

미용/의료용 유연 마이크로 발광 다이오드 디바이스 제작 공정

이재희 

노스웨스턴 대학 신소재공학과

초록: 마이크로 발광다이오드(LED)는 칩 사이즈가 100마이크로미터 이하인 무기발광재료로 우수한 전기적, 광학적, 기계적 성능 때문에 유연 디스플레이, AR/VR, 바이오 메디컬 분야의 차세대 광원으로 큰 주목을 받고 있다. 특히, 바이오메디컬 분야에 적용하기 위해서는 매우 작은 크기의 마이크로 LED 칩을 원하는 유연 기판에 옮기기 위한 기술이 요구되며, 실제 인간의 얼굴, 장기 등 여러 신체 부위에 적용하기 위해서는 대량의 마이크로 LED 칩을 낮은 정밀 오차, 빠른 속도, 높은 수율로 타겟 기판에 전사하는 것이 중요하다. 본 논문의 목적은 미용/의료용 유연 마이크로 LED 디바이스 제작 공정 방법을 소개하고, 이를 실제 미용/의료 산업에 적용하기 위해 필요한 마이크로 LED 전사 기술을 소개한다. 해당 기술로 제작된 유연 마이크로 LED 디바이스는 피부 질환, 암, 신경질환 등 인간 질병 치료에 널리 활용될 것으로 기대된다.

키워드: 마이크로 LED, 마이크로 LED 전사, 유연 광치료 디바이스

Fabrication of Flexible Micro LED for Beauty/Biomedical Applications

Jae Hee Lee

Department of Materials Science and Engineering, Northwestern University, Evanston 60208, USA

(Received September 5, 2023; Revised September 18, 2023; Accepted September 18, 2023)

Abstract: Micro light-emitting diodes (LEDs), with a chip size of 100 micrometers or less, have attracted significant attention in flexible displays, augmented reality/virtual reality (AR/VR), and bio-medical applications as next-generation light sources due to their outstanding electrical, optical, and mechanical performance. In the realm of bio-medical devices, it is crucial to transfer tiny micro LED chips onto desired flexible substrates with low precision errors, high speed, and high yield for practical applications on various parts of the human body, including someone's face and organs. This paper aims to introduce a fabrication process for flexible micro LED devices and propose micro LED transfer techniques for cosmetic and medical applications. Flexible micro LED technology holds promise for treating skin disorders, cancers, and neurological diseases.

Keywords: Micro LED, Micro LED transfer, Flexible phototherapeutic device

1. 서론

✉ Jae Hee Lee; jaehee.lee1@northwestern.edu

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

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.

- 빛과 생체 조직의 상호 작용을 바탕으로 비침습적 질병 치료를 할 수 있다는 연구들이 보고되면서, 빛을 생체 내 원하는 영역으로 전달하기 위한 광전자소자가 개발되고 있다 [1,2].
- 거리에 의한 광 손실을 최소화하여 효율적인 빛 전달을

하기 위해서는 광전자소자가 굴곡이 있는 피부표면, 장기 등 다양한 신체 부위에 기계적으로 양립하여 부착될 수 있어야 한다 [3-6].

- 무기 소재 기반의 마이크로 LED는 낮은 전력 소모, 긴 수명, 기계적 안정성 등의 우수한 특성으로 유연 디스플레이, AR/VR, 생체 부착/삽입형 광치료 및 센서의 바이오메디컬 응용 분야에서 큰 주목을 받고 있다 [7-12].
- 이 마이크로 LED를 인체 부착 가능한 형태로 제작하기 위해서는 마이크로 LED의 발광층을 딱딱한 성장 모기판에서 분리시키고 유연 기판 위에서 구동 가능한 형태로 제작하는 기술이 필요하다.
- 특히, 미용/의료 등 분야의 산업적 적용을 위해 하나의 LED 웨이퍼에서 다수의 마이크로 LED 칩을 제작하고, 이를 값싸고 높은 수율로 전사시키는 기술이 중요하다 [13-15].
- 이에, 본 논문에서는 빛을 이용한 피부 미용 및 질병 치료 원리, 습식 식각 공정을 이용한 유연 마이크로 LED 제작 공정 방법, 개별 혹은 다수의 마이크로 LED 칩 전사 공정 방법, 유연 마이크로 LED의 바이오메디컬 분야에서 활용에 대해 다루고자 한다.

- 제작된 유연 마이크로 LED 디바이스는 동물, 인간 등에 적용되어 피부 미용, 암 치료, 신경질환 치료 등에 이용될 수 있을 것으로 기대된다 [16-19].

2. 본 론

2.1 빛과 생체 내 조직의 상호작용

- 빛이 피부 내로 침투 시, 입사된 광자는 생체 내 세포/조직에 의해 산란, 반사, 흡수된다. 이 현상은 인간 질병의 진단/치료, 생체 내 조직 이미징, 약물 전달 등에 활용 가능하다. 그 중에서도 빛으로 인간의 질병을 치료하는 메커니즘은 주로 생체 조직에 의한 빛의 흡수에 의해 일어난다.
- 빛이 피부에 조사되면 그림 1(a)의 생체 내 고유 분자 혹은 외부에서 주입한 빛에 반응하는 물질(단백질, 이온 채널 등)에 의해 흡수된다. 흡수된 빛은 그림 1(b)와 같이 열 에너지, 기계적 에너지, 화학 에너지 형태로 전환되어 생물학적 기능 변화를 유도하고 암, 피부질환,

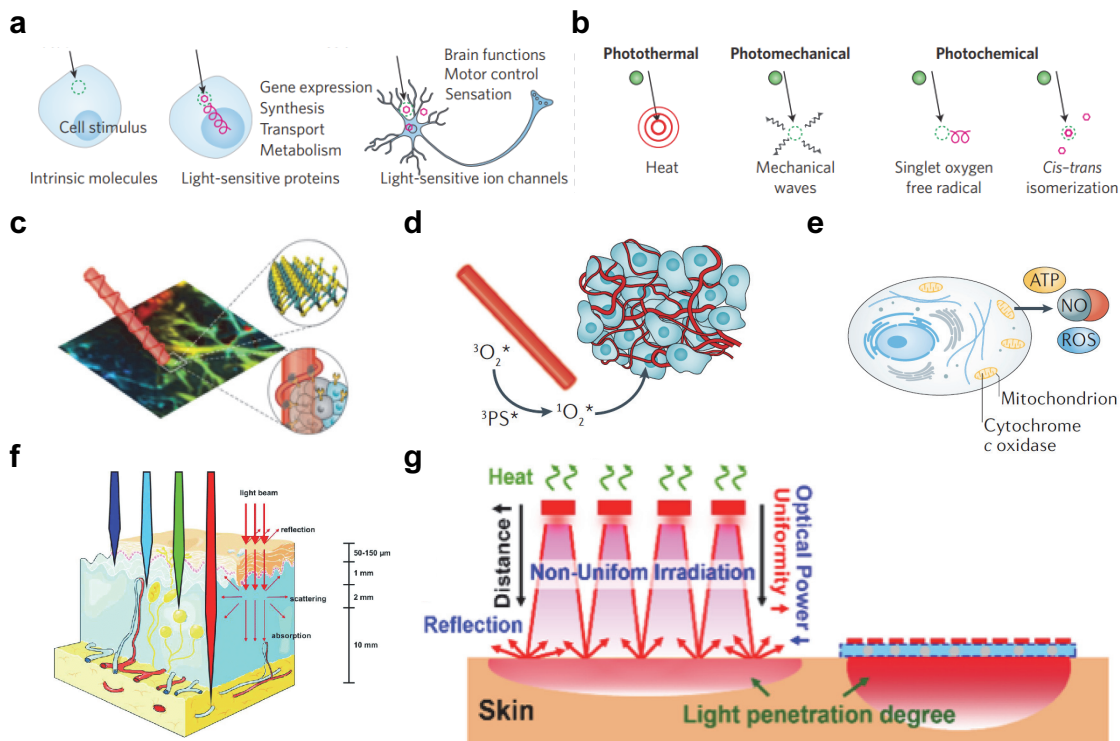


Fig. 1. (a) Intrinsic/extrinsic biomolecules that absorb light [3], (b) three types light-tissue reactions used for therapy [3], the mechanism of (c) photodynamic, (d) photobiomodulation therapy [19], (f) light penetration depth depending on the wavelength [20], and (g) light penetration effect that varies depending on the irradiation distance [11].

신경질환 등의 질병 치료에 적용된다.

- 그림 1(c)에서 설명하는 광열 반응은 빛 조사 시 열을 발생시키는 광열 소재를 이용하여 정상세포보다 상대적으로 열에 취약한 암세포를 사멸시키는 데 활용된다. 그림 1(d)는 광감각제에 빛이 조사되었을 시 발생하는 광화학 반응을 이용한 광역동치료 방법을 보여준다. 빛에 의해 여기된 광감각제는 다시 안정화되면서 에너지를 방출한다. 에너지는 조직 주변의 산소 분자에 전달되어 반응성이 매우 큰 활성산소를 생성한다. 활성산소는 암 조직을 공격하여 암의 기능을 저해하고, 결국 사멸시킨다.
- 그림 1(e)는 생체 내 고유 분자들의 광화학 반응을 통해 유도된 광생물변조를 보여준다. 적색 혹은 근적외선 파장의 빛은 생체 내 미토콘드리아에 흡수되어 세포 호흡을 촉진시키고 세포 내 에너지 생산을 증가시킨다. 이는, 세포 활동 촉진, 세포 손상 복구, 염증 감소 등의 다양한 생물학적 변화를 유도한다.
- 이러한 메커니즘의 질병 치료를 이루기 위해서는 빛을, 광을 흡수하는 분자가 있는 곳까지 도달시키는 것이 중요하다. 그림 1(f)에서 볼 수 있듯이, 빛의 피부 내 침투 깊이는 파장에 따라 달라지게 되기 때문에 원하는 분자

의 생체 내 위치에 따라 파장을 선택하여 조사해야 한다. 적색 및 근적외선 영역으로 갈수록 침투 깊이(<1 cm)가 깊어져 빛 전달에 용이하기 때문에 의료/미용 분야에서 많이 사용된다.

- 또한, 빛을 방출하는 광원의 조사 거리에 따라서 빛의 침투 효과가 달라진다. 그림 1(g)에서 볼 수 있듯이, 광원과 피부 사이의 거리를 두고 조사할 경우, 거리에 따른 빛 손실과 피부 계면에서의 반사가 증가하여 빛의 피부 침투 효과를 감소시킨다. 반면에 피부에 밀착하여 광원을 조사할 경우, 빛 손실을 최소화하여 피부 내 광 침투 효과를 향상시킬 수 있다. 이에, 빛을 피부 내로 효과적으로 전달하기 위해서는 피부와 기계적으로 양립할 수 있는 형태의 유연 광전자소자의 제작이 중요하다.

2.2 웨이퍼 식각을 통한 유연 마이크로 LED 디바이스 제작 공정

- 본 논문에서는 그림 2(a)의 구조층을 가지는 적색 마이크로 LED 제작 공정에 대해 설명한다. 각 층은 유기금속화학증착(MOCVD) 장비를 이용하여 증착되었고, n-

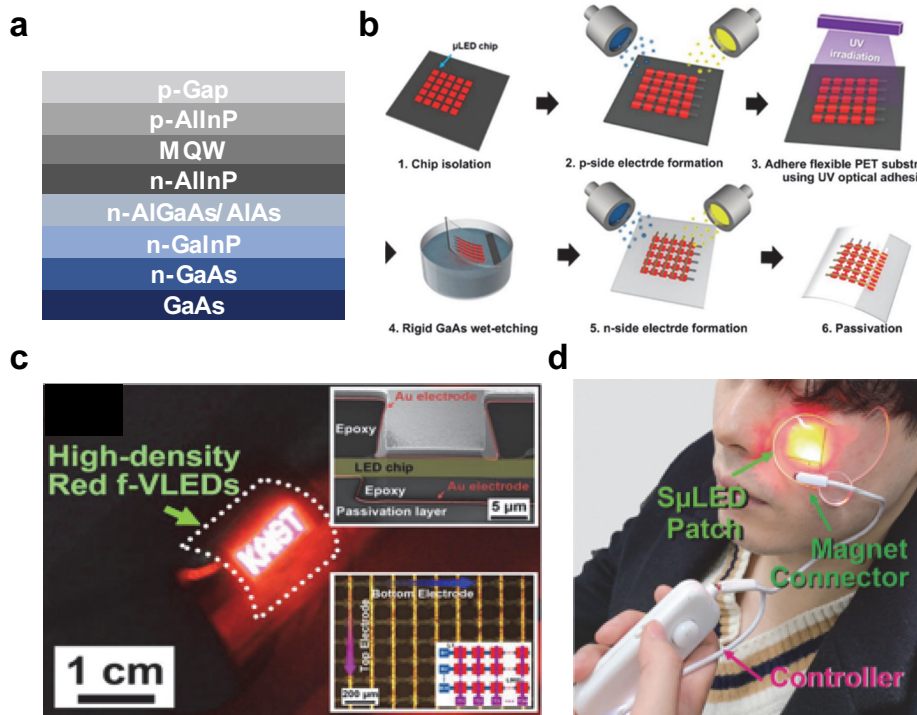


Fig. 2. (a) The structure of microled layer, (b) fabrication process of flexible microled devices [11], (c) an optical image of flexible microled devices (the upper inset is sem image of microled device showing vertical interconnection and sandwich structure) [21], and (d) the operation of microled device on human face with high mechanical and thermal stability [11].

AlGaAs/AlAs층은 빛의 광추출 효율을 높이기 위해, n-GaInP층은 습식 식각 시 발광층까지 에칭이 되는 것을 막기 위해 형성되었다. 그림 2(b)는 유연 마이크로 LED 디바이스 제작 공정 과정(1-6)을 보여준다. GaAs 기판 위에 형성된 LED 에피층으로부터 마이크로 LED 형성을 위해 chip isolation 공정을 수행한다. (1) Chip isolation 공정은 다음의 과정을 따른다. i) 클리닝을 한 LED 웨이퍼 위에 네거티브형 포토레지스트(PR)를 이용하여 포토리소그래피 공정을 통해 원하는 마이크로 LED 사이즈의 홀을 뚫는다. ii) Ohmic contact을 위한 전극을 증착하고, 이온 반응 식각 시 마스크로 사용할 Ni를 증착한다. iii) Pr을 지운 후, 염소 가스 및 아르곤 가스를 이용한 건식 식각을 통해 마이크로 LED 칩을 형성한다. (2) 마이크로 LED의 p-side 전극 배선을 형성한다. 이때 마이크로 LED 내의 통전을 막기 위해 절연층에 홀을 형성하여 전기적 통로를 만들어 준다. (3) 광학 접착제, 화학기상증착(CVD), 스펀코팅 등을 사용하여 polyethylene terephthalate (PET), parylene-c, polyimide 등의 새로운 유연 기판을 형성한다. (4) 기존의 딱딱한 모기판인 GaAs를 citric acid, H₂O₂가 혼합된 용액으로 습식 식각을 하여 제거한다. (5) 습식 식각 이후 드러난 n-side 마이크로 LED 위에 전극 배선을 형성한 후, (6) 최종 패시베이션을 한다.

- 그림 2(c)는 제작된 유연 마이크로 LED 디바이스의 이미지를 보여준다. 상부 inset의 주사형 전자현미경 (SEM) 이미지를 보면, 마이크로 LED 칩이 절연층의 홀을 통해 전기적으로 연결된 것을 확인할 수 있다. 전극을 수직으로 배열함으로써 전류가 흐르는 통로의 길이 (~5 μm)를 줄이고, 전류 크라우딩 현상을 줄여 마이크로

LED의 발열을 줄이고 효율을 높였다.

- 그림 2(d)는 점발광 마이크로 LED의 불균일한 조사를 해결하기 위해 미세 실리카입자를 코팅하여 균일한 조사를 이뤄낸 면발광 마이크로 LED를 보여준다. 면발광 마이크로 LED는 polyimethylsiloxane (PDMS) 폴리머 사이에 샌드위치 구조로 삽입되어 기계적 중립면 (neutral plane)에 위치시켰기 때문에 약 2 cm의 굽힘 반경을 가지는 인간의 눈 밑 부분에서도 높은 기계적 안정성을 가지고 작동하는 것을 확인하였다 [그림 2(d)]. 특히, 발열이 적어 인간의 피부 위에서도 39°C 이하의 온도로 구동하였고 붉은 반점, 열성 홍반, 물질 등의 저온 화상의 문제를 일으키지 않았다.

2.3 다양한 마이크로 LED 전사 방법

- 유연 마이크로 LED 디바이스의 생산 비용 절감 및 대량생산을 위해서는 효율적인 웨이퍼 사용, 다수의 칩을 빠른 속도, 높은 수율로 전사해야 한다. 그림 2에서는 레이저, elastomer stamp, 롤, 유체 자가 조립 등의 기술을 이용한 다양한 마이크로 LED의 전사 방법을 소개한다.
- 그림 3(a)는 레이저를 이용한 마이크로 LED 칩의 전사 방법을 보여준다. 먼저, UV 레이저가 투과할 수 있는 투명한 유리기판으로 마이크로 LED 칩을 1차 전사한다. 이때, 유리기판은 UV 레이저에 반응하는 dynamic release layer (DRL)가 스펀 코팅 되어 있다. UV pulse 레이저를 유리기판 방향으로 조사하면 열에 의해 DRL 내에 가스가 생성되면서 blister가 형성된다. Blister가 팽창하는 힘에 의해 마이크로 LED 칩은 원하는 기판으

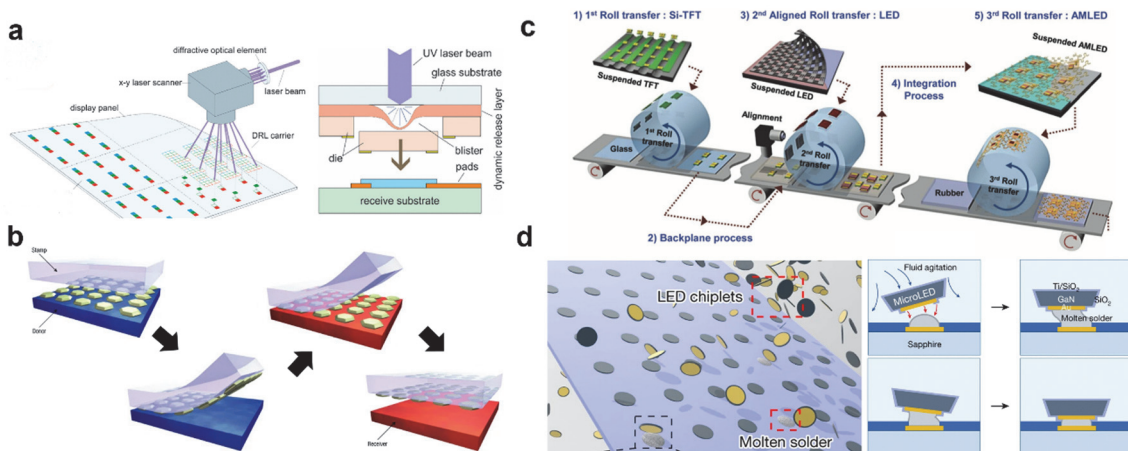


Fig. 3. Various transfer technologies of micro leds. (a) Laser-assisted transfer [22], (b) elastomer stamp-based transfer [23], (c) elastomer-based roll transfer [24], and (d) fluidic self-assembly transfer [25].

로 전사된다. 레이저 스캐닝 방식을 이용한다면 시간당 10만 개 혹은 그 이상의 마이크로 LED 칩 전사가 가능하다.

- 그림 3(b)는 elastomer stamp를 이용하여 van der Waals 힘에 의한 접착력을 통해 마이크로 LED 칩을 전사하는 방식이다. Elastomer stamp를 마이크로 LED 칩 위에 접촉시킨 후, 이를 10 cm/s 이상의 빠른 속도로 떼어내면 강한 접착력에 의해 다수의 칩을 donor 기판으로부터 박리시킬 수 있다. 이후, 마이크로 LED 칩이 접착되어 있는 elastomer stamp를 reciever 기판에 접촉시킨 후, 1 mm/s 이하의 속도로 떼어내어 전사 공정을 완료한다. 이 전사 방식은 박리 속도가 핵심적으로 작용하고, 칩의 손상 없이 전사할 수 있다는 장점이 있다.
- 그림 3(c)는 롤을 이용한 마이크로 LED 칩 전사 방법을 보여준다. 브릿지 형태의 앵커를 가진 Si 박막 트랜지스터, 박막형 마이크로 LED 칩을 롤의 접착력으로 모기판으로부터 박리한 후 임시 기판으로 전사한다. 임시 기판 위에서 전극 배선 공정을 거친 디바이스를 최종 기판으로 전사한다. 이는, 세 번의 연속적인 전사를 통해 능동형 마이크로 LED 디스플레이를 한번에 제작 가능하게 하였다.
- 그림 3(d)는 표면 장력이 유도하는 유체 자가 조립(fluidic self-assembly, FSA) 전사 기술을 보여준다. 마이크로 LED 칩을 조립 용액에 넣기 전, 칩을 전사할 사파이어

기판 위에 Au layer을 패터닝 하고 그 위에 solder bump를 형성하여 마이크로 LED 칩이 결합할 부위를 만들어준다. 마이크로 LED 칩을 조립 용액에 넣고 흔들면 칩 아래의 Au layer가 결합 부위에 스스로 접촉하게 된다. 이때 용액의 온도는 88도로 하여 solder bump가 녹은 상태를 유지해야 수율 높은 전사가 가능하다. FSA 전사 시, 칩의 사이즈가 작아지면 조립용액에서 칩으로 전달되는 운동량이 떨어져 전사 수율이 감소된다. 이때, 고분자량의 폴리머를 첨가하면 조립 용액의 viscosity가 증가하여 칩에 전달되는 운동량을 증가시켜 전사 수율을 향상시킬 수 있다. 실제로 해당 전사 기술은 칩 사이즈가 45 μm 지름, 5 μm 두께의 디스크 모양을 가지는 GaN 기반의 마이크로 LED 칩 19,000 개를 60초 안에 99.88% 수율로 전사 가능하였다.

2.4 유연 마이크로 LED 디바이스의 광치료 효능

- 유연 마이크로 발광 다이오드는 다양한 굴곡을 갖는 피부, 장기, 뇌 등에 부착 혹은 삽입될 수 있으므로 탈모 치료, 피부 미백, 암 치료, 광유전학 등 분야에 적용 가능하다.
- 그림 4(a)는 유연 마이크로 발광 다이오드 패치를 이용한 모발 성장 효능을 보여준다. 광자극을 통한 모발 성장 효능 평가를 위해 7주 된 암컷 쥐 등의 털을 밀고 마이크로 발광 다이오드 패치를 부착하였다. 20일 동안

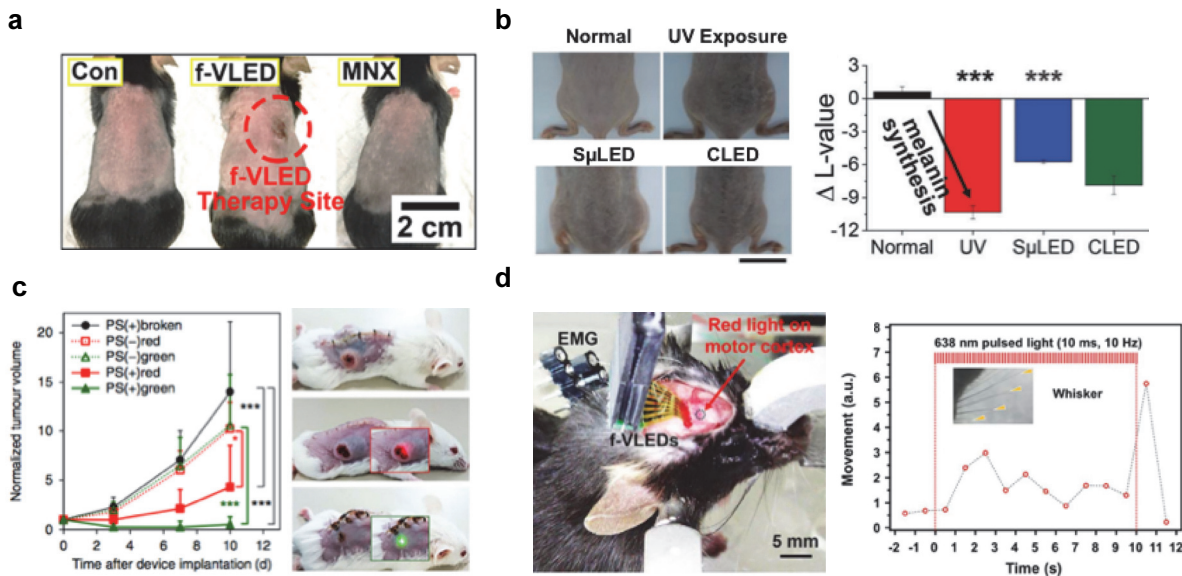


Fig. 4. (a) Facilitating hair regrowth via a flexible micro led phototherapeutic patch [21], (b) melanogenesis inhibition effect via a flexible surface-lighting micro led patch [11], (c) regression of tumor growth via an implantable tissue-adhesive micro led [18], and (d) movement control of mouse whisker by inserting a flexible micro led device into brain [26].

연속적으로 650 nm 파장의 빛을 5 mW/mm² 세기로 15분 동안 조사한 그룹과 미녹시딜을 처리한 그룹을 비교하였을 때, 광처리를 한 그룹에서 103.6 μm의 모발 길이 증가가 확인되었고 더 뚜렷한 베타-카테닌이 발현되었다. 이는, Wnt/β-카테닌 신호를 가속화하여 모낭 세포의 증식을 활성화하고 마우스 등 털의 성장기 진입을 향상시켰음을 의미한다.

- 그림 4(b)는 면발광 유연 마이크로 발광 다이오드 패치를 이용한 멜라닌 생성 억제 효능을 보여준다. 광자극을 통한 멜라닌 생성 억제 효능 평가를 위해 7주 된 HRM-2 멜라닌을 가진 누드 마우스에 UV를 처리하여 멜라닌 생성을 촉진시킨 상태에서, 630 nm 파장의 면발광 유연 마이크로 발광다이오드 패치를 쥐 등에 부착하여 ~2.4 J/cm²의 세기로 20일 동안 연속 조사하였다. 그 결과, UV 처리 군 대비 광처리 군에서 멜라닌 생성 양이 감소한 것이 확인되었다. 또한, 멜라닌 생성에 관여하는 tyrosinase, microphthalmia-associated transcription factor (MITF), melan-A 발현이 억제되는 것이 확인되었다. 이 결과는 유연 적색 마이크로 LED 패치가 자외선에 의해 유도되는 멜라닌 생성을 억제하여 피부 미백 등의 미용 분야에 활용될 수 있음을 시사한다.
- 그림 4(c)는 생체 조직에 부착 가능한 삽입형 마이크로 LED의 암 치료 효능을 보여준다. 광역동치료를 위해 암 이식이 진행된 쥐에 무선전력송신이 가능한 유연 마이크로 LED를 삽입한 후 photofrin 광감각제를 주기적으로 주사하였다. 530, 630 nm 파장의 빛을 지속적으로 조사한 결과, 암 성장이 효과적으로 억제되는 것이 확인되었다.
- 그림 4(d)는 유연 마이크로 LED를 뇌 표면으로 삽입하여 쥐 수염의 움직임 제어를 보여주는 것을 보여준다. 쥐의 운동 피질(motor cortex)의 다중 부위 조절을 확인하기 위해 전두엽 운동 피질 영역에 chrimson-tdTomato를 포함하는 adeno-associated virus (AAV) 벡터를 형질 도입했다. 638 nm 파장의 유연 마이크로 LED를 10 Hz, 10 ms 펄스로 조사하였을 때 성공적으로 쥐의 수염과 앞다리의 움직임이 유도되었다.

3. 결론

- 본 논문에서 다룬 유연 마이크로 LED 개발은 일정하지 않은 굴곡을 가진 인간 신체 및 장기에 적용 가능한 광 디바이스 구현을 가능하게 한다.

- 습식 식각을 이용한 공정은 다수의 마이크로 LED를 한번에 유연 기판으로 옮길 수 있지만, 불필요한 웨이퍼 소모가 많다. 또한, 한번에 다수의 칩을 공정하기 때문에 발광 수율의 문제를 갖는다.

- 이에, 마이크로 LED 전사 공정이 많이 연구되고 있지만, 아직까지는 마이크로 LED 칩 손상, 정렬 오차, 일회적인 사용 등 상용화 단계로 가기에는 한계가 있다.

- 또한, 최종 유연 마이크로 LED 디바이스 제작을 위해서는 전사 후 interconnection, 불량 칩 repair 등의 공정에 관한 고찰이 필요하다.

- 마이크로 LED의 치료 효능이 동물 실험적 검증을 통해 증명되었지만, 이를 넘어 실제 사람에게 적용되기 위해서는 사람의 얼굴이나 장치에서의 부착 가능한 대면적 디바이스 제작이 필요하며, 사이즈 증가에 따른 마이크로 LED 소자에 의한 저온 화상 등의 열적 이슈를 막기 위해 발광소자 내의 열적 관리도 필수적으로 고려되어야 한다.

- 유연 마이크로 LED는 광치료, 광역동치료, 광유전학 등 바이오메디컬 분야에 적용되어 피부 미용, 암, 신경 질환 등 인간 질병 치료를 위한 유망 기술 중 하나가 될 것으로 기대된다.

ORCID

Jaе Hee Lee

<https://orcid.org/0009-0007-3947-9505>

REFERENCES

- [1] N. Hanford and M. Figueiro, *J. Alzheimer's Dis.*, **33**, 913 (2013). doi: <https://doi.org/10.3233/JAD-2012-121645>
- [2] W. Posten, D. A. Wrone, J. S. Dover, K. A. Arndt, S. Silapunt, and M. Alam, *Dermatol. Surg.*, **31**, 334 (2005). doi: <https://doi.org/10.1111/j.1524-4725.2005.31086>
- [3] S. H. Yun and S.J.J. Kwok, *Nat. Biomed. Eng.*, **1**, 0008 (2017). doi: <https://doi.org/10.1038/s41551-016-0008>
- [4] H. Kim, S. Beack, S. Han, M. Shin, T. Lee, Y. Park, K. S. Kim, A. K. Yetisen, S. H. Yun, W. Kwon, and S. K. Hahn, *Adv. Mater.*, **30**, 1701460 (2018). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201701460>
- [5] V. V. Tuchin, *J. Biomed. Opt.*, **21**, 071114 (2016). doi: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.7.071114>
- [6] T. Yokota, P. Zalar, M. Kaltenbrunner, H. Jinno, N. Matsuhisa, H. Kitanosako, Y. Tachibana, W. Yukita, M. Koizumi, and T. Someya, *Sci. Adv.*, **2**, e1501856 (2016). doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501856>
- [7] T. I. Kim, J. G. McCall, Y. H. Jung, X. Huang, E. R. Siuda, Y.

- Li, J. Song, Y. M. Song, H. A. Pao, R. H. Kim, C. Lu, S. D. Lee, I. S. Song, G. Shin, R. Al-Hasani, S. Kim, M. P. Tan, Y. Huang, F. G. Omenetto, J. A. Rogers, and M. R. Bruchas, *Science*, **340**, 211 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1232437>
- [8] J. Kim, P. Gutruf, A. M. Chiarelli, S. Y. Heo, K. Cho, Z. Xie, A. Banks, S. Han, K. I. Jang, J. W. Lee, K. T. Lee, X. Feng, Y. Huang, M. Fabiani, G. Gratton, U. Paik, and J. A. Rogers, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1604373 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201604373>
- [9] L. Hu, J. Choi, S. Hwangbo, D. H. Kwon, B. Jang, S. Ji, J. H. Kim, S. K. Han, and J. H. Ahn, *npj Flexible Electron.*, **6**, 100 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00234-z>
- [10] B. Jang, S. Won, J. Kim, J. Kim, M. Oh, H. J. Lee, and J. H. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2113299 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202113299>
- [11] J. H. Lee, Y. Ahn, H. E. Lee, Y. N. Jang, A. Y. Park, S. Kim, Y. H. Jung, S. H. Sung, J. H. Shin, S. H. Lee, S. H. Park, K. S. Kim, M. S. Jang, B. J. Kim, S. H. Oh, and K. J. Lee, *Adv. Healthcare Mater.*, **12**, 2201796 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.202201796>
- [12] T. Wu, C. W. Sher, Y. Lin, C. F. Lee, S. Liang, Y. Lu, S. W. Huang Chen, W. Guo, H. C. Kuo, and Z. Chen, *Appl. Sci.*, **8**, 1557 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/app8091557>
- [13] J. Li, B. Luo, and Z. Liu, *Proc. 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT) (IEEE, Guangzhou, China, 2020)* p. 1.
doi: <https://doi.org/10.1109/ICEPT50128.2020.9201923>
- [14] J. H. Kim, B. C. Kim, D. W. Lim, and B. C. Shin, *J. Mech. Sci. Technol.*, **33**, 5321 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1024-4>
- [15] C. Linghu, S. Zhang, C. Wang, H. Luo, and J. Song, *Semicond. Semimetals*, **106**, 253 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/bs.semsem.2020.12.002>
- [16] Y. Jeon, H. R. Choi, M. Lim, S. Choi, H. Kim, J. H. Kwon, K. C. Park, and K. C. Choi, *Adv. Mater. Technol.*, **3**, 1700391 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201700391>
- [17] J. Choi, I. S. Lee, J. S. Lee, S. Jeon, W. S. Yun, S. Yang, Y. Moon, J. Kim, J. Kim, S. Choy, C. Jeong, M. K. Shim, T. I. Kim, and K. Kim, *Biomater. Res.*, **26**, 56 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1186/s40824-022-00305-2>
- [18] K. Yamagishi, I. Kirino, I. Takahashi, H. Amano, S. Takeoka, Y. Morimoto, and T. Fujie, *Nat. Biomed. Eng.*, **3**, 27 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0261-7>
- [19] G. H. Lee, H. Moon, H. Kim, G. H. Lee, W. Kwon, S. Yoo, D. Myung, S. H. Yun, Z. Bao, and S. K. Hahn, *Nat. Rev. Mater.*, **5**, 149 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0167-3>
- [20] Z. Zhou, J. Song, L. Nie, and X. Chen, *Chem. Soc. Rev.*, **45**, 6597 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/C6CS00271D>
- [21] H. E. Lee, S. H. Lee, M. Jeong, J. H. Shin, Y. Ahn, D. Kim, S. H. Oh, S. H. Yun, and K. J. Lee, *ACS Nano*, **12**, 9587 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05568>
- [22] V. R. Marinov, *J. Soc. Inf. Disp.*, **49**, 692 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/sdtp.12352>
- [23] M. A. Meitzl, Z. T. Zhu, V. Kumar, K. J. Lee, X. Feng, Y. Y. Huang, I. Adesida, R. G. Nuzzo, and J. A. Rogers, *Nat. Mater.*, **5**, 33 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1038/nmat1532>
- [24] M. Choi, B. Jang, W. Lee, S. Lee, T. W. Kim, H. J. Lee, J. H. Kim, and J. H. Ahn, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1606005 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201606005>
- [25] D. Lee, S. Cho, C. Park, K. R. Park, J. Lee, J. Nam, K. Ahn, C. Park, K. Jeon, H. Yuh, W. Choi, C. H. Lim, T. Kwon, Y. H. Min, M. Joo, Y. H. Choi, J. S. Lee, C. Kim, and S. Kwon, *Nature*, **619**, 755 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06167-5>
- [26] S. H. Lee, J. Kim, J. H. Shin, H. E. Lee, I. S. Kang, K. Gwak, D. S. Kim, D. Kim, and K. J. Lee, *Nano Energy*, **44**, 447 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.12.011>