

放射線이 照射된 MIS Capacitor의 電荷 蓄積 및 Flat Band 전압 이동에 대한 實驗 및 數值的 研究

論 文
44~4~12

Experiments & Numerical Analysis of Charge Accumulation and Flat Band Voltage Shifts in Irradiated MIS Capacitor

黃 琴 珠* · 金 弘 培** · 孫 尙 熙**

(Kum-Ju Hwang · Hong-Bae Kim · Sang-Hee Son)

Abstract - To investigate the mechanism generated by irradiation in the insulator layer irradiated MIS(Metal - Insulator - Semiconductor) device, the various types of MIS capacitors depending on insulator thickness, insulator types and implanted impurities are fabricated on the P-type wafer. MIS capacitors exposed by 1Mrad $Co^{60}\gamma$ -ray are measured for flat band voltage and charge density shifts pre- and post-irradiation. The measuring results of post-irradiation show the flat band voltage shifting toward negative direction and charge density increasing regardless of parameters. This results have a good agreement with calculated data by computer simulation. Si_3N_4 layers have a good radiation-hardness than SiO_2 layers compared to the results of post-irradiation. Also, radiation-induced negative trap is discovered in the implanted insulator layer. Using numerical analysis, four continuity equations (conduction-band electrons continuity equation, valence-band holes continuity equation, trapped electrons continuity equation, trapped holes continuity equation) are solved and charge distributions according to the distance and Si-Insulator interface states are investigated.

Key Words : MIS Capacitor, Radiation, Continuity Equations

수식 기호 정의

1. 서 론

- n : 전도대에서의 전자 농도[cm^{-3}]
- p : 가전자대에서의 정공 농도[cm^{-3}]
- j_n : 전자 flux[C/cm^2]
- j_p : 정공 flux[C/cm^2]
- n_0 : 단위 dose당 생성된 EHP
- D : irradiation dose rate [rad/h]
- η : 전자 - 정공 분리 확률
- $\sigma_{nt} \cdot \sigma_{pr}$: 전자 · 정공의 trapping capture cross section [cm^2]
- $\sigma_{nr} \cdot \sigma_{pr}$: 전자 · 정공의 recombination capture cross section
- $T_n \cdot T_p$: 전자 · 정공 트랩 중심의 농도[cm^{-3}]
- $n_t \cdot P_t$: 트랩에 포획된 전자 · 정공의 농도[cm^{-3}]
- G : 방사선 조사에 의한 유효 전자-정공 발생률 [$cm^{-3}sec^{-1}$]
- t_d : 절연막의 두께 [\AA]

반도체의 집적화에 있어서 크게 기여한 것이 MIS(Metal-Insulator-Semiconductor)구조의 연구이며 MIS 구조에서 가장 대표적인 것이 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)이다. 이러한 MIS 및 MOS구조에서는 절연층의 역할이 매우 중요하며 특히 절연층과 반도체사이의 계면상태(interface state)와 절연층 内の 트랩(trap)은 소자의 특성에 큰 영향을 끼친다.

MIS소자가 인공위성이나 원자력 발전계통등 방사선 및 방사선과 관련된 환경에 노출될 경우 이 절연층 内の 계면상태와 트랩에서 생기는 효과들(radiation effects)은 소자의 성능을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 오동작을 일으키게 한다[1]. 따라서 1962년 Telstar위성이 이온화 방사선의 영향으로 반도체 소자에 결함을 일으켜 통신에 실패한 것을 계기로 방사선에 노출된 소자에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

1964년 Hughes와 Giroux에 의해[2] MOS 소자가 이온화 방사선에 노출되는 동안 발생하는 transconductance의 변화가 측정되어진 것을 시작으로 Szeden과 Sandor [3]는 이온화 조사(照射)후의 MOS의 특성변화는 산화막내의 양(+)전하의 구조에 의해 야기된다고 발표하였다. 그 후 1966년에 Zaininger[4]가 방사선 조사에 의해 증가된 양(+)의 절연막 전하의 형태를 설명하기 위한 모델을 제시하였으며 Churchill과 Collins[5]는 방사선 조사 후의 절연막내의 전하분포에 대해 연구하였다. 1980년대에 이르러서는 산화막내의 이온화 조사효과를 계산하기 위한 컴퓨터 모델이 Seager[6]등에 의해 제시되었다.

그러나 이러한 기존의 논문들은 주로 실험에 의존한 방법을

* 正 會 員 : 淸州大 大學院 電子工學科 卒業 · 碩士

** 正 會 員 : 淸州大 理工大 半導體工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1994年 9月 23日

1次 修正 : 1995年 1月 9日

2次 修正 : 1995年 3月 9日

채택하여 연구되었을 뿐 상대적으로 이론적 배경이 등한시되고 있는 것이 대부분이다. 따라서 본 논문에서는 방사선이 조사된 MIS 구조 소자의 절연막 내에서 생기는 물리적 현상을 절연막의 종류, 절연막의 두께, 주입한 불순물에 의해 절연막 내에서 여기되는 전하량과 계면 상태를 실험을 통해 알아보고 특히 4개의 연속방정식(전도대에서의 전자의 연속 방정식, 가전자대에서의 정공의 연속 방정식, 전자 트랩에 포획된 전자에 대한 연속 방정식, 정공 트랩에 포획된 정공에 대한 연속 방정식)을 수치 해석적인 방법으로 풀어 절연막 내의 여러 가지 물리적 현상을 실제의 실험결과와 비교하여 보고자 한다.

2. 실험적인 고찰

2.1 실험 소자 제작

비저항이 13Ωcm, 결정 방향이 (100)인 P형 4인치 웨이퍼 위에 MIS 캐패시터를 제작하였다. 표준 세척공정에 따라 웨이퍼를 세척한 후 A, B 두 그룹으로 나누어 A 그룹에는 건식 산화법과 TCE 산화법을 사용하여 열적 산화를 시켰다. 건식산화는 900℃에서 전기로의 석영관 내로 산소를 1000cc/min로 하여 산화막을 형성하고 TCE 산화는 산소를 흘리는 동시에 TCE 버블러를 통해서 N₂버블링에 의해 산화막을 형성하였다. 산화공정중 프리히팅(pre-heating), 푸싱(pushing), 후냉각(post cooling)은 N₂ 분위기에서 각각 3분간하였다.

또, B 그룹은 SiH₄가스와 NH₃가스를 반응시켜 300℃에서 Si₃N₄막을 증착(deposition)하였으며, 각각 두 그룹 모두 15장(1~15번)씩 30장의 웨이퍼위에 소자를 만들었다. 각 1~15번까

표 1 실험에 사용한 MIS 캐패시터
Table. 1 Various types of MIS capacitor

절연막 소자번호	SiO ₂	Si ₃ N ₄
1	200Å	200Å
2	400Å	400Å
3	600Å	600Å
4	800Å	800Å
5	1000Å	1000Å
6	200Å P doping	200Å P doping
7	400Å P doping	400Å P doping
8	600Å P doping	600Å P doping
9	800Å P doping	800Å P doping
10	1000Å P doping	1000Å P doping
11	200Å B doping	200Å B doping
12	400Å B doping	400Å B doping
13	600Å B doping	600Å B doping
14	800Å B doping	800Å B doping
15	1000Å B doping	1000Å B doping

지의 소자는 다시 3개의 작은 그룹으로 나누어 1~5번까지는 불순물을 도핑하지 않았고, 6~10번까지는 인(phosphorus)을, 11~15번까지는 붕소(boron)를 각각 1.0×10¹³cm⁻³ 농도로 도핑 하였다.

또한 각 절연막 두께에 따른 특성을 알아보기 위해 1, 6, 11번 소자는 200Å, 2, 7, 12번 소자는 400Å, 3, 8, 13번 소자는 600Å, 4, 9, 14번 소자는 800Å, 5, 10, 15번 소자는 1000Å의 절연막을 만든 후 이 소자들을 진공 증착기의 벨 도가니(Bell Jar)에 넣고 DC 3000V에서 스퍼터링으로 1% - Si/Al을 증착하고 1.5μm CMOS metal 1 mask를 이용하여 식각한 후 감광제를 제거하고 금속전극과 Si의 접합을 양호하게 하기 위해 10%의 N₂가 포함된 질소 분위기에서 합금(alloying)하여 소자를 완성하였다.

표 1은 실험에 사용한 MIS캐패시터 소자의 종류이다.

2.2 방사선 조사 및 C-V측정

방사선을 조사하기 위하여 시편을 45×50cm의 합판에 고정시키고, Co⁶⁰ 10000 Ci 조사 시설 (대덕연구단지의 한국 원자력 연구소 대단위 조사 시설)을 이용하였다. 방사선원과 시료와의 거리를 45cm로 설치하고 조사선량은 100Krad/hour로 10시간 동안 조사하여 총 조사 선량이 1Mrad가 되도록 하였으며 조사시의 주위온도는 18~20℃로 유지하였다.

또한 MIS 캐패시터의 정전용량 및 전압(C-V) 특성을 알아보기 위해 본 실험에서는 SSM(Solid State Measurement)사의 470i장비를 사용하여 PROCAP (Professional Capacitance Analysis Program)이라는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 소자를 측정하였으며, 모든 소자의 측정은 1MHz의 고주파 상태에서 측정하였다. -5V에서 5V까지 0.05V씩 변화시켜가며 각 전압 값에 대한 캐패시턴스 값을 측정하였고, 순방향과 역방향의 ramp rate를 각각 200mV/sec로 조절하여 각 소자 두께에 따른 전하량 및 플랫폼 밴드 전압값을 모두 30개의 샘플에 대하여 비교·측정하였다.

3. 실험 결과

그림 1과 그림 2는 MIS에서 절연체로 사용된 SiO₂막과 Si₃N₄막의 각각의 두께에 따른 방사선 조사 前·後의 플랫폼 전압값의 변화를 나타냈다. 그림 1과 그림 2에서 절연막의 두께가 점점 두꺼워질수록 방사선 조사 前·後의 플랫폼 전압값이 (-)값으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히, 동일한 절연막 두께에서 방사선 조사 後의 플랫폼 전압값이 조사 前보다 (-)값으로 큰것은 방사선에 의해 절연막 내에서 양(+)의 전하가 많이 유기되었음을 보여주고 있다. 또, 동일한 절연막 두께에서 그림 1의 SiO₂ 경우와 그림 2의 Si₃N₄ 경우를 비교해 보면 방사선을 조사한 後에 플랫폼 전압의 변화가 Si₃N₄쪽이 작음을 알 수 있고, 同一 절연체의 경우 두께가 두꺼울수록 방사선 조사 前·後의 플랫폼 전압변화가 대체로 덜한것을 알 수 있다. 이것은 그림 3, 그림 4에서 절연층의 두께가 두꺼울수록 전하량의 변화로 덜한것을 알 수 있으며, 동일 절연체의 경우 두께가 두꺼울수록 방사선에 강함을 알 수 있다. 그림 3, 그림 4는 각각의 두께에 따른 SiO₂막과 Si₃N₄막의 방

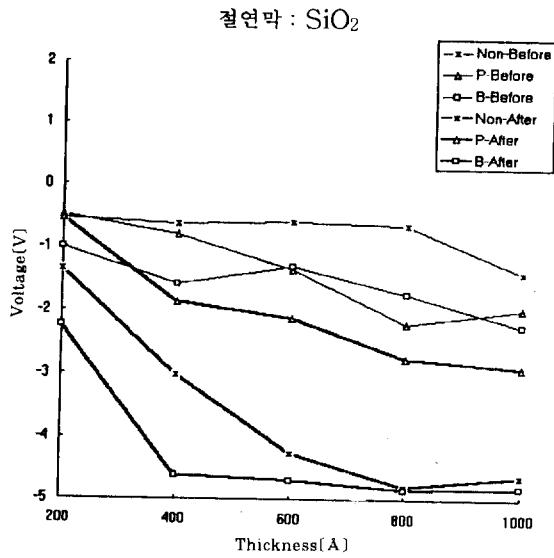


그림 1 SiO₂막의 두께에 따른 방사선 조사 전·후의 플랫 밴드 전압값의 변화
 Fig. 1 Flat band voltage shift before and after irradiation depending on SiO₂ layer thickness.

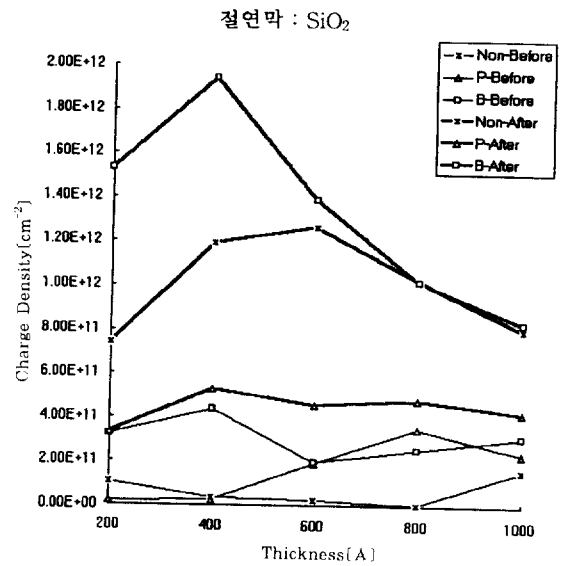


그림 3 각 두께에 따른 SiO₂막의 방사선 조사 전·후의 전하량의 변화
 Fig. 3 Charge density shift before and after irradiation depending on SiO₂ layer thickness

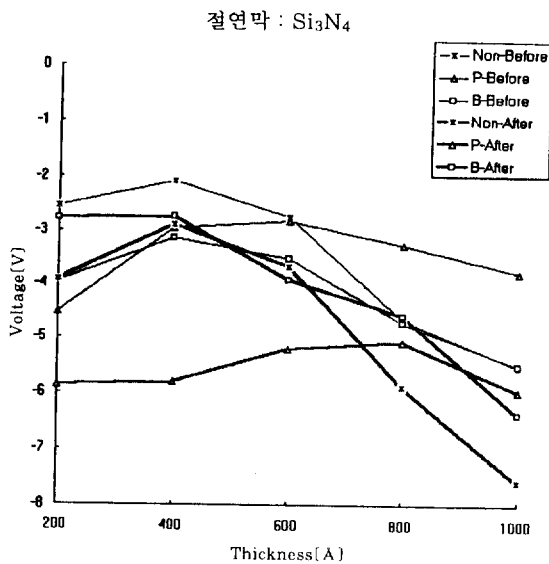


그림 2 Si₃N₄막의 두께에 따른 방사선 조사 전·후의 플랫 밴드 전압값의 변화
 Fig. 2 Flat band voltage shift before and after irradiation depending on Si₃N₄ layer thickness

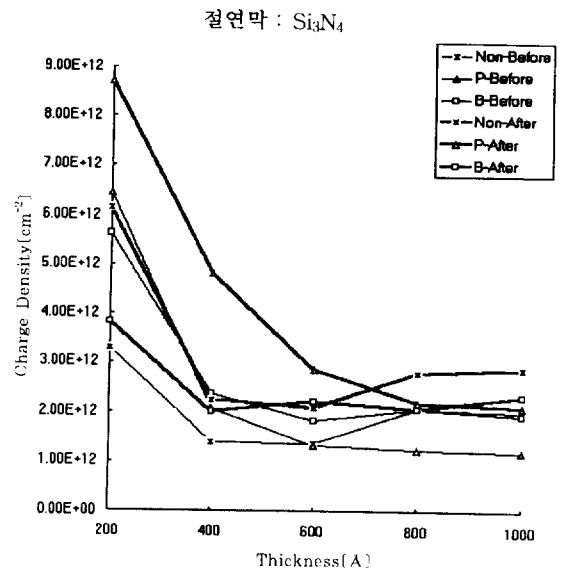


그림 4 각 두께에 따른 Si₃N₄막의 방사선 조사 전·후의 전하량의 변화
 Fig. 4 Charge density shift before and after irradiation depending on Si₃N₄ layer thickness

사선 조사 전·후의 전하량 변화를 나타내고 있다. 그림 3의 SiO₂막의 경우 방사선 조사 후의 전하량이 대략 10[cm²] 증가 하였으나, 그림 4의 Si₃N₄막의 경우는 SiO₂막 보다 전하량이 적게 증가하였으며, 따라서 SiO₂막에 비해 방사선에 덜 영향을 받는 것으로 생각된다.

그림 5, 그림 6, 그림 7은 200Å 두께의 SiO₂막과 Si₃N₄막에

대한 방사선 조사 전·후의 C-V 곡선의 특성을 비교한 것이다. 그림 5는 non-doping의 경우, 그림 6은 P를 doping한 경우, 그림 7은 B를 doping한 경우이다. 이 그림들에서 non-doping, P-doping의 절연막의 경우 뚜렷하게 C-V곡선이 방사선 조사 후에 음의 방향(왼쪽)으로 이동되었음을 알 수 있다. 그러나 그림 7에서 특이하게도 Si₃N₄의 방사선 조사 후의 C-V곡선

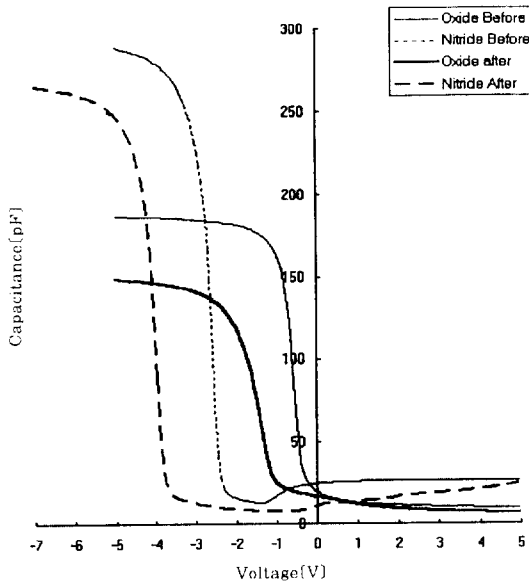


그림 5 non-doping 200Å 두께의 SiO₂막과 Si₃N₄막에 대한 방사선 조사 전·후의 C-V특성

Fig. 5 C-V characteristics before and after irradiation of non-doped 200Å SiO₂ and Si₃N₄ layer

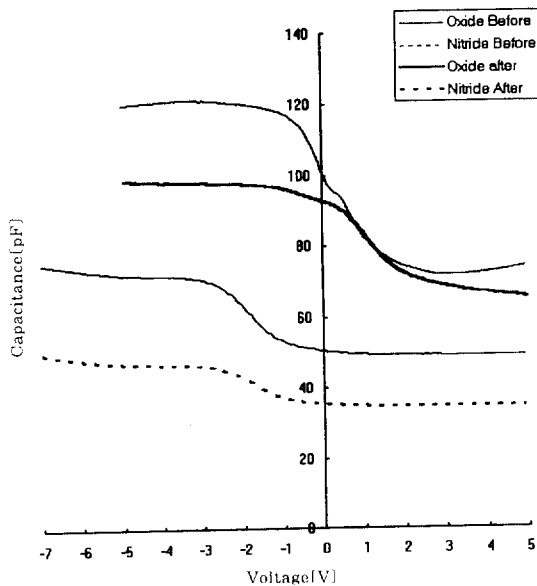


그림 6 P-doping 200Å 두께의 SiO₂막과 Si₃N₄막에 대한 방사선 조사 전·후의 C-V특성

Fig. 6 C-V characteristics before and after irradiation of n on-doped 200Å SiO₂ and Si₃N₄ layer

이 약간 오른쪽으로 이동하였는데 이것은 C-V 측정시 측정 방법에서 발생한 오류일 것으로 생각된다. 또한 Si₃N₄의 경우 방사선 조사 後의 C-V 곡선이 절연막 두께가 두꺼워질수록 반전(inversion)되었을 경우의 C-V 곡선의 형태가 마치 저주파에 의한 C-V 특성을 나타내는 듯한 형태를 보였는데 이것은 Si-Si₃N₄ 계면에서 과다한 불순물들이 절연막 전하로 작용한 것으로 추측된다.

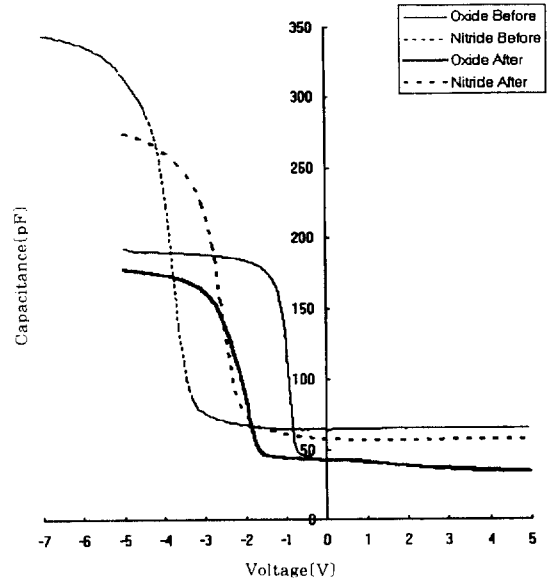


그림 7 B-doping 200Å 두께의 SiO₂막과 Si₃N₄막에 대한 방사선 조사 전·후의 C-V특성

Fig. 7 C-V characteristics before and after irradiation of B-doped 200Å SiO₂ and Si₃N₄ layer

4. 전자와 정공의 이론적인 축적비 계산

4.1 수식적 계산

절연막 내에서 방사선 조사로 인해 생성되는 많은 전자-정공쌍(electron-hole pair)들은 재결합되어 없어지기도 하지만[7], 대부분은 바이어스 전압에 따른 전계에 따라 각각 분리되어 이동한다. 이때 전자와 정공은 이동 중에 각각 전자 트랩(electron trap)과 정공 트랩(hole trap)이 중성이라고 가정한다면, 중성인 정공 트랩은 정공을 포획하여 (+)전하를 띄게 되고, (+)를 띄는 정공 트랩은 전자를 포획하여 다시 중성이 되기도 한다. 마찬가지로 중성인 전자 트랩은 전자를 포획하여 (-)를 띄게 되고, 이 (-)를 띄는 전자 트랩은 정공을 포획하여 다시 중성을 띄게 된다. 이러한 과정들이 연속적으로 발생하여 절연막 내에 전하가 축적된다.

방사선이 조사되는 동안 게이트에 양(+)의 바이어스를 가했을 경우 정공 flux $j_p(x)$ 는 게이트 쪽에서 0(zero)이고 계면 쪽으로 갈수록 증가하며, 전자 flux $j_n(x)$ 는 게이트 쪽으로 갈수록 증가하고 계면 쪽에서 0(zero)이 될 것이다. 이러한 현상은 음(-)의 게이트 전압이 가해졌을 경우에는 반대로 된다.

방사선이 조사 될 때 전자와 정공이 어떻게 트랩에 포획되고 축적되는지를 알기 위해서는 조사 - 생성된(radiation-generated) 전도대에서의 전자 연속 방정식과 가전자대에서의 정공 연속 방정식, 트랩에 포획된 전자와 정공 연속 방정식을 풀어야 한다.

전도대 전자와 가전자대 정공의 1차원 연속 방정식은

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial j_n}{\partial x} + n_0 D \eta - \sigma_{nr} j_n \rho_t - \sigma_{ni} j_n (T_n - n_i) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial j_p}{\partial x} + n_0 D \eta - \sigma_{pr} j_p n_t - \sigma_{pi} j_p (T_p - p_t) \quad (2)$$

이며, 트랩에 포획된 전자와 정공의 연속 방정식은

$$\frac{\partial n_t}{\partial t} = \sigma_{ni} j_n (T_n - n_t) - \sigma_{pr} j_p n_p \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_t}{\partial t} = \sigma_{pi} j_p (T_p - p_t) - \sigma_{nr} j_n p_n \quad (4)$$

이다. 뒷식에서 전도대의 전자와 가전자대 정공은 방사선이 조사된 시간과 비교해서 아주 짧은 시간에 정상상태에 도달한다고 가정하면, 양(+)의 게이트 바이어스에 대한 전자·정공의 flux를 구함으로써 트랩에서의 전자와 정공의 축적비를 다음과 같이 구할 수 있다.

전도대의 전자와 가전자대 정공이 방사선이 조사된 시간과 비교해서 아주 짧은 시간에 정상상태에 도달한다고 가정하면 $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$ 이고, 또 양(+)의 게이트 바이어스에 대해 $j_n(x)$ 와 $j_p(x)$ 의 미분 방정식을 풀어 (3), (4)식에 넣고 정리하면,

$$\frac{dn_t}{dt} = \frac{G\sigma_{ni}(T_n - n_t)}{\sigma_{nr}p_t + \sigma_{ni}(T_n - n_t)} (1 - \exp\{ -[\sigma_{nr}p_t + \sigma_{ni}(T_n - n_t)]x \}) - \frac{G\sigma_{pr}n_t}{\sigma_{pr}n_t + \sigma_{pi}(T_p - p_t)} (1 - \exp\{ -[\sigma_{pr}n_t + \sigma_{pi}(T_p - p_t)](t_d - x) \}) \quad (5)$$

$$\frac{dp_t}{dt} = \frac{G\sigma_{pi}(T_p - p_t)}{\sigma_{pr}n_t + \sigma_{pi}(T_p - p_t)} (1 - \exp\{ -[\sigma_{pr}n_t + \sigma_{pi}(T_p - p_t)](t_d - x) \}) - \frac{G\sigma_{nr}p_t}{\sigma_{nr}p_t + \sigma_{ni}(T_n - n_t)} (1 - \exp\{ -[\sigma_{nr}p_t + \sigma_{ni}(T_n - n_t)]x \}) \quad (6)$$

이고, 뒷 (5), (6)식에서 η 와 σ 값은 전계와 관계되는 파라메타들로서 저전계일 경우 Krantz의 논문에서 보고된 바에 의하면 [9] $\eta(\epsilon) = \eta_0 [1 + q\epsilon/8\pi\epsilon_{in}(KT/q)^2]$ 이고, 열 성장한 트랩에 대해 정공의 포획 단면적(capture cross section)은 $2.7 \times 10^{-14} \text{cm}^2 \sim 1.2 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ 의 범위이며, 전자의 포획 단면적은 $10^{-18} \text{cm}^2 \sim 10^{-17} \text{cm}^2$ 이다[8]. 이와 같이 정공 트랩의 포획 단면적이 전자 트랩의 포획 단면적 보다 크기 때문에 열 성장시킨 절연막의 경우에는 절연층 내에서 양(+)의 전하가 주로 트랩핑되어진다. 그러나 이온주입에 의한 트랩의 경우에는 전자의 포획 단면적이 정공의 포획 단면적 보다 크며, 전자와 정공의 트랩 포획 단면적은 비슷한 전계의존성을 갖는다고 가정하였다.[8,9]. 또한 실리콘-절연막 계면에 영향을 주는 또다른 요소는 정공의 트랩 밀도 $T_p(x)$ 와 전자의 트랩 밀도 $T_n(x)$ 이다. 여러 편의 논문에서 열적으로 성장시킨 정공 트랩의 밀도 $T_p(x)$ 가 실리콘 - 절연막의 계면 근처에서 최대치를 이루고 계면으

로 부터 떨어질수록 감소된다고 보고 하였으며, 특히 계면에서 2nm내에 있는 정공 트랩의 밀도는 약 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이고, 그 이외에는 약 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 라고 알려져 있다[4,10,11]. 열산화시킨 절연막에 있어서 이온화 조사 前·後에 전자의 트랩은 거의 발견되지 않기 때문에 중요하지 않다. 그러나 이온 주입(ion implantation)으로 성장시킨 절연막에서는 전자가 이온 주입으로 인한 변위 손상의 분포와 비슷하게 발견된다. 따라서 이온 주입으로 성장된 절연막의 경우에는 열산화로 성장시켰을 때의 정공 트랩뿐만 아니라 변위 손상에 의해 형성된 전자 트랩도 고려해야 한다.

지금까지 설명한 파라메타 들에 대해 식 (5), (6)을 풀어 절연막 内の 전하 분포를 구할 수 있고 구해진 전하 분포로부터 식 (7)을 이용하여 방사선 조사에 의한 플랫 밴드 전압 이동(flat-band voltage shift)을 구할 수 있다[12].

$$\Delta V_{FB} = \frac{q}{\epsilon_{in}} \int_0^{t_d} (t_d - x) [p_t(x) - n_t(x)] dx \quad (7)$$

4.2 컴퓨터를 이용한 전자와 정공의 축적비 계산

절연막의 종류와 각 두께에 따른 방사선 조사 後の 플랫 밴드 전압값과 전하량을 이론치와 비교하기 위해 그림 8과 9에 실험치와 함께 표시 하였다.

그림 8과 그림9는 SiO₂와 Si₃N₄막 각각에 대해 방사선을 조사한 後の 플랫 밴드 전압값을 컴퓨터 시뮬레이션으로 얻은 값과 실험값을 비교하여 그린 그림이다. 그림 8에서 방사선 조사 後の 플랫 밴드 전압값은 실험값과 계산한 값이 모두 비슷한 값을 나타내고 있으나 전반적으로 실험값이 계산값보다 약간 크게 측정되었다. 이것은 소자 측정시 바이어스값을 지정할때 장비 특성에 맞추기 위해 약간의 오차를 주어 측정했기 때문이거나 전자·정공의 축적률을 계산하는데 쓰인 파라메타값들이 실제 실험값과 약간씩 차이가 있기 때문일것으로 예측된다. 또한 Si₃N₄를 절연막으로 사용한 그림 9의 경우도 SiO₂를 절연막으로 사용한 그림 8과 마찬가지로 방사선 조사 後の 플랫 밴드 전압값이 실험값과 계산한 값이 일치하고 있으며 역시 실험값이 약간 크게 나타나 있다. Si₃N₄를 절연막으로 사용한 경우에 있어서 SiO₂를 절연막으로 사용한 소자와는 약간 다르게 플랫 밴드 전압 값들이 일관성 없는 형태로 나타나는 것은 Si₃N₄막의 막질이 SiO₂에 비해 떨어지기 때문에 측정 위치에 따라 다르게 측정되지 않은 것으로 생각 된다. 그래프에는 나타내지 않았으나 방사선 조사 前의 실험값과 계산값도 거의 일치하며, 그림 8과 그림 9에서 방사선 조사 後の 컴퓨터 계산값은 실험에서와 마찬가지로 방사선 조사 前에 비해 (-)쪽으로 이동한 값이다. 이와 같이 방사선 조사 後の 플랫 밴드 전압값이 실험치와 이론치 모두 비슷한 값을 가지며 (-)쪽으로 이동한 것으로 보아 방사선 조사 後에 절연막 내에는 (+)전하가 많이 유겨됨을 알 수 있었다.

그러나 단일 웨이퍼 내에서 각 거리에 따른 전하 분포를 실험상으로는 구하기 힘들었으므로 앞장에서 유도한 식(5)와(6)을 이용하여 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다. 하지만 실제로 전자, 정공의 축적비에 관한 식 (5)와 (6)은 η , σ 등의 파라메타가 내부 전계의 공간 의존성을 가지기 때문에 풀기 어렵다. 따라서 Runge - Kutta 방법[13,14]을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로

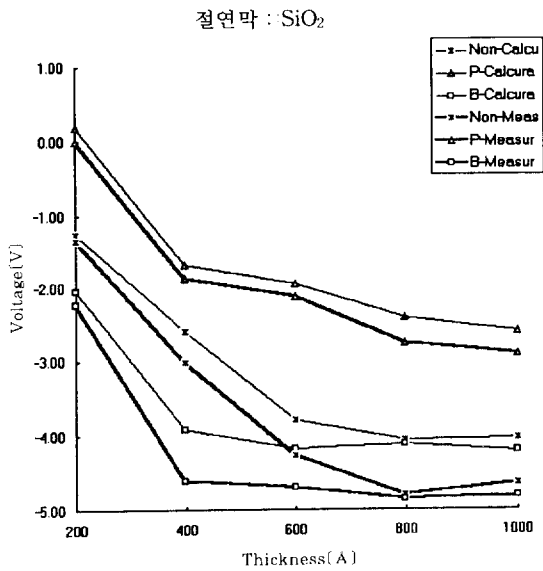


그림 8 방사선을 조사한 후 SiO₂막의 flat band 전압의 시뮬레이션값과 실험값의 비교
 Fig. 8 Comparisons of simulated and experimental data of flat band voltage after irradiation in SiO₂ layer

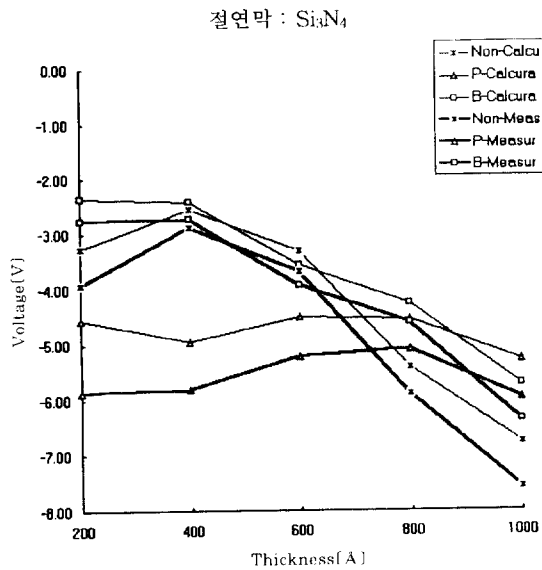


그림 9 방사선을 조사한 후 Si₃N₄막의 flat band 전압의 시뮬레이션값과 실험값의 비교
 Fig. 9 Comparisons of simulated and experimental data of flat band voltage after irradiation in Si₃N₄ lasyer

양(+)의 게이트 바이어스 하의 전자와 정공의 축적비를 계산하였다.

그림 10은 non-doping 200Å의 SiO₂막에 Co⁶⁰-γ ray를 1Mrad를 조사한 後의 절연막 內의 전하 분포를 시뮬레이션한 것으로 실리콘-절연막 계면쪽을 0축으로 하여 나타내었다. 실험과 마찬가지로 방사선 조사 後의 절연막내의 전하량이 증가

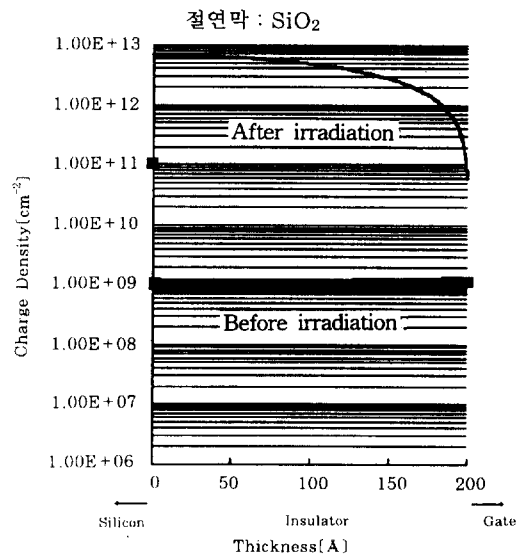


그림 10 200Å의non-doping SiO₂막에 방사선을 조사한 후 절연막내의 거리에 따른 전하 분포
 Fig. 10 Charge distribution before and after irradiation of non-doped 200Å SiO₂ layer

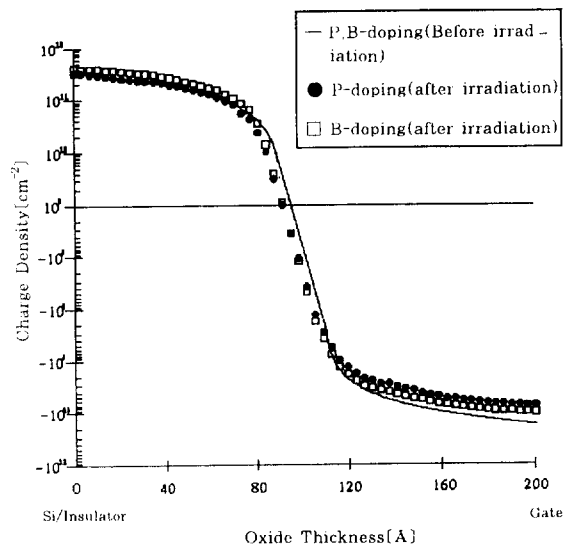


그림 11 200Å의 B를 도핑 했을 경우 절연막내의 거리에 따른 전하 분포
 Fig. 11 Charge distribution before and after irradiation of B-doped 200Å SiO₂ layer

하였으며, 절연막 內의 (+)전하는 실리콘-절연막 근처에 거의 분포하며 게이트 쪽에서 급격히 줄어든다는 것을 알 수 있었고 (-)전하의 분포는 나타나지 않았다. 또한 다른 소자에 대해서 시뮬레이션한 결과도 모두 그림 10과 같은 경향을 나타내고 있었으며, 절연막내의 전하량은 실리콘-절연막 계면에서 가장 큰값을 갖는 것으로 나타났다.

그림 11은 B를 도핑한 200Å의 SiO₂막에 방사선을 조사하기 前과 조사한 後의 절연막 內의 전하분포를 시뮬레이션 한것으

로 이온주입으로 인한 손상(displacement damage)에 의해 생성된 전자트랩이 발견되었으며, Si-SiO₂계면에서의 전하량이 non-doping의 경우보다 약간 더 작게 나타나고 있는데 이것은 불순물이 (+)전하를 감소시키기 위한 재결합 중심이나 트랩으로 작용한 것으로 예측된다. 또한 P도핑의 경우에 있어서도 비슷한 경향을 나타 내었다.

5. 결 론

SiO₂막과 Si₃N₄막을 절연막으로 갖는 MIS 소자에 Co⁶⁰ γ-ray를 조사 시킨후 C-V측정을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

방사선 조사 後의 C-V곡선이 조사 前의 C-V곡선에 비해 왼쪽(음의 방향)로 이동하였으며 이로 인해 계산되어지는 플랫 밴드 전압 V_{FB}도 왼쪽(음의 방향)으로 이동하였는데, 이것은 절연막 內에 양(+전하)의 분포가 증가되었음을 나타내며, 단일 두께 소자에 대해 전하 분포를 시뮬레이션한 결과 절연막 전하는 실리콘-절연막 계면에서 가장 많이 분포하며 게이트 전극 쪽으로 갈수록 감소됨을 보였다. 그러나 단일 두께의 절연막 內에서 거리에 따른 전하의 축적율은 실험상으로는 구하기 힘들었으므로 시뮬레이션을 통해서만 이론과 일치함을 증명하였다. 또한 1Mrad의 방사선을 조사한 後의 전하량은 방사선 조사 前보다 약 10[cm⁻²] 증가하였다.

Si₃N₄막과 SiO₂막을 비교해 볼때 Si₃N₄막이 SiO₂막에 비해 방사선 조사 前·後의 전하량과 플랫 밴드 전압값의 변화가 작아 방사선에 더 강한 반응을 나타내었다. 전반적으로 시뮬레이션을 통해 계산한 방사선 조사 後의 전하량과 플랫 밴드 전압의 변화량은 실험치와 비교했을때 몇몇 소자의 경우에 있어서 약간의 차이를 보이고 있기는 하지만 전반적인 경향은 이론값과 잘 일치 하였다. 이온 주입을 한 몇몇 소자에 있어서 C-V 특성이 불안정하게 나타난 경우가 있었으나 이것은 소자 제작 시 어닐링 과정에서 약간의 문제가 있어 생긴것으로 생각된다.

이 논문은 1993년도 한국학술 진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Y. Nishioka E. F. da Silva and T-P Ma "Radiation Induced Interface Traps in Mo/SiO₂/Si Capacitors" IEEE Trans. Nucl. Sci.NS-34, pp.1166 (1987).
 [2] H. L. Hughes and R. P. Giroux "Space Radiation Affects MOSFET's" Electronics, vol. 377,pp.58 (1964).
 [3] J. R. Szedon and J. E. Sandor, "The Effect of Low-Energy Electron Irradiation of MOS Structures," Appl. Phys. Lett., vol. 6, pp. 18 (1965).
 [4] K. H. Zaininger, "Irradiation of MIS Capacitors with High Energy Electrons", IEEE Trans. Nucl.Sci.NS-13, pp. 237 (1966).
 [5] T. W. Collins, F. E. Holmstrom, and J. N. Churchill, "Charge Distributions in MOS Capacitors for Large Irradiation Dose", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, pp.5176 (1979).

[6] R. C. Hughes and C. H. Seager, "Hole Trapping, Recombination and Space Charge in Irradiated Sandia Oxides", IEEE Trans. Nucl. Sci.NS-30, pp.4049 (1983).
 [7] L. Onsager, "Initial Recombination of Ions", Phys. Rev. 54, pp.554 (1938).
 [8] D. S. Lee and C. Y.c han, "Oxide Charge Accumulation in Metal-Oxide-Semiconductor Devices during Irradiation", J. Appl. Phys. vol.69(10), pp.7134 (1994).
 [9] R. J. Krantz, L. W. Aukerman and T, C, Zietlow, "Applied Field and Total Dose Dependence of Trapped Charge Buildup in MOS Devices", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-34, pp.1196 (1987).
 [10] J. M. Aitken and D. R. Young, "Avalanch Injecti on of Holes into SiO₂", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24, pp.2128 (1977).
 [11] J. R. Srour, O. L. Curtis, and K. Y. Chiu, "Charge Transport Studies in SiO₂: Processing Effects and Implications for Radiation Hardening", IEEE Trans. Nucl. Sci NS-21, pp.73 (1974).
 [12] E. H. Nicollian and J. R. Brews, "MOS(Metal-Oxide-semiconductor)Physics and Technology", JohnWiley&Sons, (1982).
 [13] S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers", McGraw-Hill, (1988).
 [14] S. Nakamura, "Applied Numerical Methods in C", Prentice-Hall, (1993).

저 자 소 개



황금주 (黃琴珠)

1968년 4월 25일생. 1992년 2월 청주대 이공대 반도체공학과 졸업. 1995년 2월 청주대 대학원 전자공학과 졸업(석사).



김홍배(金弘培)

1952년 5월 16일생. 1975년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(석사).1985년 동 대학원 졸업(석사). 1985년 동 대학원 졸업(공학박).1989~1990년 USF(University of South Florida, Tampa, Florida, USA)대학(연구). 현재 청주대 이공대 반도체공학과 교수.



손상희(孫尙熙)

1960년 3월 25일생. 1983년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사).1988년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1988~1990년 순천향대 전산학과 전임강사. 현재 청주대 이공대 반도체공학과

조교수