

방사선이 조사된 MOS구조에서의 전기적 특성

임규성^{*}, 고석웅^{**}, 정학기^{**}

* 논산 백제병원 방사선과

** 군산대학교 전자정보공학부

Electrical Characteristics on MOS Structure with Irradiation of Radiation

G.S. Lim^{*}, S.W. Koh^{**}, H.K. Jung^{**}

^{*}Department of Radiology, Back Jae Hospital in Nonsan

^{**} School of Electronic and Information Eng. Kunsan National University

요 약

이 연구에서는 P-MOS 커패시터에 Co^{60} - γ 선을 조사한 후 조사선량 및 산화막 두께에 따른 전하의 거동을 고찰하고자 1[MHz]의 고주파 신호에서 정전용량-전압(C-V) 특성 및 유전손실계수-전압(D-V) 특성을 측정하였다. C-V 특성에서 플랫폼 전압과 문턱전압을 구하여 이들 파라메타와 D-V 특성의 피크와의 관련성을 검토하였다. C-V 특성이 P-MOS 커패시터의 정상상태의 전하의 거동 및 계면 상태특성을 해석하기가 편리하고 D-V 특성은 C-V 특성보다 산화막 내부의 공간전하분포와 계면상태의 밀도 등을 더 명확하게 파악할 수 있으며 산화막내 캐리어의 전도현상에 관한 미시적 전하 거동의 고찰에도 편리함이 확인되었다.

ABSTRACT

The investigations were discussed on the radiation effects of the electrical properties to the p-type MOS capacitors, which were irradiated by cobalt-60 gamma ray sources. The characteristics of capacitance-bias voltage(C-V) and of dielectric dissipation factor-bias voltage(D-V) on the capacitors were measured at 1 [MHz] frequency. The microscopic behaviors of space charges in oxide and silicon-silicon dioxide(Si-SiO₂) interface were investigated from the experimental data. The C-V characteristics are statical and convenient for the evaluation of the steady state behavior of carriers and interface states characteristics. While, the distribution and magnitude of space charges in oxide can be found out accurately on the V_{dp} in D-V curves. The density of interface states can be deduced with ease from the magnitude of D-peak at depletion state. Thus, it is also concluded that the D-V curves are more useful and easier than conventional C-V curves for analysis of the microscopic and dynamic behavior of carriers in oxide and Si-SiO₂ interface.

1. 서 론

MOS(metal oxide semiconductor)구조는 IGFET(insulated gate field effect transistor), CCD(charge coupled device) 및 MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor)와 같은 반도체 소자의 개발과 응용이 급속히 성장함에 따라 반도체 소자에서 중요한 요소가 되고 있다. [1-5]반도체 소자에서 MOS 구조의 동작 특성은 절연 박막의 전기적, 유전적 성질에 따라 크게 영향을 받는다. SiO₂는 박막의 제조가 용이하고 절연과 파괴 강도(7×10^8 [V/cm])가 비교적 높으며 무시할 수 있을 정도의 적은 전자 트랩을 가진다. 따라서 양질의 산화막을 열적으로 성장시킬 수

있기 때문에 절연 박막으로 널리 사용되고 있다.

최근, 통신과 기상 등에 인공 위성을 실용하고 원자로 점검에 로봇을 배치하는 등에 따라 MOS 구조의 반도체 소자가 이용되는 경우가 증가되고 있으며 방사선 환경 하에서 고도의 신뢰성이 요구되고 있다. 우주 공간을 고려하면 통신 위성과 기상 위성이 위치하는 정지위성 궤도의 위치에서는 높은 에너지의 양자와 전자가 존재한다. 이와 같은 높은 에너지를 갖는 양자와 전자가 위성에 입사할 때 제동 방사에서 발생하는 γ 선 및 X선이 반도체 소자에 영향을 주어 방사선 조사 효과를 발생시키게 된다.[6-7]

SiO₂ 절연 박막의 전기적, 유전적 성질을 이해하기 위해 본 연구에서는 최근에 새롭게 제시되고 있는 방법인 간편하고 정확도가 높은 유전

손실 계수 특성을 통하여 MOS 커패시터의 방사선 조사 효과에 대하여 고찰하고 방사선 조사 효과 측정법으로 사용되어온 C-V 측정법을 이용하여 Si/SiO₂ 계면 상태 밀도 분포가 방사선 조사선량에 따라 변화되는 모습을 관찰하여 전하의 미시적 거동에 대하여 고찰하고자 한다.

II. 시편의 제작, 방사선 조사 및 실험

1. 제작

P-MOS 커패시터는 Si 웨이퍼의 표준 MOS 공정에 의해 제작되었다. 먼저, 1100[°C]의 산소 분위기에서 습식 산화에 의하여 0.6[μm]의 field 산화막을 형성한 후, 1050[°C]의 질소분위기에서 40분간 붕소(BN-1100 sources를 사용)를 확산시키고 1000[°C]의 산소 분위기에서 30분간 drive-in하여 p+ 확산층인 가드-링을 형성하였다. 또한, 습식 식각법으로 게이트 산화막 형성을 위한 부분을 식각하고 0.6%의 TCE(tri-chloro-ethylene)가 포함된 1000[°C]의 산소분위기에서 각각 60[nm]의 산화막을 형성한 후 산화막 고정 전하의 감소를 위하여 1000[°C]의 질소 분위기에서 30분간 어닐링하였으며 산화시키는 시간을 조절하여 산화막의 두께를 조절하였다.

Al이 증착된 웨이퍼에서 metal patterning 마스크를 사용하여 불필요한 금속부분을 제거(Al 에칭액 및 A-40 수용액 사용)한 후 10[%]의 H₂가 포함된 질소 분위기에서 425[°C]로 20분간 alloying 하였다. 가공한 웨이퍼를 웨이퍼 절단기로 절단하고 Ag-Cu합금 lead frame에 절단된 chip을 도전성 에폭시로 부착하였다. 접속용 전극 pad와 lead frame의 pin에 25.4[μm]의 Au선을 연결한 후 frame을 molding 컴파운드(HC-10B)를 사용하여 mold한 후 175[°C]에서 6시간 동안 경화시켰다. Molding 한 시편에 pin을 형성하여 시편을 제작하였다.

시편의 방사선 조사는 10,000 Ci의 C⁶⁰-γ 선원을 이용하였다. 선량률이 2.1 × 10⁴[rad/h] ~ 1.9 × 10⁵ [rad/h]가 되는 거리에 γ 선원 빔의 중앙부와 평행되도록 시편을 설치하고 +4.5[V] 바이어스 전압(조사전압, V_{brad})을 각각 다른 시편의 게이트 전극에 가하고 방사선을 조사하였다.

시편에 조사한 선량은 시편에 따라 9.9 × 10³ ~ 1 × 10⁸[rad]의 범위가 되도록 조사시간을 변화시켰으며, 방사선 조사시 전압은 + 4.5[V]를 인가하였다. 조사할 때 주위 온도는 15 ~ 20[°C]로 유지하였다.

2. 실험장치 및 방법

C-V(정전용량-게이트 인가전압)특성을 측정하

기 위한 측정 장치는 PC로 제어되는 Impedance analyzer (HP-4194A), X-Y Plotter 및 항온조를 구성하였다. 항온조에 시편을 넣고 PC에 의해 온도가 자동 제어 되도록 하였으며 방사선 조사에 따른 MOS 커패시터의 산화막 전하 및 계면전하의 거동에 의한 C-V 특성의 변화를 관찰하기 위하여 게이트 전극에 직류 전압을 인가하였는데 순방향(-V)에서 역방향(+V)으로 변화시키면서 15[mV_{rms}]의 1[MHz]의 고주파 신호를 중첩시켰다. 그리고 시편에 가하는 바이어스 전압의 인가 범위는 조사선량에 따라 변화시켰다.

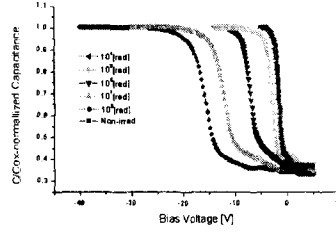
III. 실험 결과 및 고찰

1. 정전용량-전압(C-V) 특성

그림 3.1의 a)~c)는 40[nm], 60[nm], 80[nm]의 산화막 두께를 갖는 MOS 커패시터의 조사선량에 따른 C-V 특성곡선이다. 이 그림에서 특성곡선은 부방향으로 이동하였으며 축적상태에서 반전상태로 전이되어 가는 단계인 공핍상태의 기울기의 변화 경향을 보이고 있다. 특성곡선이 부방향으로 이동하는 것은 그림 a)부터 c)에서 산화막 두께에 대하여 10⁴[rad]~10⁵[rad]의 범위에서는 뚜렷한 변화를 보이지 않았지만, 10⁶ [rad] 이상부터는 큰 변화를 보였다. 특히 80[nm]의 산화막 두께를 갖는 커패시터가 커다란 변화를 보였다. 공핍층의 기울기는 조사선량이 증가할수록 완만해짐을 보이고 있다. 이들을 정량적으로 살펴보면 다음과 같다. 우선 특성곡선의 부방향으로의 이동에 대하여 살펴보자. 그림 3.1의 a)~c) 특성곡선으로부터 에너지 밴드를 평탄화시키는 전압을 의미하는 플랫폼 전압과 정전용량이 일정하게 되기 시작하는 전압을 의미하는 문턱전압을 구하여 도식화한 것이 그림 3.2와 그림 3.3이다. 그림에서 방사선이 조사되지 않았을 때와 10⁵[rad]이 조사되었을 때의 플랫폼 전압과 문턱전압의 변화량은 40[nm]의 산화막 두께를 갖는 커패시터에서는 0.104[V], 0.103[V]이고, 60[nm]는 1.432[V], 0.448[V], 80[nm]의 경우는 1.614[V], 1.59[V]의 값을 보였다. 이들 값을 통해서 알 수 있는 것은 산화막의 두께가 두꺼울수록 플랫폼 전압과 문턱 전압의 변위량은 증가하지만, 그 변위량은 MOS 소자의 동작 범위내에 포함되어 있기 때문에 커다란 영향을 미치지 않을 것이다. 그러나 10⁶[rad] 이상의 방사선이 조사되면 그 변위량은 매우 크게 증가한다. 이를 정량적으로 살펴보기 위하여 10⁸[rad]가 조사된 커패시터와 방사선이 조사되지 않은 커패시터를 비교해보면 40[nm]의 두께를 갖는 커패시터의 플랫폼 전압과 문턱전압의 변위량은 5.043[V], 5.041[V], 60[nm]는 8.482[V], 8.477[V], 80[nm]는 14.649[V], 14.612[V]로 변화하였다. 10⁵[rad]과 비교하면 매우 큰 변위량을 보였으며

조사선량이 증가하면 MOS소자의 동작 범위를 크게 벗어나게 된다는 것을 쉽게 알 수 있다.

이러한 현상에 대한 메카니즘을 살펴보면 다음과 같다. MOS 커패시터에 Co^{60} - γ 선이 조사되면 산화막내에 전자-정공 쌍이 생성되고 생성된 일부 전자-정공 쌍은 10^{-6} [sec] 이내에 재결합을 하지만 대부분의 전자와 정공은 산화막을 통하여 이동되거나 트랩된다. 전자와 정공의 이동도는 각각 $\mu_e \approx 20 [cm^2/V \cdot cm]$, $\mu_h \approx 2 \times 10^{-5} [m^2/V \cdot cm]$ 이다. 따라서 방사선 조사 초기에 전자는 산화막 내를 빠져나가고 정공은 Si/SiO₂ 계면 근처에 면전하로 잔류하게 된다. 게이트에 정극성을 인가한 상태에서 Co^{60} - γ 선을 조사하였기 때문에 SiO₂와 Si의 계면 근처에 공간전하를 형성하고 있는 것으로 볼 수 있다. 이들 정의 공간전하는 산화막 Si내의 소수 캐리어인 전자는 Si와 SiO₂ 계면쪽으로 이동하여 Si의 에너지 밴드를 굽게 만든다. 이와 같이 Si와 SiO₂ 계면에 모이는 전자의 수는 산화막내의 정의 공간전하량에 비례하고 Si와 SiO₂ 계면에 모인 전자를 Si의 내부로 밀어내기 위해서는 게이트 전극에 부의 극성을 인가하여야 한다. 한편, 산화막의 두께가 증가할수록 곡선은 부방향으로 이동하고 있다. 이것은 산화막의 두께가 증가할수록 방사선이 조사되는 단면적이 증가하여 생성되는 전자 및 정공 쌍의 수가 증가하였기 때문으로 사료된다.



(C) Oxide Thickness 80[nm]

그림 3.1 C-V 특성의 Co^{60} - γ 선 조사선량의존성

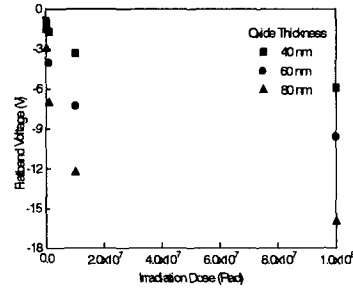
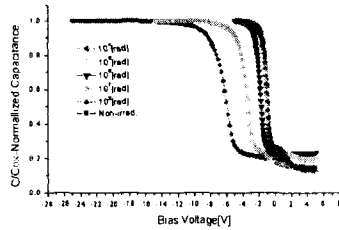
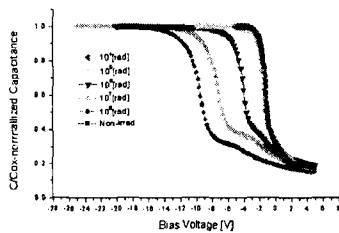


그림 3.2 산화막 두께에 따른 플랫폼 전압의 조사선량 의존성



(a)Oxidethickness40[nm]



(b)Oxidethickness 60[nm]

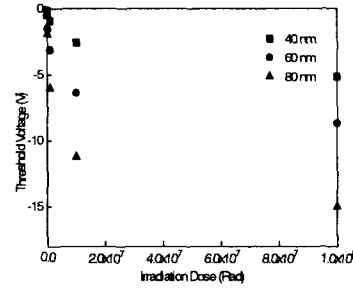


그림 3.3 산화막 두께에 따른 문턱 전압의 조사선량 의존성

2. 유전손실계수-전압(D-V) 특성

그림 3.2는 산화막 두께 60[nm]를 갖는 MOS 커패시터의 조사선량과 전압에 따른 유전 손실의 변화를 나타낸 것이다. 이 특성곡선은 C-V 곡선과 마찬가지로 부방향 이동을 보이고 있으며, 조사선량이 증가할수록 피크 값도 증가하는 경향을 보여주고 있다.

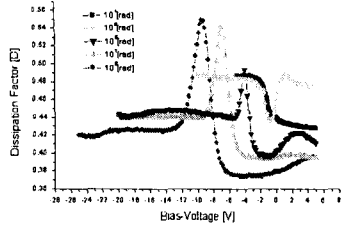


그림 3.4 D-V 특성의 방사선 조사선량 의존성 (60[nm])

IV. 결 론

MOS 커패시터와 같은 반도체 소자는 Co^{60} - γ 선과 같은 방사선 환경에서 사용되는 경우가 점점 증가되고 있다. 따라서 방사선이 조사된 MOS 커패시터의 산화막내 전하의 거동 및 Si/SiO₂ 계면에서 전하들의 미시적 거동을 고찰하는 것은 의미 있는 일이다. 본 연구에서는 p-MOS 커패시터에 Co^{60} - γ 를 조사하고 고주파 (1MHz) 정전용량-전압(C-V) 특성을 이용하여 산화막내의 Si/SiO₂ 계면에서 전하의 미시적 거동을 고찰하고 Si/SiO₂ 계면에서의 계면전하밀도 분포를 구하였다. 또한 유전손실계수 측정을 통하여 산화막내의 고정전하 및 가동전하, 계면트랩전하에 대한 미시적 거동을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다. Co^{60} - γ 선에 노출된 P-MOS 커패시터의 방사선 조사 효과는 산화막내에 발생하는 전자-정공쌍의 수치와 Si/SiO₂ 계면에 형성되는 계면트랩 상태에 따라서 변화되는 정도가 달라진다. 산화막 두께 및 방사선 조사선량에 따라 정전용량-전압 특성을 통하여 검토한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째로, C-V 특성곡선은 산화막 두께 및 조사선량이 증가할수록 부방향으로 변위하였다. 두번째로, C-V 특성곡선으로부터 구한 플랫폼 전압은 방사선이 조사되지 않은 것과 비교하였을 때 10^5 [rad]이하의 방사선이 조사된 소자에서는 3[V] 미만의 변위량을 보였고, 10^8 [rad] 이상의 방사선이 조사된 소자에서는 특성곡선의 부방향 이동은 80[nm] 산화막 두께의 경우 14.649 [V]의 값을 보였다. 이러한 특성변화는 산화막내에 발생되어 트랩된 전하의 공간전하효과로 해석된다. 조사선량의 변화에 대하여 측정한 D-V 특성곡선으로부터 공핍상태에서 나타나는 손실 피크가 존재함이 관측되었다. 이들 피크는 Si/SiO₂ 계면 상태와 반도체에 축적되는 캐리어와의 상호작용으로 포획 및 방출의 반복 작용에 의한 것으로 해석하였다. 피크 값은 계면상태분포와 밀접한 관계가 있다. 유전손실계수의 측정법을 이용하면 산화막내의 트랩 전하, 계면 상태를 쉽게 이해할 수 있고 피크

모양을 정량적으로 해석하면 계면트랩 밀도의 분포를 해석할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. C. C Chang & W.C. Johnson, "Frequency and Temperature Tests for Lateral Non-uniformities in MIS Capacitors", IEEE Trans. Electron Devices, ED-24, p. 1249, 1977.
2. J. P. MITCHELL & D. K. WILSON, "Surface Effects on Semiconductor Devices", Bell. Syst. Tech. J., p. 529 1967.
3. J. R. Brews & A. D. Lopez, "A Test of Lateral Non-uniformities in MOS Devices Using Capacitance Curves." Solid State Electron., p. 1267, 1973.
4. H. L. Hughes & R. Giroux, "Space Radiation Affects MOSFET's", Electronics, pp. 58 ~ 60, 1964.
5. E.H. Snow et. al., "Effect of Ionizing Radiation on Oxidized Silicon Surfaces and Planner Devices", Proc. IEEE, 55, p. 1168, 1967.
6. Watanabe, "Radiation Effects in SiO₂/Si Structures", 電子情報通信學會, p. 387, 1987.
7. G. Ong, "Modern MOS Technology", pp. 68 ~ 72, 1984.