

# 차세대 고효율 태양전지 기술 동향

Trends of the Next-Generation Solar Cell Technology

## IT 융합 · 부품 기술 특집

한원석 (W.S. Han)	차세대광전소자팀 선임연구원
김현수 (H.S. Kim)	차세대광전소자팀 선임연구원
최병석 (B.S. Choi)	차세대광전소자팀 선임연구원
오대곤 (D.K. Oh)	광소자그룹 그룹장

## 목 차

- .....
- I. 서론
  - II. 태양전지 기술 개발 동향
  - III. 차세대 고효율 태양전지
  - IV. 결론

최근까지 태양전지 기술 개발 방향은 발전 단가를 낮추는 저가형 태양전지 개발 연구와 변환 효율을 높이는 고효율 태양전지 개발 연구가 진행되어 왔다. 태양전지의 발전 단가를 낮추기 위하여 저가로 대량 생산이 가능하도록 다양한 물질과 공정이 개발되었지만, 변환 효율이 낮아 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 또한 변환 효율 향상을 위한 연구는 과거에는 변환 효율이 높은 물질을 찾기 위해 다양한 시도가 이루어졌으며, 현재는 물질 합성과 적층 구조 등을 이용하여 광흡수 대역을 넓혀 변환 효율을 높이는 데 주력하고 있다. 최근에는 양자점과 나노 기술을 이용하여 기존의 광전 변환 메커니즘의 비효율성을 개선한 신개념의 MEG 태양전지에 대한 연구 개발이 추진되고 있다.

## I. 서론

최근 심각한 환경 오염 문제와 화석 에너지 고갈로 차세대 청정 에너지 개발에 대한 중요성이 증대되고 있다. 그 중에서 태양전지는 공해가 적고, 자원이 무한적이며 반 영구적인 수명을 가지고 있어 미래 에너지 문제를 해결할 수 있는 에너지원으로 기대되고 있다.

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 전력으로 본격적으로 도입이 시도되었으며, 1980년대에는 단결정 실리콘 태양전지 제조 기술의 급격한 발전으로 광변환 효율이 20%에 이르렀다. 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 기판 공급 문제가 발생하여 태양전지 제조 단가가 상승하게 됨으로써, 태양전지는 제조 단가 절감과 효율 향상 문제 이외에도 원자재 공급 등을 해결해야 하는 문제가 생겼다. 실리콘 태양전지를 이용한 태양광 발전 시스템이 정부 보조금 지급으로 인해 많이 보급되었지만, 변환효율이 20% 미만으로 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 높은 문제점을 가지고 있다.

태양광 발전 시스템에 있어서 태양전지 모듈 가격이 차지하는 비중이 크고 태양광 발전 시스템을 설치할 때 드는 모듈 설치 비용, 설치에 필요한 땅 값, 유지 관리비 등 태양전지 이외의 비용이 태양전지의 총 면적에 비례하기 때문에 태양전지의 효율 증가는 태양광 발전 시스템의 제조 단가를 낮추는 효과도 있지만 발전 단가를 낮추는 중요한 변수이

다. 따라서, 태양 에너지를 지상 전력용으로 도입을 확대하기 위해서는 태양전지의 고효율화 기술과 저가화 기술이 중요한 핵심 기술이라고 할 수 있다.

## II. 태양전지 기술 개발 동향

### 1. 태양전지의 종류와 작동 원리

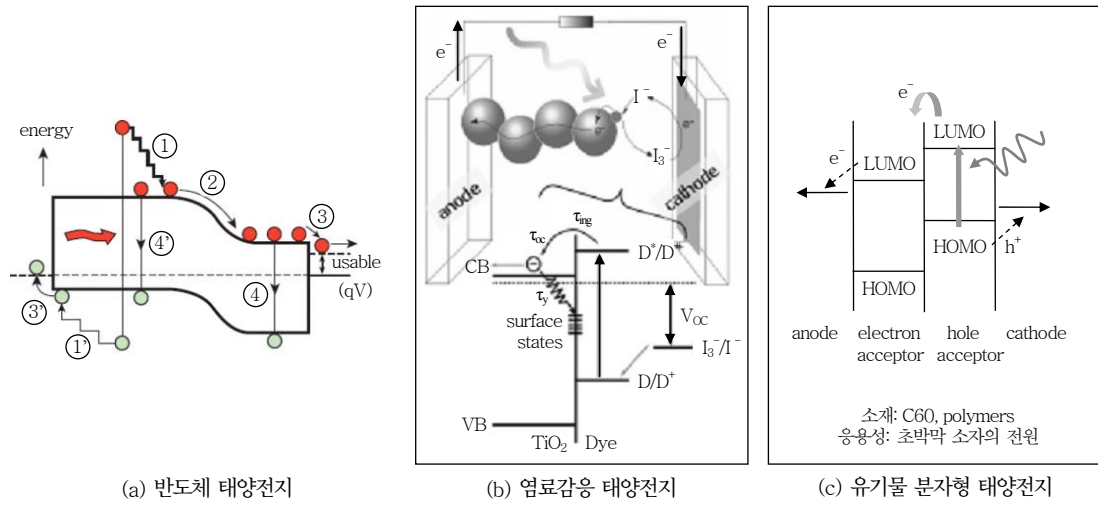
최근 주목 받고 있는 태양전지를 물질별로 크게 구분하면 무기물 태양전지(inorganic solar cell), 염료감응 태양전지(dye-sensitized solar cell)와 유기물 태양전지(organic solar cell)가 있다.

#### 가. 무기물 태양전지

실리콘 계열 태양전지와 CdTe, GaAs, CIGS와 같은 반도체 태양전지가 이에 속한다. n형 반도체 물질과 p형 반도체 물질을 접합하여 태양전지를 제조하며, n형 반도체는 전자(electron)가, p형 반도체는 양공(hole)이 전달체 역할을 한다. (그림 1a)와 같이 반도체 밴드갭 에너지보다 큰 에너지를 가지는 빛(photon)이 입사되면 p-n 접합 계면 근처에서 빛을 흡수하여 전자-양공쌍을 생성하고, 내부 전지장(built-in electric field)에 의해 양공은 p형 반도체 쪽으로, 전자는 n형 반도체 전극으로 이동하여 합선 회로 전류(short-circuit current,  $I_{sc}$ )를 발생하고, 개방회로전압(open-circuit voltage,  $V_{oc}$ )은 두 반도체의 밴드갭 에너지 차이에 의해 결정된다.

#### 나. 염료감응 태양전지

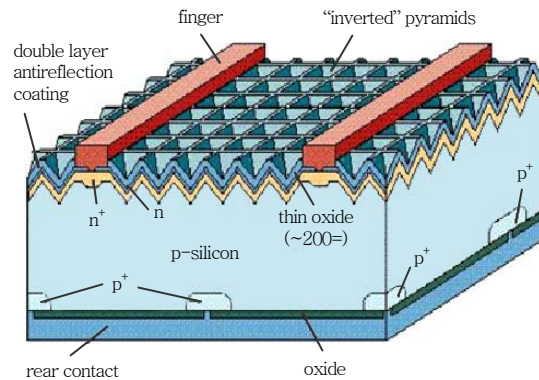
표면에 염료 분자가 화학적으로 흡착된 n형 나노 입자 반도체 산화물 전극이 빛을 흡수하면 (그림 1b)와 같이 염료분자는 전자-양공쌍을 생성하고, 전자는 반도체 산화물의 전도띠로 주입되며, 반도체 산화물 전극으로 주입된 전자는 나노 입자간 계면을 통하여 투명 전도성 막으로 전달되어 전류를 발생시키게 된다. 염료 분자에 생성된 양공은 산화-환원 전해질에 의해 전자를 받아 다시 환원된다.



(그림 1) 다양한 태양전지의 광전 변환 원리

다. 유기물 태양전지

유기분자접합 태양전지의 작동 원리는 (그림 1c)와 같다. 전자주개(electron donor D) 특성과 전자받개(electron acceptor A) 특성을 갖는 유기물로 구성되어 있어, 빛을 흡수하면 전자-양공쌍을 생성하고 전자-양공쌍은 D-A 계면으로 이동하여 전하가 분리되고 전자는 전자받개로, 양공은 전자주개로 이동하여 전류를 발생한다.



<자료>: Appl. Phys. Lett., Vol.48, 1986, pp.215-217.

(그림 2) Passivated Emitter and Rear Locally-Diffused Cell

광 변환 효율은 물질의 광 흡수율과 광 흡수 대역폭에 의해 결정된다.

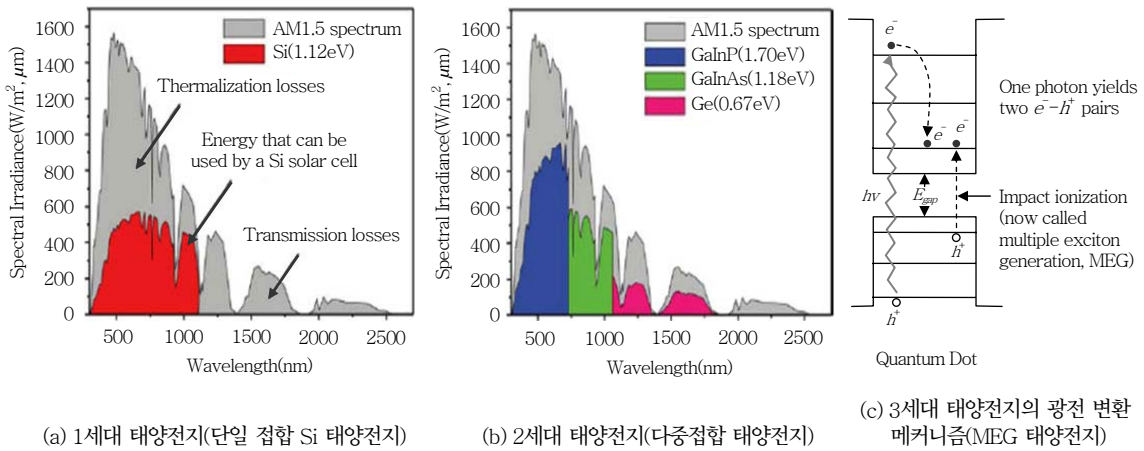
대표적인 1세대 태양전지인 실리콘 태양전지는 1985년 passivation 기술을 적용한 rear point contact 태양전지로 최초로 22% 효율을 달성하였으며, (그림 2)와 같이 전지의 전면은 passivated emitter 태양전지와 유사하고 후면은 point contact 태양전지에서 사용한 전극 형태를 이용한 PERL 태양전지가 개발되었으며 광변환 효율이 24%로 현재 실리콘 태양전지 중 가장 높은 효율을 기록하고 있다[2]. 실리콘 태양전지는 (그림 3a)와 같이 빛을 흡수할 수 있는 흡수 대역이 좁아 이론적 변환효율이

2. 태양전지의 세대별 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 기술 보다는 광변환 효율 향상을 위한 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,



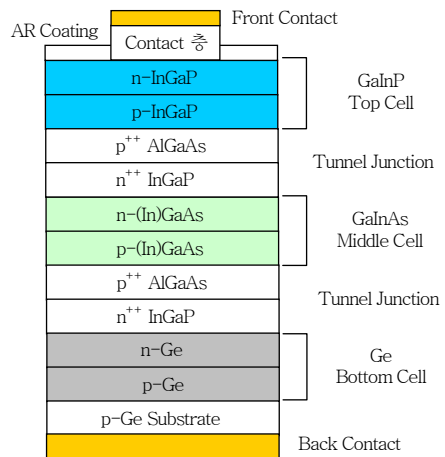
(그림 3) 태양전지 구조에 따른 광 흡수 대역

30% 미만이다[1].

현재 정부에서 보조금을 지급하는 방법으로 실리콘 태양전지 기반의 태양광 발전 시스템 보급을 확대하고 있으나 변환 효율이 낮아 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 매우 높아 재생에너지로서의 효용성이 낮아 미래 에너지로서의 입지를 확보하지 못하고 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 4)와 같이 광 흡수 대역이 서로 다른 단일 접합 태양전지를 적층함으로써 광 흡수 대역을 (그림 3b)와 같이 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 제도가 용이하고, 직접천이(direct



(그림 4) GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조

bandgap) 구조를 가지고 있어 실리콘에 비해 광 흡수율이 높다. 또한 터널정전(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 4)와 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[3]. III-V 화합물 반도체 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 3c)와 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. [4]. 태양의 빛에너지를 보다 효율적으로 전기에너지로 전환이 가능함으로써 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[5].

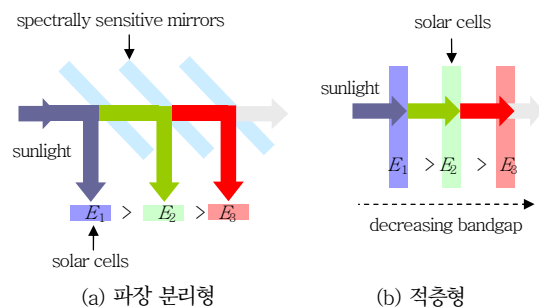
## III. 차세대 고효율 태양전지

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 박막 실리콘 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 5a)와 같이 입사되는 빛을 여러 개의 파장 대역으로 분리하고 각각의 파장 대역에 알맞은 태양전지를 수평 배치하는 방법과 (그림 5b)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 개발 프로그램을 진행중이며, (그림 6)과 같은 파장 분리형을 사용할 예정이다. 파장 분리형에 집광장치를 결합한 초박형 집광 태양전지는 차세대 모바일 기기의 보조 전원으로 사용 가능할 것이다.

(그림 5b)와 같은 적층형 태양전지는 각각의 파

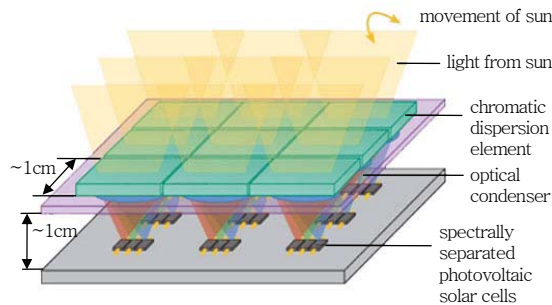


(그림 5) 다중 접합 태양전지 개념도

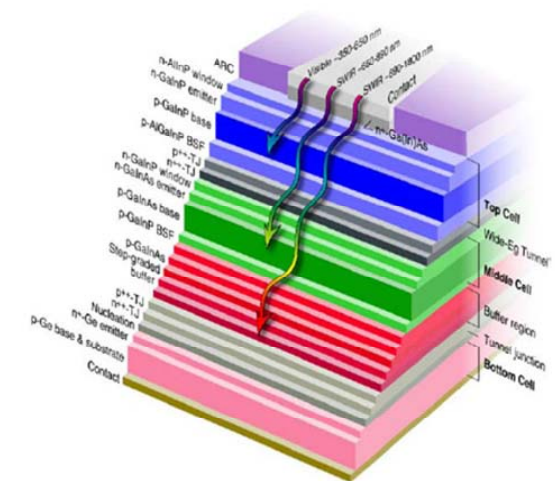
장 대역에 적합한 태양전지를 흡수 에너지 대역이 높은 순서로 수직으로 배치하고 각각에 전극을 연결하는 방법이 있으나 각 태양전지 증착시 사용한 기판을 제거하거나 최대한 얇게 제작해야 하며, 하부 전극을 최소화하거나 투명 전극을 사용하여 빛 투과를 최대화해야 하는 많은 기술적인 어려움이 있다. 박막형 실리콘 태양전지 등에서 시도되고 있지만은 전극 제작 공정이 까다로워 높은 효율을 얻지 못하고 있으며 대면적으로 제작이 어려워 제작 단가가 비싼 문제가 있다.

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 가능하게 되었다. (그림 7)과 같은 서로 다른 흡수대역을 가지는 태양전지들 사이에 터널정선 구조를 삽입하여 한 번의 박막 증착 공정만으로 (그림 8)과 같이 monolithic하게 다중접합 태양

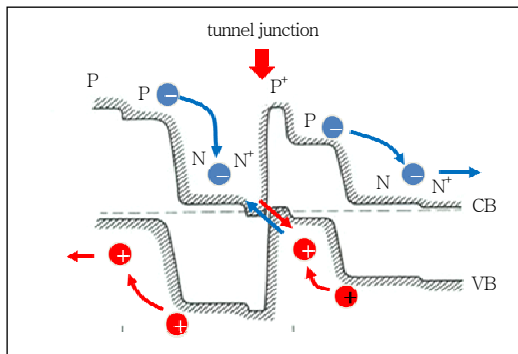
전지 제작이 가능하다[6]. 단일 접합 태양전지 간의 직렬 연결시 별도의 전극 공정이 필요하지 않으므로 단일 접합 태양전지 제작 공정과 동일하다. 따라서 적층 수가 증가하여도 제조 공정에 별도의 비용 증가가 없고 공정이 단순해 대량 생산이 용이하여 차세대 태양전지로 주목 받고 있다. (그림 9)는 III-V 화합물 반도체 태양전지의 적층에 따른 이론적 효율이다. (그림 9a) 구조는 현재 Spectralab에서 monolithic하게 성장하여 AM1.5, 1sun 측정 조건에서 32%의 효율을 얻었고, (그림 9b) 구조 구현은 Ga-InAsN cell의 효율이 향상되지 않아 개발이 지연되고 있다. (그림 9c)는 6중 접합 태양전지 구조로 태양광 흡수 대역을 세분하였으나 4중 접합 태양전지보다 효율이 낮을 것으로 예상된다.



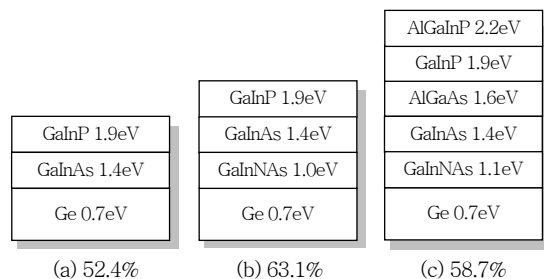
(그림 6) 초고효율 태양전지 배열 방식



(그림 8) III-V 화합물 반도체를 이용한 GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조



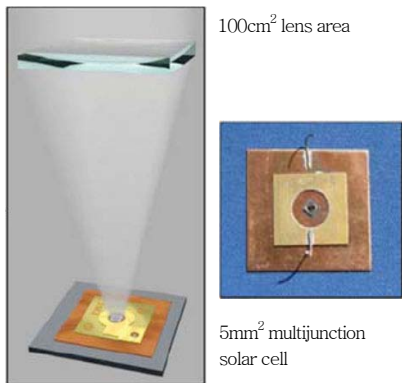
(그림 7) 터널정선 동작원리



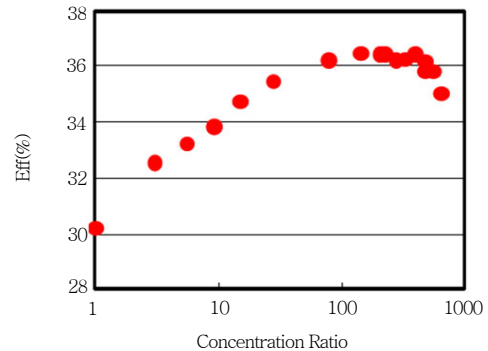
(그림 9) 다중 접합을 이용한 III-V 화합물 반도체 태양전지의 이론적 효율

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 집광장치(concentrator)와 III-V 화합물 반도체 태양전지를 결합하여 제조 단가 문제를 해결하고자 연구 개발하고 있다. 집광형 태양전지는 (그림 10)과 같이 태양광을 렌즈나 거울 등을 이용하여 넓은 면적의 태양광을 작은 면적의 태양전지에 빛을 모으는 방법을 사용한다. 집광형 태양전지는 가격이 저렴한 플라스틱 렌즈나 알루미늄 코팅 거울을 사용함으로써 태양광의 집광도가 높을수록 제조 단가가 비싼 태양전지의 면적을 줄일 수 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 (그림 11)과 같이 집광률이 200배까지 집광률 증가에 따라 효율이 증가하고 500배 이후에는 고집광으로 인해 많은 전류가 발생하여 전극에 저항이 발생하여 효율이 감소한다[7]. 그러나 III-V 화합물 반도체 태양전지는 1000배 집광시 효율이 1% 감소하므로 고집광형 태양광 발전 시스템에 적합하다. 고효율 III-V 태양전지와 집광장치를 결합한 태양광 발전 시스템이 실리콘 태양광 발전 시스템보다 발전 단가가 낮아 보다 경제적인 것으로 보고되고 있다[8]. 또한 집광형 III-V 화합물 반도체 태양광 발전시스템은 <표 1>과 같은 많은 장점을 가지고 있어 기존의 평판형 실리콘 태양광 발전 시스템보다 경제적이고 친환경적이다. (그림 12)는 대용량 발전을 위한 고집광 태양광 발전



(그림 10) 집광형 태양전지



(그림 11) III-V 화합물 반도체의 집광 비율에 따른 효율 변화

<표 1> 집광형 III-V 화합물 반도체 태양광 발전 시스템의 강점

강점	비고
저비용	- 태양광 발전 시스템 비용에서 태양전지 모듈 비중을 최소화(고집광) - 값싼 플라스틱 렌즈 사용
고효율성	- 설치비용 및 관련 부대 비용(땅과 유지보수비) 등 감소
재료 절감	- 태양전지의 면적을 최소화 함으로써 실리콘의 공급부족 현상이나 CIGS와 같은 indium 부족 현상이 적다.
높은 발전 단가 감소율	- 시스템에서 태양전지의 비중이 낮으므로 태양전지 효율 향상만으로도 발전 단가 감소 효과가 크다.
성능향상 용이	- 보다 효율 높은 태양전지로 교체가 가능하므로 전체적인 시스템 성능 향상이 가능하다(반사형이 용이).
재생 가능	- 시스템 구성이 대부분 철, 알루미늄, 플라스틱 등으로 이루어져 있어 재활용이 용이하다.
고부가가치 산업	- III-V 고효율 태양전지의 경우 태양전지 제조가 어려워 고부가가치 산업으로 육성 가능하다.



(a) 렌즈형



(b) 반사형

(그림 12) 집광형 태양광 발전 시스템

시스템이다. 일본은 (그림 12a)와 같은 렌즈형 위주로 연구 개발중이며, 미국과 호주는 (그림 12b)와 같은 대용량 발전이 가능한 반사형 집광 시스템 상용화에 주력하고 있다.

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 나노입자 등을 이용하여 기존 태양전지의 광전 변환 메커니즘을 대폭 개선한 3세대 MEG 태양전지는 실내 조명 등만으로도 저전력 디지털 기기의 전원으로 사용이 가능할 것으로 예상된다.

#### IV. 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 단가를 실리콘 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

#### 약어 정리

AM	Air Mass
MBE	Molecule Beam Epitaxy
MEG	Multi-Exciton Generation
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
PERL	Passivated Emitter and Rear Locally-Diffused cell
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide

#### 참고 문헌

[1] Frank Dimorth and Saeah Kurtz, "High-efficiency Multijunction Soalr Cells," *MRS BULLETIN*, Vol.32, Mar. 2007, pp.230-235.

[2] Martin A. Green, Keith Emery, David L. King, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhelm Warta, "Solar Cell Efficiency Tables(version 29)," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, Vol.15, 2007, pp.35-40.

#### ● 용어해설 ●

**AM:** 태양전지 측정 조건을 정의하기 위해 태양광을 정량화한 것으로 Air Mass number(AM m)라 한다. 이 값은 지구 표면에 입사되는 태양광의 입사각이  $\theta$ 일때 AM m은  $\cos(\theta)$ 의 역수에 비례한다. 대기권 밖은 AM0이면, 지표면에 수직 입사의 경우는 AM1이다.



- [3] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif, and N.H. Karam, "40% Efficient Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge Multijunction Solar Cells," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.90, 2007, p.183416.
- [4] Sntonio Luque, Antonio Marti, and Arthur J. Nozik, "Solar Cells Based on Quantum dots: Multiple Exciton Generation and Intermediate Bands," *MRS BULLETIN*, Vol.32, Mar. 2007, pp.236-241.
- [5] Randy J. Ellingson, Mattew 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.
- [6] 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.
- [7] Masafumi Yamaguch, Tatsuya Takamoto, and Kenji Araki, "Super High-efficiency Multijunction and Concentrator Solar Cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.90, 2006, pp.3068-3077.
- [8] Richard M. Swanson, "Promise of Concentrators," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, Vol.8, 2000, pp.93-111.