

박막 태양전지의 기술개발 동향

Development Trends of Thin Film Solar Cell Technologies

스마트 & 그린 융합부품소재기술 특집

윤선진 (S.J. Yun)	박막태양광기술연구팀 팀장
정용덕 (Y.D. Chung)	박막태양광기술연구팀 선임연구원
임정욱 (J.W. Lim)	박막태양광기술연구팀 선임연구원
박현균 (H.K. Pak)	에너지응용기술연구팀 선임연구원
김제하 (J.H. Kim)	차세대태양광연구부 부장

목 차

-
- I . 서론
 - II . 박막 태양전지 기술의 종류
 - III . 박막 태양전지 기술의 개요 및 기술개발 동향
 - IV . 결론

박막 태양전지 기술은 현재 가장 큰 시장점유율을 보이고 있는 결정질 Si 태양전지와 비교되는 차세대 태양전지 기술로서 큰 관심을 받고 있다. 결정질 Si 태양전지의 효율보다 높은 효율로서, 훨씬 저가로 생산할 수 있는 수준을 목표로 하여 다양한 종류의 박막 태양전지들이 개발되고 있는데, 본고에서는 그 중에서 가장 많이 연구개발되고 있는 세 종류의 박막 태양전지, 즉, 화합물 반도체 박막 태양전지 중 가장 대표적인 CIGS(Cu(InGa)Se₂) 태양전지, 지구상에 가장 풍부한 무기 소재인 Si를 기반으로 하는 비정질 Si 박막 태양전지, 그리고 유기물 기반 태양전지 중 가장 높은 효율을 나타내는 DSSC에 대해서 중점적으로 기술하였다.

I. 서론

화석 연료 사용에 따른 지구 환경의 오염, 화석 연료 고갈의 위험을 극복하는데 반드시 필요한 기술로서의 신재생에너지에 대한 인식은 더 강조할 필요가 없을 만큼 이미 큰 관심을 받고 있다. 신재생에너지 산업 중에서도 빠르게 성장하고 있는 산업이 바로 태양광 산업이다. 2004~2009년 기간 중 풍력 설비는 36%, 지열발전은 4.0%의 연평균 증가율을 보인 반면, 태양광발전 설비는 60%의 연평균 증가율을 보였다[1]. 장기적인 불경기과 더딘 경기 회복으로 인해 예상보다 다소 성장이 지연되고 있기는 하나, 수년 후에는 고용 면에서 우리나라 대표적인 산업인 메모리 산업을 능가할 것으로 점쳐지기도 한다. 태양광발전은 가장 청정하며, 무한한 태양에너지를 이용한다는 큰 장점을 가지고 있다.

국가 정책적인 면에서도 태양광 산업을 포함한 신재생에너지 산업은 지속적으로 육성되어야 한다. 지구 온난화의 규제와 방지를 위한 기후변화협약의 수정안인 교토의정서는 2005년 처음 발효된 이래 2009년 11월 시점으로 187개 국가가 비준하였으며, 한국도 2002년 11월 국회 비준 이후 2013년부터 이산화탄소 규제 대상국에 포함될 예정이다.

1970년대 오일쇼크 이후 일본, 유럽, 미국 등에서 태양전지 기술개발이 꾸준히 진행되어 온 것에 반하여, 우리나라에서는 2000년대 초 원유 가격이 크게 증가하던 시점부터 비로소 태양전지 기술개발에 대한 중요성을 인식하기 시작하였다. 현재 가장 큰 시장 점유율을 가진 결정질 Si 태양전지의 경우는 수년간 양산기술 개발에 주력하여 상용 제품 중에서는 세계 최고 수준의 효율(19% 이상)을 가지는 제품이 국내에서도 생산되고 있다.

그러나 차세대 태양전지로 분류되는 박막 태양전

지의 경우, 국내 일부 연구 그룹들이 수치적으로 세계 최고 수준에 근접한 결과들을 발표하고 있기는 하지만, 축적되어 있는 핵심 기반 기술과 경쟁력은 아직 매우 낮은 수준에 머물러 있다. 그러므로 앞으로 도래할 거대 시장을 겨냥한 태양광 발전 기술의 국가 경쟁력 확보 노력이 반드시 필요하다.

2000년 초부터 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심이 커지고 태양전지의 설치량이 급증하여 결정질 Si 태양전지의 원소재 공급 부족이 심화되자 원소재 가격이 폭등하고, 이에 따라 태양전지 모듈 단가가 크게 상승하였다. 이러한 배경으로 보다 저가의 모듈 제조가 가능한 박막 태양전지에 대한 관심이 크게 증가하였고 차세대 태양전지로서의 기술개발 투자가 본격화되었다. 그러나 2011년 현재, Si 원소재 생산 설비에 대한 과잉 투자, 장기적인 경기 불황으로 인한 시장 위축, 태양광 발전 모듈의 공급량과 설치량의 불균형으로 태양광 모듈 가격이 급격히 하락하는 등의 시장 상황으로 인해 박막 태양전지 기술개발에 대한 투자가 많이 위축되고 있는 실정이다. 하지만, 이와 같은 상황이 차세대 태양광 기술의 수준이 뒤쳐진 우리나라에서는 그 기술 격차를 단시간 내에 따라 잡을 수 있는 좋은 기회라고 볼 수 있다.

본고에서는 차세대 태양전지로 분류되는 여러 종류의 박막 태양전지에 대해 간략히 소개하고, 기술별 장단점과 기술개발 동향, 시장 전망 등에 대해 기술하고자 한다.

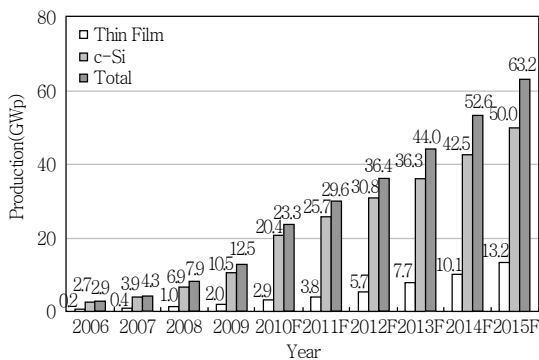
II. 박막 태양전지 기술의 종류

박막 태양전지는 소재별로 크게 화합물 박막 태양전지, Si 박막 태양전지, 유기물 기반 태양전지로 나눌 수 있다. 화합물 태양전지는 II-VI족, I-III-VI족 화합물 반도체가 대표적인 소재인데, 화합물 반도체

의 높은 광흡수율로 인해 박막 태양전지 중에서는 가장 높은 효율이 기대되고 있다. Si 박막 태양전지는 비정질 Si를 포함하여 미세결정질 Si, SiGe 소재도 포함한다. 유기염료를 이용하는 염료감응태양전지(DSSC)는 유기물 기반 태양전지의 일종으로 분류된다. 2011년 NREL에서 발표한 태양전지의 최고 효율은 CIGS 20.3%(ZSW), Si 박막 태양전지 12.5%(United Solar, 안정화 효율), DSSC 11.1%(Sharp)이다.

(그림 1)에는 결정질 Si(c-Si) 대비 박막 태양전지의 생산량을 전망한 자료를 소개하였다[2]. 이 자료에 의하면 2015년경 박막 태양전지는 전체 시장의 20.9%를 점유할 것으로 전망되며, 태양전지 종류별 시장점유율은 CIGS 4.9%, Si 박막 태양전지 7.9%, DSSC 0.38%로 예상하고 있다[2].

본고에서는 화합물 반도체 박막 태양전지 중 가장 대표적인 CIGS(Cu(InGa)Se₂) 태양전지, 비정질 Si 박막 태양전지, 유기물 기반 태양전지 중 가장 높은 효율을 나타내는 DSSC에 대해서 중점적으로 기술하였다. 각 태양전지들은 종류별로 고유한 장점과 단점을 가지며, 따라서 가장 적합한 응용 분야 역시 서로 다를 수 있다. 이에 대한 이해를 높이기 위해 기술별



<자료>: 솔라엔에너지, 2011. 1.

(그림 1) 2006~2015년 결정질 Si 대비 박막 태양전지의 생산량 전망

동작원리, 제조방법에 대해 소개하고, 기술개발 동향, 시장 전망에 대해 논의하였다.

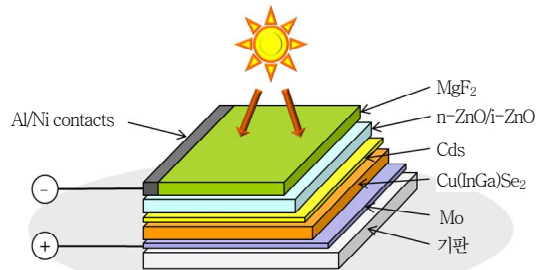
III. 박막 태양전지 기술의 개요 및 기술개발 동향

1. CIGS 태양전지

가. 동작 원리

CIGS로 대표되는 I-III-VI족 chalcopyrite계 화합물 반도체로서 직접천이형 에너지 밴드갭을 가지고 있고, 광흡수계수가 약 $1 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ 로 반도체 중에서 가장 높은 편에 속하여, 두께 1~2 μm 의 박막으로도 고효율의 태양전지 제조가 가능하다. CIGS계 화합물 반도체는 구성하고 있는 양이온(ex: Cu, Ag, In, Ga, Al etc.) 및 음이온(ex: Se, S)의 종류와 조성을 변경함으로써 결정격자 상수뿐만 아니라 에너지 밴드갭의 조절이 가능하다. CIGS 셀 및 모듈은 실외에서도 전기광학적으로 장기 안정성이 매우 우수하고, 복사선에 대한 저항력이 뛰어나서 우주선용 태양전지에도 적합하다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 유리 기판 이외에도 고분자(ex: polyimide) 및 금속박막(ex: stainless steel, Ti) 기판 위에 증착하여 플렉시블 태양전지 형태로 제조할 수 있다.

(그림 2)는 CIGS 박막 태양전지의 구조이다. 기판 위에 Mo 후면전극, 광흡수층(CIGS), CdS 버퍼층,



(그림 2) CIGS 박막 태양전지의 구조

ZnO 투명장층, 반사방지층과 그리드 전극(Al/Ni) 박막을 순차적으로 형성시켜 제작된다. 단위 박막별로 다양한 종류의 재료 및 공정이 적용되고 있다[3].

나. 제조 방법

CIGS 광흡수층의 증착을 위해 다양한 방법들이 시도되고 있으나, 크게 분류하면 동시증발법과 전구체 형성 후 셀렌화하는 공정으로 나눌 수 있다.

1) 동시증발법

동시증발법은 개별원소 Cu, In, Ga, Se들을 고진공 분위기에서 증발시켜, 고온(550~600°C) 기판 위에 증착하는 방법으로 현재 실험실 규모에서 최고의 효율(약 20%)을 확보하고 있는 공정이다. 개별 원소들의 증착량을 각각 조절하므로 생성되는 CIGS의 조성을 용이하게 조정할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 공정의 특성상 대면적화 적용 시 조성 제어에 어려움이 있다.

2) 전구체 셀렌화

첫 번째 단계에서 Cu-Ga-In 금속 전구체 혹은 Se를 포함한 전구체를 제조하고, 두 번째 단계에서 H₂Se gas 혹은 Se vapor 분위기에서 셀렌화를 진행하는 공정으로 일반적으로 '2단계 공정'이라고도 불린다. 전구체 박막을 제조하는 방법으로는 스퍼터링 공정이 가장 널리 사용되고 있지만, 가격 경쟁력 확보를 위해 전기도금, 잉크프린팅, 스프레이 열분해법 등과 같은 비진공 방법도 시도되고 있다[4].

다. 기술개발 동향

본 절에서는 국내외 CIGS 박막 태양전지 개발 동향을 소개하고자 한다.

국내 연구기관의 동향으로서, 한국전자통신연구

원에서는 소다라임 유리 기판에서 17.5% 이상의 고효율 및 스테인리스 스틸 기판에서 효율 13.95%(반사방지막 없음)의 CIGS 박막 태양전지 기술을 보유하고 있으며, 한국에너지기술연구원은 유리 기판에서 19% 및 폴리머 기판에서 7% 효율의 기술을 보유하고 있다. 한국광기술원 대구경북과학기술원 KAIST, 영남대, 중앙대, 성균관대, 충주대, UNIST 등 대학교에서 진공법 및 비진공법에 의한 CIGS 흡수층 제조 핵심 기초기술을 개발하고 있다. 또한, 나노분말을 이용한 CIS 태양전지 연구 및 탠덤(tandem) 구조에 대한 기초 연구가 수행 중이다[5].

CIGS의 높은 광변환효율 때문에 기업체에서는 상용화에 큰 관심을 가지고 있다. LG이노텍에서는 60×120cm² 면적에서 13.6% 변환효율을 보고하였으며, 2012년 120MW 양산을 준비 중이다. 삼성SDI에서는 유리 기판으로 900×1600cm²에서 16% 변환효율을 목표로 연구개발 중이다. 금호전기는 소다라임 유리 기판을 이용하여 2단계 공정으로 변환효율 12%, 면적 60×120cm² 모듈을 목표로 개발하고 있다. 현대중공업은 프랑스 생고방(Saint-Gobain)사와 기술 협력을 통해 2012년 상반기까지 100MW급 CIGS 박막 태양전지 공장을 설립할 예정이다. 대양 금속에서 금속 유연 기판을 이용한 롤투롤 공정으로 25MW 규모로 생산을 시작했다[6].

국외의 대표적인 박막 태양전지 연구기관인 미국의 NREL에서는 2000년대 이후 CIGS 박막 태양전지 분야 세계 최고 효율 기록을 지속적으로 갱신하여 유리 기판에서 19.9%, STS에서 17.5%의 변환효율을 기록하고 있다. 또한, 1.0μm의 얇은 CIGS 박막에서 변환효율 17.1%를 달성한 바 있다. 독일의 ZSW Stuttgart에서 최근 0.503cm²에서 20.3% 효율을 보고한 바 있다. 일본의 AIST에서는 3단계 증착법을 이용하여 세라믹 기판에서 17.7%, 폴리머 기판에서

14.7%, 미니모듈에서 15.9% 효율을 달성한 바 있다. 독일의 Wurth Solar에서는 진공증발법을 이용하여 CIGS 박막을 증착하고 있는데, 하향식 선형증발원을 이용하여 60×120cm²에서 최고 13%, 평균 11%의 변환효율을 확보하고 있다. HMI는 동시증발법으로 유연 기판을 사용하여 CIGS 태양전지의 효율이 15%에 도달하였다. 독일의 Avancis는 스퍼터링과 셀렌화 공정을 이용하여 평균 12.9% 효율의 모듈을 생산하는 기술을 보유하고 있다. Sulfurcell은 Cu, In 스퍼터링과 황화 공정으로 광흡수층 제작하고 있다. 독일의 Johanna Solar는 BOSCH의 관계사로서 BIPV용의 여러 가지 색으로 채색된 CIGS 모듈로 차별화를 시도하고 있다. Solarion은 폴리머 기판 위에서 Se 이온을 이용하여 저온에서 고품질의 CIGS 박막을 제작하는 기술을 보유하고 있다. Solibro는 동시증발법으로 25cm²의 CIGS 미니모듈 변환효율 16.6% 및 모듈 효율 11.4%를 확보하였다. Odersun은 구리 리본 위에 전착법을 이용하여 In, Ga 증착한 후 소성을 통한 제품 개발로 휴대용에 응용 가능한 제품을 판매 중이다. Centrotherm은 CIGS의 스퍼터링 및 열처리 공정 기반의 turn-key solution을 제공하고 있으며, 60초의 RTP 기술을 이용한 인라인 공정으로 900cm²에서 10.3%를 보고하였다. 미국의 Miasole은 60×120cm² 크기의 stainless steel 기판을 이용하여 수직 스퍼터 방법으로 CIGS 박막 태양전지를 생산하고 있다. Solopower는 유연 stainless steel 포일 기판을 사용하여 비진공 전기도금법을 이용하여 13.76% (0.48cm²), 12.25%(102cm²) 효율을 보고하였다. Nanosolar는 롤투롤 방식과 nano ink technology를 응용한 printing과 RTP 공정 사용하여 유연 금속 기판에서 16.4% 효율의 제품을 개발하였다. Global Solar Energy는 인라인 증발법과 롤투롤 공정을 이용하여 CIGS 셀 및 모듈을 생산하고 있다. Ascent

Solar는 Solarion과 유사하지만, 롤투롤과 모노리식 집적화 방법을 사용하여 유연 플라스틱 기판에서 14% 효율 달성하였고, 모듈 효율은 11.7%이다. HelioVolt는 서로 다른 두 precursor를 접합하여 고속 셀렌화를 수행하는 특허 기술로 7,200cm²에서 10.5%를 보고하였으며, 최근 SK이노베이션의 투자 결정이 이루어졌다. ISET은 롤투롤 공정을 이용하지 않는 ink-based CIGS 제작 공정으로 100cm²에서 6~7%의 비진공 공정을 개발하고 있으며, 국내 지사 설립을 통한 투자 유치활동을 벌이고 있다. 일본의 Solar Frontier(이전 Showa Shell Sekiyu)에서는 스퍼터링/셀렌화 공정으로 3,459cm²의 모듈에서 13.4%를 달성하였고, 73×92cm² 기판 면적에 효율 13%의 모듈을 생산/판매하고 있다. 1GW급 양산라인 구축계획을 발표한 바 있다. Honda Soltech는 1985년부터 자체 연구개발을 시작하였고, 스퍼터링 방식을 이용한 CIGS 태양전지로 2007년부터 시장에 출시하였으며, 모듈의 전환 효율은 12%를 확보하고 있다.

최근 발표된 주요 업체의 상용모듈 효율을 정리하면 <표 1>과 같다[7].

CIGS 박막 태양전지는 산업화를 위한 기술개발이 한창 진행되고 있으며, 차세대 기술로 다음과 같은 분야의 연구개발이 진행되고 있다.

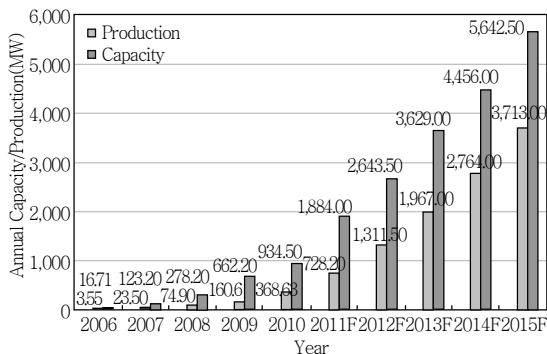
<표 1> 최근 발표된 주요 업체의 CIGS 상용모듈의 효율[7]

회사명	모듈 효율(%)
Miasole	13.1
Q-cells	12.7
Solar Frontier	12.6
Avancis	12.6
Global Solar Energy	12.6
Nanosolar(US)	12.0
New Energy Solutions	11.4
HelioVolt	11.3
Solarion	10.9
Ascent Solar Technologies	10.7

소재 및 소자 개발 분야에서는 고가의 In 소재를 대체하고자 저가 원소인 Cu-Zn-Sn-Se(또는 S) 화합물 태양전지 기술, 환경 오염 문제가 있는 Cd를 사용하지 않는 비퍼층 기술, 저가화가 기대되는 비진공 또는 롤투롤 공정 기술을 개발하고 있으며, 장비 분야에서는 대면적 선형 고속 증착장비 개발, 신개념 고속 증착장비 개발, 실시간 CIGS 박막 모니터링 기술 등이 개발되고 있다. 또한, 고효율화를 위한 탠덤형 CIGS 소자, 파장변환 기술, 양자점을 이용한 효율향상 기술 등이 개발되고 있다[8].

라. 시장 전망

CIGS 태양전지 업체들의 연구개발과 상용화의 노력으로 CIGS 태양전지 규모는 2007년 123.2MW의 생산용량과 23.5MW의 생산량에서 3년 뒤인 2010년에는 934.5MW의 생산용량과 368.6MW의 생산량을 나타내었다. 특히 2010년은 업체들의 양산화 용량 향상과 생산 수율 향상으로 인해 가파른 생산량 향상을 보였으며, 2011년에도 마찬가지로 전망된다. 또한 2011년부터 Solar Frontier, Solibro, Miasole 등 주요 업체들의 증설과 Hyundai-Avancis의 시장 진입 등의 영향으로 높은 성장률을 보여 (그림 3)에서 보인 바와 같이 2015년에는 총 5.64GW의 생산용량과 3.71GW의 생산량에 이를 것으로 전망된다[9].



(그림 3) CIGS 태양전지 모듈의 연도별 생산용량과 생산량 (2006~2015)[9]

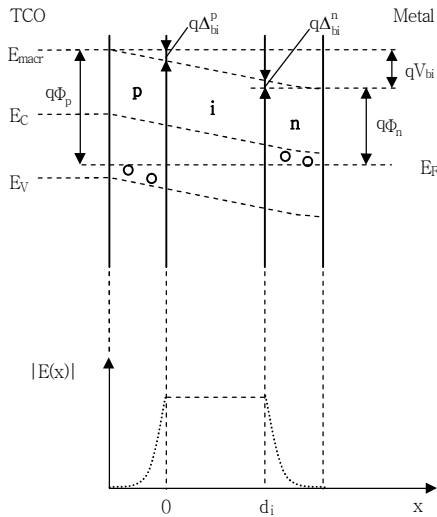
2. 비정질 Si 박막 태양전지

가. 동작 원리

Si 박막 태양전지는 결합이 많은 비정질 Si 또는 미세결정질 Si 층을 광흡수층으로 이용하므로, pn 다이오드로 구성되는 결정질 Si 태양전지와는 달리 pin 다이오드 구조를 가진다[10].

Si 박막 태양전지의 광흡수층으로 사용되는 비정질 Si와 미세결정 Si 중에서 비정질은 분자 배열의 규칙도가 낮으며 액체 상태와 비슷하다. 따라서, dangling bond와 같은 많은 결합이 존재하여 빛에 의하여 생성된 전자와 정공을 효과적으로 전달하기 위하여 결합을 제어하는 기술이 매우 중요하다. 대부분의 결합은 수소 원자를 이용하여 제거하는데, 이러한 과정을 수소 passivation이라고 한다. 기존의 결정질 Si 태양전지의 경우에는 전자와 정공의 확산거리가 충분히 길어서 pn 접합으로 제조하여 전하의 확산을 이용하여 광발전을 할 수 있지만, 비정질이나 미세결정 실리콘의 경우에는 확산거리가 매우 짧고, 도핑의 용해도가 낮아서 intrinsic층을 광흡수층으로 사용한다. p와 n층은 실제로 광흡수에 참여하지 않고 기전력만 제공하는 역할을 하는데, 특히 p층을 통해 태양광이 입사되면 이 층은 최대한 태양광을 투과해야 하는 window층이 되고 두께는 15nm 이하로 매우 얇게 제조되며, 대부분은 intrinsic 광흡수층이 차지한다.

(그림 4)는 p-i-n 구조와 전기장 및 에너지 밴드 곡선의 분포를 보여 주고 있다. 광흡수층으로 사용되는 intrinsic층 내부에는 일정한 전기장이 걸려있고, 이곳에서 생성된 전자와 정공은 전기장을 따라 각각 n-Si과 p-Si에서 수집된다. 따라서 결정질 Si이 확산에 의하여 발전이 주도되는 반면 비정질이나 미세결정 실리콘의 경우 전기장에 의한 표동(drift)으로 주도된다. 전기장은 효율적으로 intrinsic 내부에 인가



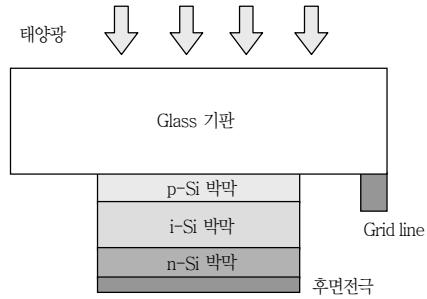
(그림 4) p-i-n 구조의 박막 실리콘 태양전지의 에너지 밴드 곡선과 전기장의 분포[10]

되어야 하는데 내부에 결함이 많이 존재하면 전기장이 제대로 걸리지 않고 손실되는 현상이 발생하여 효율 저하가 나타나므로 결함을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

기본적으로 비정질 Si는 1.7~1.8eV의 높은 에너지 밴드갭을 갖고 있기 때문에 흡수하는 파장 영역이 여타 태양전지에 비하여 좁을 수 밖에 없다. 따라서 낮은 광 변환율을 보여주고 있는데, 이를 개선하여 효율을 향상시키기 위해서는 반사방지나 재흡수 방법을 통해 빛의 이용률을 높이는 기술이 확보되어야 하며, 이를 위해서 표면 조직화(texturing)나 반사방지막, 후면반사막 등의 기술 등이 개발되고 있다[11]. 비정질 Si 광흡수층의 경우 dangling bond의 passivation의 약한 결합으로 인하여 빛을 조사하면 특성이 열화되는 광열화 현상이 관찰된다. 따라서 초기 효율 대비 최고 20% 내외의 효율 저하가 나타나며 일정 시간이 경과하면 안정화된다.

나. 제조 방법

(그림 5)는 비정질 Si 태양전지의 단면을 보여주고



(그림 5) Superstrate형의 비정질 Si 태양전지의 구조

있다. 유리 기판 위에 전극과 광흡수층이 제조되고 빛은 유리를 통해 들어오기 때문에 이러한 구조를 superstrate 구조라고 한다. 유리 기판 위에 제조되는 투명전극은 SnO:F, ZnO:Ga, ZnO:Al, ZnO:B 등이 사용되는데, 스퍼터링이나 CVD 방법이 사용되고 있다[12],[13]. 투명전극으로 가장 잘 알려져 있는 ITO의 경우에는 후속 플라즈마 공중에 노출되면 특성이 열화되므로 이 구조에서는 사용되지 않는다. 투명전극은 낮은 직렬저항과 높은 전하수집을 위하여 비저항이 낮아야 하고 광손실을 최소화할 수 있도록 투과도가 높아야 한다. 투명전극 위에 박막 Si층이 증착되는데, 정공의 이동도가 전자에 비하여 낮기 때문에 p-Si층을 빛이 들어오는 쪽에 배치한다. 따라서 p층을 먼저 증착하고 i층, n층의 순서로 증착하며, p층과 n층은 각각 B와 P를 증착 중에 주입하여 도핑한다. 보통 p와 n층은 각각 15nm, 25nm 정도로 매우 얇게 증착하며, 단일접합의 경우 i층은 300~400nm 정도로 제조한다.

실리콘 박막을 제조하는 온도는 200~300°C로 비교적 낮은 편이며 소스 가스를 수소에 희석하여 공급한다. 수소와 소스 가스의 유량의 비, 즉 수소의 희석률이 박막의 결정화도를 크게 좌우하므로 태양전지의 특성에 매우 큰 영향을 미친다[14]. n층의 제조가 끝나면 후면반사막으로 ZnO를 얇게 형성하고, 그 위에 Ag 또는 Al 금속을 후면전극으로 증착하는데,

ZnO는 후면에서 반사를 증진시켜 빛의 재흡수를 도와준다.

Superstrate형의 경우 큰 유리 기판 위에 Si 박막 태양전지를 제조할 때, 투명 전극, Si층, 금속 전극을 각각 레이저를 이용해 일정 간격으로 패터닝함으로써 한 장의 큰 태양전지 모듈이 만들어지는데, 현재 1.1×1.3m의 5세대급 Si 박막 태양전지가 주로 생산되고 있다.

상기 superstrate형의 역전 구조인 substrate형 Si 태양전지도 생산되고 있다. Substrate형은 불투명 기판을 사용하므로 상부에 투명전극이 형성되어 기판의 반대 방향에서 태양광이 입사되는 구조이다. 대표적인 기업인 Uni-Solar는 스테인레스 스틸 유연 기판 위에 삼중접합 구조로 생산 중이며, Fuji Electric, PowerFilm 등에서 폴리이미드 기판 위에 유연성 태양전지를 제조하여 판매하고 있다.

다. 기술개발 동향

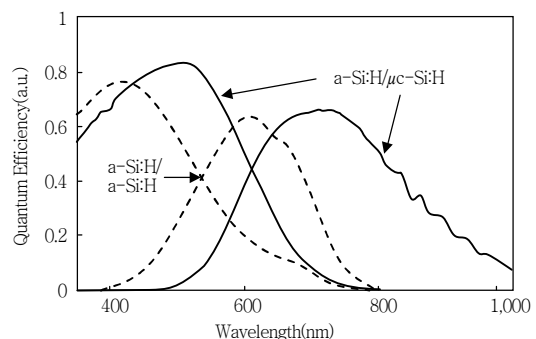
Si 박막 태양전지는 무기 소재 중 지구상에 가장 매장량이 많고 저렴한 Si를 사용하며, 화학적, 물리적 안정성이 우수하고, 독성이 없는 등 많은 장점을 가지고 있다. 특히 결정질 Si 태양전지에 비해 소재 의존율이 매우 낮으며, 우리나라가 특히 경쟁력을 가진 Si 반도체 공정기술을 이용할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 Si가 광흡수 계수가 낮고 간접천이형 물질이므로 고효율을 얻기 어려운 단점이 있다. 그래서 Si 박막 태양전지 기술 분야는 저가로 고효율을 얻기 위한 기술개발에 초점이 맞춰져 있다.

고효율을 얻을 수 있는 방법으로는 가능한 한 많은 태양광을 흡수하여 발전에 이용할 수 있도록 할 수 있는 두 종류의 접근방법이 있다. 첫번째는 광흡수층 내에서 광의 경로를 길게 하여 빛이 많이 흡수되도록하고 표면에서 반사율을 최소화하는 광캡처 기

술이다. 또 다른 접근방법은 다중접합 구조를 이용하는 것이다. 삼중접합의 경우를 예로 들면, top cell은 단파장 광을, middle cell은 중파장, bottom cell은 장파장 광을 이용하는 원리이다.

단일접합으로 제조되는 박막 Si 태양전지는 cell 기준으로 초기 효율 10~11%, 안정화 효율 8~9% 정도를 보여 주고 있는데, 모듈의 경우 6~7%의 효율을 나타낸다. 이 보다 높은 효율을 얻기 위해 다중접합 태양전지가 연구되고 있다. 특히 이중접합의 탠덤 구조가 많이 개발되고 있는데, 대표적인 탠덤 구조 셀의 파장에 따른 양자효율을 (그림 6)에 소개하였다. Top cell과 bottom cell 모두에 광흡수층으로 비정질 Si를 사용한 경우에 비해 밴드갭이 서로 많이 다른 비정질 Si(약 1.7eV)와 미세결정질 Si(약 1.1eV)를 각각 사용할 때 더 넓은 파장영역의 빛을 활용할 수 있음을 잘 보여주고 있다.

높은 에너지 밴드갭을 갖는 비정질 Si와 낮은 에너지 밴드갭을 갖는 미세결정 Si를 직렬로 연결하는 ‘micromorph’ 구조는 보다 넓은 파장 대역을 흡수할 수 있고, 단일 접합에 비해 개방전압도 향상된다. 이 경우 현재 5세대급의 면적에서 안정화 효율이 12% 가까이 얻어지고 있어서 저비용화와 기술개발이 이루어지면 태양전지 시장에서 경쟁력을 갖출 것으로 판단된다. 삼중접합의 경우 보다 높은 효율 상승이 기



(그림 6) 이중접합 태양전지의 파장에 따른 양자효율의 변화 [15]

대되나 제조비용이 상승되는 단점이 있다.

현재까지 Uni-Solar와 Sharp, Kaneka 등에서 다중접합 태양전지가 대면적에서 개발되었으며, 대부분의 회사에서 micromorph 구조를 형성하여 제작하였다. 현재까지 개발된 주요 모듈의 면적과 효율을 <표 2>에 나타내었다[10]. 최근 EUPVSEC 학회에서 발표된 연구 동향을 살펴보면 Sanyo에서 micromorph 구조로 1cm²의 소면적에 안정화 효율 12.7%를 달성하였고, Uni-Solar에서 3중접합으로 0.25cm²의 소면적에서 16.3%의 초기 효율을 얻기도 하였다. 또한 Oerlikon에서 textured glass를 사용하여 소면적에서 micromorph 구조로 안정화 효율 12.3%를 얻었음을 발표하였다. 지속적인 효율 향상 결과들이 속속 보고됨에 따라 향후 대면적에서 12%에 육박하는 안정화 효율을 얻을 것으로 기대되며, 보다 고효율의 micromorph 태양전지가 상용 모듈로 제작될 것으로 전망된다.

국내에서는 한국철강(20MW), 알티솔라(25MW)에서 생산라인을 보유하고 있다. 박막 Si 태양전지를 연구하는 정부출연연구기관으로는 한국에너지기술연구원, 한국전자통신연구원 등이 있으며, 한국과학기술원, 고려대학교, 성균관 대학교 등에서도 다년간 연구를 수행하고 있다. 한국전자통신연구원에서는 현재 단일접합 Si 태양전지로 p-Si:H window 층과 Al 전극을 사용하여 효율 9.8%를 얻은 바 있으며, Si/SiGe 텐덤셀 기술과 다양한 접근 방법을 통해 광

<표 2> 주요 회사의 대면적 모듈 구조, 크기 및 효율[10]

회사	Cell 구조	면적(m ²)	효율(%)
Kaneka	Micromorph	1.43	9.1
Inventux	Micromorph	1.58	8.3
Sharp	Micromorph	1.78	8.4
Sunfilm	Micromorph	5.72	8.6
Mitsubishi	Micromorph	1.58	8.3
Uni-Solar (Flexible)	a-Si/a-SiGe/a-SiGe	2.16	6.7

캡처 기술을 개발하고 있다.

라. 시장 전망

현재 대부분의 태양전지 시장은 결정질 Si 태양전지가 점유하고 있고, 그 중 일부를 박막 태양전지가 점유하고 있다. 최근 폴리실리콘 가격 하락이 지속적인 결정질 Si 태양전지의 시장 점유율 유지에 기여하고 있다. 하지만, 박막 태양전지의 시장 점유율 또한 가파르게 상승하고 있는 추세이다. 지난 2010년 결정질 Si 태양전지의 경우 87.7%, 박막 태양전지는 12.3%의 시장 점유율을 보였다. 2015년에는 박막 태양전지의 시장 점유율이 20.8%로 상승할 전망이다[2]. 비정질 Si 박막 태양전지의 경우 2012년에 6.1%, 2015년에는 7.9%로 상승할 것으로 기대된다[2]. 시장 위축과 공급과잉으로 단가가 크게 낮아짐에 따라 당분간은 수량 성장에 비하여 수익성 면에서는 고전할 것으로 예상되나, 수년 내에 이러한 불리함이 해소될 것으로 전망하고 있다.

비정질 Si 태양전지는 대면적화의 공정에 진입하는 장벽은 낮은 편이나 효율을 높이고 공정단가를 낮추는 것이 관건이다. 미세결정 Si의 증착 속도를 높이고 두께를 낮추어 공정비용과 시간을 줄이는 것이 경쟁력 확보에 중요한 요소이다.

하지만, 풍부한 소재와 무독성 및 우수한 내구성은 실리콘 박막 태양전지의 매우 큰 장점이며 대면적 양산에 진입하는 장벽도 매우 낮은 편이다. 비정질 Si 태양전지의 또 다른 장점은 바로 낮은 온도계수와 빛의 강도에 따른 효율 저하가 거의 없다는 것이다. 날씨와 장소에 대한 발전량의 변화가 적어 결정질 Si 태양전지에 비하여 실효 효율이 높은 이러한 요소들은 큰 장점이 된다.

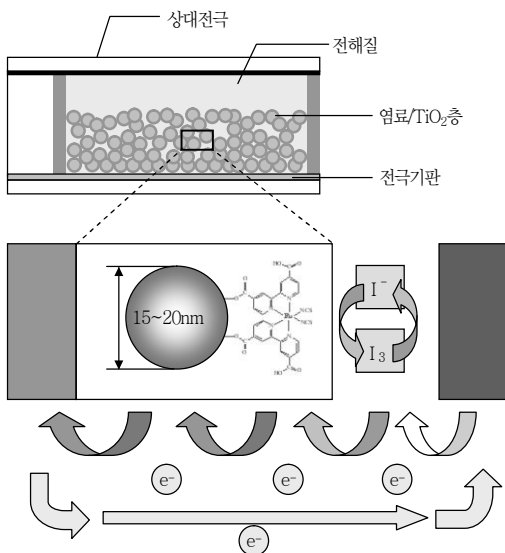
특히, Si 박막 태양전지는 제조 공정의 온도가 낮고, 롤투를 공정이 가능하므로, 기존에 결정질 Si 태

양전지로는 구현이 힘든 유연 기판(flexible substrate) 기반의 시장 진입 장벽은 다른 박막 태양전지에 비하여 매우 낮다. 그래서 스테인레스 스틸 기판 위에 유연성 Si 박막 태양전지를 생산하고 있는 Uni-Solar는 상대적으로 낮은 효율에도 불구하고 Si 박막 태양전지 생산업체들 중 가장 시장 점유율이 크다. 이러한 유연성 Si 박막 태양전지는 앞으로 건물일체형 태양전지가 본격화되면 수요가 폭발적으로 증가될 것으로 기대되고 있다. Si 박막 태양전지 전체 시장도 현재는 결정질 Si 태양전지의 저가화로 본격적인 시장 점유가 늦어지고 있지만, 향후에 grid parity 도달과 더불어 수요가 급격히 증가할 것으로 전망된다.

3. 염료감응 태양전지

가. 동작 원리

(그림 7)은 일반적인 염료감응 태양전지(DSSC)의 구조 및 동작 원리를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이, 가장 일반적인 형태의 DSSC는 적어도 한 쪽 이상이 투명한, 두 장의 전도성 기판 중 한 면에 일전



(그림 7) 일반적인 DSSC의 구조 및 동작 원리

극을, 다른 한쪽에 상대전극을 두고, 그 사이에 전해질을 포함하도록 구성한다. 일전극은 이산화티타니아 나노입자를 전도성 기판 위에 소결하고, 그 소결된 입자 표면에, 빛을 받아 전자를 내어놓는 염료 분자를 흡착시켜 구성한다. 상대전극은 전도성 기판 표면에 백금이나 탄소 등, 전자를 잘 내어 줄 수 있는 촉매를 고정한다.

투명 기판을 통과한 빛을 흡수한 염료는, 전자를 이산화티타니아 입자로 전달하고, 이렇게 발생한 전류는 외부 회로에서 일을 한 뒤에, 다시 상대전극의 촉매를 통해, 전지 내부에 있는 전해질에 전달된다. 전해질은 산화/환원 반응을 통해, 다시 염료 분자에 전자를 전달함으로써 전체 회로를 완성하게 된다.

나. 제조 방법

DSSC는 통상적인 반도체 태양전지에 비해 비교적 간단한 공정, 낮은 순도의 소재, 저가의 장비 등으로 제조가 가능한 장점이 있다. 일전극의 경우, 이산화티타니아 페이스트를 전도성 기판 위에 screen printing 또는 doctor blade 방식으로 코팅한 후에 약 450~550°C로 가열하여 소결한 뒤에, 염료 용액 속에 넣어, 염료 분자가 이산화티타니아 표면에 흡착되도록 하여 만든다. 다양한 염료 분자를 이용할 수 있으나, 가장 일반적으로는 루테튬 금속에 유기 리간드가 배위되어있는 염료가 적용된다.

상대전극은 전도성 기판 표면에 백금을 sputtering 하거나, 이온성 백금 용액을 450~550°C에서 환원시켜 제작한다. 백금을 사용하지 않을 경우에는 탄소 나노튜브나, 카본 블랙 등 탄소 계열의 촉매가 사용되기도 한다.

이렇게 제조한 두 전극을 서로 마주보도록 접합하고, 그 사이에 전해질을 주입하고 봉입하는데, 현재로서는 요오드 계열의 전해질이 가장 많이 적용된다.

다. 기술개발 동향

DSSC의 개발은 고효율화, 고내구성화, 저가화, 디자인성의 개선 등을 목표로 진행되고 있다. 이를 위해서 전극, 염료, 전해질, 봉지재 등 각 소재별로 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

염료의 경우, (그림 8)에서와 같이, N3, N719 등, 루테늄-유기분자 화합물 형태의 분자가 효율 및 내구성 면에서 우수한 성능을 보이고 있어, 가장 흔하게 사용되고 있다. 또한, 이러한 염료의 리간드에 흡수성 작용기를 부착해서, 염료의 탈착을 최소화해서 전체 염료감응 태양전지의 내구성을 높이는 염료(Z907), 나아가 이처럼 내구성을 높임과 동시에, π-전자를 갖는 작용기를 부착하여, 흡수되는 빛의 파장대에도 영향을 미치는 등(TG6) 다양한 염료가 개발되어 적용되고 있다.

또한, 고가의 루테늄 금속을 사용하지 않고, 다양한 색상의 염료를 개발할 수 있는 장점이 있는 순수 유기 염료도 개발되고 있다.

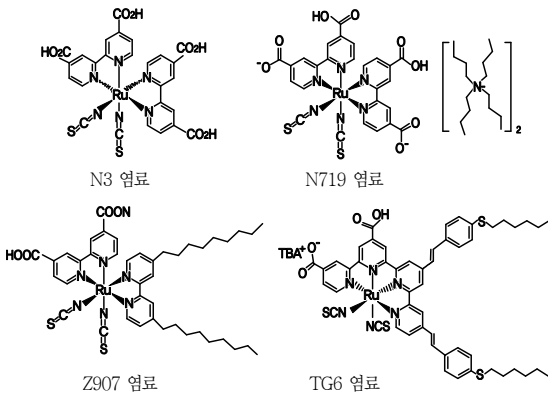
전해질로는, 산화 환원 반응을 일으키는 종으로 I⁻/I₃⁻를 사용하는 것이 보편적이다. 단지 최고 효율을 얻기 위해서는 acetonitrile 용매를 주로 사용하지만, 끓는점이 82°C로 매우 낮기 때문에, 내구성 문제를 해결하기 위해서는 효율 면에서 다소 불리하더라도

끓는점이 높은 용매를 사용하거나, 나아가서는 고형화시킬 필요가 있다. Ionic liquid를 사용하는 방법, gel 형태의 전해질을 이용하는 방법, 전해질과 무기물의 nanocomposite를 사용하는 방법뿐 아니라, 전도성 고분자를 이용하는 방법 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

이산화티타니아의 크기와 형상을 조절하여 효율을 향상시키려는 노력도 있다. 일전극에서 흡수되지 못하고 투과되는 빛을 산란시켜서 재활용하기 위해서, 통상적으로 사용하는 이산화티타니아 입자(약 20μm)보다 큰 입자층(200~400μm)을 적용하기도 하며, 전자의 전달을 원활하게 해서, 전해질과의 전자 재결합을 최소화해 효율을 향상시키기 위해, 나노튜브 형태의 이산화티타니아 구조를 사용하기도 한다.

DSSC의 전극 기판으로는, 통상적으로 불소를 첨가한 산화주석층을 전도막으로 사용한 판유리를 사용한다. 그러나, 이는 유연한 형태의 염료감응 태양전지로 만들 수 없으므로, 이산화티타니아 나노입자를 유연한 금속 기판에서 소결시키는 방법 등이 사용된다. 가장 손쉬운 방법은 티타늄 포일을 일전극의 기판으로 사용하는 것으로, 이는 G24i 등에서 상품화에 적용되는 소재이기도 하다. 다만, 티타늄 포일은 가격이 다소 고가이므로, 스테인레스 포일을 사용하거나, 기타 다른 금속의 표면을 코팅하여 사용하는 방법도 개발되었다. 전체 구성이 유연성을 갖기 위해서는 상대전극도 유리 기판이 아닌, 유연한 투명 고분자 필름에 인듐-산화주석을 입힌 전도성 필름을 사용한다.

이처럼 일전극을 금속 기판으로 구성할 경우, 높은 온도에서의 이산화티타니아의 소결 처리는 가능하지만, DSSC의 특징점이라 할 수 있는 반투명한 구성을 만들 수는 없다. 따라서, 반투명하면서도 유연한 DSSC를 만들기 위해서는 일전극 또한, 금속 포일이 아닌, 전도성 필름을 적용하여야 하며, 이 경우, 고온



(그림 8) 다양한 Ru 계열 염료

소결은 불가능하기 때문에, 낮은 온도에서 고압으로 압착하거나, 나노입자 간에 결합제를 사용하는 방법 등을 적용한다.

라. 시장 전망

DSSC는 국내의 기업에서 많은 개발이 진행되고 있으나, 완제품의 시장 판매는 아직 미미한 상황이다. 영국의 G24i에서는 유연 기판을 사용한 휴대용 전원 공급기를 생산하고 있으나, 실제 매출 규모는 파악되지 못하고 있다. 일본에서는 Sharp, Sony, Toyota, Fujikura 등의 기업들이, 국내에서는 삼성 SDI, 동진 세미켐, 이진창호, TG에너지, 상보 등에서 꾸준히 연구개발을 하고 있으나, 아직 시장에 대량 진출은 이루어지지 않고 있다.

상대적으로 낮은 효율과 안정성 문제가 해결되고 나서, 본격적인 규모의 경제가 도달하기 전까지는, DSSC 관련 시장은 완제품보다는 개발용 원재료 위주로 유지될 가능성이 높아, 연구개발을 위한 기초 소재 시장이 먼저 활성화되고 있다. 대표적인 해외 기업으로는 스위스의 Solaronics와 호주의 Dysol이 DSSC용 소재 전반에 대해 공급하고 있다. 각 소재별로 특화된 기업으로는 대만의 Everlight Chemical에서는 염료를, 일본의 CCIC에서는 이산화티타니아를 생산하고 있다. 국내에서는 이앤비 코리아가 이산화티타니아를 생산하고 있고, CSelsolar와 오염산업에서 염료를 생산하고 있다.

IV. 결론

본고에서 차세대 태양전지인 CIGS 태양전지, 비정질 Si 박막 태양전지, DSSC에 대해서 소개하였다. 앞 절들에서 기술한 바와 같이 각 태양전지 종류별로 그 특성이 매우 다르고 장단점이 서로 다르다. CIGS 태

양전지는 고효율 면에서, Si 박막 태양전지는 소재의 풍부함과 안정성 면에서, DSSC는 제조공정이 간단하고 저가화에 유리하다는 장점들을 가지고 있다. 이러한 박막 태양전지 기술개발은 단점을 극복하고 고효율화와 저가화를 달성하기 위한 방향으로 이루어지고 있다. 위에 소개한 태양전지를 포함한 차세대 태양전지들 중에서도 무기소재 기반 태양전지의 경우 단기적이고 집중적으로 기술을 개발하여 조기에 상용화하는 것을 목적으로 하며, 유기소재 기반 태양전지의 경우 소재의 안정성을 확보하고 초저가화를 목표로 장기적으로 접근하고자 하는 큰 흐름을 따르고 있다고 볼 수 있다. 지구상에서 얻을 수 있는 에너지 중 가장 청정하고 고갈되지 않는 태양에너지를 활용하는 태양전지 기술의 개발 필요성은 더 이상 강조할 필요가 없겠으며, 그 시장의 잠재력과 성장 가능성은 그 어느 기술보다 크다.

이러한 태양전지 기술의 개발은 국가 경쟁력 확보를 위해서도 매우 중요하다. 아직 개발하여야 할 숙제를 많이 안고 있는 차세대 기술인 박막 태양전지 기술개발에 대한 투자와 지원이 적기에 이루어질 경우, 앞으로 우리나라 박막 태양전지 기술이 우리나라 경제를 견인하는 주요 동력이 될 것으로 예상된다.

약어 정리

BIPV	building integrated photo-voltaic, 건물통합형 태양광 발전 시스템
CIGS	Cu(InGa)Se ₂
DSSC	dye sensitized solar cell
NREL	National Renewable Energy Laboratory 미국 신재생에너지국립연구소

참고 문헌

[1] IEA(International Energy Agency), "Clean En-

- ergy process Report,” 2011.
- [2] Solar & Energy, “플렉서블 박막 태양전지 기술 및 시장전망(2006~ 2015),” 2011.
- [3] 한국전자통신연구원, CIGS 박막 태양전지 기술 연구, 2009.
- [4] 한국에너지기술평가원, 비진공 프린팅법을 적용한 CIGS 박막 태양광 서브 모듈 개발, 2011.
- [5] 김제하 외, “박막형 태양전지 기술 및 산업 동향,” 전자통신동향분석, 제23권, 제6호, 2008.
- [6] 지식경제부, 고효율 장수명 금속 유연기판 CIGS 박막 태양전지 및 모듈 양산 기술 개발, 2009.
- [7] <http://www.solarplaza.com/>
- [8] 박진호, “태양광 산업 현황과 기술개발 주요 이슈,” 그린에너지 기술, 통권 2호, 2011
- [9] Solar & Energy, CIGS 박막 태양전지 생산용량과 생산량 전망(2006~ 2015), 2011.
- [10] A. Shah, Thin-Film Silicon Solar Cells, EPFL Press, 2010.
- [11] J.-M. Lee et al., “Texturing of Ga-Doped ZnO Transparent Electrode for a-Si:H Thin Film Solar Cells,” *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 14, no. 11, 2011, pp. B124-B126.
- [12] J.K. Kim et al., “High-Performance Transparent Conducting Ga-Doped ZnO Films Deposited by RF Magnetron Sputter Deposition,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, 2010, pp. 04DP09.
- [13] 윤선진, 김준관, 임정욱, “마그네트론 스퍼터 증착법으로 증착한 ZnO계 투명전극의 특성과 응용,” *인포메이션디스플레이*, 11권, 5호, 2010, pp. 23-32.
- [14] J.K. Kim et al., “Effect of Deposition Conditions and Crystallinity of Substrate on Phase Transition of Hydrogenated Si Films,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 7, 2011, pp. D430-D434.
- [15] A.V. Shah et al., “Thin-film Silicon Solar Cell Technology,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 12, 2004, pp. 113-142.