

고정밀 연속 피부 온도 모니터링을 위한 초고감도 금 도핑 실리콘 나노막 기반 웨어러블 센서 어레이

상민규^{1*}, 강교원^{1*}, 유기준^{1*}

연세대학교 전기전자공학과¹

Ultra-high Sensitive Au-doped Silicon Nanomembrane Based Wearable Sensor Arrays for Continuous Skin Temperature Monitoring with High Precision

Mingyu Sang^{1*}, Kyowon Kang^{1*}, Ki Jun Yu^{1*}

School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University¹

Abstract

Monitoring the body temperature with high accuracy provides a fast, facile, but powerful route about the human body in a wide range of health information standards. Here, we introduce the first ever ultra-sensitive, and stretchable gold-doped silicon nanomembrane (Au-doped SiNM) epidermal temperature sensor array. The ultra-sensitivity is achieved by shifting freeze-out region to intrinsic region in carrier density and modulation of fermi energy level of p-type SiNM through the development of a novel gold-doping strategy. The Au-doped SiNM is readily transferred onto an ultrathin polymer layer with a well-designed serpentine mesh structure, capable of being utilized as an epidermal temperature sensor array. Measurements in-vivo and in-vitro show temperature coefficient of resistance (TCR) as high as $-37270.72\text{ppm}/^\circ\text{C}$, 22 times higher than existing metal-based temperature sensors with similar structures, and one of the highest thermal sensitivity among the inorganic material based temperature sensors. Applications in the continuous monitoring of body temperature and respiration rate during exercising (i.e., in a sweat environment) are demonstrated with a successful capture of information. This work lays a foundation for monitoring human body temperature, potentially useful for precision diagnosis (e.g., continuous monitoring body temperature in COVID-19 cases) and management of disease relevance to body and skin temperature in healthcare.

1. 연구 배경

현재 의학적 진단, 상처 치유, 피부 수분 및 혈류 모니터링을 위한 체온 감지 기술이 개발되고 있습니다. [1, 2] 다양한 방법으로 체온을 모니터링하는 연구에 대한 광범위한 연구가 있었지만 [3-5], 바이러스 감염, 어린이, 노인과 같은 고위험군에 대한 초고정밀 및 지속적인 모니터링은 불가능합니다. 예를 들어, 현재의 코로나 바이러스 감염증 (COVID-19) 대유행은 체온을 모니터링하여 바이러스 감염의 위험 요인을 추적하는 것이 중요함을 보여줍니다. [6]

적외선(IR) 카메라를 사용한 기존의 간접 온도 감지는 온도 측정에 가장 널리 사용되는 방법입니다. IR 카메라는 온도를 정확하게 측정할 수 있지만, IR 카메라와 대상 감지 영역 사이의 매개체 조건 및 대상 영역의 움직임에 큰 영향을 받을 수 있습니다. 대조적으로, 직접 감지 접근 방식의 개발은 이러한 문제를 최소화하고 측정 정확도를 향상시킬 수 있습니다. 표피 온도 센서는 신속성, 낮은 영률, 투과성 등 피부와 같은 물리적 특성으로 인해 피부 표면에 직접 부착하여 기존 온도 센서의 단점을 극복할 수 있는 우수한 후보입니다. [2, 7, 8]

대표적인 무기(inorganic) 재료인 실리콘(silicon)은 유기(organic) 재료에 비해 내산화성(oxidation resistive property)으로 인해 상당히 광범위한 작업 조건에서 높은 신뢰성을 보이며 도핑(doping)과 같은 고온 공정에도 견딜 수 있습니다. 실리콘 기반 온도 센서는 temperature coefficient of resistance(TCR)과 관련된 상대적으로 높은 감도를 제공합니다. 또한 상변화 물질(phase change materials)에 비해 실리콘 기반 센서의 빠른 응답 시간은 놀라운 장점 중 하나입니다. [9] 전기 전도도(electrical conductivity) 및 압저항(piezoresistive effect) 효과와 같은

실리콘의 특성은 도펀트(dopants) 및 도핑 농도를 제어하여 조절할 수 있습니다. [10] 깊은 불순물(deep impurity)로 작용하는 금(Au)은 실리콘의 페르미 에너지 준위(fermi energy level)를 조절할 수 있어 열 민감도를 크게 향상시킬 것으로 기대된다. [11, 12] 그러나, 실리콘 나노막(SiNM)에 금을 도핑한 후 유연한 기판으로 옮기는 것은 매우 어렵습니다.

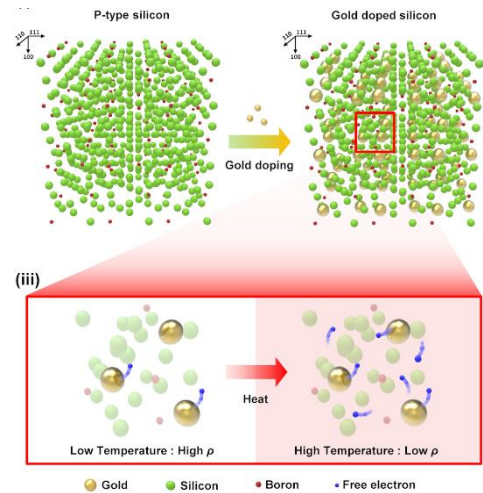


그림 1. 골드 도핑 실리콘과 온도 센싱 메커니즘

우리는 본 연구에서, 빠른 응답 시간을 기반으로 지속적인 초고정밀 모니터링을 위해 피부에 등각 접촉하는 것을 가능하게 하는 얇은 초고감도 Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이를 소개합니다. SiNM의 금 도핑 농도를 제어함으로써 페르미 에너지 준위가 이동하고 활성화 에너지(Active energy)가 증가하여 감도가 크게 향상됩니다. Au 도핑된 SiNM의 초박층을 폴리이미드(polyimide) 기판으로 옮기고

상호 연결을 포함한 전체 장치를 구불구불한 구조의 메쉬로 패터닝하면 능동 어레이에 가해지는 변형을 최소화할 수 있습니다. Au 도핑된 SiNM 온도 센서를 구성하는 모든 재료는 대표적인 생체적합성 재료로 생체 전자공학으로의 응용 가능성이 높다. [13] 우리는 가장 정밀한 체온 모니터링 장치를 위해 개발한 기술을 시연하고 체온을 지속적으로 모니터링하는 기능의 예를 보여줍니다.

2. 연구 방법

먼저 SOI(silicon on insulator)위에 Thermal evaporation을 사용하여 얇은 금 층 (10nm)을 증착한 후 산소가 풍부한 환경에서 1000~1100°C의 적절한 온도로 어닐링하여 SiNM에 금이 도핑될 수 있도록 한다. 그런 다음 Au 도핑된 SiNM (300nm)을 1.5µm 폴리이미드(PI) 층으로 전사한다. 전사된 Au 도핑된 SiNM의 얇은 층에 대한 선택적 에칭 프로세스를 수행하여 4 x 4 픽셀 어레이를 갖는 구불구불한 구조를 형성합니다. 400nm Cu의 층은 인터커넥트를 형성하기 위해 증착되고 구불구불한 구조로 패터닝됩니다. encapsulation 층을 위한 추가 PI 층은 금속 하드 마스크를 사용하여 스피ن 코팅되고 동일하게 구불구불한 구조로 에칭됩니다. 장치의 총 두께가 ~3.5 µm 이므로 피부에 부착할 때 등각 접촉이 가능합니다. 그 후, 장치를 픽업하기 위한 수용성 테이프가 메쉬 구조의 초박형, 고감도 Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이에 부착됩니다. Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이를 피부에 옮긴 후 수용성 테이프를 물에 녹이고 장치만 피부에 부착하고, 이를 이용하여 체온, 호흡 등을 모니터링 할 수 있습니다.

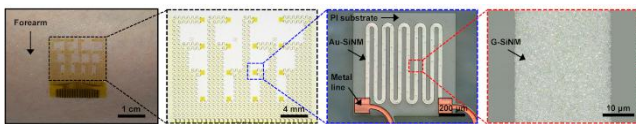


그림 2. Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이 사진

3. 연구 결과

서로 다른 여섯 개의 문자 모양의 알루미늄 shadow mask를 사용하여 히트맵 모니터링을 진행하였습니다. 그 결과는 Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이가 고성능 IR 카메라를 사용한 결과와 잘 일치하는 높은 공간 분해능을 보여줍니다.

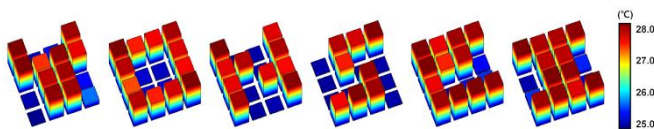


그림 3. Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이로 측정된 부분적으로 열이 가해진 문자에 대한 히트맵

Au 도핑된 SiNM 온도 센서는 -37270.72 ppm/°C로 가장 높은 TCR을 보인 반면, 기존의 표피 금 온도 센서와 붕소 도핑된 SiNM 온도 센서의 TCR은 각각 1691.07 ppm/°C 및 1771.25 ppm/°C를 나타냈습니다. 또한 Au 도핑된 SiNM 온도 센서는 상 변화 물질에 비해 상대적으로 빠른 응답 시간(< 9ms)을 보여줍니다.

Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이의 셀 간 변동 (cell-to-cell variation)을 테스트한 결과는 무시할 수 있는 0.8% 미만으로, 셀 간 변동이 거의 없음을 분명히 보여줍니다. 온도를 낮추고 가열하는 동안 저항 변화를 모니터링하는 실험을 통해 장치의 신뢰성과 안정성을 확인하였습니다.

관절에서 인간 피부의 움직임은 큰 스트레칭을 수반합니다. Finite Element Analysis(FEA) 결과는 큰

단(uni)축 변형(30%) 및 이(bi) 축 변형에서 Au 도핑된 SiNM 온도 센서 어레이의 기계적 변형이 탄성 변형 내에 있음을 확인하였습니다. 또한 장치의 수직 방향을 따라 인장 변형률의 30%를 적용하여 5000회 주기에 대한 순환 스트레칭 테스트를 진행하였습니다. 이는 기계적 안정성을 보여줍니다.

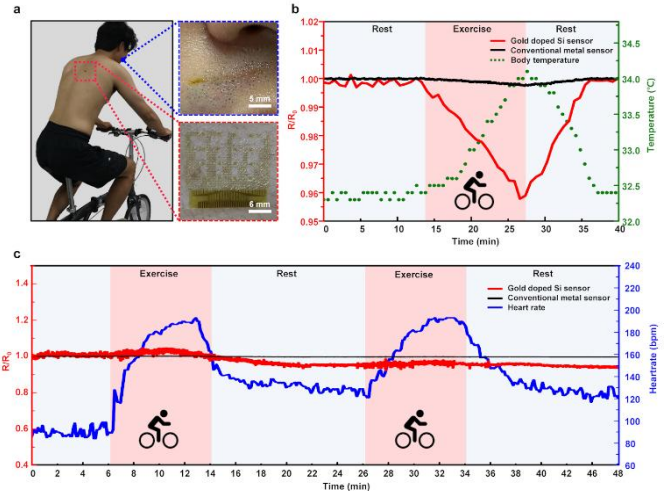


그림 4. Au 도핑된 SiNM 온도 센서로 측정된 사이클링 중 지속적인 체온 및 호흡 모니터링

땀이나 움직임과 같은 간섭 때문에 인체의 체온과 호흡을 지속적으로 모니터링하는 것은 매우 어렵습니다. 등과 인중에 부착된 Au 도핑된 SiNM 온도 감지 장치는 사이클링 중 들숨과 날숨의 온도 차이를 감지하여 인체 온도 변화를 측정하고 호흡을 정확하게 모니터링하는데 성공했습니다. 운동 중 체온이 약 32.3°C에서 34.1°C로 상승했을 때 Au가 도핑된 SiNM 온도 센서의 저항은 약 4.2%의 비율로 현저한 변화를 나타내는 반면, 기존의 표피 금 온도의 저항은 센서는 0.23%의 비율로 작은 변화를 보입니다. 동시에 스마트 워치로 측정된 심박수와와의 관련성도 확인하였습니다. 모니터링된 호흡 결과는 심박수 변화에 대해 동일한 경향을 보여줍니다. 이러한 결과는 우리의 Au 도핑된 SiNM 온도 센서가 작고 빠른 변화를 감지할 수 있을 만큼 충분히 민감하고 센서에 땀이나 습기를 방지하는 캡슐화 층이 있더라도 호흡에 의한 온도 변화를 정확하게 모니터링할 수 있음을 보여줍니다.

4. Acknowledgements

이 연구는 National Research Foundation of Korea (NRF) 과제의 지원을 받아 수행하였음. (NRF-2018M3A7B4071109 and NRF-2019R1A2C2086085).

5. 참고 문헌

- [1] C. Liu, et al., Adv Healthc Mater 2021, e2100383.
- [2] S. Y. Hong, et al., Adv Mater 2016, 28, 930.
- [3] K. E. Crawford, et al., Extreme Mech Lett 2018, 22, 27.
- [4] S. Han, et al., Science Translational Medicine 2018, 10, eaan4950.
- [5] D.-H. Kim, et al., Science 2011, 333, 838.
- [6] H. Jeong, et al., Science Advances 2021, 7, eabg3092.
- [7] L. Tian, et al., Advanced Functional Materials 2017, 27.
- [8] L. Tian, et al., Nat Biomed Eng 2019, 3, 194.
- [9] R. C. Webb, et al., Nat Mater 2013, 12, 938.
- [10] S. W. Jones, IC Knowledge LLC 2008, 23.
- [11] N. Ferdous, et al., AIP Advances 2018, 8.
- [12] H. Bracht, et al., MRS Proceedings 1997, 469, 25.

[13] K. J. Yu, et al., Nat Mater 2016, 15, 782.