 속도는 50 rpm, 연마압력은 7 psi, 슬러리 유속은 90 ml/min로 고정시키고, 각각 선택된 공정변수만 스플릿(split)하여 연마하는 방법을 적용하였다. 본 논문에서 연마 제거율은 CMP 공정 전의 두께에서 CMP 공정 후의 두께를 뺀 값을 총 연마시간으로 나눈 값으로 정의하였다. 또한 비균일도는 웨이퍼 내의 박막 두께의 균일도를 나타내는 기준으로 웨

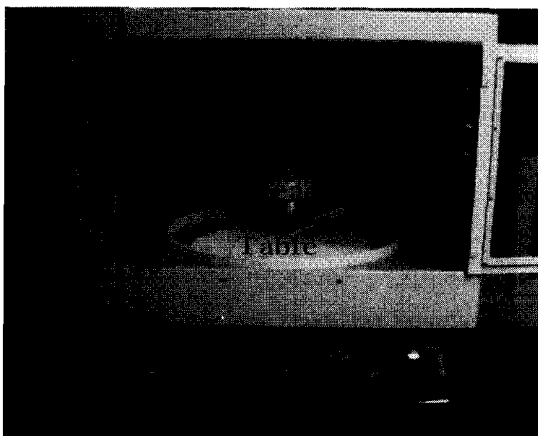


그림 2. G&P Technology사의 POLI380 CMP 장치.
Fig. 2. POLI380 CMP equipment of G&P technology company.

이퍼내 비균일도 (Within Wafer Non Uniformity; WIWNU%), 웨이퍼간 비균일도 (Wafer To Wafer Non Uniformity; WTWNU%) 등으로 나뉜다. 본 논문의 비균일도는 WIWNU%에 해당하며 웨이퍼가 가지고 있는 두께 편차와 패드와의 접촉 상태의 차이에 의해 영향을 받으며, 웨이퍼 두께에 대한 표준편차를 평균으로 나눈 값의 백분율로 정의하여 계산하였다.

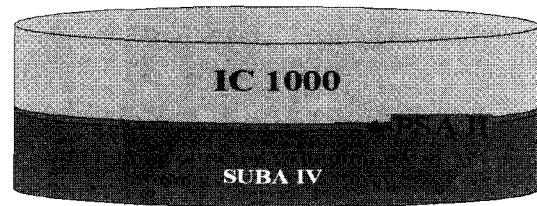


그림 3. 이중 연마패드의 개략도.

Fig. 3. Schematic diagram of double polishing pad.

표 1. DOE를 위한 CMP 장비의 공정 파라미터 범위.

Table 1. Parameter ranges of CMP equipment for DOE technique.

공정 변수 (Process parameters)	파라미터 범위 (Parameter range)	C.P (Center point)
테이블 속도 (Table speed)	10 ~ 40 [rpm]	25 [rpm]
헤드 속도 (Head speed)	10 ~ 100 [rpm]	50 [rpm]
연마압력 (Down force)	4 ~ 10 [psi]	7 [psi]
슬러리 유속 (Slurry flow rate)	30 ~ 150 [ml/min]	90 [ml/min]

3. 결과 및 고찰

CMP 공정에서는 수많은 변수들이 작용하는데, 그 중에서도 CMP 장비 자체에서 조절 가능한 변수들은 다음과 같다. 여기서 소개될 변수들은 DOE 기법에 필수로 적용되어야 하는 매우 중요한 인자들이다. CMP 공정 메커니즘을 설명하는 기본적인 Preston 방정식에 의하면 연마율은 연마 압

력과 상대속도 (테이블 속도와 헤드속도의 비 ; $\omega h/\omega t$)에 비례한다고 보고되어있다[11]. 본 실험에 사용된 CMP 장비는 테이블과 헤드 (웨이퍼)가 모두 회전하는 rotary 방식이므로, 두 회전체 사이의 상대적인 속도가 연마율을 좌우한다. 즉, rotary 방식은 상대적인 원운동으로 인해 웨이퍼의 중심과 가장자리 사이에 상대속도의 차가 발생한다.

3.1 테이블 속도(table speed)

그림 4는 헤드 속도는 50 rpm, 연마 압력은 7 psi, 슬러리 유속은 90 ml/min로 고정시키고, 테이블 속도의 변화에 따른 연마율과 비균일도를 나타낸 것으로, 테이블 속도는 10 ~ 40 rpm의 범위 내에서 변화를 주며 실험하였다. 속도가 증가함에 따라 연마율은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 비균일도는 점점 감소하다가 28 rpm을 기점으로 약간 증가하였다. 비균일도가 3.8 %로 가장 낮은 값을 나타내었던 28 rpm에서의 연마율은 2500 Å이었다. 결과적으로 테이블 속도가 28 rpm일 때 연마율과 비균일도 조건을 모두 만족시킬 수 있는 가장 안정된 공정으로 진행됨을 알 수 있었다.

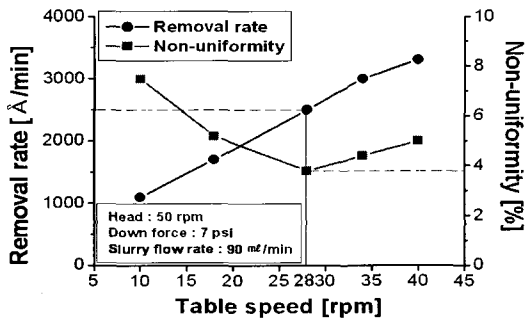


그림 4. 테이블 속도에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 4. Relation of removal rate and non-uniformity as a function of table speed.

3.2 헤드 속도(head speed)

그림 5는 테이블 속도는 25 rpm, 연마 압력은 7 psi, 슬러리 유속은 90 ml/min일때, 헤드 속도에 따른 연마율과 비균일도의 관계를 나타낸 것으로, 헤드 속도는 10 ~ 100 rpm의 범위 내에서 변화를 주며 실험하였다. 속도가 증가함에 따라 연마율과

비균일도 모두 비선형 증가하는 경향을 나타내었으며, 연마율과 비균일도 모두 52 rpm을 기점으로 더욱 증가하였다. 비균일도가 4.3 %로 가장 낮은 값을 나타내었던 52 rpm에서의 연마율은 2520 Å이었다. 결과적으로 헤드 속도가 52 rpm일 때 높은 연마율과 낮은 비균일도 측면에서 가장 안정된 값을 나타내고 있다. 이는 헤드의 속도가 증가함에 따라 웨이퍼 표면과 접촉되는 슬러리 입자의 회전 속도가 증가해서 연마율이 증가한 것으로 생각되며, 헤드의 속도가 증가할수록 헤드 아래에서의 슬러리의 원심력에 의한 운동이 증대되어 비균일도 특성은 떨어진 것으로 생각된다.

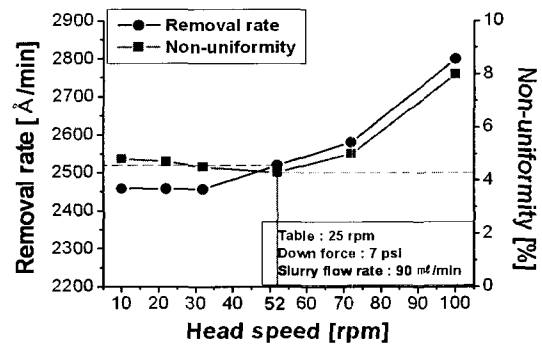


그림 5. 헤드 속도에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 5. Relation of removal rate and non-uniformity as a function of head speed.

3.3 상대 속도($\omega h/\omega t$)

그림 6과 그림 7은 각각 테이블 속도와 헤드의 속도 변화 실험 결과로부터 도출된 $\omega h/\omega t$ 에 따른 연마율과 비균일도를 나타낸 것이다. 그림 6의 테이블 속도 변화에 따른 상대속도 $\omega h/\omega t$ 의 실험에서는 헤드 속도를 35 [rpm]으로 고정시키고 테이블 속도만 변화를 주었고, 그림 7의 헤드 속도 변화에 따른 $\omega h/\omega t$ 의 실험에서는 테이블 속도를 28 [rpm]으로 고정시키고 헤드의 속도를 각각 변화시켜 주었다. 먼저 그림 6에서 연마율은 상대속도의 증가에 따라 낮아지는 경향을 보인 반면, 비균일도는 $\omega h/\omega t$ 가 1.14인 기점으로부터 더욱 증가하였다. 비균일도가 3.8 %로 가장 낮은 값을 나타냈던 1.14에서의 연마율은 2400 Å이었다.

또한, 그림 7은 상대속도의 증가에 따라 처음에는 완만한 변화를 보이다가 $\omega h/\omega t$ 가 1.85인 점을

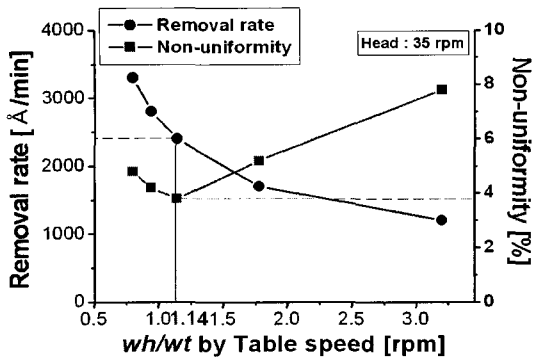


그림 6. 테이블 속도 변화실험으로부터 도출된 $\omega h/\omega t$ 에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 6. Relation of removal rate and non-uniformity by $\omega h/\omega t$ that is drawn from a table speed change experiment.

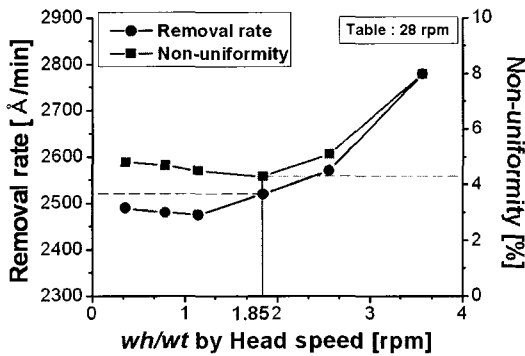


그림 7. 헤드 속도 변화실험으로부터 도출된 $\omega h/\omega t$ 에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 7. Relation of removal rate and non-uniformity by $\omega h/\omega t$ that is drawn from a head speed change experiment.

지나면서 급격히 비균일도가 증가하는 추세를 나타내었으며, 1.85에서의 비균일도는 4.3 %이고 연마율은 2520 Å이었다. 결과적으로, 테이블의 속도 변화에 따른 상대속도는 1.14에서, 헤드의 속도 변화에 따른 상대속도는 1.85에서 비교적 양호한 결과를 나타내었다. 다시 말해서, 헤드와 테이블의 상대속도는 대략 1 ~ 2 범위에서 선택하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 따라서, 테이블 속도에 대해 헤드 속도를 동일하게 설정하거나, 대략 2배 정도의 헤드 속도를 갖도록 실험을 설계하는 것이

가장 이상적일 것으로 판단된다.

3.4 연마압력(down force)

그림 8은 테이블 속도는 25 rpm, 헤드 속도는 50 rpm, 슬러리 유속은 90 ml/min인 경우, 연마 압력의 변화에 따른 연마율과 비균일도의 관계를 나타낸 것으로, 연마 압력은 4 ~ 10 psi의 범위 내에서 변화를 주며 실험하였다. 연마 압력이 증가함에 따라 연마율은 선형 증가하는 경향을 나타내었으며, 비균일도는 감소하였다. 즉, 연마압력이 높을수록 회전하는 웨이퍼면의 변형과 진동이 최소화되어 연마율이 증가를 하고, 균일도가 향상된 것으로 생각된다. 그러나 8.5 psi 이상에서부터 연마율과는 달리 비균일도가 갑자기 증가하는 것으로 보아 임계점으로 생각된다. 비균일도가 4.4 %로 가장 낮은 값을 나타내었던 8.5 psi에서의 연마율은 2800 Å이었다. 연마 압력이 8.5 psi일 때 가장 낮은 비균일도와 높은 연마율을 얻을 수 있었다.

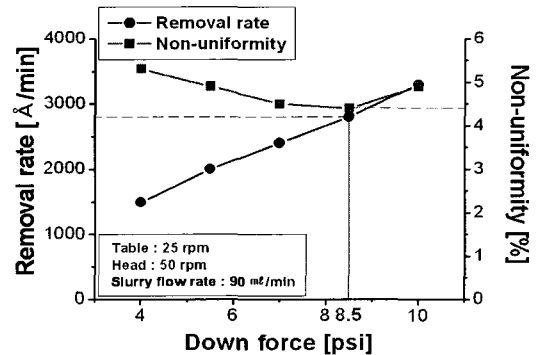


그림 8. 연마압력에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 8. Relation of removal rate and non-uniformity as a function of down force.

3.5 슬러리 유속(slurry flow rate)

슬러리의 패드 유입량과 웨이퍼 면 내 유입량은 중요한 변수인데, 슬러리의 공급은 연마반응과 반응 부산물 제거, 냉각 작용 등과 관련되어 있기 때문이다. 대부분의 CMP 장치에서 슬러리가 웨이퍼 면내로 유입될 때는 필연적으로 웨이퍼 가장자리를 통해 유입/유출되므로 웨이퍼 중심부와는 슬러리 농도의 구배가 발생하여 웨이퍼 중앙이 가장자리보다 더 연마되는 bull's eye effect가 나타난다 [11].

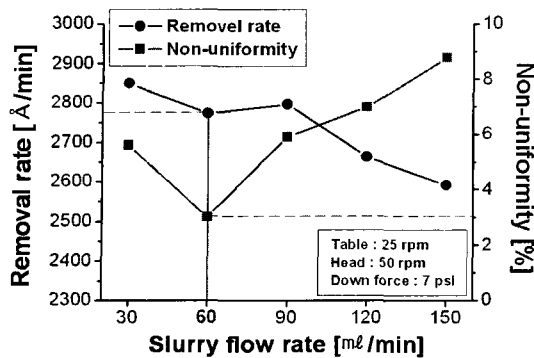


그림 9. 슬러리 유속에 따른 연마율과 비균일도 관계.

Fig. 9. Relation of removal rate and non-uniformity as a function of slurry flow rate.

표 2. DOE 기법으로 얻은 최적 파라미터.

Table 2. Optimum parameter of DOE technique.

공정 변수 (Process parameters)	최적 파라미터 (Optimum parameter)
테이블 속도 (Table speed)	28 [rpm]
헤드 속도 (Head speed)	52 [rpm]
상대 속도 ($\omega h / \omega t$)	1.14 ~ 1.85 [rpm]
연마압력 (Down force)	8.5 [psi]
슬러리 유속 (Slurry flow rate)	60 [ml/min]

그림 9는 테이블 속도는 25 rpm, 헤드 속도는 50 rpm, 연마 압력은 7 psi로 고정시키고, 슬러리 유속에 따른 연마율과 비균일도 관계를 나타낸 것으로, 슬러리 유속은 30 ~ 150 ml/min의 범위 내에서 변화를 주며 실험하였다. 슬러리 유속이 감소할수록 연마율은 증가하는 경향을 나타내었으나, 비균일도는 급격히 감소하다가 60 ml/min을 기점으로 다시 증가하였다. 즉, 슬러리의 과다공급은 균일도를 저하시키고, 연마율도 감소시키므로, 고가의 슬러리인 점을 감안하여 세심한 실험설계(DOE)가 더욱 요구되는 분야임을 알 수 있다. 비균일도가 3 %로 가장 낮은 값을 나타내었던 60

ml/min에서 연마율은 2773 Å이었다. 결과적으로 슬러리 유속이 60 ml/min일 때 가장 안정된 공정으로 진행됨을 알 수 있었다.

표 2에 DOE 기법으로부터 얻은 최적조건을 요약하여 나타내었다.

4. 결론

산화막 CMP 공정에서 높은 연마율과 낮은 비균일도를 얻기 위해 본 논문에서 제안하는 DOE 기법을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

1. 각 공정 파라미터의 변화는 연마 제거율과 웨이퍼의 비균일도에 상당한 영향을 주었다. 또한, 2000 Å/min 이상의 높은 연마율과 4 % 이하의 낮은 비균일도를 나타내어 정량적으로 최적화되었다.
2. 테이블의 속도는 28 rpm 부근에서 높은 연마율과 낮은 비균일도를 모두 만족시키는 최적값을 추출할 수 있었다.
3. 헤드의 속도는 52 rpm 지점에서 비교적 안정된 비균일도를 나타내는 것으로 미루어, 이 점에서 파라미터의 변화에 대한 최적값을 얻을 수 있었다.
4. 헤드 속도와 테이블 속도의 비($\omega h / \omega t$)인 상대속도는 1 ~ 2 사이에서 양호한 결과를 나타내었다. 따라서 테이블 속도에 대해 헤드 속도를 같게 하거나, 또는 2배 정도로 실험을 설계하는 것이 가장 이상적임을 알 수 있었다.
5. 연마압력은 8.5 psi일 때 가장 낮은 비균일도와 높은 연마율을 얻을 수 있었다.
6. 슬러리 유속은 60 ml/min일때, 가장 만족하는 최적값을 나타내었다.

이상과 같이 DOE 기법에 의해 결정된 최적의 파라미터는 웨이퍼의 연마율과 비균일도를 결정하는 데 매우 효과적임을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시하는 DOE 기법을 통한 CMP 공정의 최적화에 대한 기반연구는 앞으로 새로운 소재나 구조에 대응하기 위해서는 물론, CMP 공정 능력의 향상, 시행착오로 인한 비용과 시간을 절약할 수 있어 CMP 공정의 신뢰성 및 재현성을 확보하는데 지대한 공헌을 할 것이며 특히, 시뮬레이션을 위한 데이터 테이블로 제공될 수 있어 그 의미가 매우 크다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 2002년 정보통신부에서 지원하는 기초기술연구지원사업(과제번호 : 2002-042-185-3)으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] The National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, 1997.
- [2] Modak, P. Monteith, and N. Parekh, "Components of within-wafer non-uniformity in a dielectric CMP process", CMP-MIC proceeding, p. 169, 1997.
- [3] S. Y. Jeong, Y. J. Seo, and S. Y. Kim, "Effect of system facility factors for hot spot reduction of inter-level dielectric (ILD) CMP process", ISEIM-2001, p. 95, 2001.
- [4] 김상용, 서용진, 김태형, 이우선, 김창일, 장의구, "Chemical Mechanical Polishing(CMP) 공정을 이용한 Multilevel Metal 구조의 광역 평탄화에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 논문지, 11권, 12호, p. 1084, 1998.
- [5] 서용진, 김상용, 김태형, 김창일, 이우선, 장의구, "CMP 공정에 기인하는 소자특성의 열화를 방지하기 위한 PMD 구조에 대한 연구", 한국전기전자재료학회논문지, 12권, 2호, p. 111, 1999.
- [6] S. Y. Kim and Y. J. Seo, "Correlation analysis between pattern and non-pattern wafer for characterization of shallow trench isolation-chemical mechanical polishing (STI-CMP) process", Microelectronic Engineering, Elsevier Science, Vol. 60, Issue. 3-4, p. 357, 2002.
- [7] S. R. Wilson, C. J. Tracy, and J. L. Freeman, "In Multilevel Metallization for Integrated Circuits", edit by S. R. Wilson, C. J. Tracy, and J. L. Freeman, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1993.
- [8] S. P. Murarka, "Metallization Theory and Practice for VLSI and ULSI," Butterworth-Heinimann, Boston, p. 100, 1993.
- [9] 김상용, 서용진, 이우선, 이강현, 장의구, "슬러리와 패드 변화에 따른 텅스텐 플러그 CMP 공정의 최적화", 한국전기전자재료학회논문지, 13권, 7호, p. 568, 2000.
- [10] T. Izumitani, "In Treatise on Materials Science and Technology," edit by M. Tomozawa and R. Doremus, Academic Press, New York, p. 115, 1979.
- [11] 남철우, 최기식, 김삼동, 김정태, "CMP 기술의 현황과 전망", Prospectives of Industrial Chemistry, Vol. 2, No. 3, p. 11, 1999.