

금속-산화막-반도체(MOS) 소자에서의 전자주입에 따른 느린 준위의 전류 응답 특성 연구

최 성 우, 전 현 구, 안 병 철, 노 관 중, 노 용 한
성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터 공학부
경기도 수원시 장안구 천천동 300

The Electron Injection-induced Slow Current Transients in Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors

Sungwoo Choi, Hyungoo Jeon, Byungchul Ahn, Yonghan Roh
Department of Electronic Engineering, Sung Kyun Kwan University
300 Chunchun-Dong, Suwon, Korea 440-746

Abstract

A simple two-terminal cyclic current-voltage(I-V) technique is used to measure the current-transients in MOS capacitors. Distinct charging/discharging currents were measured and analyzed as a function of (1) the hold time, (2) the gate polarity during the FNT electron injection, (3) the injection fluence and (4) the annealing time after the injection had stopped.

Discharging and charging current-transients were strongly dependent upon the conditions for forming the inversion layer and the density of interface traps caused during the FNT electron injection, respectively. Several tentative mechanisms were suggested in the current work.

I. 서론

실리콘 표면과 산화막간 계면 근처는 구조적으로 급격히 변화되는 영역(Structural Transition Layer, STL)으로써 국부적으로 강한 응력의 존재로 인해 상대적으로 취약한 원자간 결합(Si-O, Si-Si 등)을 가져 계면 준위(interface state)와 계면 근처에 많은 트랩을 함유하게 되며^[1,2], 이러한 산화막내 불안정한 결합에 의한 결합 및 실리콘 기판(혹은 게이트 전극)과 산화막의 경계에 존재하는 계면 준위들은 실리콘 기판(혹은 게이트 전극)과 전하교환을 할 수 있게 되어 중성과 정전하를 왕복하는 도너형 준위 및 중성과 부정하를 왕복하는 억셉터형 준위

의 가변전하의 특성을 갖게 되는 것으로 알려지고 있다. 이러한 트랩 혹은 계면준위들은 전하를 교환함에 있어 수 ns 부터 수초에 이르기까지 다양한 시간대에 걸쳐 응답특성이 나타나는 시간 의존성이 관측되어 왔다.^[3,4] 따라서 개념적으로는 응답속도에 따라 빠른 준위(fast state)와 느린 준위(slow state)로 분류할 수 있으며, 소자의 응용 분야에 따라 이들 준위의 시간응답 속도의 개념을 정의할 수 있다. 전하 교환에 의한 전류성분배의 기여가 얼마나 빠르나 하는 것은 전하교환이 가능한 트랩 혹은 준위의 위치가 캐리어를 공급하는 실리콘 표면(혹은 게이트 전극)에서 얼마나 떨어져 있느냐 하는 거리의 함수로 특성 지어 질 수 있기 때문에 일반적으로 계면준위는 빠른 준위, 산화막내 계면 가까이 존재하는 경계영역내 트랩들은 느린 준위로 작용한다^[5].

특히 계면 가까이 존재하는 이상정전하(異常正電荷, Anomalous Positive Charge)는 느린 준위의 대표적인 것으로 그 실체가 아직 명확히 밝혀지지는 않았지만 Si/SiO₂ 계면으로부터 약 30 Å 정도의 산화막내 경계 영역에 존재하여 실리콘 기판과 전자를 주고 받음으로써 그때마다 정전하와 중성을 띄게 되는 성질을 가지고 있어 도너형의 느린준위로 불리며 flatband 전압의 변화를 초래하고, 소자 동작시 발생하는 1/f noise의 원인이 되고 있다고 알려지고 있다^[6,7].

본 논문에서는 전자주입 극성에 따른 도너형의 느린 준위에 의한 전하교환특성 및 전자주입후 시간이 경과함에 따른 변화를 관측함으로써 전하교환의 메카니즘 규명 및 영향을 검토하였다.

II. 소자제작 및 측정방법

금속-산화막-반도체(MOS) 캐패시터의 제작은 n 형의 (100) 결정성장 방향을 갖는 6" 웨이퍼를 이용하였다. 열산화막 성장은 확산로(furnace)를 이용해 800°C에서 80 Å 두께의 전식 실리콘 산화막(SiO₂)을 성장하였고, 질소 분위기에서 열처리를 실시하였다. 게이트 전극은 세도우 마스크를 이용하여 2000 Å 두께의 알루미늄(Al)으로 형성하였으며, 웨이퍼 뒷면의 산화막을 제거한 후 약 1500 Å 두께의 알루미늄을 증착하여 접촉저항을 최소화하였다. 캐패시터의 면적은 $2 \times 10^5 \mu\text{m}^2$ 을 기준으로 평가하였다.

시간 응답특성의 측정은 HP4140B의 pA미터 및 직류 전압원을 포함한 각종 계측기를 조합·구성한 자체 제작된 벤치탑(bench top) 시스템을 이용하여 전압에 따른 정전용량의 변화 및 전류응답 특성을 동시에 측정하였다. 전압 인가 및 전류 측정 방식을 그림.1에 나타내었는데, 음의 최소 전압 조건에서 일정 시간동안 유지시간(hold time, t_h)을 갖게 함으로써 산화막 혹은 계면으로부터 전자가 방출(정전하의 충전)될 수 있도록 한 후 단계적으로 양의 최대 전압까지 전압을 증가시켜 가면서 전류의 변화를 측정하였다(그림.1(b) 참조). 같은 방법으로 양의 최대 전압에서도 대칭되는 유지시간을 줄으로써 정전하가 방전될 수 있도록 한 후 전압을 단계적으로 음의 최소 전압까지 감소 시키며 전류의 변화를 측정하였다⁶⁾.

전류-전압특성의 측정중에는 음과 양의 최대전압을 $\pm 4.5\text{MV/cm}$ 이내로 유지하여 Fowler-Nordheim tunneling에 의한 전자주입 및 새로운 트랩의 생성이 진행되지 않도록 하였으며, 유지시간별 전류응답의 의존성 측정시를 제외하고는 느린 준위에 의한 시간 응답 특성의 측정을 위한 지연 시간은 400ms, 유지시간(t_h)은 5초, 단계별 전압의 증가(voltage step size, V)는 40mV로 하였다.

III. 결과 및 토의

n 형 웨이퍼 위에 확산로로 성장시킨 80 Å 두께의 MOS 캐패시터에 대한 지연시간 및 유지시간별 측정결과를 그림.2에 나타내었다. 전압증가후 지연시간이 길어짐에 따라 반응전류는 감소하며, 유지시간이 길어질수록 반응전류는 더욱 음의 전압측에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 특히 짧은 유지시간임에도 불구하고 빛을 조사해 주었을 경우에는 가장 긴 유지시간보다 항상 먼저 전류의 반응이 관측되었는데 이로 미루어 산화막내 이상정전하의 충전(charging) 및 방전(discharging)에 의한 전류는 반전층

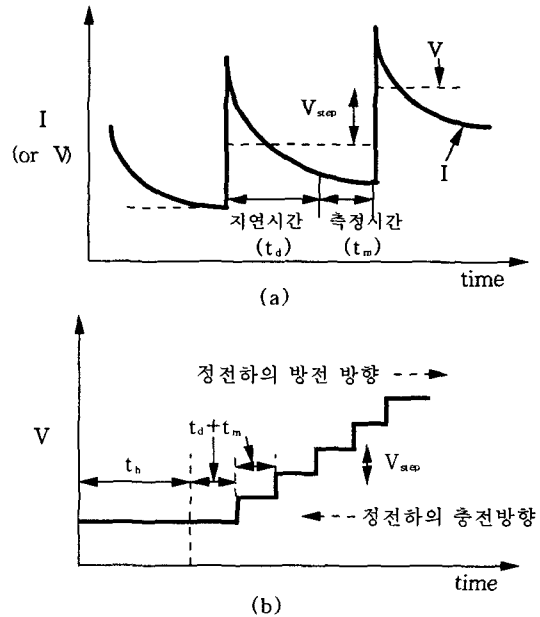


그림.1 느린 준위에 의한 전류성분 측정을 위한 계단식 전압인가 방식 : (a) 순간전류의 형태와 측정위치 (b) 단계적 전압인가 방식

(inversion layer)의 형성과 밀접한 관계가 되고 있음을 나타내고 있다. 즉, 빛을 조사하여 줄으로써 실리콘내 소수캐리어(minority carrier)의 증가를 야기시켜 반전층의 형성을 용이하게 해줄 때와 유지시간을 길게해 줄으로써 반전층의 형성을 지원하게 되면 이상정전하의 방전에 의한 전류가 더욱 일찍(즉, 더욱 음의 쪽) 발생되고 있는 것이 관측되었다. 그러나 어떠한 경우에도 반응전류의 중단시점은 동일한 시점, 즉 약한 반전층(weak inversion) 영역에서 나타났다. 이러한 관점에서 보면 초기에 나타나는 순방향의 방전전류는 반전층 형성을 위한 소수캐리어(정공)의 이동에 의한 전류로 보이는데 유지시간을 충분히 길게 하여 주면 이 전류성분은 거의 관측되지 않았다.

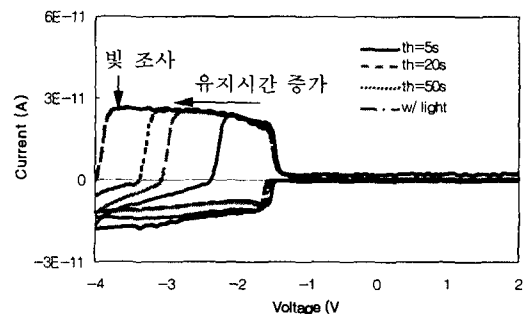


그림.2 유지시간(t_h) 및 빛의 조사에 따른 방전 및 충전 전류반응 특성

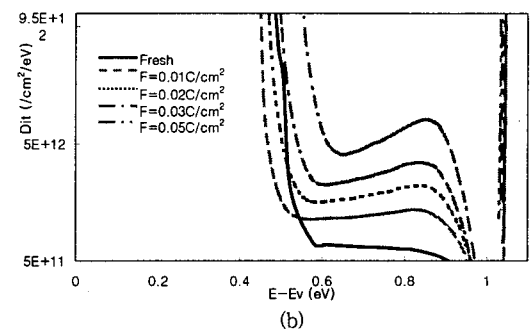
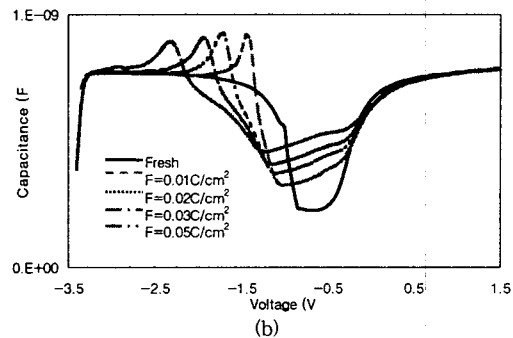
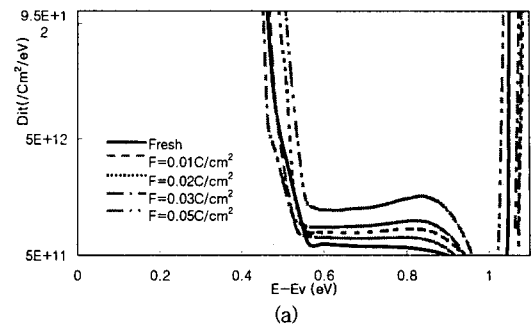
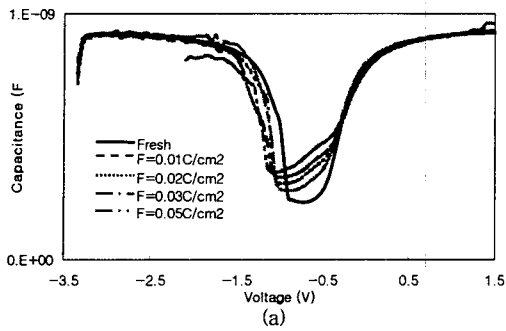


그림3 전자주입 극성 및 주입량에 따른 전압-정전용량의 변화 : (a) 실리콘 기판에서의 전자주입 (b) 게이트 전극에서의 전자주입

그림4 게이트전극에서의 전자주입(0.05C/cm²) 시 주입량에 따른 계면준위의 변화 : (a) 실리콘기판 전자주입 (b) 게이트 전극 전자주입

전자주입 극성별 Quasi-Static(QS) 전압-정전용량의 변화 및 Si/SiO₂ 계면에 발생한 계면준위 밀도(D_i)를 각각 그림3 과 그림4 에 나타냈는데, 게이트 전극으로부터 전자를 주입했을 경우에 더욱 심한 전압-정전용량 곡선의 이동현상 및 왜곡현상, 즉 정전용량(dQ/dt)의 이상 증가 현상이 관측되었고, 계면준위 밀도의 증가도 두드러지게 나타났다. 정전용량의 왜곡 현상은 전자주입에 의해 생성(강화)된 산화막내 정전하가 실리콘 기판으로부터의 전자 터널링에 의해 방전되어 중성화 됨으로써 실리콘 표면에서의 정공 축적이 순간적으로 증가하기 때문인 것으로 보인다.

그림5 는 전자주입 극성별로 전자주입량에 따른 전류-전압특성 변화를 보여 주는 것으로 최대 충전 및 방전 전류의 발생시점이 정전용량 왜곡시점과 일치하는 경향을 보인다. 즉, 전자주입량이 증가할 수록 충전 전류 발생영역은 더욱 음의 방향으로 이동하고, flatband 전압도 함께 음의 방향으로 이동되는 것이 관측되었다.

전자주입전에는 극성에 관계없이 이상정전하의 빠른 방전(fast discharging) 및 느린 충전(slow charging)의 공통적 특징을 보였으나, 전자주입후에는 충전시에도 빠른 전류 응답 특성을 보이는 경향이 점차 뚜렷해지고 있음을 알 수 있었다. 특히, 그림5 의 (b) 에 나타낸 게이트

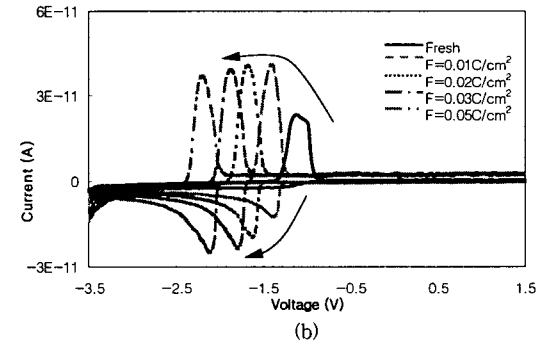
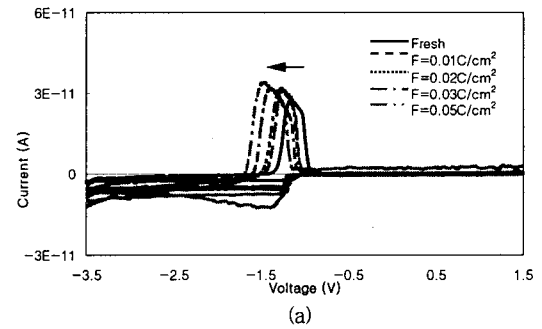


그림5 전자주입 극성별 주입량에 따른 전류-전압특성 곡선: (a) 실리콘기판 전자주입 (b) 게이트 전극 전자주입

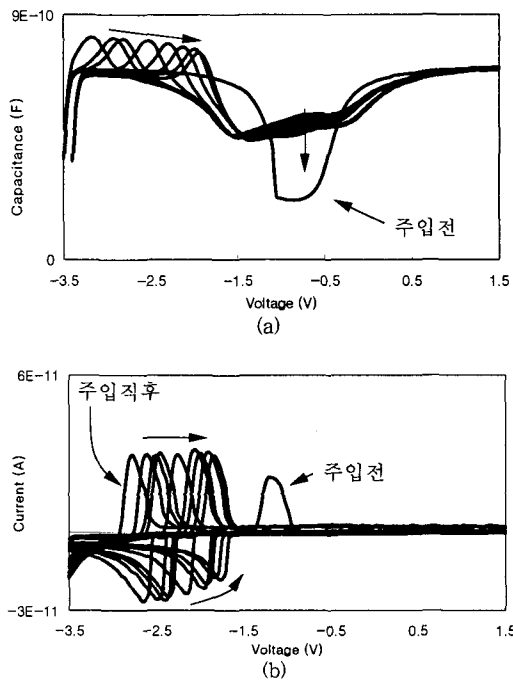


그림 6 게이트 전극에서 전자주입(0.1C/cm) 후 상온방치(0.5~454 시간) 시 전압-정전용량 및 전압-전류 특성 곡선. (→표는 방치시간의 증가방향)

전극에서의 전자주입후 양의 최대전압에서 음의 방향으로 이동하며 측정된 이상정전하의 충전전류를 보면, 계면 준위 증가에 따라 더욱 빠른 전류응답 특성을 보이며 최대전류의 크기가 증가되고 있는 것으로 보아 적어도 계면 준위가 산화막내 이상정전하와 실리콘내 캐리어간에 전하 교환의 통로역할을 하고 있다고 사료된다.

그림 6 은 게이트 전극에서 전자주입후 상온방치 시간에 따른 전류-전압특성 곡선의 변화를 측정한 결과로서, 시간경과시 점차 전자주입전 상태로 복구되는 현상을 보인다. 이는 전자주입에 의해 포획되었던 산화막내 정전하 및 계면준위가 어닐링되어 감소되면서 전자주입 때와는 반대방향으로 실리콘 표면의 전위를 변화시킴으로써 전류 응답 특성의 변화를 초래하기 때문으로 사료된다.

또한, 전자주입량 증가시와 전자주입후 시간경과에 따른 의존성에서 나타난 응답 전류의 반응은 매우 유사한 결과를 보이는데, 이상정전하의 방전시에는 일정한 수준의 최대전류를 유지하고 있는 반면, 충전시에는 크기가 증가 혹은 감소하는 경향이 계면준위 밀도의 증감 경향과 일치함으로써 충전시에는 계면준위를 거치지 않고 직접 터널링에 의한 전하교환이 주를 이루고, 방전시에는 계면준위를 거치는 간접 터널링의 지배를 받는 것으로 보인다.

IV. 결론

산화막내 존재하는 이상정전하(느린 준위)에 의한 방전 및 충전전류 발생 수준을 양방향 전류-전압특성 측정 기술을 이용하여 임의의 지연시간, 유지시간을 선택하여 평가 할 수 있었다. 전자주입량에 따른 특성 측정 결과, 방전과 충전 전류의 변화 형태가 서로 달라 전하교환의 성격이 상이함을 알 수 있었다. 즉, 방전전류는 반전층(inversion layer)의 형성시점과 밀접한 관련이 있으며 전압-정전용량 특성곡선 상의 왜곡을 초래하고, 충전전류는 계면준위의 증가에 따라 빠른 응답특성을 갖게 되는 동시에 반응전류의 크기도 증가되는 것으로 미루어 계면준위가 전하교환의 직접적 통로가 되고 있음을 확인할 수 있었다. 전자주입후 방치시간 의존성을 관측한 결과 충전과 방전전류 공히 전자주입전 상태로 회복되는 경향을 보여 산화막내 정전하의 상온 어닐링에 의한 감소 경향을 확인할 수 있었으며, 특히 충전전류의 경우 전류의 크기가 방치시간에 따라 점차 감소하면서 회복되는 경향을 보여 계면준위의 감소경향과 일치하였다.

참고문헌

- [1] Y.Roh., "New model of a common origin for trapped holes and anomalous positive charge in MOS capacitors", Elsevier Sci., p.227, 1993
- [2] A.J.Lelis, et al., "Reversibility of Trapped hole annealing", IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.35, no.6, 1988
- [3] Ze-Qiang Yao, Sima Dimitrijević, et al., "Slow current transients in metal-oxide-semiconductor capacitors", Appl.Phys.Lett., Vol.66, No.19, 1995
- [4] K.G.Druijff, et al., "Slow states in vacuum ultraviolet irradiated metal-oxide-silicon systems", J.Appl. Phys., Vol.79, no.3, 1996
- [5] K.G.Druijff, et al., "Charge exchange mechanisms of slow states in the Si/SiO₂", Microelectronic Engineering 22, p.231, 1993
- [6] Joseph F.Stephany, "A theory of 1/f noise", J.Appl. Phys., 83, p.3139, 1998
- [7] T.L.Meisenheimer and D.M.Fleetwood, "Effect of radiation-induced charge on 1/f noise in MOS devices", IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.37, no.6, 1990
- [8] P.Tanner, S.Dimitrijević and H.B.Harrison, "Technique for monitoring slow interface trap characteristics in MOS capacitors", Electronics Letters, Vol.31, No.21, 1995