

실리콘 박막 마이크로셀 태양전지 제조기술

Fabrication of Microscale Silicon Thin Film Solar Cells

남지윤 · 조성진 | Jiyoong Nam · Sungjin Jo

School of Energy Engineering, Kyungpook National University, Daehak-ro 80,
Buk-gu, Daegu 41566, Korea
E-mail: sungjin@knu.ac.kr

1. 서론

화석에너지의 고갈과 이산화탄소를 비롯한 온실 가스 배출에 따른 지구온난화는 친환경, 신재생 에너지 개발의 필요성을 야기하였으며, 전 세계적으로 그린에너지에 대한 다양한 연구 및 개발을 촉진하였다. 그 중 태양광 발전은 비용 및 사용량의 제한이 없는 태양빛을 에너지원으로 사용하기 때문에 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 태양광 발전에 사용되는 태양전지의 경우 기본적으로 n-형 반도체와 p-형 반도체를 접합한 구조를 가지고 있는데, 빛 에너지를 흡수하여, 전기에너지의 근원인 전하(전자, 정공)를 생성하고, 반도체 내부에서 전하를 분리한 다음 최종적으로 전하를 수집하여 전기를 생산하는 원리로 구동이 된다. 태양전지는 사용하는 소재에 따라 유기물 태양전지와 무기물 태양전지로 구분할 수 있으며, 이용분야 또는 태양전지 구조에 따른 분류로도 구분할 수 있다.¹ 이러한 태양전지는 최근 IT 기술의 발달에 따라 경량화 및 소형화된 전자소자에 적용하기 위해 다양한 형태로의 변화가 요구되고 있다.

반도체 집약 기술의 발달과 전자소자의 경량화 및 소형화는 웨어러블 전자기기(wearable electronics) 및 생체친화적 소자(bio-compatible devices) 등의 개발을 가속화시켰다. 웨어러블 전자기기 및 생체친화적 소자는 기본적으로 곡선으로 이루어진 표면과 신축성 있는 표면 위에서 구현이 가능하여야 하는데, 이러한 전자소자에 전력을 공급해 줄 전원의 경우도 신축성 및 유연성이 요구된다. 따라서 차세대 전자소자에 적용 가능한 신축성 전원 및 초소형 전원 제작 기술이 필요한 실정이다. 또한 생체친화적 소자에 주로 사용되는 압전소자, 마이크로 펌프 등과 같은 미세전자소자의 경우 전원의 크기도 작아야 하지만, 구동 전압 또한 수십에서 수백볼트(V)가 필요하기 때문에 원하는 구동전압으로의 승압을 위한 기술도 필요하다.

본 기고 글에서는 마이크로 패터닝(micro-patterning) 기술을 이용하여 차세대 전자소자에 적용 가능한 마이크로셀 실리콘 박막 태양전지 제작 기술을 소개하고자 한다. 마이크로 패터닝 기술의 경우 마이크로미터 단위의 원하는 형태로 태양전지를 제작하여 외부 응력에 의한 변형 시 소자에 기계적 응력을 최소화 하기 위한 구조로 구현이 가능하다. 또한 단일 태양전지의 개방전압 이상의 전압 출력을 위한 직렬 연결 시에 마이크로 미터 사이즈의 태양전지는 전체 소자의 집약도를 높여서 미세전자기기에 사용 가능한 소형 고전압 전원으로 구현이

Author



남지윤

2012
2013–현재

경북대학교 신소재공학부 (학사)
경북대학교 에너지공학부
(석박사 통합과정)



조성진

2003
2005
2008
2008–2011
2011–현재

연세대학교 신소재공학과 (학사)
연세대학교 신소재공학과 (석사)
연세대학교 신소재공학과 (박사)
University Illinois at Urbana-Champaign (Post-Doc.)
경북대학교 에너지공학부 조교수

가능하다. 실리콘 박막 태양전지는 얇은 박막으로 제작이 가능하여 가볍고 소형화가 가능하기 때문에 차세대 전원으로 주목 받고 있다.

2. 본론

2.1 실리콘 박막 태양전지 제작 공정

실리콘 박막 태양전지는 플라즈마 화학 기상 증착법 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)으로 증착하여 제작할 수 있는데, 일반적으로 화학 기상 증착법을 이용하여 실리콘 원소를 가스 상태의 원재료 물질에서 분리해서 얻어내는 방식으로 제작한다.²

그림 1은 본 글에서 다룬 실리콘 박막 태양전지의 기본 구조 및 단면 이미지를 보여주고 있다. 세척된 일반 유리 기판 위에 스퍼터링(sputtering) 공정으로 알루미늄이 도핑 된 산화아연 층(Al doped ZnO, AZO)을 300 °C에서 500 nm 두께로 증착하여 하부 전극으로 사용한다. 그 이후 플라즈마 화학 기상 증착법으로 p-형, 진성, n-형 실리콘 박막층(amorphous silicon, a-Si)을 250 °C에서 13 nm, 460 nm, 25.7 nm 두께로 순서대로 증착한다. 그리고 다시 스퍼터링 공정으로 알루미늄이 도핑 된 산화아연 층을 상부 전극으로 사용하기 위해 300 °C에서 300 nm 두께로 증착한다. 앞서 언급한 바와 같이 이 실리콘 박막 층은 약 500 nm 두께로 매우 얇게 증착되었는데, 가시광 영역에서 매우 높은 흡수계수를 가지고 있어서 1 μm 두께로도 태양광의 90%를 흡수할 수 있기 때문에 가능하다.² 또한 실리콘 박막 태양전지의 특성을 좌우하는 하부 전극, 실리콘 박막, 상부 전극의 세 가지 층은 클러스터 (cluster) 시스템을 이용하여 고 진공 상태에서 한번에 (*in-situ*) 증착이 진행되었다. 알루미늄(Al) 층은 후면 전극으로 사용하기 위하여, 열증착공정(thermal evaporation)을 이용하여 증착하였다.³

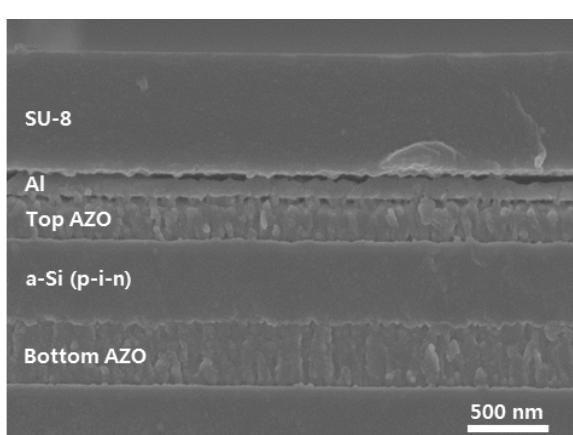


그림 1. 실리콘 박막 태양전지의 단면 주사전자현미경 (scanning electron microscopic, SEM) 이미지.

2.2 실리콘 박막 마이크로셀 패터닝 기술

실리콘 박막 태양전지를 마이크로미터 단위의 태양전지로 패터닝하여 제작하기 위하여 포토리소그래피(photolithography) 공정과 다양한 식각(etching) 공정이 사용되었다. 그림 2에서 클러스터 시스템으로 유리 기판 위에 증착된 실리콘 박막 층을 원하는 형태의 마이크로셀로 패터닝 하는 공정을 모식도와 현미경 이미지로 나타내었다. 그림 2a 구조와 같이 증착된 기판에 positive PR(photoresist) 용액을 사용하여 상부 산화아연층을 식각하기 위한 마스크를 패터닝하고, 0.2% 염산(HCl) 용액으로 산화아연층을 습식식각(wet etching) 한다(그림 2b). 그리고 식각된 상부 산화아연층을 다시 식각 마스크로 사용하여 실리콘 박막층을 건식식각방식(reactive ion etching, RIE)으로 식각한다(그림 2c). RIE 공정은 대표적인 건식식각(dry etching) 공정으로 식각용 가스를 플라즈마 상태로 만든 다음, 상하 전극을 이용하여 방향성을 주어

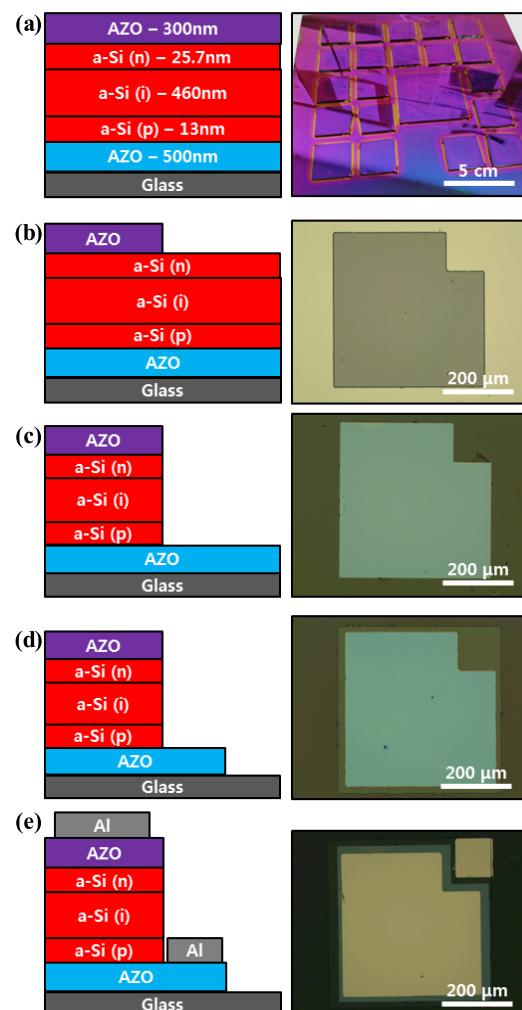


그림 2. 실리콘 박막 태양전지 패터닝 공정: (a) 증착된 실리콘 박막 태양전지 구조 및 표면 사진, (b) 상부 산화아연 전극 습식식각, (c) 실리콘 박막층 건식식각, (d) 하부 산화아연 전극 습식식각, (e) 알루미늄 전극 리프트오프 공정.

식각하는 방식을 말한다. 실리콘 박막층의 경우 시불화탄소 (CF_4) 와 산소(O_2)를 혼합한 플라즈마를 생성하여 건식식각을 진행한다. 그림 2d에서는 앞서 설명한 상부 산화아연층 식각 공정과 동일하게 하부 산화아연층을 positive PR 용액을 이용한 포토리소그래피 공정으로 패터닝하고, 0.2% 염산 용액으로 습식식각한다. 마지막으로 후면 전극으로 사용할 알루미늄을 열증착공정으로 증착하는데, 이 때 리프트오프 (lift-off) 공정을 이용하여 알루미늄 전극을 원하는 모양으로 패터닝 한다. 알루미늄 전극의 경우 일반적인 습식식각 공정으로 패터닝을 진행할 시에 하부의 산화아연 전극과 실리콘 박막 층이 알루미늄 식각용액에 손상을 입을 가능성이 높기 때문에 리프트오프 공정으로 전극을 형성한다.

이러한 패터닝 공정을 응용하면 일반적인 태양전지의 형태뿐만 아니라 다양한 모양에도 적용이 가능하다(그림 3).

2.3 마이크로셀을 이용한 신축성 태양전지

신축성 전자소자의 경우 쉽게 구부리지고, 접히고, 휘어질 수 있으며 외부의 인장응력 혹은 압축응력에 유연하게 반응해 전자소자의 특성에는 영향이 없는 것이 특징이다.^{4,6} 특히, 신축성 태양전지의 경우 웨어러블 전자소자에 필수적인 휴대용 전원으로 사용이 가능하여 주목 받고 있다.^{7,8} 여러 종류의 태양전지 중 유기물 태양전지는 유연한 기계적 성질 때문에 그 동안 신축성 태양전지에 주로 적용되어 왔다.⁹ 하지만, 상대적으로 낮은 태양전지 특성과 장기안정성이 좋지 못하다는 문제가 있다. 반대로 일반적인 무기물 태양전지의 경

우 상대적으로 태양전지 특성은 좋지만, 본질적으로 딱딱하고 유연하지 못한 재료로 제작이 되기 때문에 그 동안 신축성 태양전지에 적용하기가 쉽지 않았다. 무기물 태양전지의 기반 재료에서 야기된 이러한 문제점을 해결하기 위해 현재 대부분의 연구는 새로운 대체 재료를 찾는 것이 아닌, 구조적인 접근 방식에 초점이 맞춰져 있고, 물결 모양(wavy), 구불구불한 형태(serpentine), 섬 구조(stiff island) 등의 신축성 태양전지를 제작하기 위한 구조가 개발되었다.^{10,11} 이러한 구조들을 구현하기 위해서는 원하는 모양으로의 패터닝 공정이 필수적이고, 마이크로미터 단위의 패터닝 기술은 다양한 크기 및 형태의 전자소자에 신축성 전원을 적용하기 위한 기반기술로 요구되고 있다.

실리콘 박막 태양전지의 경우 포토리소그래피 공정과 선택적 식각 공정에 의해 다양한 형태로 마이크로 패터닝이 가능하다. 이러한 장점을 이용하여 마이크로셀 실리콘 박막 태양전지를 외부 응력에 유연하게 반응하며 신축성 있는 구조로 구현하여, 신축성 태양전지를 제작할 수 있다. 그림 4는 앞서 설명한 신축성 태양전지 중 구불구불한 형태를 적용하여 제작한 신축성 실리콘 박막 태양전지이다. 그림 4a와 같이 신축성 기판으로 주로 사용되는 polydimethylsiloxane (PDMS) 기판 위에서도 제작이 가능하며, 주름이 많은 손 등 위에서도 태양전지 제작이 가능하다(그림 4b). 하나의 단일 태양전지 셀의 크기는 $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 정도로 작으며, 전

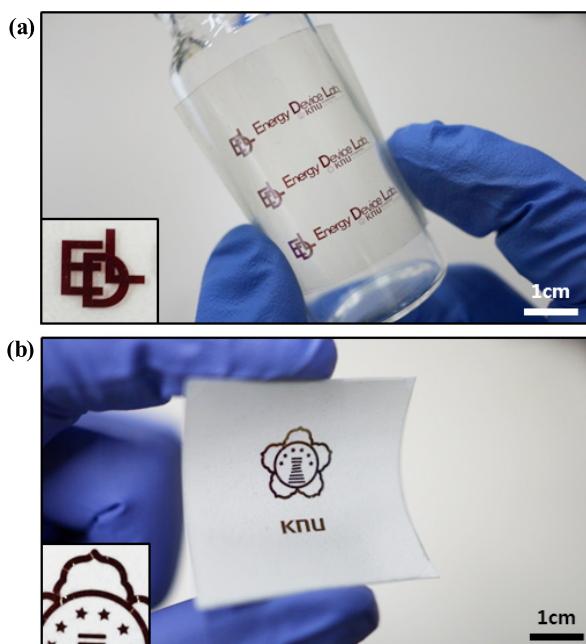


그림 3. 다양한 모양으로 패터닝된 실리콘 박막 태양전지: (a) PET(poly(ethylene terephthalate)) 기판 위에 제작된 실리콘 박막 태양전지, (b) 손 위에 제작된 실리콘 박막 태양전지.

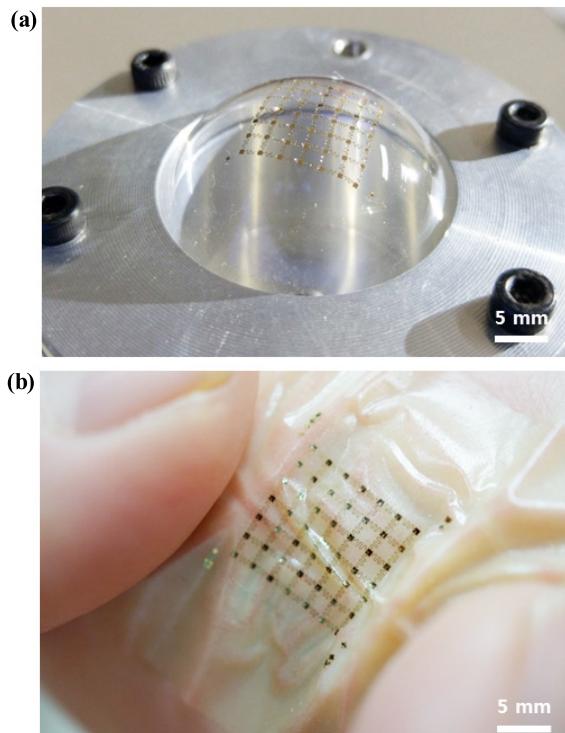


그림 4. 신축성 실리콘 박막 태양전지: (a) 신축성 기판 위에서 제작된 실리콘 박막 태양전지, (b) 주름진 손등 위에서 제작된 실리콘 박막 태양전지.

체 신축성 태양전지 소자의 크기도 가로세로 1.5 cm × 1.5 cm 정도이며, 49개의 태양전지 셀을 포함하고 있다.¹²

구불구불한 형태의 신축성 구조의 경우, 각각의 독립된 태양전지 셀을 상호 연결 전극(interconnection electrode)을 이용하여 연결하는데, 이때 연결 전극의 구조를 구불구불한 형태로 만들어 외부 응력에 유연하게 변형되도록 제작하였다. 또한 하부 신축성 기판과 제작된 실리콘 박막 태양전지는

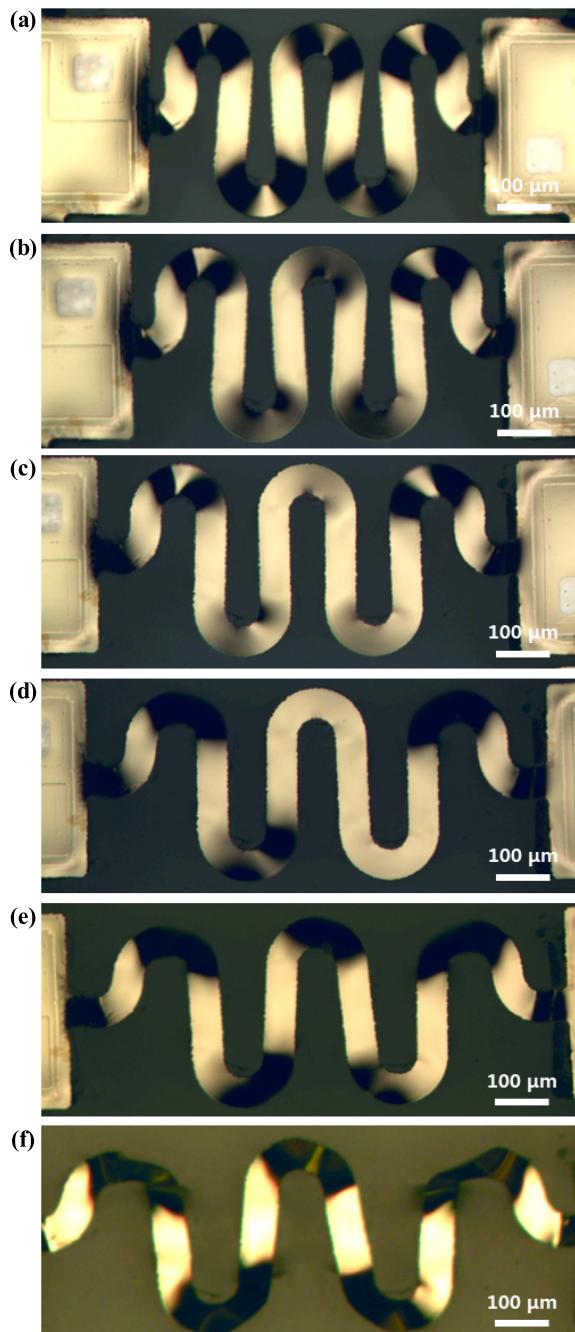


그림 5. 신축성 실리콘 박막 태양전지 간의 구불구불한 구조의 상호 연결 전극의 현미경 사진. 외부 응력이 (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40%, (f) 50% 가해졌을 때 신축된 연결 전극의 모습.

화학적 결합(chemical bonding)을 이용하여 고정시키고, 상호 연결 전극 부분은 신축성 기판으로부터 분리시킨 구조로 제작하였다. 외부 응력에 의한 변형 시 분리된 구불구불한 형태의 연결 전극 부분이 변형되어 상대적으로 실리콘 박막 태양전지는 외부 응력으로부터 안전한 구조로 제작되었다.¹³ 그림 5에서 알 수 있듯이, 신축성 기판 위에 제작된 마이크로 셀 크기의 실리콘 박막 태양전자는 외부 응력이 가해짐에 따라 변형되지 않고, 대신 다리 역할을 하는 상호 연결 전극이 응력을 흡수하여 변형이 일어나게 된다. 마이크로미터 단위로 패터닝 된 실리콘 박막 태양전자는 신축성 구조 덕분에 외부 응력이 가해지는 환경에서도 특성저하 없이 정상적으로 구동이 가능하다. 그림 6은 이러한 특성을 보여주는데, 외부 응력이 0%에서부터 50%까지 가해지는 동안 태양전지의 특성을 나타내는 전류, 개방전압, 곡선인자(fill factor, FF)에는 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

마이크로 패터닝 기술은 실리콘 박막 태양전지뿐만 아니라 다양한 태양전지에서도 적용이 가능하다.^{14,15} 마이크로 패터닝 기술을 이용한 신축성 태양전자는 웨어러블 전자기기, 플렉서블 디스플레이, 자동차 외관이나 건물 외벽과 같은 곡면 형태의 표면에도 적용될 수 있으며, 차세대 전원으로써 그 활용범위를 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

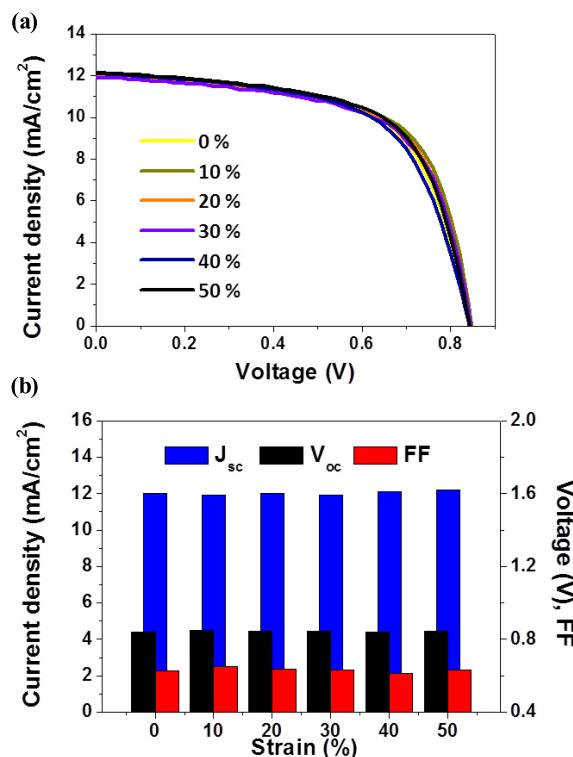


그림 6. 마이크로셀을 이용하여 제작된 신축성 실리콘 박막 태양전지의 외부 응력에 따른 태양전지 특성 변화: (a) 외부 응력에 따른 태양전지 전류-전압 그래프, (b) 외부 응력에 따른 태양전지 특성 차이.

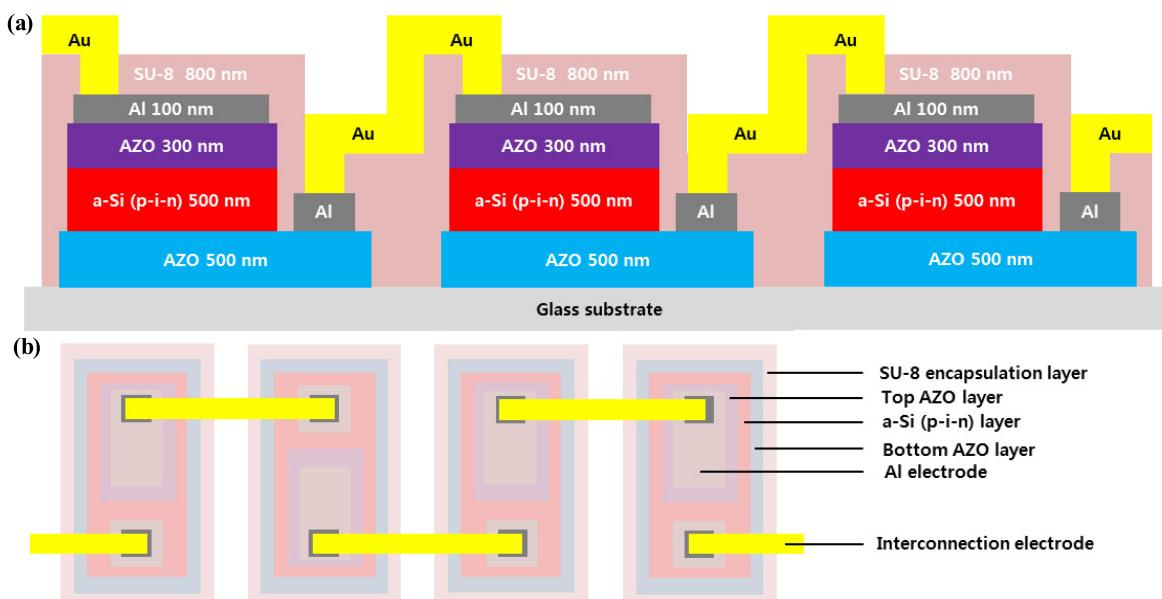
2.4 마이크로셀을 이용한 소형 고전압 전원

IT 기술의 발달은 미세전자기계시스템(microelectromechanical system, MEMS)의 기술 개발을 유도하였으며, 이러한 기술은 현재 최첨단 의료 산업, 항공 우주 산업, 생체 친화적 전자기기 등에 다양하게 적용되어 개발이 진행 중이다. 미세전자기계시스템에 주로 사용되는 소형의 압전소자(piezoelectric device) 혹은 초소형 펌프(micropump)의 경우 수십에서 수백 볼트(V) 정도의 구동 전압을 필요로 하는데, 이 때문에 추가적인 전압 공급원을 필요로 한다.¹⁶⁻¹⁸ 또한, 이들 소자는 가볍고 소형으로 제작되기 때문에 상대적으로 부피가 크고 무거운 전원은 미세전자기계시스템 구현에 제약으로 작용한다. 추가로 서론에서 언급한 생체친화적인 소자의 경우 인체에 삽입되거나 부착되는 경우가 있는데, 이 때문에 마이크로미터 수준의 크기로 제작이 가능하여야 하고 자체적인 전력 생산과 공급이 함께 이루어져야 한다. 따라서, 소형화 및 경량화가 가능하고 전력 생산과 공급이 일체적인 전원의 필요성이 대두되고 있다.

실리콘 박막 태양전지의 경우 앞서 설명한 바와 같이 얇고 박막으로 제작이 가능하여 가볍고, 마이크로 패터닝 기술을 이용하여 미세한 구조로도 제작이 가능하다. 또한 태양전지는 기본적으로 자체적으로 전력 생산과 공급이 가능하며, 원하는 출력 전압만큼 태양전지 셀을 직렬로 연결하는 방식으로 출력 전압의 승압이 간편하다. 결과적으로 미세전자기계시스템에 필요한 초소형 고전압 전원은 마이크로 미세 패터닝이 가능한 실리콘 박막 태양전지를 직렬로 연결하여 구현이 가능하다.

실리콘 박막 태양전지는 포토리소그래피 공정과 습식/건식 식각 공정을 통해 원하는 형태 및 크기로 마이크로셀 제작이 가능하다.¹⁹ 그림 7은 고전압 실리콘 박막 태양전지 전원에 사용된 단일 셀의 단면 모식도와 직렬 연결의 모식도이다. 노란색의 금(Au) 전극이 단일 셀과 셀 사이를 연결해주는 상호 연결 전극 역할을 하며, 이빔 증착(e-beam evaporation) 공정을 통하여 증착되었다. 마이크로 패터닝 된 단일 태양전지 셀의 전면에 금 전극을 증착하여 연결하게 되면, 양극과 음극이 닿아 단락이 발생될 수 있기 때문에, 금 전극 증착 전에 감광성 물질인 SU-8을 스핀코팅한 다음 포토리소그래피 공정으로 전극 증착이 필요한 부분을 제외한 나머지 부분을 덮는 방식으로 마이크로 패터닝하였다. 그 후 금 전극을 이빔 증착 공정으로 전면 증착한 다음, 포토리소그래피 공정과 습식식각 방법을 이용하여 마이크로미터 단위로 패터닝하였다. 결과적으로, 상호 연결 전극을 통해 연결된 태양전지의 개수에 따라 원하는 출력 전압만큼 개방전압이 승압된다.³

실리콘 박막 태양전지의 개방전압은 보통 0.8 ~ 0.85 V 정도이며, 100 V의 출력 전압을 얻기 위해서는 약 120여 개의 실리콘 박막 태양전지를 직렬로 연결하여야 한다. 앞서 설명한 상호 연결 전극은 전도도를 높이고 전극계면에서의 특성 저하를 낮추기 위해 금 전극을 사용하였고, 마이크로 패터닝 공정을 통해 그림 8a, b와 같은 형상으로 구현된다. 각각의 단일 실리콘 박막 태양전지를 직렬로 연결하기 위하여, 상부 전극과 하부전극을 상호 연결 전극으로 연결하였으며, 금 전극의 크기를 최소화하기 위해 상부전극과 하부전극의 방향이 서로 반대가 되도록 배치하였다. 또한 그림 7에서 설명한



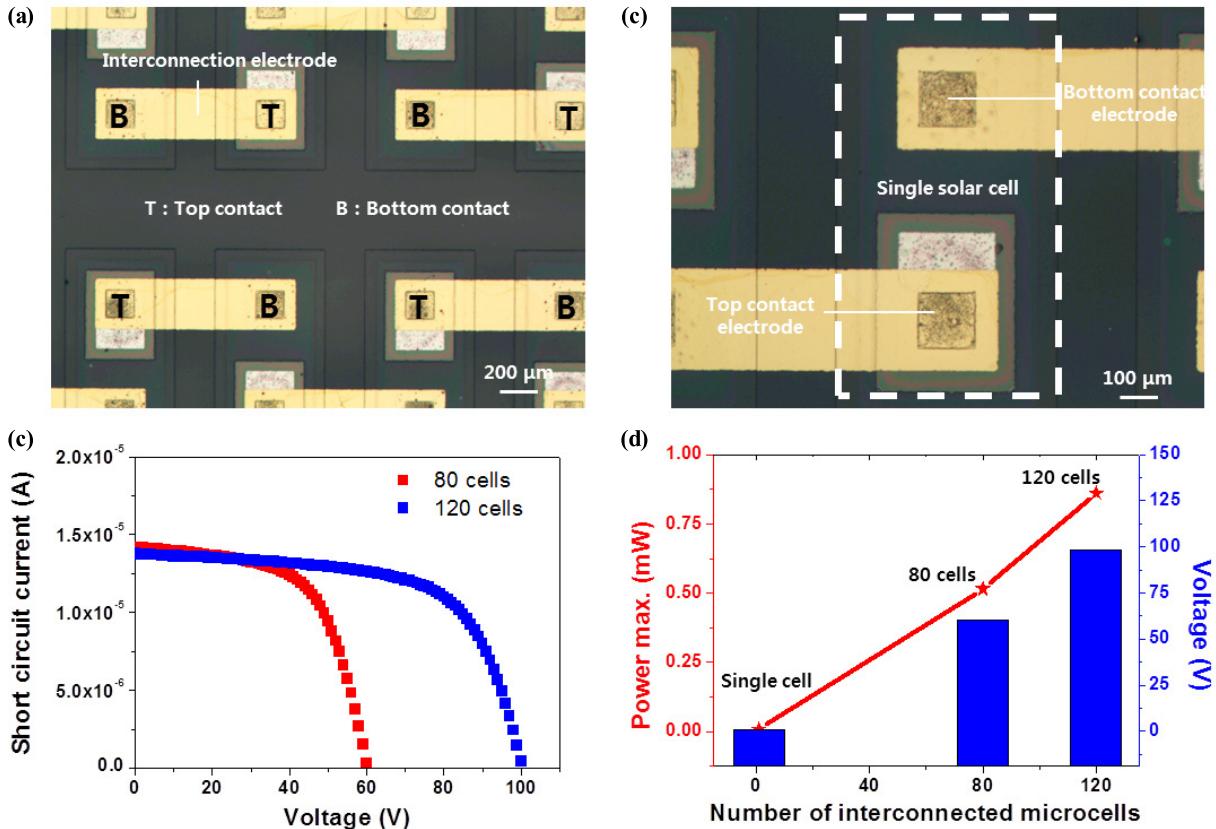


그림 8. 고전압 실리콘 박막 태양전지 모듈의 특성 및 광학 현미경 사진: (a) 포토리소그래피 공정과 이빔증착공정을 이용하여 제작한 실리콘 박막 태양전지 광학 현미경 사진, (b) 상호 연결 전극에 의해 연결된 단일 실리콘 박막 태양전지 광학 현미경 사진, (c) 80개 셀과 120개 셀을 연결한 고전압 태양전지 모듈의 전류 전압 곡선, (d) 직렬 연결한 태양전지 셀의 개수에 따른 최대 전력과 개방전압 특성 변화.

대로 셀과 셀 사이 연결 시에 단락이 발생하는 문제를 방지하기 위하여, 투명한 감광성 물질인 SU-8을 각각의 셀 모양에 맞게 마이크로 패터닝하였다. 200개의 단일 실리콘 박막 태양전지가 가로세로 2 cm × 2 cm 크기 안에 제작되었으며, 80개와 120개씩 각각 직렬로 연결되어 소형 고전압 전원으로 제작되었다. 120개가 연결된 모듈에서는 개방전압이 약 100 V로 출력되었다. 그림 8c, d에서 확인할 수 있듯이 직렬 연결된 태양전지의 개수에 따라 개방전압은 승압되지만, 다른 태양전지 특성은 크게 변화가 없는 것을 확인할 수 있으며, 최종적으로 120개의 태양전지를 직렬로 연결하여 개방전압 100 V, 최대 전력 약 1 mW에 가까운 출력을 달성하였다.

3. 결론

지금까지 실리콘 박막 태양전지를 이용한 마이크로 패터닝 기술과 이를 활용한 응용분야에 대하여 알아보았다. 실리콘 박막 태양전지는 1976년 RCA 연구소의 Carlson과 Wronski²⁰에 의해 처음 실리콘 박막 태양전지가 제작되면서부터 연구가 시작되어, 40여 년 간의 축적된 연구인프라를

구축하고 있으며, 높은 광흡수 계수, 직접 천이 밴드갭(direct band gaps), 저가 대량 생산 가능성 등의 장점을 가지고 있다.^{21,22} 또한 얇은 박형으로 제작이 가능한 실리콘 박막 태양전지는 포토리소그래피 공정과 간단한 식각공정들을 통하여 마이크로미터 단위의 미세구조로 패터닝이 가능하며, 이를 통해 다양한 분야로의 응용이 가능함을 보였다. 마이크로셀을 이용하여 구불구불한 구조로 구현된 신축성 태양전지의 경우 웨어러블 전자기기를 비롯한 다양한 신축성 소자의 휴대용 전원으로 적용가능성을 보였다. 또한 100여 개의 마이크로셀을 직렬로 연결한 고전압 전원의 경우 미세전자기계 시스템뿐만 아니라 다른 소형 전자소자의 전원으로의 응용도 기대된다. 마이크로 미세 패터닝 기술은 미세구조에서도 전자소자 본래의 특성을 그대로 유지하면서 원하는 모양과 형태로 변형이 가능한 차세대 전자소자 개발에 필수적인 기술이다. 본 글에서는 실리콘 박막 태양전지를 이용한 마이크로 미세 패터닝 기술을 다루었지만, 포토리소그래피 공정과 습식/건식 식각 공정을 이용한 마이크로 미세 패터닝 기술은 다른 다양한 전자소자에도 적용이 가능하며, 차세대 미세 전자소자 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. J. Lee, K. Kim, *Solar Cell Engineering*, Green, Seoul, 2007.
2. J. Poortmans, and V. Arkhipov, *Thin film Solar Cells*, Wiley, New York, 2006.
3. J. Nam, Y. Lee, C. S. Kim, H. Kim, D.-H. Kim, and S. Jo, *J. Nanomater.*, **2016**, 3613928 (2016).
4. J. Ahn and J. H. Je, *J. Phys. D.*, **45**, 103001 (2012).
5. D. Kim, J. Xiao, J. Song, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Adv Mater.*, **22**, 2108 (2010).
6. J. A. Rogers, T. Someya, and Y. Huang, *Science*, **327**, 1603 (2010).
7. T. F. O'Connor, A. V. Zaretski, S. Savagatrup, A. D. Printz, C. D. Wilkes, M. I. Diaz, E. J. Sawyer, and D. J. Lipomi, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **144**, 438 (2016).
8. C. Yan and P. S. Lee, *Small*, **10**, 3443 (2014).
9. M. Kaltenbrunner, M. S. White, E. D. Głowacki, T. Sekitani, T. Someya, N. S. Sariciftci, and S. Bauer, *Nat. Commun.*, **3**, 770 (2012).
10. Y. Zhang, S. Xu, H. Fu, J. Lee, J. Su, K. Hwang, J. A. Rogers, and Y. Huang, *Soft Matter*, **9**, 8062 (2013).
11. J. Lee, J. Wu, J. H. Ryu, Z. Liu, M. Meitl, Y. Zhang, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Small*, **8**, 1851 (2012).
12. J. Nam, Y. Lee, W. Choi, C. S. Kim, H. Kim, J. Kim, D.-H. Kim, and S. Jo, *Adv. Eng. Mater.*, **6**, 21, 1601269 (2016).
13. D. Kim, Z. Liu, Y. Kim, J. Wu, J. Song, H. Kim, Y. Huang, K. Hwang, Y. Zhang, and J. A. Rogers, *Small*, **5**, 2841 (2009).
14. N. Kang, W. Choi, H. Kim, C. S. Kim, and S. Jo, *ECS Solid State Lett.*, **4**, 88 (2015).
15. W. Choi, C. Z. Kim, C. S. Kim, W. Heo, T. Joo, S. Y. Ryu, H. Kim, H. Kim, H. K. Kang, and S. Jo, *Adv. Eng. Mater.*, **4**, 16, 1400589 (2014).
16. M. Karpelson, G. Wei, and R. J. Wood, *Sens. Actuators A: Phys.*, **176**, 78 (2012).
17. M. Patrascu, J. Gonzalo-Ruiz, M. Goedbloed, S. H. Brongersma, and M. Crego-Calama, *Sens. Actuators A: Phys.*, **186**, 249 (2012).
18. M. Behnam, G. V. Kaigala, M. Khorasani, P. Marshall, C. J. Backhouse, and D. G. Elliott, *Lab Chip.*, **8**, 1524 (2008).
19. K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, **12**, 69 (2014).
20. D.E. Carlson and C.R. Wronski, *Appl. Phys. Lett.*, **28**, 671 (1976).
21. Y. Lee, M. Choi, D. Kim, C. Kim, M. Song, J. Kang, Y. Jeong, K. Nam, S. Park, and S. Kwon, *J. Phys. Chem. C.*, **116**, 23231 (2012).
22. H. Zhou, W. Hsu, H. Duan, B. Bob, W. Yang, T. Song, C. Hsu, and Y. Yang, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 2822 (2013).