

논문 98-7-1-05

## 다채널 ISFET 측정용 단일 바이어스 회로의 설계

조병욱\*, 김영진\*\*, 김창수\*\*\*, 최평\*, 손병기\*

## Design of Bias Circuit for Measuring the Multi-channel ISFET

Byung Woog Cho\*, Young Jin Kim\*\*, Chang Soo Kim\*\*\*, Pyung Choi\*,  
and Byung Ki Sohn\*

## 요 약

ISFET을 측정할 때 다채널 센서를 이용하면 신뢰도를 향상시킬 수 있고 노이즈를 제거할 수 있다. 향후 하나의 소자를 이용하여 여러 가지 이온을 측정할 수 있는 센서를 제조하기 위해서도 다채널 센서는 반드시 필요한 과정이다. 그러나 다채널 센서를 개발시 각 센서에 개별적으로 바이어스를 인가한다면 센서의 개수만큼 바이어스 회로가 필요하다. 본 논문에서는 영전위회로에 스위칭방식을 도입하여 4개의 pH-ISFET을 바이어스 하는 방식을 제안하였다. 제안된 회로는 4개의 센서에 대해 단지 하나의 바이어스 회로가 필요하므로 개별적인 바이어스 인가방식에 비해 전력을 적게 소모하며 적은 면적에 구현할 수 있다. 제안된 회로는 이산소자를 이용하여 성능을 검증하였다. 또한 최근 센서시스템이 휴대화 되어지는 경향에 따라 검증된 바이어스 회로를 CMOS를 이용하여 집적화 하였다. 설계된 바이어스 회로의 마스크 면적은  $660\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 이다. ISFET은 반도체 집적회로 공정에 의해 제조되므로 향후 CMOS를 이용한 신호처리 회로와 함께 하나의 칩에 집적화 하여 다기능, 다채널, 그리고 지능형의 스마트센서 시스템으로 개발되어져야 바람직할 것이다.

## Abstract

Multi-channel sensors can be used to increase the reliability and remove the random noise in ion-sensitive field effect transistors(ISFETs). Multi-channel sensors is also an essential step toward potential fabrication of sensors for several ionic species in one device. However, when the multi-channel sensors are separately biased, the biasing problems become difficult, that is to say, the bias circuit is needed as many sensors. In this work, a circuit for biasing the four pH-ISFETs in null-balance method, where bias voltages are switched, was proposed. The proposed concept is need only one bias circuit for the four sensors. Therefore it has advantages of smaller size and lower power consumption than the case that all sensors are separately biased at a time. The proposed circuit was tested with discrete devices and its performance was investigated. In the recent trend, sensor systems are implemented as portable systems. So the verified measurement circuit was integrated by using the CMOS circuit. Fortunately, ISFET fabrication process can be compatible with CMOS process. Full circuit has a mask area of  $660\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ . In the future, this step will be used for developing the smart sensor system with ISFET.

\* 경북대학교 전기·전자공학부 (School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\* 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\*\*센서기술연구원 (Sensor Technology Research Center)

&lt;접수일자 : 1997년 12월 4일&gt;

## 1. 서 론

센서 시스템 개발은 타 분야에 미치는 효과가 지대하며 고부가가치 기술로 볼 수 있다. 많은 센서 시스템을 수입하고 있는 우리 나라 실정으로 볼 때 국산화

가 절실히 요구되고 있는 기술분야임에 틀림없다. 앞으로 센서시스템은 다채널화, 다기능화, 복합화, 지능화 등을 통하여 인간의 감각 기능과 유사한 스마트 센서 시스템으로 발전할 것이다. 이러한 스마트 센서 시스템의 구현을 위해서는 기존의 이산적으로 설계된 센서시스템을 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)을 통해 시스템의 소형화, 경량화, 저 전력화가 선행되어야 한다. 특히 FET형 반도체센서는 집적회로 제조공정을 활용하여 제조되므로 소형화, 규격화 및 양산화가 가능할 뿐만 아니라 CMOS를 이용하여 측정회로를 함께 집적<sup>1)</sup>, 2)시킬 수 있어 스마트 센서 시스템 개발에 매우 적합한 형태의 센서이다.

지금까지 ISFET<sup>3)</sup>을 위해 개발된 여러 가지 측정기들을 살펴보면 대부분 하나의 ISFET을 이용하여 측정하는 방식을 취해왔다. 이러한 방식은 측정 중 ISFET의 감도저하, 오동작 혹은 파손 등의 여러 가지 요인들로 인해 측정값의 안정도나 신뢰도가 낮아지게 되는 문제점<sup>4)</sup>이 있다. 제시된 문제점들을 해결하기 위해 다채널의 ISFET을 동시에 측정하여 적절한 신호처리<sup>5)</sup>를 하는 방법을 이용할 수 있다. 同種의 다채널 ISFET을 이용하여 센서의 신뢰도를 개선할 수 있으며, 다른 종류의 여러 ISFET을 동시에 측정할 경우 여러 이온의 동시 측정<sup>6)</sup>까지 가능하다. 그러나 여러 개의 센서에 개별적인 바이어스 회로를 사용할 경우 센서 개수에 따라 소비전력이 비례적으로 증가한다. 따라서 센서 개수에 관계없이 하나의 바이어스 회로를 갖는 센서시스템의 구현이 필요하다. 본 논문에서는 전력을 적게 소모하고 적은 면적에 구현할 수 있도록 아날로그 멀티플렉서, 2비트 카운터를 이용하여 4개의 ISFET을 순차적으로 바이어스를 인가할 수 있는 회로를 CMOS를 이용하여 설계하고자 한다. 이때 각 센서는 ISFET의 드레인-소스간 전압( $V_{DS}$ ) 및 전류( $I_D$ )를 일정하게 유지시키는 영전위방식(null-balance method)<sup>7)</sup>에 의해서 구동되어진다. CMOS를 이용한 설계에 앞서 이산소자들을 이용하여 bread board상에 회로를 꾸미고 pH 완충 용액(ORION)으로 감도와 시간응답특성을 조사하여 정상 동작의 가능성을 검증하였다. 이산소자를 이용하여 검증된 회로를 소형화 및 향후 ISFET과의 단일칩 집적화를 위해 CMOS를 이용하여 설계하였다. 설계한 회로의 성능을 검증하기 위한 소프트웨어로 Hspice를 이용하였고, Cadence tool을 이용하여 layout, DRC(design rule check), 및 LVS(layout vs. schematic)를 수행하였다.

## II. 설계 및 측정

### 2-1. 다채널 pH-ISFET의 바이어스 회로 설계

이온 농도 변화에 따른 드레인 전류를 측정할 경우 ISFET의 동작점이 바뀔 뿐만 아니라 전류에 따른 Joule 열에 의한 센서의 기본 특성이 달라지는 단점이 있다. 이에 따라 현재 보편적으로 사용되어지는 방법으로서 ISFET의 드레인 전류( $I_D$ )와 드레인-소스간 전압( $V_{DS}$ )을 일정하게 유지시키면서 접지된 기준전극에 대해 소스 전압이 이온 농도에 따라 변화하는 것을 측정하는 영전위방식의 측정법을 선택하였다. 측정시 드레인 전류가 일정해서 Joule열에 의한 영향을 고려하지 않아도 되므로 다채널의 ISFET을 한 용액 내에서 병렬 적으로 동작시키는데 적합한 회로이다. 이때  $I_D$ 와  $V_{DS}$ 는 ISFET이 충분한 포화영역에서 동작할 수 있도록 결정하였다.

다채널 센서를 개발시 각 센서에 개별적으로 바이어스를 인가한다면 그림 1에서 보여지는 바와 같이 센서의 개수만큼 독립적인 바이어스 회로가 필요하게 된다. 이에 따라 회로의 면적과 회로에서 소비되는 전력이 측정하고자 하는 ISFET의 개수에 비례하여 증가하게 되어 센서 시스템의 소형화 및 저 전력의 구현이 어려워진다. 이로 인해 센서 개수의 증가에 의한 신뢰도 개선에도 한계를 가지게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고자 스위치를 이용하여 다채널 ISFET에 순차적으로 바이어스를 인가함으로써 한 개의 바이어스 회로만으로 여러 개의 센서를 동시에 구동할 수 있도록 하였다. 스위치를 이용한 바이어스 회로의 구조는 그림 2에 보여진다. 먼저 스위치의 on/off에 의해 n개의 ISFET 중 1개가 선택되어지고, 선택되어진 ISFET은 스위치가 on상태를 유지하는 동안 바이어스 신호를 공급받게 되어 포화상태의 동작영역에 머무르게 된다. 이렇게 스위치를 이용하여 바이어스 회로를 한 개로 줄임으로써 전력소모나 회로의 면적은 측정하고자 하는 센서의 개수와 관계없이 한 개의 ISFET을 측정할 때와 동일하게 된다. 이미 ISFET의 드레인-소스간 바이어스 전압을 스위칭 하였을 때 ISFET의 과도응답 특성은 이온감지막과 그와 관련된 여러 계면들에 의한 영향을 받는다는 것이 보고되어졌고<sup>8)</sup> ISFET의 계전형  $V_D$ 에 대한 과도응답시 일정시간 동안 overshoot이 나타난 후 안정화되는 결과를 나타내므로 실험을 통해 충분히 안정화되는 시간을 조사한다면 적절한 스위칭 시간을 결정할 수 있다.

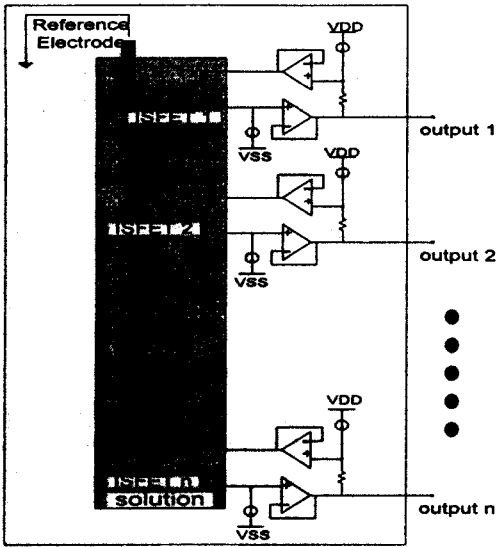


그림 1. 개별적인 바이어스 인가 회로  
Fig. 1. Circuit for separate bias.

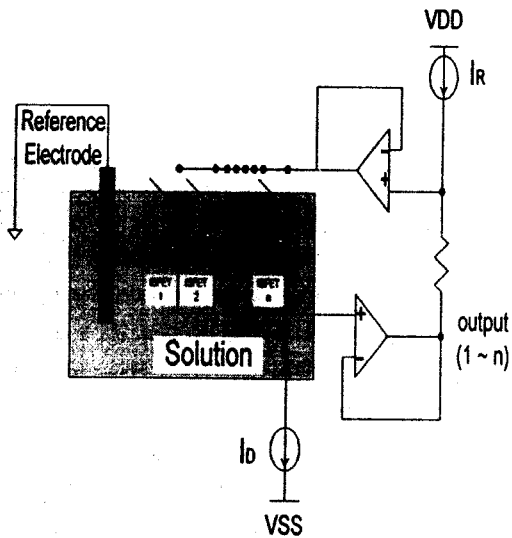


그림 2. 스위치를 이용한 바이어스 인가 회로  
Fig. 2. Circuit for switched bias.

2-2. 이산소자를 이용한 스위칭 바이어스 회로의 동작 검증

이상에서 고안되어진 회로의 실제 적용시 스위칭시간의 결정과 성능 검증을 위해 테스트회로가 필요하다. 연산증폭기로 op27, 정전류원으로 LM334, 그리고 아날로그 스위치로는 ADG201등 상용 IC를 이용하여 스위

칭방식의 영전위 회로를 bread board상에 구성하였고, 디코더용 IC인 74LS139를 이용하여 아날로그 스위치를 순차적으로 구동시켰다. 구성되어진 회로의 개념도는 그림 3에서 보여진다. 그림 3에서 op1과 op2는 각 연산증폭기의 입력에 가해진 신호를 손실 없이 전달해주는 완충증폭기 역할을 하고,  $I_{sink}$ 는 ISFET에  $120\mu A$ 의 전류 동작점을 정해주기 위한 회로이며,  $I_{source}$ 는  $25k\Omega$ 의 저항을 통해 흘러 ISFET의 드레인과 소스 양단에 항상 3V의 전압 차를 유지시켜서 ISFET의 전압 동작점을 정해주는 회로이다. 이러한 동작점에서는 여러 가지 ISFET(pH, Ca, Na, K 등) 모두가 포화영역에서 동작할 수 있다<sup>[9]</sup>. 그리고 2비트 카운터에 의해 순차적으로 구동되는 멀티플렉서는 내부의 4개의 스위치를 통해 각각의 ISFET에 바이어스 전류를 공급하게 된다. 측정에 사용되어진 센서는  $Si_3N_4$ 를 감지막으로 하고  $L=20\mu m$ ,  $W=400\mu m$ 의 게이트면적을 가지는 4개의 pH-ISFET(S1, S2, S3, S4)을 이용하였다. 그림 4는 4개의 ISFET을 pH완충 용액에 담그고 순차적으로 드레인 전압을 스위칭 하여 출력전압을 오실로스코프(Gould 475)를 사용하여 관측한 것이다. 스위치에 의해 선택되어진 센서는 초기에 짧은 overshoot을 나타낸 후 안정된 출력을 나타내는 것을 확인하였다. 그리고 바이어스를 스위칭 하면서 pH-ISFET의 수소이온에 대한 감도를 측정하였다. pH 4, 7, 10 용액을 이용하여

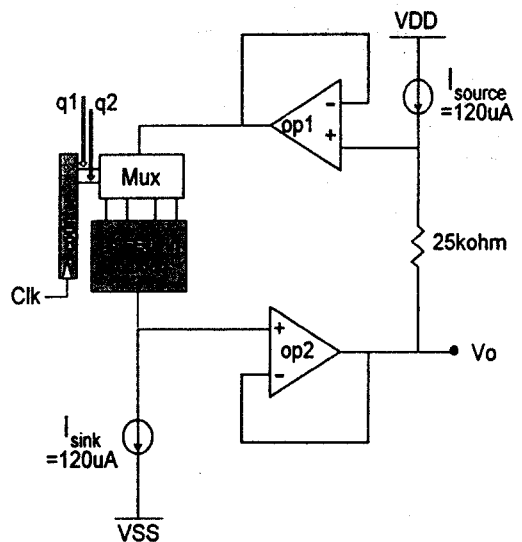


그림 3. 설계된 전체 회로의 개념도  
Fig. 3. Schematic of designed bias circuit.

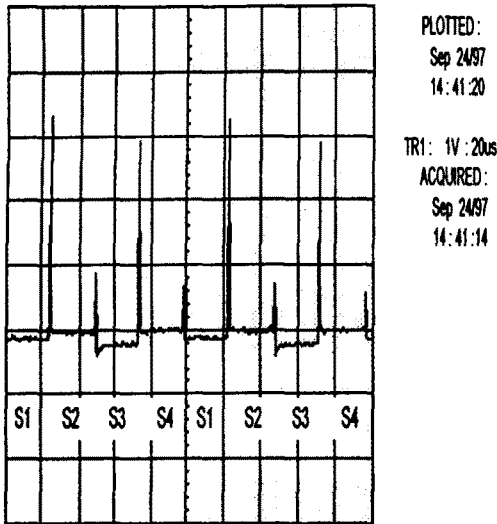


그림 4. 단일 바이어스회로를 이용한 다채널 pH-ISFET의 측정 결과

Fig. 4. Measurement result of multi-channel pH-ISFET using the single bias circuit.

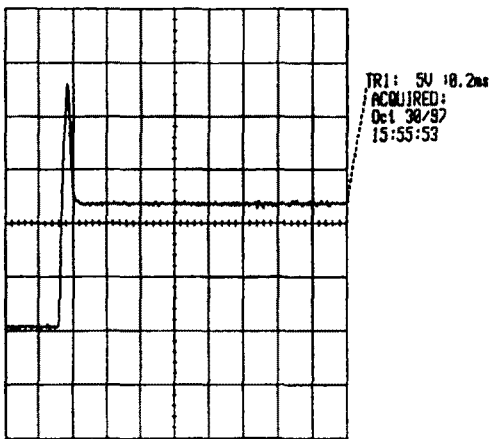


그림 5. 드레인전압 스위칭에 의한 pH-ISFET의 과도 응답

Fig. 5. Transient response of pH-ISFET by switching drain voltage.

측정했을 때 센서의 감도는 약 57mV/pH로 나타났다. 이러한 결과는 이론적 감도인 59mV/pH에 매우 가까움을 알 수 있다.

또한 제안된 바이어스 회로의 적절한 스위칭 시간의

결정을 위해 각각의 센서를 개별적으로 스위칭하면서 시간적 특성을 조사하였다. 측정된 결과는 그림 5에 보여진다. 보고되어진 바에 의하면 overshoot은 시간에 대해 지수 함수적으로 감소하는 결과를 나타낸다. 따라서 overshoot이 최대치에서 63%감소하는 시간을 측정하여 이를 기준으로 삼았다. 측정 결과는 대략 10 $\mu$ s로 조사되어졌으며 이의 10배에 해당하는 100 $\mu$ s를 스위칭 시간으로 결정한다면 overshoot은 최대치의 0.0045%로 감소하여 센서의 안정된 출력에 거의 영향을 미치지 않을 것이다.

### 2-3. CMOS를 이용한 단일 바이어스회로의 집적화

지금까지 스위칭방식을 이용한 바이어스 회로의 성능을 이산 소자를 이용하여 검증하였다. 이렇게 검증되어진 회로를 휴대용 및 센서시스템에 적용하기 위해서는 이산소자를 이용하여 구성한 회로에 비해 더욱 전력소모가 적고 매우 적은 면적에 구현할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 검증되어진 바이어스회로를 CMOS를 이용하여 집적화 하였다. 설계시 시뮬레이션과 레이아웃에 사용되어진 소프트웨어는 각각 Hspice와 Cadence tool이다.

그림 6은 설계되어진 연산증폭기의 구조로서 널리 사용되어지는 Miller OTA 구조이다. 연산 증폭기는 측정 시스템의 특성에 가장 영향을 많이 주는 부분이므로 이를 충분히 고려하여 설계해야 한다. 연산 증폭기에 있어서 일반적으로 평가의 기준이 될 수 있는 특성은 개방이득, 주파수대역, slew rate 그리고 출력범위<sup>11)</sup> 등이 있는데, 이러한 특성이 모두 우수한 연산증폭기를 설계하기는 매우 어렵다. 그러므로 시스템에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 요인들을 우선적으로 고려하여 설계하여야 한다. 본 논문에서는 pH-ISFET이 스위칭에 의해 안정되는 시간, pH변화에 따른 출력의 범위, 그리고 입력의 변화에 대해 출력이 충분히 반응할 수 있도록 연산증폭기를 설계하였다. 여기서 스위칭에 의해 안정화되는 시간은 overshoot이 63%로 감소되는 시간의 10배인 100 $\mu$ s이다. 그리고 일반적으로 측정에 사용되어지는 pH의 범위는 pH2에서 pH12까지 이고 이론적인 감도 59mV/pH를 고려한다면 최대 출력의 범위는 590mV이다. 즉 5.9mV/ $\mu$ s 이상의 slew rate을 가진다면 스위칭에 의한 응답을 지연없이 측정할 수 있다. 이로부터 10배에 해당하는 약 59mV/ $\mu$ s 이상의 slew rate을 가진다면 스위칭에 의한 신호의 왜곡없이 측정이 가능

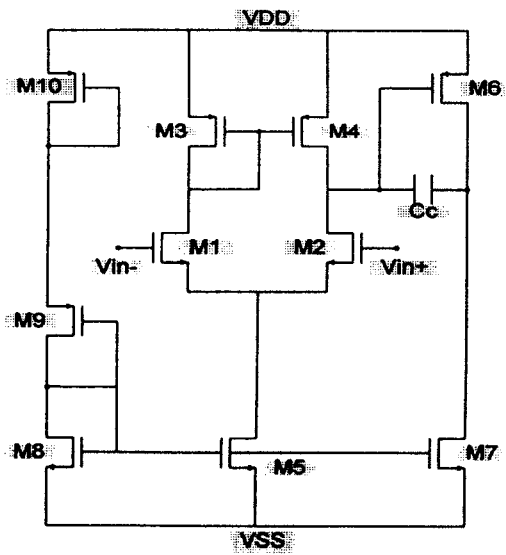


그림 6. 연산증폭기의 구조

Fig. 6. Structure of operational amplifier.

표 1. 설계된 연산증폭기의 성능

Table 1. Specifications of designed operational amplifier.

Specifications	Simulation Results
Open Loop Gain	≈ 80 dB
Phase Margin	≈ 80 degree
Slew Rate	+SR = 5 V/μs -SR = -5 V/μs
Output swing	Approximately Full Swing
Compensation Capacitor	0.7 pF

할 것이다. 그림 6에서 Cc는 주파수 특성을 보상하기 위한 보상용 capacitor로서 0.7pF이다. 설계된 연산증폭기의 기본적인 성능은 표 1에 나타나있다. 표 1에서 80dB의 개방이득은 연산증폭기가 완충증폭기로서 동작하기에 충분한 이득이며, 80°의 위상 여유는 안정된 주파수 특성을 가지기에 충분하다. 또한 slew rate는 5V/μs이므로 예상되어지는 스위칭에 의한 신호를 왜곡 없이 측정할 수 있고 연산증폭기의 출력범위가 거의 0V에서 5V까지 이므로 센서의 최대 출력범위 590mV보

다 충분히 넓다. 그림 7은 연산증폭기의 주파수 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 그리고 pH-ISFET의 드레인 전류를 일정하게 유지하기 위하여 multiple cascode 형태의 전류원을 설계하였다. 이러한 형태의 전류원은 출력저항값이 커서 부하의 영향을 적게 받는 장점이 있다. 실제로 사용되어질 센서의 동작점을 고려하여 pH-ISFET의 드레인에 전류 120μA를 공급하도록 설계하였고, 확산 저항 25kΩ에 120μA의 전류가 흐르도록 설계하여 pH-ISFET의 드레인과 소스 양단에 3V가 인가되도록 하였다. 이러한 조건하(I<sub>D</sub>=120μA, V<sub>DS</sub>=3V)에서 pH-ISFET은 깊은 포화상태에 이르러 안정된 동작을 할 수 있다. 이러한 바이어스 상태하에서는 수소이온 감지 센서 뿐만 아니라 Na, K, 그리고 Ca이온 센서 모두가 깊은 포화영역을 유지한다. 따라서 향후 하나의 바이어스 회로로 여러 가지 이온센서에 동시에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

아날로그 멀티플렉서는 순차적으로 여러 개의 센서에 바이어스를 인가하기 위한 스위치로 사용되어졌다. 멀티플렉서에 의해 선택되어진 ISFET은 일정 시간동안 포화상태의 동작점을 유지하며 pH의 변화에 따른 감도를 나타내게 된다. 설계되어진 멀티플렉서는 크게 스위치와 스위치 선택을 위한 디코더, 그리고 디코더를 시간에 따라 순차적으로 구동할 2비트 카운터로 이루어

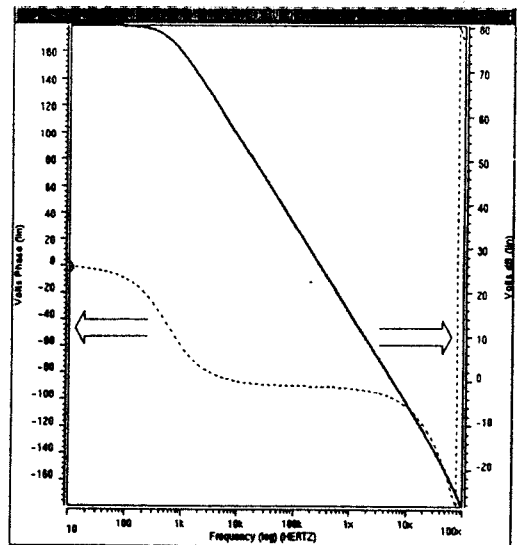


그림 7. 연산증폭기의 주파수 특성

Fig. 7. Frequency response of operational amplifier.

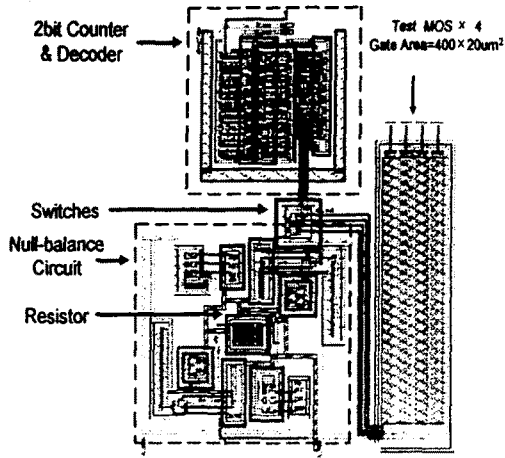


그림 8. 전체회로의 레이아웃

Fig. 8. Layout of the full circuit.

어진다. 여기에서 2비트 카운터는 발진이나 불안정한 과도 특성을 피하기 위해 master-slave<sup>[12]</sup>형의 JK flip-flop을 이용하였다. 설계되어진 2비트 카운터는 외부 클럭의 반주기에 해당하는 시간마다 값이 바뀌어 선택하는 스위치가 바뀐다. 즉, 바이어스의 스위칭 시간은 외부 클럭의 반주기에 해당하므로 200 $\mu$ s 이상의 주기를 갖는 클럭으로 카운터를 구동시켜야한다.

이렇게 개별적으로 설계되어진 구성요소들을 앞에서 소개되어진 그림 3의 개념도와 같이 배치하였다. 그림 8은 설계되어진 회로를 Cadence 레이아웃 에디터 (layout editor)를 이용하여 레이아웃 한 결과이며, 전체 회로의 면적은 약 660 $\mu$ m $\times$ 500 $\mu$ m이다. 레이아웃의 우측에 나타났는 400 $\times$ 20 $\mu$ m<sup>2</sup>의 게이트 면적을 가지는 4개의 MOS는 현재 사용되어지는 CMOS표준공정에 의해서는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 게이트 감지막을 가지는 ISFET을 제작할 수 없으므로 실제로 사용되어질 ISFET과 같은 크기의 게이트 면적을 가지는 MOSFET을 이용해 전체 회로의 스위칭 특성을 테스트하기 위하여 사용될 것이다. 일반 MOSFET은 ISFET에 비해 시간응답특성이 매우 빠르지만 같은 소자 구조를 가지므로 회로의 동작 가능성을 검증하는데는 무리가 없을 것이라 여겨진다. 레이아웃된 회로는 DRC(design rule check)를 통해 디자인 규칙과의 부합성이 확인되었으며, 정확한 배선을 확인하기 위하여 LVS(layout vs. schematic)가 행해 졌다. 그림 9는 전체회로를 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션시 pH-ISFET의 전기 화학적인 소자특

성을 spice 변수로 모델링<sup>[13-14]</sup>을 하는데 어려움이 많기 때문에 pH-ISFET과 같은 크기의 게이트 면적을 가지는 MOSFET을 대신 사용하였고, 소자의 특성 차이에서 비롯되는 개별 pH-ISFET의 유효 임계 전압의 차이를 고려하여 각각의 MOSFET에 게이트 전압을 0.2V씩 다르게 인가하였다. 그림 9를 살펴보면 4개의 소자가 각각 스위치에 의해 선택되어 바이어스 신호가 인가되었을 때의 시간에 따른 출력을 보여주는데 유효 임계 전압의 차이가 영전위회로의 출력 단에서 나타남을 알 수 있다. 즉 측정소자가 가지는 기생용량이 스위칭 pulse에 의해 충·방전됨을 알 수 있고, 충전된 상태에서 충분히 동작점에 도달함을 보여준다. 이로부터 실제 MOSFET을 ISFET로 대체하더라도 스위치에 인가하는 입력신호의 주기를 조절한다면 충분히 적용 가능함을 알 수 있다.

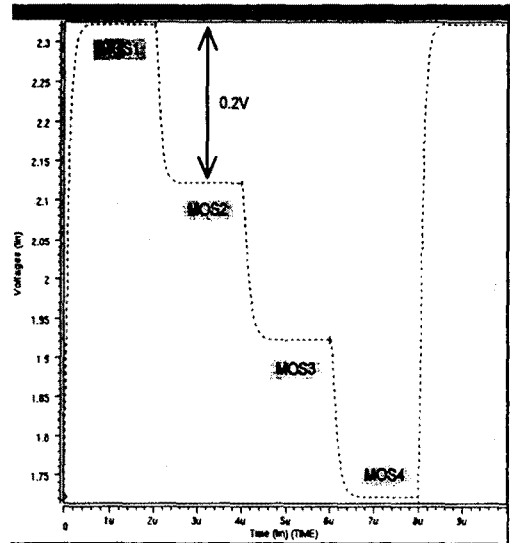


그림 9. 전체 회로의 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulation result of the full circuit.

### III. 결 론

여러 개의 同種 또는 異種 ISFET을 동시에 측정함에 의해 다양한 이온들을 동시에 검출하는 것이 가능할 뿐만 아니라 센서의 신뢰성 및 안정성을 향상시킬 수 있을 것이다. 다채널 ISFET에 각각 바이어스를 인가할 경우 센서의 수에 비례하여 센서 구동회로의 크기 및 소비 전력이 증가되는 단점이 있다. 또한 센서

회로의 소형화, 보안성, 센서와의 일체화 면에서 보면 측정회로의 ASIC화가 필히 요구된다.

본 논문에서는 ISFET신호의 신뢰도를 향상시키기 위해 아날로그 스위치를 영전위회로에 적용하여 4개의 pH-ISFET을 동시에 구동할 수 있는 바이어스 회로를 구현하였다. 설계시 여러 채널의 ISFET을 바이어스 할 때 제기되어질 수 있는 전력소모와 면적의 문제를 가장 고려하였다. 설계에 앞서 스위칭에 의한 바이어스 인가 방법의 동작 가능성은 상용 IC와 이산 소자들을 이용한 실험을 통해 검증하였다. 그 결과 수소이온에 대한 감도는 대략 57mV/pH로 이론적인 감도 59mV/pH와 비슷하게 나타났으며 이러한 결과는 바이어스를 스위칭 하지 않았을 때와 비슷하다. 그리고 실험을 통해 스위칭 시간을 100 $\mu$ s로 결정할 수 있었다. 실험적으로 검증된 측정시스템을 IC(integrated circuit) 제작과 휴대성을 고려하여 소비전력을 줄이면서 적은 면적에 제작할 수 있도록 CMOS를 이용하여 설계하였다. 설계시 Hspice를 이용하여 시뮬레이션 하였고, Cadence tool을 이용하여 레이아웃 하였으며 DRC(design rule check)와 LVS(layout vs. schematic)를 수행하여 레이아웃된 회로를 검증하였다. 설계된 바이어스 회로의 구동전압은 0~5V 이며 현대전자의 0.8 $\mu$ m, double poly공정을 이용하여 설계되어졌다. 설계된 회로의 시뮬레이션 결과 각각의 구성요소가 우수하게 동작됨을 알 수 있었고 전체회로 역시 양호하게 동작하였다. 이러한 스위칭을 이용한 바이어스 방식은 다채널 센서 시스템에 적용할 수 있는 센서 개수의 제한을 극복할 수 있고, 다채널 센서의 측정을 통해 신호의 신뢰도 향상 뿐만 아니라 ISFET의 게이트 감지막을 변화시킴으로써 여러 가지 이온의 동시 측정까지 가능하게 할 것이다. 향후 pH-ISFET의 여러 가지 간섭효과를 포함한 정확한 모델링이 행해져야 할 것이며 이와 더불어 제작된 시스템을 통해 측정된 값들의 신뢰도를 높이기 위해 신호의 연산처리까지 할 수 있는 외부 신호처리회로도 CMOS를 이용하여 집적화해야 할 것이다. 또한 ISFET과 표준 CMOS의 동시 제작에 적합한 공정을 개발하여 센서와 신호처리 회로를 하나의 chip에 집적화 시킨다면 더욱 적은 면적을 이용해 다채널, 지능형 그리고 다기능적인 스마트 센서 시스템을 개발할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Lui, B. Margesin, V. Zanini, M. Zen, G. Soncini, and S. Martinoia, "A test chip for ISFET/CMOS technology development," *Proc. ICMTS96*, Trento, 1996.
- [2] L. Bousse, J. Shott, and J. D. Meindl, "A process for the combined fabrication of ion sensors and CMOS circuits," *IEEE ED. Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 44-47, 1988.
- [3] J. N. Zemel "Ion-sensitive field effect transistors and related devices," *Anal. Chem.*, vol. 47, pp. 255A-268A, 1975.
- [4] F. V. Perezgasga and A. K. Covington, "Multisensor operation of ion-sensitive field-effect transistors in the constant current mode," *Sensors and Actuators B*, vol. 6, pp. 219-222, 1992.
- [5] H. I. Seo, C. S. Kim, T. C. W. Yeow, B. K. Sohn, and M. R. Haskard, "Very large integrated pH-ion sensitive field effect transistor sensor array chip," *The 7th conf. on Sensor Technology'96*, pp. 150-155, 1996.
- [6] K. Tsnkada, Y. Miyahara, Y. Shibata, and H. Miyagi, "An integrated chemical sensor with multiple ion and gas sensors," *Sensors and Actuators*, vol. B, no. 2, pp. 291-295, 1990.
- [7] 손병기 외, 반도체 요소/포도당 센서 개발, 과학기술처, pp. 160-164, 1991.
- [8] R. L. Smith, J. Janata, and R. J. Huber, "Transient Phenomena in Ion Sensitive Field Effect Transistors," *J. Electrochem. Soc. Solid-State Science and Technology*, vol. 127, no. 7, pp. 1599-1603, 1980.
- [9] 손병기 외, FET형 반도체 마이크로센서 개발(III), 센서기술연구소, pp. 25-81, 1993.
- [10] P. R. Gray and R. G. Meyer, Analysis and Design of analog integrated circuits, *John wiley & Sons, Inc.*, pp. 409-478, 1993.
- [11] P. E. Allen, D. R. Holberg, CMOS analog circuit design, *Harcourt Brace Jovanovich College Publishers*, pp. 365-455, 1987.

[12] T. A. DeMassa, Z. Ciccone, Digital integrated circuits, *John wiley & Sons, Inc.*, pp. 526-534, 1996.

[13] S. Martinoia, G. Massobrio, and M. Grattarola, "An ISFET model for CAD applications," *Sensors and Actuators*, vol. B, no. 8, pp. 261-265, 1992.

[14] S. Martinoia, G. Massobrio, and M. Grattarola, "Modelling non-ideal behaviours in H<sup>+</sup>-sensitive FETs with SPICE," *Sensors and Actuators*, vol. B, no. 7, pp. 561-564, 1992.

---

著 者 紹 介

---

**조 병 욱**

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-08, p.101 참조  
현재 경북대학교 전자공학과 박사과정

**최 평**

『센서학회지 제3권 제1호』 논문94-3-1-07, p.53 참조  
현재 경북대학교 전자·전기공학부 부교수



**김 영 진**

1973년 1월 6일생. 1996년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 현재 경북대학교 센서공학과 석사과정. 주관심분야 : 반도체 마이크로 센서, CMOS 회로 모델링 및 설계.

**손 병 기**

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-08, p.101 참조  
현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수, 센서기술연구소 소장

**김 창 수**

『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-08, p.101 참조  
현재 경북대학교 센서기술연구소 선임연구원