

## HfO<sub>2</sub> 박막의 전기적 특성에 대한 통계적 분석

이정환, 권경은, 고영돈, 문태형\*, 명재민\*, 윤일구  
 연세대학교 전기전자공학과,  
 연세대학교 금속공학과\*

### Statistical Analysis for Electrical Characteristics of HfO<sub>2</sub> Thin Films

Jung Hwan Lee, Kyoung Eun Kweon, Young-Don Ko, Tae-Hyoung Moon, Jae-Min Myoung, and Ilgu Yun  
 Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University  
 Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei University\*

**Abstract :** In this paper, multiple regression analysis of the electrical characteristics for HfO<sub>2</sub> thin films grown by metal organic molecular beam epitaxy (MOMBE) was investigated. The electrical properties, such as, the accumulation capacitance and the hysteresis index, are the main factors to determine the characteristics of HfO<sub>2</sub> thin films. The input factors on the process are the substrate temperature, Ar gas flow, and O<sub>2</sub> gas flow. For statistical analysis, the design of experiments was carried out and the effect plots were used to analyze the manufacturing process. This methodology can predict the electrical characteristics of the thin film growth mechanism related to the process conditions.

**Key Words :** regression model, accumulation capacitance, hysteresis index, HfO<sub>2</sub>, MOMBE

### 1. 서 론

Metal-oxide semiconductor field-effect transistor(MOSFET) 분야에서의 최근 경향은 고밀도 패키징을 위하여 gate oxide의 두께를 줄이려고 노력하고 있다. 하지만, 두께가 감소함에 따라 유전체의 신뢰성과 gate leakage current가 같이 감소하는 물리적인 한계가 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 높은 에너지 밴드갭, 고유전 상수 그리고 높은 breakdown field를 가진 high-k dielectric 물질인 HfO<sub>2</sub>박막이 주목받고 있다[1].

본 연구에서는 공정 조건에 따른 HfO<sub>2</sub>박막의 전기적 특성을 통계적으로 분석하고 예측하기 위해서 실험계획법을 이용하여 실험을 설계하고 다중 회귀 분석을 실시하였다.

### 2. 실험

실험은 p-Si(100) 기판 위에 금속 유기 분자 빔 에피택시 방법을 이용하여 HfO<sub>2</sub> 박막을 성장시켰다. 박막을 성장시키기 전에 Si 기판 위에 존재하는 자연 산화막을 제거하기 위해서 H<sub>2</sub>O:Hf 용액을 이용하였다. 금속 유기 선구 물질로 Hf-t-butoxide를 사용하였고 carrier gas로 고순도의 Ar가스를 사용하였다. 산화제로는 O<sub>2</sub> 가스를 선택하였다. 기본 압력과 작동 압력은 각각 10<sup>-9</sup> Torr와 10<sup>-7</sup> Torr로 유지하였다. Si 기판과 HfO<sub>2</sub> 박막 사이의 계면 특성을 향상시키기 위해 N<sub>2</sub> 가스 환경에서 700 °C에서 2분간 어닐링을 수행하였다.

### 3. 모델링 계획

2<sup>3</sup> full factorial design 방법을 통해서 실험을 설계하고 중앙점을 추가하여 총 9번의 실험을 실시하였다. 각 실험

에서 통제된 공정 조건은 기판 온도(T<sub>sub</sub>)가 450~550 °C, Ar 가스량(Ar)이 3~5 sccm, 그리고 O<sub>2</sub> 가스량(O<sub>2</sub>)은 3~5 sccm이다. 각각의 조건에 따른 반응 변수인 accumulation capacitance와 hysteresis index에 대한 다중 회귀 분석을 사용하여 모델링을 하였다. accumulation capacitance (C<sub>acc</sub>)는 accumulation region 에서의 MOS구조가 갖는 정전용량을 나타내며, hysteresis index (H)는 양방향 전압 변화로 생성된 히스테리시스 루프의 전압변위를 나타낸다. 다중 회귀 분석에서 유효하지 않은 요인을 제거하기 위해서 후진제거법(backward elimination)이 사용되었고 90 %의 통계적 유의 수준 하에서 실시하였다[2].

### 4. 결과 및 고찰

Accumulation capacitance와 hysteresis index에 대한 다중 회귀모델은 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Accumulation capacitance}(C_{acc}) \\ = 34.874 - 0.015 \times T_{sub} - 5.982 \times Ar - 3.956 \times O_2 \\ + 0.009 \times T_{sub} \times Ar + 0.006 \times T_{sub} \times O_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Hysteresis index}(H) = -2.049 - 0.003 \times T_{sub} + 1.176 \times Ar \\ + 0.609 \times O_2 + 0.001 \times T_{sub} \times Ar - 0.222 \times Ar \times O_2 \end{aligned} \quad (2)$$

모델의 설명력은 각각 99.9 %와 99.3 %로 다중 회귀 모델이 매우 유의하다는 것을 알 수 있다. 분산 분석표는 표1과 표2에 각각 나타내었다. p-value는 각 항의 유의수준을 보여준다. 90 %의 통계적 유의수준 하에서 p-value가 0.1보다 작으면, 그 항은 유의하다고 말할 수 있다. 각 항의 p-value를 보면 주 효과와 2차 상호작용 효과 모

두 유의하다는 것을 알 수 있다.

표 1. ANOVA table for accumulation capacitance.

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F	p-value
Main effects	3	67.9309	22.6436	323.19	0.003
2-way interactions	2	2.2660	1.1330	16.17	0.058
Curvature	1	3.5285	3.5285	50.36	0.019
Error	2	0.1401	0.0701		
Total	8	73.8655			

표 2. ANOVA table for hysteresis index.

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F	p-value
Main effects	3	1941585	647195	11025.50	0.000
2-way interactions	2	394656	197328	3361.64	0.000
Curvature	1	5596	5596	95.34	0.010
Error	2	117	59		
Total	8	2341954			

### 3.1 주 효과

그림 1은 각 반응변수에 대한 주 효과를 분석한 그래프이다. 그림 1 (a)를 보면 hysteresis index는 Ar 농도가 높을수록 O<sub>2</sub> 농도가 낮을수록 커지고 그림 1 (b)를 보면 accumulation capacitance는 온도가 높을수록 Ar 농도가 낮을수록 증가한다.

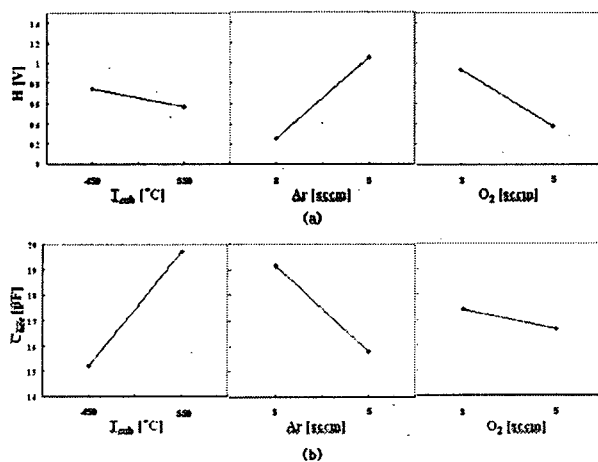


그림 1. 각 변수에 대한 주 효과: (a) hysteresis index, (b) accumulation capacitance.

### 3.2 교호작용 효과

그림 2는 각 반응변수에 대한 교호작용으로 유의하지 않은 항은 고려하지 않았다. 그림 2 (a)를 보면 hysteresis index에 대해 Ar이 3 sccm 일 때 온도의 효과가 Ar이 5

sccm 보다 더 크고, O<sub>2</sub>가 3 sccm 일 때 Ar의 효과가 O<sub>2</sub>가 5 sccm 일 때 보다 크다. 그림 2 (b)를 보면 accumulation capacitance에 대한 온도의 효과가 Ar, O<sub>2</sub> 모두 5 sccm일 때가 3 sccm일 때 보다 더 크다.

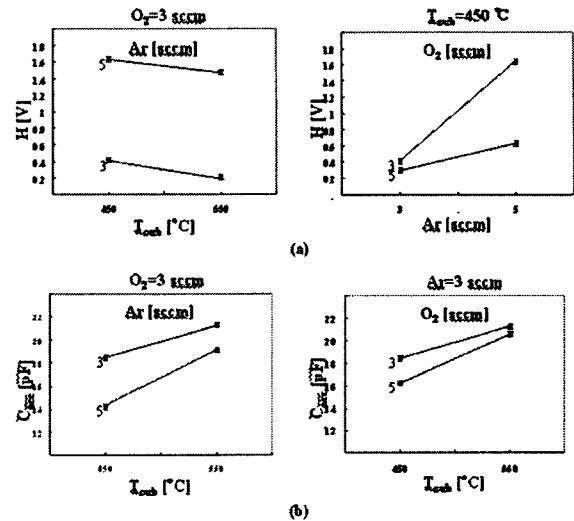


그림 2. 각 변수에 대한 교호작용: (a) hysteresis index, (b) accumulation capacitance.

## 4. 결론

본 연구에서는 금속 유기 분자 빔 에피택시 방법을 이용하여 성장한 HfO<sub>2</sub> 박막의 전기적 특성인 accumulation capacitance와 hysteresis index에 대해 통계적인 분석을 실시하였다. 다중 회귀 분석을 통하여 공정조건에 따른 반응변수 모델을 만들고, effect plot으로 각 조건의 효과를 분석하고 예측 할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음

## 참고 문헌

- [1] C. C. Yeo, M. S. Joo, B. J. Cho, and S. J. Whang, "Effect of annealing on the composition and structure of HfO<sub>2</sub> and nitrogen-incorporated HfO<sub>2</sub>," Thin Solid Films, vol. 462, p. 90, 2004.
- [2] R. R. Hocking, "The Analysis and Selection of variables in Linear Regression" Biometrics, vol. 32, p. 1, 1976.