

## 구리 CMP 공정변수 최적화를 위한 실험계획법(DOE) 연구

### A Study on DOE Method to Optimize the Process Parameters for Cu CMP

최민호<sup>1</sup>, 김남훈<sup>1</sup>, 김상용<sup>1</sup>, 장의구<sup>1,a</sup>

(Min-Ho Choi<sup>1</sup>, Nam-Hoon Kim<sup>1</sup>, Sang-Yong Kim<sup>1</sup>, and Eui-Goo Chang<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

Chemical mechanical polishing (CMP) has been widely accepted for the global planarization of multi-layer structures in semiconductor manufacturing. Copper has been the candidate metallization material for ultra-large scale integrated circuits (ULSIs), owing to its excellent electro-migration resistance and low electrical resistance. However, it still has various problems in copper CMP process. Thus, it is important to understand the effect of the process variables such as turntable speed, head speed, down force and back pressure are very important parameters that must be carefully formulated in order to achieve desired the removal rates and non-uniformity. Using a design of experiment (DOE) approach, this study was performed investigating the main effect of the variables and the interaction between the various parameters during CMP. A better understanding of the interaction behavior between the various parameters and the effect on removal rate, non-uniformity and ETC (edge to center) is achieved by using the statistical analysis techniques. In the experimental tests, the optimum parameters which were derived from the statistical analysis could be found for higher removal rate and lower non-uniformity through the above DOE results.

**Key Words** : CMP(chemical mechanical polishing), DOE(design of experiment), Turntable and head speed, Back pressure, Removal rate, Non-uniformity

#### 1. 서론

반도체 소자의 고속화 집적화에 의해 다층 배선, 저온 절연막 형성, 3차원 및 고유전체의 커패시터 등의 복합화 기술이 적용 및 요구되고 있다. 이에 따라 단차가 급격히 높아지게 되어서, 노광공정 및 식각공정 등 후속 공정에서의 어려움이 증가하게 되었다[1]. 이에 대한 대안으로 CMP 기술이 제안되었고, 활발한 연구를 통해 핵심 공정 기술로 부각되었다. 향후 CMP 공정의 중요성은 계속 증가할 전망이어서 반도체 집적회로 제조 공정

중 CMP가 차지하는 역할은 더욱 증가할 것이다. 반도체 공정에서 CMP 공정은 IMD(inter-metal dielectric)와 ILD(inter-layer dielectric)막의 평탄화 [2-4], STI(shallow trench isolation) CMP, 그리고 W, Al, Cu 등과 같은 금속 CMP 공정으로 나뉘어 적용되고 있다[5]. CMP 공정은 화학적인 작용과 기계적인 작용에 의해서 연마하고자 하는 물체의 표면을 제거하는 작업이다. CMP 공정에서 제어해야 될 변수들은 각 공정과 장치들의 조합에 따라서 여러 가지로 분류될 수가 있다. 이러한 변수가 각각 적절하게 고려되어 조합된 상태에서 최적의 CMP 공정 설계가 가능하게 된다. 하지만, 이러한 모든 변수에 대한 실험을 행함으로써 변수를 제어하여 최적의 조건을 구한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 그럼에도 불구하고 더욱 개선된 공정을 위해서는 변수들에 대한 올바른 이해가 필요하다고 생각되기 때문에 본 논문에서는 CMP 공정에서

1. 중앙대학교 전자전기공학부  
(서울시 동작구 흑석동 221)

a. Corresponding Author : changeg@cau.ac.kr

접수일자 : 2004. 11. 9

1차 심사 : 2004. 12. 3

심사완료 : 2004. 12. 13

실험 장비의 공정 변수를 실험계획법(DOE; design of experiment)을 통해서 결정함으로써 최적의 조건을 도출하여 메커니즘을 이해하고자 한다[6,7]. 연마제거율과 균일도 등의 개선을 위해 실험설계법을 적용하여 변수들의 영향을 고찰하여 CMP 공정 장비의 변수를 최적화하고자 하였다. 이를 위하여 실험계획법의 분산분석을 행하여 공정변수를 결정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험계획법

CMP 공정에 영향을 주는 요인들은 크게 4개의 영역으로 나눌 수 있다. CMP 장비 요소, CMP 소모자재 요소, post-CMP cleaning 요소 및 CMP metrology 등으로 나눌 수 있다. 가장 바람직한 CMP 공정은 이상의 4개의 영역이 모두 고려되어 최적화된 경우일 것이다. 높은 연마율, 낮은 비균일도, 연마 후의 평면 결함의 감소, 선택비 개선 등으로 다양한 특성을 CMP 공정을 통하여 얻을 수 있다. 그러나, 가장 궁극적인 목적인 평탄화 측면에서 연마율과 균일도를 실험설계법의 목표로 설정하고 각각의 공정 변수에 따라 최적화된 CMP 공정의 조건을 도출해 보기로 하였다. 연마율과 비균일도에 영향을 미치는 것으로 알려진 주요 공정 변수를 선정하여 실험계획법 중 L8형 직교 배열표 (tables of orthogonal arrays)를 사용하여 4요인 2수준으로 배치하였으며, 실험계획법은 Minitab Inc.의 통계 소프트웨어인 MINITAB™을 사용하여 분석하였다.

### 2.2 실험 방법

본 논문에서 연마 제거율은 CMP 공정 전의 두께에서 CMP 공정 후의 두께를 뺀 값을 총 연마시간으로 나눈 값으로 정의하였으며, 또한 비균일도는 웨이퍼내의 박막 두께의 균일도를 나타내는 기준인 웨이퍼내의 비균일도(within-wafer non uniformity ; WIWNU%)를 나타내며, 웨이퍼의 두께 편차와 패드와의 접촉 상태의 차이에 의해 영향을 받으며, 웨이퍼 두께에 대한 표준 편차를 평균으로 나눈 값의 백분율로 정의하여 계산하였다. ETC (edge to center)는 웨이퍼의 상대적인 원운동에 의해 중심과 가장 자리의 상대적인 속도 차가 생기기 때문에, 웨이퍼 위치에 따른 연마율의 차이값을 나타낸 것이다. ETC값은 웨이퍼 중심의 9 포인트

값에 가장 자리 10 포인트 값을 뺀 값으로 나타내었다. 모든 시료의 polishing은 G&P POLI-380 CMP polisher를 사용하여 수행되었으며, 이 실험에 사용된 CMP 공정 장비는 CMP polisher, 주 작동 패널, 캐리어 헤드 그리고, 패드 테이블 부분으로 나뉘어진다.

## 3. 결과 및 고찰

CMP 공정에서 제어해야 될 변수들은 각 공정과 장치들의 조합에 따라서 여러 가지로 분류될 수가 있다. 따라서, 이러한 변수가 각각 적절하게 고려되어 조합된 상태에서 최적의 CMP 공정 설계가 가능하게 된다. 일반적으로 기계적 연마에서는 웨이퍼 패드간의 상대 속도 및 가공 압력이 균일하게 부여되고 또한 균일하게 슬러리가 공급되면 웨이퍼 전면은 균등하게 연마된다. CMP 공정 메커니즘을 설명하는데 자주 인용되는 Preston 방정식에 의하면[8-10], 연마율은 패드의 상대속도(턴 테이블 속도와 헤드 속도의 비)와 패드의 압력(연마압력과 배압)에 비례하는 것을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 CMP 장비는 테이블과 헤드가 모두 회전하는 로터리 방식이므로, 두 회전체 사이의 상대적인 속도가 연마율을 좌우한다. 즉, 로터리 방식은 상대적인 원운동으로 인해 웨이퍼의 중심과 가장자리 사이에 상대속도의 차가 발생한다. 본 실험에서는 이러한 웨이퍼의 중심과 가장자리 사이의 상대속도의 차에 의한 웨이퍼의 위치에 따른 연마율의 차이와 연마율과 균일도에 대해서 분석해 보았다. 그리고, 여러 가지 분석을 통하여 얻은 공정 변수의 영향을 가장 적합하다고 생각되는 수준에서 찾아내었다. 실험은 공정변수 연마압력(down force), 배압(back pressure), 헤드 속도, 턴 테이블 속도를 4요인 2수준의 DOE 방법을 사용하였으며, 표 1에 나타내었다. 연마율, 비균일도와 ETC는 변수들의 작용에 의해서 좌우된다. 각각의 공정 변수를 변화시켜가면서 기초 공정 실험을 한 후, 그 실험 결과를 실험계획법 소프트웨어인 MINITAB™에 의해서 분석해 보았다. 표 2의 L8형 직교 배열표를 사용하여 실험 계획법을 사용하였다. 표 2는 연마율, 비균일도와 ETC의 결과가 포함되어 있다. 분산분석(ANOVA)을 사용하여, 요인들과 수준들이 각 변수나 교호작용에 의해 연마율, 비균일도와 ETC에 어떠한 영향을 주는지 분석하여 보았다.

표 1. 공정변수와 수준.

Table 1. Process parameters and levels.

Factor	Level	
	Low	High
Down Force (DF)	300	392
Back Pressure (BP)	98	138
Head speed (HS)	50	75
TurnTable speed (TS)	75	100

표 2. 실험계획법을 위한 CMP 공정 변수 범위와 결과.

Table 2. Situation of process parameters and results for DOE method.

DF	BP	HS	TS	RR	NU	ETC
300	138	50	100	12867	11.8	1418
300	98	50	75	9453	10.3	294
392	98	75	75	9108	16.6	2122
392	98	50	100	11288	18.4	2820
392	138	75	100	10992	17.6	2402
392	138	50	75	9239	16.2	1961
300	138	75	75	8185	13.8	1638
300	98	75	100	9539	11.8	1394

3.1 주 효과 (Main Effect)

그림 1은 4개의 공정 변수들 중 하나의 변수에 의한 효과를 분석한 그래프이다. 그림 1을 보면, 비균일도와 ETC는 변수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고, 연마율은 헤드 속도에서만 반비례하는 것을 알 수 있다. 그리고, 연마압력, 배압과 테이블 속도가 증가함에 따라 연마율, 비균일도와 ETC는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었는데, 이것은 세 변수들의 증가가 연마율은 향상시킬 수는 있지만, 웨이퍼의 균일도는 저하시킨다는 것을 나타낸다. 또한, 각 공정변수의 증가는 비균일도와 ETC의 증가로 나타나는데, 이것은 연마율의 향상을 위하여 공정변수들의 증가함에 따라 균일도의 저하를 받게 된다는 것을 알 수 있었다. 주 효과 플롯을 볼 때, 그래프의 기울기가 클수록 효과가 크기 때문에 두 가지 인자인 헤드 속도와 테이블 속도가 연마율에 영향을 끼치는 것으로 나타난다.

그리고, 연마압력이 비균일도와 ETC에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 연마율과 균일도에 미치는 영향을 분석하는 데는 부족하지만, 이상의 주 효과 그래프만으로도 높은 연마압력과 테이블 속도, 낮은 헤드 속도가 더 나은 공정 조건의 변수인 것으로 판단할 수 있다.

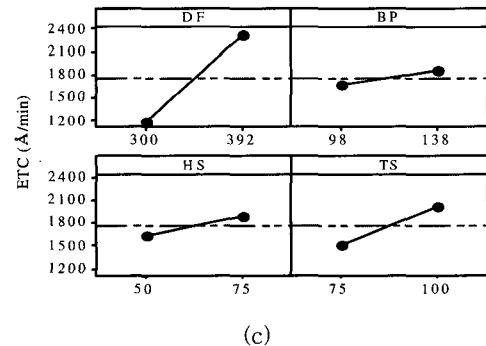
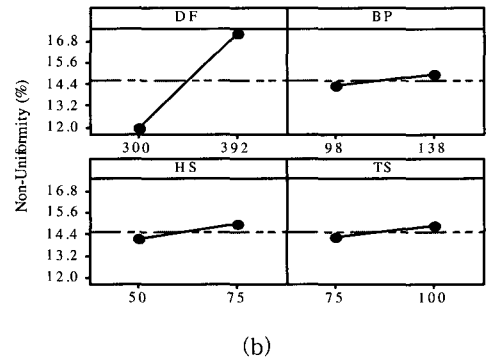
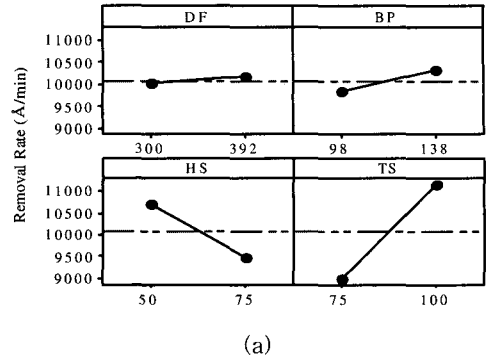


그림 1. 각각의 공정 변수에 의한 주 효과; (a) 연마율, (b) 비균일도 및 (c) ETC.

Fig. 1. Main effects by each process parameter; (a) removal rate, (b) non-uniformity, and (c) ETC.

3.2 교호작용 효과 (Interaction Effect)

각 공정변수의 주 효과 그래프만으로는 공정변수가 연마율, 비균일도와 ETC에 어떠한 영향을 주는지 분석하기에는 다소 미흡하다. 따라서, 두 개의 변수에 대한 반응물의 경향을 알아보기 위하여

교호작용 플롯을 통해 두 개의 변수에 의한 영향을 알아보고자 하였다. 교호작용 플롯을 볼 때, 그래프의 교차점이 있으면 두 개 변수의 교호 작용이 크다는 것이므로, 그 교차점이 있는 그래프를 분석해 보았다. 그림 2에서 보이는 것처럼, 고정 변수 두 개 사이의 교호 작용은 연마율에 영향을 주는 것으로 나타났다. 두 개의 변수 사이의 교호 작용을 보면, 연마 압력과 배압 사이의 교호 작용은 그래프의 교차점이 생기므로 연마율에 영향을 가지는 것으로 나타났다. 낮은 연마 압력과 조합될 때의 배압은 연마율에 큰 영향을 준다. 반면, 높은 연마 압력에서는 배압의 변화는 연마율에 적은 영향을 준다. 또한, 낮은 연마 압력에서는 헤드 속도의 변화에서도 연마율에 큰 영향을 미친다. 배압에서는 배압의 수준에 관계없이 테이블 속도의 변화에 큰 영향을 받지만, 높은 배압일 때는 더 우수한 연마율의 향상을 도모할 수 있다.

Interaction Effect for Removal Rate

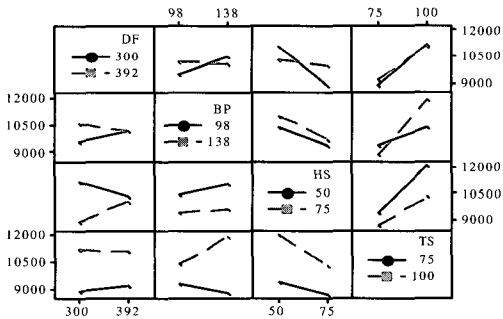


그림 2. 연마율에 대한 교호작용.  
Fig. 2. Interaction effects for removal rate.

Interaction Effect for Non-Uniformity

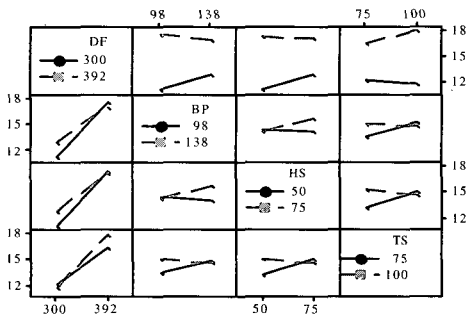


그림 3. 비균일도에 대한 교호작용.  
Fig. 3. Interaction effects for non-uniformity.

Interaction Effect for ETC

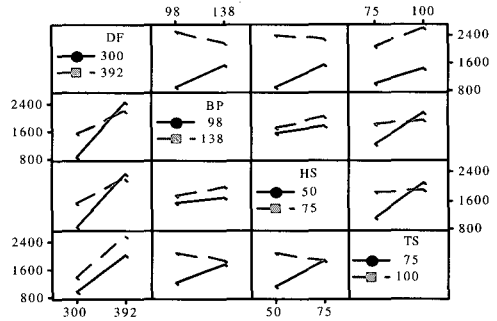


그림 4. ETC에 대한 교호작용.  
Fig. 4. Interaction effects for ETC.

그림 3은 비균일도에 대한 그래프이다. 비균일도는 연마 압력과 배압, 헤드 속도, 테이블 속도 사이의 교호 작용에서 두 인자 사이의 교호작용이 큰 것을 알 수 있다. 연마압력이 높을수록 증가하는 다른 변수와의 관계없이 높은 비균일도를 나타내는 것을 알 수 있다.

비균일도와 ETC의 교호 작용 플롯을 보듯이 ETC와 비균일도는 다른 공정 변수들의 교호 작용에서 연마 압력이 증가하면, 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 전반적으로 연마압력이 클수록 비균일도가 증가하여 웨이퍼의 균일도가 저하됨을 알 수 있다. 따라서, 높은 연마압력일 때에 연마율, 비균일도 및 ETC는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 연마압력이 높을수록 회전하는 웨이퍼면의 변형과 진동이 최소화되어 연마율이 증

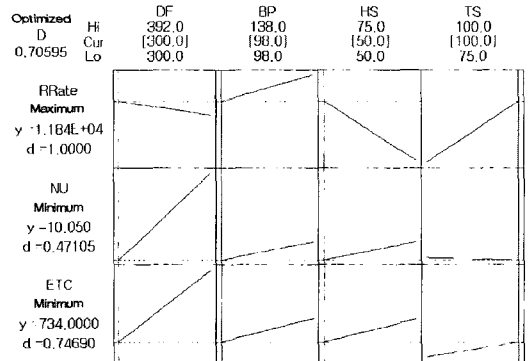


그림 5. 반응최적화도구를 사용한 최적 조건.  
Fig. 5. Optimized process condition by the response optimizer.

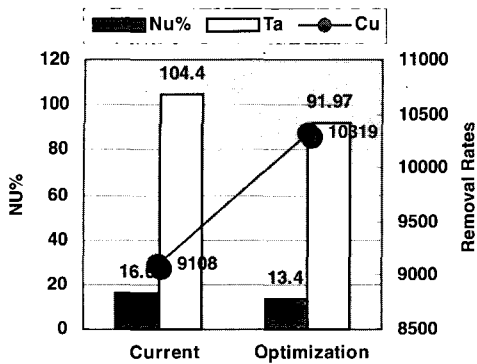


그림 6. 최적화된 공정 변수에 대한 연마율, 비균일도 및 선택비 특성.

Fig. 6. Removal rate, non-uniformity, and selectivity with the optimized process condition.

가되었다고 사료된다. 그러나, ETC와 비균일도의 증가로 웨이퍼의 균일도가 저하되게 된다. 테이블 속도는 웨이퍼를 가로지르는 슬러리의 이동에 영향을 미치므로 반응물과 생산물을 이동시키어 연마율의 향상에 영향을 준다. 헤드 속도와 테이블 속도는 웨이퍼의 중심과 가장자리의 상대속도에 영향을 준다. 배압과 테이블 속도사이의 교호작용을 보면, 연마율, 비균일도 및 ETC의 그래프가 교차하기에 교호작용이 크게 작용되는 것을 알 수 있다. 이러한 각 변수들 간의 교호작용이 크게 작용하기에 연마율, ETC와 비균일도를 고려하여 최적의 공정 변수를 도출해 내기 위해 MINITAB™의 반응최적화도구(response optimizer)를 사용한 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험계획법의 반응최적화도구로부터 얻은 최적조건을 확인하기 위하여 최적조건으로 연마실험을 수행하였다. 기존의 반응최적화의 시작값과 비교했을 때, 그림 6처럼 Cu 및 Ta의 연마율과 비균일도 등이 전반적으로 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한 선택비 면에서도 향상되는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과에서 보면, 주 효과에서 압력의 증가는 연마율의 증가를 나타내게 된다. 이것은 앞에서 언급한 CMP의 기계적인 요소인 패드의 상대속도와 패드의 압력에 연마율이 비례한다는 Preston 방정식에 부합되는 것을 알 수 있다. 그러나, 주 효과만으로는 표면과 패드의 상대속도에 따라 연마율이 비례하는 경향을 분석하기에는 부족하다. 상대속도에 대해서는 두 공정변수들 간의 교호작용

을 나타낸 그래프를 분석해보면 상대속도에 따라 연마율의 증가를 확인할 수가 있다. 그림 2의 연마율에 대한 교호작용 효과의 헤드 속도와 테이블 속도부분의 그래프를 보면, 각각 속도 변화에 따른 상대 속도인 것을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 고정된 헤드 속도에서 테이블 속도의 변화만 주었을 때, 연마율은 상대속도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이게 된다. Preston 방정식의 이론적인 개념을 본 실험에 의해 통계적으로 접근할 수 있었다.

#### 4. 결론

CMP 공정 변수들은 연마율, ETC, 비균일도 등에 영향을 끼친다. 본 논문에서는 공정 변수들의 영향을 실험계획법을 통하여 통계분석을 하여서 높은 연마율과 낮은 비균일도 특성을 가진 조건을 도출하였으며, 다음의 결론을 유도하였다.

- 1) CMP 공정 변수들의 변화는 연마율, 웨이퍼내의 비균일도, ETC 등에 상당한 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- 2) 연마압력은 300 psi일 때, 낮은 비균일도와 ETC를 얻을 수 있었다.
- 3) 테이블속도는 100 rpm 일 때, 상대적으로 높은 비균일도와 ETC를 보이지만, 높은 연마율을 나타낸다. 이 점에서 공정 변수의 변화에 대한 최적화를 얻을 수 있었다.
- 4) 헤드 속도가 50 rpm 지점에서 비교적 안정적인 비균일도와 ETC를 나타내는 것으로 미루어, 이 점에서 최적 값을 얻을 수 있었다.
- 5) 본 논문에서의 실험계획법을 이용하여 결정된 최적의 변수는 연마율, 비균일도 및 선택비를 향상 시키는 데 효과적임을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시한 실험계획법을 통한 CMP 공정 변수의 최적화는 앞으로의 새로운 소재의 CMP 공정 능력의 향상뿐만 아니라 시행착오로 인한 비용과 시간을 절약할 수가 있을 것이라 예상된다.

#### 감사의글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00375-0) 지원으로 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] P. Modak, P. Monteith, and N. Parekh, "Components of Within-wafer Non-uniformity in a Dielectric CMP Process", CMP-MIC proceeding, p. 169, 1997.
- [2] S. P. Murarka, "Metallization Theory and Practice for VLSI and ULSI", Butterworth Heinemann, p. 100, 1993.
- [3] 서용진, 김상용, 김태형, 김창일, 이우선, 장의구, "CMP공정에 기인하는 소자특성의 열화를 방지하기 위한 PMD 구조에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 12권, 2호, p. 111, 1999.
- [4] 정소영, 김상용, 서용진, "PMD (Pre-metal Dielectric) 선형 질화막 공정의 최적화에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 10호, p. 779, 2001.
- [5] S. R. Wilson, C. J. Tracy, and J. L. Freeman, "Handbook of Multilevel Metallization for Integrated Circuits", Noyes Publications, p. 158, 1993.
- [6] 이경진, 김상용, 서용진, "반경험적인 실험설계 기법을 이용한 CMP 공정 변수의 최적화", 전기전자재료학회논문지, 15권, 11호, p. 939, 2002.
- [7] S. W. Park, C. B. Kim, S. Y. Kim, and Y. J. Seo, "Design of experimental optimization for ULSI CMP process application", Micro-electronic Engineering, Vol. 66, Iss. 1-4, p. 488, 2003.
- [8] J. M. Strigerwald, S. P. Murarka, and R. J. Gutmann, "Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials", John Wiley & Sons, Inc., p. 49, 1997.
- [9] C. T. Nguyen, A. Hu, and X. Zhang, "Application of selective epitaxial silicon and chemi-mechanical polishing to bipolar transistor", IEEE Transactions on Electron Device., Vol. 41, No. 12, p. 2343, 1994.
- [10] 김상용, 서용진, 김태형, 이우선, 김창일, 장의구, "Chemical Mechanical Polishing(CMP) 공정을 이용한 Mutilevel Metal 구조의 광역 평탄화에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, 12호, p. 1084, 1998.