

빛을 이용한 Ambipolar 실리콘 나노와이어 FET의 모듈레이션

이경건, 이국녕, 이민호, 정석원*
전자부품연구원 메디컬IT 융합 연구 센터

The modulation of an ambipolar silicon nanowire FET through illumination

Kyounggun Lee, Kook-Nyung Lee, Min-Ho Lee, Suk-Won Jung*
Korea Electronics Technology Institute

Abstract - 본 논문에서는 Ambipolar 실리콘 나노와이어 FET (SiNW FET)의 빛을 통한 모듈레이션을 분석하였다. Ambipolar SiNW FET를 얻기 위해서는 나노와이어가 저농도로 도핑된 실리콘이어야 한다. 실리콘의 비등방성 습식식각 이후, 산화 공정을 통한 나노와이어 제작을 통해 보론의 확산을 통해 저농도로 도핑된 실리콘 나노와이어를 제작하였다. 빛이 조사될 시에 생기는 Ambipolar SiNW FET의 모듈레이션 특성에 대해 분석하고 간단한 응용 실험을 통하여 검증하였다. 응용 실험 결과 pH 센싱의 감도는 빛을 10000 lux 조사할 경우 8.84 배 증가하였다.

1. 서 론

실리콘 나노와이어는 1 차원 나노 소재로서 미래를 촉망 받는 물질 중에 하나이다.[1] 실리콘 나노와이어의 소재인 실리콘은 빛이 조사되면 전자-정공 쌍을 생성하는 성질이 있다. 벌크 실리콘의 경우 생성된 전자-정공 쌍은 빠른 재결합으로 인하여 적은 수명을 가지고 있다. 하지만 실리콘 나노와이어는 나노레벨의 너비로 인하여 긴 수명을 보여 주며, 이로 인해 높은 응답도 및 광자 생성률을 가진다 [2]. 이러한 나노와이어의 광 특성을 응용한 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 포토센서 혹은 광 발전에 국한 되어 있다.

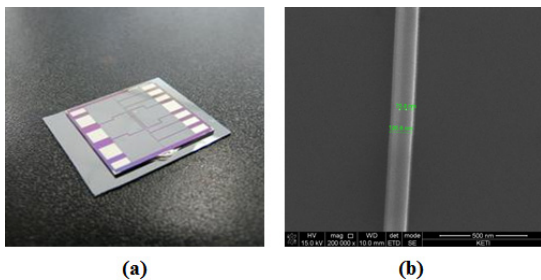
하지만 빛의 조사시 생성되는 캐리어로 인하여 실리콘 나노와이어 FET에서 게이트 특성을 변화는 연구된 바 없다. 게이트 전압에 따른 소스-드레인의 전류의 특성 변화는 빛을 통한 소자의 모듈레이션의 가능성을 말해주며, 이를 통해 광센서와 결합된 동작 회로, 광을 통해 조정 가능한 바이오 센서등에 응용할 수 있다.

본 논문에서는 Ambipolar SiNW FET의 게이트 전압 특성이 빛을 통해 변화함을 보이고, 응용 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 실리콘 나노와이어의 제작

먼저 실리콘 트렌치를 제작한 후, TMAH 혹은 KOH와 같은 비등방성 실리콘 식각을 통하여 모래시계 형상을 제작한다. 제작된 모래시계 형상은 산화 공정을 통하여 나노와이어의 구조를 가지게 된다. 제작된 나노와이어에 알루미늄 전극을 형성하여 메탈이 소스-드레인 역할을 하는 FET가 제작된다 [3]. 제작시 사용된 기판은 보론이 도핑된 P-type 기판으로 산화 공정시에 보론이 산화막으로 확산된다. 따라서 제작된 실리콘 나노와이어는 저농도의 p-도펀트를 가지고 있으며, 이로 인해 ambipolar한 동작 특성을 가지게 된다 [4]. 비교 분석을 위하여 N-type 기판으로도 제작되었으며, 도펀트로 사용된 phosphore는 산화 공정시 산화막으로 확산되지 않기 때문에 unipolar한 N-type FET 동작 특성을 가지게 된다. 그림 1에 최종 제작된 실리콘 나노와이어의 사진 및 SEM 사진이 나타나 있다. 약 150 nm의 폭을 가지며, 20 μm의 길이를 가진다. 게이트 실험을 위하여 실버에폭시로 칩의 뒷 면과 실리콘 웨이퍼를 접합하였다.

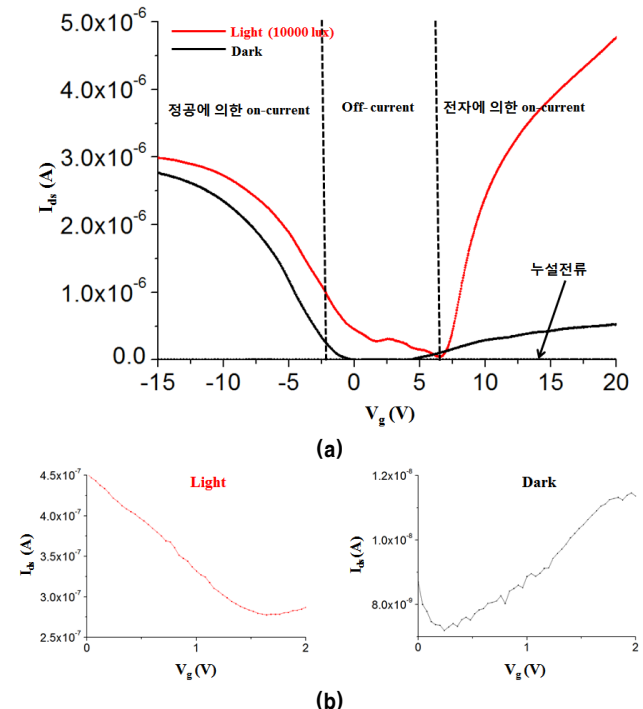


<그림 1> 제작된 (a) 실리콘 나노와이어 칩 및 (b) SEM 사진

2.2 제작된 실리콘 나노와이어 FET의 동작 특성

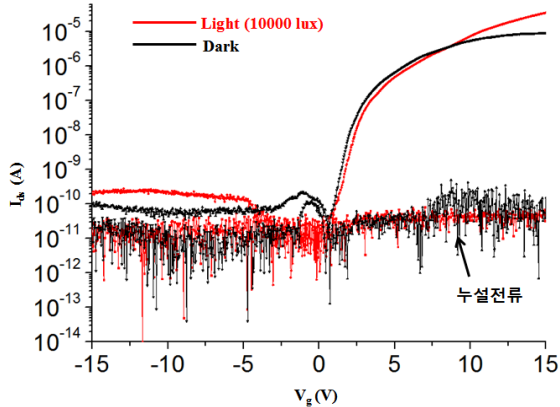
그림 2에 Ambipolar SiNW FET의 동작 특성이 나타나 있다. 상온에서 기판에 전압 V_g 를 가하여 소스-드레인 전류 I_{ds} 를 측정하였다. 소스 및 드레인 전압은 1 V로 고정되었다. 그림 2의 (a)에서 볼 수 있듯이, 빛이 없는 상태(dark)에서 보론이 도핑된 기판으로 만든 SiNW FET는 ambipolar한 동작을 보인다. 약 6 V, -2 V에서 전자, 정공의 문턱 전압이 나타난다. 저 농도로 도핑된 보론으로 인하여 전자의 이동도가 높은 데도 불구하고 게이트 전압이 전자에 의한 on-current가 정공에 의한 on-current가 더 높다. 이는 저 농도의 보론으로 인하여 전자의 영향이 무시될 수 없기 때문이다 [4].

그림 2 (a)에서 볼 수 있듯이 암실 상태에서 정공에 의한 on-전류는 약 2.7 $\mu A(V_g=-15 V)$ 로 전자의 on-전류인 50 nA에 비하여 20배 이상의 큰 전류를 보여준다. 하지만 빛이 조사된 상태(light, 10000 lux)에서는 정공에 의한 on-전류는 약 3.0 $\mu A(V_g=-15 V)$ 로 암실 상태에 비하여 약 10 % 가량 증가하였지만, 전자에 의한 on-전류는 약 4.0 $\mu A(V_g=15 V)$ 로 암실 상태에 비하여 80배 이상 증가 되었다. 실리콘의 특성상 빛이 조사된 상태에서는 전자-정공쌍이 생성되기 때문에 초기의 저 농도 보론의 농도를 넘어서는 많은 양이 생성된다. 생성된 전자-정공 쌍은 진성 실리콘 혹은 저 농도의 N-type 도펀트가 도핑된 FET와 같은 동작을 보여준다. 누설 전류는 10^{-11} A 레벨로 I_{ds} 에 비하여 1000배 이상 작으므로 무시 가능하다.



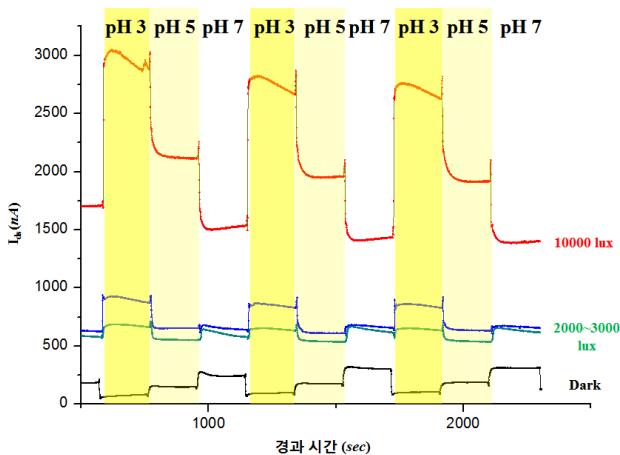
<그림 2> 저농도 p-type 나노와이어 FET의 (a) I_{ds} - V_g 특성 및 (b) 일부 구간 확대 그래프

그림 2 (b)에는 I_{ds} 를 V_g 가 0 V에서 2 V인 구간을 확대하여 나타내었다. 빛의 유무에 따라서 V_g 에 의한 I_{ds} 의 증가, 감소가 달라지는 것을 볼 수 있다. 이는 빛의 조사로 인한 실리콘 나노와이어 내의 전자, 정공의 개수가 달라짐으로써, 각 전자, 정공에 대한 문턱 전압이 변화하기 때문이다. 그림 2. (b)와 같이 0 ~ 2 V의 구간에서는 기울기의 역전현상이 나타났다. V_g 에 의하여 I_{ds} 의 기울기가 변화한다는 것은 빛을 통해서 변화된 게이트 특성을 이용하여 단일 게이트 전압을 이용한 바이오 센서의 실험에 응용될 수 있음을 보여준다.



〈그림 3〉 N-type 나노와이어 FET의 I_{ds} - V_g 특성

그림 3 에는 N-type 기판으로 제작된 실리콘 나노와이어의 FET의 I_{ds} - V_g 특성이 나타나 있다. N-type도펀트인 phosphor는 보론과는 다르게 산화 공정 중 확산이 빠르지 않다. 따라서 실리콘 나노와이어는 N-type적 특성을 보이며, 빛을 비추었을 경우에 정공에 의한 효과가 미미하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 게이트로의 누설 전류 역시 10^{-12} 레벨로 무시 가능하다. 하지만 암실 상태와 빛을 조사한 상태에서의 차이는 크게 나타나지 않으며, 이는 기존의 도핑농도가 높기 때문에 빛의 조사로 인해 생성된 전자, 정공이 전류에 큰 영향을 끼치지 못하기 때문이다.



〈그림 4〉 빛에 따른 저농도 p-type 나노와이어 FET의 pH 용액 검출 특성

2.3 응용 실험

바이오 센서로의 응용을 검증하기 위하여 pH의 변화에 따른 소스-드레인 전류 I_{ds} 의 변화를 보는 실험을 수행하였다. 실리콘 나노와이어에 마이크로플루이딕 유체채널을 집합한 후, 자동 시스템을 통하여 pH 3, 5, 7 표준 용액을 순차적으로 흘려주어 측정하였다. p-type의 실리콘 나노와이어는 pH가 증가함에 따라서 게이트가 음의 값을 가지는 것으로 느끼게 되고 따라서 채널의 캐리어가 증가하기 때문에 소스-드레인 전류량이 증가한다. 그림 4 와 같이 암실 상태에서는 pH가 증가함에 따라서 I_{ds} 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 점차 빛의 양이 10000 lux까지 증가할수록 그래프의 기울기가 바뀌면서 최종적으로는 기울기의 부호가 바뀌는 현상을 확인할 수 있다. pH 3의 전류량을 기준으로 하였을 때 빛의 양이 10000 lux일 경우 pH 7로의 I_{ds} 변화량은 -1466 nA로 변화량의 절대치는 암실 상태에서 I_{ds} 변화량은 165 nA의 8.84배이다. 이는 나노와이어의 게이트 효과를 이용하는 바이오 센서의 감도를 변화량의 절대치로 정의했을 경우에 빛에 의해 센서의 감도가 비약적으로 증

가한다는 것을 의미하며, 빛을 통해 센서 감도의 모듈레이션이 가능하다는 것을 의미한다.

3. 결 론

본 논문에서는 실리콘 나노와이어 FET가 빛에 의하여 특성이 변화하는 것을 보이고, 간단한 응용실험을 통해 증명하였다. 산화 공정으로 인해 만들어진 저 농도의 실리콘 나노와이어는 ambipolar한 특성을 보이며, 빛이 조사될 경우 전자, 정공에 대한 문턱 전압이 변화하는 것을 볼 수 있었다. pH 표준 용액을 통한 실험으로 실리콘 나노와이어의 게이트 효과를 이용한 센서의 감도를 높일 수 있다는 것을 증명하였다. 빛을 조사할 시 암실 상태에서 보다 약 8.84배의 높은 감도를 가졌다. 따라서 저농도로 도핑된 실리콘 나노와이어 FET를 통한 바이오 센서의 감도 향상을 통해 더 낮은 농도의 바이오 물질을 검출하거나, 같은 농도에서 더 높은 S/N 비율을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 10030694-국제협력 R&D 사업 과제(차세대 바이오 반도체)의 지원을 받았습니니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.L. Arlett, E.B. Myers and M.L. Roukes, "Comparative advantages of mechanical biosensors", nature nanotechnology, 10,1038, 2011
- [2] Cesare Soci, Arthur Zhang, Xin-Yu Bao, Hongkwon Kim, Yuhwa Lo, and Deli Wang, "Nanowire Photodetectors", Journal of nanoscience and nanotechnology, vol. 10, 1-20, 2010
- [3] K. N. Lee, S. W. Jung, K. S. Shin, W. H. Kim, M. H. Lee, W. K. Seong, "Fabrication of Suspended Silicon Nanowire Arrays", small, 5, 642, 2008
- [4] K. Byon, D. 쓰쁘, and J. E. Fischer, "systematic study of contact annealing: Ambipolar silicon nanowire transistor with improved performance", 90, 143513, 2007