

논문 2016-53-2-14

## pH에 민감한 그래핀 전계효과 트랜지스터(FET)

(pH Sensitive Graphene Field-Effect Transistor(FET))

박 우 환\*, 송 광 섭\*

(Woo Hwan Park and Kwang Soup Song<sup>Ⓢ</sup>)

## 요 약

최근 환경, 의료분야에서 실시간 검출 및 인체 삽입형 pH 센서에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 생체적 합성이 우수한 그래핀을 이용하여 실시간 pH 검출이 가능한 센서를 개발하였다. Polyethylene terephthalate(PET) 기판에 전사된 그래핀 표면에 이온 용액속에서 동작하는 전계효과 트랜지스터(solution-gated field-effect transistors; SGFETs)를 제작하였으며 이를 이용하여 이온 용액의 pH를 검출하였다. 제작한 트랜지스터의 게이트 채널 길이는 500  $\mu\text{m}$ , 게이트 채널 폭은 8 mm이다. 이온 용액속에서 트랜지스터 동작특성 및 pH 감도를 평가하기 위하여 드레인-소스 전압( $V_{\text{DS}}$ )에 따른 드레인-소스 전류( $I_{\text{DS}}$ ) 및 게이트-소스 전압( $V_{\text{GS}}$ )에 따른 드레인-소스 전류( $I_{\text{DS}}$ )를 측정하였다. PET기판에 전사된 그래핀 위에 제작한 그래핀 SGFETs의 전류-전압 특성은 이온 용액내에서 매우 안정적으로 동작하였으며 그래핀 SGFETs의 Dirac point는 이온 용액의 pH값이 증가함에 따라 양의 방향으로 19.32 mV/pH씩 증가하였다.

## Abstract

Recently, the detection of pH with real-time and *in vivo* has been focal pointed in the environmental or medical fields. In this work, we developed the pH sensor using graphene sheet. Graphene has high biocompatibility. We fabricated flexible solution-gated field-effect transistors (SGFETs) on graphene sheet transferred on the polyethylene terephthalate (PET) substrate to detect pH in electrolyte solution. The gate length was 500  $\mu\text{m}$  and the gate width was 8 mm. We evaluated the current-voltage ( $I$ - $V$ ) transfer characteristics of graphene SGFETs in pH solution. The drain-source current ( $I_{\text{DS}}$ ) and the gate-source voltage ( $V_{\text{GS}}$ ) curves of graphene SGFETs were depended on pH value. The Dirac point of graphene SGFETs linearly shifted to the positive direction about 19.32 mV/pH depending on the pH value in electrolyte solution.

**Keywords** : 그래핀, 전계효과 트랜지스터, pH센서, 전류-전압 특성, Dirac point

## I. 서 론

일상생활서 pH는 대기, 농업, 음식, 환경 등 모든 분야에 걸쳐 매우 밀접한 관련이 있다<sup>[1]</sup>.

인간의 신체는 각 부위별 pH 값이 다르며 매우 중요하

\* 정회원, 금오공과대학교(Kumoh National Institute of Technology)

\* 정회원, 금오공과대학교(Kumoh National Institute of Technology)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: kssong10@kumoh.ac.kr)

※ 본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

Received ; November 23, 2015

Revised ; December 18, 2015

Accepted ; January 20, 2016

다. 그 예로 혈액의 pH 값은 7.35-7.4로 약알칼리성을 나타내고 위산은 pH 1-3.5로 강산성, 피부표면은 pH 4.5-5.8의 약산성을 나타낸다. 음이온이 함유되어 판매되는 음료수는 일반적으로 인체에 가장 흡수가 잘되는 pH 값(8.5-9)을 고려하여 만든 것이며, 피부에 직접 바르는 화장품도 동·서양인 피부의 pH 차이를 고려하여 제품을 생산한다. 이처럼 pH 값은 일상생활에 매우 중요한 수치이며 일반적인 측정 방법은 pH에 민감한 종이(litmus paper)를 사용하거나 글라스 재질의 pH 전극 및 소형 센서의 경우 실리콘 재질에 제작한 이온 민감형 전계효과 트랜지스터(ion-sensitive field-effect transistors: ISFETs) 형태의 pH 센서를 이용하여 측정하고 있다<sup>[2]</sup>. 근래 들어

서는 환경, 의료분야에서 가요성(flexibility)이 높고 on-line 실시간으로 pH 값을 측정할 수 있는 pH 센서에 대한 요구가 증가하고 있으면 이를 구현하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다<sup>[3-6]</sup>. 그래핀(graphene)은 단일 탄소 원자층으로 이루어진 2차원 구조로,  $sp^2$  결합에 의한 벌집 모양의 배열을 이루고 있다. 이러한 그래핀은 가요성 및 빛 투과율이 우수하고 높은 전자 이동도(mobility)를 가진다. 이로 인해 디스플레이, 반도체와 같은 전자산업 분야의 차세대 전자소자 재료로 인정받고 있다. 또한 그래핀은 생체적합성 및 화학적 안정성이 우수하여 세포배양 및 바이오센서 분야에서도 가능성을 나타내고 있다<sup>[7]</sup>.

전계효과 트랜지스터를 이용한 전하 검출형 바이오센서는 높은 입력임피던스와 낮은 출력임피던스를 가지고 있으며 미세공정을 이용한 소형 고감도 바이오센서를 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>[8]</sup>. 그러나 일반적으로 실리콘을 이용한 ISFETs는 이온 용액속의 이온들로부터 게이트 채널을 보호하기 위해 게이트 채널부위에 절연층 보호막을 증착하고 있으며, 이들 절연층으로 인해 전하 검출감도가 감소하는 문제가 있다<sup>[2]</sup>. 그래핀을 이용하여 제작한 이온 용액에서 동작하는 전계효과 트랜지스터(solution-gate field-effect transistors: SGFETs)는 전해질 용액 안에서 동작 안정성이 우수하여 게이트 채널을 보호하기 위한 절연막이 필요 없다. 따라서 게이트 채널이 이온 용액과 직접적으로 접촉하는 구조로써 고감도 전하 검출형 바이오센서를 제작할 수 있다<sup>[9-10]</sup>.

본 연구에서는 polyethylene terephthalate(PET) 재질에 단일 층 그래핀(single layer graphene)을 전사하고 전사된 그래핀위에 SGFETs를 제작하였다. 이온 용액속에서 그래핀 SGFETs의 트랜지스터 전류-전압 특성을 분석하였으며 pH 2에서부터 pH 12까지 넓은 범위에 걸쳐 pH 감응성을 평가하였다.

## II. 방법

### 1. 단일 층 그래핀(single layer graphene sheet)

단일 층 그래핀은 삼성전자에서 구입하였으며 구입한 그래핀은 촉매금속을 이용한 화학 기상 증착(chemical vapor deposition: CVD) 방법을 사용하였다. 구체적으로는 구리 호일(copper foil)을 이용하여 1000°C 고온에서 메탄( $CH_4$ ) 및 수소( $H_2$ ) 가스를 주입한 후 급속 냉각을 통해 구리막상 표면에 mono-layer 그래핀을 합성하였다. 합성된 그래핀에 열전달 테이프(thermal

tape)를 부착하고 구리 호일을 제거하기 위해 0.1 M 농도의 과산화황산암모늄(ammonium persulfate ( $(NH_4)_2S_2O_8$ ): APS)을 이용하여 구리 호일을 제거하였다. 이후 열전달 테이프에 부착되어 있는 그래핀을 원하는 타겟 기판(target substrate)에 전사하기 위하여 roll-to-roll 방식을 이용하여 PET 또는 실리콘( $Si/SiO_2$ ) 기판에 전사하였다.

### 2. 그래핀 분석

그래핀 형태 및 특성을 분석하기 위해서 실리콘( $Si/SiO_2$ ) 기판위에 전사된 그래핀을 이용하였다. 실리콘( $Si/SiO_2$ ) 기판에 전사된 그래핀 특성은 파장 514 nm의 아르곤-이온 레이저를 이용한 Raman 분광기(Renishaw, system1000)를 이용하였다. 기판에 전사된 그래핀 형태는 주사형 전자현미경(field emission scanning electron microscope: FE-SEM JEOL, JSM6701F)을 이용하였으며 working distance는 7.8 mm, accelerating voltage는 15.0 kV에서 분석하였다. 전사된 그래핀 표면 거칠기(roughness)는 원자간 현미경(atomic force microscope: AFM, ParkSYSTEMS, XE-100)을 이용하였다. 그래핀의 원자 상태는 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS: monochromatic Al K $\alpha$  X-ray source, 1486.6 eV, beam diameter 400  $\mu$ m) 장비를 이용하여 그래핀 표면 기능기를 분석하였다.

### 3. 그래핀 SGFETs제작 및 pH 감도 평가

그래핀 SGFETs의 드레인 및 소스 전극은 ohmic 접촉을 위하여 드레인, 소스 전극에 금(99.99%)을 증착하였다. 각 전극 와이어 본딩은 실버 페이스트를 이용하여 진행하였으며, 와이어 본딩된 드레인 전극과 소스 전극은 에폭시를 이용하여 전해질 용액으로부터 보호하였다. 제작한 그래핀 SGFETs의 게이트 채널 길이는 500  $\mu$ m, 채널 폭은 8 mm이다.

pH 용액은 3차 증류수(18.5 M $\Omega$ /cm)에 넓은 범위의 pH 버퍼용액 제조가 가능한 Carmod buffer용액(0.2 M boric acid, 0.05 M citric acid and 0.1 M trisodium phosphate)을 이용하여 pH 2에서 pH 12까지 제조하였다. 이온 용액속 그래핀 SGFETs의 트랜지스터 전류-전압 특성 및 감도 평가는 2대의 소스미터(Keithley 2400)를 이용하였으며 2대의 소스미터는 LabVIEW 프로그램을 통하여 컴퓨터로 제어하였다. 기준전극으로는 Ag/AgCl을 이용하였으며 pH 버퍼용액의 pH 측정은 디지털 pH미터를 이용하였다.

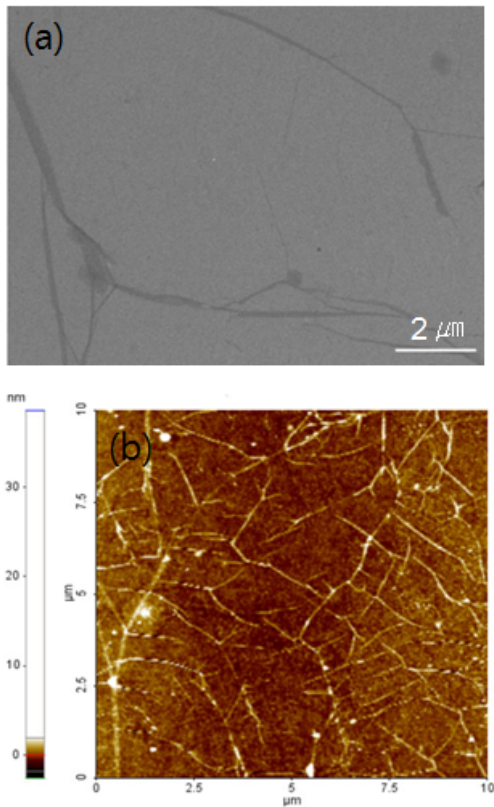


그림 1. 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판위에 전사된 그래핀 (a) FE-SEM 및 (b) AFM 이미지  
Fig. 1. (a) FE-SEM and (b) AFM images of the graphene sheet transferred on Si/SiO<sub>2</sub>.

### III. 결 과

그림 1(a)는 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판위에 전사된 그래핀의 FE-SEM 영상이다. 부분적으로 roll-to-roll 방식의 그래핀 전사 과정에서 발생하는 주름(wrinkle)이 보이고 있다. 또한 CVD방법을 이용한 그래핀 합성 방법은 구리 기판 양쪽면에 그래핀이 형성되기 때문에 구리 기판 에칭공정에서 발생하는 그래핀 조각들이 열전달 테이프에 흡착된 반대쪽 그래핀에 부분적으로 흡착되어 발생하는 그래핀 조각들이 관측된다<sup>[11]</sup>. 그림 1(b)는 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>)에 전사된 그래핀의 AFM영상으로 그래핀의 경계면(boundary)이 관측된다. 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판에 전사된 그래핀의 표면 거칠기(root mean square value of roughness: R<sub>q</sub>)는 1.363 nm이다.

그림 2(a)는 실리콘에 전사된 그래핀의 Raman 스펙트럼으로 그래핀 고유 특성인 G(1588.78 cm<sup>-1</sup>) 피크와 2D(2689.54 cm<sup>-1</sup>) 피크를 관측할 수 있다<sup>[12]</sup>. 전사된 그래핀의 질 평가 지수중 하나인 I<sub>2D</sub>/I<sub>G</sub>비가 2.44로 단일층 그래핀이 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판위에 전사되어 있는

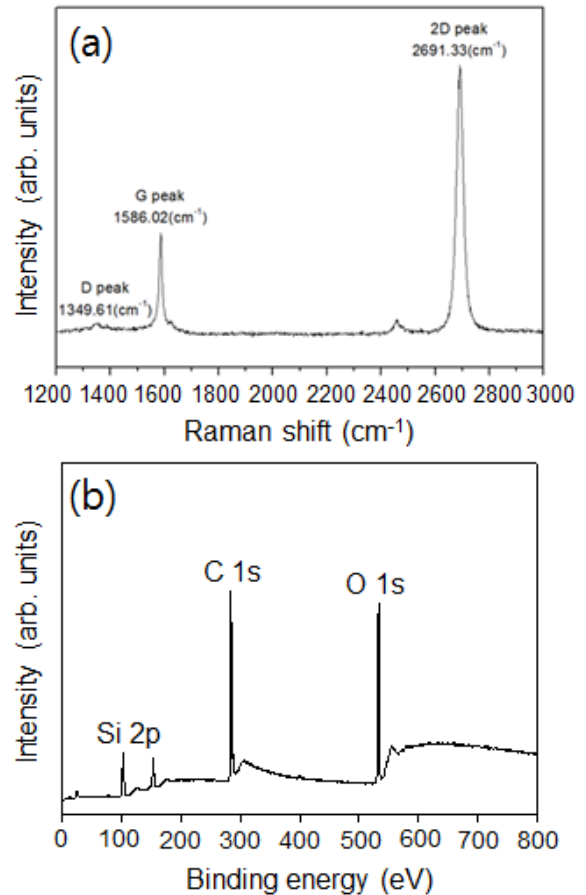


그림 2. 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판위에 전사된 그래핀의 (a) Raman 및 (b) XPS 스펙트럼  
Fig. 2. Spectra of (a) Raman and (b) XPS in the graphene sheet transferred on Si/SiO<sub>2</sub>.

것을 확인할 수 있다. 그래핀의 sp<sup>3</sup> 구조 및 결합등에 의해 나타내는 D 피크는 1349.81 cm<sup>-1</sup> 부근에서 약하게 관측되었다. 그림 2(b)는 그래핀 표면 원자 상태를 측정하기 위한 XPS 스펙트럼이다. 탄소 C 1s 피크는 285.06 eV에서 산소 O 1s 피크는 533.03 eV에서 관측되었다. 측정된 그래핀 표면에서 탄소 C 1s의 원자 비율(atomic ratio)은 82.24%이고 산소 O 1s의 원자 비율은 11.79%이다.

순수 그래핀에서 산소 O 1s 피크가 관측 되는 이유는 다음과 같다. 전사된 그래핀의 두께(0.40 nm)가 매우 얇아 XPS 측정 시 X-ray가 그래핀을 투과하여 실리콘(Si/SiO<sub>2</sub>) 기판의 산소 원자가 관측되기 때문이다. 또한 구리 에칭공정에서 사용하는 과산화황산암모늄 용액에 그래핀이 부분적으로 산화되어 표면 기능화 처리하지 않은 그래핀 표면에서 O 1s가 관측되는 것으로 사료된다<sup>[11]</sup>. 산화에 따른 그래핀 구조는 Raman 스펙트럼에서 D 피크가 관측되는 것과 일치한다. 대기 중 물분자가

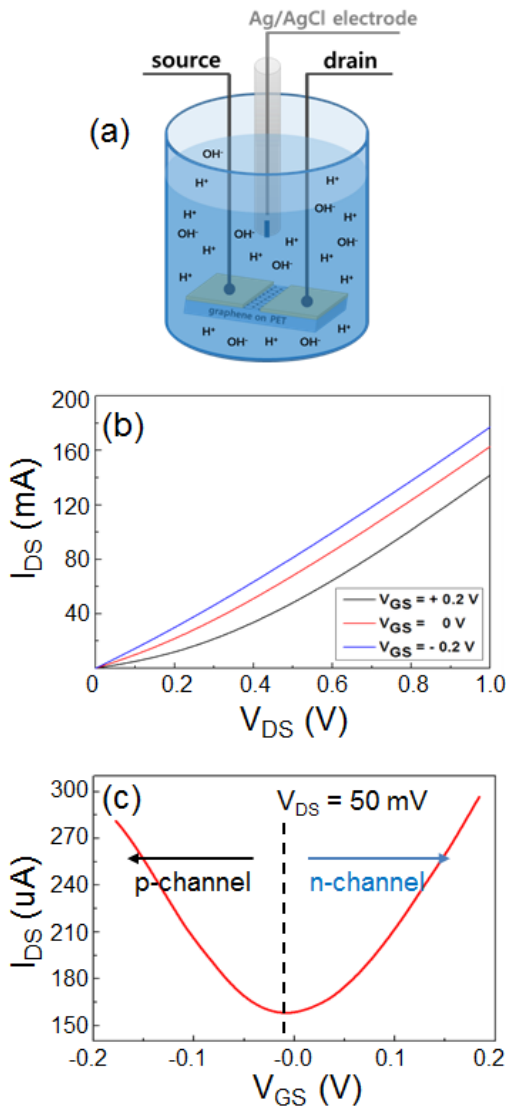


그림 3. pH 버퍼용액 속에서 (a) 그래핀 SGFETs 동작 및 (b) IDS-VDS, (c) IDS-VGS 특성 곡선  
 Fig. 3. (a) Graphene SGFETs in the pH buffer solution and the characteristics of (b) IDS-VDS and (c) IDS-VGS.

그래핀 표면에 흡착하여 발생하는 산소의 영향도 무시할 수 없다. 이들 산소 원자들을 자세하게 구분하기 위해서 탄소 C 1s 피크를 피크 분리하면 C-C/C=C(284.3 eV), 하이드록실 그룹(C-OH, 285.9 eV) 및 카르보닐 그룹(C=O, 288.51 eV)으로 분리된다. 이외에 실리콘(Si 2p) 피크를 확인할 수 있다. 실리콘 피크는 실리콘 기판의 Si와 SiO<sub>2</sub>로부터 측정되는 값이다.

그림 3(a)는 pH 버퍼용액 속에서 그래핀 SGFETs의 동작을 나타낸다. 버퍼용액의 pH는 1회 측정 후 디지털 pH 미터를 이용하여 확인하였다. 드레인, 소스 및 Ag/AgCl 전극은 2대의 소스미터에 연결하여 트랜지스터 특성을 평가하였다. 그림 3(b)는 pH 6 버퍼용액 속

에서 동작하는 그래핀 SGFETs의 드레인-소스 전압 ( $V_{DS}$ )에 따른 드레인-소스 전류( $I_{DS}$ )변화를 나타내고 있다.  $V_{DS}$  인가전압이 커질수록  $I_{DS}$  크기가 증가하며 인가하는 게이트-소스 전압( $V_{GS}$ )이 p-채널 영역에 해당하는 -0.2 V에서 0.2 V사이로 음전압의  $V_{GS}$ 를 인가할수록  $I_{DS}$ 가 증가한다. 그림 3(c)는  $V_{DS}$ 를 50 mV로 고정 후  $V_{GS}$  전압 크기 변화에 따른  $I_{DS}$  변화를 나타내고 있다.

그래핀의 밴드구조는 벌집구조의 육각형 꼭지점에 위치한 탄소를 기준으로 전자가 가득 찬 가전자대(valence band)와 전자가 없는 전도대(conduction band)가 꼭지점에서 만나게 되고 Fermi 준위에서 Dirac cone 형태를 나타낸다<sup>[7]</sup>. 따라서 외부 인가 전압에 따라 그래핀에 흐르는 전하 종류가 바뀌며 Fermi 준위가 바뀌게 된다. 그림 3(c)에서와 같이 전류 값이 가장 작은 Dirac point를 기준으로 오른쪽 양전압을 인가하면 그래핀의 Fermi 준위가 위쪽으로 이동하게 되고 전자가 유도되어 n-channel과 같이 동작하게 된다. 이와 반대로 왼쪽 방향의 음전압을 인가하면 Fermi 준위가 아래쪽으로 이동하고 정공이 유도되어 p-channel과 같이 동작하게 된다. 그림 3(a, b)는 일반적으로 그래핀 전계 효과 트랜지스터에서 나타내는 전류-전압 특성과 매우 유사하며 본 연구에서 제작한 이온 용액속에서 동작하는 그래핀 SGFETs가 pH 버퍼 용액 속에서 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(a)는 그래핀 SGFETs의  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  특성 곡선을 각 pH 버퍼용액에서 나타내고 있다. 그림에 보는 것과 같이 용액의 pH 값이 증가할수록 그래핀 SGFETs의 Dirac point가 오른쪽으로 이동하는 현상을 볼 수 있다. 이는 그래핀 SGFETs의 게이트 채널 표면에 이온 용액의 프로톤 [ $H^+$ ]과 결합(protonation)할 수 있는 산소기가 있기 때문이다. 순수 그래핀의 경우 표면에 산소관련 그룹이 없고  $sp^2$  구조의 탄소로 구성되어 있다. 일반적으로 탄소 표면은 약간의 소수성(hydrophobicity)을 나타내며 용액속의 프로톤과 결합하지 않는다. 그러나 표면이 산화 처리된 그래핀 SGFETs의 게이트 채널 경우 채널 부위에 프로톤과 결합할 수 있는 C-O<sup>-</sup> 및 C-OH 같은 반응기들(active sites)이 있으며 이러한 반응기들은 구리 호일 에칭공정에서 형성된 것으로 사료된다. 게이트 채널위 반응기들은 pH 값이 낮은 산성 용액속에서 용액속 프로톤과 결합하여(protonated) C-OH 및 C-OH<sub>2</sub><sup>+</sup>로 바뀌며 게이트 채널에서 프로톤과 결합한 반응기들은 양전하(positive charge)를 나타낸다. Dirac point를 기준으로 오른쪽 n-채널에서는 게이트 채널에

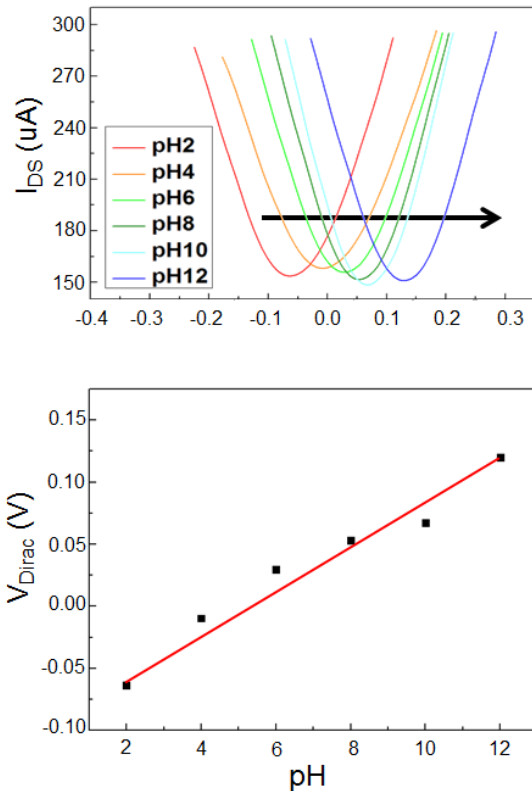


그림 4. 각 pH 버퍼용액 속에서 (a) 그래핀 SGFETs의 IDS-VGS 특성 곡선 및 (b) pH 감도  
Fig. 4. (a) The IDS-VGS characteristics of graphene SGFETs in pH buffer solutions and (b) pH sensitivity.

증가한 양전하에 의한 인력으로 채널내 전자가 증가하고 전류가 증가하는 현상이 발생한다. pH 값이 감소할수록 게이트 채널 표면은 더 많은 프로톤과 반응하게 되고 채널 표면 양전하는 증가한다. 게이트 채널에 증가한 양전하에 의해 전류는 증가하고 Dirac point는 왼쪽으로 이동한다. 반면 왼쪽 p-채널에서는 게이트 채널 표면에 양전하가 증가함에 따라 채널 정공과 반발력에 의해 전류가 감소한다. pH 값이 감소할수록 게이트 채널 표면은 더 많은 프로톤과 반응하게 되고 채널 표면의 양전하는 증가하여 p-채널 전류는 감소하고 Dirac point는 왼쪽으로 이동하게 된다.

반면 pH 값이 높은 용액에서는 상대적으로 이온 용액속에 프로톤 농도가 낮고 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)이 증가하여 그래핀 게이트 채널위 C-O<sup>-</sup> 및 C-OH 반응기들은 탈프로톤(deprotonation)화 반응이 중점적으로 발생한다. 탈프로톤화에 의해 게이트 채널 반응기 들은 C-O<sup>-</sup>, C-O로 바뀌며 게이트 채널은 높은 pH 용액속에서 음전하(negative charge)를 나타낸다. pH 값이 높아질수록 게이트 채널의 음전하는 증가하게 되고 n-채널

에서는 전류가 감소하며, p-channel에서는 전류가 증가하여 그래핀 SGFETs의 Dirac point는 오른쪽으로 이동하는 것으로 사료된다. 그림 4(b)는 그래핀 SGFETs의 pH 감도를 나타낸 것으로 pH 2에서부터 pH 12까지 넓은 범위에 걸쳐 평균적으로 19.32 mV/pH 감도를 나타내었다.

일반적으로 pH 센서는 Nernstian 방정식에 의해 pH 변화에 따라 58 mV/pH 감도를 나타내야 한다<sup>[2]</sup>. 그러나 본 연구에서 그래핀 SGFETs를 이용한 pH 센서 감도는 Nernstian 방정식과 일치하지 않는다. 이는 그래핀 SGFETs의 게이트 채널에 프로톤과 반응하는 반응기들이 부족해서 감도가 떨어지는 것으로 사료된다. 만약, 게이트 채널에 물리적/화학적 방법을 이용하여 이온용액 속 프로톤과 반응할 수 있는 기능기를 증가시킨다면 pH 감도는 증가할 것으로 예상된다.

#### IV. 결론

pH 값은 의료 진단 및 일상생활의 주변 환경에서 광범위하게 측정되고 있으며 매우 중요한 지표로 활용되고 있다. 이러한 pH를 빠르고 정확하게 측정하기 위해서 많은 방법들이 제시되고 있으며 최근 들어 환경 및 의료분야에서는 구부릴 수 있고 실시간으로 pH를 측정할 수 있는 센서에 대한 요구가 증가하고 있다. PET재질에 전사된 그래핀은 가요성이 우수하며 트랜지스터 구조의 전하검출형 pH 센서는 실시간 pH 측정이 가능하다. 본 연구에서는 가요성이 우수하고 실시간으로 pH를 측정하기 위하여 PET위에 전사된 그래핀에 SGFETs를 제작하고 pH 센서 감도를 평가하였다.

향후 연구에서는 그래핀 SGFETs 게이트 채널에 프로톤과 결합하는 기능기를 물리적 및 화학적 방법을 이용하여 형성하고 pH 감도를 증가시키는 방법을 제시할 것이다. 그 결과 pH 감도가 향상된다면 그래핀 SGFETs의 가요성을 이용한 다양한 형태의 pH 센서가 제작 가능할 것이며 활용 분야 또한 광범위하게 적용할 수 있을 것이다.

#### REFERENCES

[1] J.M. Alexander, B. Jeff, A.B.D. Colin, and R.L. Christopher, "pH-Sensitive Holographic Sensors," Anal. Chem., Vol. 75, no. 17, pp. 4423-4431, 2003.



- [2] K.S. Song, Y. Nakamura, Y. Sasaki, M. Degawa, J.H. Yang, H. Kawarada, "pH-sensitive diamond field-effect transistors (FETs) with directly aminated channel surface," *Anal. Chim. Acta.*, Vol. 573-574, no. 12, pp. 3-8, 2006.
- [3] L. Manjakkal, B. Synkiewicz, K. Zaraska, K. Cvejin, J. Kulawik, D. Szwagierczak, "Development and characterization of miniaturized LTCC pH sensors with RuO<sub>2</sub> based sensing electrodes," *Sens. & Actuat. B*, Vol. 223, pp. 641-649, 2016.
- [4] N. Uria, N. Abramova, A. Bratov, F. M. Pascual, E. Baldrich, "Miniaturized metal oxide pH sensors for bacteria detection," *Talanta*, Vol 147, pp. 364-369, 2016.
- [5] Y. Qiao, T. Xu, Y. Zhang, C. Zhang, L. Shi, G. Zhang, S. Shuang, C. Dong, "Green synthesis of fluorescent copper nanoclusters for reversible pH-sensors," *Sens. & Actuat. B*, Vol. 220, pp. 1064-1069, 2015.
- [6] J. Ma, C. Ding, J. Zhou, Y. Tian, "2D ratiometric fluorescent pH sensor for tracking of cells proliferation and metabolism," *Biosen. & Bioele.*, Vol 70, pp. 202-208, 2015.
- [7] 이병훈, 황현준, 장경은, 김윤지, 김소영, 유원범, "그래핀 소자 기술," *대한전자공학회지* 제42권, 제 7호, 76-87쪽, 2015년 7월
- [8] K.S. Song "Detection of SNPs using electrical biased method on diamond FETs," *IEIE*, Vol. 52, 3, pp. 190-195, 2015.
- [9] I.Y. Sohn, D.J. Kim, J.H. Jung, O.J. Yoon, T.N. Thanh, T.T. Quang, N.E. Lee, "pH sensing characteristics and biosensing application of solution-gated reduced graphene oxide field-effect transistors," *Biosen. & Bioele.*, Vol. 45 pp. 70-76, 2013.
- [10] W. Yue, S. Jiang, S. Xu, Y. Ma, C. Bai, "Fabrication of graphene FETs combined with fluorescence and its double read-out system," *Sens. & Actuat. B*, Vol 214, pp. 204-210, 2015.
- [11] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X.F. Xu, J.S. Park, Y. Zheng, B.H. Hong, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes," *Nat. Nanotech.*, Vol. 5, no. 8, pp. 574-578, 2010.
- [12] H.G. Oh, H.G. Nam, D.H. Kim, M.H. Kim, K.H. Jhee, K.S. Song, "Neuroblastoma cells grown on fluorine or oxygen treated graphenes sheets," *Mate. Lett.*, Vol. 131, pp. 328-331, 2014.

---

 저 자 소 개
 

---



박 우 환(정회원)

2016년 금오공과대학교 메디컬IT융  
합공학과 졸업.

<주관심분야 : 카본 전극 성막, 바  
이오센서>



송 광 섭(정회원)

대한전자공학회 논문지  
제 48권 SC편 제 2호 참조