

직교배열표를 쓴 Remote-PECVD 산화막형성의 공정최적화 및 특성

논문
8-2-7

Optimization of Remote Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition oxide deposition process using orthogonal array table and properties

김광호*, 김제덕*, 유병곤**, 구진근**, 김경수**

(Kim Kwang-Ho, Kim Je-Deok, Yu Byung-Gon, Koo Jin-Gun, Kim Kyung-Soo)

Abstract

Optimum condition of remote plasma enhanced chemical vapor deposition using orthogonal array method was chosen. Characteristics of oxide films deposited by RPECVD with SiH_4 and N_2O gases were investigated. Etching rate of the optimized SiO_2 films in P-etchant was about 6[A/s] that was almost the same as that the high temperature thermal oxide. The films showed high dielectric breakdown field of more than 7[MV/cm] and a resistivity of $8 \times 10^{13}[\Omega\text{cm}]$ around at 7[MV/cm]. The interface trap density of SiO_2/Si interface around the midgap derived from the high frequency C-V curve was about $5 \times 10^{10}[\text{cm}^{-2}\text{eV}]$. It was observed that the dielectric constant of the optimized SiO_2 film was 4.29.

Key Words(중요용어) : Orthogonal array table(직교배열표), Remote-PECVD(리모트-PECVD), Silicon dioxide(실리콘 산화막), Intermetal dielectric(층간절연막), Optimization of deposition process(퇴적공정의 최적화).

1. 서 론

반도체회로의 고집적화, 고속화가 진행되면서 ULSI(Ultra Large Scale Integration) 소자에서는 다층배선기술에 양호한 층간절연막이 요구가 되고 있다. 절연막을 형성시키는 CVD법으로는 열CVD법, 플라즈마CVD법, 광CVD법 등 여러가지 방법이 있으며¹⁾ 필요에 따라 목적에 맞도록 CVD법을 선택하여 공정에 도입하고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 층간절연막은 500°C이하의 저온 공정이 필요하므로 플라즈마에 의한 SiO_2 산화막이며 점점 더 제반 특성이 양호한 막이 요구되고 있다. 종래의 O_2 direct PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)는 실리콘 웨이퍼가 직접 플라즈마 방전 영역에 노출되기 때문에 damage로 인해 막의 특성이 열화된다.

본 연구에서는 좀 더 damage가 적고 층간 절연막으로 이용하기 양호한 특성을 갖는 SiO_2 산화막을 형성하고자 플라즈마 생성 영역과 기판위에서의 반응 영역을 분리시켜서 박막을 형성하는 remote PECVD(RPECVD)²⁾ 장비를 국내에서 제작하여 가장 경제적으로 최적의 성장조건을 찾기 위해 직교배열표(orthogonal array table)³⁾를 써서 실험을 수행하여 형성된 산화막의 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 장비의 반응실 구조를 그림 1에 보인다. 최근에 국내에서 제작한 이 RPECVD 시스템은 반응실과 준비실로 구성되어 있고 유지할 수 있는 반응실의 베이스 진공도는 5×10^{-8} [Torr]이하이다. RF는 13.56[MHz]의 유도형을 사용하고 있고 공급전력은 1[kW]까지 사용 가능하다. 원료 가스인 SiH_4 은 샤워링을 통하여 도입이 되고, 플라즈마 생성을 위한 가스는 N_2O 가스를 사용하였다. 기관 가열기구는 저항가열식이며 상하

* : 청주대학교 반도체공학과
** : 한국전자통신연구소 반도체연구단
접수일자 : 1994년 12월 3일
심사완료 : 1995년 1월 16일

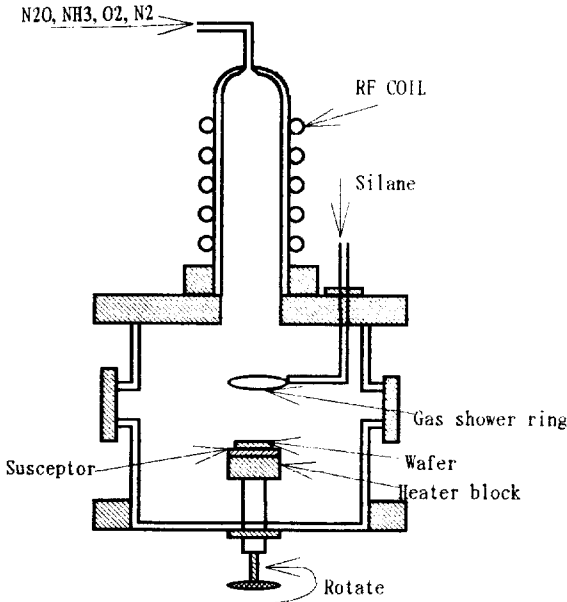


그림 1. Remote-PECVD 시스템의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the Remote-PECVD system.

로 조절 가능하며 샤워링 및 플라즈마와의 간격을 조절할 수 있다. 반응가스의 유량은 MFC에 의하여 조절된다.

기판은 저항율이 1~10[Ωcm]인 p-type Si(100)를 사용하였다. 웨이퍼는 유기세정후 통상적인 RCA법⁴⁾을 사용하여 세척하였다. 준비된 웨이퍼는 susceptor 위에 올려 놓아져 준비실을 거쳐 반응실로 도입하여 가열기구위에 올려놓고 이하의 여러 조건에서 실험을 수행하였다.

일반적으로 퇴적속도는 압력이 낮을수록 빠르는데, 본 실험에서는 장치의 배기능력 등을 감안하고, 또한, 가능한 한 퇴적속도를 높이기 위해 0.1[Torr]로 고정시켰다. 실험조건 범위의 범위 및 내부 부품간 위치는 다음과 같다.

- (a) RF power(Watts) ; 50 - 250
- (b) 기판온도(℃) ; 300 - 400
- (c) SiH₄ gas flow(SCCM) ; 5 - 15
- (d) N₂O gas flow(SCCM) ; 100 - 200
- (e) reactor pressure(Torr) ; 0.1
- (f) heater와 shower ring간의 간격 ; 50mm
- (g) shower ring과 plasma 발생원간의 간격 ; 60mm

본 실험에서는 우선 최적의 성막조건을 찾기 위해 직교배열표를 이용하여 퇴적 실험을 수행 분석

하였다. 본 실험에서 이용한 제어인자 및 수준은 표 1과 같고, 각 인자의 배치 및 실험순서는 L₉(3⁴)인 직교배열표를 이용하였다. 표 2에 각 인자의 직교배열표에의 배치 및 실험순서를 보인다. 형성된 산화막의 전기적인 특성은 I-V측정과 C-V측정으로 수행하였으며, 물성적인 분석은 ESCA에 의하여 수행하였다. 실험에서의 특성값으로 유전율, etch rate, 퇴적속도, 굴절율 등을 측정하여 평가하였다. 퇴적속도 및 굴절율은 20mm×20mm의 기판의 5군데를 ellipsometer로 두께를 측정한 평균값으로 분석하였다. 특히, 유전율의 산출은 정확을 기하기 위하여 다음과 같이 평가하였다. 즉, 동일한 커패시터에 직경이 각각 200μm, 400μm 및 800μm

표 1. 제어인자 및 수준(인자 : 4, 수준 : 3)
Table 1. control factors and levels (factors : 4, levels : 3).

No.	제어인자	수준			비고
		1	2	3	
A	RF power(Watts)	50	150	250	P: 0.1 Torr
B	Sub. temp.(℃)	300	350	400	
C	SiH ₄ flow(SCCM)	5	10	15	
D	N ₂ O flow(SCCM)	100	150	200	

표 2. 각 인자의 직교배열표에의 배치 및 실험순서

Table 2. Assignment to orthogonal array of factors and experiment procedure.

회수	표시	조건			
		RF PWR	Sub temp	SiH ₄	N ₂ O
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	50	300	5	100
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	50	350	10	150
3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	50	400	15	200
4	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	150	300	10	200
5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	150	350	15	100
6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	150	400	5	150
7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	250	300	15	150
8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	250	350	5	200
9	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	250	400	10	100

인 면적을 갖는 3종류를 퇴적시켜 각 면적에 대하여 5개의 측정점의 커패시턴스를 측정한 평균값을 구하였다. 그 후, X축을 면적으로 잡고 Y축을 커패시턴스의 평균값으로 잡아 그 기울기(즉, dC/

dA)를 이용하여 유전율을 산출하였다(즉, $\epsilon_i = (d/\epsilon_0)(dC/dA)$). 또한, etch rate의 측정은 RPECVD 실험을 행한 Hattangady등의 결과⁵⁾와 비교하기 위하여 그 때에 사용한 etchant와 동일한 용액인 P-etchant(5:10:300=HF(49%):HNO₃(70%):(H₂O)를 사용하여 etching 전후의 두께를 측정하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에 기판온도에 따른 퇴적속도의 변화관계를 보인다. 그림에서 보듯, 기판온도가 상승하면 퇴적속도는 떨어진다. 이는 일반적인 direct PECVD의 경향과 일치한다. 한편, 그림 3에 보인 RF power에 따른 퇴적속도의 관계는 power가 높을수록 퇴적속도가 상승함을 알 수 있었다.

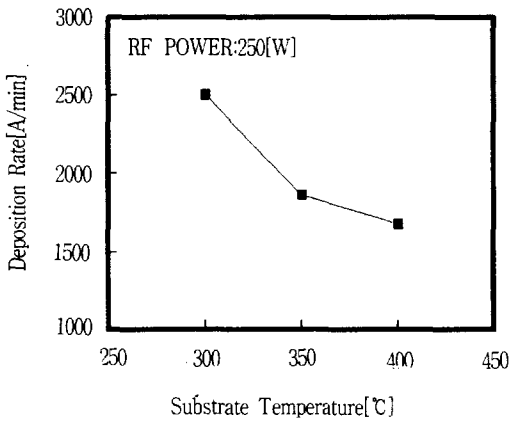


그림 2. 기판온도에 따른 Si 산화막 퇴적속도의 변화

Fig. 2. Oxide deposition rate dependance of the substrate temperature variation.

공정의 최적조건 선정은 아홉번 실행한 데이터를 토대로 분산분석(ANOVA)을 행하여 최적조건을 구하는 것이 일반적인 방법이지만, 본 실험에서는 막이 형성되지 않는 영역이 있었으므로 분산분석은 행할 수 없었다. 따라서, 유전율, etch rate 등과 같은 얻어진 특성값에 대하여서 최적값을 선정하였다. 여기서 최적값은 유전율, etch rate 등의 특성값들이 열산화막에 가장 근접하는 값으로 잡았다. 그 결과 RF Power 150[W], 기판온도 400 [°C], SiH₄ 5[sccm], N₂O 150[sccm]인 제 6번째 실험의 조건이 아홉번의 실험중에서 가장 열산화막에 접근하는 특성을 보였다. 한편, 더 세밀한 조건

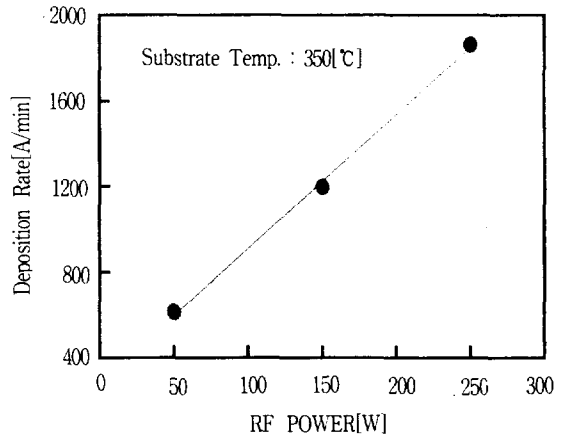


그림 3. RF power에 따른 SiO₂ 산화막 퇴적속도의 변화

Fig. 3. Oxide deposition rate dependance of the RF power variation at substrate temperature of 350°C.

을 찾기 위해 앞서의 제 6번째 조건의 각 제어인자를 그 전후의 값에서 가변시켜 실험을 수행한 결과에서도 비슷한 결과가 얻어졌다. 이하에서는 제 6번째 실험의 평가결과를 논의한다.

그림 4에 전류밀도와 전계의 관계로 나타난 I-V 특성을 보인다. 이 I-V특성은 축적영역인 상태에서 바이어스시킨 경우(즉, 전극에 마이너스 전압인가)에 측정된 것이다. breakdown field를 전류밀

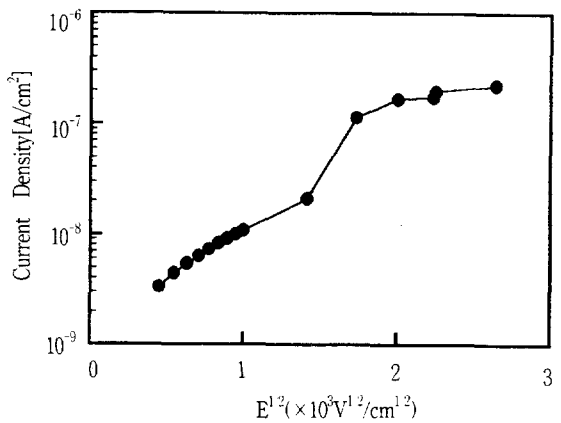


그림 4. 전계와 전류밀도로 표시한 SiO₂ 산화막의 I-V특성

Fig. 4. Current-Voltage characteristics denoted by current density and electric field of a MOS capacitor biased at accumulation state.

도가 $1[\mu A/cm^2]$ 인 점으로 정의할 때, $7[MV/cm]$ 이상에서도 breakdown이 일어나지 않은 좋은 전기적인 특성을 보여주고 있다. $7[MV/cm]$ 부근에서의 막의 저항율은 $8 \times 10^{13}[\Omega cm]$ 이상이였다. 이 그림에서 보면 낮은 전계에서와 높은 전계에서 막의 전도 메카니즘이 틀림을 알 수 있다. 낮은 전계에서는 ohmic이 지배적이며 높은 전계에서는 Frenkel-Poole emission이 지배적이라고 판단하고 있으나 온도변화에 의한 전류의 변화를 측정하는 등 계속 검토중에 있다.

그림 5에 $1[MHz]$ C-V특성을 보인다. 이 시료의 기판농도는 $6.25 \times 10^{15}[cm^{-3}]$, 막의 두께는 $129[nm]$, 전극의 면적은 $3.14 \times 10^{-4}[cm^2]$ 이다. C-V곡선이 축적영역에서 반전영역까지 변화하고 있으며 축적영역으로 부터 산출한 비유전율은 4.29이다. 이 값은 열산화막에서 얻어지는 3.9보다는 약간 높으나 비교적 낮은 값의 비유전율이며, 종래의 CVD법으로 생성된 박막의 결과에 비하면 우수한 것이다. 한편, 형성된 막의 C-V곡선은 대부분 그림 5에서 보는 것처럼 threshold 전압이 마이너스쪽으로 shift되어있다. 이 현상은 성막중에 형성된 막과 계면부근에 존재하는 전하들에 기인한 것으로 판단되며 세밀한 주의에 의해 감소하리라고 사료된다.

그림 6에 $1[MHz]$ C-V 곡선으로 부터 산출한 Si 에너지갭내의 계면준위 밀도를 보인다. U자 형태를 나타내는 전형적인 결과를 보이고 있으며

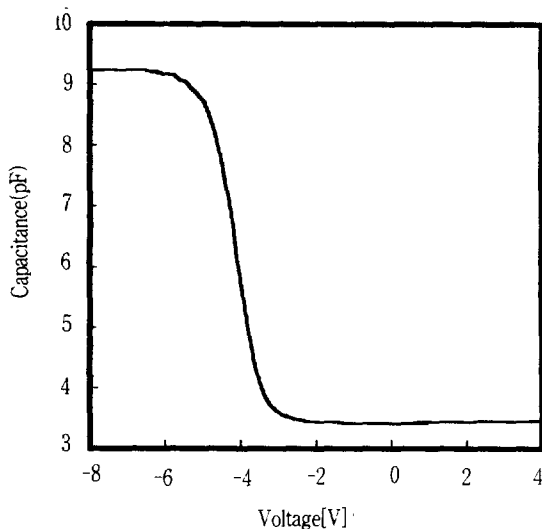


그림 5. MOS 커패시터의 1 MHz C-V특성
Fig. 5. 1 MHz C-V characteristics of a MOS capacitor.

midgap 부근에서 $5 \times 10^{10}[cm^{-2}eV]$ 정도의 준위밀도가 얻어지는 상당히 양호한 계면특성임을 알 수 있다.

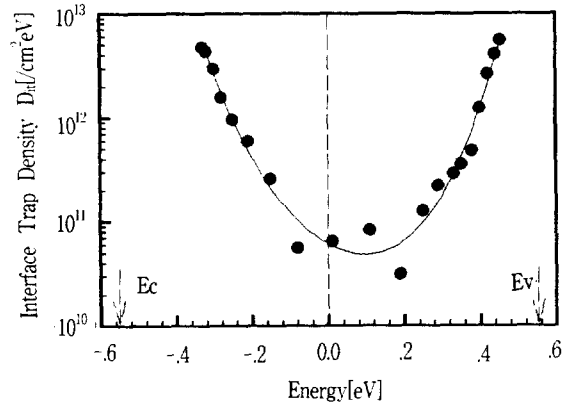


그림 6. C-V곡선으로 부터 구한 Si 에너지갭내의 계면준위 밀도
Fig. 6. Interface state density D_{it} within the Si bandgap obtained by using high frequency method from the curve of Fig. 5.

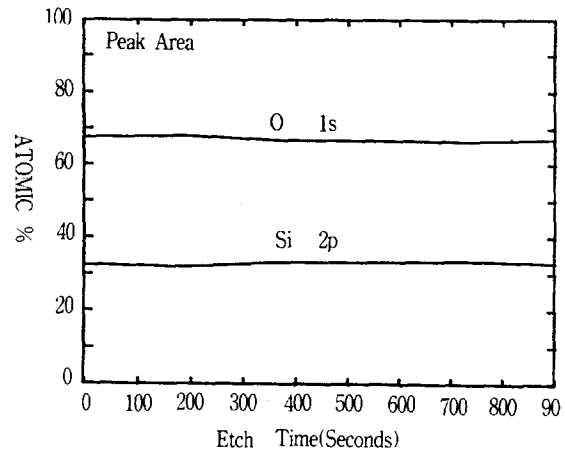


그림 7. RPCVD 산화막의 ESCA depth profile
Fig. 7. ESCA depth profile of the RPECVD oxide film.

그림 7에 ESCA depth profile의 결과를 보인다. $25[A/min]$ 의 식각율로써 표면을 1분정도 etch시킨 후 depth profile을 측정한 결과로서 박막의 조성비 $Si:O=33:67$ 로 거의 1:2의 비를 일정하게 유지하는 것으로 보아 고온 열산화막과 거의 같은 조성을 갖는 산화막인 것임을 알 수 있다.

한편, P-etchant에 의한 etch rate는 6[A/s]로 확인하고 있으며, RPECVD에 의한 Hattangady등의 결과⁵⁾와 거의 동등하며, 고온 열산화막(약 2[A/s]의 etch rate)에 거의 접근하는 특성을 보였다.

4. 결 론

다층배선 기술의 층간절연막에 사용가능한 SiO₂ 산화막을 SiH₄와 N₂O 반응가스를 사용한 RPECVD법으로 제작하였다. 퇴적조건인 최적조건은 직교배열법에 의해 최적화 할 수 있었으며, 실험기간을 단축시킬 수 있는등 경제적으로 실험을 수행하였다. 최적조건에서 퇴적된 SiO₂ 산화막은 etch rate가 P-etchant를 사용하였을 때 6[A/s]정도로 고온의 열산화막에 거의 근접하는 특성이었고, breakdown field도 7[MV/cm]이상이며 계면준위밀도는 midgap 부근에서 5×10¹⁰[cm⁻²eV] 정도로 양호한 특성을 보이고 있다. 또한 비유전율도 4.29로 비교적 낮은 값을 얻을 수 있었다.

※ 본 논문은 한국전자통신연구소에서 수행하는 1994년도 반도체관련 "공용 Foundry 기술사업"중 "절연막 기술개발" 위탁과제 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. 日本化學工學會 編集, CVD Handbook, 朝倉書店, pp. 2-60, 1991.
2. G. Lucovsky and D. V. Tsu, "Plasma enhanced chemical vapor deposition: Differences between direct and remote plasma excitation", J. Vac. Sci. Technol., A5(4), pp. 2231-2238, Jul/Aug 1987.
3. 田口玄一, 實驗計劃法, 丸善, 6章, 1992.
4. W. Kern and D. A. Poutinen, "Cleaning Solutions Based on Hydrogen Peroxide for use in Silicon Semiconductor Technology", RCA Review, pp. 187-206, June 1970.
5. S. V. Hattangady, R. G. Alley, G. G. Fountain, R. J. Markunas, G. Lucovsky, and D. Temple, "Effect of rf power on remote-plasma deposited SiO₂ films", J. Appl. Phys., 73(11), pp. 7635-7642, June 1993.

저자소개



김광호

1983년 한양대학교 전자공학과(학사). 1984년-1990년 일본 문부성 초청 연구원. 1985년-1987년 일본 동경공업대학 전자시스템(석사). 1987년-1990년 동경공업대학 대학원 전자시스템(박사). 1994년 일본 학술진흥재단 초청 동경공업대학 객원연구원. 1990년-현재 청주대학교 반도체공학과 조교수.



유병곤

1984년 경북대학교 자연과학대학 물리학과 졸업. 1984년-85년 일본 동경공업대학 원자핵공학과 연구생. 1985년-1990년 일본 동경공업대학 원자핵공학과 핵물리학 전공(공박). 1990년-1991년 일본 히타찌(Hitachi)중앙연구소 연구원. 1991년-현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 선임연구원.

구진근



1980년 경북대학교 공대 전자공학과 졸업. 1990년 경북대학교 산업대학 졸업. 1980년-1986년 한국전자기술연구소 선임연구원. 1987년-현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 미세구조연구실 실장

김제덕



1994년 청주대학교 반도체공학과 졸업(학사). 1994년-현재 청주대학교 전자공학과 대학원 재학중.

김경수



현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 주문형반도체 개발센터장.