

EEPROM을 이용한 전하센서

이동규¹, 김해봉¹, 양병도¹, 김영석¹, 이형규^{1,a}

¹ 충북대학교 전자정보대학

EEPROM Charge Sensors

Dong-Kyu Lee¹, Hai-Feng Jin¹, Byung-Do Yang¹, Young-Suk Kim¹, and Hyung-Gyoo Lee^{1,a}

¹ College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received July 9, 2010; Accepted July 23, 2010)

Abstract: The devices based on electrically erasable programmable read-only memory (EEPROM) structure are proposed for the detection of external electric charges. A large size charge contact window (CCW) extended from the floating gate is employed to immobilize external charges, and a control gate with stacked metal-insulator-metal (MIM) capacitor is adapted for a standard single polysilicon CMOS process. When positive voltage is applied to the capacitor of CCW of an n-channel EEPROM, the drain current increases due to the negative shift of its threshold voltage. Also when a pre-charged external capacitor is directly connected to the floating gate metal of CCW, the positive charges of the external capacitor make the drain current increase for n-channel, whereas the negative charges cause it to decrease. For an p-channel, however, the opposite behaviors are observed by the external voltage and charges. With the attachment of external charges to the CCW of EEPROM inverter, the characteristic inverter voltage behavior shifts from the reference curve dependent on external charge polarity. Therefore, we have demonstrated that the EEPROM inverter is capable of detecting external immobilized charges on the floating gate. and these devices are applicable to sensing the pH's or biomolecular reactions.

Keywords: EEPROM, Inverter, Extended floating gate, Charge sensor

1. 서 론

단백질 또는 DNA 등 생체물질 간의 반응을 전기적 방법에 의해 검출하는 기술이 카본 나노튜브, 반도체 나노선 제작 기술의 등장으로 더욱 활발해지면서 기존의 형광물질, 방사선 물질을 통해 간접적으로 관찰하는 방법을 대체하고 있다 [1,2]. 이들 나노구조를 이용한 전계효과 트랜지스터 (FET: field-effect transistor)는 자체 전하를 가진 생체분자가 게이트 전극의 표면에 부착되면 전계에 의해 드레인 전류가 변화한다. 이를 위해서는 채널을 형성하는 제어게이트와 생체물질을

고정화할 수 있는 또 다른 게이트를 필요로 한다. 이중 게이트 구조는 플래시, EEPROM 소자가 대표적이며 이들은 top-down 방식의 CMOS 공정을 활용하여 제작할 수 있는 이점을 가지고 있고, bottom-up 방식을 사용하는 3차원 나노소자에 비해 재현성과 집적도가 우수하다 [3,4].

플래시, EEPROM은 제어게이트 (CG)와 부유게이트 (FG)간의 정전용량 (C_{CG})를 구현하기 위해 다결정 실리콘 게이트를 적층으로 제작한다. 단일 다결정 실리콘 EEPROM은 비휘발성 메모리의 저가 생산을 위한 대안 중 하나로써, CG와 FG사이의 C_{CG} 를 MIM (metal-insulator-metal) 캐패시터로 구현하면 프로그램 속도가 빠르며 반복사용에 대해 열화가 적은 특성을

a. Corresponding author; hglee@cbnu.ac.kr

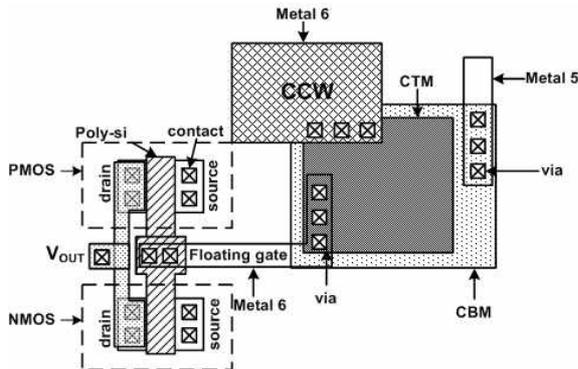


Fig. 1. Layout of an EEPROM inverter.

가지고 있음이 보고된 바 있다 [5]. EEPROM의 부유 게이트의 넓이를 크게 확장한 소자는 생체분자 사이의 반응을 감지할 수 있으며 만약 CG를 FG 하단에 위치시킨다면 소자 면적의 대부분이 FG에 의해 점유되어 많은 생체물질들을 고정화할 수 있는 이점이 있다 [6]. 생체센서에 관한 대부분의 연구들은 게이트에 고정된 전하에 의해 FET의 드레인 전류 변화를 측정하고 있지만 전류 출력보다는 전압으로 출력하는 것이 센서로서의 활용도가 높아진다.

본 연구에서는 확장된 부유게이트 FET의 CG로 MIM-캐패시터 구조를 적용하고 생체분자에 해당하는 전하를 부유 게이트에 고정화하여 바이오센서로서의 응용 가능성을 보이고, 또한 EEPROM 인버터를 제작하여 전하에 의한 소자의 특성변화를 전압으로 출력하고자 한다.

2. 실험 방법

MIM 캐패시터로 C_{CG} 를 구현한 단일 실리콘 EEPROM의 레이아웃을 그림 1에, 그리고 그 단면 개략도를 그림 2에 나타내었다. 일반적인 NMOS, PMOS의 게이트에 같은 금속 라인을 통해 MIM 캐패시터와 확장된 부유게이트인 CCW (charge contact window)가 추가로 구성되어 있는 형태이다. MIM 캐패시터는 Metal 6와 Metal 5사이에서 PECVD SiN를 절연체에 의해 형성되었다. 소자는 동부하이테크 단일다결정, 0.13 마이크로 MPW 공정에 의해 제작되었다.

PMOS와 NMOS의 W/L비는 각각 $1.4 \mu\text{m}/0.13 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}/0.3 \mu\text{m}$ 와 $0.7 \mu\text{m}/0.13 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}/0.3 \mu\text{m}$ 의 비율로 제작 되었고, MIM 캐패시터는 정사각형으로

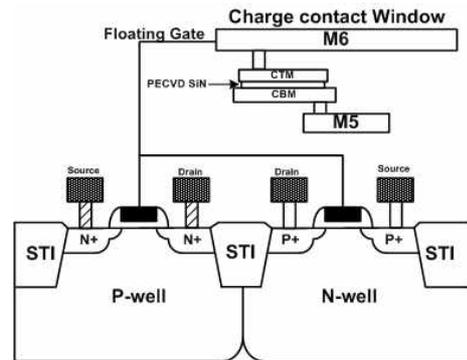


Fig. 2. Schematic side-view of the device.

써 각 변의 길이가 $15 \sim 35 \mu\text{m}$ 로 변화시켰다. 구리에 의해 형성된 M6는 면적이 $120 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ 로써 외부로 노출시켜 외부전하가 고정되는 부위인 CCW를 구성하고 있다. 최종 제작된 시편은 외부 접촉단자 외에는 전면이 SiN/SiO₂ 다층으로 보호막으로 덮혀있어 별도의 추가공정에 의해 CCW 층을 외부와 전기적으로 노출되도록 하였다. MPW공정에 의해 제작된 소자는 최상위 금속 층(M6)을 비롯한 모든 영역에 2쌍의 SiN(74 nm)/SiO₂(90 nm), 그리고 최종적으로 SiN 층의 보호막 (두께 $1.6 \mu\text{m}$)층이 존재하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 외부 전압에 의한 효과

보호막으로 덮여있는 CCW 영역에 Cr 금속 층을 증착하여 캐패시터를 구성하고 외부 전압을 인가해 주었다. NMOS에 구현된 CCW영역의 금속에 전압 (V_E)을 인가한 후 CG 전압을 0-1 V 범위에서 변화시키며 측정한 드레인 전류 특성은 그림 3과 같다. 양의 전압을 FG에 인가한 경우 ($V_E > 0$), 기준 시료의 특성에 비해 V_E 전압이 클수록 $I_d - V_{CG}$ 특성은 점차 좌측 (또는 음의 방향)으로 이동되었으며, 반면 음의 전압을 인가하면 ($V_E < 0$), V_E 전압이 음의 값이 클수록 전류 특성은 우측 (양의 방향)으로 이동하였음을 알 수 있다. 이러한 변화는 제어 게이트가 느끼는 문턱전압이 변화하였기 때문에 발생하는 것으로 다음의 관계로 설명할 수 있다.

소자 제작 공정과 디자인에 의한 정전용량 값들은 MIM 캐패시터의 정전용량 $C_{CG} = C_{MIM} = 900 \text{ fF}$, CCW

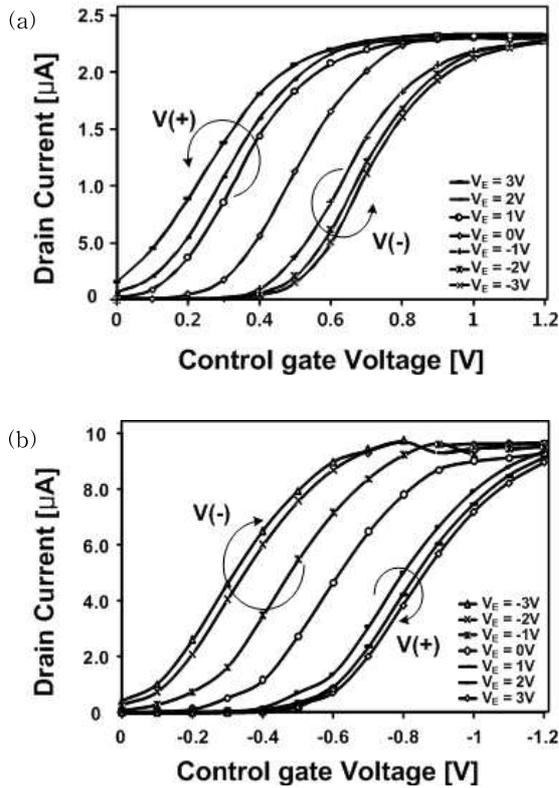


Fig. 3. Transfer curves at various FG voltages: (a) NMOS: $W/L=1.4\ \mu\text{m}/0.13\ \mu\text{m}$, (b) PMOS: $W/L=1.4\ \mu\text{m}/0.3\ \mu\text{m}$.

영역의 정전용량 $C_E=190\ \text{fF}$, 게이트의 정전용량 $C_{FG}=4.8\ \text{fF}$ 이다. 또한 시뮬레이션에 의해 계산된 소오스-FG 사이, 그리고 드레인-FG 사이의 정전용량은 각각 $3.1\ \text{fF}$, $2.8\ \text{fF}$ 으로 다른 값들에 비해 작은 값이다. 따라서 FG의 전압 (V_{FG})은 MIM 캐패시터에 인가된 전압 (V_{CG})과 CCW에 인가된 전압 (V_E)에 의해 [1],

$$V_{FG} = \alpha_G \left[V_{CG} + \frac{C_E}{C_{CG}} V_E \right] \quad (1)$$

$$\alpha_G = \frac{C_{CG}}{C_{CG} + C_E + C_{FG}}$$

로 표현된다. 하지만 C_{FG} 의 계산 값은 채널 위의 영역만을 계산한 것이므로 실제 값에 비해 과소평가된 값이다. 제작된 소자의 변수들은 $\alpha_G < 1$ 의 관계를 만족하므로, 소오스-드레인 사이에 채널을 형성하게 하는 제어 게이트 문턱전압 V_{T,V_E}^{CG} 은 전압 V_E 를 가하지 않았을 때에 비해 식 (2)를 만족하게 된다 [2].

$$V_{T,V_E}^{CG} = \frac{V_T^{FG}}{\alpha_G} - \frac{C_E V_E}{C_{CG}} \quad (2)$$

그러므로, 외부 전압 변화 ΔV_E 에 의한 문턱전압의 변화 $\Delta V_{T,V_E}^{CG}$ 는 $\Delta V_{T,V_E}^{CG} = -C_E \Delta V_E / C_{CG}$ 의 관계를 갖는다. 따라서 CCW에 가해진 전압이 증가하면 문턱전압의 변화는 $\Delta V_{T,V_E}^{CG} < 0$ 가 된다. 이러한 관계식은 FG에 외부 캐패시터가 연결된 때의 문턱전압의 변화는 확장된 FG에 절연막을 통해 생체전하(Q_i)가 고정화 된 때 CG가 느끼는 채널 문턱전압의 변화 관계식 $\Delta V_{T,V_E}^{CG} = -Q_i / C_T$ 과 유사하지만 본 연구에서 제작된 소자 구조에 의해 비례상수가 차이가 난다 [2].

선형영역에서 동작하는 NMOS의 외부 전압을 변화시키면서 측정한 CG 전압에 대한 드레인 전류 특성 그래프[그림 3(a)]에서, 일정한 드레인 전류를 흐르게 하는 CG 전압의 변화는 곧 문턱전압의 변화에 비례하게 된다. 그림 3의 결과에서 드레인 전류가 $I_d = 0.7\ \mu\text{A}$ 인 CG의 전압은 전압이 가해지지 않은 기준 시료에 비해 $\Delta V_E = +1\ \text{V}$ 씩 증가함에 따라 $\Delta V_{CG} = -0.16, -0.19, -0.25\ [\text{V}]$ 로 변화하며, $\Delta V_E = -1\ \text{V}$ 씩 감소함에 따라 $\Delta V_{CG} = +0.14, +0.18, +0.20\ [\text{V}]$ 로 증가하는 것이 관측되어, 이론적인 선형적 관계에서 벗어나 ΔV_E 의 크기가 커질수록 ΔV_{CG} 변화는 점차 작아지는 비선형적 관계를 보이고 있다. 그 원인으로는 CCW 영역의 하부 유전체와 Cr 금속의 계면에서 전하에 의해 발생할 가능성이 가장 크지만 이에 대해 더 자세한 연구는 진행되지 않았다.

PMOS에 대한 실험결과는 NMOS에 대한 결과와 반대의 특성을 보이고 있다. 즉 전압 V_E 의 값이 양으로 증가할수록 같은 드레인 전류 ($I_d = 0.7\ \mu\text{A}$)를 흐르게 하는 CG 전압이 증가하여 전체적인 드레인 전류 곡선이 우측으로 이동한 것으로 나타난다. 반면 음의 V_E 전압의 경우에는 전류 곡선이 좌측으로 이동되는 것이 관측된다. 드레인 전류가 $I_d = 0.7\ \mu\text{A}$ 인 때의 $\Delta V_E - \Delta V_{CG}$ 의 관계는 비선형적으로 나타남을 그림 3(b)에서 알 수 있다.

3.2 외부 전하에 의한 효과

CCW 영역을 통해 외부 전하를 FG에 전달시킨 후 NMOS, PMOS 소자의 전류-전압 특성을 관찰하였다. 이를 위해 소자의 보호막 층을 식각하여 연결 금속

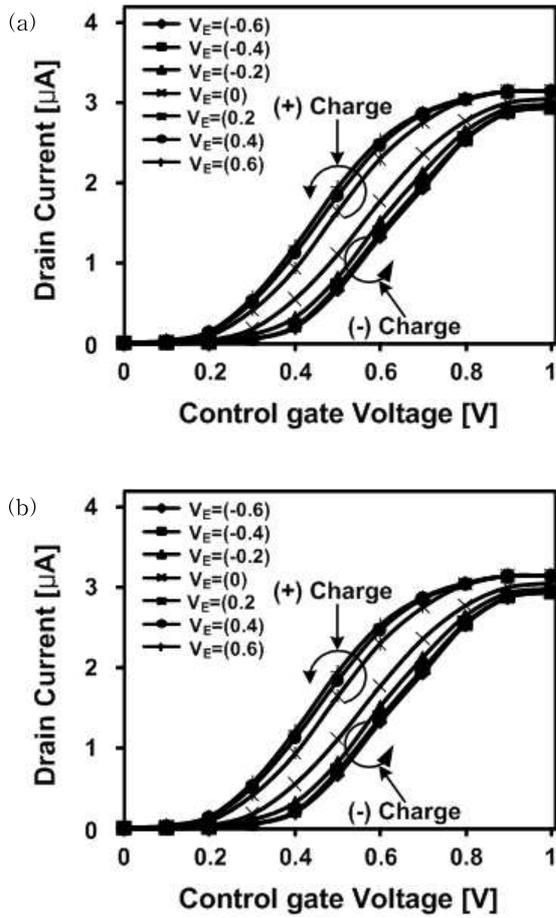


Fig. 4. Transfer characteristics of (a) NMOS, and (b) PMOS at various applied FG charges.

충인 Cu가 노출되도록 하고 별도로 외부에서 충전된 캐패시터를 FG에 연결하여 전하가 FG에 전달되도록 하였다. 측정은 소자의 모든 단자를 접지한 후 일정 전압(V_E)으로 충전된 $1 \mu\text{F}$ 크기의 캐패시터를 탐침을 통해 CCW에 연결한 다음, 트랜지스터의 I-V 특성을 측정하였다. 그 결과를 그림 4에 도시하였다.

외부 캐패시터가 $V_E < 0$ 으로 충전되어 FG에 연결된 소자는 CG를 변화시켰을 때 드레인 전류 특성은 기준 시료에 비해 양의 방향으로 이동되었으며 반면 $V_E > 0$ 인 경우 음의 방향으로 이동됨을 알 수 있다. 이는 NMOS의 경우, 외부 캐패시터의 양극의 단자가 탐침에 의해 FG에 연결되면 ($V_E > 0$ 인 때), 캐패시터의 충전된 총 전하는 외부 캐패시터 (C_{ext}), 탐침의 캐패시터 (C_{probe}), FG의 캐패시터 (C_{FG})에 분산되고

소오스와 드레인 사이의 채널 위에 존재하는 양의 전하는 FG의 전압을 높이기 되어 결과적으로 CG에서 바라본 문턱전압은 상대적으로 감소하게 될 것이다. 한편 PMOS의 경우에는 그 반대 현상이 나타나게 된다. 이러한 문턱전압의 변화를 수식적으로 표현하면, 위 식 (1)과 유사하게

$$V_{FG} = \frac{C_{MM}}{C_T} V_{CG} + \frac{Q_{ext}}{C_T} \quad (3)$$

이며 $C_T = C_{MM} + C_{FG} + C_{probe} + C_{ext}$, $Q_{ext} = C_{ext} V_E$ 이다. 앞에서 기술한 바와 같은 과정에 의해 제어 게이트의 문턱전압 변화($\Delta V_{T,V_E}^{CG}$)는 식 (4)와 같다.

$$\Delta V_{T,V_E}^{CG} = -\frac{C_{ext} \Delta V_E}{C_{CG}} \quad (4)$$

따라서, CG가 느끼는 문턱전압은 외부 캐패시터에 가해지는 전압이 $V_E > 0$ 인 경우, 제어 게이트의 문턱전압은 점차 감소한다. 그 결과로 드레인 전류-CG 전압의 그래프는 외부 캐패시터가 연결되지 않은 기준 시료에 비해 $V_E > 0$ 의 경우 왼쪽으로 이동 (음의 변위), $V_E < 0$ 의 경우에는 오른쪽으로 이동(양의 변위)하게 된다.

외부에서 가해진 전하의 종류에 따른 변화는 PMOS의 경우 (-)전하에 대해 문턱 전압이 감소하며 (+)전하에 대해선 증가하는 반응을 보였다. 반대로 NMOS의 경우 (-)전하에 대해선 문턱 전압이 증가하였으며 (+)전하에 대해선 감소하는 반응을 보였다. 그림 2와 3을 비교할 때, CCW 영역을 캐패시터로 제작하여 외부전압 V_E 를 가해준 경우의 비례상수인 식 (2)의 C_B/C_{CG} 와 외부전하를 고정화한 식 (4)의 C_{ext}/C_{CG} 를 비교하면 $C_{ext} > C_E$ 임에도 불구하고 문턱전압의 변화 정도는 현격히 차이를 보이지 않고 있다.

3.3 외부 전하에 의한 인버터 특성

인버터를 구성하는 NMOS, 능동 부하인 PMOS는 동일한 부호의 전하에 대해 문턱전압이 서로 반대 방향으로 변화한다는 것이 앞의 연구에서 알려졌다. 이들로 구성된 인버터의 공통 FG에 외부에서 충전된 캐패시터(용량 $1 \mu\text{F}$, 충전압 $\pm 0.5 \text{ V}$)를 연결하면 그림 5와 같은 입-출력 전압 특성을 보인다.

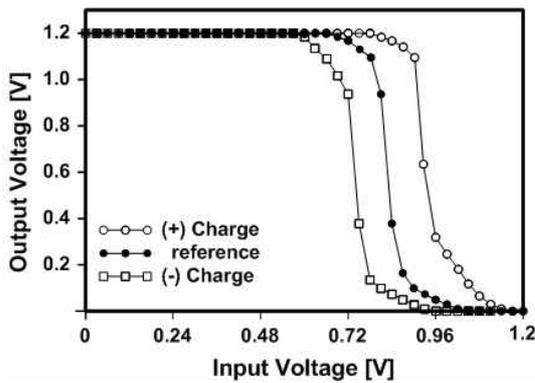


Fig. 5. Inverter input-output curve by immobilized external charges on the FG.

양의 전하가 인가된 경우는 인버터의 출력 중간 전압이 +0.1 V 정도 증가하며 음의 전하의 경우에는 -0.1 V만큼 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 인버터를 단백질 또는 DNA 등의 반응을 감지하는 생체 전하센서로 사용하게 되면 앞의 결과들(그림 3과 4)에서 보았듯이 전하에 의해 드레인 전류의 변화를 감지하는 것보다는 직접 출력을 전압으로 표현할 수 있어 그 활용도가 더 다양해진다. 만약 센서의 CG 입력단에 200 Hz의 주기를 갖고 0 V에서 1.2 V까지 변하는 삼각파를 인가하고 출력파형을 관찰하면 출력파형의 밴드 폭이 변화하는 것을 알 수 있다.

초기 조건이 형성된 기준 출력에 대해 CCW에 (+) 전극이 접촉하면(양전하의 축적) PMOS의 문턱 전압이 증가하고 NMOS의 문턱전압은 감소하여 그림 6에서 보여 지는 (C)의 파형처럼 밴드폭이 넓어지게 되며, (-)전극이 접촉하면(음전하 축적) 반대로 PMOS의 문턱 전압은 감소하고 NMOS의 문턱 전압은 증가하여 (B)의 파형과 같이 밴드폭이 좁아지게 된다. 초기 상태에 대해 음전하 축적 시 밴드 폭이 160 ms에서 119 ms로 감소하였고 양전하 축적 시 198 ms로 증가하였다.

3.4 FG에 전하 고정화

앞에서는 FG에 전하를 고정화하기 위해 외부에서 충전된 캐패시터를 연결하여 소자의 특성변화를 보았지만 실제 소자의 응용은 FG에 생체물질을 고정화하여 그 전하에 의한 소자 변화를 관찰하여야만 생체센서로써 활용될 수 있다. 따라서, 전하를 가진 물질을 FG에 고정화하기 위한 시도를 하였다.

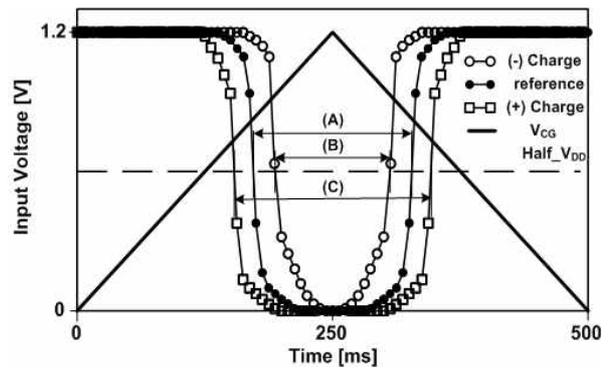


Fig. 6. Inverter output characteristics when an input ac signal is engaged on the CG.

CCW는 외부로 구리판이 노출되어 있어 구리표면에 먼저 외부 물질을 고정화하기 위한 표면처리가 필요하다. 자기정렬된 단일층 (SAM)을 형성키 위해 구리 층 표면을 소수성으로 변환시킨다고 알려져 있는 1 Normal 농도의 6-mercapto-hexa-decanoic acid (Aldrich) 용액에 12시간 시료를 담근 후 실온, 질소 가스로 표면을 건조하여 전류-전압 특성을 측정하였다. 제어 게이트 전압에 의한 드레인 전류 특성은 SAM 처리를 하지 않은 시료에 비해 그 변화를 감지하지 못하였다. SAM 처리 된 표면에 전하를 고정화하기 위해 시료를 1 Normal 농도의 암모니아수를 5 초간 담근 후 다시 건조하고 또 다시 전류-전압 특성을 측정하였으나 그 결과에서도 아무런 변화를 감지하지 못하였다. 암모니아기는 SAM 처리된 표면에서는 NH⁺기를 띠게 되어 양의 전하가 구리에 부착될 것으로 기대되었지만 SAM 처리 농도가 너무 낮거나 혹은 암모니아 기의 반응이 미약하여 트랜지스터의 특성 변화에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 대부분의 생체물질의 부착은 산화막 또는 금 표면에서 연구되었지만 본 연구에서처럼 구리를 사용한 연구는 매우 적어 전하의 고정화하는 기법에 대해 기초 연구가 더 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 EEPROM 소자의 부유게이트(FG)에 전하를 유입하면 문턱 전압이 변화하는 원리를 활용하여 미세전하 센서로 활용하는 방법을 구현해 보았다. 소자는 제어게이트(CG)로써 MIM캐패시터를 가

지도록 설계하였다. 제작된 소자는 유전체를 통해 FG에 전압을 가해주거나 외부에서 전하를 고정화하여 EEPROM의 특성 변화를 측정하였다. FG에 형성된 보호막인 유전체 다층 물질 위에 Cr을 별도 증착한 후 전압을 인가하여 제어게이트에 의한 드레인 전류의 변화를 관찰하였다. 채널영역의 전하에 반대되는 극성의 전압이 FG에 인가되면 CG의 문턱전압은 감소하는 경향을 보여 기대한 바와 같이 동작함을 확인할 수 있었다. 보호막 층을 식각하여 FG의 금속이 노출되도록 한 후, 외부 캐패시터에 충전된 전하를 연결하여 FG와 전하 분배가 일어나도록 하여 드레인 전류의 변화를 관찰하였다. CG에 대한 드레인 전류특성은 대전 극성에 따라 NMOS의 드레인 전류-게이트 전압 특성곡선이 양의 방향 (음의 단자 연결) 또는 음의 방향 (양의 단자 연결)으로 이동하는 것을 관찰하였다. 인버터의 FG에 외부 캐패시터에 의해 양의 전하가 인가되면 인버터의 출력 중간 전압이 +0.1 V 정도 증가하며, 음의 전하의 경우에는 -0.1 V만큼 감소하는 것을 알 수 있었다. 입력 단에 주기적으로 변화하는 전압을 인가하고 출력 전압의 변화를 관찰하면 초기 조건의 출력 파형에 대해 밴드폭은 기준에 비해 음전하의 경우에는 감소하였고 양전하의 경우에는 증가하였다. 이로써 EEPROM 구조를 이용한 인버터 센서는 FG에 전하가 고정화되면 그 크기에 따라

외부출력을 전압으로 표시할 수 있음을 확인하였고 향후 단백질 분자를 고정화하면 생체전하 센서로 사용할 수 있음을 제시하였다.

REFERENCES

- [1] M. Barbaro, A. Bonfiglio, and L. Raffo, *IEEE Trans. Elect. Dev.* **53**, 158 (2006).
- [2] L. Abbati, P. Placidi, A. Scorzoni, and M. Lanzoni, *2nd IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI 2007)* (IEEE, Bari, Italy, 2007) p. 1.
- [3] K.-Y. Na and Y. S. Kim, *IEEE Electron. Device Lett.* **27**, 291 (2006).
- [4] B. Chen, C. Tao, S. William, and S. Pandey, *Proc. IEEE Int. Conf on Electro/Information Technology (EIT 2008)* (IEEE, Ames, USA) p. 300.
- [5] Y. Cui, Q. Wei, H. Park, and C.M. Lieber, *Science* **293**, 1289 (2001).
- [6] E. Stern, J. F. Klemic, D. A. Routenberg, P. N. Wyrembak, D. B. Turner-Evans, A. D. Hamilton, D. A. LaVan, T. M. Fahmy, and S. A. Reed, *Nature* **445**, 519 (2007).
- [7] Z. Cui, M. Choi, Y. Kim, H. Lee, K. Kim, and N. Kim, *Electron. Lett.* **45**, 185 (2009).