

Avalanche 주입에 따른 dry oxide와 wet oxide의 캐리어 트랩핑에 관한 연구

A study on the carrier trapping characteristics of the dry and wet oxide films under the avalanche injection

정경호*, 정양희*, 박영걸*
(Kyung-Ho Chung, Yang-Hi Chong, Yong-Guol Park)

요 약

본 연구에서는 dry oxide 와 wet oxide로 MOS capacitor를 제작하여 avalanche 전자주입 실험으로 산화막의 캐리어 트랩핑특성을 조사하였다.

dry oxide에서는 avalanche 전자주입 시 전자 trapping이 주도적으로 일어났다. wet oxide에서는 주입 초기에 전자 trapping이 주도적이다가 hole trapping이 주도적으로 바뀌게 되는 turn-around 현상이 일어났다. 주입시간이 길어지면 다시 전자 trapping이 주도적으로 되는 또 한번의 turn-around 현상이 일어났다.

산화막의 트랩 parameter를 결정하기 위해 실험결과를 기초로 하여 종류가 다른 여러 트랩을 가지는 계에 대한 캐리어 트랩핑 이론식을 세워서 실험결과와 curve-fitting한 결과 실험치와 잘 일치하는 곡선을 얻었다.

Abstract

The MOS capacitors with the dry oxide and the wet oxide are fabricated to investigate the carrier trapping due to the avalanche injection of electrons.

The carrier trapping in the oxide depends on the oxidation conditions under the avalanche injection of electrons. Electron trapping occurs dominantly in the dry oxide. For the wet oxide, during the avalanche injection of electrons electron trapping occurs dominantly in the first stage but positive charge generation takes over in the next stage, Showing so called turn-around phenomenon. When the injection time is prolonged, the turn-around phenomenon occurs once more.

Based on the experimental results, the carrier trapping model for system having multiple traps is proposed and is fitted with experimental data in order to determine trap parameters of the dry oxide and the wet oxide.

1. 서 론

최근의 VLSI 반도체 산업에서 소자 크기가

감소하고 얇은 게이트 산화막을 사용함에 따라 MOSFET에서의 transconductance 감소, threshold voltage shift와 같은 소자의 퇴화가 소자 신뢰성에 영향을 주는 심각한 문제로 대두되어 왔다. [1, 2]

MOS capacitor 구조는 열적으로 성장된 산화막의 트랩핑 특성연구에서 매우 편리하고 유용

*: 인하대학교 전자재료공학과
接受日字: 1992年 9月 21日

한 구조이다. 소자의 퇴화는 trap center에 hot carrier가 트랩됨으로서 야기된다. 이들 trap center는 소자 공정과정중에 형성된 trap center 뿐만 아니라 산화막 내로 주입된 전하에 의해 생성되기도 한다.^[3] 따라서 MOS capacitor의 트랩핑 특성연구에서 전하를 Si 기판으로부터 SiO₂막으로 avalanche 주입시키는 방법이 매우 효과적이다.

본 연구에서는 dry oxide와 wet oxide를 갖는 MOS capacitor를 제작하여 avalanche 전자 주입에 따른 캐리어 트랩핑특성을 조사하였으며, capacitance방법을 이용하여 flatband voltage shift (ΔV_{FB})를 측정하였다. 산화막의 트랩특성을 조사하기 위해서는 포획단면적과 트랩밀도를 알아야 하므로 여러 종류의 트랩을 가지는 계에 대한 트랩핑모델을 제시하고 이를 감쇠 최소자승법으로 curve-fitting하여 트랩 parameter를 결정하였고 이를 토대로 산화막에서의 전자 trap과 전하 생성과의 관계를 추론하였다.

2. 전하생성에 관한 이론

Avalanche 주입방법으로 전하를 산화막 속으로 주입하면 막 내에는 양전하와 음전하가 생성되는데 그 생성기구를 다음과 같이 modeling 하여 생성된 전하량을 계산할 수 있다.

양전하는 산화막으로 주입된 전자가 전자를 포획하고 있는 trap과 충돌하여 전자를 detrapping시키든가 또는 band-to-band impact ionization에 의해 생긴 electron-hole쌍의 hole을 포획하여 발생하는데, 어느 경우이나 생성된 양전하는 주입된 전자의 수에 의존하며 한 전자에 의해 단위 길이당 양전하가 발생하는 비율을 α 로 표시하면 시간 t 에 생성되는 양전하 Q_p 는 다음과 같이 표시된다.

$$Q_p = \alpha T_{ox} \int J_n dt = \alpha T_{ox} Q_{i,n,i} \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 J_n 은 주입전류 밀도, T_{ox} 는 산화막의 두께, $Q_{i,n,i}$ 는 주입전하이다. 위의 coulombic center는 다시 전자를 포획할 것으로 기대된다. 이러한 coulombic center에 포획되는 전자밀도를 n_T 라 할 때

$$\frac{dn_T}{dt} = \frac{J_n \sigma_n}{q} \left[\frac{Q_p}{q} - n_T \right] \dots \dots \dots (2)$$

이 성립한다. 여기에서 σ_n 은 양으로 대전된 Coulombic center에 의한 전자의 포획 단면적이다. (1)식을 쓰면 (2)식은

$$\frac{dn_T}{dt} = \frac{J_n \sigma_n}{q} \left[\frac{\alpha T_{ox} Q_{i,n,i}}{q} - n_T \right] \dots \dots \dots (3)$$

이된다. (3)식의 해는

$$n_T = \exp \left[- \frac{\sigma_n}{q} \int J_n dt \right] \cdot \left[\frac{\sigma_n \alpha T_{ox}}{q^2} \int Q_{i,n,i} \right] \cdot \exp \left(\frac{\sigma_n}{q} \int J_n dt \right) J_n dt + C \dots \dots \dots (4)$$

가 되며 초기조건 $t=0$ 일 때 $n_T=0$ 을 쓰면,

$$n_T = \frac{\alpha T_{ox}}{\sigma_n} \left[\frac{\sigma_n Q_{i,n,i}}{q} + \exp \left(- \frac{\sigma_n Q_{i,n,i}}{q} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (5)$$

를 얻는다. 위의 두 과정에서 얻은 양의 총전하 $Q_{p,Tot}$ 는 다음과 같다.

$$Q_{p,Tot} = Q_p - qn_T = \frac{\alpha T_{ox} q}{\sigma_n} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma_n Q_{i,n,i}}{q} \right) \right] \dots \dots \dots (6)$$

위의 양전하 발생에 관한 것 이외에 이미 존재하고 있는 전자 trap과 새로 생성되는 trap에 의한 전자의 포획을 고려해야 한다. 이미 존재하고 있는 neutral electron trap밀도를 $N_{s,t1}$ 로 하고 이들 중 음으로 대전된 trap밀도를 n_{s1} 라 할 때 n_{s1} 는 다음식을 만족한다.

$$\frac{dn_{s1}}{dt} = \frac{J_n \sigma_{s1}}{q} \left[N_{s,t1} - n_{s1} \right] \dots \dots \dots (7)$$

여기에서 σ_{s1} 는 전자 trap의 포획 단면적이다. 초기조건 $t=0$ 에서 $n_{s1}=0$ 을 쓰면 (7)의 해는

$$n_{s1} = N_{s,t1} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma_{s1} Q_{i,n,i}}{q} \right) \right] \dots \dots \dots (8)$$

가 된다. 그리고 막내에 이미 존재하는 포획 단면적이 다른 또 하나의 neutral electron trap 밀도를 $N_{s,t2}$ 라 하고 이들 중 음으로 대전된 트랩밀도를 n_{s2} 라고 할 때 하나의 식을 더 얻을 수 있다.

$$n_{s2} = N_{s,t2} \left[1 - \exp \left(- \frac{\sigma_{s2} Q_{i,n,i}}{q} \right) \right] \dots \dots \dots (9)$$

한편 avalanche injection에 의해 새로운 neutral electron trap이 생성될 것이 기대되며 이것에 전자가 포획된다. 이러한 과정에서 포획되는 전자밀도 n_s 는

$$n_s = RQ_{i,nj} \dots\dots\dots (10)$$

으로 표시되며 R은 새로이 발생하는 neutral electron trap에 의한 음전하의 발생률을 표시한다. 위의 4가지 과정에서 얻어지는 총 전하량 Q_{Total} 은

$$Q_{Total} = Q_p - qn_T - qn_{s1} - qn_{s2} - RQ_{i,nj} = Q_{PTot} - qn_{s1} - qn_{s2} - RQ_{i,nj} \dots\dots\dots (11)$$

로 표시되며 (11) 식으로 부터 Avalanche주입에 따른 flatband 전압의 변화 ΔV_{FB} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta V_{FB} = - \left[\frac{\bar{x}_+}{\epsilon_o \epsilon_s} Q_{PTot} - \frac{\bar{x}_-}{\epsilon_o \epsilon_s} (qn_{s1} + qn_{s2} + RQ_{i,nj}) \right] - \frac{\bar{x}_+ \alpha T_{ox} q}{\sigma_n \epsilon_o \epsilon_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n Q_{i,nj}}{q}\right) \right] + \frac{\bar{x}_- q N_{s,t1}}{\epsilon_o \epsilon_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_n Q_{i,nj}}{q}\right) \right] + \frac{\bar{x}_- q N_{s,t2}}{\epsilon_o \epsilon_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{s2} Q_{i,nj}}{q}\right) \right] + \frac{\bar{x}_-}{\epsilon_o \epsilon_s} RQ_{i,nj} \dots\dots (12)$$

여기에서 \bar{x}_+ 와 \bar{x}_- 는 각각 양전하 및 음전하의 charge centroid이다. \bar{x}_+ 와 \bar{x}_- 를 구하기 위해서, constant current stress를 인가할 때의 gate 전압변화 (ΔV_{FB})와 flatband 전압변화(ΔV_{FB})를 생성된 전하량 Q_s , Q_i 및 그 charge centroid \bar{x}_+ , \bar{x}_- 로 표시하면 다음과 같다. (4)

$$\Delta V_{FN}^s = -(Q_s^s \bar{x}_+^s - Q_i^s \bar{x}_-^s) / \epsilon_{ox} \dots\dots\dots (13)$$

$$\Delta V_{FN}^g = -(Q_s^g (T_{ox} - \bar{x}_+^g) - Q_i^g (T_{ox} - \bar{x}_-^g)) / \epsilon_{ox} \dots\dots (14)$$

$$\Delta V_{FB}^s = -(Q_s^s \bar{x}_+^s - Q_i^s \bar{x}_-^s + qN_{it}^s T_{ox}) / \epsilon_{ox} \dots\dots (15)$$

$$\Delta V_{FB}^g = -(Q_s^g \bar{x}_+^g - Q_i^g \bar{x}_-^g + qN_{it}^g T_{ox}) / \epsilon_{ox} \dots\dots (16)$$

첨자 s, g는 각각 substrate injection, gate injection을 표시한다. Q_s , Q_i 는 단위 면적당 양·음전하 밀도이며, \bar{x}_+ , \bar{x}_- 는 gate로부터 측정된 양·음전하의 centroid이다. T_{ox} 는 SiO₂막의 두께, ϵ_{ox} 는 SiO₂막의 유전율, qN_{it} 는 interface charge의 변화를 표시한다. charge centroid를 구하기 위해 stress를 가했을 때, 양전하 발생이 우세한 것에 착안하여 적은 $Q_{i,nj}$ 에 대해 $Q_{i,nj}^s=0$, $N_{it}^s=0$ 로 놓고 (14), (16) 식을 풀면

$$x_s^g = T_{ox} / (1 + \Delta V_{FN}^g / \Delta V_{FB}^g) \dots\dots\dots (17)$$

이 된다.

3. 시료 및 실험방법

본 연구에서는 (100)인 P형 실리콘 웨이퍼에 boron을 ion implantation시켜 substrate 농도가 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 이 되게 하였다. 두께가 500 Å, 700 Å, 1000 Å인 wet oxide와 두께가 430 Å, 700 Å, 1000 Å인 dry oxide를 만들어 MOS capacitor를 제작하였다. MOS capacitor의 전극은 LPCVD 법으로 polysilicon을 2000 Å 증착하고 POCl₃로 도핑한 후 dot mask를 써서 photolithography 법으로 만든 polysilicon gate이다.

본 연구에서 사용한 게이트 전극 면적은 $1 \times 10^{-2} \text{cm}^2$ 이다. EG&G PAR사의 model 124A인 lock-in amplifier를 이용하여 avalanche주입 전후에 MOS capacitor의 high frequency C-V를 측정하였으며 voltage ramp 방법을 이용하여 quasi-static C-V도 측정하였다.

Avalanche 주입을 하기 위해서 WAVETEK사의 model 148A를 이용하여 210KHz 주파수를 갖는 sine파형을 TELEDYNE PHILBRICK 1022 증폭기로 증폭시켜 MOS capacitor에 가했다. V_{pp} 는 avalanche 주입하기 시작하여 산화막을 통해 흐르는 주입된 dc 전자전류를 일정하게 유지시키기 위해 19(V)~23(V)사이에서 변화시켰다.

Avalanche 전자주입을 한 다음에 flatband 전압변화를 측정하기 위해 고주파 C-V를 측정하고 다시 avalanche 전자주입을 하고 C-V를 측정하는 식으로 실험을 반복하였다. 실험결과 C-V곡선을 얻기 위해 전자주입을 중단할 때 생기는 영향은 거의 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 실험결과 및 고찰

dry oxide와 wet oxide에서 avalanche 주입 시간에 따른 flatband 전압 변화량을 측정된 결과가 그림 1, 2 이다. 이 실험 결과를 종류가 다른 여러가지 트랩을 가지는 계에 대해 세운 캐리어 트랩핑 이론식 (12)와 curve fitting하므로써 트랩 파라미터인 트랩센터의 포획 단면적 σ 와 그것의 트랩밀도 N을 결정하였다.

1. dry oxide인 경우

(17) 식을 이용하여 x_s^g 를 구한 결과, 430 Å, 700 Å, 1000 Å 시료의 x_s^g 는 251 Å, 450 Å,

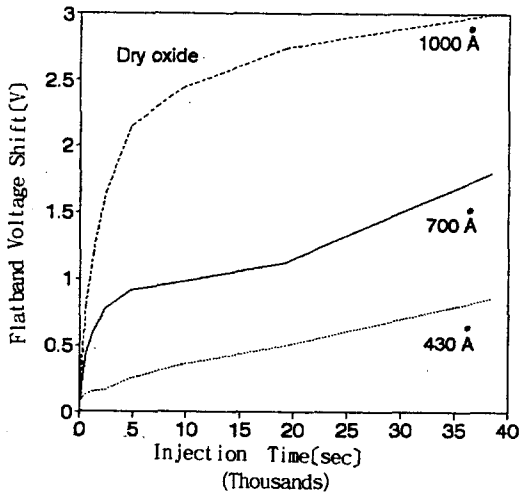


그림 1 주입 시간에 따른 flatband 전압변화
Fig. 1 Flatband voltage shift as a function of injection time

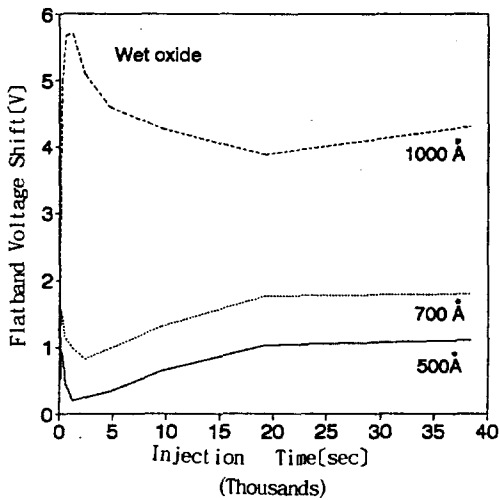


그림 2 주입 시간에 따른 flatband 전압변화
Fig. 2 Flatband voltage shift as a function of injection time

표 1 Avalanche 주입하에서의 트랩의 포획 단면적 및 트랩밀도

Table 1 Capture cross section and trap densities under Avalanche injection of electrons.

dry oxide thickness		430 Å	700 Å	1000 Å
Trap 1	N_1 [cm ⁻²]	1.680×10^{11}	6.367×10^{11}	9.551×10^{11}
	σ_1 [cm ²]	8.003×10^{-18}	1.236×10^{-18}	1.851×10^{-18}
Trap 2	N_2 [cm ⁻²]	2.351×10^{12}	1.963×10^{12}	1.171×10^{12}
	σ_2 [cm ²]	1.311×10^{-20}	1.123×10^{-20}	5.122×10^{-20}
Trap 3	N_3 [cm ⁻²]	2.494×10^{10}	5.497×10^{10}	3.323×10^{11}
	σ_3 [cm ²]	2.032×10^{-19}	1.231×10^{-19}	5.083×10^{-20}
Generation Factor		1.103×10^{-9}	4.324×10^{-9}	2.905×10^{-9}

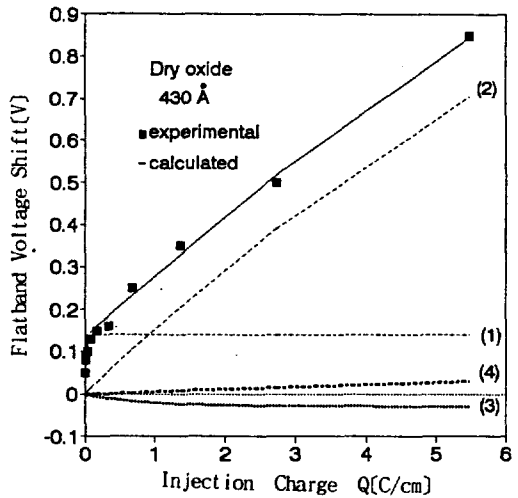


그림 3 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
Fig. 3 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

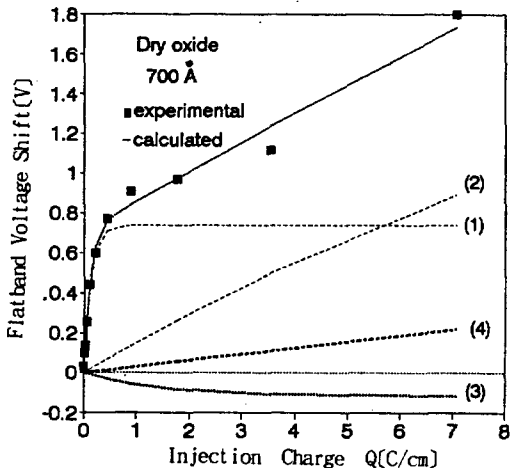


그림 4 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
Fig. 4 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

529 Å 이었다.

그림 1의 flatband 전압의 변화를 이론식 (12)에서 구한 이론곡선과 실험곡선을 curve fitting하여 그림 3, 4, 5에 표시하였다. 그림 3, 4, 5에서 (1)과 (2)는 산화막 내에 이미 존재하는 전자 trap에 포획되는 음전하를 표시한다. dry oxide에서 curve fitting의 결과로 얻어지는 트랩의 밀도 및 포획단면적을 정리한 것이 표 1이다. (3)은 홀 트랩을 보여 준다. 주입된 전자가 산화막을 거쳐 게이트 속으로

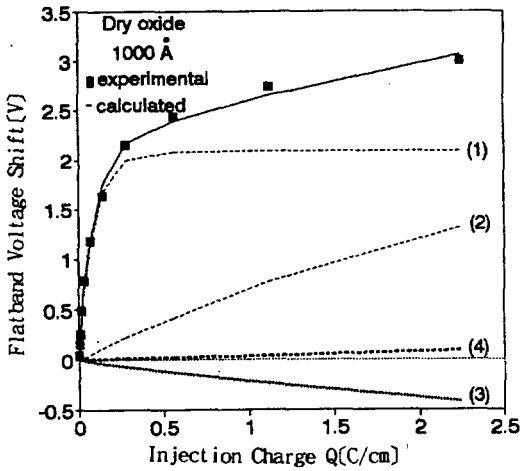


그림 5 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
 Fig. 5 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

들어가는 동안 impact ionization을 통해 electron-hole pair (EHP)를 생성한다. 생성된 홀은 산화막으로 주입되고 이 주입된 홀이 트랩되어 flatband 전압의 변화량을 음(-) 값으로 나타낸다. 이것이 그림 3, 4, 5의 (3)으로 나타나 있다. 또한 그림에서 (4)는 새로이 생성된 전자트랩을 의미한다.

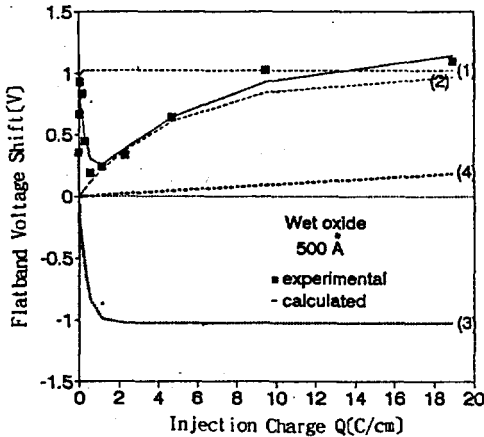


그림 6 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
 Fig. 6 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

2. wet oxide인 경우

(17) 식의 x, θ 를 구한 결과 500 Å, 700 Å, 1000 Å 시료의 x, θ 는 294 Å, 560 Å, 600 Å 이었다.

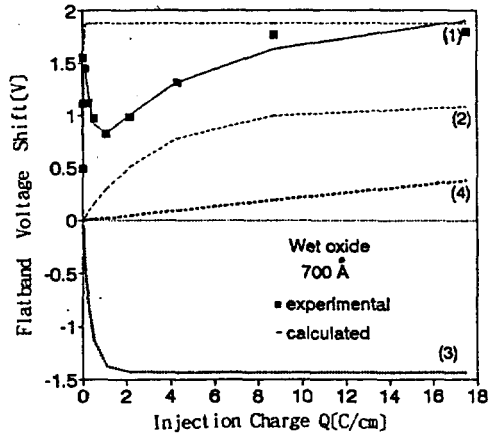


그림 7 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
 Fig. 7 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

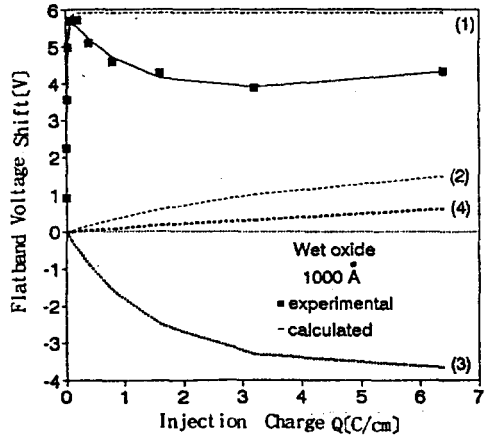


그림 8 실험값과 이론적 curve fitting값에 대한 flatband 전압변화 비교
 Fig. 8 Comparison of flatband voltage shift for experimental data and theoretical curve fitting

그림 2의 flatband 전압의 변화를 이론식 (12)에 대입하여 계산한 이론곡선과 실험곡선을 curve fitting한 것이 그림 6, 7, 8이다. 그림 6, 7, 8에서 알 수 있듯이 avalanche 전자주입에 따라서 주입초기에는 electron trapping이 주도적으로 일어나고 시간이 경과하면 hole trapping에 의한 양전하의 축적이 주도적으로 일어나는 turn-around 현상을 나타낸다. 전자주입이 더 증가하면 전자 트랩핑이 다시 주도적으로 일어나는 또 한번의 turn-around이 일어나서 증가하다 거의 포화되는 것을 볼 수 있다. 그림에서 보면 이론곡선과 실험곡선이 잘 일치하고 있다.

그림에서 (1)은 산화막 내에 이미 존재하는 electron trap을 보여준다. 이것은 표 2에서 Trap 1의 포획단면적 σ_1 으로서도 알 수 있다. dry oxide에서와 마찬가지로 (4)는 새로이 생성된 전자트랩을 나타내고 (3)은 홀 트랩을 의미한다.

그림 3, 4, 5와 그림 6, 7, 8을 비교해 보면 같은 두께에서의 홀 트랩에 의한 flatband 전압의 변화가 wet oxide에서 더 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 계면상태가 donor type임을 의미한다. [5, 6]

표 2 Avalanche 주입하에서의 트랩의 포획 단면적 및 트랩밀도

Table 2 Capture cross section and trap densities under Avalanche injection of electrons.

wet oxide thickness		500 Å	700 Å	1000 Å
Trap 1	$N_t[\text{cm}^{-2}]$	1.069×10^{12}	2.890×10^{12}	3.178×10^{12}
	$\sigma_1[\text{cm}^2]$	7.036×10^{-18}	5.898×10^{-18}	7.157×10^{-18}
Trap 2	$N_t[\text{cm}^{-2}]$	1.042×10^{12}	1.677×10^{12}	1.001×10^{12}
	$\sigma_2[\text{cm}^2]$	3.221×10^{-20}	4.618×10^{-20}	3.898×10^{-20}
Trap 3	$N_t[\text{cm}^{-2}]$	7.551×10^{11}	5.515×10^{11}	1.334×10^{12}
	$\sigma_3[\text{cm}^2]$	4.535×10^{-19}	4.542×10^{-19}	1.108×10^{-19}
Generation Factor		1.627×10^{-9}	5.378×10^{-9}	8.426×10^{-9}

5. 결 론

avalanche 주입에 따라 산화막 내에 생성되는 전하에 관한 이론식을 세우고 이것을 실험 결과와 curve fitting하므로써 산화막 내에 분포하는 carrier trap 밀도 및 포획단면적을 결정할 수 있었다.

avalanche 전자주입에 따른 캐리어 트랩핑특성은 산화막에 따라 다음과 같은 관계를 갖는다.

1) dry oxide인 경우: 주입전하량에 따라서 ΔV_{FB} 가 증가하고 (+)shift를 나타내어 전자 trapping이 주도적임을 알 수 있다.

2) wet oxide인 경우: 초기에는 전자 trapping이 주도적이고 나중에는 hole trapping이 주도적으로 일어나는 turn-around 현상이 일어났다. 주입시간이 길어지면 다시 전자 trapping이 주도적으로 되는 또 한 번의 turn-around 현상이 일어났다.

3) curve fitting을 통해 결정된 dry oxide와 wet oxide에서의 각 트랩의 포획단면적과 트랩의 밀도는 표 1, 표 2와 같다.

※본 논문은 1992년도 인하대학 교내연구비로 지원되었음

References

- R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H. N. Yu, N. L. Rideout, E. Bassous, and A. R. LeBlanc, "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions", J. Solid State Circuits, SC-9, 256(1974)
- Y. Hayafuji and Kajiwara, "Nitridation of Silicon and Oxidized-Silicon", J. Electrochem. Soc. 129, 2102(1982)
- E. H. Nicollian and J. R. Brews, "MOS Physics and Technology", Wiley and Sons, New York, 532(1982)
- P. Fazan, M. Dutoit, C. Martin and M. Ilegems, "CHARGE GENERATION IN THIN SiO₂ POLYSILICON-GATE MOS CAPACITORS", Solid-State Electronics Vol. 30, 829(1987)
- M. V. Fischetti and B. Ricco, "Hot electron induced defects at the Si-SiO₂ interface at high fields at 295 and 77K", Appl. Phys., 57, 2854(1985)
- W. L. Warren and P. M. Lernerhan, Appl. Phys. Lett., 49, 1296(1986)

著者紹介



정경호
1963년 3월 11일생. 1989년 인천대학교 전기공학과 졸업. 1992년 인하대학교 응용물리학과 졸업(석사)



박영길
1929년 3월 7일생. 1952년 2월 서울대학교 응용물리학과 졸업. 1974년 2월 인하대학교 응용물리학과(이학박사). 1993년 현재 인하대학교 응용물리학과 교수.