

연구실 소개

# GIST 플렉서블 광전자 연구실

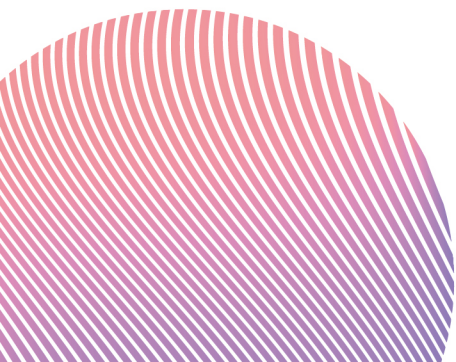
WRITER\_GIST 전기전자컴퓨터공학부 송영민



↑ [그림 1] GIST 플렉서블 광전자 연구실 그룹 멤버 단체 사진

## 1. 들어가며

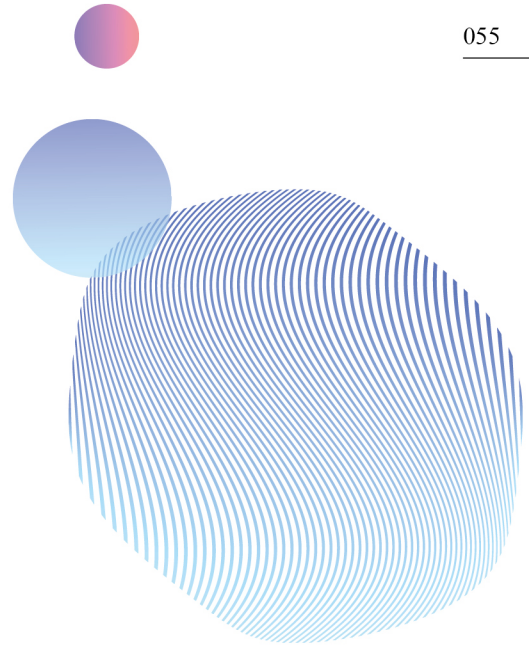
광전자 소자(optoelectronic devices)는 반도체 레이저, 발광 다이오드 등 발광 소자, 광검출기, 태양전지 등 수광 소자, 그리고 광변조기(optical modulator) 등을 포함한다. 광전자 소자는 전기적 특성을 다루는 다이오드, 트랜지스터 등의 기본 속성과 함께 빛과 물질의 상호작용(light-matter interaction)에서 얻는 고유의 특성을 가진다. 따라서 광전자 소자를 이용한 연구를 위해서는 전류의 흐름을 적절히 제어해야 함은 물론이고, 광학적 상태밀도(density of optical state)와 그 공간적 분포를 효과적으로 제어하여야만 한다. 반도체 레이저로 예를 들자면, '얼마나 낮은 문턱 전류를 가질 수 있는가?'라는



물음에 답하기 위해 많은 연구자들이 공진 구조를 통해 광학적 상태밀도를 극대화하고, 주입된 전류를 손실없이 최대한 공진 구조로 전달하기 위한 최적 전류 주입 구조를 고안했다. 이 밖에도 높은 광출력, 좁은 방사각, 고속 변조, 단일 모드 구동 등 개별 소자의 동작 특성에서부터 2차원 대면적 제작, 안정적 수율, 방사 방향 제어 등 어레이 특성에 이르기까지 수많은 문제들을 광전자 소자를 통해 해결할 수 있다. 광전자 소자는 산업의 발전과 소비자의 수요에 발맞추어 발전되었으며, 광통신, 조명, 디스플레이, 카메라(이미지 센서) 등 우리의 일상생활에서 절대 빼놓을 수 없는 필수 부품으로 자리잡았다. 현시대를 살아가는 우리 모두는 1960년대부터 시작되어 2~3세대에 걸친 광전자 소자 연구자들의 피땀 어린 노력에 빚을 지고 있는 것이다.

한편, 연구결과의 진보가 꼭 소비자의 수요에 맞추어 이뤄진 것은 아니다. 앞서 언급된 반도체 레이저의 낮은 문턱 전류 관련 연구는 1960년대에 이미 산업에서 필요한 수준의 결과를 얻어내었지만, 연구자들은 '이론적으로 혹은 실험적으로 가능한 최소한의 레벨은 어디까지인가?'에 대한 고민과 연구를 지속해왔다. 지적 호기심의 결과물은 다시 산업적 수요와 연계되어, 예상치 못한 응용분야를 만들기도 한다. 현재 스마트폰의 생체 인식용(애플의 FaceID 등) 광원으로 널리 활용되고 있는 저전력 반도체 레이저가 그 예이다.

최근 재료/기계공학의 발달에 따라 광전자 소자 및 시스템은 점차 유연한(flexible)형태를 갖는 방향으로 발전하고 있다. 가장 대표적인 사례가 폴더블(foldable) 디스플레이를 채택한 스마트폰이다. 사용자 인터랙티브(interactive) 기술은 서서히 발전하여, 기존에 존재하지 않았던 스마트 헬스케어, 몰입형 복합현실(mixed reality), 완전 자율주행 등을 가능하게 할 것으로 기대하고 있다. 한편 유연하다(flexible)의 단어는 사전적 의미에서 물리적 유연성을 뜻하기도 하지만, 다양한 형태(diversity), 물성 변화(tunability) 등의 의미도 내포하기 때문에 보다 넓은 의미를 갖는다. 이런 관점에서 볼 때, 플렉서블 광전자 기술은 미래에 활용될 보다 유연한 형태의 모든 광전자 소자 기술을 포괄한다고 할 수 있다.



## 2. GIST 플렉서블 광전자 연구실의 연구분야

플렉서블 광전자 기술은 기존 반도체 기반 광전자 소자에 '유연성(flexibility)'을 더하기 위해 새로운 포토닉스 기술을 도입함으로써 완성된다. 본 연구실에서는 이를 위해 연구 분야를 크게 반도체 소자 및 시스템과 포토닉스 기술로 나누었다. 반도체 소자 및 시스템 파트는 본 연구실에서 가장 활발히 연구하고 있는 생체모사형 이미지 센서 분야와 최근 본격적으로 연구를 시작한 뉴로모픽 인-센서 컴퓨팅 분야로 나뉜다. 또한 포토닉스 기술 분야는 각 기술의 응용 목적에 따라 반도체 소자, 보안, 에너지 등 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 이에 대해 다음과 같이 소개하고자 한다.

### 2.1. 반도체 소자 및 시스템

#### 2.1.1. 생체모사형 이미지 센서 및 카메라 기술

시스템 반도체의 한 축을 이루고 있는 이미지 센서는 스마트폰, 자동차, 감시 카메라 등에 활용되며, 관련 시장은 2022년 기준 26조 원 수준으로 매년 7%씩 성장하고 있다. 이미지 센서 시장은 소니, 삼성, 옴니비전 등 대기업이 77% 가량 점령하고 있으며 서로 치열한 성능경쟁을 벌이고 있다. 그렇기 때문에 크기나 해상도 등 획일화된 성능 경쟁만으로는 앞으로 다가올 미래의 신개념 카메라 경쟁에서 뒤쳐질 수밖에 없다.

자연계의 시각 시스템은 개별동물의 서식환경에 따라 매우 다양한 형태를 가지며, 최소한의 에너지를 이용하여 원하는 정보를 쉽게 얻어낼 수 있도록 설계되어 있기 때문에 많은 연구자들이 이를 모방한 카메라를 만드는데 몰두해왔다. 동물 눈을 모방한 생체모사



카메라 연구는 자연을 보다 깊이 이해할 수 있게 하고, 구조적/기능적으로 훨씬 효과적이면서도 새로운 카메라 또는 이미징 장치를 개발할 수 있다는 점에서 그 의의가 있다<sup>[1]</sup>.

본 연구실에서는 곤충 눈을 모방한 초광각 카메라<sup>[2]</sup>를 비롯하여 물고기 눈을 모방한 어안 카메라<sup>[3]</sup>, 농계모사형 전방위 수륙양용 카메라<sup>[4]</sup>, 갑오징어 눈을 모사한 고대비/고해상도 카메라<sup>[5]</sup> 등을 개발해 왔다. 생체모사형 카메라 기술은 광학 구조에 대한 이해뿐만 아니라, 광학계 설계/제작 기술, 플렉서블 이미지 센서 제작/측정 기술, 영상 처리 기술 등이 복합적으로 필요하기 때문에 하나의 연구결과로 정리하기까지 상당히 많은 시간이 소요된다. 그런 만큼 선진국에서도 수행하기 어려운 연구 분야이며, 동시에 미래 시스템 반도체 산업의 핵심 분야 중 하나로서 앞으로의 발전 가능성이 높기 때문에 연구에 도전할만한 가치가 있다고 할 수 있겠다.

### 2.1.2. 뉴로모픽 인-센서 컴퓨팅 기술

차세대 AI 반도체는 범용 GPU의 과소비전력 및 비효율적 연산의 한계를 극복하기 위한 neural processing unit (NPU), processing in memory (PIM) 등 기술 혁신

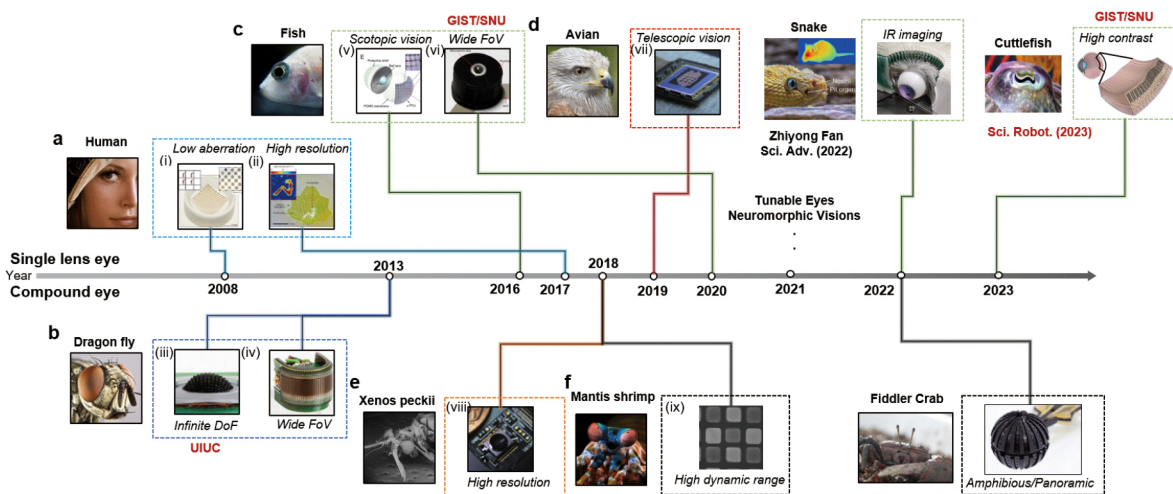
진행 중이다. 현재 산학연을 통틀어 메모리 반도체와 프로세서를 하나로 통합해 사람의 뇌처럼 연산하는 반도체의 개발에 속도를 내고 있으며, 자율주행, 사물인터넷(IoT), 인공지능 로봇 등에 폭넓게 활용될 것으로 기대하고 있다.

한편 시스템 반도체의 한 축을 이루는 이미지 센서에서도 이와 유사한 개념으로 센서 내에서 연산을 할 수 있는 인-센서 컴퓨팅(in-sensor computing) 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구실에서는 센싱/메모리/컴퓨팅을 동시에 수행할 수 있는 반도체 소자를 개발하고 있다.

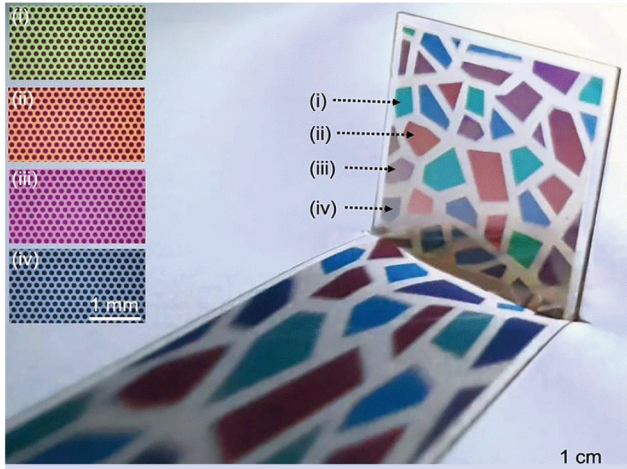
## 2.2. 포토닉스 기술

### 2.2.1. 반도체 소자용 포토닉스

반도체 광소자의 효율향상 또는 새로운 기능 부여를 위해서는 빛과 물질의 상호작용을 제어할 수 있는 포토닉스 기술이 필요하다. 본 연구실에서는 수백 혹은 수십 나노 크기의 구조물을 제작 및 집적함으로써 빛의 투과, 회절, 산란 등을 제어하여 독특한 기능을 갖는 반도체 광소자를 개발하고 있다. 컬러 태양전지(colored solar cells)<sup>[6]</sup>, 반사형 디스플레이(reflective display)<sup>[7]</sup>, LED/PD 기반 생체신호 분석<sup>[8]</sup>, 비색 센서(colorimetric sensor)<sup>[9]</sup> 등이 이에 해당한다.

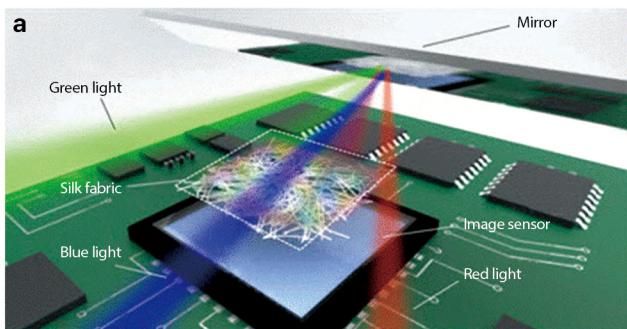


↑ [그림 2] 생체모사형 이미지 센서 연구 동향



↑ [그림 3] 포토닉스 기술을 이용한 컬러 태양전지

그림 3은 성당의 스테인드 글래스처럼 다양한 색상을 연출할 수 있는 태양전지 사진이다. 태양전지는 태양빛을 전기 에너지로 저장할 수 있는 신재생 에너지 기술로서 건물 지붕이나, 평지, 사막 등에 주로 활용된다. 투명하거나 색상을 낼 수 있는 태양전지가 개발될 시 그 활용영역을 극대화할 수 있으며, 심미적 요인을 고려한 생활공간 디자인 또한 가능해진다. 본 연구실에서는 색상구현이 가능한 태양전지 제작을 위해 태양전지의 흡수층 윗면 또는 아랫면에 금속-유전체-금속의 공진 구조를 도입하였다. 본 방법을 통해 유전체의 두께에 따라 원하는 색상을 조절할 수 있으며, 흡수층과 분리된 구조로 인해 태양전지의 효율과 색순도(color purity) 모두 우수한 특성을 얻을 수 있다. 제작된 태양전지는 건물 유리창에 부착되어 RE100 실현을 위한 핵심 제품으로 활용될 것으로 전망한다.



↑ [그림 4] 포토닉스 기술을 이용한 물리적 암호기 생성기술

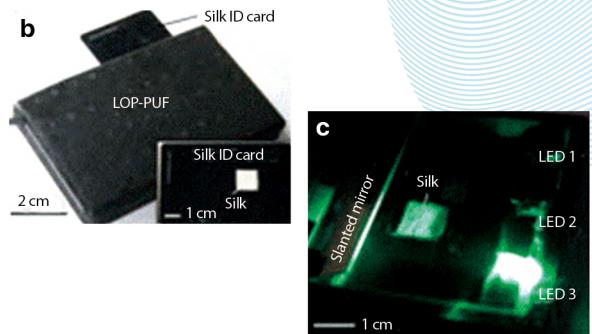
### 2.2.2. 보안용 포토닉스

사물인터넷(IoT) 시대가 도래하면서 스마트폰 등 각종 전자기기의 보안강화 이슈는 날로 커지고 있으나, 소프트웨어 기반의 보안 기술은 해킹에 취약하다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 하드웨어 보안 기술이 개발되고 있으며, 이 중 하나인 물리적 복제 방지(physical unclonable function, PUF) 기술은 동일한 공정으로 매번 다른 키(key)를 생성해낼 수 있기 때문에 각광을 받고 있다. 더 나아가 빛을 이용한 PUF 기술을 통해 보안 성능을 높이는 연구 또한 진행되고 있으나, 시스템 구조가 복잡하여 상용화는 다소 지연되고 있다.

본 연구실에서는 누에고치 실크(silk)의 마이크로/나노구조가 갖는 랜덤성을 활용한 보안용 포토닉스 연구를 진행하고 있다<sup>[10]</sup> (그림 4). 제작된 PUF는 빛의 입사 방향이나 색상에 대해 서로 다른 key를 생성하기 때문에 매우 높은 보안성을 가지며, LED 광원과 이미지 센서로 key 획득이 가능하기 때문에 기존 레이저 기반 광PUF에 비해 시스템을 최소화할 수 있다. 또한, 실크 본연의 유연성으로 인해 추후 고급 소재, 의류 등의 위변조 방지에 활용될 수 있다.

### 2.2.3. 에너지용 포토닉스

빛과 물질의 상호작용은 더 나아가 전자기파와 물질의 상호작용으로 이해되며, 가시광선 영역이 아닌 장적외선(far-infrared)영역에서 복사열을 제어하는 기술로 활용될 수 있다. 열복사(thermal radiation) 제어를 통해 열을 원하는 방향으로 전달 가능한 특성으로 인해 물체의 냉각/





발열에 응용할 수 있으며, 이는 최근 가속화되고 있는 지구온난화 문제를 해결할 핵심기술로 여겨진다.

본 연구실에서는 열복사 제어를 통해 물체의 온도를 크게 낮출 수 있는 복사 냉각(radiative cooling) 기술을 연구하고 있다<sup>[11-14]</sup>. 복사 냉각 기술은 차량, 건물, 웨어러블 기기 혹은 태양전지 등에 부착되어 에어컨 등의 냉각 기기 없이도 물체를 시원하게 할 수 있기 때문에 그 응용범위가 매우 크다. 본 연구실에서는 국내 최초 복사 냉각 전문 회사 (주)포엘(<https://www.foel.cool>)을 설립하였으며 현재 대면적 복사 냉각 필름 개발에 박차를 가하고 있다.

### 2.3. 연구 인프라

광전자소자를 제작하기 위해서는 여러 종류의 반도체 제작 장비 및 특성 평가 장비가 필요하다. 특히 연구목적에 따라 기판, 증착/식각 재료, 패턴의 크기 등이 변경되므로, 이에 따라 세분화된 반도체 제작/분석 장비들이 필요하다. 본 연구실은 반도체 특화 공정/측정 장비가 30대 이상 구축된 공정실(cleanroom)을 보유하고 있어 실험의 연속성을 유지할 수 있으며, 새로운 형태의 소자 구현을 비교적 자유롭게 실행해 볼 수 있다.

### 3. 마치며

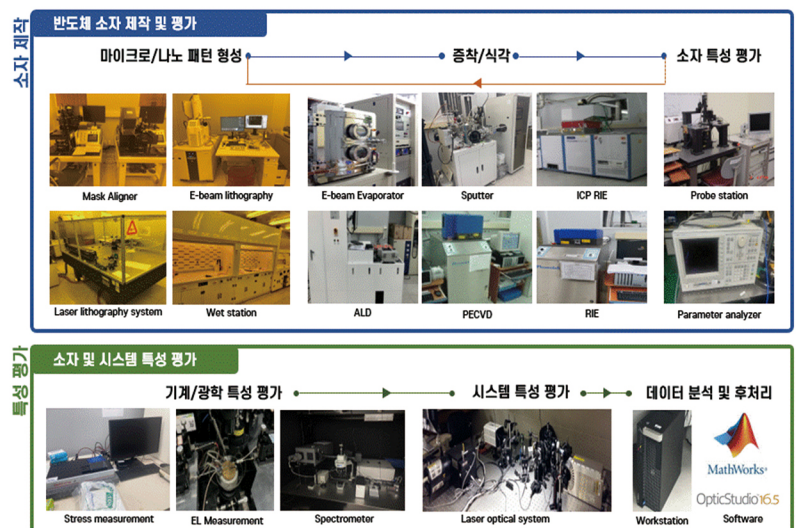
GIST 플렉서블 광전자 연구실은 차세대 광전자 소자 및 시스템에 활용될 기반 기술을 연구하고 있다. 광학/포토닉스, 반도체 재료 및 소자, 전자 회로 시스템, 신호 처리 및 분석 등을 폭넓게 연구하며, 나노 및 마이크로 구조, 발광, 수광, 변조 소자 등의 제작 및 특성평가를 직접 수행하기 때문에 연구자로서 폭넓은 경험을 얻을 수 있다. 또한 전자기파 관점에서 자외선, 가시광선, 적외선 및 중장적외선을 다루며, 파동과 기하 광학 시물



↑ [그림 5] 본 연구실에서 개발한 수동 복사 냉각 기술

레이션, 반도체 소자 시뮬레이션도 필요에 따라 직접 수행하기 때문에 이론 및 실험적 노하우를 두루 쌓기에 적합한 연구실이다.

2013년 부산대학교 전자공학과에서 시작한 플렉서블 광전자 연구실은 이제 햇수로 만 10년을 채우게 되었다. 현재까지 총 다섯 명의 박사를 배출했고, 2021년에는 본 연구실 졸업생이 다시 부산대학교 전자공학과에 조교수로 뿌리를 내리게 되었다. 또한 생체모방 카메라 분야 및 복사 냉각 소재 분야에서 탁월한 성과를 내었으며, 해당 연구를 학계에 보고하는 것에 그치지 않고 대기업 및 중소기업과의 협업 또는 연구실 창업을 통해 현장맞춤형 기기를 개발하려 노력해왔다. 연구실 구성원 한 명 한 명의 노력이 없이는 이런 소중한 결실을 맺을 수 없었음을 이 자리를 빌어 다시 한 번 상기한다. 연구실을 거처간 구성원 모두에게 다시 한 번 감사하다는 말을 전한다. 마지막으로, 플렉서블 광전자 연구실의 연구 결과가 학계와 산업계에서 널리 활용될 수 있기를 바라며 소개글을 마친다.



↑ [그림 6] 반도체 소자 제작 및 특성 평가 인프라

- 1 G. J. Lee, C. S. Choi, D. H. Kim, and Y. M. Song, "Bioinspired artificial eyes: Optic components, digital cameras, and visual prostheses," *Adv. Funct. Mater.* **28**, 1705202 (2018).
- 2 Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, R.-H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Digital cameras with designs inspired by the Arthropod eye," *Nature* **497**, 95-99 (2013).
- 3 M. S. Kim, G. J. Lee, C. Choi, M. S. Kim, M. Lee, S. Liu, K. W. Cho, H. M. Kim, H. Cho, M. K. Choi, N. Lu, Y. M. Song, and D. H. Kim, "An aquatic vision inspired camera based on a monocentric lens and a silicon nanorod photodiode array," *Nat. Electron.* **3**, 546-553 (2020).
- 4 M. Lee, G. J. Lee, H. J. Jang, E. Joh, H. Cho, M. S. Kim, H. M. Kim, K. M. Kang, J. H. Lee, M. Kim, H. Jang, J.-E. Yeo, F. Durand, N. Lu, D.-H. Kim, and Y. M. Song, "An amphibious artificial vision system with a panoramic visual field," *Nat. Electron.* **5**, 452-459 (2022).
- 5 M. Kim, S. Chang, M. Kim, J.-E. Yeo, M. S. Kim, G. J. Lee, D.-H. Kim, and Y. M. Song, "Cuttlefish-eye-inspired artificial vision for high-quality imaging under uneven illumination conditions," *Sci. Robot.* **8**, eade4698 (2023).
- 6 W. Lee, Y. J. Yoo, J. Park, J. H. Ko, Y. J. Kim, H. Yun, D. H. Kim, Y. M. Song, and D. -H. Kim, "Perovskite microcells fabricated using swelling-induced crack propagation for colored solar windows," *Nat. Commun.* **13**, 1946 (2022).
- 7 J. H. Ko, Y. J. Yoo, Y. J. Kim, S.-S. Lee, and Y. M. Song, "Flexible, large-area covert polarization display based on ultrathin lossy nanocolumns on a metal film," *Adv. Funct. Mater.* **30**, 1908592 (2020).
- 8 M. H. Kang, G. J. Lee, J. H. Lee, M. S. Kim, Z. Yan, J.-W. Jeong, and Y. M. Song, "Outdoor-useable, wireless/battery-free patch-type tissue oximeter with radiative cooling," *Adv. Sci.* **8**, 2004885 (2021).
- 9 Y. J. Yoo, J. H. Ko, G. J. Lee, J. Kang, M. S. Kim, S. G. Stanciu, H.-H. Jeong, D.-H. Kim, and Y. M. Song, "Gires-Toumois immunoassay platform for label-free bright-field imaging and facile quantification of bioparticles," *Adv. Mater.* **34**, 2110003 (2022).
- 10 M. S. Kim, G. J. Lee, J. W. Leem, S. Choi, Y. L. Kim, and Y. M. Song, "Revisiting silk: a lens-free optical physical unclonable function," *Nat. Commun.* **13**, 247 (2022).
- 11 S.-Y. Heo, G. J. Lee, D. H. Kim, Y. J. Kim, S. Ishii, M. S. Kim, T. J. Seok, B. J. Lee, H. Lee, and Y. M. Song, "A Janus emitter for passive heat release from enclosures," *Sci. Adv.* **6**, eabb1906 (2020).
- 12 S.-Y. Heo, D. H. Kim, Y. M. Song, and G. J. Lee, "Determining the effectiveness of radiative cooler-integrated solar cells," *Adv. Energy Mater.* **12**, 2103258 (2021).
- 13 W. B. Han, S.-Y. Heo, D. Kim, S. M. Yang, G.-J. Ko, G. J. Lee, D.-J. Kim, K. Rajaram, J. H. Lee, J.-W. Shin, T.-M. Jang, S. Han, H. Kang, J. H. Lim, D. H. Kim, S. H. Kim, Y. M. Song, and S.-W. Hwang, "Zebra-inspired stretchable, biodegradable radiation modulator for all-day sustainable energy harvester," *Sci. Adv.* **9**, eadf5883 (2023).
- 14 S.-Y. Heo, G. J. Lee, and Y. M. Song, "Heat-shedding with photonic structures: radiative cooling and its potentials," *J. Mater. Chem. C.* **10**, 9915-9937 (2022).

