

얇은 절연막의 TDDB 분석과 전기적 특성

박 찬 원* 김 복 현**

TDDB Analysis and Electrical Characteristics of Thin Insulator Films

Chanwon - Park* Bokheon - Kim**

Abstract

In this paper, the characteristics of electrical breakdown and TDDB (Time Dependant Dielectric Breakdown) were studied to evaluate stability and reliability of thin insulator films such as oxide and nitride.

As the oxide film thickness decreased, the electrical breakdown field was increased proportioning to its reverse square root, $d^{-\frac{1}{2}}$. As for the temperature dependance of breakdown field, its field was inclined to decrease as temperature increased. It also showed that oxide charge (Q_{ss}) was changed by stress field and stress time.

Consequently, TDDB characteristics and breakdown mechanism proved the improvement of reliability and stability and provided the accurate analysis to predict a device life time.

1. 서 론

오늘날 VLSI시대를 맞이하여 IC의 미세화에 따른 접적도가 증가함에 따라 소자 구조 파라미터중 얇은 표면 보호막이 절실히 요구되고 있으나, SiO_2 의 박막화의 경우 구조적인 문제를 위시하여 High Field Instability, 전기적 Stress에 의한결함발생, 박막화에 따른 전극과의 반응, 절연파괴현상^{1,2)} 및 TDDB (Time Dependent Dielectric Break-down)³⁾ 현상등의 특성 열화요인이 내포되고

있다.

이러한 단점을 해결하기 위하여 PECVD에 의한 SiN 막⁴⁾이나 산화막을 암모니아를 이용하여 열질화시킨 SiO_xN_y (일명 Nitroxide) 막⁵⁾을 소자의 층간절연막이나 표면보호막등에 이용하려는 연구가 진행되고 있으나 이들 막으로 산화막을 대신하여 실용화하기 위하여는 많은 연구노력이 기울여져야 할 것이다.

현재 이들 막의 전기적 특성과 절연파괴 현상 및 TDDB 특성 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이들막의 절연파괴 특성은 소

* 공과대학 전기공학과 조교수

** 전기공학과 대학원생

자의 점적화와 미세화 추세에 있어서 초고집적 소자의 신뢰도와 안정도의 향상에 있어 제한적인 요소로 작용하여 절연내구력의 향상과 안정화는 고신뢰성, 고안정도 소자 제작의 필수불가결한 요소가 되고 있으나 이러한 절연파괴 메카니즘에 대한 실험적인 결과가 다양하여 이에 대한 정설이 없는 실정이다. 또한 TDDB 특성은 소자의 신뢰도 향상과 사용수명예측에 있어 중요한 수단으로 각광받고 있으나 실험방법과 정량적인 해석 등에서 많은 차이가 있어 절연파괴 기구에 대한 TDDB 특성의 정량적이고 통일적인 해석방법의 확립이 시급한 과제이다.

더우기 이 방면에 대한 대부분의 연구마저도 실리콘 산화막(SiO_2)에 대하여만 집중되어 있어 Plasma Enhanced CVD에 의한 질화막(SiN)과 Nitroxide 막 등의 절연막에 대한 이 방면의 연구는 국내외적으로 대단히 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 SiO_2 , SiN , Nitroxide 막 등의 각종 절연막에 대한 TDDB 특성과 절연파괴 기구에 관한 연구로서 소자의 신뢰도 및 안정도의 향상과 소자수명 예측에 대한 정확한 해석을 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

1) 시 료

1) Starting Wafer : P형 및 N형 Si wafer, $\langle 100 \rangle$, 비저항 $5-25 \Omega \cdot \text{cm}$

2) 세척 : Standard Cleaning Method

3) 퇴적조건

(1) SiO_2 막 : 상기 wafer를 1000°C , dry O_2 분위기에서 열산화 \langle 유량 $1 \ell / \text{min} \rangle$ 시킨후 1000°C N_2 분위기에서 20분간 annealing, SiO_2 막 두께는 $30-700 \text{ \AA}$

(2) SiN 막 : 기판온도 300°C , $\text{SiH}_4 / \text{N}_2$ flow rate 0.01, RF Power 250 W, chamber 압력 1 torr, SiN 막 두께는 $500-$

2000 \AA

(3) Nitroxide 막 상기 조건에서 형성된 산화막을 $1000-1100^\circ\text{C}$, 온도에서 $15 \sim 60$ 분간 NH_3 분위기 \langle 유량 $1 \ell / \text{min} \rangle$ 에서 열질화 Nitroxide 두께는 $100-500 \text{ \AA}$

(4) 전극 직경 1 mm , 1.5 mm , 2 mm Al 원형전극, 전기전도 및 절연파괴용 시료는 guard ring 부착

2) 부 착

1) I-V 특성 측정

2) 절연파괴 전압 측정

ramp rate 4 V/sec 의 ramp 전압을 인가하여 절연파괴시 peak detector에 검출된 전압을 DVM으로 측정

3) TDDB 특성 측정

$4.5, 6 \text{ MV/cm}$ 의 정전계를 인가하여 time to breakdown (t_{BD}) 측정

4) 고주파 C-V 측정

5) 상기 시료들의 B-T 처리 효과 측정

3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 각각의 방법으로 형성시킨 산화막, 질화막 등의 각종 절연막에 대한 절연파괴 및 TDDB 특성을 실험하여 이 결과로부터 각 절연막의 사용수명 예측을 위한 각종 변수를 추출하고 이들의 $\pm B-T$ stress 효과 등의 실험으로부터 절연파괴기구에 대한 고찰을 하였다.

그림 1은 절연파괴 및 TDDB 측정을 위한 장치의 개략도이다. 절연파괴 전계의 측정은 ramp rate가 약 4 V/sec 인 ramp 전압을 인가하여 전압계의 전압이 급강하하는 순간의 전압을 peak detector로 holding 측정하였다.

TDDB 측정은 정전압 stress 인가후에 소자가 파괴되는 순간까지의 시간 (t_{BD})을 측정하였다.

한편 B-T 처리와 고주파 C-V 측정을 위한 실험장치의 개략도는 그림 2 와 같다. 그림 3 은

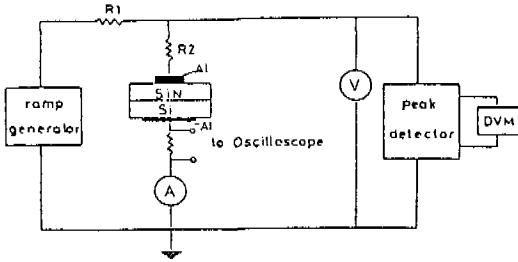


Fig.1. Block diagram of an apparatus for breakdown characteristics .

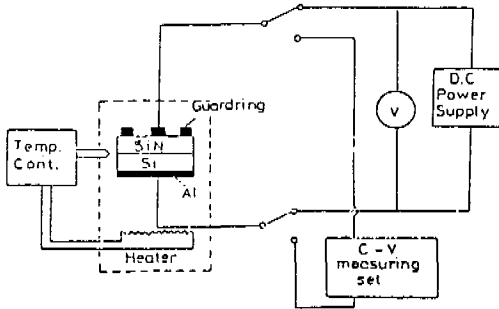


Fig.2. Schematic diagram for measuring the C-V curve with B-T stress.

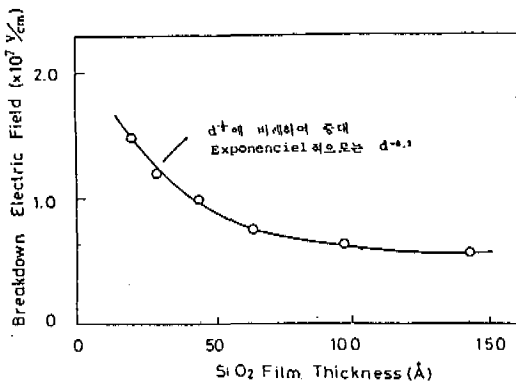


Fig.3. Relation between breakdown field to oxide thickness.

산화막의 막두께 변화에 따른 절연파괴전계의 변화를 나타내는데 절연막의 막두께가 감소할수록 절연파괴 전계는 $d^{-1/2}$ 에 비례하여 증가함을 알 수 있으며 이로부터 막이 박막화 될수록 defect density가 감소하여 절연파괴가 10 MV/cm를 넘는 Intrinsic Breakdown으로 Breakdown Mode가 옮겨감을 알 수 있다.⁶⁾

그림 4는 산화막의 절연파괴율의 두께 의존성을 나타낸 그림으로 각각 1, 5, 6 MV/cm의 전계를 가했을 경우 전체 측정 시료중 파괴된 시료의 백분율을 나타내며 막두께가 감소할수록 같은 전계치에서 파괴되는 확율은 적어지는데 이는 절연막내의 defect수의 감소에 기인하는 것으로 사료되며 1 MV/cm의 전계에 의한 절연파괴율은 막두께의 증가에 대해 거의 직선적으로 증가하나 5, 6 MV/cm의 전계치에서는 그 파괴율의 증가가 막두께가 증가할수록 둔화되는 양상을 나타내 이로부터 절연막의 두께증가에 따라 defect가 전체적으로 증가하는 것이 아니라 defect의 종류에 따라 그 증가양상이 다름을 알 수 있다.

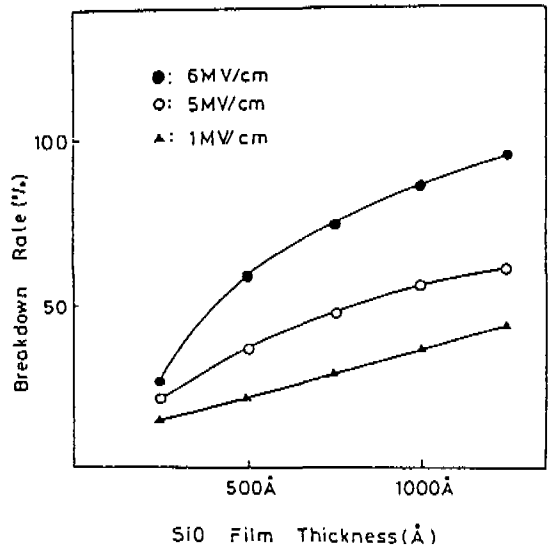


Fig.4. Relation between breakdown rate to SiO₂ film thickness.

그림 5는 산화막의 절연파괴 전계의 막두께 의존성을 나타낸 그림으로 이 그림은 final breakdown뿐만 아니라 initial breakdown의 두께 의존성을 나타내며 initial breakdown field 역시 막두께의 증가에 따라 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.⁷⁾ 산화막의 절연파괴 전압의 histogram을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯 본실험에서 제작한 산화막의 절연파괴분포 7 - 8 MV/cm의 전계치에 집중하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 그림 6의 histogram을 Weibull 분포⁸⁾의 누적파괴 확률과 전계와의 관계로 Weibull paper 상에 도시하였으며 Weibull plot 상에 직선관계를 나타냄을 알 수 있어 산화막의 breakdown histogram은 Weibull 통계 해석법을 적용할 수 있음을 알 수 있다. 막두께비의 증가에 따른 절연파괴 전계 저하율을 그림 8에 나타내었다. 이는 두께의 증가분 즉 d/d_0 (d : 막두께, d_0 : 기준막두께)에 따른 절연파괴 전계의 저하율 E_B/E_{B0} (E_B : 절연파괴 전계, E_{B0} : 기준절연파괴 전계)의 관계를 $\log d/d_0$ vs. $\log E_B/E_{B0}$ 의 관계로 plot하였다. 그림에서 보듯

막두께비의 증가에 따라 절연파괴 저하율이 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 그

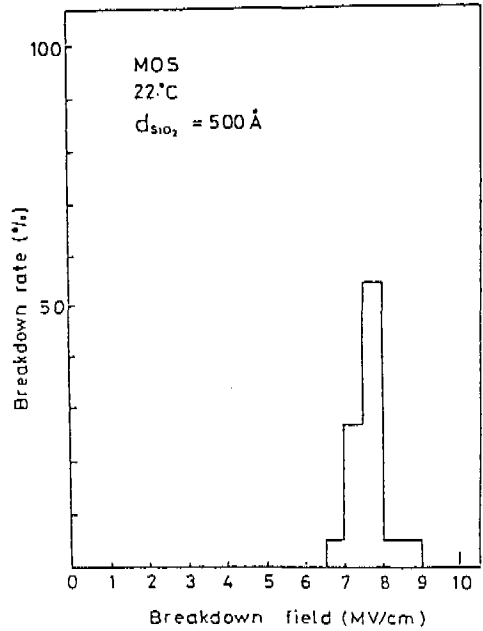


Fig.6. Histogram of breakdown field of the SiO₂ film.

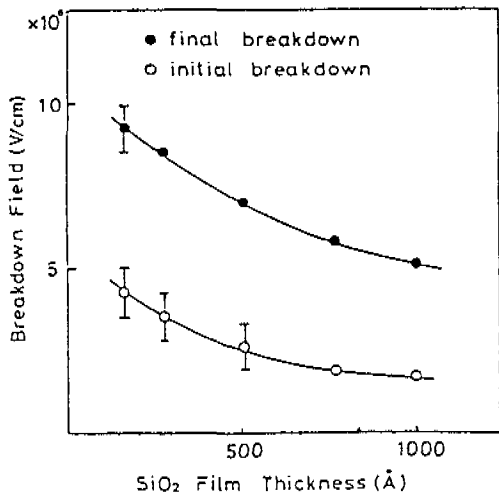


Fig.5. Relation between breakdown field to SiO₂ film thickness.

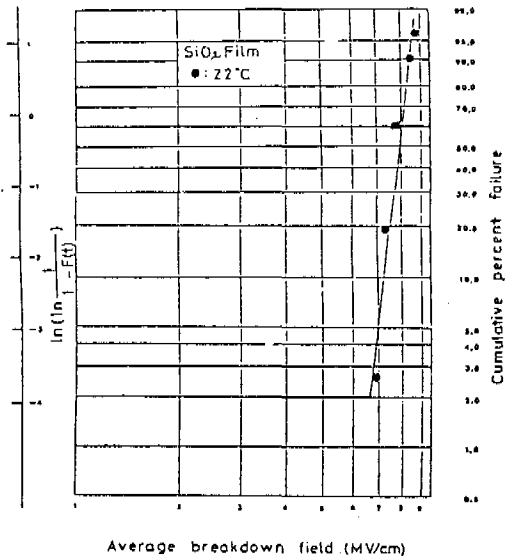


Fig.7. Weibull distribution of average breakdown field (SiO₂).

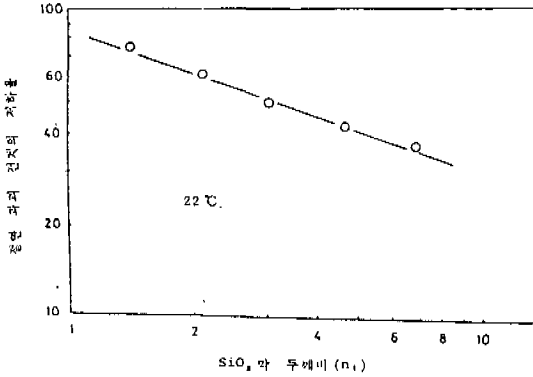


Fig.8. Thickness dependence of the SiO₂ film to breakdown.

림 5, 6, 7, 8. 또한 절화막의 stress 전계에 대한 time to breakdown (t_{BD})을 온도에 따라서 그림 9에 나타내었다. 한편 산화막의 stress에 대한 안정성을 평가하고 이로부터 TDDB 특성의 파괴기구를 고찰하기 위하여 일정기간동안 각각 다른 전계하에서의 BT처리에 따른 고주파 C-V곡선과 일정조건에서 처리시간을 변화시키며 측정된 고주파 C-V곡선의 변화양상을 각각 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 그림에서 처리전계 및 처리시간의 증가에 따라 C-V곡선은 좌측으로 편이하며 이로부터 B-T 처리시간의 증가에 따라 산화막내의 부가적인 정전하가 형성되고 있음을 알 수 있고 이러한 정전하의 축적현상이 실리콘 기판으로부터 주입된 hole의 trapping 때문인지 혹은 높은 온도에서 여기된 계면부근의 약한 결합의 파괴라는 impact ionization에 의한 정전하의 형성인지 혹은 이 두 가지 모두에 의한 복합적인 효과인지는 명확치 않으나^{9,10)} 그림 12와 그림 13에서와 같이 절연막 내 전하 (Q_{ss})의 처리전계 및 처리시간에 따른 변화양상을 고찰하여 보면 그림에서 보듯 처리전계의 증가에 대하여 절연막내 전하의 변화량 (ΔQ_{ss})은 거의 직선으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 고전계에서의 고에너지 이온에

의한 새로운 trap site의 발생으로 설명하는 것이 타당하게 여겨진다. 이것은 같은 전계하에서 처리시간의 증가에 따라 ΔQ_{ss} 의 증가양상이 초기에는 급격히 변화되나 처리시간의 증가에 따라 그 증가양상이 완만하게 변화함을 알 수 있고 이는 초기에는 절연막내의 채워지지 않은 비어있는 trap에의 trapping과정에서의 높은 trap율에 따른 것으로 사료되며 처리시간의 증가에 따라 이러한 trap site는 채워지고 포화되며 새로운 trap이

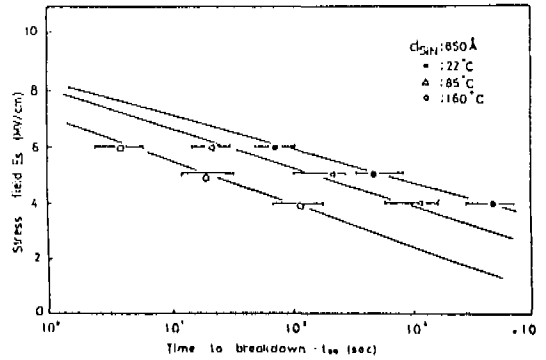


Fig.9. Relation between stress field(E_s) to t_{BD} as a function of temperature

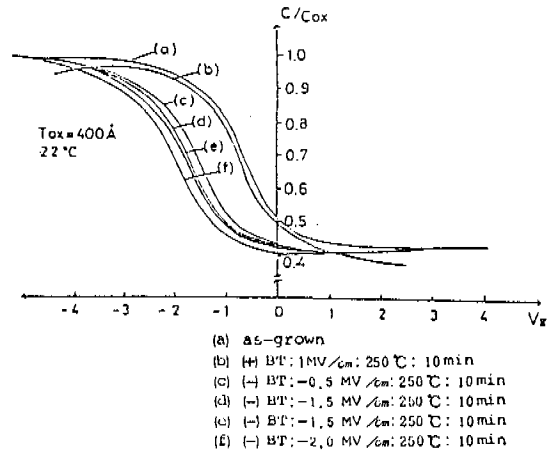


Fig.10. 1MHz C-V curve for SiO₂ films after (±) B-T stress.

발생되는 양만큼의 hole밖에는 trap되지 못하는 결과로 생각되어 진다. 이로부터 산화막의 절연막내의 정전하 축적에 의한 내부전계 증가에 의한 함을 알 수 있다.

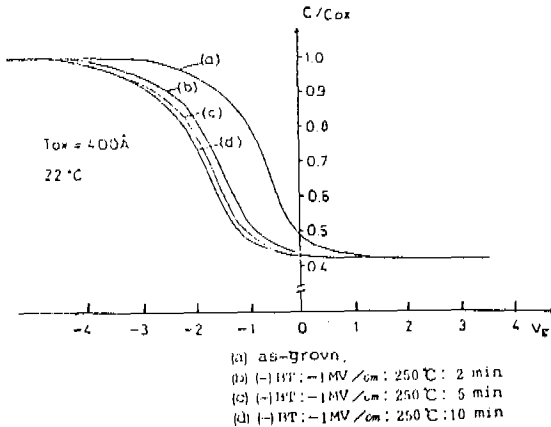


Fig. 11. 1MHz C-V curves for SiO₂ films after (-) B-T stress.

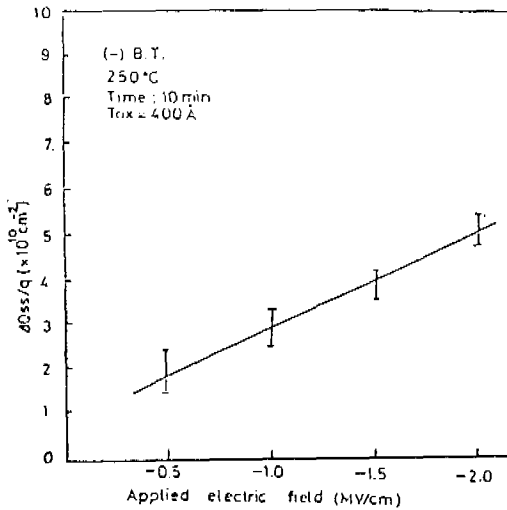


Fig. 12. Relation between oxide charge (ΔQ_{ss}) to applied electric field.

한편 최근 산화막의 대체 절연막으로서 연구가 진행중인 SiN막의 절연 내구력 특성을 평가하기 위하여 breakdown 및 TDDB 특성 측

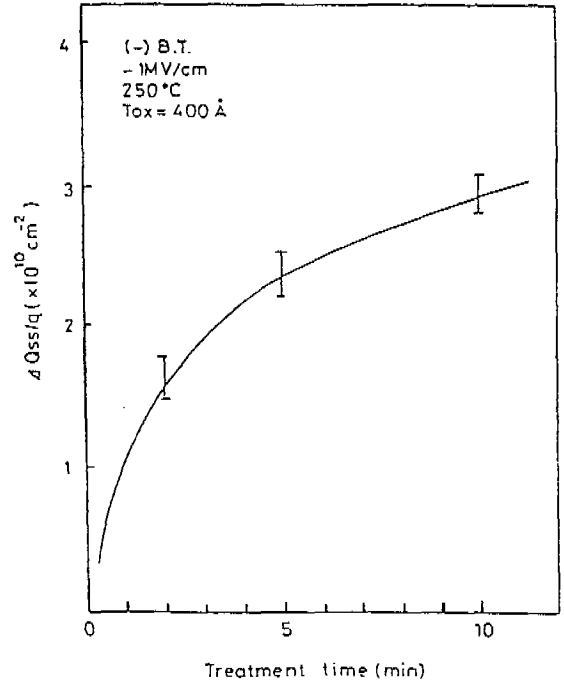


Fig. 13. Relation between oxide charge (ΔQ_{ss}) to (-) B-T stress time.

정을 행하였다. 그림 14는 그림 15의 SiN막의 breakdown field의 histogram을 Weibull 분포로 나타낸 그림이다. 그림에서 온도의 증가에 따라 절연 파괴 전계가 감소함을 알 수 있으며 이는 질화막의 절연 파괴가 약한 결함의 파괴에 의한 것으로 생각되며 이러한 결함들이 열에너지에 의해 여기되어 보다 적은 에너지를 가진 전자에 의해 결함이 파괴되기 때문으로 생각되어 진다.

그림 14에서 절연 파괴 histogram의 Weibull 분포가 직선 관계에서 벗어나는 것을 알 수 있으며 이러한 경우 기존의 Weibull 통계의 적용이 어려워진다. 따라서 측정 data의 dispersion에 의한 요소를 고려한 새로운 Weibull 통계 모델이 결정되어야 한다.

그림 16은 각각 다른 정전계 stress하에서의 TDDB 특성을 누적 파괴율 vs. t_{BD} 의 관계로 나타내었다. 전계의 증가에 따라 t_{BD} 가

지수함수적으로 감소함을 알 수 있으며 이 그림에서 누적파괴율이 50%인 점의 t_{BD} 를 각각의 전계에서 구하여 그림 17에 전계 E VS. $\log t_{BD}$ 의 plot으로 나타내었다. 이로부터 TDDB의 전계가속계수 r 를 그림의 slope로부터 구할 수 있으며 본 실험에서의 $r=0.9$ (cm/MV)를 얻었다. 이는 stress 전계가 $1 MV/cm$ 증가함에 따라 t_{BD} 는 $10^{-0.9}$ 씩 감소함을 의미하며 이로부터 정규동작 조건에서의 소자의 사용수명간을 전계를 더욱 크게한 가속 시험방법으로 짧은 시간에도 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

산화막, 질화막 등의 절연막에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 절연파괴 특성과 TDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown) 특성을 고찰하였다. 산화막의 경우 막두께가 감소할수록 절연파괴 전계는 d^{-2} 에 비례하여 증감함을 알 수 있고 절연파괴 전계의 온도의존성은 온도가 증가할수록 절연파괴 전계가 낮아지는 경향이 있다. 또 절연막내 전하 (Q_{ss})의 처리전계 및 처리 시간에 따른 변화양상을 고찰해보면 처리전계의 증가에 따라 절연막내 전하의 변화량 (ΔQ_{ss})은 거의 직선적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 질화막의 경우는 절연파괴 histogram의 Weibull분포가 직선관계에서 벗어나는데 이러한 경우는 기존의 Weibull 통계 적용이 어려워진다. 따라서 측정 data의 dispersion에 대한 요소를 고려한 새로운 Weibull 통계 모델이 선정되어야 할 것이다. 전계 E대 $\log t_{BD}$ 의 그림에서 TDDB의 전계 가속계수 r 를 구할 수 있는데 이로부터 정규 동작조건에서의 소자사용수명시간을 전계를 더욱 크게한 가속 시험방법으로 짧은 시간에도 예측할 수 있음을 알 수 있다.

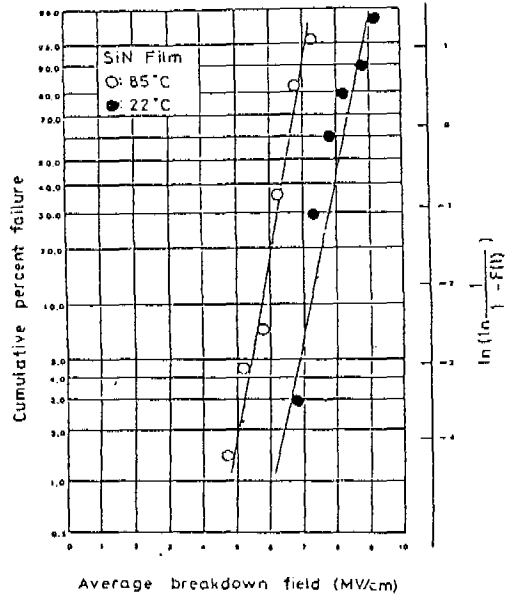


Fig.14. Weibull distribution of average breakdown field (PECVD SiN films).

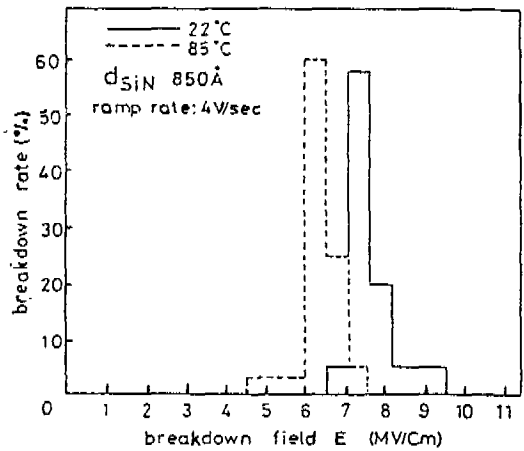


Fig.15. Histogram of breakdown field of the PECVD SiN film.

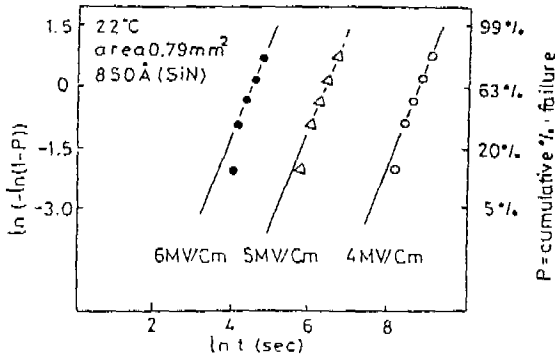


Fig.16. Wearout curve of MNS capacitor as a parameter of stress field.

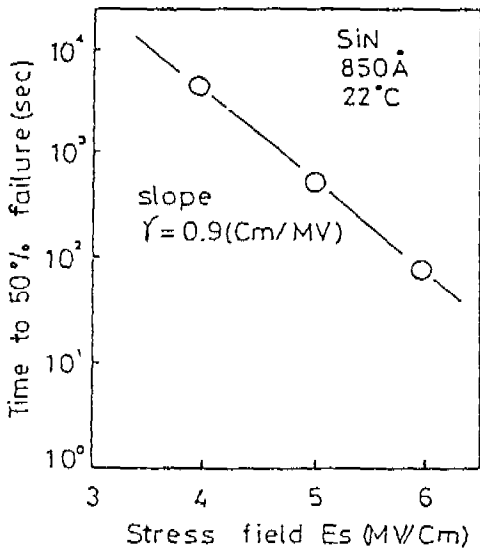


Fig.17. Stress field dependence of time to 50% failure.

참 고 문 헌

1. H.Grinoide
"Nitrided-oxides for thin gate dielectrics in MOS device"
IEDM Tech.Dig,P42, 1982.

2. I.Kato et.al.
"Ammonia-annealed SiO₂ films for thin-gate insulator" Japan, J. Appl. Phys., Vol.21, Suppl.21-1, p.153, 1982.
3. I.Chen, IEEE, ED-32, P.413, 1985.
"Electrical Breakdown in thin gate and Tunneling Oxides"
4. M.Maeda,
"Plasma enhanced Chemical Vapour Deposition nitride films"
5. M.M.Moslehi,
"Thermal nitridation of Si and SiO₂ for VLSI", IEEE, Trans., Vol ED-32, No.2, 1985.
6. K.Yamabe,
"Time Dependent Dielectric Breakdown of Thin Thermally Grown SiO₂ Films"
IEEE.Trans., Vol.ED-32, No.2, P.423, 1985.
7. T.Ito, H, Arakawa,
"Retardation of destructive breakdown of SiO₂ films" annealed in Ammonia gas", J.Electrochem. Soc., Vol.127, No.10, 1980.
8. L.W.Falls,
"Estimation of Parameters in compound Weibull distributions"
Technometrics, 12, No.2, 1970.
9. J.J.O'Dwyer,
"Theory of high field conduction in a dielectric"
J.Appl.Phys., 40, P.3887, 1969.
10. T.H.Distefano,
"Impact ionization model for dielectric instability and breakdown"
Appl. Phys.Lett., 25, P.685, 1974.
11. J.Mcpherson, D.Baglee, J. Electrochem. soc., Vol.132, P.1903, 1985.