

## Fluorine 주입에 따른 NMOSFET의 소자 특성 연구

권성규<sup>1</sup>, 권혁민<sup>1</sup>, 이환희<sup>1</sup>, 장재형<sup>1</sup>, 곽호영<sup>1</sup>, 고성용<sup>2</sup>, 이원묵<sup>2</sup>, 이성재<sup>1</sup>, 이희덕<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 전자전파정보통신공학과

<sup>2</sup> DMS

### Analysis of Device Characteristics of NMOSFETs on Fluorine Implantation

Sung-Kyu Kwon<sup>1</sup>, Hyuk-Min Kwon<sup>1</sup>, Hwan-Hee Lee<sup>1</sup>, Jae-Hyung Jang<sup>1</sup>,  
Ho-Young Kwak<sup>1</sup>, Sungyong Go<sup>2</sup>, Weon-Mook Lee<sup>2</sup>, Song-Jae Lee<sup>1</sup>, and Hi-Deok Lee<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup> DMS Co. Ltd., Suwon 443-803, Korea

(Received November 4, 2011; Revised November 24, 2011; Accepted December 24, 2011)

**Abstract:** In this paper, we investigated the device performance on fluorine implantation, hot carrier reliability and RTS (random telegraph signal) noise characteristics of NMOSFETs. The capacitance of the fluorine implanted NMOSFET decreased due to the increase of the gate oxide thickness. RTS noise characteristics of the fluorine implated NMOSFET was improved approximately by 46% due to the decrease of trap density at Si/SiO<sub>2</sub> interface. The improved gate oxide quality also results in the longer hot carrier life time.

**Keywords:** Hot carrier, Low frequency noise, RTS noise, Fluorine implantation

### 1. 서론

CMOSFET (complementary metal oxide semiconductor field effect transistor) 소자의 지속적인 scaling down에 의해 IC (integrated circuit) 칩의 집적도가 증가해 왔으며, 그 결과 아날로그 소자와 디지털 소자가 집적화된 아날로그/믹스드 신호 (analog/mixed signal), 나아가 memory 소자까지 집적한 system on chip (SOC) 기술 또한 가능하게 되었다. 하지만 CMOS 소자의 여러 장점에도 불구하고 아날로그/믹스드 신호 응용에서는 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)이 BJT (bipolar junction transistor) 보다 열악한 노이즈 특성을 갖는 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 또한 칩 크기의 감소는 신뢰성 열화에 직접적인 영향을 끼쳤으며, interface state나 impurity 등에 의해 발생하

는 드레인 전류의 fluctuation이 중요한 신뢰성 이슈 중의 하나가 되고 있다. 이러한 전류 fluctuation을 노이즈라고 하며, 여러 노이즈 중에서 저주파 노이즈로 1/f (flicker) 노이즈와 RTS (random telegraph signal) 노이즈가 있다. 특히 sub-micron CMOS device에서는 Si/SiO<sub>2</sub> 계면에 존재하는 트랩들에 의한 전자의 캡처 (capture)와 에미션 (emission)에 의해 발생하는 드레인 전류의 fluctuation, 즉, RTS 노이즈가 dominant한 것으로 알려져 있다.

최근 무선통신 분야의 급격한 성장에 따라 CMOS의 아날로그/믹스드 신호와 RF (radio frequency) 신호 분야의 응용이 늘면서, CMOS의 저전압, 저전력 응용에 있어서 소자의 성능을 결정하는 중요한 요소의 하나인 저주파 노이즈 (low frequency noise) 특성의 연구가 활발히 이루어지고 있다. CMOS 집적 회로에서의 저주파 노이즈 특성이 개선되면 회로설계에

서의 critical signal path의 디자인 마진이 증가되고 overhead를 줄일 수 있으며, 이를 통해 SNR이 개선되는 이점을 얻을 수 있다 [1,2]. 이러한 CMOS 소자의 동작 특성 및 신뢰성 개선을 위하여 fluorine 주입 방법이 연구되어 왔으며 fluorine 주입의 효과로 PMOSFET의 NBTI 특성, NMOSFET의 핫 캐리어 특성, 1/f 노이즈, 계면특성, break down 특성 등이 개선되는 것으로 알려져 있다 [3,4]. 그러나 fluorine 주입에 따른 NMOSFET의 핫 캐리어 특성 변화 및 RTS 노이즈 특성 개선에 대한 동시적인 분석은 미미한 상태이다.

본 논문에서는 fluorine의 주입 유/무에 따른 NMOSFET 소자의 기본동작 특성과 신뢰성 및 RTS 노이즈 특성의 변화를 통합적으로 연구하였다.

### 2. 실험 방법

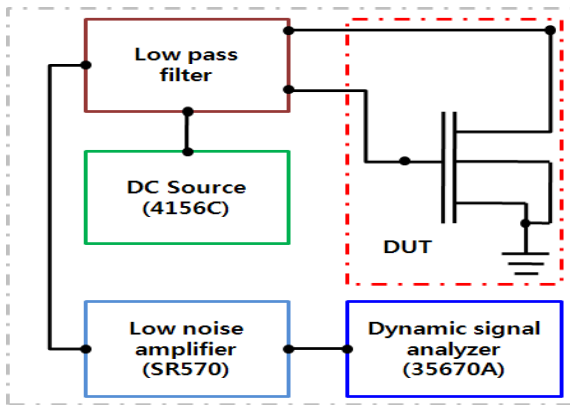


Fig. 1. Apparatus configuration to measure low frequency noise.

본 연구의 저주파 잡음 분석은 그림 1의 계측 시스템을 이용해 수행되었다 [1]. 파라미터분석기 (Agilent 4156C)와 신호분석기 (35670A), 저잡음 증폭기 (SR570)가 사용되었으며, fluorine 주입에 따른 소자의 특성을 분석하기 위해서 fluorine 유/무로 split 하였다. 그리고 측정에 사용된 소자의 크기는 W/L가 0.22/0.5 um인 NMOSFET 소자이다. 우선 fluorine 주입으로 인한 계면특성 변화를 확인하기 위하여 capacitance를 측정하여 비교하였고 fluorine 주입에 따른 기본적인 소자특성을 분석하기 위하여 전압-전류 특성을 확인하였으며, RTS 노이즈 측정을 통하여 amplitude를 비

교하였다. 그리고 마지막으로 DAHC (drain avalanche hot carrier) 측정을 이용하여 HCI (hot carrier injection) 수명시간을 분석하였다. 고주파 C-V특성을 확인하기 위하여 1 MHz에서 측정을 진행하였고, RTS 노이즈 측정은 드레인 전류가 1 uA일 때 드레인 전류의 변화를 관찰함으로써 확인하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 fluorine 주입처리를 한 것과 하지 않고 제작한 소자에서의 고주파 C-V 특성을 나타낸다. fluorine 주입이 된 소자의 경우 capacitance가 감소하는 것을 알 수 있다. 게이트 산화막 두께와 capacitance의 관계식은

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} \tag{1}$$

과 같이 표현될 수 있다.

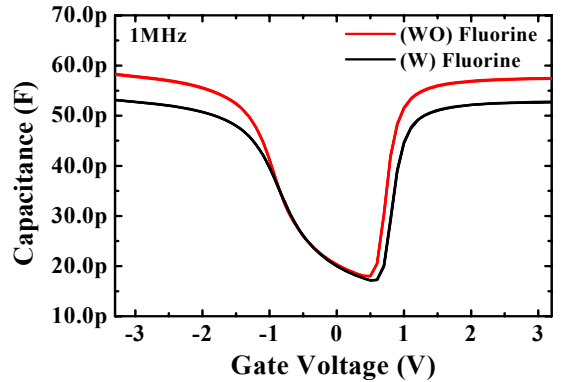


Fig. 2. High-frequency capacitance versus voltage curve with and without fluorine implantation.

따라서 그림 2에서와 같은 capacitance 감소의 이유는 실질적인 gate oxide 두께의 증가 또는 oxide의 유전상수의 감소로 인한 것으로 볼 수 있다 [5]. 여기서는 fluorine 주입으로 인한 gate oxide 두께의 증가로 인해 capacitance가 감소한 것이라 생각된다. Oxide 두께가 증가하는 이유는 주입된 fluorine이 벌크 쪽에 존재하는 excess 산소의 이동을 촉진시켜 Si/SiO<sub>2</sub> 계면에서의 반응을 활성화시킴으로써 oxide의 두께를 증가시키는 것으로 설명할 수 있다 [6]. 그리고 fluorine

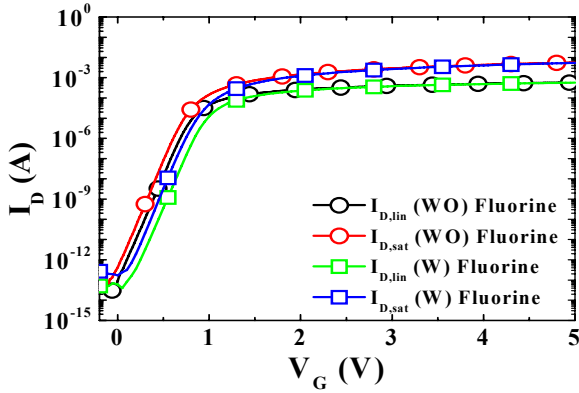


Fig. 3. Drain current versus gate voltage characteristics with and without fluorine implantation.

을 주입한 경우 flat band 전압이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 fluorine에 의한 Si/SiO<sub>2</sub> 계면의 음전하의 감소와 strained interfacial bond의 완화로 인한 것이라 할 수 있다 [7].

그림 3은 게이트 전압에 따른 드레인 전류 특성을 나타낸다. 소자의 문턱전압의 차이가 발생한 것을 확인할 수 있는데 fluorine이 주입된 소자에서 문턱전압이 증가하고 이로 인해 낮은 on 전류를 갖는다. 이는 fluorine 주입에 의한 oxide 두께 증가가 주원인이라고 여겨진다.

그림 4는 RTS 노이즈가 발생했을 경우의 time domain에서의 드레인 전류의 변화를 나타낸 것이다. RTS 노이즈가 발생하였다는 의미는 트랩에 의한 전자나 정공의 캡처 및 에미션에 의해 전류가 그림과 같이 high와 low의 2 level을 갖는 변동을 갖는 것이다. 따라서 소자의 동작에 있어서 RTS 노이즈로 인한 드레인 전류의 변화폭이 작을수록 좋다고 할 수 있다.

그림 5에 fluorine을 주입 유무에 따른 RTS 노이즈 발생에 의한 드레인 전류의 변화율을 비교하여 나타내었다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이 fluorine이 주입되지 않은 소자를 기준으로 할 때 fluorine 주입 소자의 경우 드레인 전류의 변화율이 약 46% 감소한 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 노이즈특성이 개선되는 이유는 fluorine이 주입됨에 따라 Si/SiO<sub>2</sub> 계면에 존재하는 트랩 중 노이즈에 영향을 미치는 주요한 트랩이 산화막 안쪽에 존재하게 되기 때문이다. fluorine이 주입되게 되면 Si와 만나 Si-F 결합을 형성하는 것으로 알려져 있다 [8]. 산화막 내에는 트랩들이 불균일하게

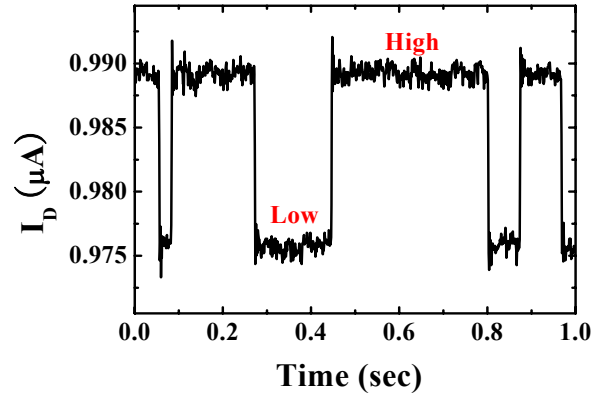


Fig. 4. Variation of drain current as a function of time (typical RTS noise signal).

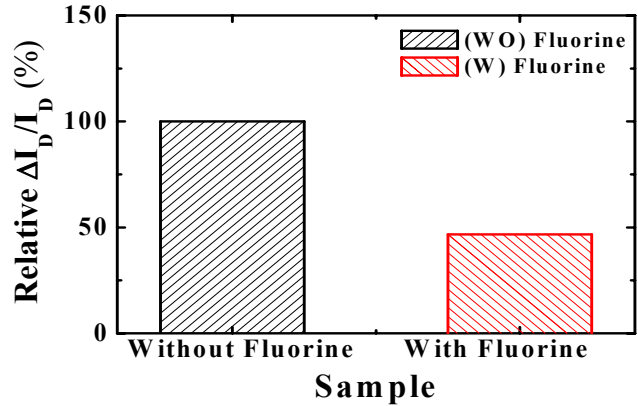


Fig. 5. Percent decrease of the relative variation of drain current ( $\Delta I_D/I_D$ ) by fluorine implantation.

분포하는데 이 중 RTS 노이즈를 유발하는 트랩이 Si/SiO<sub>2</sub> 계면 쪽에서 산화막 내로 이동하게 된다. 즉, 트랩에 의한 전류 변화의 크기가 감소하는 것으로 노이즈특성이 개선되었다고 할 수 있다.

그림 6은 RTS 노이즈의 드레인 변화의 크기를 weibull plot을 나타낸다. fluorine을 주입한 소자의 기울기가 주입하지 않은 소자보다 큰 기울기를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 앞서 언급한대로 fluorine 주입으로 인해 소자의 RTS 노이즈특성이 개선되었다고 할 수 있다.

그림 7은 DAHC (drain avalanche hot carrier) 스트레스 시간에 따른 드레인 전류의 변화를 나타낸 그림이다. 두 소자의 문턱전압의 차이를 반영하여 같은  $V_G - V_T$ 가 인가되도록 하였다.

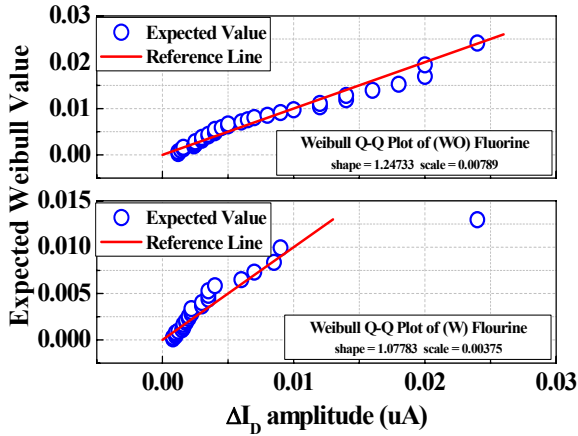


Fig. 6. Amplitude distribution of the drain current due to RTS noise in Weibull plot.

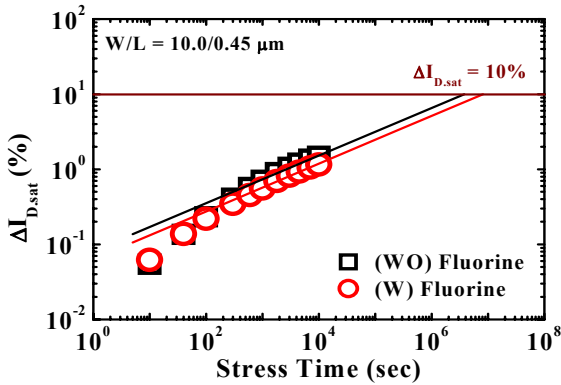


Fig. 7. Hot carrier characteristics with and without fluorine implantation.

Fluorine을 주입한 소자에서 그렇지 않은 소자보다 약 2배 정도의 수명시간 개선 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 수명시간의 개선은 계면의 Si-H 결합보다 강한 Si-F 결합의 생성으로 인한 게이트 산화막 계면의 안정성이 향상됨에 따른 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서 fluorine의 주입 유/무에 따른 NMOSFET의 DC 및 RTS 노이즈 특성, 신뢰성 특성의 변화에 대해 분석하였다. fluorine을 주입한 소자에서 oxide 두께의 증가로 인한 capacitance 감소가 나타났으며, Si/SiO<sub>2</sub> 계면의 dangling bond의 감소 효과로 인해 RTS 노

이즈 특성이 약 46% 정도 개선되었다. 이러한 계면특성이 향상됨에 따라 DAHC 방법에 따른 HCI 수명시간 평가에서도 fluorine이 주입된 경우에 2배 정도 더 긴 수명시간을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 소자 특성의 개선을 위한 fluorine 주입을 고려할 때에는 소자의 동작 조건이나 응용에 따라서 DC 동작 특성이 중요한지 아날로그 동작에서의 노이즈를 낮게 하는 것이 중요한지에 따라 fluorine의 주입을 결정해야 한다.

따라서 본 논문에서 연구한 fluorine의 주입에 따른 NMOSFET에서 소자특성의 종합적인 변화 분석에 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)[10034838, 25 nm급 Oxide Trench Etcher 개발]과 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 일환으로 수행하였음.

#### REFERENCES

- [1] I. S. Han, H. M. Kwon, J. D. Bok, S. K. Kwon, Y. J. Jung, W. I. Choi, D. S. Choi, M. G. Lim, Y. S. Jung, J. H. Lee, G. W. Lee, and H. D. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 10PB03 (2011).
- [2] M. M. Nelson, K. Yokoyama, M. Thomason, G. Scott, and B. Greenwood, *IEEE WMED* (Boise, USA, 2005) p. 17.
- [3] T. B. Hook, E. Adler, F. Guarin, J. Lukaitis, N. Rovedo, and K. Schroefer, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **48**, 1346 (2001).
- [4] R. Brederlow, W. Weber, R. Jurk, C. Dahl, S. Kessel, J. Holz, W. Sauert, P. Klein, B. Lemaitre, D. S. Landsiedel, and R. Thewes, *Proc. 28th ESSDERC* (Bordeaux, France, 1998) p. 472.
- [5] P. E. Wright and K. C. Saraswat, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **36**, 879 (1989).
- [6] T. B. Hook, E. Adler, F. Guarin, J. Lukaitis, N. Rovedo, and K. Schroefer, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **48**, 1346 (2001).
- [7] A. Balasinski, M. H. Tsai, L. Vishnubhotla, T. P. Ma, H. H. Tseng, and P. J. Tobin, *Microelectron. Eng.*, **22**, 97 (1993).
- [8] Y. Yasuda and C. Hu, *International Electron Device Meeting* (San Francisco, USA, 2006) p. 1.
- [9] S. R. Kasi, M. Liehr, and S. Cohen, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, p. 2975 (1991).