



이종 집적 유연 반도체 시스템 구현을 위한 무기물 박막소재의 전사 방법

주경현¹, 김정현^{1,2}, 박상윤^{1,2}, 김강현^{1,3}, 이한얼^{1,2,3} 

¹ 전북대학교 신소재공학부

² 전북대학교 JBNU-KIST 산학연용융학과

³ 전북대학교 전자정보공학부

Transfer Methods of Inorganic Thin Film Materials for Heterogeneously- Integration Flexible Semiconductor System

Gyeong Hyeon Ju¹, Jeong Hyeon Kim², Sang Yoon Park², Kang Hyeon Kim³, and Han Eol Lee^{1,2,3}

¹ Department of Materials Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

² Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³ Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received March 4, 2024; Revised March 20, 2024; Accepted March 21, 2024)

Abstract: With the recent development of emerging technologies, information acquisition and delivery between users has been actively conducted, and inorganic thin film transfer technology that effectively transfers various materials and devices is being studied to develop flexible electronic devices accordingly. This is aimed at innovative structural changes and functional improvement of electronic devices in the era of the Internet of Things (IoT). In particular, advanced technologies such as micro-LEDs are used to realize high-resolution flexible displays, and the possibility of heterogeneous integrated technologies can be presented by precisely transferring materials to substrates through various transfer process. This paper introduced physical, chemical, and self-assembly transfer methods based on inorganic thin film materials to implement heterogeneous integrated flexible semiconductor systems and introduces the results of application studies of semiconductor devices obtained through different transfer technologies. These studies are expected to bring about innovative changes in the field of smart devices, medical technology, and user interfaces in the future.

Keywords: Inorganic thin film, Thin-film transfer, Heterogeneous integration, Flexible semiconductor systems

1. 서론

최근 대두되고 있는 4차 산업 혁명은, 새로운 디지털 기술과 혁신적인 제품 생산 방식을 융합하여 미래 시대에 사회, 경제, 산업을 전반적으로 변화시키는 역할을 할 것으로 예측된다. 특히, 4차 산업 혁명을 성공적으로 진행하기 위해 새로운 정보의 중요성이 대두되면서, 사용자의 정보

✉ Han Eol Lee; haneol@jbnu.ac.kr

Copyright ©2024 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.

획득을 비롯하여 사용자-사용자 혹은 사용자-사물, 더 나아가 사물 간의 정보 교환 및 처리가 활발히 이루어질 것이며, 진정한 의미의 사물인터넷(internet of things, IoT) 시대가 도래할 것으로 보인다 [1,2].

전자 기기의 디자인이나 크기를 혁신적으로 변화시켜, 더 효율적으로 사용하기 위해 기기의 구조적 변화를 꾀하는 폼팩터 혁신(form factor innovation)이 새로운 연구/개발의 중요한 과제로 제시되고 있다 [1]. 전자 기기는 소형화나 유연/웨어러블화를 통해 기기의 휴대성이 향상되고, 사용자 요구 변화에 맞추어 그 사용성을 높여 사용자가 습득할 수 있는 정보의 양을 극대화시킬 수 있게 된다. 따라서 전 세계 수많은 연구자들은 고성능, 안정성, 장기 수명 등의 특성을 충족하는 전자 기기를 유연/웨어러블화 하는 연구를 활발히 진행하고 있으며 [5], 더 나아가 다양한 소자를 고집적화하여 새로운 기능을 만들고자 노력하고 있다.

예를 들어, 유연/웨어러블 디스플레이는 미래 IoT 기기 중에서도 데이터를 시각화하여 효과적으로 사용자에게 전달하는 매체로써 각광받고 있다. 인간이 습득할 수 있는 다양한 정보 중에서도, 시각 정보는 전체의 83%를 차지하고 있어 인간의 삶에 가장 지대한 영향을 미치게 되는데, 유연/웨어러블 디스플레이는 자동차나 건물 내·외부, 의류 등 다양한 표면에 부착되어 손쉽게 시각 정보를 제공하게 된다 [3]. 특히, 효율적인 공간 사용이 가능할 뿐만 아니라 이 기술은 고해상도/고색상 표현력을 가진 화면이나 가상 현실(virtual reality, VR), 증강 현실(augmented reality, AR)에 적용 가능할 것이며, 자율주행, 의료/교육 분야 등 수많은 분야에 응용이 가능하여, 그 중요성이 더 높아지고 있다.

유기 LED(organic LED, OLED), 양자점(quantum dot, QD) 등 다양한 광원 중에서도, 마이크로 LED(micro light emitting-diode, μ LED)는 초박막(두께 $<5\ \mu\text{m}$), 초소형 크기(너비 $<100\ \mu\text{m}$)를 지닌 소자로서 5,000 PPI(pixel per Inch) 이상의 높은 해상도, 뛰어난 광·전기적 특성(휘도 $>100,000\ \text{cd}/\text{m}^2$, 구동전력 $<40\ \text{mW}$), 빠른 응답시간($\sim 0.2\text{ns}$)으로 차세대 유연/웨어러블 디스플레이에 사용될 수 있을 것으로 보인다. 하지만 μ LED는 단색광의 소자로서, 실제 디스플레이로 구현하기 위해서는 서로 다른 기판에서 제작된 이종물질의 적색(red), 녹색(green), 청색(blue) μ LED를 한 기판 상에 위치시킬 필요가 있다 [4-6].

따라서 다양한 종류의 소재나 소자를 한 기판에 구현하여 새로운 기능이나 뛰어난 특성을 얻고자 하는 노력의 일환으로, 이종 집적(heterogeneous integration) 반도체 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이종 집적을 실현하기 위해서는 박막 전자 소자를 정확한 위치에 높은 수율로 옮겨

야 하기에 뛰어난 전사공정(transfer)이 필요하게 되며 [7], 이를 상업화하기 위해 전사 공정은 제작 속도, 대량 생산 가능성, 기판의 재사용 유무 등 다양한 조건을 만족해야 한다. 하지만 대량의 박막 전자 소자를 한 번에 전사하는 기술은 아직 완벽하지 않다. 수천만 개의 광원 픽셀로 이루어진 유연 μ LED 디스플레이를 구현한다고 가정할 때, 한 번에 백 개의 단색 μ LED 소자를 전사하여도 디스플레이를 완성하기 위해서는 100,000회 이상의 전사가 필요하며, 하루 이상의 시간이 소요되는 문제가 발생한다. 또한, 풀 컬러 디스플레이를 제작할 경우, RGB 세 가지 색의 μ LED를 정확한 위치에 이종 집적하는 데 사용되는 시간과 인력을 추가적으로 고려할 때, 박막 전사 기술은 아직 개발/개선되어야 할 여지가 많은 기술로 여겨진다. 더욱이, 완전한 유연/웨어러블 디스플레이를 실현하기 위해서는, 각 픽셀을 개별적으로 어드레싱하는 액티브 매트릭스(active-matrix, AM) 회로, 전력원, 메모리 소자를 전사하여 RGB μ LED 어레이와 집적해야 한다는 큰 도전과제도 남아 있다.

본 논문에서는 이종 집적 유연 반도체 시스템을 구현하기 위한 핵심 기술인 무기물 박막 전사 공정에 대해 정리하여 소개하고자 한다. 딱딱한 모기판 상에 형성된 다양한 박막 소재/소자는 원하는 기판(예: 유연, 신축, 웨어러블 기판 등)으로 전사되어야 한다. 이때 사용되는 전사 공정은 크게 i) 물리적 전사, ii) 화학적 전사, iii) 자기조립 기반 전사로 분류된다. 먼저, 물리적 전사로 탄성체의 접착력을 이용하는 스탬핑(stamping) 방식, 레이저로 희생층을 반응시키는 레이저 박리(laser lift-off, LLO), 대량 생산용 롤 기반 전사(roll-to-roll process, R2R process), 정전기력/전자기력 기반 전사, 마이크로 진공 전사, 2차원 물질 기반 박막 전사(2D layer-based transfer, 2DLT)로 나누어 볼 수 있다. 다음으로 화학적 전사는 기판과 소재 사이의 희생층만을 제거하는 에피택셜 전사(epitaxial lift-off, ELO)와 기판을 완전 제거하는 기판 식각 공정으로 구성된다. 마지막으로, 자기조립 기반 전사는 마이크로 크기의 박막 소자를 타겟 기판 상에 위치시키고, 유체의 이동성이나 전기장에 의해 소자가 스스로 정렬되게 만드는 방식이다. 본문에서는 앞서 언급한 전사 방법들의 메커니즘과 장단

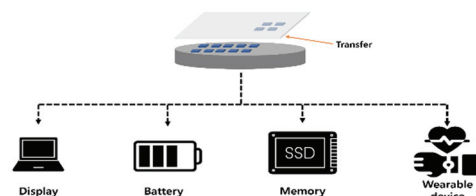


Fig. 1. Application strategies of inorganic thin-film transfer.

점에 대해 자세히 설명할 것이며, 다양한 전사 방법을 통해 구현된 반도체 소자가 적용된 응용 연구 결과들을 소개하도록 한다 (그림 1).

2. 무기 박막의 전사 기술 방안

2.1 물리적 전사

물리적인 전사 방식은 딱딱한 기판에 제작된 반도체 소자를 기계적 힘, 열 에너지, 전기적 유도, 압력 등의 물리적인 힘을 이용해 분리하여 기존의 기판에서 새로운 기판으로 이동시키는 방법이다. 그림 2(a)는 고분자 탄성체를 이용한 스탬핑 방식을 사용하여 초소형 광소자를 타겟 기판으로 전사하는 방법을 보여주는 공정 모식도이다. 고분자 복합소재 중 하나인 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS)은 점탄성을 지닌 실리콘 탄성체로, 스탬핑 방식에서 가장 대표적으로 사용되는 소재이다. 전사 공정은, 도너 기판(donor substrate) 위에서 박막 소재를 성장시킨 후 CMOS 공정(complementary metal oxide semiconductor)을 통해 마이크로 크기의 반도체 소자를 제작하게 된다. 소자/도너 기판 상부에 평평한 고분자 탄성체 스탬프를 등각 접촉하여, 스탬프의 접착력을 이용하여 소자를 도너 기판으로부터 박리해 낸다. 이렇게 박리된 소자는 리시버 기판(receiver substrate)으로 옮겨지며, 리시버 기판의 특성에 따라 유연, 신축, 혹은 웨어러블 소자 등으로 변모될 수 있다. 이 기술의 장점으로는, 상대적으로 저렴하게 반도체 소자를 원하는 기판으로 전사할 수 있으며, 내구성이 높은 스탬프를 사용하므로 반복적인 전사 작업이 가능하다는 것이 있다 [1,24]. 그러나 탄성체 소재의 변형에 의한 낮은 전사 정밀도, 대면적 전사의 어려움, 다회 사용시 스탬프의 오염 이슈와 같은 한계점을 갖고 있다.

롤 기반 전사는 고분자 탄성체인 폴리디메틸실록산을 이용해 소자를 기판으로부터 떼어내는 스탬프 전사 방식의 원리를 기반으로 하지만, 평면 구조의 스탬프와 달리 롤러 형태의 구조로 연속 전사가 가능한 기술이다 [그림 2(b)]. 이 방식에서는 기존 스탬프 전사 방식의 한계 중 대량 생산이 어렵다는 점을 보완하고자, 스탬프 구조를 대형 롤 형태로 변형하였고, 4인치 이상의 크기로 대규모 전사가 가능하다는 이점을 갖는다. 대량 생산이 가능하다는 점을 통해 공정의 시간이나 비용을 절감하여 생산 효율성을 향상시킬 수 있지만, 롤 기반 스탬프 전사의 특성상 고분자 복합소재의 변형이 생기면 기존 스탬프 전사와 마찬가지로 전사의 정밀도가 좋지 않아 이를 개선할 방안이 필요하다 [8-10].

레이저를 이용한 전사는, 고에너지의 레이저 빔으로 도너 기판 상의 희생층만 반응시켜 반도체 소자를 분리하는 공정 기술이다 [그림 2(c)]. 가장 먼저, 투명하고 딱딱한 기판 표면에 레이저에 선택적으로 반응하는 희생층을 성장시킨다. 그 상부에 원하는 반도체/전자 소자를 제작한 뒤, 투명한 기판을 통해 조사된 레이저로 희생층을 반응시켜 계면의 접착력을 감소시킨다. 레이저-희생층의 반응은, 고에너지의 레이저를 이용하여 희생물질을 순식간에 용해시키는 방식. 반응을 통해 2가지 이상의 상으로 분해시키는 방식[예: $2\text{GaN(s)} \rightarrow 2\text{Ga(s)} + \text{N}_2\text{(g)}$]으로 나누어 볼 수 있다. 이러한 방법들을 통해 도너 기판으로부터 소자를 선택적으로 분리하여 리시버 기판에 전사할 수 있다 [3]. 이 기술은 레이저 빔을 활용해 소자 칩을 선택적으로 전사가 가능하여 원하는 위치에 개별 전사가 되며, 스탬프 방식에 비해 미세한 정렬이 가능하고, 빠른 대면적 전사가 가능하지만, 소자의 박리면이 깔끔하지 않고, 고가의 레이저 장비가 필요하다는 점, 제한된 투명기판에서만 공정이 진행될 수 있다는 단점을 갖고 있다 [1,4,11-13,24].

정전기 전사(electrostatic transfer) 기술은, 정전기 전사 모듈에 전압을 가해 정전기를 유도하고, 도너 기판 상의 소자를 기계적으로 떼어내고 들어올려 리시버 기판으로 전사시키는 방식이다 [21,24]. 전사 모듈은 히터 1 (적외선 가열 램프, 레이저 또는 저항 가열), 반도체 소자는 히터 2에 의해 가열되어, 이 열에 의해 발생한 정전기 인력을 통해 소자를 도너 기판으로부터 떼어낼 수 있다. 이후, 전사 모듈의 전력을 차단하여, 소자는 리시버 기판으로 전사가 된다 [그림 2(d)]. 이 기술은 제조한 반도체 소자를 선택적으로 들어올릴 수 있고, 정렬 오차가 적어 불량 소자가 적기 때문에, μLED 기반 디스플레이의 패널 제조에 유용하다고 볼 수 있다 [1]. 하지만 정전기 기반 모듈은 매우 정교한 마이크로 전자기계 시스템(micro electro mechanical systems, MEMS) 기술을 이용하기 때문에 제작이 복잡하고 가격이 비싸다는 단점이 있으며, 소자 특성상 정전기에 취약하기 때문에, 소자가 파손되는 것을 방지하려면 유전체(dielectric material)를 추가하는 별도의 공정 설계가 필요하다는 단점을 갖는다. 또한 전사 공정 자체의 복잡성과 한 번에 전사 가능한 영역이 2인치로 작기 때문에 대량 생산에 어려움이 있다 [1,14].

전자기 전사(electromagnetic transfer)는 전자기장을 이용하여 미세한 소자 구조물을 정밀하게 조정하여 기판에 옮기는 기술이다. 전사 공정은 반도체/전자 소자가 제작된 도너 기판이 아닌 임시 기판(transitional substrate)에서 주로 진행된다. 도너 기판에 μLED 와 전극을 구현한 후, 점착성의 임시 기판에 부착한 뒤 LLO 공정을 통해 도

너 기판을 분리한다. 임시 기판위의 소자 표면에 희생층과 니켈(Ni), 니켈-철(Ni-Fe) 합금으로 이루어진 자성층(ferromagnetic layer)을 형성한다. 그림 2(e)와 같이, 전자기 모듈을 통해 자성층을 끌어당기는 자기력을 발생시켜, 소자를 모듈에 부착하고 임시 기판의 접착력을 제거시킨다. 마지막으로, 모듈의 전자기력을 제거하면 소자를 리시버 기판의 원하는 위치에 전사시킬 수 있다 [14]. 이 기술은 전자기력을 이용해 소자를 분리하기 때문에, 기판의 기계적 손상을 최소화할 수 있고, 정밀한 선택적 전사가 가능하다는 장점을 갖는다. 하지만 모듈의 제작이 어렵고, 자성층 증착/제거 등 전사 공정이 복잡하며, 전자기력이 전사하고자 하는 반도체/전자 소자에 영향을 줄 수 있다는 문제점이 있다 [4,24].

마이크로 진공 전사(micro-vacuum assisted selective transfer, μ VAST)는 진공 모듈 장치를 기반으로 마이크로 진공상태의 흡입력을 조절하여 소자를 이동시키는 방

안이다. 본 연구에서는 미세한 소자를 진공 전사하기 위해 유리 기판에 레이저 유도 식각(laser-induced etching, LIE) 기술을 이용해 제작한 진공 제어 모듈(vacuum control-lab-le module, VCM)을 이용하였다. 진공 모듈은 LIE기반 20 μ m 홀이 있는 유기 기판과 하드 폴리디메틸실록산(h-PDMS) 마이크로 채널(μ -channel)을 연결하여 제작된다. 이러한 진공 모듈 장치는 내부의 압력 변화 차이($P_{\mu\text{-hole}} < P_{\text{atm}}$)에 의해 발생한 진공의 힘으로 소자를 표면에 부착할 수 있었고, 리시버 기판 위에서 모듈의 압력을 상압으로 바꿔 줌으로써 간단하게 전사가 가능했다. 이 전사 기술은 그림 2(f)와 같이, 본 전사 공정을 이용하면 다양한 형태, 크기, 소재의 반도체 소자 칩 전사가 가능했으며, 이를 통해 이중 집적 반도체를 구현할 수 있었다. 또한 선택 전사가 가능하여 제조 과정에 있어 우수한 정밀도로 소자를 정확히 배치할 수 있으며, 이방성 전도 필름이나 화학적 식각 용액을 사용하지 않고 오로지 진공을 기반으로 전

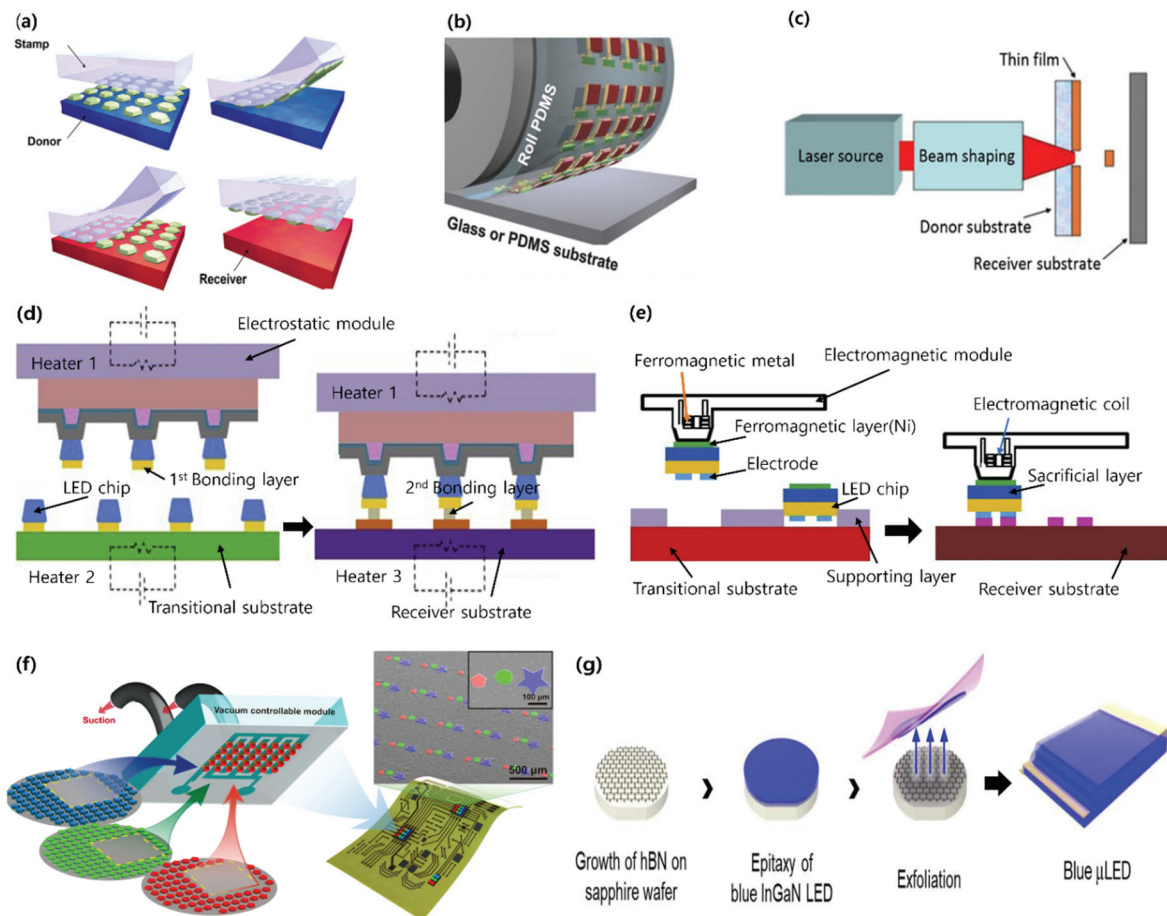


Fig. 2. Schematic image of (a) stamping-based transfer process by using PDMS elastomer, (b) elastomer-based roll-to-roll transfer process, (c) laser lift-off (LLO) process, (d) electrostatic transfer process, (e) electromagnetic module based-transfer process, (f) micro-vacuum assisted selective transfer, and (g) 2D layer-based-transfer process.

사하기에 소자의 손상이나 변형을 방지할 수 있다는 장점이 있다 [4,15].

2차원 물질 레이어 기반 전사는 기계적 힘을 이용하여 웨이퍼 크기의 대면적 박막 전사가 가능한 새로운 전사 방법이다 [5]. 공정은 다음과 같이 진행된다 [그림 2(g)]. 그래핀(graphene), 육방정계 질화 붕소(hexagonal-boron nitride, h-BN)와 같은 2차원 물질을 도너 기판에 성장시키고, 그 상부에 반도체 소재를 제작한 뒤, 그 표면에 강한 스트레스를 갖는 재료인 Ni를 증착시킨다. Ni에서 유도된 스트레스는 상대적으로 접착력이 낮은 2차원 물질/반도체 소재의 계면에서의 박리를 발생시키며, 도너 기판에서 떨어진 박막은 손쉽게 리시버 기판으로 전사된다. 2차원 물질은 원자 1~3층의 구조로 얇은 두께 덕분에, 상부에 고성능 단결정 반도체 소재를 성장시킬 수 있게 해주며, 기존 헤테로 에피택시(heteroepitaxy)나 레이저 리프트 오프 공정과는 달리 격자 불일치가 발생하지 않는다는 장점을 갖는다. 이러한 방식을 사용하게 되면 고성능 RGB μ LED를 손쉽게 단일기판으로 전사할 수 있게 된다. 2DLT 기술은

기판에 손상 없이 반도체/전자 소자를 도너 기판으로부터 분리시킬 수 있으므로 기판 재사용이 가능하고, 대면적 웨이퍼 스케일로, 수 초의 빠른 공정을 이용하여 전사하기 때문에 공정 원가를 절감할 수 있다는 장점을 갖는다.

2.2 화학적 전사

화학적 전사 방식은 반도체 소재가 성장되었거나 소자가 형성된 기판을 특정용액에 담가, 원치 않는 소재를 화학적 제거함으로써 소자를 프리스탠딩(free-standing)한 상태로 만들고 리시버 기판으로 전사하는 방식을 말한다. 가장 먼저, 에피택셜 리프트 오프(epitaxial lift-off, ELO)는 도너 기판과 소자 사이에 위치한 희생층만을 선택적으로 식각하여 박막 소자를 분리해 내는 전사 기술이다. 이러한 기술은 기존 물리적 전사 공정에 비해 매우 단순하며, 고가의 레이저나 전기적 모듈 장치가 필요하지 않고 화학적 용액으로 처리하기 때문에 비교적 저렴한 비용으로 전사가 가능하다는 장점을 갖지만, 불화수소와 같은 화학적 식각 용

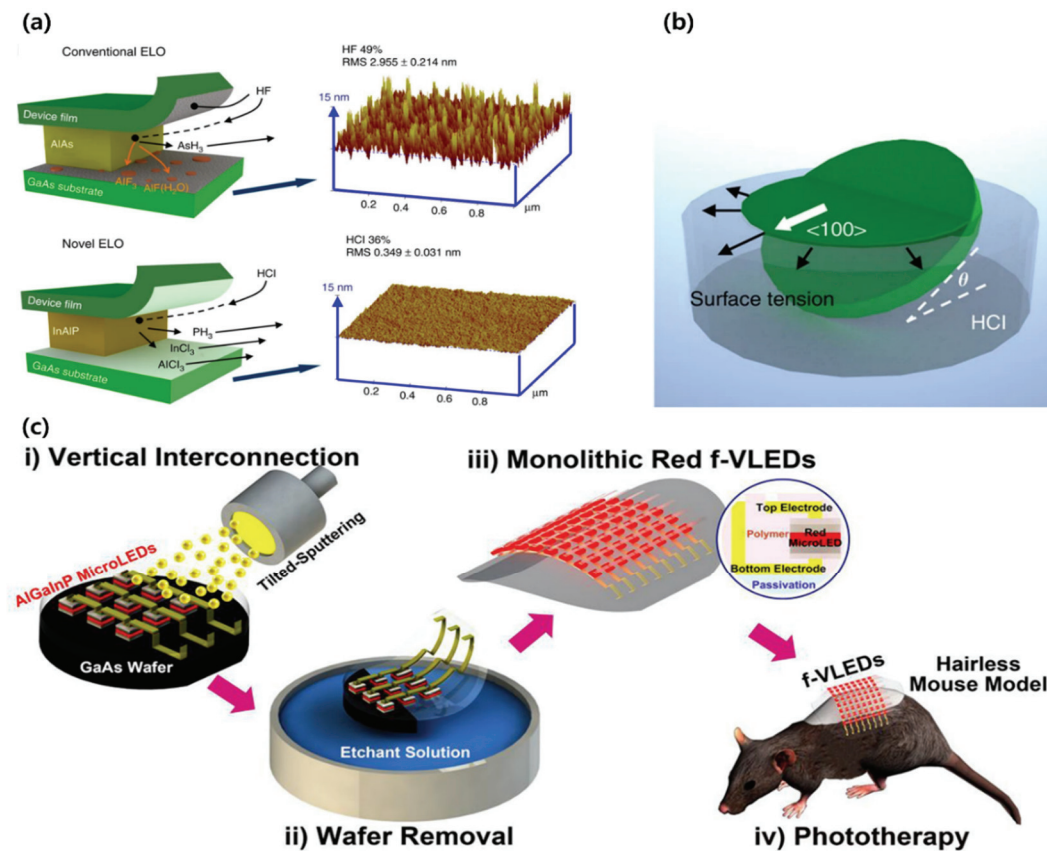


Fig. 3. Fabrication schematic of (a) epitaxial lift-off (ELO) process, (b) surface tension assisted epitaxial lift-off (STA-ELO), and (c) chemical etching transfer for flexible vertical μ LEDs.

액을 사용 시, 식각 후 반응 잔류물이 남아 있으며 전사 후 도너 기판 표면의 거칠기가 나빠진다. 그림 3(a)는 희생층 식각에 불화수소와 염산을 각각 사용 후 기판 표면의 거칠기를 비교한 이미지를 보여준다 [19]. 하지만 이러한 공정 기술은 식각 용액의 확산이 오래 걸리는 까닭에 공정 속도가 매우 느리고, 수율이 낮다는 단점이 있으며, 과한 식각 처리로 인해 원하지 않는 영역까지 손상되어 소자 성능 부분에 영향을 줄 수 있다. 이에 실제 반도체/전자 소자의 상업화에는 적용이 어려울 것으로 예측된다. 그림 3(b)는 표면 장력을 기반으로 에피택셜 리프트 오프(surface tension assisted epitaxial lift off, STA-ELO)를 진행하는 모습을 보여준다. 포토레지스트(photoresist, PR)로 코팅된 웨이퍼 기판을 염산 용액 표면에 1~20°의 각도로 비스듬히 기울여 식각 과정을 최적화하였다. 웨이퍼 기판으로 사용된 GaAs의 표면은 염산 용액에서 소수성을 띠며, 이로 인해 발생한 표면 장력에 의해 박막 소자가 스스로 기판으로부터 박리된다. 박막 소자는 용액 표면에 떠 있게 되고, 표면 장력은 소자를 평평하게 하여 식각을 보조하게 되는데, 본 공정은 기존 ELO 공정보다 효율적으로 처리량을 향상시킬 수 있어 대량 생산을 촉진하는 수단으로 작용될 수 있다 [16].

그림 3(c)는 기판을 완전히 제거하는 식각 전사 방식으

로, 고성능의 유연 적색 수직형 μ LED를 제조하는 공정 개략도이다. 이 전사 방식은 기판에서 μ LED와 같은 반도체 소자 하부의 도너 기판을 완전히 제거하고, 박리된 소자만을 다른 기판의 표면에 전사하는 기술이다. GaAs 기판 상에 유기금속 화학 기상 증착(metal organic vapor chemical vapor deposition, MOCVD) 방법을 이용해 AlGaInP의 LED층을 성장시킨 후, 반도체 공정을 통해 μ LED 어레이를 형성한다. 소자 주위에 고분자 에폭시 물질로 코팅하여 절연층을 만들어주는데, 이 층은 손상이나 오염으로부터 소자를 보호하는 역할을 한다. 이후 과산화수소(H_2O_2 , 13 wt%)와 구연산($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, 30 wt%)의 혼합용액을 사용하여, GaAs 기판을 완전히 제거하는 습식 식각(wet-etching) 전사를 통해 소자가 독립적으로 존재할 수 있게 한다 [17]. 본 기술은 선택적 식각을 통해 필요하지 않은 기판을 정밀하게 제거가 가능하며, 필요한 소자 어레이만 리시버 기판에 구현할 수 있기에 공정이 매우 간단하고 생산 시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 다만, 화학적 식각은 정밀한 제어가 필요한데, 사용된 화학 용액이 상부의 반도체/전자 소자에 영향을 주지 않도록 주의가 필요하다. 또한 이러한 식각 전사 기술은 GaAs와 같은 특정한 웨이퍼 기판으로 한정되어 사용된다는 점에서 반도체 소자 제조 공정의 사용에 일부 제한이 있다.

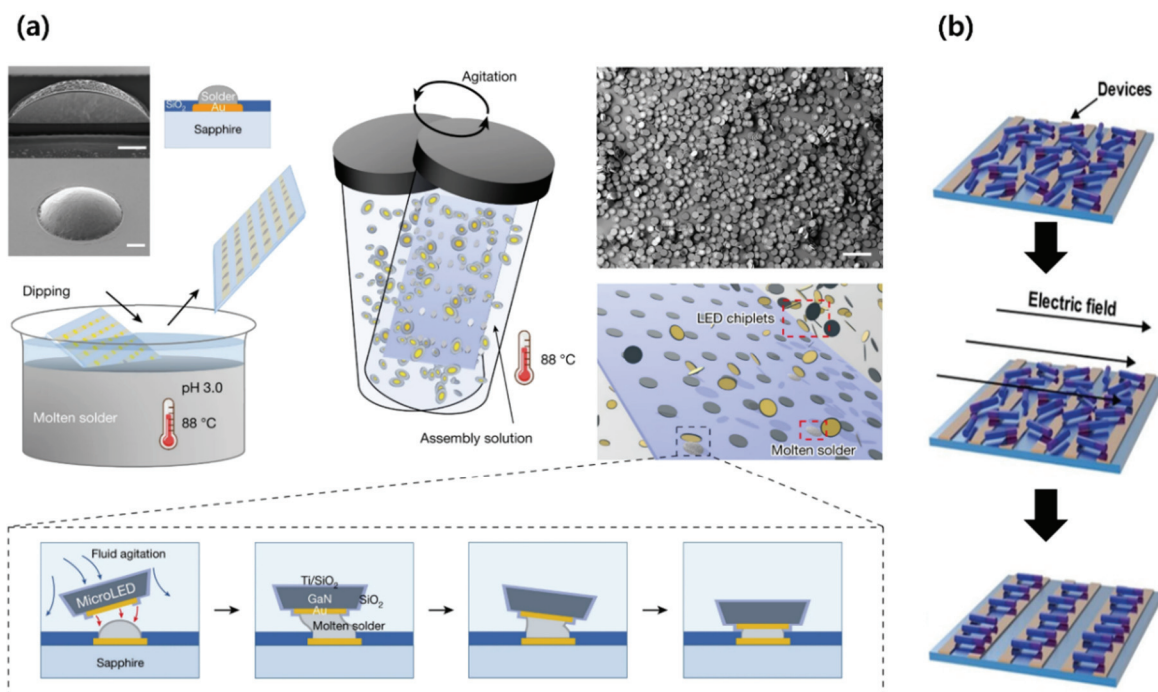


Fig. 4. Process illustration of (a) self-assembly transfer process and (b) electric field based self-assembly transfer process.

Table 1. Summary of features of thin film transfer technologies.

Transfer category	Transfer yield (%)	Device performance	Advantages	Disadvantages	Reference
Physical transfer	High transfer yield (99.99%)	- Transfer rate: 7 million h ⁻¹ - Scalability: High	- Low cost	- Deformation and wear of elastic bodies	[10, 24]
			- Repeated tasks are necessary because of high durability of the materials.	- Low transfer precision	
	High transfer yield (99.9%)	- Transfer rate: 36 million h ⁻¹ - Scalability: Moderate	- Large-scale transfer process	- Difficulties with large- area transfer	[8, 10]
			- Reduce processing time and costs	- Deformation and wear of elastic bodies	
Chemical transfer	Transfer yield (90%)	- Transfer rate: 100 million h ⁻¹ - Scalability: Moderate	- Selective partial transfer	- Low transfer precision	[10, 13, 24]
			- Semiconductor device alignment work	- Roughness of the device's peeling surface	
	Transfer yield (90%)	- Scalability: Low	- Fast large-area transfer	- Use of expensive equipment	[24]
			- Selective partial transfer	- Limited substrate utilization	
Self-assembly transfer	Transfer yield (90%)	- Scalability: Low	- Semiconductor device alignment work	- Use of expensive equipment	[10, 13, 24]
			- Minimize substrate damage	- Additional processes are required to prevent device damage from high voltage	
	High transfer yield (98.06%)	-	- Selective partial transfer	- Difficulties with large- area transfer	[15]
			- Semiconductor device alignment work	- High technical requirements	
Chemical transfer	High transfer yield	-	- Minimize damage and deformation of devices	- Complex transfer process	[24]
			- Minimize substrate damage	- Concerns about damage to the device	
	Transfer yield	-	- Easy to reuse substrate	- A ferromagnetic layer is required	[5]
			- Fast processing speed	-	
Self-assembly transfer	Transfer yield	-	- Low cost	- Roughness of the substrate peeling surface	[16]
			- Simple process	- Low processing speed	
	Transfer yield	-	- Fast transfer speed	- Low transfer yield	[16]
			- Promote mass production	- Concerns about device damage by etching	
Self-assembly transfer	Transfer yield	-	- Low cost	- Roughness of the substrate peeling surface	[16]
			- Simple process	- Concerns about device damage by etching	
	Transfer yield	-	- Simple process	- Low transfer yield	[17]
			- Low cost	- Concerns about device damage by etching	
Self-assembly transfer	High transfer yield (99.3-99.8%)	- Transfer rate: 50 million h ⁻¹ Scalability: Moderate	- Selective etching for precise substrate removal	- Limited use of substrate materials	[10, 23]
			- Semiconductor device alignment work	- Requires an additional process for device alignment	
	High transfer yield	- Scalability: Low	- Fast transfer speed	- Deterioration of device characteristics due to electric fields	[10]
			- High transfer yield	- Concerns about reverse semiconductor device alignment	

2.3 자기조립 전사

자기조립 전사(self-assembly transfer) 방식은 한 기판에서 미세한 소자를 다른 기판으로 전사하는 데 있어, 액체 상에 분산되어 있는 소자가 리시버 기판 상에서 스스로 정렬되도록 설계하는 전사 공정 기술의 한 종류이다. 유체 기반 자기조립(fluidic self-assembly, FSA) 전사 방식은 모기판에서 박리된 마이크로 크기의 반도체/전자 소자가 고점도의 풀록사며 고분자 용액에 분산되고, 이를 리시버 기판에 코팅하여 미세한 소자가 스스로 조립되도록 하는 전사 기술이다. 자기조립 공정은 그림 4(a)와 같이, 정확한 전사를 위해 도너 기판과 리시버 기판 모두에 공정이 수행된다. 리시버 기판으로 사용되는 사파이어 기판에는 Cr, Pt, Au를 순차적으로 증착하고, 그 상부에 SiO₂ 절연층을 패터닝하여 원하는 위치에만 Au이 드러나게 한다. 이후, 반도체 소자 부착을 위해 저융점 솔더를 사용하여 Bi (32.5%), Sn (16.5%), In (51%) 합금 기반의 솔더 범프를 형성해 준다. 풀록사며 용액에 수많은 마이크로 크기의 소자를 넣고, 용액을 가열하여 소자가 용액에 일정하게 분산되도록 한다. 가열된 용액에 솔더 범프가 있는 기판을 용액에 침지하고, 태플론 뚜껑으로 밀봉 후 용액과 함께 기판을 교반하여 소자 칩이 솔더 범프에 자기조립 되도록 하는 전사 공정 방식이다 [18,23]. 이 기술의 장점은 높은 정밀도로 소자 칩을 기판에 정렬하고 스스로 조립할 수 있으며, 수많은 소자를 단시간에 조립 전사할 수 있어 대규모 생산에 적합하다. 또한 높은 조립 수율(99.88%)을 달성할 수 있어 제조 비용을 절감하고 효율성을 높일 수 있지만, 소자의 정확한 정렬을 위해 복잡한 추가 공정이 필요하다는 단점을 갖는다.

전기장을 이용한 자기조립 전사(electric field self-assembly transfer) 방식은 아주 작은 입자들을 원하는 위치에 배열하는 유전 영동(dielectrophoretic, DEP) 기술을 바탕으로, 전기장에 의해 정렬되는 반도체 소자가 기판 상에 스스로 조립 전사되는 기술이다 [10]. 이 기술은 다 음과 같이 진행된다. 폴리스티렌 나노구체를 하드마스크로 사용하여 InGaN 기판에 나노로드 LED를 제작한 뒤, 이를 기판에서 분리하여 교차 전극(interdigitated electrodes, IDE) 패턴이 있는 유리 기판 상에 정렬시킨다. 나노로드 LED 상에 아세톤을 떨어뜨린 뒤, 전기장을 가하여 나노로드들이 전극 사이에 정확히 정렬되도록 한다. 정렬된 나노로드 LED는 Au를 통해 IDE와 전기/기계적으로 연결되며, 급속 열처리(rapid thermal annealing, RTA) 과정을 이용하여 연결이 강화된다 [그림 4(b)].

본 전기장 기반 자기조립 전사 방식은 유전영동력을 이

용하여 정확하게 반도체 소자를 조립하고 정렬할 수 있는 높은 정밀도를 보이며, 다수의 소자를 자기 조립할 수 있어 처리량이 높고 대량 생산에 유리하다. 하지만 외부에서 인가하는 강한 전기장에 의해 반도체/전자소자의 특성이 저하될 수 있고, 일부 소자가 올바른 방향으로 정렬되지 않고 역방향으로 정렬될 수 있다는 문제점을 갖는다. 표 1은 다양한 무기 박막 전사 기술에 대한 특징을 정리한 개략도이다.

3. 전사 기술 적용 분야

앞에서 기술한 고성능 무기물 박막의 전사공정들이 개발됨에 따라, 혁신적인 품팩터를 갖는 유연, 신축, 더 나아가 웨어러블 반도체/전자 소자 분야가 전 세계적으로 급격하게 발전되었다.

특히, 최근에는 이종 박막소재/소자를 한 개의 기판으로 전사하여 통합함으로써, 단일 반도체/전자 소자 시스템 내에 다양한 기능을 부여할 수 있게 되었고, 이는 의료용 웨어러블 기기, 유연 박막 배터리, 트랜지스터, 메모리, 디스플레이 등의 차세대 전자 기기의 응용 분야에 혁신적인 발전을 가져왔다. 웨어러블 소자는 사용자의 건강 상태 모니터링부터 개인 맞춤형 치료까지 다양한 의료적 응용 가능성을 보여주었다 [1]. 그림 5(a)는 무기물 소재 기반의 공정을 통해 제작한 박막 μ LED를 응용하여 제작한 옵토제네틱스(optogenetics)용 유연 광 자극 장치이다. 먼저, 살아있는 생쥐의 대뇌피질 신경세포의 일부를 유전적을 변형시키고, 마취된 쥐의 두개골에 얇은 슬릿을 만들어 주어 유연한 μ LED를 안으로 밀어 넣는다. 이렇게 삽입된 소자는 두개골과 대뇌 사이의 얇은 공간으로 들어간 뒤, 대뇌 피질의 표면에 안정적으로 부착된다. 이를 통해 μ LED가 대뇌 피질을 자극할 수 있다. 이렇게 개발된 생체 의료용 유연 박막 μ LED는 얇은 두께(15 μ m), 높은 광 출력 밀도(25~30 mW/mm²), 장기 수명(>12년) 등의 뛰어난 성능을 보였으며, 적색 빛을 대뇌 피질을 자극하여 생쥐 수면의 움직임을 조절할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 옵토제네틱스용 유연 μ LED는 뇌 조직 손상을 최소화하면서 빛의 대뇌 피질 자극이 가능하고, 복잡한 동물 행동도 제어가 가능할 것을 보여 그 활용성이 무궁무진하다 [4,19,20].

반도체 시스템을 구성하는 요소로서 전력원은 빼놓을 수 없는 소자이다. 특히, 다양한 전력소자 중에서도 리튬 이온 배터리는 소자의 유연화가 어려워, 유연/웨어러블 전자 소자 시스템에 적용이 힘들었다. 하지만 층상구조를 갖는 운모 기판 상에 고체 박막 배터리를 제작하고, 이를 3M사

에서 제조한 스카치 테이프의 기계적 힘을 이용하여 박리함으로써 손쉽게 유연 소자를 구현할 수 있었다 [그림 5(b)]. 이렇게 구현된 고성능의 유연 리튬 이온 배터리는 구부러진 상태에서도 높은 에너지 밀도($2.2 \times 10^3 \mu \text{Wh/cm}^3$)와 전류 밀도($46.5 \mu \text{A/cm}^2$)를 유지할 수 있어 유연 전자 소자 시스템 발전에 기여할 수 있을 것으로 보인다 [21].

차세대 디스플레이를 구현하기 위해서는 광원뿐만 아니라 그들을 안정적으로 구동시킬 수 있는 백플레인(backplane) 구동회로가 필수적이다. 현재 디스플레이 분야에서 주로 사용하고 있는 구동방식은 능동형 매트릭스(active matrix, AM) 방식으로, 보통 2개의 박막형 트랜지스터(thin film transistor, TFT)와 1개의 축전기(capacitor)로 구성되는 2T-1C 혹은 1T-1C 구조이다. 여

기서 축전기는 각 광원에 일정한 전류를 인가해 주는 역할, TFT는 원하는 광원만 구동시키기 위한 스위칭 소자의 역할을 하게 되는데, 사용자가 원하는 이미지를 구현하기 위해서는 고성능의 TFT가 필수적이다. 그림 5(c)는 롤 기반 스탬프 전사 공정을 통해 제작된 단결정 실리콘(Si) 박막 트랜지스터를 보여준다. 다양한 TFT용 반도체 소자 중에서도 Si는 기존 CMOS 공정에 적합하고, 상대적으로 저렴한 가격, 훌륭한 특성(이동도: 약 $750 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)을 갖는다 [11]. 앵커로 연결된 Si TFT 어레이는 SOI 기판(Si on insulator) 위에서 제작되고, 하부의 SiO_2 를 제거하여 free-standing한 구조를 만들어 준다. 이 Si TFT 어레이는 롤 형태의 PDMS에 부착되어 박리된 뒤, 구불구불한 구조(serpentine structure)의 플라스틱 기판 상으로 전사된다. 이후, 롤 전사 장비의 미세한 정렬을 통해, μLED 소

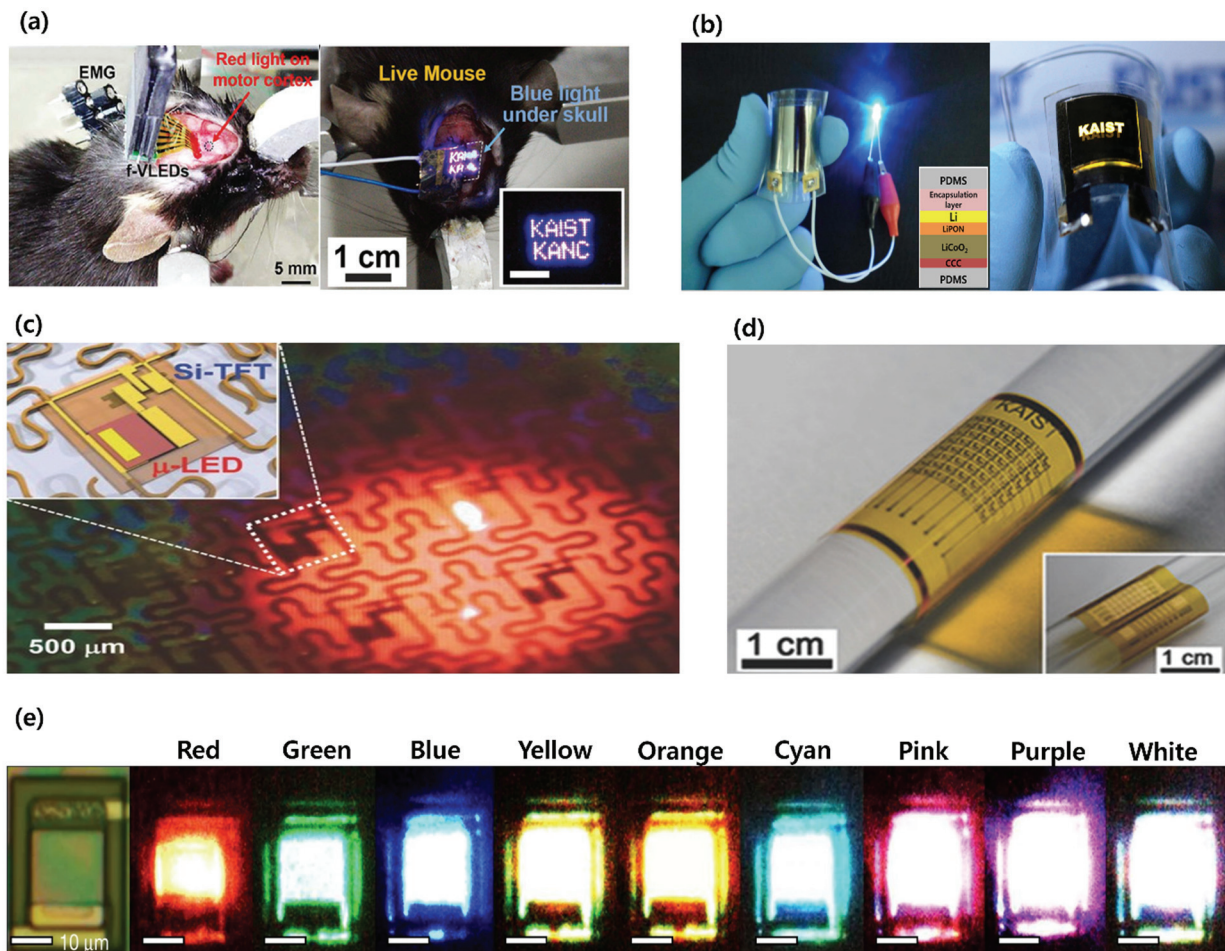


Fig. 5. (a) Flexible red μLEDs for optogenetics applications, (b) photographs of flexible lithium-ion battery under bent state, (c) active-matrix μLED display with red μLED and single crystal Si-TFT on serpentine structured flexible polyimide substrate, (d) optical image of flexible RRAM, and (e) vertically-stacked RGB μLEDs showing multicolor wavelength lighting.

자를 Si TFT 옆에 전사함으로써 1T-1C 구조의 AM μ LED 디스플레이를 구현할 수 있었다.

메모리는 숫자나 문자와 같은 데이터를 전기적 신호로 저장하는 기억장치로서, 전자 소자 시스템에서 빼놓을 수 없는 소자이다. 그중 차세대 메모리 기술 중 하나인 저항 메모리(resistive random-access memory, RRAM)는 빠른 응답성과 낮은 전력 소비, 높은 내구성의 특징을 가지고 있다. 5(d)는 전사 공정을 통해 제작된 유연한 RRAM으로 5 mm의 굽힘 반경을 가진 석영 막대에 유연하게 부착될 수 있음을 보여준다. 이 연구에서 제작된 RRAM은 NOR 타입 배열에서 하나의 트랜지스터-다른 하나의 메모리스터(1T-1M) 시스템 온 플라스틱(SoP)을 시연하여 유연한 RRAM을 형성하였다. 유연한 1T-1M 배열은 5 mm의 굽힘 반경을 가진 석영 막대에 밀착되어 부착될 수 있으며, RRAM의 박리나 균열 없이 안정적으로 유지되었다 [22]. 이러한 특성은 유연한 메모리 소자가 기계적 안정성과 우수한 기능성을 유지할 수 있으며, 높은 유연성과 함께 메모리 성능을 제공할 수 있었다.

차세대 전자 기기의 중요한 후보로 주목받고 있는 고해상도 디스플레이는 5,100 PPI 이상의 높은 픽셀 밀도를 가진 μ LED 소자를 사용하여 제작할 수 있다. 이러한 고밀도의 μ LED 소자는 고해상도 디스플레이의 핵심 요소로, 선명한 이미지와 뛰어난 색상 표현력을 가능하게 한다. 특히, 그래핀이나 h-BN과 같은 2차원 물질을 기반으로 한 레이저 전사 기술을 활용하여 RGB μ LED를 구현하는 연구가 진행되고 있다. 이 기술은 에피택시와 반도체 이종 집적 기술을 결합하여, 수직으로 중첩된 RGB μ LED를 통해 다채로운 파장의 조명을 구현할 수 있음을 보여주었다. 이러한 기술의 발전은 광범위한 색상 영역과 높은 명암비를 제공함으로써, 사용자에게 선명하고 생동감 넘치는 이미지를 제공할 수 있는 고해상도 AR/VR 디스플레이 구현을 가능하게 한다. 연구 사례에 따르면, 9 μ m의 높이와 4 μ m의 크기를 가진 μ LED를 성공적으로 제작했으며, 이러한 RGB μ LED는 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cd/m²의 범위에서 휘도를 제공하였다. 이는 μ LED 기술이 차세대 디스플레이의 해상도와 밝기 측면에서 매우 좋은 해결책이 될 수 있다. 또한 이 고해상도 디스플레이 기술은 미래의 전자 기기에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서 다룬 이종 집적 반도체 관련 전사 기술들은 차세대 전자 기기의 발전에 있어 핵심적인 역할을 수행하

고 있다. 이 기술은 다양한 재료와 소자를 기존의 제한된 유연/웨어러블 기판 위에 통합함으로써, 소자의 성능 개선, 제조 공정의 유연성 증대, 그리고 새로운 기능의 실현이라는 측면에서 큰 잠재력을 보여주었다. 특히, 유연한 광학소자 분야에서는, LLO 공정을 통해 구현된 유연 μ LED 소자의 두께가 15 μ m에 불과하면서도 ~ 30 mW/mm²에 이르는 높은 광학적 성능을 보여주었다. 이 결과로 말미암아 μ LED 기반 옵토제네틱 기기가 체내에서 장기간 사용할 수 있으며, 뇌 조직에 최소한의 손상을 가하면서도 정밀한 뇌 자극을 수행할 수 있을 것으로 예측된다. 또한, 기계적 힘으로 유연 기판으로 전사된 고성능의 유연 리튬 이온 배터리는 구부러진 상태에서도 고성능을 보였으며, 롤 기반 스탬프 전사 기술을 기반으로 제작된 박막 Si TFT는 μ LED와 통합되어 디스플레이 시스템화될 수 있었다. 이러한 결과들은 무기물 박막의 다양한 전사 공정들이 유연한 전자 소자 시스템의 발전에 크게 기여할 수 있으며, 향후 다양한 휴대용 전자 기기에 효과적으로 적용될 수 있음을 시사한다. 더 나아가 이러한 기술적 진보는 의료, 에너지, 정보 기술 및 통신 등 다양한 분야에서 혁신적인 변화를 가져올 것이며, 향후 지속적인 연구와 개발을 통해 더욱 발전될 가능성을 보여준다. 특히, μ LED 제조를 위한 전사 공정이 광범위하게 연구되어 왔지만, LED소자 칩의 손상 최소화, 소자 정렬 기술 개선의 필요성, 기판 재사용의 한계 등의 문제로 인해 현재 상용화에 어려움이 있다. 더욱이, 전사 기법에 따라 소자 물성에 큰 영향을 주기도 하는데, 그중 전사 온도에 따라 소자의 결함이 발생할 수 있다. 예를 들어 GaN μ LED의 경우, 전사 후 다양한 온도에서 전기적/광학적 특성이 바뀌므로 LED의 결함 밀도나 발광 효율에 미치는 영향을 분석하여 이를 최적화하는 방안을 고안할 필요가 있다 [26]. 또한 소자를 제작하기 위해서는 전사 후 기판과 소자의 호환성을 확보하고, 잘못 전사된 소자를 수정하기 위한 공정 계획이 개발되어야 한다 [2]. 이에 최근에 소자에 손상 없이, 기판을 재사용하는 방법, 소자 성능 향상을 위한 기판 표면 화학 처리, 접착제를 이용한 전사 기술 개발이 활발히 진행되는 추세이다. 이러한 방안은 공정의 비용을 낮추며, 외적 요인으로부터 보다 안정적으로 소자를 제작하고 분리시킬 수 있는 것으로 기대된다 [25]. 앞으로 이종 집적 반도체 기술은 차세대 전자 기기의 성능 한계를 극복하고, 새로운 기능과 응용 분야를 창출하는데 결정적인 역할을 하여, 현대인의 일상생활, 산업 활동, 사용자 간의 정보 전달에 긍정적인 영향을 미치고 지속 가능한 기술 혁신의 새로운 지평을 가져올 것으로 기대된다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIT) (NRF-2022R1A4A3033320 and RS-2023-00278906), and the Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT, 2023).

ORCID

Han Eol Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2866-5947>

REFERENCES

- [1] H. E. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 221 (2021).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.4.221>
- [2] J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 563 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.4>
- [3] Y. G. You, Y. J. Song, and D. W. Kim, *J. Korean Contents Assoc.*, **9**, 23 (2009).
doi: <https://doi.org/10.5392/jkca.2009.9.1.023>
- [4] H. E. Lee, J. H. Shin, J. H. Park, S. K. Hong, S. H. Park, S. H. Lee, J. H. Lee, I. S. Kang, and K. J. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1808075 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201808075>
- [5] J. Shin, H. Kim, S. Sundaram, J. Jeong, B. I. Park, C. S. Chang, J. Choi, T. Kim, M. Saravanapavanantham, K. Lu, S. Kim, J. M. Suh, K. S. Kim, M. K. Song, Y. Liu, K. Qiao, J. H. Kim, Y. Kim, J. H. Kang, J. Kim, D. Lee, J. Lee, J. S. Kim, H. E. Lee, H. Yeon, H. S. Kum, S. H. Bae, V. Bulovic, K. J. Yu, K. Lee, K. Chung, Y. J. Hong, A. Ougazzaden, and J. Kim, *Nature*, **614**, 81 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05612-1>
- [6] D. Chen, Y. C. Chen, G. Zeng, D. W. Zhang, and H. L. Lu, *Research*, **6**, 0047 (2023).
doi: <https://doi.org/10.34133/research.0047>
- [7] C. Choi, H. Kim, J. H. Kang, M. K. Song, H. Yeon, C. S. Chang, J. M. Suh, J. Shin, K. Lu, B. I. Park, Y. Kim, H. E. Lee, D. Lee, J. Lee, I. Jang, S. Pang, K. Ryu, S. H. Bae, Y. Nie, H. S. Kum, M. C. Park, S. Lee, H. J. Kim, H. Wu, P. Lin, and J. Kim, *Nat. Electron.*, **5**, 386 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00778-y>
- [8] 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>
- [9] Y. W. Ha, G. H. Kim, and D. C. Lim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 36 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.1.4>
- [10] J. E. Ryu, S. Park, Y. Park, S. W. Ryu, K. Hwang, and H. W. Jang, *Adv. Mater.*, **35**, 2204947 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202204947>
- [11] P. J. Parbrook, B. Corbett, J. Han, T. Y. Seong, and H. Amano, *Laser Photonics Rev.*, **15**, 2000133 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.202000133>
- [12] J. C. Heo, J. E. Kim, D. G. Lee, Y. S. Hwang, Y. M. Woo, H. E. Lee, and J. H. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 286 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.12>
- [13] D. J. Joe, S. Kim, J. H. Park, D. Y. Park, H. E. Lee, T. H. Im, I. Choi, R. S. Ruoff, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **29**, 1606586 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201606586>
- [14] X. Zhou, P. Tian, C. W. Sher, J. Wu, H. Liu, R. Liu, and H. C. Kuo, *Prog. Quantum Electron.*, **71**, 100263 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100263>
- [15] S. H. Park, T. J. Kim, H. E. Lee, B. S. Ma, M. Song, M. S. Kim, J. H. Shin, S. H. Lee, J. H. Lee, Y. B. Kim, K. Y. Nam, H. J. Park, T. S. Kim, and K. J. Lee, *Nat. Commun.*, **14**, 7744 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43342-8>
- [16] C. W. Cheng, K. T. Shiu, N. Li, S. J. Han, L. Shi, and D. K. Sadana, *Nat. Commun.*, **4**, 1577 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms2583>
- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] H. E. Lee, J. H. Choi, S. H. Lee, M. Jeong, J. H. Shin, D. J. Joe, D. H. Kim, C. W. Kim, J. H. Park, J. H. Lee, D. Kim, C. S. Shin, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **30**, 1800649 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201800649>
- [20] 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>
- [21] M. Koo, K. I. Park, S. H. Lee, M. Suh, D. Y. Jeon, J. W. Choi, K. Kang, and K. J. Lee, *Nano Lett.*, **12**, 4810 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl302254v>
- [22] H. E. Lee, J. H. Park, T. J. Kim, D. Im, J. H. Shin, D. H. Kim, B. Mohammad, I. S. Kang, and K. J. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1801690 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201801690>
- [23] S. C. Park, J. Fang, S. Biswas, M. Mozafari, T. Stauden, and H. O. Jacobs, *Adv. Mater.*, **26**, 5942 (2014).

- doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201401573>
- [24] Z. Liu, C. H. Lin, B. R. Hyun, C. W. Sher, Z. Lv, B. Luo, F. Jiang, T. Wu, C. H. Ho, H. C. Kuo, and J. H. He, *Light: Sci. Appl.*, **9**, 83 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0268-1>
- [25] C. Linghu, S. Zhang, C. Wang, and J. Song, *npj Flexible Electron.*, **2**, 26 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-018-0037-x>
- [26] G. Shen, X. Da, X. Guo, Y. Zhu, and N. Niu, *J. Lumin.*, **127**, 441 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2007.02.00>