

차세대 박막 태양전지 기술 동향 및 미래 기술에 대한 연구

김무진
강남대학교 전자공학과 교수

Next-Generation thin Film Solar Cell Technology Trends and Future Technologies

Moojin Kim
Professor, Department of Electronic Engineering, Kangnam University

요약 최근 기후 환경과 에너지 소비에 대한 관심은 세계적으로 중요한 이슈가 되고 있다. 이러한 상황에서 신재생 에너지원에 대한 관심과 연구가 지속적으로 증가하고 있으며, 그 중에서도 가장 각광을 받고 있는 기술은 태양에너지를 직접 전기로 변환하는 태양전지 기술이다. 이 기술은 인간에게 무해하고 무한한 태양 에너지를 활용하여 전력을 생산할 수 있다는 장점이 있다.

먼저, 본 문헌에서는 중요하다고 판단되는 태양전지 동향을 다루었으며, 그 주요 태양전지에는 페로브스카이트, 유기물, 양자점, 무기물 기반의 기술들이 있다. 이러한 태양전지들의 개발 현황과 상용화 가능성을 검토하여 타 신재생에너지와의 경쟁에서 우위를 점할 수 있도록 할 것이다. 이를 위해서는 각 차세대 태양전지 기술들이 직면한 문제와 그 해결을 위한 연구 방향을 면밀히 살펴봐야 할 것이다. 결론적으로, 이러한 기술의 발전은 향후 에너지 공급에 중요한 역할을 하여, 기후 변화 문제 해결에 기여할 것으로 판단된다.

주제어 : 기후 변화, 에너지 자원, 태양에너지, 태양전지, 차세대 기술 동향

Abstract Recently, interest in climate environment and energy consumption has become an important issue worldwide. Interest in and research on new and renewable energy sources are continuously increasing, and among them, the most popular technology is solar cell technology that directly converts solar energy into electricity. This technology has the advantage of being harmless to humans and being able to produce electricity by utilizing infinite solar energy. This paper covers important solar cell trends, and the main solar cells include perovskite, organic, quantum dot, and inorganic-based technologies. The development status and commercialization potential of these solar cells will be reviewed so that they can gain an advantage in competition with other renewable energy. It is necessary to closely examine the problems faced by each next-generation solar cell technology and the research direction to solve them. The development of these technologies is expected to play an important role in energy supply in the future, contributing to solving the climate change problem.

Key Words : Climate change, Energy resources, Solar energy, Solar cells, Next-generation technology trends

*This work was supported by the Semiconductor major track (Materials, Components, Equipment) project supported by the Ministry of Education and the Ministry of Trade, Industry and Energy (No. P0022196).

*Corresponding Author : Moojin Kim(moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received July 4, 2024

Revised September 3, 2024

Accepted December 20, 2024

Published December 30, 2024

1. 서론

21세기에 접어들면서 기후 변화와 에너지 고갈 문제는 전 세계적으로 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이에 따라 무한한 에너지원에 대한 관심과 연구가 증가하고 있으며, 태양전지는 이러한 에너지 기술 중 하나다 [1-3]. 태양전지는 태양광을 직접 전기로 변환하는 기술로, 환경에 무해하고 무한한 태양 에너지를 활용하여 전력을 생산할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 가진다.

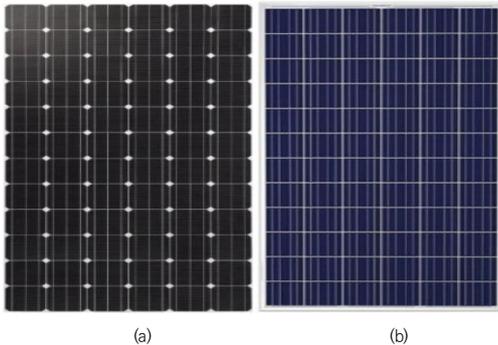


Fig. 1. Solar cell panel made of (a) single crystal and (b) polycrystalline silicon

기존 태양전지 기술은 주로 실리콘을 기반으로 하여 구성되었으며, Fig. 1에서 보여주는 것처럼 실리콘 태양전지는 높은 안정성과 효율성으로 인해 상용화가 많이 이루어졌으나, 여전히 몇 가지 한계점을 가지고 있다 [4-6]. 먼저, 실리콘 태양전지 제조 과정은 반도체 기술을 기반으로 제작되기 때문에 다소 복잡하고 비용도 많이 든다. 또한, 실리콘의 물리적 특성인 이론적 효율의 한계에 근접하고 있으며, 이는 태양광 발전의 비용 대 효율을 고려했을 때 지속적인 개발이 필요한지 고민해야 할 이유 중 하나이다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 다양한 차세대 태양전지 기술이 연구되고 개발되었으며, 관련된 내용을 아래에 설명하고자 한다.

최근 몇 년간 대표적으로 관심이 집중되고 있으며, 전 세계 수많은 연구자들이 집중하고 있는 것으로는 유기 기반의 페로브스카이트 태양전지, 유기물을 이용하여 제작된 유기 태양전지, 양자 기술이 접목된 양자점 태양전지, 반도체 기술이 적용되어 얇은 막을 이용하여 제작된 박막 태양전지가 있다[7-12]. Fig. 2에서 보여주는 페로브스카이트 태양전지는 높은 광전 변환 효율과 저비용 생산 가능성 때문에 이슈가 되고 있다.

이러한 특성 구현이 가능한 이유로는 페로브스카이트 구조(Fig. 2(a))는 다양한 화학 조성을 통해 조절할 수 있기 때문이며, 최근 실리콘 태양전지의 효율에 근접하거나 이를 초과하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 페로브스카이트 태양전지는 환경 적인 문제와 소자의 신뢰성 문제를 해결해야 한다.

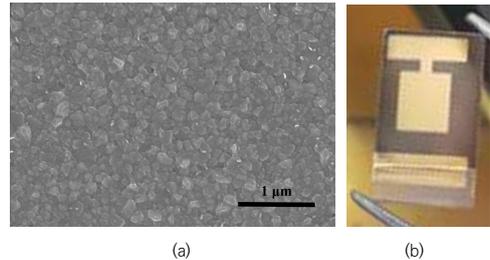


Fig. 2. (a) SEM image of the surface of the perovskite thin film and (b) photo of a solar cell device manufactured using this semiconductor material (provided by Kyung Hee University).

유기 태양전지는 유연성, 경량성, 저비용 제작이 가능하다 [10]. 특히, 유기물을 사용함으로써 다양한 기판에 적용할 수 있어 웨어러블 기기나 건물 일체형 태양전지(BIPV) 분야로의 응용이 가능하다. 그러나 상용화를 위해서는 상대적으로 낮은 효율성과 안정성 문제가 해결되어야 한다.

양자점 태양전지는 양자점의 독특한 광학적 특성을 이용하여 높은 변환 효율을 구현할 수 있으며, 다양한 스펙트럼의 태양광을 효과적으로 흡수할 수 있다[11]. 이러한 장점 때문에 미래 고효율 태양전지 기술로 주목받고 있으며, 나노미터 크기의 반도체 입자인 양자점은 전자와 정공 쌍을 효과적으로 분리할 수 있어 높은 광전 효율을 달성할 수 있다.

무기 박막 태양전지는 기존 실리콘 태양전지의 한계를 극복할 수 있는 대안으로, 가벼운 무게와 유연한 형태로 다양한 기판에 적용 가능하며, 비용 효율성에서도 장점을 가진다. 특히, Fig. 3의 CIGS(구리-인듐-갈륨-셀레늄)와 같은 무기 박막 태양전지는 높은 효율성과 안정성을 보이며 상용화 가능성이 있다[12]. 이외에도 CZTS(구리-아연-주석-황)와 같은 무기 박막 태양전지도 저비용 원료를 사용하여 비용 효율성을 높일 수 있다[13].

본 논문에서는 미래 에너지원인 차세대 태양전지 기술의 최신 동향을 종합적으로 살펴보고, 각 기술의 특

성과 장단점을 살펴보고자 한다. 특히, 페로브스카이트 태양전지, 유기 태양전지, 양자점 태양전지, 무기 박막 태양전지의 개발 현황과 상용화 가능성을 중점적으로 조사할 것이다. 또한, 차세대 태양전지 기술이 직면한 중요 과제와 이를 해결하기 위한 연구 방향을 제시하여, 미래 태양전지 기술의 발전 가능성을 보여주고자 한다.

차세대 태양전지 기술의 발전은 미래의 에너지 공급을 위한 중요한 돌파구가 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 차세대 태양전지 기술의 연구 및 개발 방향을 제시함으로써, 지속 가능한 에너지 공급을 위한 기술 발전에 기여하고자 한다.

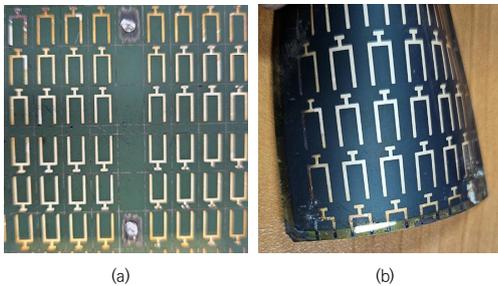


Fig. 3. (a) Thin-film CIGS solar cells fabricated on the substrate shown in Fig. 3(a) and (b) Thin-film CIGS solar cells fabricated on the substrate shown in Fig. 3(b).

2. 본론

2.1 태양전지 구조

태양전지는 태양광을 전기 에너지로 변환하는 전자 소자이다. 이 절에서는 태양전지의 주요 구성 요소인 기판(Substrate), 활성영역(Active region), 전극(Electrode) 등 각 부분의 기능과 역할에 대해 상세히 설명하여 관련 연구자들에게 조금이나마 도움이 되고자 한다.

2.1.1 태양전지 기판

기판은 태양전지의 기본 구조를 형성하는 부분으로, 전체 장치의 기초 역할을 한다. 기판은 다양한 재료로 제작될 수 있으며, 태양전지의 종류에 따라 다르게 사용된다.

1) 실리콘 기판

- 단결정 실리콘: 고효율 태양전지에 사용되며, 높은 순도를 기반으로 한방향의 단결정 구조를 가지도록 제

작할 수 있다. 전자와 정공의 이동 경로가 길고 재결합이 적어 높은 효율을 제공한다.

- 다결정 실리콘: PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), Sputter 등 반도체 기술의 발전으로 제조 비용이 저렴해졌으며, 다양한 응용 가능성을 제공할 수 있게 되었다. 매우 얇은 박막형태로 구현이 가능하지만, 단결정 실리콘보다 효율은 낮다.

2) 유리 기판 (Fig. 4(a))

- 박막 태양전지에서 주로 사용되며, 기계적 안정성, 고내열성과 투명성을 제공한다. CIGS, CdTe 태양전지 등에 사용되고 있다.

3) 플렉시블 기판 (Fig. 4(b))

- 플라스틱 기판: 유기 태양전지나 페로브스카이트 태양전지에서 사용되며, 유연성과 경량성을 가진다. 웨어러블 기기 및 건물 일체형 태양전지(BIPV)에 적합하다.

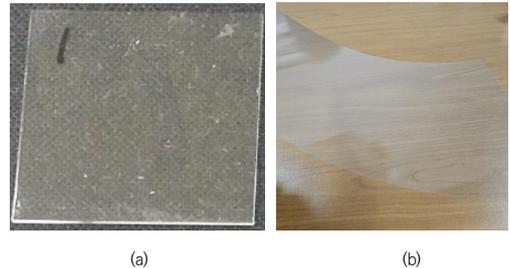


Fig. 4. (a) High heat resistance glass substrate for thin film solar cells (provided by Kyung Hee University) and (b) glass substrate for flexible solar cells.

2.1.2 태양전지 활성 영역

활성 영역은 태양전지의 핵심 부분으로, 태양광을 흡수하여 전자와 정공을 생성하는 역할을 수행한다. 활성 영역의 재료와 구조는 태양전지의 성능에 큰 영향을 미친다.

1) 실리콘 태양전지의 활성 영역

단결정 및 다결정 실리콘: 태양광을 흡수하여 전자와 정공을 생성하며, 높은 변환 광전효율을 나타낸다.

2) 페로브스카이트 태양전지의 활성(반도체 물질) 영역

- 페로브스카이트 구조: ABX_3 형태의 결정 구조

(Fig. 5 참조)로, A 입자는 유기 또는 무기 양이온, B는 금속 양이온, X는 할로겐 음이온이다. 이 구조는 높은 광 흡수율과 전하 이동 특성을 제공하기 때문에 태양전지의 광흡수 재료로 사용된다 [7-9]. 이러한 구조는 2000년대 초에 이슈가 되기 시작하였으며, 높은 광흡수율 때문에 최적화를 위한 많은 연구가 진행되었다.

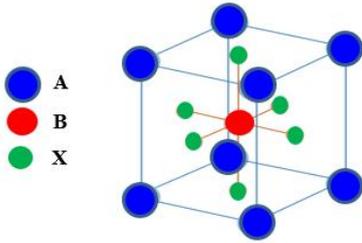


Fig. 5. Structure of perovskite semiconductor material (provided by Kyung Hee University).

3) 유기 태양전지의 활성 영역

- 고분자 및 소분자 기반의 유기 재료: 유기물로 되어 있어 가볍고 유연한 특성을 가지며, 다양한 파장의 빛을 흡수할 수 있도록 할 수 있다. 주로 P3HT:PCBM 등의 혼합물이 사용된다.

4) 양자점 태양전지의 활성 영역

- 양자점: 반도체 입자가 나노미터 크기를 기반으로 하기 때문에, 다양한 파장의 빛을 흡수하여 전자와 정공을 생성한다. 특히 반도체 입자의 크기를 조절할 수 있어 광 흡수 스펙트럼을 제어할 수 있다. 일반적으로 빛은 파동과 입자의 이중성을 가지고 있고, 특히 입자로서의 물성은 반도체 입자와의 상호 작용이 가능하다.

5) 무기 박막 태양전지의 활성 영역

- CIGS(구리-인듐-갈륨-셀레늄, Fig. 6(a)): 고온에서 반도체 물질을 형성하기 때문에 높은 효율과 안정성을 제공하는 박막 재료다.
- CdTe(카드뮴-텔루라이드): 높은 흡수 계수를 가지며, 저비용으로 생산 가능하다. 하지만, Cd 원소의 환경 안정성에 대한 문제가 있다.

2.1.3 태양전지 전극 (Electrodes)

전극은 반도체에서 생성된 전자와 정공을 외부 회로

로 전달하는 도체 소재로 형성된 구조이다. 전극은 일반적으로 투명 전극과 후면 전극으로 구성된다.

1) 투명 전극

외부에서 공급되는 빛 에너지를 태양전지 소자의 활성영역에 최대한 공급이 되어야 하며, 공급된 에너지는 전자와 정공을 발생시킨다. 이러한 캐리어들을 외부로 이동시키기 위해서는 일반적인 금속 소재로는 불가능하다. 그 이유는 전극은 금속소재로 제작되기 때문에 투명하지 않기 때문이다. 따라서, 투명하면서도 전도성 특성을 나타내는 물질에 대한 연구가 이루어졌다.

- ITO(Indium Tin Oxide, Fig. 6(b)): 현재 태양전지 및 디스플레이 분야에 사용되고 있으며, 투명하며 전기 전도성이 우수하여 다양한 분야에 사용되고 있다.

- FTO(Fluorine-doped Tin Oxide): ITO 대체재로 사용되며, 높은 투명성과 전도성을 가진다.

2) 후면 전극

- 알루미늄, 은, 금, 구리 등의 금속 박막: 반도체 기술로 도체 물질을 증착하는 다양한 방법이 연구되고 있다. 기존에는 sputter와 evaporation 기술로 형성되었으며, 최근에는 ALD(Atomic Layer Deposition) 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 소재들은 전자와 정공을 효율적으로 수집하고 외부 회로로 전달하는 역할을 한다.

2.1.4 전하 수송층 (Charge Transport Layers)

전하 수송층은 생성된 전자와 정공을 분리하고 양극과 음극으로 이동시키는 역할을 한다.

1) 전자 수송층 (Electron Transport Layer, ETL)

- TiO₂, ZnO: 전자를 선택적으로 전달할 수 있도록 하며, 전자가 정공과의 재결합을 방지하는 역할을 한다.

2) 정공 수송층 (Hole Transport Layer, HTL)

- Spiro-OMeTAD, PEDOT:PSS: 정공을 선택적으로 전달하고, 효율적인 전하 수송을 제공한다.

각 구성 요소의 재료와 구조에 따라 태양전지의 성능과 응용 분야가 정해진다. 최근의 연구와 개발 방향은 이러한 구성 요소들의 성능을 향상시키고 새로운 재

료와 구조를 최적화하여 태양전지의 효율과 소자 안정성을 향상시키는 데 역량이 집중되고 있다.

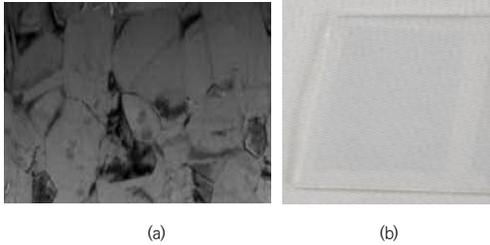


Fig. 6. (a) TEM image of the semiconductor material in the active area of a CIGS solar cell and (b) Sample photo of the ITO transparent electrode formed on glass.

2.2 태양전지 효율

태양전지의 효율은 태양 에너지를 전기 에너지로 변환하는 비율을 나타내며, 이는 태양전지의 성능을 평가하는 중요한 지표이다. 태양전지의 종류에 따라 최대 효율은 크게 다르며, 재료와 구조에 의하여 효율에 한계가 있다. 이 절에서는 주요 태양전지 종류와 각 종류별 최대 효율에 대해 설명하고자 한다.

1) 단결정 실리콘 태양전지 (Monocrystalline Silicon Solar Cells)

가장 오랫동안 연구되었고 사용되고 있는 단결정 실리콘 태양전지는 반도체 기술의 발전과 그 방향을 같이하고 있다. 고순도의 실리콘, 즉 웨이퍼를 사용하여 제작하며, 결정 구조가 단일한 형태로 되어 있다. 이로 인해 전자 이동 경로가 길고 재결합 손실이 적어 높은 효율을 보인다. 설명한 고순도 웨이퍼를 사용하기 때문에 가격이 높다.

- 연구실에서 26.7% 이상의 변환 효율을 기록한 바 있으며, 상용 제품의 경우 약 22-24%의 효율을 보이고 있고, 1세대 태양전지로 분류된다.

2) 다결정 실리콘 태양전지 (Polycrystalline Silicon Solar Cells)

다결정 실리콘 태양전지는 다수의 실리콘 결정이 무작위로 배열된 형태로, 제조 비용이 단결정에 비해 낮다. 이 다결정 반도체 물질은 CVD(Chemical Vapor Deposition) 기술과 같은 방법을 이용하여 박막 형태

로 형성되거나 비정질 반도체 물질을 고온이나 레이저를 이용하여 다결정 물질로 변화시키는 방법으로 제작된다. 그러나 내부 결함과 결정 경계에서 전자 재결합이 발생하여 효율이 다소 낮다.

- 연구실에서 23.3%의 효율을 달성한 사례가 있으며, 상용 제품의 경우 약 18-20%의 효율을 보이고 있고, 1세대 태양전지로 분류된다.

3) 페로브스카이트 태양전지 (Perovskite Solar Cells)

페로브스카이트 태양전지는 앞에서 자세하게 설명한 것처럼 다양한 화학 조성을 통해 높은 광 흡수율과 전자 이동 특성을 제공하는 ABX_3 형태의 결정 구조를 사용하고 있다. 짧은 연구 기간이지만, 빠르게 효율이 증가하고 있다.

- 연구실에서 25.7%의 효율을 기록한 바 있으며, 다양한 연구 기관에서 상용화 진행 중이며, 상용 제품의 효율은 향후 증가할 것으로 기대하고 있다. 하지만, 소자 열화 등 안정성 문제를 반드시 해결해야만 한다.

4) 유기 태양전지 (Organic Solar Cells)

유기 태양전지는 고분자 및 소분자 유기 재료를 사용하여 제작된다. 다양한 색상 구현이 가능하여 디자인 측면에서 유리하다.

- 연구실에서 17.4%의 효율을 기록하였으며, 상용 제품의 경우 약 10-12%의 효율을 나타낸다.

5) 양자점 태양전지 (Quantum Dot Solar Cells)

양자점 태양전지는 나노미터 크기의 반도체 입자를 이용하여 다양한 파장의 빛과 상호 작용을 통해 에너지를 흡수하여 캐리어를 생성할 수 있도록 한다. 이를 위하여 빛의 파장과 비슷한 크기로 제작된다.

- 연구실에서 16.6%의 효율을 기록하였다. 상용화 단계는 아직 초기 단계에 있으며, 이를 위해서는 많은 연구가 필요하다.

6) 무기 박막 태양전지 (Inorganic Thin-Film Solar Cells)

무기 박막 태양전지는 CIGS(구리-인듐-갈륨-셀레늄)와 CdTe(카드뮴-텔루라이드) 등의 반도체 재료를 사용하여 제작된다. 박막 형태로 다양한 기판에 적용할 수 있다.

- CIGS 태양전지: 연구실에서 23.4%의 효율을 기록하였다. 상용 제품의 경우 약 18-20%의 효율을 보이고 있다.

- CdTe 태양전지: 연구실에서 22.1%의 효율을 기록하였다. 상용 제품의 경우 약 17-19%의 효율을 보이고 있다.

단결정 실리콘 태양전지는 가장 높은 효율을 보이지만, 제작 비용이 높은 반면, 페로브스카이트 태양전지와 같은 차세대 태양전지는 저비용으로 높은 효율을 달성할 수 있기 때문에 잠재력이 크다. 유기 태양전지는 유연성과 경량성에서 강점을 보이지만, 효율과 안정성에서 개선이 필요하다. 양자점 태양전지는 높은 효율 잠재력을 가지고 있으며, 무기 박막 태양전지는 다양한 기판에 적용 가능하고 비용 효율성에서 장점을 나타낸다. 각 기술의 특성과 장단점을 고려하여 최적의 태양전지 기술을 선택하는 것이 중요하다 판단된다.

2.3 차세대 태양전지

차세대 태양전지 기술은 기존의 실리콘 기반 태양전지의 한계를 극복하고자 다양한 새로운 재료와 구조를 활용하여 개발되고 있다. 그 중에서도 플렉서블(flexible) 및 스트레처블(stretchable) 태양전지는 유연성과 신축성을 갖춘 혁신적인 기술로, 새로운 형태와 환경에 적용할 수 있는 장점이 있다. 이들 태양전지는 웨어러블 기기, 전자 피부, 휴대용 전자 기기, 건물 일체형 태양전지(BIPV) 등 다양한 응용 분야에서 많은 관심을 받고 있다.

2.3.1 플렉서블 태양전지 기판

플렉서블 태양전지(Fig. 3(b))는 유연한 기판을 사용하여 제작되며, 구부리거나 말 수 있는 특성을 가지고 있다. 주로 유기 태양전지, 페로브스카이트 태양전지, 무기 박막 태양전지 등의 기술을 활용한다 [14,15].

이러한 태양전지는 다양한 기판 재료(플라스틱, 금속 호일 등)를 사용하여 자유롭게 구부릴 수 있다는 유연성이 가장 큰 장점이다. 기존 실리콘 태양전지보다 가벼워 휴대성이 좋고 설치가 용이하다.

최근 플렉서블 태양전지의 성능을 향상시키기 위해 새로운 고분자 재료 및 페로브스카이트 재료가 개발되고 있다. 롤투롤(Roll-to-Roll) 인쇄 기술을 통해 대량 생산이 가능하며, 비용을 절감할 수 있다. 플렉서블 페

로브스카이트 태양전지가 20% 이상의 변환 효율을 달성하는 등의 성과를 보이고 있다.

2.3.2 스트레처블 태양전지 (Stretchable Solar Cells)

스트레처블 태양전지는 신축성이 있어 늘리거나 변형할 수 있는 특성을 가지며, 더 극단적인 변형 조건에서도 기능을 유지할 수 있다.

이러한 태양전지는 30% 이상의 신축성을 가지며, 다양한 형태로 늘릴 수 있다. 반복적인 변형에도 높은 내구성을 유지하며, 인체에 부착 가능한 전자 피부, 생체의료 기기 등에 적용 가능하다.

최근에는 실리콘 나노리본, 탄소 나노튜브, 메탈 나노와이어 등의 소재를 사용하여 신축성과 효율성을 높이는 연구가 진행되고 있다 [16,17]. 메쉬 구조, 웨이브 패턴 등을 통해 변형시 전기적 특성을 유지하는 설계가 연구되고 있으며, 신축성을 유지하면서도 효율성을 극대화하기 위한 다양한 재료 조합과 구조적 설계가 개발되고 있다.

플렉서블 및 스트레처블 태양전지는 차세대 태양전지 기술의 혁신적인 발전을 보여주며, 다양한 새로운 응용 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있다. 앞으로의 연구와 개발을 통해 효율성, 내구성, 경제성을 더욱 향상시키는 것이 중요하며, 이를 통해 차세대 태양전지 기술의 상용화와 보급이 가속화될 것으로 기대하고 있다.

3. 결론

이 논문에서는 주요 차세대 태양전지 기술로 페로브스카이트 태양전지, 유기 태양전지, 양자점 태양전지, 무기 박막 태양전지, 그리고 플렉서블 및 스트레처블 태양전지의 최신 동향을 분석하고 각 기술의 특성과 장단점을 고찰하였다.

페로브스카이트 태양전지는 뛰어난 변환 효율과 저비용 생산 가능성으로 인해 많은 연구자들의 관심을 받고 있다. 다양한 화학 조성을 통해 효율성을 조절할 수 있으며, 실리콘 태양전지의 효율성을 초과하는 성과를 보이고 있다. 그러나 환경 안정성과 장기적인 신뢰성 문제를 해결하는 것이 필수적이다.

유기 태양전지는 유연성과 경량성, 저비용 생산이 가능한 장점을 가지고 있으며, 다양한 기판에 적용할 수 있어 차세대 웨어러블 기기와 건물 일체형 태양전지

(BIPV) 등의 응용 가능성이 크다. 하지만 현재 상용화 단계에서는 낮은 효율성과 안정성 문제를 해결해야 한다.

양자점 태양전지는 나노미터 크기의 반도체 입자인 양자점을 사용하여 높은 변환 효율을 기대할 수 있으며, 다양한 스펙트럼의 태양광을 효과적으로 흡수할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 미래 고효율 태양전지 기술로 주목받고 있으며, 양자점의 크기를 조절하여 광 흡수 스펙트럼을 최적화할 수 있다.

무기 박막 태양전지는 기존 실리콘 태양전지의 한계를 극복할 수 있는 대안으로, 가벼운 무게와 유연한 형태로 다양한 기판에 적용 가능하며 비용 효율성에서도 장점을 보인다. 특히 CIGS와 CdTe와 같은 재료를 사용하여 높은 효율성과 안정성을 보이며, 상용화 가능성을 가지고 있다.

플렉서블 태양전지는 유연한 기판을 사용하여 제작되며, 구부리거나 말 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 태양전지는 웨어러블 기기, 휴대용 충전기, 건물 일체형 태양전지 등 다양한 응용 분야에서 활용 가능하다. 최근의 연구에서는 플렉서블 페로브스카이트 태양전지가 20% 이상의 변환 효율을 달성하는 성과를 보이고 있다.

스트레처블 태양전지는 신축성이 있어 늘리거나 변형할 수 있는 특성을 가지며, 극단적인 변형 조건에서도 기능을 유지할 수 있다. 인체에 부착 가능한 전자 피부, 생체 의료 기기 등에 적용 가능하며, 다양한 형태로 늘릴 수 있다. 신축성을 유지하면서도 효율성을 극대화하기 위한 다양한 재료 조합과 구조적 설계가 개발되고 있다.

각 기술은 고유의 특성과 장단점을 가지고 있으며, 상용화를 위해서는 효율성, 안정성, 경제성 등의 측면에서 개선이 필요하다. 앞으로의 연구와 개발은 이러한 기술적 도전 과제를 극복하고, 더 나은 성능과 신뢰성을 제공하는 태양전지 기술의 발전을 도모해야 한다. 이러한 노력을 통해 태양전지는 더욱 효율적이고 경제적인 지속 가능한 에너지원으로서의 가능성을 확대할 것이며, 궁극적으로 기후 변화 문제를 해결하고 에너지 자원의 지속 가능성을 확보하는 데 기여할 것이다.

REFERENCES

- [1] Roy, P., Ghosh, A., Barclay, F., Khare, A., & Cuce, E. (2022). Perovskite Solar Cells: A Review of the Recent Advances. *Coatings*, 12(8), 1089. DOI : 10.3390/coatings12081089
- [2] Li, Y. et al. (2022). Recent Progress in Organic Solar Cells: A Review on Materials from Acceptor to Donor. *Molecules*, 27(6), 1800. DOI : 10.3390/molecules27061800
- [3] Yang, M., Liu, M., & Zhu, K. (2016). Graded Bandgap Perovskite Solar Cells. *Nano Letters*, 16(3), 1234-1239. DOI : 10.1021/acs.nanolett.5b04808
- [4] Yu, C., Xu, S., Yao, J., & Han, S., (2018). Recent Advances in and New Perspectives on Crystalline Silicon Solar Cells with Carrier-Selective Passivation Contacts. *Crystals*, 8(11), 430. DOI : 10.3390/cryst8110430
- [5] Liu, W., Massiot, I., Cattoni, A., & Collin, S. (2020). Bendy Silicon Solar Cells Pack a Powerful Punch. *Nature Energy*, 5, 959-972. DOI : 10.1038/s41560-020-0671-0
- [6] Battaglia, C., Cuevas, A., & De Wolf, S. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy & Environmental Science*, 9(5), 1552-1576. DOI : 10.1039/C5EE03380B
- [7] Khachatryan, H. et al. (2018). Novel method for dry etching CH₃NH₃PbI₃ perovskite films utilizing atmospheric-hydrogen -plasma. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 75, 1-9. DOI : 10.1016/j.mssp.2017.11.019
- [8] Khachatryan, H. et al. (2019). Direct etching of perovskite film by electron-beam scanning. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 90, 171-181. DOI : 10.1016/j.mssp.2018.10.022
- [9] Jung, E. H., Jeon, N. J., Park, E. Y., Moon, C. S., Shin, T. J., Yang, T. Y., Noh, J. H., & Seo, J. W. (2019). Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene). *Nature*, 567, 511-515. DOI : 10.1038/s41586-019-1036-3
- [10] Lin, Y., Zhan, X., & Yang Y. (2018). Non-Fullerene Acceptors for Organic Solar Cells. *Nature Reviews Materials*, 3, 18003. DOI : 10.1038/natrevmats.2017.91
- [11] Ganesan, A. A., Houtepen, A. J., & Crisp, R. W. (2018). Quantum Dot Solar Cells: Small Beginnings Have Large Impacts. *Applied Sciences*, 8(10), 1867. DOI : 10.3390/app8101867
- [12] Kim, M., Zhang, H., Qu, F., & Li, H. (2020).

Enhancement in Efficiency of CIGS Solar Cell by Using a p-Si BSF Layer. *Energies*, 13(19), 4259. DOI : 10.3390/en13194259

- [13] Lee, T. D., & Ebong, A. U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Sustainable Energy Reviews*, 76, 176-190. DOI : 10.1016/j.rser.2016.12.028
- [14] Lee, H. J., Kim, S. Y., & Moon, J. H. (2020). Flexible Perovskite Solar Cells: Achieving High Efficiency with Mechanical Durability. *Science Advances*, 6(34), 578-584. DOI : 10.1126/sciadv.aaz5074
- [15] Vak, D., Gao, M., & Chesman, A. (2023). Solar Power: Printed Flexible Solar Achieves Efficiency Record. *Nature Communications*, 11, 1234-1240. DOI : 10.1038/s41467-023-25620-1
- [16] Lee, J. W., Lee, H. G., Kim, T. S., & Li, S. (2024). Rigid and Soft Block-Copolymerized Conjugated Polymers Enable High-Performance Intrinsically-Stretchable Organic Solar Cells. *Joule*, 5, 1234-1245. DOI : 10.1016/j.joule.2023.09.012
- [17] Lee, C. H., Kim, D. R., & Zheng, X. (2014). Transfer Printing Methods for Flexible Thin Film Solar Cells: Basic Concepts and Working Principles. *ACS Nano*, 8, 8746-8753. DOI : 10.1021/nn503885k

김 무 진(Moojin Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성 디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코 (책임연구원)

- 2015년 4월 ~ 2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학 전공 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr