

# 고효율 Solar Cell 기술개발동향

## I. 서론

태양광 발전의 매력은 다른 발전방식과는 달리 대기오염, 소음, 발열, 진동 등의 공해가 전혀 없는 청정기반 에너지원이며, 고갈의 염려가 없는 무한한 에너지 원천이다. 태양광발전시스템은 넓은 설치면적이 필요하고, 발전단가가 상대적으로 높은 단점이 있기 때문에, 태양광발전기술의 궁극적인 실용화를 위해서는 기존발전방식과 경쟁 가능한 가격 수준의 저가, 고효율화 기술개발과 그에 따른 시장개척이 필요하다.

1956년에 고순도 단결정 실리콘 제조 방법이 개발되어 Bell 연구소에서 최초로 4% 효율의 단결정 실리콘 태양전지를 만들었고 1960년대 미국과 소련이 우주개발 경쟁을 하면서 실리콘 태양전지는 인공위성의 전원 장치의 중요 핵심 소자로서 많은 연구가 이루어졌다. 그 후 다소 둔화되다가 1970년 에너지 위기에 직면하면서 미국 정부와 산업계에서 지상용 전

---

**태양전지의 효율은 셀의 효율과 모듈 효율로 구분한다. 셀의 효율이 아무리 좋아도 후속 공정의 잘못으로 최종 광효율이 저하된다. 이것이 모듈 효율이다.**

---

력으로 본격적으로 도입이 시도되었으며, 1980년대에는 단결정 실리콘 태양전지 제조 기술의 급격한 발전으로 광변환 효율이 20%까지 증진되었다. 그 후 태양전지는 효율 향상과 대면적화, 대량생산화 되면서 생산 단가가 계속 낮아져 산업화에 성공하였다. 현재 태양전지 산업의 90%를 실리콘 태양전지가 차지하고 있지만 2000년 이후 실리콘 태양전지의 효율이 한계치에 도달하고, 갑작스러운 수요 증가로 실리콘 원재료 및 실리콘 기관 수급 문제가 발생하여 태양전지 제조 단가가 상승하게 됨으로써, 태양전지는 제조 단가 절감과 효율 향상 문제 이외에도 원자재 수급 등을 해결해야 하는 문제가 생겼다. 태양전지의 효율증가



이 해수  
(주)삼민산업

는 태양광 발전 시스템의 제조 단가를 낮추는 효과도 있지만 발전 단가를 낮추는 중요한 변수이다. 따라서, 태양 에너지를 지상 전력용으로 도입을 확대하기 위해서는 태양전지의 고효율화 기술과 저가화 기술이 중요한 핵심 기술이라고 할 수 있다.

핵심기술은 무엇보다도 태양전지의 고효율화와 저가격화이므로, 요소요소의 재료, 원재료의 제조법에서부터 전지의 구조, 접합형성기술, 모듈화에서 시스템에 이르기까지 실제로 여러 가지 연구개발 노력이 중첩되어 있다. 본고는 이런 견지에서 현존하는 태양전지에 대하여 알아보고 고효율화 방법과 차세대 태양전지 제조기술에 대하여 살펴본다.

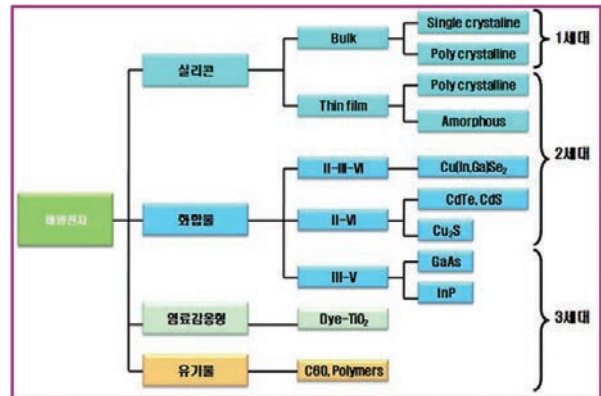
## II. 본론

### 1. 태양전지 종류와 현황

태양전지는 <표 1>에서와 같이 크게 실리콘계, 화합물계, 기타 태양전지로 구분할 수 있다. 세계 태양전지 산업계의 현황은 실리콘(Si)계 태양전지가 세계 생산량의 95% 이상을 차지하고 있으며, 실리콘계 중에서도 단결정과 다결정 실리콘 태양전지가 세계 생산량의 88% 이상을 차지하고 비정질 Si 태양전지는 5% 내외를 차지하고 있다. 실리콘 이외의 태양전지로서 CdTe, CIS, GaAs 등은 전체를 합하여 약 5%이며 아직 시장지배 태양전지는 아니다. 결국 Si-based

<표 1> 태양전지의 종류와 변환 효율

태양전지의 종류		반도체 재료	변환 효율(%)	
			Cell	Module
실리콘 태양전지	결정계	Single-Si	15~24	10~14
		Poly-Si	10~17	9~12
	비정질계	a-Si a-SiCa-SiGe	8~13	6~9
화합물 반도체 태양전지	2원계	GaAs, InP	18~30(GaAs)	-
		CdS, CdSe	10~12(기타)	-
	3원계	CuInSe <sub>2</sub>	10~12	-
유기반도체 태양전지		멜로시아닌 프탈로시아닌	1 이하	-



<그림 1> 세대별 태양전지 개발 동향

시장을 생각한다면 가격과 공정과정 공정장비 인력들을 감안한다면 아직도 태양전지 기술개발은 Si-based 기술에 의존할 수 밖에 없다<sup>[1]</sup>. 문제는 고효율 태양전지 개발을 위해 무엇이 선행되어야 하는지 지속적 기술개발이 필요하다.

<표 1>에서 보는바와 같이 이원계 반도체(GaAs) 계열이 효율은 높지만 공정 단가가 너무 높다는 단점이 있다.

현재 우주 산업에서는 단가는 높지만 이원계 화합물을 사용 중이다. 하지만 지상에서의 태양전지 고효율 부분의 증진 방안은 유향한 자원인 이원 반도체 화합물 보다는 Si-based 반도체의 물질 채용을 요구하고 있다.

일반적인 태양전지의 세대별 개발 모습은 <그림 1>과 같다.

<그림 1>에서 Si-based 모습이 다소 다른 물질재료에 효율 면에서 미흡해 보인다. 그러나 시장화를 위해서는 아직 Si-based 태양전지가 대세이다. 문제는 이런 가격과 효율 면의 이중성격적 문제를 해결 할 수 있는 방법을 부단히 연구되어야 한다. 그리고 고가의 태양전지 경우 환경과 신재생 그린에너지(green energy) 개발 방법을 찾아야 한다. 본 고에서 이 부분에 대하여 기초적인 자료를 제공하고자한다.

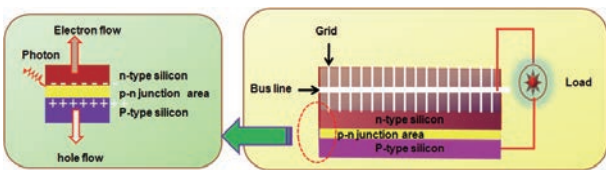
**직접반도체는 동일한 밴드의 전도대에서  
가전대로 천이되는 반도체이다.  
간접반도체는 서로 다른 밴드에서  
일어나는 광전인데 밴드간 간접 천이로  
인해 광효율이 저하된다.**

## 2. 태양전지 동작의 기본원리

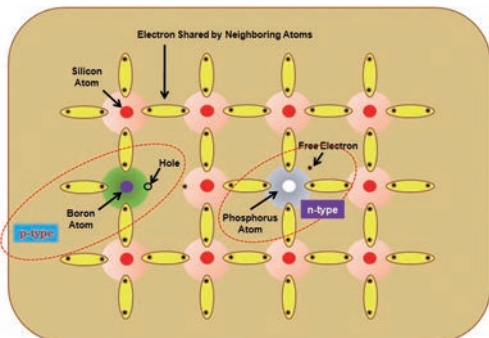
태양광 발전의 핵심 소자인 태양전지의 구조는 <그림 2>와 같이 pn 접합으로 구성된 반도체 소자에 금지대폭보다 큰 에너지를 가진 파장영역의 태양광이 입사되면 광에너지에 의해 전자-정공 쌍이 여기 되고, 내부전계에 의해 분리된 전자와 정공이 이동하여 n층과 p층을 각각 음극과 양극으로 대전시킴으로써 기전력이 발생하며, 외부에 접속된 부하에 전류가 흐른다. 즉, 태양전지는 빛을 전기에너지로 변환하는 발전소자이다.

여기서 먼저 인식되어야 하는 부분이 pn 형성을 위한 물학적 개념이다. 그 도시도가 <그림 3>에 도시되어있다.

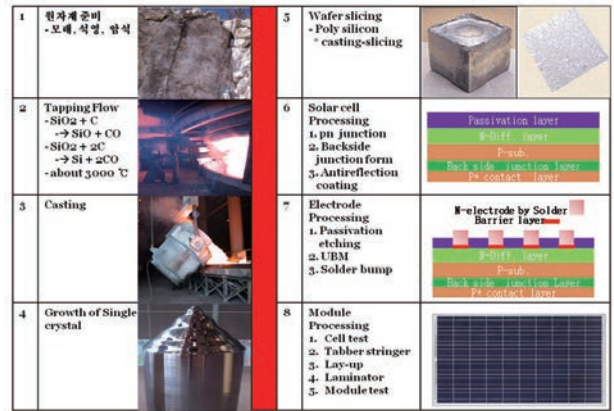
<그림 3>이 도시하는 개념은 반도체의 p-type과 n-type 형성도를 설명하고 있다. 기본 적인 개념은 Octar-rule이다. 무슨 물질이 결합하던 이 규칙은 기본이다. 그래서 반도체를 우리가 구분하길 2-6족, 3-5족, 4-4 족 결합으로 나눈다. 더욱 중요한 사실은 그 결합물질이 직접 반도체인지 간접반도체인지 구분할 뿐이다. 직접 반도체는 광소자와 연결되고, 간접반도체는 전기소자와 연결된다는 차이점이 있을 뿐이다. 직접반도체의 경우 광효율이 뛰어나다. 반면 간접반도체의 경우 그렇지 못하다. 이에 대한 설명은 세심한 사항이 필요하기에 본 고에서는 생략하겠다. 중요한 것은 소자 형성에 필요한 p-n



<그림 2> 태양전지 발전원리



<그림 3> Si-based 태양전지 p-n 접합다이오드 형성 기본적 개념도



<그림 4> 태양전지 제작 공정 및 모듈 형성 공정 흐름도

접합에 대한 이해에 도움이 되고자 한다. 우선 이해할 개념은 Si-based 태양전지의 제작과 소자 기술이 기본이다.

## 3. Si-based 결정형 태양전지의 제작

태양전지의 구성에 있어서 물질에 따라 제작기술이 다양하다. 본 고에서는 Si-based 태양전지의 제작공정에 대하여 살펴본다. <그림 4>에 전체적인 공정흐름도가 도시되어 있다.

## 4. 박막형 태양전지

### 가. 실리콘 박막 태양전지

실리콘 박막 태양전지의 역사는 1969년 이전 시기로부터 올라가며 초기에 아몰포스(amorphous) 실리콘 박막을 스퍼터링(sputtering) 등의 방법으로 증착하는 것으로부터 시작된다. 이 시기에는 막 내부에 아몰포스 특유의 결합이 있어서 소자로서 사용할 수 있는 수준은 아니었다. 1969년 실란(SiH<sub>4</sub>) 가스를 기반으로 Glow discharge를 이용하여 수소화 아몰포스 실리콘 박막을 증착하게 되면서 비수소화 아몰포스 실리콘에 비해 결합밀도가 낮아졌고 소자특성을 구현할 수 있는 박막을 증착하게 된다. 1975년에는 phosphine과 diborane을 이용하여 p와 n 도핑을 할 수 있는 기술이 개발되었고,<sup>[2]</sup> 1976년 효율이 1~2% 대의 실리콘 박막 태양전지가 개발되었다.<sup>[3]</sup> 실리콘 박막 태양전지의 상업적인 응용은 1979년 산요사가 전자 계산기에 도입하는 데 성공하였고, 이후 오늘날의 TFT-



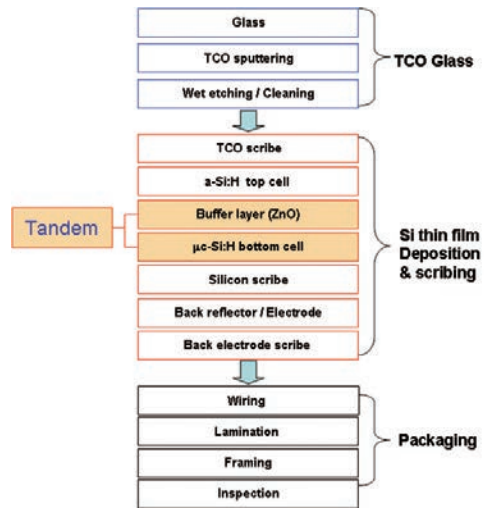
LCD 기술의 토대가 되었으며 태양전지 산업이 급격히 발달과 동행하여 실리콘 박막 태양전지 기술의 지속적인 성장이 예상된다.

실리콘 박막은  $\text{SiH}_4$ 와  $\text{H}_2$ 의 혼합 가스를 주입하고 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 방법으로 증착하게 되며, 여러 주변 성막 조건이 고정된 하에서  $\text{H}_2$  가스 분량이 총 가스에서 차지하는 양에 따라 크게 아몰포스, Poly, 3종류의 박막이 증착될 수 있다. 아몰포스 상(Phase)은 전혀 결정상을 포함하고 있지 않은 상태이며 원자들의 배열이 비방향성 결합 구조(random network)를 형성하고 있다. 마이크로 결정(Micro)은 아몰포스와 결정상 모두가 구조 내에 존재하나 그 기본 형상의 크기가 20 nm 가량이 된다. 반면 폴리 결정(Poly)은 결정만으로 구성되어 있다.

제 1세대는 단일 접합구조(Single Junction)로 아몰포스나 마이크로 실리콘 중 하나의 박막을 광 흡수층으로 하는 박막형 태양전지이다. 가장 단순한 구조이면서 제조 원가가 매우 싸다는 장점이 있으나 안정화효율이 6~7% 대로 그리 높지 않다. 안정화 효율을 정의하는 이유는 아몰포스 박막이 광의 흡수에 따라서 열화되는 특성을 보여주기 때문이다. 열화특성은 박막의 증착 조건이나 사용된 장비의 사양 및 소자의 구조에 따라서 차이가 나겠지만 대략 초기 효율의 15~25% 가량 열화되는 특성을 보여주며 열처리에 따라서 원래 초기 효율이 회복되기도 한다.

제 2세대형 실리콘 박막 태양전지의 구조는 아몰포스와 마이크로 실리콘 박막의 두 개 광흡수층을 갖는 이중 접합 효과가 매우 크기 때문에 세계적으로 이 구조에 대한 연구가 크게 각광받고 있다. 생산성이 확보된 12% 이상의 상용모듈의 경우 태양광 발전소용 뿐만 아니라 지붕형 태양전지에서도 큰 파급효과를 가져올 것으로 예상하고 있다. 현재 지붕형 태양전지는 태양전지 모듈 시장의 절반 이상을 차지하고 있고 12% 대 이상의 높은 효율을 요구하고 있다.

제 3세대형 박막태양전지는 아몰포스 실리콘 박막, 아몰포스 실리콘 저마늄(a-SiGe:H), 및 마이크로 결정 실리콘 박막을 각각 광흡수층으로 사용하는 삼중접합(Triple Junction Cell) 구조를 가지고 있다. 이러한 구조



〈그림 5〉 실리콘 박막 태양전지 모듈을 제작

는 소형 Cell에서는 15% 이상의 높은 효율을 얻을 수 있으나 대면적 제품에서는 아직 12% 대 이상의 높은 효율을 보여주지 못하고 있다. 제조원가 측면에서 보면 아몰포스 실리콘 저마늄 공정에 의한 추가적인 설비가 요구되기 때문에 감가상각비 측면에서 다소의 증가 요소를 갖고 있지만 효율에서 보상을 할 수 있다. 또한 제조 생산성 측면에서는 이중접합에 비해 크게 떨어지지 않기 때문에 기술력 여하에 따라 향후 제품의 가능성이 확인될 수 있을 것이라 판단된다. 실리콘 박막 태양전지 모듈을 제작하는 그 구체적인 공정 과정은 〈그림 5〉와 같은 순서로 진행된다.

크게 투명전극을 포함한 기판을 준비하는 과정, 실리콘 박막 증착 및 패턴 형성 과정을 통해 소자를 만드는 과정과 패키징(Packaging)하는 과정으로 이루어진다. 투명전극을 유리 기판에 증착하고 Texturing하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 저압 화학기상증착법(LPCVD: Low Pressure Chemical Vapor Deposition)으로 투명전극층을 증착하면서 Texturing이 자동으로 이루어지게 하는 방법과 다른 하나는 스퍼터링 방법으로 투명전극층을 증착하고 염산을 포함한 용액을 이용해 Texturing하는 방법이다. 두 가지 방법은 소자 성능상의 차이는 크지 않으며 단지 생산성이나 원가 경쟁력에 따라 선택할 수 있다. 패키징 공정은 모듈의 신뢰성에 영향을 주는 매우 중요한 공정으로 이미 실제 사용 환경에서 검증된 Wafer 기반 태양전지에서 사용하는 방법과 동일한 공정으로 제

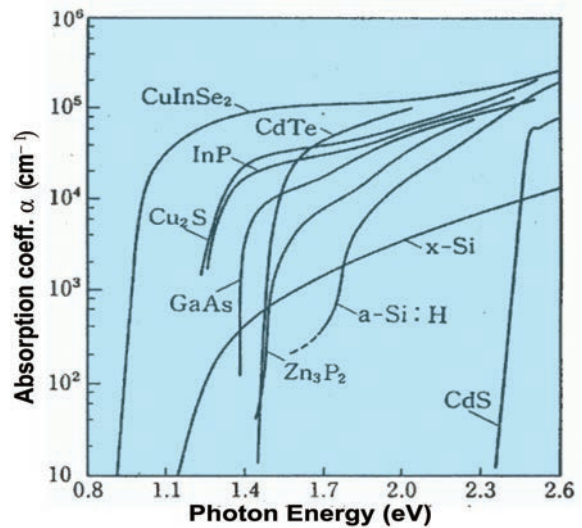
작한다. 먼저 소자 제조과정에서 형성된 전극에 외부로 뽑아낼 전극 와이어를 연결하고 이것을 Junction Box와 연결한 후 패키징용 접합 필름을 삽입하고 그 위에 패키징용 덧 유리나 후면 Sheet를 덮은 상태에서 라미네이션이란 패키지 공정을 수행함으로써 마무리하게된다. 태양 전지 모듈은 매우 극한의 환경에서 20년 이상의 수명을 보장해야 하기 때문에 패키지 공정은 모듈 제조에 있어서 매우 중요한 공정이며 잘 관리되어야 할 공정이다. 현재 일반적인 박막 태양전지 모듈의 크기는  $1.1 \times 1.4 \text{ m}^2$ 이다. 초대형 모듈은 도시의 건물 일체형 태양전지 모듈(BIPV: Building Integrated PhotoVoltaics)에 적합할 것으로 예상하고 있으며 태양광 발전소의 BOS(Balance Of System) 측면에서 원가 절감에 기여할 것으로 예상하고 있다. 실리콘 박막 태양전지의 양산에 있어서 주의하여야 할 과제는 크게 3가지로 축약할 수 있다. 한 가지는 투명전극 층을 포함한 기판을 준비하는 방식으로 LPCVD 방법과 스퍼터링 후 Texturing하는 방법 중 어떤 방식을 선택하느냐에 따라서 주변장치와 공정의 흐름에 큰 영향을 미치게 된다. 경우에 따라서는 이미 Texturing 된 기판을 유리 기판 전문 업체로부터 도입하는 것도 가능하다. 현재 진행되고 있는 Texturing된 박막재질은 AZO와  $\text{SnO}_2$ 이다. 다른 하나는 PECVD 시스템을 어떤 방식으로 선택할 것인가인데 아마도 생산성과 원가에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소로 특히 향후 고효율 이중접합 Cell의 생산을 고려해 선택하는 것이 중요하다. 마지막으로 레이저 패터닝 기술인데 이 기술은 많은 노하우(Know-How)를 요하는 부분이므로 철저한 검증이 요구된다.

실리콘 박막 태양전지 특징은 실제 사용 환경에서 특히 온도가 높을수록 발전량이 상대적으로 Wafer 기반 태양전지에 비해 높은 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 아몰포스 실리콘 박막이 결정 Wafer에 비해 효율의 온도계수가 2배 이상 낮기 때문에 나타나는 특성이다. 태양전지 모듈은 실 설치 환경에서 모듈의 온도가 80도 까지 올라가기 때문에 표준검사 조건(STC: Standard TestCondition)에서 검사한 모듈의 전력 생산량에 비해 실제 전력생산량이 낮은 것이 일반적이다. 또한 실제 태양전지 모듈이 많이 설치되는 지역에서의 광 에너지는 자

외선 쪽에 가까운 특성을 보여준다. 하지만 표준검사 조건 하의 평균 광에너지는 좀 더 장파장에 가깝기 때문에 실제 설치 조건에서의 광 전환 효율이 떨어지는 현상이 발생한다.

#### 나. 화합물 박막전지

현재 태양전지 시장의 주종은 결정질 실리콘 기판을 이용한 태양전지이다. 하지만 결정질 실리콘은 기판 소재 비용이 전체 가격 대비 차지하는 비중이 높고 잉곳-웨이퍼-전지-모듈 등의 단속적이고 복잡한 공정을 거쳐야 하기 때문에 가격 저감에 있어서 한계가 있다. 또한 최근의 실리콘 원소재 가격 급등은 전체적인 태양광 발전 시스템의 발전단가에 부담이 되고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 실리콘 웨이퍼의 두께를 줄이는 기술과 함께 박막형 태양전지가 대안으로 제시되고 있다. 박막 태양전지는 수  $\mu\text{m}$ 의 박막을 태양전지 광흡수층으로 이용함으로써 원소재 소모가 극히 적으며, 반도체 공정을 사용하기 때문에 연속공정이 가능하다. 또한 유리, 금속 등의 기판을 사용하게 되면 저가의 건물일체형 태양전지 모듈도 제조할 수 있다. 박막 태양전지는 광흡수층 소재에 따라 실리콘 박막, 화합물 박막 태양전지로 구분되며, I-III-VI<sub>2</sub> 화합물인  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) 박막 태양전지와 II-VI족 화합물인 CdTe 태양전지가 화합물



〈그림 6〉 태양전지 관련 물질들의 광흡수계수 분포도

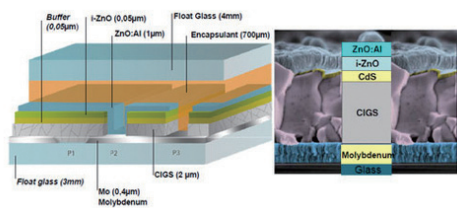
박막 태양전지에 포함된다. 또한 CIGS, CdTe 모두 Se, Te 등의 VI족 원소를 사용하기 때문에 칼코지나이드계(Chalcogenide Photovoltaic material) 소재로 표현되기도 한다. 실리콘 소재를 이용한 태양전지와 비교하였을 때 화합물 박막 태양전지는 소재 물성과 구조에 있어서 다음과 같은 차이점이 있다.

〈그림 6〉에서와 같이 CIGS, CdTe 등의 화합물반도체는 실리콘 소재와 비교하여 광흡수계수가 매우 높다. 광흡수계수가 높다는 것은 얇은 두께의 광흡수층으로도 빛을 효과적으로 흡수할 수 있다는 것이다. 이는 원소재의 소비를 줄이고자 하는 박막 태양전지의 개념에 화합물 박막 태양전지가 잘 부합된다는 것을 의미하며 실리콘 박막 태양전지 보다 효율이 높은 원인이기도 하다.

(1) CIGS(CuInSe<sub>2</sub>)

CIGS를 광흡수층으로 하는 태양전지의 구조는 〈그림 7〉과 같다.

일반적으로 유리를 기판으로 5개의 단위 박막-배면전극, 광흡수층, buffer층, 앞면 투명전극, 반사방지막을 순차적으로 형성시켜 만든다. 단위박막별로 다양한 종류의 재료와 조성, 또한 제조방법에서는 갖가지 물리적, 화학적 박막 제조방법이 사용될 수 있다. 태양전지의 면적이 커지면 면저항의 증가로 인하여 효율이 감소하게 된다. 따라서 대면적 모듈의 경우는 일정한 간격으로 직렬연결이 되도록 패터닝한다. 기판의 재질로는 일반적으로 유리가 사용되고 있다. 그 밖에 알루미늄과 같은 세라믹 기판, 스테인리스 스틸, Cu tape같은 금속 기판, 폴리머 등도 사용이 가능하다. 유리 기판으로 soda회 유리(sodalime glass)를 사용한다. 미국 NREL이 기록한 19.9%의 변환 효율도 soda회 유리를 기판으로 사용한 것이다. soda회

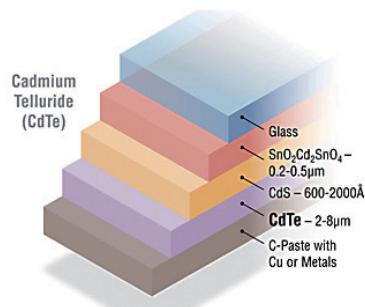


〈그림 7〉 CIGS를 광흡수층으로 하는 태양전지의 구조 (Source: Manz AG)

유리 기판은 코닝 유리 기판에 비해 저렴하다는 장점으로 인해 공정온도의 한계(600 ℃)가 있음에도 불구하고 기판재료로 사용되었다. 하지만 soda회 유리에서 확산된 나트륨(Na)이 태양전지의 효율을 증가시킨다는 사실이 알려지게 되면서 최근에는 CIGS 태양전지에서 soda회 유리가 가장 널리 사용되고 있다<sup>[4]</sup>. soda회에 존재하는 Na은 공정 중에 IGS 광흡수층으로 확산되는데 박막의 전하농도를 증가시키거나<sup>[5]</sup> CIGS 단일 상의 영역을 증가시켜 조성변화에 따른 구조적인 특성변화를 줄여주는 역할을 한다고 보고되고 있다<sup>[6]</sup>. 후면전극 물질로는 Sputtering 방법으로 증착된 몰리브덴(Mo)이 가장 광범위하게 사용된다. 이는 Mo이 가진 높은 전기전도도, CIGS와의 ohmic contact, Se 분위기 하에서의 고온 안정성 때문이다. Mo 박막은 전극으로서 비저항이 낮아야 하고 또한 열팽창계수의 차이로 인하여 박리현상이 일어나지 않도록 유리 기판에의 점착성이 뛰어나야 한다. 태양전지 효율에 있어서 가장 중요한 요소인 광흡수층의 경우, CIGS 박막은 다원 화합물이기 때문에 제조공정이 매우 까다롭다. 물리적인 박막제조방법으로 진공증발법(evaporation), sputtering + selenization, 화학적인 방법으로는 electrodeposition 등이 있다. 각 방법에 있어서도 출발물질(금속, 2원 화합물등)의 종류에 따라 다양한 제조방법이 동원될 수 있다. 현재까지 가장 좋은 효율을 얻을 수 있었던 것은 evaporation 방법이며 출발물질로 4개의 금속원소 (Cu, In, Ga, Se)를 사용한 것이다.

(2) CdTe 태양전지

CdTe 태양전지는 기본적으로 CdS(광투과층)와의 이중



〈그림 8〉 CdTe 태양전지의 구조(Source: NREL)





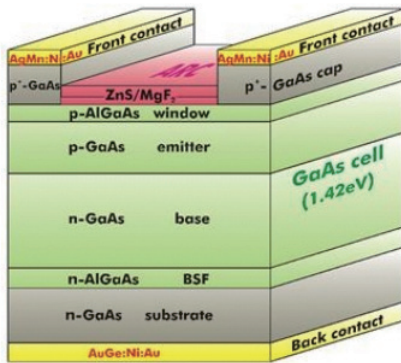
접합을 기본으로 하며 전면 투명전극과 배면전극으로 구성된다. CdTe 태양전지의 구조는 <그림 8>과 같다.

각 단위박막의 특징 및 공정은 CIGS 태양전지와 같이 CdTe 태양전지도 n-type 물질로 CdS 박막을 사용하는데, CdS를 증착하는 방법으로는 진공증착법(vacuum evaporation), 스퍼터링(sputtering), 화학기상증착법(chemical vapor deposition), 열분해법(spray pyrolysis)과 CBD법(chemical bath deposition) 등이 있다. CBD법은 CdS 박막이 성장하는 기관을 비롯하여 여러 종류의 화학종을 포함한 수용액에서 화학 반응을 이용하여 증착 속도를 조절하는 것이 특징이다. 용액을 이용할 때는 저온(20~95 °C)에서 성장시킬 수 있으므로, 300~450 °C의 고온이 필요한 열분해법보다 다양한 기관의 사용이 가능하다. CdTe는 Sputtering, Evaporation, Electrodeposition 등 다양한 방법으로 제조가 가능하지만 일반적으로 CSS(closespaced sublimation) 법이라 불리는 공정으로 광흡수층을 증착한다. CSS법은 장치가 간단하고 유지가 간편하며, 특히 소스와 기관과의 간격이 수 mm 정도에 지나지 않아 빠른 증착 속도로 대면적 태양전지를 제조하기에 적합한 방식이다. CSS법 장치는 반응챔버, 할로겐 램프, gas 봄베 및 연결부, 진공펌프 및 기타 제어판으로 구성된다. 반응챔버의 상부와 하부에는 소스와 기관의 온도 조절을 위하여 각각 할로겐 램프가 장착된다. 최근에는 CSS 공정보다 양산에 적합한 VTD(Vapor Transport Deposition) 공정이 적용되고 있다. VTD 공정은 원소재를 가열하여 vapor를 만든 후 기관에 공급하는 방식으로 FirstSolar, IEC 등에서 적용하고 있다. CdTe 태양전지에서 가장 중요하게 해결해야 할 과제는 저항이 낮고 안정한 배면전극을 형성하는 것이다. CdTe는 일함수가 매우 커서 보통의 금속전극을 사용했을 경우 p-type CdTe와 금속간에는 Schottky barrier가 형성된다. Contact barrier의 높이는 CdTe의 페르미 준위와 금속표면의 페르미준위의 차이로 결정된다. 이러한 경우에 있어서 배면전극은 완전한 ohmic 특성을 보이지 않기 때문에 순방향으로 전압을 걸어주었을 때 배면전극에서 전압강하가 일어나게 된다. Band diagram의 측면에서 살펴보면 CdTe와 CdS의 junction 전지의 상

당한 효율 향상을 보고하고 있다. Cu는 CdTe 내에서 확산이 빠른 물질로 알려져 있으며, Cu 확산 mechanism은 grain boundary diffusion으로 보고 있다.  $Cu^+$ 와  $Cd^{2+}$ 의 이온의 크기는 비슷하여 CdTe내에서  $Cu^+$ 는  $Cd^{2+}$  site에 쉽게 substitute가 된다. 따라서 Cu의 확산은 CdTe의 거의 전 영역에 걸쳐 일어난다고 보고 있으며, 때로는 CdS/CdTe junction 영역까지 Cu가 확산되었다는 결과도 보고하고 있다. 이러한 junction과 CdTe 막 내의 Cu는 recombination center와 shunt pathway로 작용해 태양전지의 특성 저하의 원인이라 보고되고 있다. 근래에는 Cu가 포함되지 않는 배면 전극 물질이 제안되고 있으며, 이런 예로 Ni:P,  $Sb_2Te_3$ , HgTe 등이 있다. 위의 배면 전극 물질을 사용한 태양전지의 경우 상당한 안정성은 보여주고 있지만, 초기 효율은 그다지 높지 않는 것으로 보고하고 있다. Stress 가속 실험을 통해서 Cu 함유 배면 전극 물질의 경우 250시간 정도의 lifetime을 보이지만 이런 배면 전극 물질의 경우 1000시간 이상의 lifetime을 보고하고 있다

### (3) GaAs 태양전지

화합물반도체인 GaAs 태양전지는 인공위성의 전원 공급 장치로 개발되어 왔다. GaAs 태양전지는 GaInP, GaAs, Ge 등 서로 다른 밴드갭 물질을 사용해 삼중접합 구조를 형성함으로써 태양전지 파장 대역에서 최대한 빛을 흡수해 고효율·고성능의 태양전지를 구현할 수 있다. 삼중접합 구조의 태양전지에서 빛이 처음 들어오는 상부 전지는 밴드갭이 1.9 eV인 InGaP 화합물반도체 에피층을 이용한 p-n 접합이고, 중앙부 전지는 밴드갭이 1.4 eV인 InGaAs 화합물반도체 에피층을 이용한 p-n 접합이다. 하부 전지는 밴드갭이 0.8 eV인 Ge 기관으로 형성하는 p-n 접합이다. 삼중접합 구조는 이렇게 밴드갭 크기가 서로 다른 물질로써 태양광 스펙트럼 영역을 폭 넓게 흡수할 수 있어 단일접합 실리콘 태양전지에 비해 광전변환효율이 우수하다. 이러한 밴드갭 엔지니어링이 가능한 점이 화합물반도체 태양전지의 최대 장점이며, 반대로 공정이 복잡해져서 생산 단가가 높아지는 원인이기도 하다.



〈그림 9〉 GaAs 박막 태양전지 구조도 (Source: Photovoltaics Lab IOFFE)

〈그림 9〉에 일반적인 전지 구조도가 나타나 있다.

#### 다. 염료감응 태양전지

염료감응 태양전지는 식물의 광합성 작용을 모방하여 만든 전지로서, 빛을 흡수하는 광감응성 염료, 이 염료를 지지하는 나노 티타니아 전극, 전해질, 촉매 상대전극으로 구성된 3세대 태양전지이다. Si 태양전지나 박막 태양전지와 같이 p형과 n형 반도체의 접합을 사용하지 않고 전기화학적 원리에 의해 전기를 생산하므로, 이론 효율이 33%에 이르고, 친환경적이어서 미래의 그린에너지로 가장 적합한 태양전지로 기대되고 있다.

염료감응형 태양전지 (Dye Sensitized Solar Cell, DSSC)는 스위스의 Gratzel 교수가 식물의 광합성 작용에서 힌트를 얻어 고안한 전지로서, 작동 전극(working electrode), 전해질(electrolyte), 상대전극(counter electrode)으로 구성되어 있다. 작동 전극은 식물의 엽록소와 같이 태양 빛을 받아 전자를 높은 에너지 상태로 만들어 주는 염료가 높은 에너지의 전자를 쉽게 받아들이는 산화물 반도체 표면에 부착되어 있다. 따라서 외부의 빛이 염료에 닿으면, 염료에서 전자가 에너지를 얻어 높은 에너지의 전자가 되고, 이를 산화물 반도체 인  $TiO_2$  물질이 받아 외부로 전달된다. 높은 에너지의 전자는 외부 회로를 타고 흐르면서 자신의 에너지를 소모하게 되고, 다시 상대 전극에 도달하게 된다. 이때, 작동 전극의 염료

에서 전자가 외부로 빠져나갔기 때문에 전해질 내부의 이온에서 한 개의 전자가 다시 염료로 공급되고, 외부에서 상대전극으로 돌아온 전자는 다시 전해질 내부의 이온으로 전달되어서 에너지 공급과정에 연속적으로 이루어지게 된다. 이상의 과정들은 주로 작동 전극과 전해질 사이와 상대 전극과 전해질 사이에서 이루어지는 전기화학반응으로 이루어져 있다. 따라서, 전극과 전해질이 닿는 면적이 넓을수록 많은 반응이 빠르게 진행될 수 있다. 아울러, 작동 전극의 표면 면적이 넓을수록 많은 양의 염료가 붙어있을 수 있기 때문에 생산할 수 있는 전력의 양이 증가하게 된다. 따라서, 각각의 전극의 소재로 나노 입자를 사용하게 된다. 나노 입자를 사용하는 경우, 동일 부피에서 물질의 표면적이 극단적으로 증가하기 때문에 많은 양의 염료를 표면에 부착할 수 있고, 전극과 전해질 사이의 전기화학 반응의 속도를 증가시킬 수 있다. 일반적으로 작동 전극을 형성하는  $TiO_2$  전극의 경우, 20~50 nm 수준의 나노입자가 10~20  $\mu m$  두께로 도포되어 있고, 그 표면에 염료를 부착시키게 된다. 아울러 상대전극은 10 nm 미만의 크기를 갖는 백금 입자가 기판에 얇게 도포되어 있다.

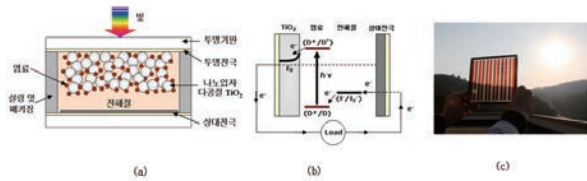
**페르미-디랙 통계의 변수나 페르미입자계의 화학 위치에너지는 열적 양자통계로서 페르미와 디랙, 보스와 아인슈타인에 의해 잘 정립되어 있다.**

염료감응 태양전지는 유리기판 위에 나노입자와 염료를 사용하여

만들어짐에 따라 친환경성, 투명성과 채색성, 경사각과 저광량에서도 효율 유지, 다양한 형태로 제작 가능 같은 장점을 지니고 있다. 특히 다양한 형태로 제작 가능 측면에서는 염료감응형 태양전지의 구조상 투명한 태양전지 혹은 유연 기판 태양전지로 제조가 가능하기 때문에 기존의 Si 기반 태양전지와는 다르게 커튼형, 창문형 및 롤(roll) 형태 등 다양한 형태로 제조가 가능하다.

이제까지 태양전지의 개발은 주로 이미 개발된 태양전지를 설치하는 것에 집중되어 있다. 하지만 앞으로 태양전지의 개발은 사용환경에 적절한 태양전지를 생활 속으로 얼마만큼 포함시킬 수 있는가의 문제를 고민해야 한다. 예를 들어 ‘적은 빛으로도 발전할 수 있는가’ 혹은 ‘아름다운 모양의 태양전지로 건물을 장식할 수 있는가’, ‘창문에 태양전지를 설치할 수 있는가’ 등의 생활 속 요구사





〈그림 10〉 염료감응형 태양전지: (a) 전지 모듈 구조, (b) 광흡수 원리, (c) 제품모습

향이 태양전지의 개발에 고려되어야 한다. 이를 위해서는 기존의 Si 기반의 태양전지 외에도 염료감응형 태양전지, 유기 태양전지 및 박막 태양전지가 각각의 특성에 맞는 활용범위로 시장에서 공존해야 한다는 것을 의미한다. 차후에는 건축 및 토목 공학과 태양전지의 융합기술 및 디자인과 태양전지의 융합기술, 1회용 태양전지와 재활용 기술 등 융복합기술과 새로운 기술 영역으로의 개발 분야의 확대가 요구된다. 염료 감응형 태양전지 구조가 〈그림 10〉에 나타나 있다.

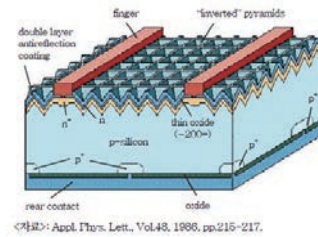
### 5. 태양전지의 기술진화별 분류

태양전지를 일반적으로 소재에 따라 분류를 하여 실리콘 태양전지, 화합물 반도체 태양전지, 염료감응 태양전지, 유기분자접합 태양전지 등으로 분류하지만, 그러나 태양전지 세대 구분은 단순 전지 소자가 아닌 차세대 에너지 관점에서 소재나 제조 기술보다는 광변환 효율 향상을 위한 기술적 메커니즘에 따른 분류가 필요하다.

#### 가. 1세대 태양전지

1세대 태양전지는 빛에너지를 전지에너지로 변환 가능한 물질을 이용한 단일 접합(single junction)구조이다. 1세대 태양전지는 p형과 n형 반도체 물질을 접합한 단일 접합구조를 가지고 있으며, 광 변환 효율은 물질의 광 흡수율과 광 흡수 대역폭에 의해 결정된다.

대표적인 1세대 태양전지인 실리콘 태양전지는 1985년 passivation 기술을 적용한 rear point contact 태양전지로 최초로 22% 효율을 달성하였으며, 〈그림 11〉과 같이 전지의 전면은 passivated emitter 태양전지와 유사하고 후면은 point contact 태양전지에서 사용한 전극 형태를 이용한 PERL 태양전지가 개발되었으며 광변환 효



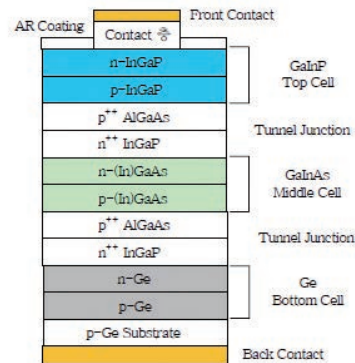
〈그림 11〉 Passivated Emitter and Rear Locally-Diffused Cell (Appl. Phys. Lett., Vol.48, 1986, pp.215-217.)

율이 24%로 현재 실리콘 태양전지 중 가장 높은 효율을 기록하고 있다.

#### 나. 2세대 태양전지

2세대 태양전지는 빛 흡수를 극대화하기 위해 빛 흡수 대역을 넓혀 광 흡수율을 높이는 구조를 가진다. 1세대 태양전지의 이론적 최대 효율이 30%를 넘지 못하는 이유는 pn 접합을 이루는 반도체 박막의 밴드갭 에너지보다 매우 큰 에너지를 가지는 빛을 흡수하면 여기된 전자들이 열로 소멸되고 밴드갭 에너지보다 낮은 에너지를 가지는 빛은 투과됨으로써 좁은 흡수 대역으로 인한 손실이 매우 크기 때문이다. 이러한 손실을 최소화하기 위해 2세대 태양전지는 〈그림 12〉와 같이 광 흡수 대역이 서로 다른 단일 접합 태양전지를 적층함으로써 광 흡수 대역을 넓힐 수 있다.

2세대 태양전지는 MOCVD와 MBE 같은 박막 증착 장비의 발달로 인하여 III-V 화합물 반도체 분야에서 빠르게 발전하고 있다. III-V 화합물 반도체는 다양한 밴드갭 에너지를 가지는 박막 제조가 용이하고, 직접천이(direct

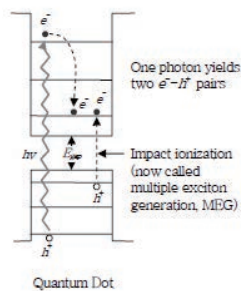


〈그림 12〉 GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조

bandgap) 구조를 가지고 있어 실리콘에 비해 광 흡수율이 높다. 또한 터널정선(tunnel junction) 구조를 이용하여 pn 접합 태양전지를 금속 전극 없이 반도체 박막만으로 직렬 연결이 가능하여 한 번의 박막 증착 공정으로 넓은 흡수대역을 가지는 다중접합 태양전지 제작이 가능하다. 2006년 Spectralab에서 <그림 12>과 같은 GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조를 이용하여 AM 1.5에서 x240배 집광하여 변환 효율 40.7%를 얻었다. 또한 4중 접합 이상의 접합 태양전지는 이론적으로 최대 59% 효율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. III-V 화합물반도체 태양전지는 제조 단가가 실리콘 태양전지에 비해 매우 높아 인공 위성과 같은 특수 용도로 주로 사용되었지만, 최근 효율이 실리콘 태양전지의 2배가 되면서 지상용 전원으로 사용하려는 연구가 미국, 일본, 호주에서 주도적으로 진행 중이다.

### 다. 3세대 태양전지

1, 2세대 태양전지의 광전 변환 방법은 흡수되는 광자의 에너지에는 무관하고 오직 흡수된 광자의 수에 비례하여 전자-양공쌍을 생성함으로써 높은 에너지를 가지는 광자의 남은 에너지는 열로 손실되므로 매우 비효율적이다. 그러나, 3세대 태양전지는 <그림 13>과 같이 높은 에너지 광자를 흡수하여 여기 상태에 생성된 전자와 양공이 낮은 에너지 상태로 천이하면서 1개의 전자-양공쌍을 생성하고, 천이 때 생성되는 빛에너지를 재흡수하여 2개 이상의 전자-양공쌍을 생성하는 메커니즘을 이용하고 있으며 이러한 태양전지를 MEG 태양전지라고 한다. 태양의 빛에너지를 보다 효율적으로 전기에너지로 전환이 가

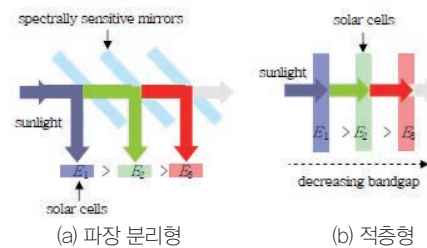


<그림 13> MEG 태양전지 광흡수 원리

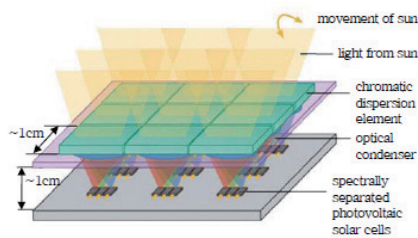
능함으로써 3세대 태양전지는 획기적으로 효율을 증가시킬 수 있을 것이다. 현재 양자점과 나노 입자 등을 이용한 MEG 태양전지 연구가 진행되고 있으나 아직까지 이론적 가능성만을 보여주고 있는 상태이다.<sup>[7]</sup>

## 6. 차세대 고효율 태양전지

21세기에 접어들면서 재생에너지에 대한 요구가 급증하면서 태양전지에 관심이 집중되었다. 그리고 태양광 발전 시스템 증설이 급증하면서 실리콘 원자재 및 실리콘 기판의 공급 부족으로 인하여 태양전지 제조 단가가 증가하는 문제가 발생하였다. 이러한 이유로 단결정 실리콘 태양전지보다 제조 단가가 낮고, 원자재 소모가 적고, 재료 공급이 원활한 박막실리콘 태양전지, 염료감응 태양전지, 플라스틱 태양전지 등이 각광 받게 되었다. 그러나 낮은 제조 단가에도 불구하고 낮은 변환 효율과 짧은 수명이 산업화에 걸림돌이 되고 있다. 태양전지 제조 단가는 저렴하지만 태양광 발전 시스템을 구축할 때 드는 interconnection, encapsulation, 모듈 설치, 설치에 필요한 땅값 등 태양전지 이외의 비용이 전지의 총 면적에 비례하기 때문에 태양전지 제조 단가 보다는 태양전지의 효율 증가가 태양광 발전 시스템의 발전 단가를 낮추는 중요한 변수로 작용한다. 이러한 문제로 인하여 최근에는 실리콘 태양전지를 비롯한 저가의 1세대 태양전지보다는 효율이 높은 2세대 태양전지의 발전 단가를 낮추어 지상용 전력으로 사용하기 위한 연구가 증가하고 있다. 태양전지가 30%의 변환 효율을 극복하기 위해서는 2세대 태양전지와 같이 변환 효율을 극대화하기 위해 광 흡수 대역을 넓히기 위한 방법으로 <그림 14(a)>와 같이 입사되는 빛을 여러 개의 파장 대역으로 분리하고 각각의 파장



<그림 14> 다중 접합 태양전지 개념도



〈그림 15〉 파장 분리형 초고효율 태양전지 배열 방식

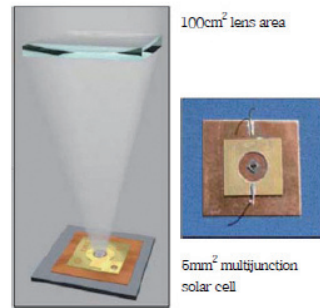
대역에 알맞은 태양전지를 수평 배치하는 방법과 〈그림 14(b)〉와 같이 빛의 입사 방향으로 흡수대역이 에너지가 큰 태양전지부터 차례로 적층하는 방법이 있다. 파장분리형은 다양한 물질의 태양전지를 이용하여 각각의 파장 대역에 가장 적합한 태양전지를 배치함으로써 광 흡수를 극대화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 광학계를 사용함으로써 제작이 복잡하여 대면적으로 제작이 어렵고 대량 생산에 한계가 있다.

그러나, 미국에서는 DARPA 프로젝트를 통해 2005년 11월부터 530억 원을 투자하여 효율 50% 이상인 초고효율 태양전지 개발프로그램을 진행중이며, 〈그림 15〉와 같은 파장 분리형을 사용할 예정이다.

파장 분리형에 집광장치를 결합한 초박형 집광 태양전지는 차세대 모바일 기기의 보조 전원으로 사용 가능할 것이다. 〈그림 15〉과 같은 적층형 태양전지는 각각의 파장 대역에 적합한 태양전지를 흡수 에너지 대역이 높은 순서로 수직으로 배치하고 각각에 전극을 연결하는 방법이 있으나 각 태양

전지 증착시 사용한 기판을 제거하거나 최대한 얇게 제작해야 하며, 하부 전극을 최소화하거나 투명 전극을 사용하여 빛 투과를 최대화해야 하는 많은 기술적인 어려움이 있다. 박막형 실리콘 태양전지 등에서 시도되고 있지만은 전극 제작 공정이 까다로워 높은 효율을 얻지 못하고 있으며 대면적으로 제작이 어려워 제작 단가가 비싼 문제가 있다. 그러나, MOCVD와 MBE 같은 박막 증착 장비의 발달로 III-V 화합물 반도체 태양전지분야에서는 터널정선 기술 개발로 단일 접합 태양전지 사이에 금속 전극 없이 반도체 박막만으로 직렬 연결이 기술이 개발되면서 가

**집광형이란 태양광을 렌즈를 이용하여 태양전지 셀로 집광하는 형태이다. 주요한 것은 태양광을 집적하는 기술에서 어떤 렌즈를 사용하느냐가 상용 시 모든 코스트를 좌우한다.**



〈그림 16〉 광형 태양전지

능하게 되었다. 서로 다른 흡수대역을 가지는 태양전지들 사이에 터널정선 구조를 삽입하여 한 번의 박막 증착 공정만으로 monolithic하게 다중접합 태양전지 제작이 가능하다.<sup>[8]</sup> 단일 접합 태양전지 간의 직렬 연결 시 별도의 전극 공정이 필요하지 않으므로 단일 접합 태양전지 제작 공정과 동일하다. 따라서 적층 수가 증가하여도 제조 공정에 별도의 비용 증가가 없고 공정이 단순해 대량 생산이 용이하여 차세대 태양전지로 주목 받고 있다.

III-V 화합물 반도체 태양전지는 다중접합 구조를 이용하여 매우 높은 효율을 얻고 있지만 고가의 원재료를 사용하고 있어 제조 단가가 비싼 단점을 가지고 있다. 그러나 효율이 높아 지상용 에너지원으로 사용하기 위해 집

광장치(concentrator)와 III-V 화합물 반도체 태양전지를 결합하여 제조 단가 문제를 해결하고자 연구 개발하고 있다. 집광형 태양전지는 〈그림 16〉과 같이 태양광을 렌즈나 거울등을 이용하여 넓은 면적의 태양광을 작은 면적의 태양전지에 빛

을 모으는 방법을 사용한다.

집광형 태양전지는 가격이 저렴한 플라스틱 렌즈나 알루미늄 코팅 거울을 사용함으로써 태양광의 집광도가 높을수록 제조 단가가 비싼 태양전지의 면적을 줄일수 있어 태양전지 모듈 제조 단가를 대폭 줄일 수 있다. 집광형 태양전지는 1970년대 초반부터 연구가 시작되었지만 실리콘 태양전지는 20배 이상 집광시 효율이 급격히 감소하는 문제로 인하여 고배율 집광이 어려워 널리 사용되지 못하였다. 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 집광률이 200배까지 집광률 증가에 따라 효율이 증가하고





〈그림 17〉 집광형 태양광 시스템의 모습

500배 이후에는 고집광으로 인해 많은 전류가 발생하여 전극에 저항이 발생하여 효율이 감소한다. 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 1000배 집광시 효율이 1% 감소하므로 고집광형 태양광 발전시스템에 적합하다. 고효율 III-V 태양전지와 집광장치를 결합한 태양광 발전 시스템이 실리콘 태양광 발전 시스템보다 발전 단가가 낮아 보다 경제적인 것으로 보고되고 있다. 기존의 평판형 실리콘 태양광 발전 시스템보다 경제적이고 친환경적이다. 집광형 III-V 화합물 반도체 태양광 발전 시스템의 장점은 저비용, 태양광 발전 시스템 비용에서 태양전지 모듈 비중을 최소화(고집광), 값싼 플라스틱 렌즈 사용, 고효율성(설치비용 및 관련 부대 비용)등 감소, 태양전지의 면적을 최소화 함으로써 실리콘의 공급부족 현상이나 CIGS와 같은 indium 부족 현상이 적다. 시스템에서 태양전지의 비중이 낮으므로 태양전지 효율 향상만으로도 발전 단가 감소 효과가 크다. 또한 보다 효율 높은 태양전지로 교체 가능하므로 전체적인 시스템 성능 향상이 가능하다. 재생가능 측면에서는 시스템 구성이 대부분 철, 알루미늄, 플라스틱 등으로 이루어져 있어 재활용이 용이하다. III-V 고효율 태양전지의 경우 태양전지 제조가 어려워 고부가가치 산업으로 육성 가능하다. 〈그림 17〉은 대용량 발전을 위한 고집광 태양광 발전 시스템을 보여 주고 있다.

### III. 결론

태양에너지에 대한 관심이 집중되면서 태양전지에 대한 수요가 급증하였지만, 실리콘 태양전지 생산을 위한 실리콘 원재료와 기판 공급 부족현상이 나타나고 또한, 기존 화석 에너지나 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 높은 문제로 인하여 보다 효율이 높고 대량생산에 적합한 태양전지가 필요하게 되었다. 그 동안 높은 제작 단가로 인하여 인공위성과 같은 특수 용도로만 사용되던 III-V 화합물 반도체 태양전지가 고집광 장치와 결합하여 발전 단가를실리콘 태양전지 수준으로 낮출 수 있는 기술이 개발됨으로써 지상용 에너지원으로 부각되고 있다. 현재 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지의 최고 효율은 40.7% 를 달성하였고, 매년 1%씩 효율 증가를 예상하고 있으며, 2009년에는 45% 효율을 달성할 것으로 예상되며 가까운 시일 내에 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지가 미래 에너지원으로 자리를 잡을 것으로 예상된다. 또한 양자점이나 나노입자들을 이용하여 기존 태양전지의 광전 변환 메커니즘을 대폭 개선한 3세대 MEG 태양전지는 실내 조명등만으로도 저전력 디지털 기기의 전원으로 사용이 가능할 것으로 예상된다.

### 참고 문헌

- [1] Kepler Equities, Sarasin bank, Lahmeyer, Solarbuzz 종합.
- [2] W. Spear and P. LeComber, Solid State Comm. 17, 1193 (1975).
- [3] D.E. Carlson and C.R. Wronski, APL 28, 671 (1976).
- [4] Ingrid Repins, Miguel A. Contreras, Brian Egaas, Clay DeHart, John Scharf, Craig L Perkins, Bobby To and Rommel Noufi, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2008) DOI: 10.1002/pip.822.
- [5] X.Wu, J.C. Keane, R.G. Dhere, C. DeHart, D.A. Albin, A. Duda, T.A. Gessert, S. Asher, D.H. Levi, and P. Sheldon, Proc. of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 995 (2001).
- [6] The Future of Thin Film Solar, Vol. 1, No. 1, August 2007, Greentechmedia
- [7] Randy J. Ellingson, Matthew C. Beard, Justin C. Johnson, Pingrong Yu, Olga I. Micic, Atthur J. Nozik, Andrew Shabaev,



and Alexander L. Efros, "Highly Efficient Multiple Exciton Generation in Colloidal PbSe and PbS Quantum Dots, Nano Lett., Vol. 5, No. 5, 2005, pp. 865-871.

[8] Lawrence L. Kazmerski, "Solar Photovoltaics R&D at the Tipping Point: A2005 Technology Overview," J. Elec. Spectroscopy and Related Phenomena 2006, Vol. 150, pp. 105-135.



이해수

- 1983년 전주공업대학교 전자과 전문학사
- 1992년 호원대학교 전자공학과 학사
- 2005년 아주대학교 대학원 석사
- 1988년 2월~2008년 4월 광전자(주)/중국대련법인 사장
- 2004년 3월~2010년 8월 전주비전대학교 전자과 겸임교수
- 2008년 4월~현재 (주)세광에너지/(주)삼민산업/  
(주)충남기업 대표이사

〈관심분야〉

디스플레이, LED조명, 무전극 조명, 태양광