통계적 실험계획법을 이용한 HDP-CVD 로 증착된 실리콘 산화막 공정조건 최적화에 관한 연구

유경한* , 김조원** , 홍상진 (책임저자)*

*명지대학교 전자공학과 & IT 중점연구소, **서울산업대학교

초록

본 논문에서는 HDPCVD를 이용한 실리콘 산화막 형성에서 산화막의 특성에 영향을 미치는 RF Power, Gas, 산소 등의 공정조건과 증착된 산화막의 특성을 나타내는 증착율, 균일성 및 굴절율에 관한 주효과와 교호작용을 정량적으로 규명하고, 산화막 증착에서 관심의 대상이 되는 여러가지의 반응변수를 모두 만족시키는 최적의 공정조건을 제시한다. 실험의 효율성을 높이기 위해 통계적인 실험계획법을 활용하여 실험의 회수를 줄이는 한편 반응모델링을 통하여 입력변수와 반응변수의 관계를 시각적으로 도식화 한다. 실험을 통하여 현재 사용되고 있는 공정조건에 대한 개선점을 발견하였으며, 수립된 모델을 바탕으로 한 반응최적화 알고리즘을 통하여 세 가지 반응변수 모두 만족시킬 수 있는 5가지의 입력조건을 제시한다.

1. 서론

CVD (Chemical Vapor Deposition)는 기체상태의 화합물을 분해한 후 화학반응에 의해 웨이퍼에 박막을 형성하는 증착 방법이다. 반도체 소자의 고집적화에 따라 공정이 복잡해지고, 여러 단계를 거치게 되기 때문에 많은 공정상의 제약이 발생하게 되는데, 특히 최근 반도체 공정에서 저온 공정의 필요가 확대됨에 따라, 낮은 공정온도를 유지 하면서도 높은 증착율의 특성을 나타내는 high density plasma-chemical vapor deposition (HDP-CVD) 에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. HDPCVD 는 공정에 사용되는 입력변수들의 조건에 따라 서로 다른 박막의 특성을 나타내기 때문에 이러한 변수가 적절하게 고려되어 조합된 상태에서 최적의 공정설계가 가능하다

최적의 공정조건을 결정하기 위한 다양한 방법에 대한 연구가 발표되었음에도 불구하고, 실제 장비의 운용면에서 선험적이고 경험적인 방법에 의한 공정조건의 설계가 지배적이다. 또한, 입력변수가 여러 가지일 경우에는, 각각의 변수가 독립이며 변수간의 교호작용 (interaction)이 없다는 가정 하에, 조정이 가능한 하나의 입력변수를 선정하여 순차적으로 그 변위를 조정하는 "one factor at a time" 의 방법이 가장 보편적으로 이용되고 있다. 플라즈마를 이용한 공정은 입력 요소들이 독립이 아니며 변수간의 교호작용이 존재할 수 있기 때문에, 공정 설계에 따른 결과를 예측하고 어렵고, 예측한 데로 결과가 나오지 않았을 경우 이에 대한 대처가 어렵다 최적의 공정조건을 구하는 면에서도 모든 변수에 대한 실험을 반복적으로 실행하기가 어려우므로 위에서 언급한 방법은 효과적인 방법이지 못하다 [2].

본 논문에서는 HDP-CVD 를 이용한 산화막 증착에 있어서 입력 변수와 반응 변수간의 주효과 및 교호작용의 정도를 판단하고 통계적인 기법을 활용하여 반응표면 모델을 제시하고, 공정 설계에 따른 입력변수의 중요도를 결정하고 여러 가지 반응변수를 만족할 수 있는 최적의 조건을 도출하고자 한다.

2. 실험 방법

표 1. 입력 인자의 범위

인자	범위
Top SiH_4	23 ~ 43sccm
Bottom SiH_4	10 ~ 30sccm
O_2	170 ~ 200sccm
Top RF Power	3500 ~ 4500W
Bottom RF Power	1000 ~ 1400W

본 연구에서는 HDP-CVD 를 이용한 SiO_2 박막 증착 공정에서 어떠한 요인이 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고 그 영향을 정량적으로 판단하고 유의한 영향을 미치는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 최적의 반응을 얻을 수 있는가를 알아내기 위하여 통계적인 방법을 활용하였다. 일반적으로 다섯 가지의 입력변수와 세 가지의 반응변수에 관한 포괄적인 상관관계를 규명하기 위해서는 상상할 수 없을 만큼의 많은 실험의 횟수가 요구되나 실험계획법 (design of experiment)을 활용하여 그 실험 수를 19 회로 줄일 수 있었다.

실험계획법이란 실험에 계획방법을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의 할 수 있다. 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하고 주 효과와 2 인자 교호작용만의 추정이나 검정을 할 뿐이라면, 반드시 인자의 모든 조합에서 실험을 할 필요가 없으며, 교호작용이라든가 고차의 교호작용을 구하지 않고 실험의 크기를 작게 할 수 있도록 인자의 조합 중 일부분만을 실험하는 방법으로 실험회수를 가능한 적게 하기 위해서 본 논문에서는 부분 실시법 (fractional factorial design) 을 사용하였다 [3]

주성엔지니어링의 EUREKA series 를 이용하여 현재 사용이 되고 있는 표준 recipe 를 기준으로 가스의 양과 PR power 의 비율을 고려하여 표 1 과 같은 입력의 범위를 결정하였다. 표준 recipe 를 이용하여 7,000Å의 SiO_2 박막을 증착할 수 있는 일정의 시간 동안 4 인치 실리콘 웨이퍼에 증착을 하였으며, 증착된 박막은 ellipsometer 를 이용하여 5 개의 고정된 점에 대한 증착율 (deposition rate) 과 굴절율 (refractive index) 을 측정하였으며, 측정된 증착율을 바탕으로 균일성 (within-wafer-uniformity)를 계산하였다. 표에서 제시한 변수를 모두 고려하여 전체실험을 실시할 경우 32 번의 실험이 수행되어야 하지만 실험의 수를 줄이고 효율적인 실험 결과를 얻기 위해서 2^{5-1} 의 부분 실시법을 사용하였고, 반응변수의 비선형성 (non-linearity) 과 실험의 재연성 (repeatability) 을 고려하여 3 개의 중앙값 (center point)를 추가하여 총 19 번의 실험을 수행 하였다 [4].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주 효과(Main Effect)

그림 1 의 주 효과 도면은 각각의 입력 인자가 독립적으로 얼마나 결과에 영향을 미치는지를 알아보는 그림이다. 이 도면에서 점선은 총 평균이고 각 점은 수준에서의 평균이며 실선은 각 평균을 이은 선을 의미 한다. 산소와 Bottom RF Power 는 평균치가 크게 변하지 않았기 때문에

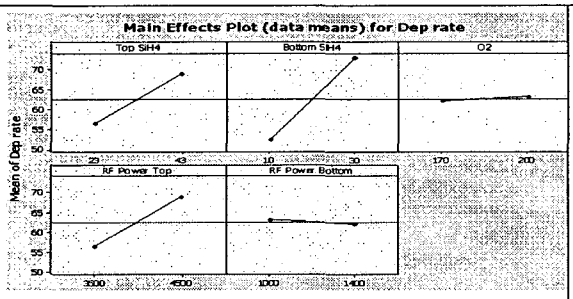

그림 1. 증착율에 대한 주 효과 도면

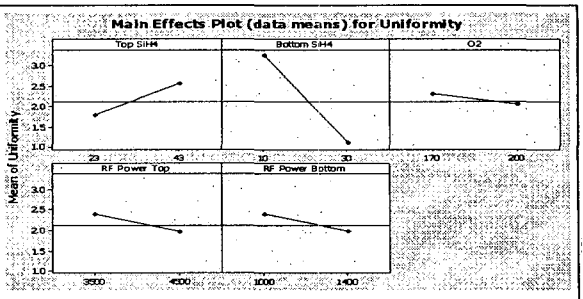

그림 2. 균일성에 대한 주 효과 도면

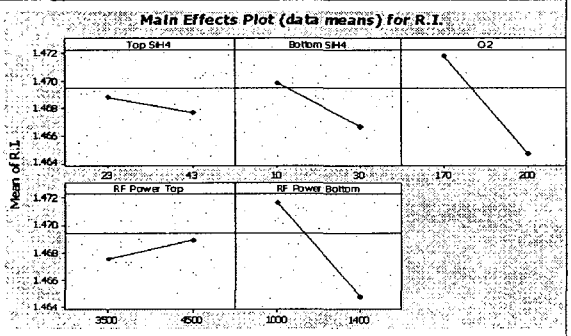

그림 3. 굴절률에 대한 주 효과 도면

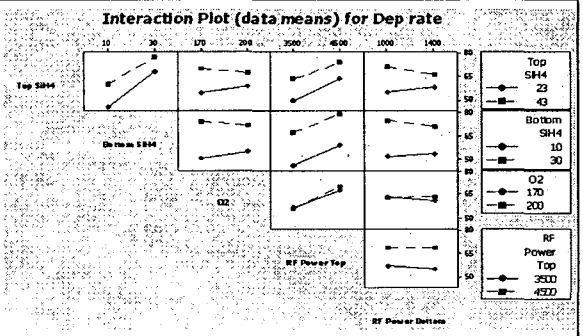

그림 4. 증착율에 대한 교호작용 효과 도면

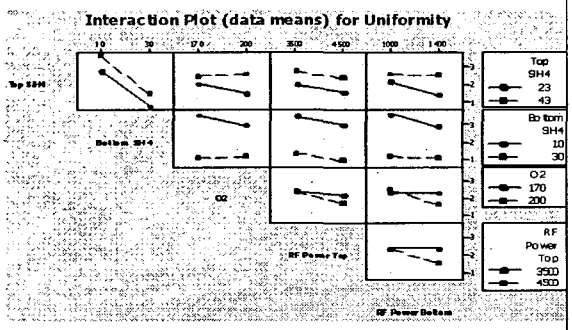

그림 5. 균일도에 대한 교호작용 효과 도면

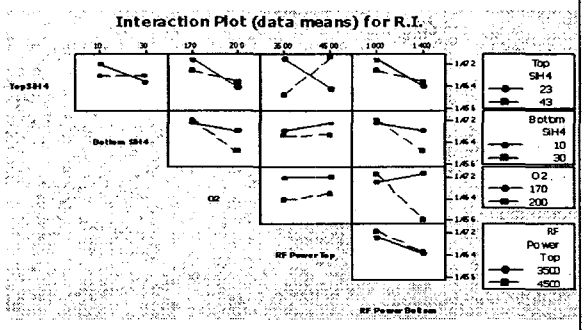

그림 6. 굴절률에 대한 교호작용 효과 도면

각각 독립적으로는 결과에 큰 영향을 주지 않았지만, 산소의 경우 교호 작용을 통해 결과를 확인 해볼 필요가 있고, Bottom RF Power 는 sputter 를 위한용도 이므로 증착율 에는 거의 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있었다. Top SiH_4, Bottom SiH_4, Top RF Power 가 결과에 더 민감하게 변화 하므로 증착율에 영향을 미치는 유의한 인자라고 해석 할 수 있다. 이는 주입해주는 SiH_4의 양이 증가 할수록, 가해주는 RF power 가 증가 할수록 해리되는 분자의 양이 증가하기 때문이다 [5].

그림 2 의 균일성에 대한 주 효과 도면을 보면 대부분의 그래프가 크게 변하지 않았고 Top SiH_4 과 Bottom SiH_4 의 평균값의 변화가 크므로 결과에 유의 하다고 판단되는데, 균일도는 Top SiH_4 과 Bottom SiH_4 의 비율에 의해 결정되기 때문이다. 그림 3 의 굴절률에 대한 주 효과 도면을 보면 산소와 Bottom RF Power, SiH_4 값의 변화율이 가장 크기 때문에 굴절률에 큰 영향을 주는 인자 이다. 여기서 Bottom RF Power 는 산소를 sputter 하기 위해서 사용되는데 이 때 산소가

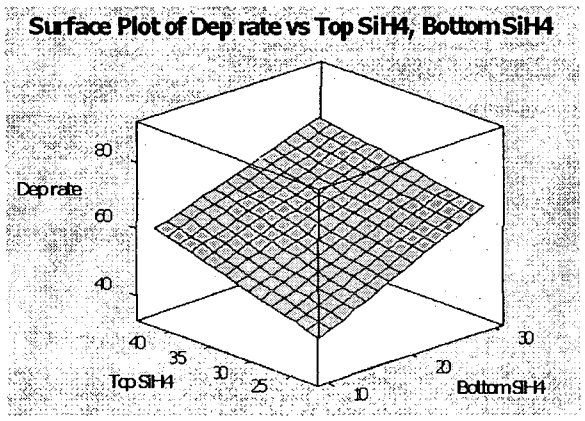

그림 7. 증착율과 Top SiH_4과 Bottom SiH_4

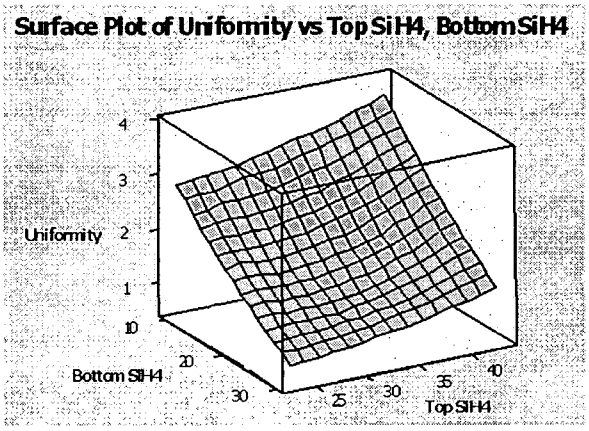

그림 8. 균일성과 Top SiH_4과 Bottom SiH_4

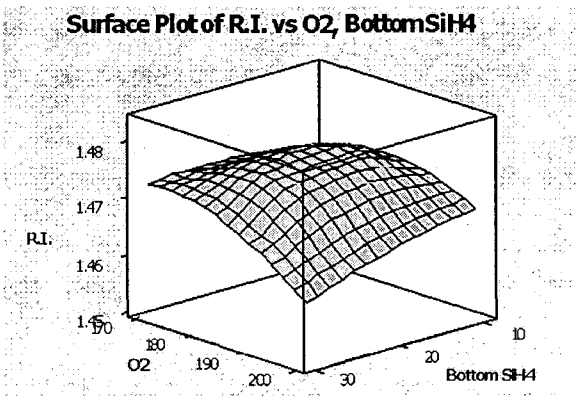

그림 9. 굴절률과 산소와 Bottom SiH_4

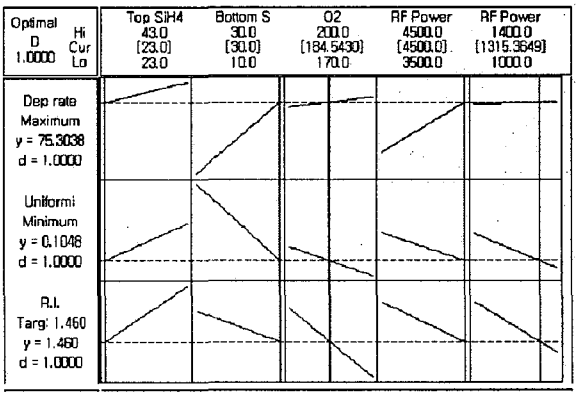

그림 10. 반응표면에 의한 최적조건

SiH_4 과 결합하면서 굴절률에 영향을 미치기 때문이다. 이상의 주 효과 그래프를 통해 SiH_4 의 양이 많을 수록, 가해주는 RF power 가 클 수록 더 나은 공정조건의 변수인 것으로 판단 할 수 있다.

3.2 교호작용 효과(Interaction Effect)

주 효과 그래프만으로는 공정변수가 막질에 어떠한 영향을 주는지 분석하기에는 다소 미흡하다. 따라서 두 개 변수에 대한 교호 작용을 통해 영향을 알아보고자 한다. 그림 4 를 보면 그림 1 에서는 별로 중요하지 않다고 판단되었던 산소와 RF Power Bottom 의 교호작용을 확인 할 수 있다. 이는 산소분자가 SiH_4 에서 해리된 분자와 결합하여 막을 형성하기 때문이다. 그림 5 에서 교호작용 효과 도면은 서로 접하는 부분이 있어야 서로 관계가 있다고 볼 수 있는데 Top SiH_4 과 Bottom SiH_4 간의 그래프가 서로 평행한 것으로 보아 그 인자간의 교호작용이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 독립적으로는 결과에 영향을 미치는 Top SiH_4 과 Bottom SiH_4 이 동시에는 큰 영향이 없다는 것을 나타낸다. 그림 3 와 그림 6 을 비교했을 때 주 효과 도면상에는 산소와 RF Power Bottom 이 가장 영향을 많이 미치는 것으로 나타났지만 교호작용을 고려했을 때 거의 대부분의 인자들이 고르게 굴절률에 영향을 주는 것으로 판단된다. 실험 결과를 가지고 인자들이 실리콘 절연막의 특성에 미치는 효과를 3-D 표면 반응 도면을 통해 알아보았다. 이러한 결과로부터 최적화된 조건을 그림 10 에 나타내었다.

4. 결론

본 실험에서는 HDPCVD 로 증착된 실리콘 산화막 형성에 있어서 SiH4 과 산소, RF Power 가 증착율과 균일성, 굴절률에 미치는 영향을 통계적인 방법을 통해서 효과적으로 정의 하였다. 실리콘 산화막 증착시 입력요인들의 상관관계들은 회귀 분석과 반응 최적화을 통해 명확하게 확인 할 수 있었다. 분석을 통해서 HDPCVD 를 이용한 실리콘 산화막 형성의 최적 조건을 확립할 수 있었고, 이러한 최적 조건을 공정능력의 향상뿐 아니라 시행착오로 인한 비용과 시간을 절약할 수 있을 것이라고 예상된다.

참고문헌

[1] A . Abdelgadir, "HDP-CVD STI oxide process with in situ post deposition laterally enhanced sputter etchback for the reduction of pattern-dependent film topography in deep submicron technologies," *IEEE Trans. Semi. Manufac.*, Vol. 19, No. 1, pp. 130-137, 2006.

[2] S. Hong, G. May and D. Park, "Neural Network Modeling of Reactive Ion Etch Using Optical Emission Spectroscopy Data," *IEEE Trans. Semi. Manufac.* Vol. 16, No. 4, pp. 598-608, 2003.

[3] 박성현, *현대실험계획법*, 민영사, 2004.

[4] 이레테크 미니텝사업팀, *새 미니탭 실무완성*, 이레테크, 2004.

[5] M. Quirk and J. Serda, *Semiconductor Manufacturing Technology*, Newyork, NY, Prentice Hall, 2004.