

## 빛에 의해 변조되는 금속-그래핀 컨택이 그래핀 포토디텍터의 광응답도에 미치는 영향

이창주 · 심재훈 · 박홍식<sup>†</sup>

### Effects of Optically-modulated Metal-graphene Contact on the Photoresponsivity of Graphene Photodetectors

Chang-Ju Lee, Jae Hoon Shim, and Hongsik Park<sup>†</sup>

#### Abstract

Graphene is recognized as a promising material for silicon photonics, since it has a wide optical-window that entirely covers the optical communication wavelength region (1.3~1.6- $\mu\text{m}$ ) and extremely high-carrier mobility that makes it possible to fabricate the high-speed photodetectors. However, the maximum absorbance of monolayer graphene is only 2.3%, which limits the photoresponse characteristics of graphene photodetectors. As a result, a low photoresponsivity of graphene photodetector is a critical issue limiting the use of graphene photodetectors in the optical communications field. In this paper, we investigated effects of optically-modulated metal-graphene contact on the photoresponsivity of graphene photodetectors. The optical modulation of the contact resistance mainly determined the photoresponse characteristics of graphene photodetectors. The Ni-contact graphene photodetector which has a characteristic of the significant optical modulation of metal-graphene contact showed a higher photoresponsivity than the Pd-contact device. This work will provide a way to improve the photoresponse characteristics of graphene-based photodetector and contribute to the development of high-speed/high-responsivity graphene photodetector.

**Keywords:** Graphene, Photodetector, Optically-modulated contact, Metal-graphene contact, Photoresponsivity

#### 1. 서 론

그래핀은 지금까지 알려진 가장 대표적인 2차원 물질로 높은 화학적 안정성, 우수한 물리적/전기적 특성을 가지고 있고, 이러한 특성들을 활용한 다양한 연구들이 진행되고 있다[1-6]. 특히 그래핀은 빛의 파장에 관계없이 거의 동일한 수준의 흡광도를 가지는 점[7,8], 다른 물질들에 비해 높은 전하이동도를 가지는 특성[2-5]으로 인해 광통신에 주로 이용되는 대역인 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  파장의 빛을 감지하는 고속 포토디텍터의 제작에 적합한 물질이다[9-12]. 하지만 원자 단일층의 두께를 가지는 그래핀의 구조적 특성으로 인해 그래핀에 입사된 빛에 대한 최대 흡광도가 2.3%에 불과하다는 단점이 존재하고[7,8] 이는 그래핀을 이용하

여 제작된 포토디텍터에서 매우 중요한 성능 지표들 중 하나인 광응답도(responsivity)를 제한하는 요인으로 작용한다. 광응답도는 포토디텍터에 입사된 빛에 의해 생성되는 전자-정공 쌍(electron-hole pair, EHP)이 전류 변화에 기여하는 정도를 정량적으로 나타낼 수 있는 지표이므로 저전력/고효율 신호 전송을 목표로 하는 광통신 분야에 그래핀 포토디텍터를 활용하기 위해서는 높은 광응답도 특성이 필수적으로 요구된다. 따라서, 그래핀 포토디텍터의 낮은 광응답도 특성을 극복하기 위해 내부 다중 반사층 구조의 소자 설계, 이중 게이트 및 터널링 배리어 구조를 이용한 광 감도 향상 기법 등 그래핀 포토디텍터의 광응답도를 향상시킬 수 있는 다양한 방법들에 대한 연구가 진행되고 있으며, 그에 대한 결과들이 문헌으로 보고되고 있다[13-15]. 한편, 질화물 반도체(Nitride semiconductor) 나노와이어(nanowire)를 이용한 소자가 기존 질화물 반도체 벌크(bulk) 또는 에피층(epitaxial layer) 기반 포토디텍터 소자들에 비해 높은 광응답 특성을 가지는 것이 확인되었고, 이는 빛에 의한 광전도도(photoconductivity) 변화가 소자의 채널 영역이 아닌 컨택 영역에 의해 주로 발생한다는 연구 결과가 보고된 바 있다[16].

본 연구에서 우리는 그래핀 포토디텍터의 컨택 전극으로 사용하는 금속의 종류에 따라 소자의 광응답도가 달라질 수 있음을 확인하였다. 서로 다른 금속, 팔라듐(palladium, Pd)과 니켈

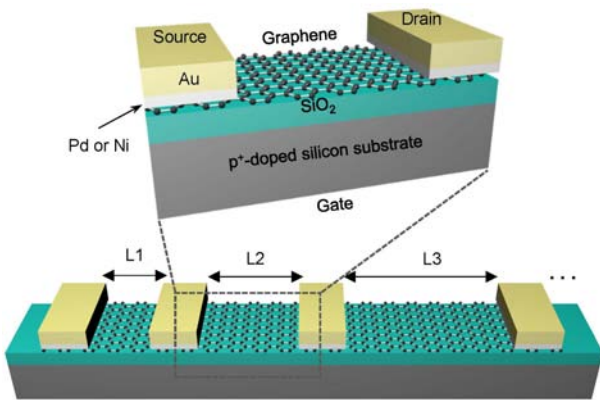
경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)  
80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Republic of Korea  
<sup>†</sup>Corresponding author: hpark@ee.knu.ac.kr  
(Received: Mar. 21, 2019, Accepted: Mar. 27, 2019)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(nickel, Ni)을 컨택 전극으로 사용한 그래핀 포토디텍터 소자들의 광응답 특성을 소자의 채널 영역과 컨택 영역으로 분리하여 비교/분석하였고, 빛이 조사되었을 때 그래핀 포토디텍터의 채널 영역에서의 광응답보다 금속-그래핀 접합에서의 광응답이 소자의 광응답 특성을 결정짓는 요인임을 확인하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 90-nm 두께의 SiO<sub>2</sub>가 성장된 실리콘 기판에 전사된 CVD 그래핀(Graphene Platform, Japan)을 이용하여 전계 효과 트랜지스터(field-effect transistor, FET) 구조의 그래핀 포토디텍터 소자를 제작하였고, 전송선 모델(transmission-line model, TLM)을 이용하여 채널 영역과 컨택 영역에서의 빛에 의한 저항 특성 변화를 각각 비교/분석하기 위해 다양한 채널 길이(5~100 μm)를 가지는 그래핀 포토디텍터를 제작하였다. 먼저 그래핀 위에 포토리소그래피(photolithography) 공정으로 전극 패턴을 형성하고, e-beam evaporator 장비를 이용하여 컨택 전극을 위한 두 종류의 금속으로 Pd/Au(20/50 nm)와 Ni/Au(20/50 nm)를 각각 다른 그래핀 샘플 위에 증착하였다. 금속 증착 후 리프트-오프(lift-off) 공정을 통해 소스/드레인 전극 영역 외의 나머지 금속들과 감광제(photoresist, PR)를 동시에 제거하였다. 소자 채널 영역 외에 나머지 부분의 그래핀을 제거하기 위해 두 번째 포토리소그래피 공정을 진행하여 패턴을 형성하고 산소 플라즈마(O<sub>2</sub> plasma) 처리(30 W, 30 mTorr, 90 sec)를 통해 그래핀을 식각하였다. Fig. 1은 본 연구에서 제작한 그래핀 포토디텍터의 소자 구조도 및 TLM 패턴을 각각 보여준다. 고농도의 p-type으로 도핑된 실리콘 기판은 FET의 후면 게이트(back-gate)로 사용되었다. 그래핀 포토디텍터의 전기적 특성은 프로브 스테이션(MSTECH M6VC, Republic of Korea)과 반도체 파라미

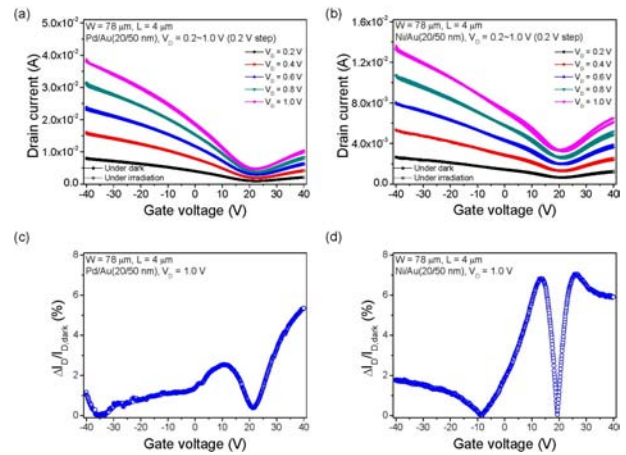


**Fig. 1.** Schematics of (a) Pd- and Ni-contact graphene photodetector and (b) transmission-line model (TLM) pattern fabricated with a graphene layer transferred on SiO<sub>2</sub>/Si substrate. The channel length of the graphene photodetectors varies from 4 to 100 μm.

터 분석장비(Agilent 4156C, USA)를 이용하여 진공환경(~10<sup>-7</sup> Torr)에서 측정되었고, 광응답 특성은 전기적 특성을 측정할 때와 동일한 환경에서 가시광 영역의 빛(400~800 nm)을 출력하는 백색광 램프(Philips 6834FO 100W, Germany)를 이용하여 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Pd와 Ni을 각각 컨택 전극을 사용한 그래핀 포토디텍터를 제작한 후, 우리는 먼저 빛이 있을 때와 없을 때로 나누어 소자의 전기적 특성을 평가하였다. Fig. 2. (a)와 (b)는 각각 Pd를 컨택 전극으로 사용한 그래핀 포토디텍터와 Ni을 컨택 전극으로 사용한 그래핀 포토디텍터의 빛이 없을 때와 있을 때의 게이트 전압에 따른 드레인 전류( $I_D$ - $V_G$ ) 특성을 보여준다. 측정된 소자의 채널 폭과 길이는 각각 78 μm와 4 μm이고, 드레인 전압( $V_D$ )은 0.2~1.0 V로 0.2 V씩 증가시켜가며 측정하였다. Pd를 컨택으로 사용한 소자의 경우는 전류의 절대치는 크지만 빛에 의한 전류의 변화가 거의 미미하였고, Ni을 컨택으로 사용한 소자의 경우는 전류의 절대치는 Pd 소자에 비해 상대적으로 작아도 빛에 의한 전류의 변화가 더 큰 것을 확인하였다. 특히 이 빛에 의한 전류의 변화는 소자의 Dirac 전압( $V_{Dirac}$ ) 부근에서 더 확연하게 나타났다. 두 그래핀 포토디텍터의 광응답에 의한 전류 차이를 보다 더 명확하게 알아보기 위해, 우리는 빛이 없을 때의 전류( $I_{D,dark}$ )와 빛에 의해 변화된 전류량( $\Delta I_D$ )의 비를 각각 Fig. 2. (c)와 (d)에 나타냈다. 게이트 전압이 10 V 일 때를 기준으로 두 소자의 광응답 특성을 비교했을 때, Pd 컨택 소자는 전류 변화율이 2.5% 정도였지만 Ni 소자는 전류 변화율이 약 6.8%로 Pd 소자에 비해 2.7% 이상 큰 것을 확인하였다. 또한  $V_{Dirac}$  부근에

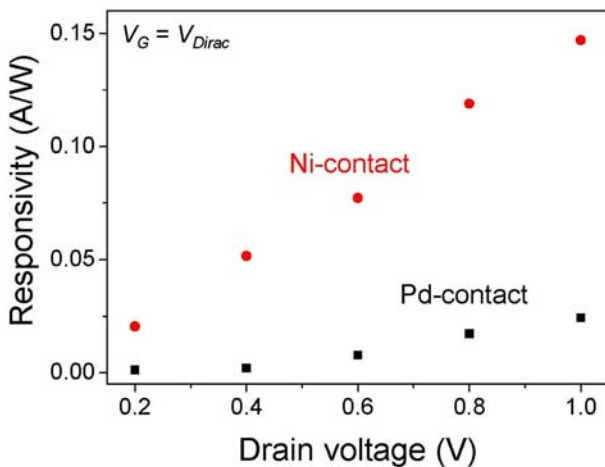


**Fig. 2.** Transfer  $I_D$ - $V_G$  characteristics of (a) Pd-contact and (b) Ni-contact graphene photodetectors under varying drain bias from 0.2 to 1.0 V and  $\Delta I_D/I_{D,dark}$  versus  $V_G$  characteristics of (c) Pd-contact and (d) Ni-contact graphene photodetectors under drain bias of 1.0 V.

서의 전류 변화율도 Ni 소자에서 더 크게 나타났으며, 특히 변화율의 최대값이  $V_{Dirac}$ 으로부터  $\pm 5$  V 이내에서 관측되었다. 그에 비해 Pd 소자에서 광응답에 의한 전류 변화율의 최대값은  $V_{Dirac}$ 으로부터  $\pm 10$  V 이상 떨어진 곳에서 나타나는 것을 Fig. 2. (c)를 통해 확인할 수 있다.

앞선 실험 결과로부터 Pd 소자에 비해 Ni 소자의 광응답에 의한 전류 변화가 더 크다는 사실을 확인한 후, 우리는 이 특성이 그래핀 포토디텍터의 광응답도(responsivity)에 미치는 영향을 확인하고자  $V_G = V_{Dirac}$  인 조건에서 두 소자의 드레인 전압에 따른 광응답도 값을 계산했고, 이를 Fig. 3에 나타냈다. 드레인 전압이 1 V 일 때, Pd 소자와 Ni 소자의 광응답도는 각각 25 mA/W, 140 mA/W였고 이는 같은 측정 조건에서 Ni 소자의 광응답도가 Pd 소자의 경우에 비해 약 5.6배 더 크다는 것을 보여준다.

Pd 컨택 소자와 Ni 컨택 소자 모두 동일한 그래핀 샘플을 사용해서 제작하였으므로 두 그래핀 포토디텍터 소자의 광응답 특성 차이는 소자의 채널 영역이 아닌 컨택 영역에서 주로 발생했을 것으로 예상할 수 있다. 우리는 이를 확인하기 위해 Pd과 Ni 두 금속을 컨택 전극으로 사용한 다양한 채널 길이를 갖는 그래핀 포토디텍터들의 빛의 유무에 따른  $I_D$ - $V_G$  측정 결과로부터 소자의 저항을 계산하였다. 그리고 그 값들을 이용하여 TLM 방법으로 소자의 채널 영역 저항과 컨택 영역 저항을 추출하여 빛에 의한 각 저항값들의 변화를 비교/분석하였다. Fig. 4. (a)와 (b)는 각각 Pd 컨택 소자와 Ni 컨택 소자의 게이트 전압에 따른 그래핀 채널 영역의 면저항 변화 특성을 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 Ni 소자의 면저항이 Pd 소자의 면저항에 비해 상대적으로 값이 크다는 것 외에 드레인 전압에 따른 면저항 값들의 편차 또는 빛에 의한 면저항 변화는 거의 없는 것을 확인하였다. 반면에 컨택 저항은 Pd 소자와 Ni 소자 모두 빛에 의해 변화하는 것을 Fig. 4. (c)와 (d)를 통해 확인할 수 있다. 특히 Ni 소자의 경우, 빛에 의해 컨택 저항이 변화하는 것이 그래프를 통해 명확하게 구분될 정도로 그 차이가 크다는 것을 알

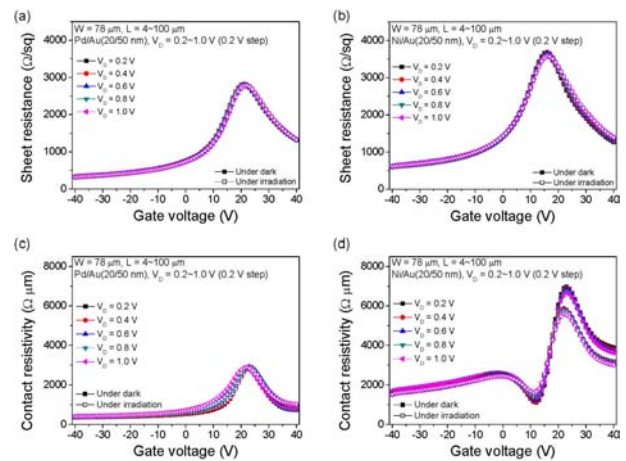


**Fig. 3.** Photoresponsivity values of Pd- and Ni-contact graphene photodetectors under varying drain bias from 0.2 to 1.0 V.

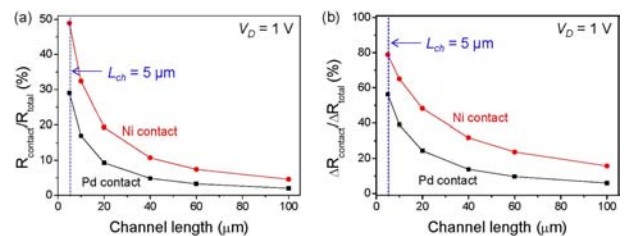
수 있으며, 이 현상으로 인해 Ni 소자의 광응답에 의한 전류 변화 및 광응답도가 Pd 소자에 비해 크게 나타나는 것으로 추정된다.

그래핀 포토디텍터 소자의 전체 저항 성분은 크게 두 가지, 채널 저항과 컨택 저항으로 구분할 수 있으며, 컨택 저항이 빛에 의해 변화하는 것이 빛에 의한 소자 전체 전류 변화의 주된 요인임을 실험을 통해 확인하였다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 채널 길이가 4  $\mu\text{m}$ 인 Pd 소자의 경우는 컨택 저항이 전체 저항에서 차지하는 비중이 30%에 불과하지만 Ni 소자에서는 50%에 달한다. 그리고 빛에 의해 변화하는 소자 전체의 저항 중 컨택 저항 변화에 의해 발생하는 비중이 채널 길이가 4  $\mu\text{m}$ 인 Pd 컨택 소자에서는 58% 정도지만 같은 채널 길이를 갖는 Ni 컨택 소자의 경우는 거의 80%에 달하는 것을 Fig. 5(b)를 통해 확인할 수 있다.

이 결과들은 컨택 전극으로 사용하는 금속의 종류에 따라 그래핀 포토디텍터의 광응답 특성이 크게 영향을 받을 수 있다는 것과 컨택 영역에서의 광응답 특성을 잘 이용하면 소자의 광응답도를 향상시키는 것이 가능하다는 것을 의미한다.



**Fig. 4.** Sheet resistance versus  $V_G$  characteristics of (a) Pd-contact and (b) Ni-contact graphene photodetectors under dark and irradiation conditions and contact resistivity versus  $V_G$  characteristics of (c) Pd-contact and (b) Ni-contact graphene photodetectors under dark and irradiation conditions. Drain bias varies from 0.2 to 1.0 V.



**Fig. 5.** (a) Compositions of contact resistances in device resistances versus channel length of the Pd- and Ni-contact graphene photodetectors and (b) compositions of optically-modulated contact resistances in optically-modulated device resistances versus channel length of the Pd- and Ni-contact graphene photodetectors.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 컨택 전극으로 사용하는 금속의 종류에 따라 그래핀 포토디텍터의 광응답 특성이 달라질 수 있음을 보였다. 또한 그래핀 포토디텍터의 광응답 특성을 결정하는 주된 요인이 금속-그래핀 접합에서의 빛에 의한 저항 변화임을 확인하였고, 이러한 현상이 소자의 광응답도를 향상시킬 수 있는 방법으로 활용될 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 현재의 추세로 보면 그래핀 포토디텍터의 소자 구조 디자인에서 채널 길이는 점점 짧아질 것이므로 소자 전체 저항에서 컨택 저항이 차지하는 비중은 더욱 커질 것으로 예상할 수 있다. 따라서 컨택 영역에서의 광응답에 의한 전류 변화가 소자의 광응답 특성을 결정하는 핵심 요소가 될 것이므로 본 연구에서 얻은 결과가 향후 그래핀 포토디텍터의 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 찾는 것에 하나의 방향성을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

이 성과물은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 기초연구실 지원 사업(과제번호: 2017R1A4A1015565)과 한국연구재단 바이오-의료기술개발사업(과제번호: 2017M3A9G8083382)의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### REFERENCES

- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, Vol. 306, pp. 666-669, 2004.
- [2] A. K. Geim and K. S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nat. Mater.*, Vol. 6, pp. 183-191, 2007.
- [3] K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, and K. Kim, "A roadmap for graphene", *Nature*, Vol. 490, pp. 192-200, 2012.
- [4] Y. -M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H. -Y. Chiu, A. Grill, and Ph. Avouris, "100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene", *Science*, Vol. 327, pp. 662, 2010.
- [5] R. M. Westervelt, "Graphene nanoelectronics", *Science*, Vol. 320, pp. 324-325, 2008.
- [6] M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, and X. Zhang, "A graphene-based broadband optical modulator", *Nature*, Vol. 474, pp. 64-67, 2011.
- [7] X. Li, Y. Zhu, W. Cai, M. Borysiak, B. Han, D. Chen, R. D. Piner, L. Colombo, and R. S. Ruoff, "Transport of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes", *Nano Lett.*, Vol. 9, No. 12, pp. 4359-4363, 2009.
- [8] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Graphene photonics and optoelectronics", *Nat. Photonics*, Vol. 4, pp. 611-622, 2010.
- [9] F. Xia, T. Mueller, Y. -M. Lin, A. Valdes-Garia, and P. Avouris, "Ultrafast graphene photodetector", *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 4, pp. 839-843, 2009.
- [10] T. Mueller, F. Xia, and Ph. Avouris, "Graphene photodetectors for high-speed optical communications", *Nat. Photonics*, Vol. 4, pp. 297-301, 2010.
- [11] A. Pospischil, M. Humer, M. M. Furchi, D. Bachmann, R. Guider, T. Fromherz, and T. Mueller, "CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands", *Nat. Photonics*, Vol. 7, pp. 892-896, 2013.
- [12] X. Wang, Z. Cheng, K. Xu, H. K. Tsang, and J.-B. Xu, "High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors", *Nat. Photonics*, Vol. 7, pp. 888-891, 2013.
- [13] M. Furchi, A. Urich, A. Pospischil, G. Lilley, K. Unterrainer, H. Detz, P. Klang, A. M. Andrews, W. Schrenk, G. Strasser, and T. Mueller, "Microcavity-Integrated Graphene Photodetector", *Nano Lett.*, Vol. 12, pp. 2773-2777, 2012.
- [14] C.-H. Liu, Y.-C. Chang, T. B. Norris, and Z. Zhong, "Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature", *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 9, pp. 273-278, 2014.
- [15] G. Konstantatos, M. Badioli, L. Gaudreau, J. Osmond, M. Bernechea, F. P. G. de Arquer, F. Gatti, and F. H. L. Koppen, "Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain", *Nat. Nanotechnol.*, Vol. 6, pp. 1-6, 2012.
- [16] H. Park, R. Beresford, R. Ha, H.-J. Choi, H. Shin, and J. Xu, "Evaluation of metal-nanowire electrical contacts by measuring contact end resistance", *Nanotechnology*, Vol. 23, No. 24, pp. 245201, 2012.