

## 특집

# III-V족 고효율 화합물 반도체 태양전지 기술개발 동향

김성일(KIST)

## 1. 서론

III-V 화합물 태양전지는 직접 천이형 밴드갭을 가지고 있으므로 간접 천이형 밴드갭을 갖는 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 높다. 따라서 실리콘 태양전지 보다 활성층의 두께가 얇아도 태양전지에 입사되는 태양에너지를 더 잘 흡수하는 장점을 가지고 있다. 또한 유기금속화학증착법(MOCVD; Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 이나 분자선 에피층 성장법(MBE; Molecular Beam Epitaxy) 등 에피층 성장기술의 발달로 다중접합(Multi-junction) 구조의 성장이 가능하며, 이 경우 태양스펙트럼의 이용 효율이 증대되어 초고효율 태양전지 제작이 가능하다. 또한 III-V 화합물 반도체는 고온 특성이 우수하여 온도 안정성 및 신뢰성이 우수하고, 또한 집광을 함에 따라 광전 변환 효율이 상승하는 특성이 있으므로 고배율 집광형 태양광 발전 시스템에 가장 적합하다. 따라서 최근에 III-V 화합물 반도체 태양전지에 대한 관심이 고조되고 있다.

III-V 화합물 반도체 다중접합 태양전지의

경우 적절한 재료 및 밴드갭을 잘 선택하여 다중접합 구조를 설계하면 태양에너지 스펙트럼의 넓은 영역을 이용할 수 있으므로 효율이 50% 이상의 초고효율 태양전지도 제작이 가능할 것으로 예상된다.

III-V 화합물 반도체 태양전지는 높은 광전 변환 효율에도 불구하고, 기판으로 사용하는 갈륨비소(GaAs) 등의 원재료비가 비싸고, 고가격의 증착 장비인 MBE, MOCVD 를 사용하므로 제조단가가 높다는 인식 때문에 지금까지는 인공 위성용 태양전지 등 특수한 용도로만 그 사용이 제한되어 왔다. 그러나 최근 40% 이상(40.7%, 미국 Spectrolab)의 높은 광전 변환 효율을 갖는 고효율 III-V 화합물 반도체 태양전지가 개발되고, 500 배 이상의 고배율 집광장치를 사용하여 태양전지 모듈의 가격 비중이 많이 낮아져서, 단결정 실리콘 모듈 및 시스템과 가격 경쟁을 할 수 있는 수준이 되었다.

그림 1은 현재 개발 및 상용화가 진행 중인 여러 가지 태양전지의 효율 증가 추이를 해마다 나타낸 그림이다. 가장 위에 있는 보라색의 실선으로 나타낸 곡선이 III-V 화합물 반도체

태양전지로 가장 효율이 높고, 효율 증가 추세가 당분간은 계속적으로 지속될 것으로 예상된다. 그 다음으로는 결정질 실리콘, 다결정 실리콘 및 CIGS 태양전지 등이 위치해 있다. 따라서 크게 나누어 보면 III-V 태양전지는 고효율 화를 지속적으로 추구할 것이고, 기타 태양전지들은 저가화 방향으로 연구개발 및 양산화가 진행될 것으로 예상된다.

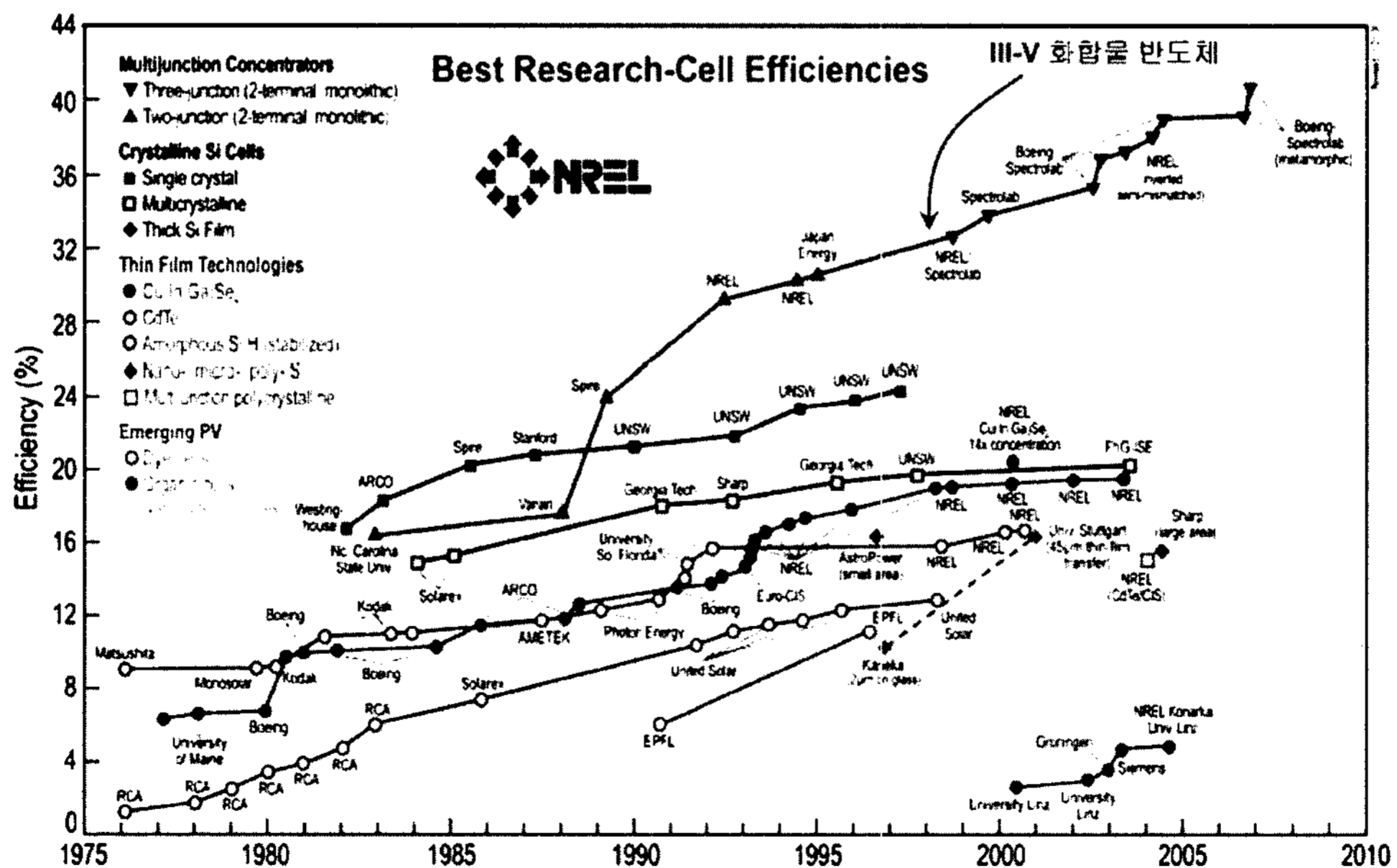
## II. 고효율 III-V 화합물 반도체 태양전지

### 1. 태양전지 이론 개요

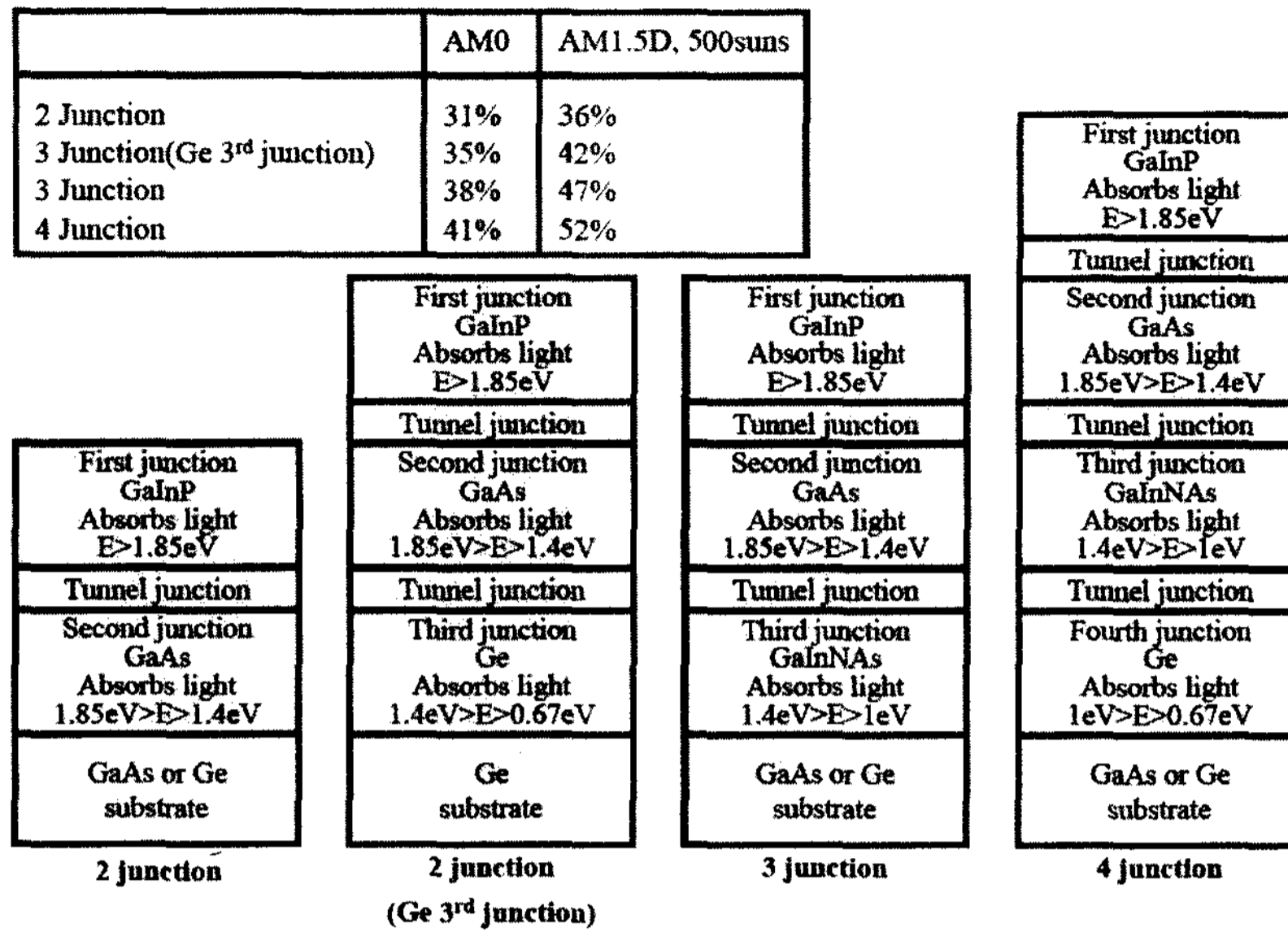
태양에너지 스펙트럼을 보면 파장이 변화됨에 따라 에너지 강도가 많이 달라짐을 알 수 있다. <sup>11)</sup> 따라서 고효율의 태양전지를 제작하기 위해서는 태양스펙트럼을 최대한 잘 활용할 수 있어야 한다.

그림 2는 여러 가지 재료를 적층하였을 경우 태양전지의 이론 효율을 나타낸다. [2] 여러 가지 밴드갭을 가진 재료를 잘 선정하여 적층된 태양전지 셀의 개수를 늘리면 태양전지 효율을 50% 이상으로 크게 할 수도 있음을 보여준다. 특히 아직까지 완전하게 개발이 되지 않은 InGaAs와 같은 1eV 근처의 밴드갭을 가진 재료를 사용할 수 있으면 태양전지의 효율이 많이 증가될 수 있음을 보여준다. 그러나 지금까지는 3개의 태양전지 셀을 적층한 3중 접합(Triple-junction) 구조의 태양전지 효율이 가장 높고, 4나 5개의 셀을 접합한 구조의 효율이 오히려 낮다. 그 이유는 아직도 충분히 좋은 전기적 및 광학적 특성을 갖는 재료가 개발되지 않았기 때문이다.

그림 3은 태양에너지의 스펙트럼을 잘 이용하기 위한 여러 가지 방법들을 나타내는 그림이다. 그림 3(a)는 수직방향으로 여러 개의 태양전지를 적층하여 가장 위층의 에너지부터



(그림 1) 여러 가지 태양전지 효율의 발전현황을 연도별로 나타낸 자료.



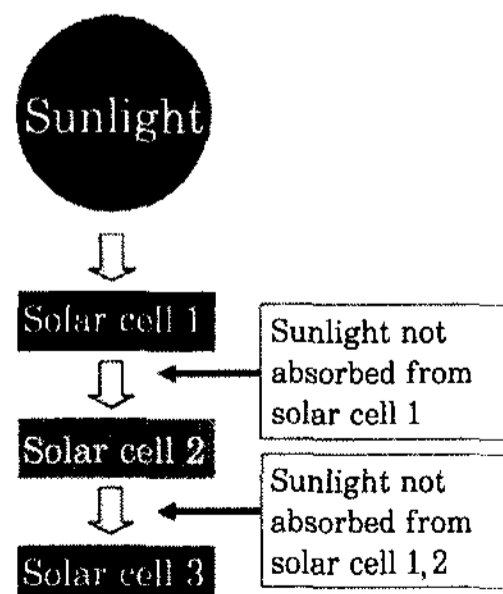
〈그림 2〉 이중, 삼중 및 4중 접합 태양전지의 구조 및 이론효율 비교 [2]

짧은 파장의 큰 에너지를 갖는 광자들을 흡수하고, 그 다음 셀에서는 중간 에너지, 그리고 가장 아래에 있는 셀에서는 가장 작은 에너지를 갖는 광자들을 흡수한다. 따라서 태양 스펙트럼의 넓은 영역에있는 광자 에너지를 흡수하므로 큰 효율을 갖는 태양전지의 제작이 가능하다. 연구의 초기에는 격자정합이 잘되는 다층접합 구조의 태양전지를 제작하기가 어려웠으므로 각각의 단위 셀들을 따로따로 제

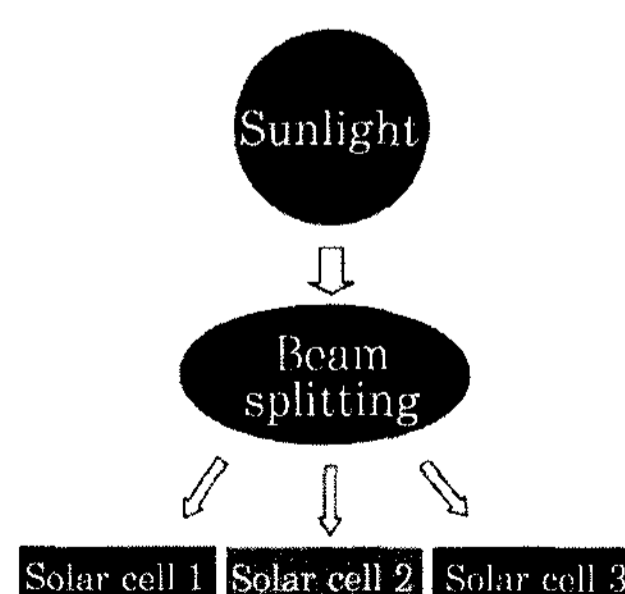
작한 후 기계적으로 쌓아놓았다. 이렇게 기계적으로 셀을 쌓는 경우에는 각각의 셀마다 두 개씩 전기적 단자가 생기므로 단자의 개수가 많아지는 단점이 있고 제작 비용도 부가적으로 많이 든다. 또한 상부 셀에서 흡수되지 않은 빛이 하부전극에서 차단되지 않도록 설계하는 것이 꼭 필요하다.

적층형 태양전지의 경우에는 격자 부정합 문제만 해결된다면 아무리 단위셀의 개수가 많

A) Mechanically stacking or monolithic 2 or more solar cells



B) Beam splitting to 2 or more solar cells



〈그림 3〉 태양에너지의 스펙트럼을 잘 이용하기 위한 여러 가지 방법들

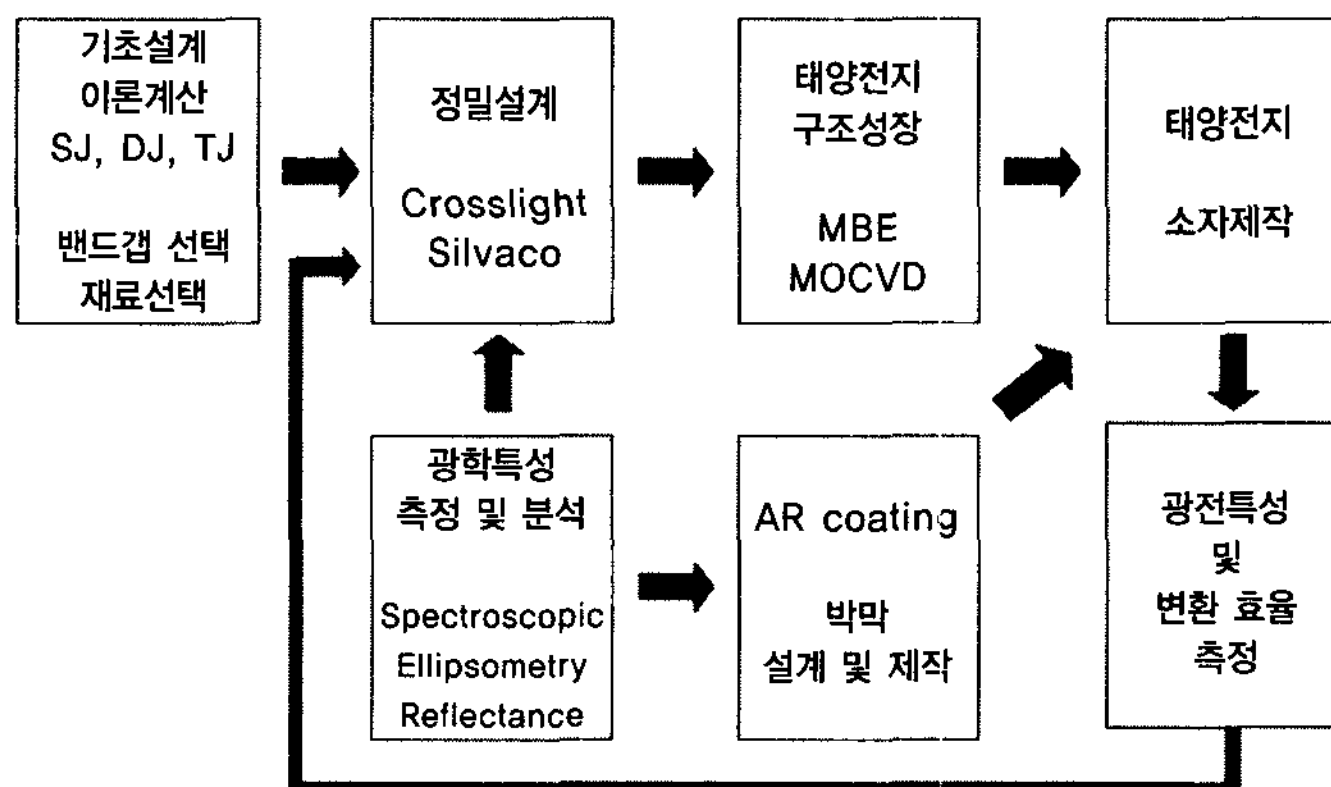
아도 전기적 단자는 위쪽 전극과 아래쪽 전극 2개 만 있는 장점이 있다. 이 경우에는 각각 단위 셀에서 생성되는 전압의 합이 태양전의 최종 전압이 된다. 그러나 전류의 경우에는 어느 한 단위 셀이라도 작은 값은 갖는다면 그 단위 셀의 전류 값이 최종 소자의 전류 값이 되는 단점이 있다. 따라서 적층 구조의 태양전지에서는 각각 단위 셀의 전류 값을 최적화하는 (current matching) 문제가 매우 중요하게 된다.

## 2. 고효율의 태양전지를 개발하기 위한 순서

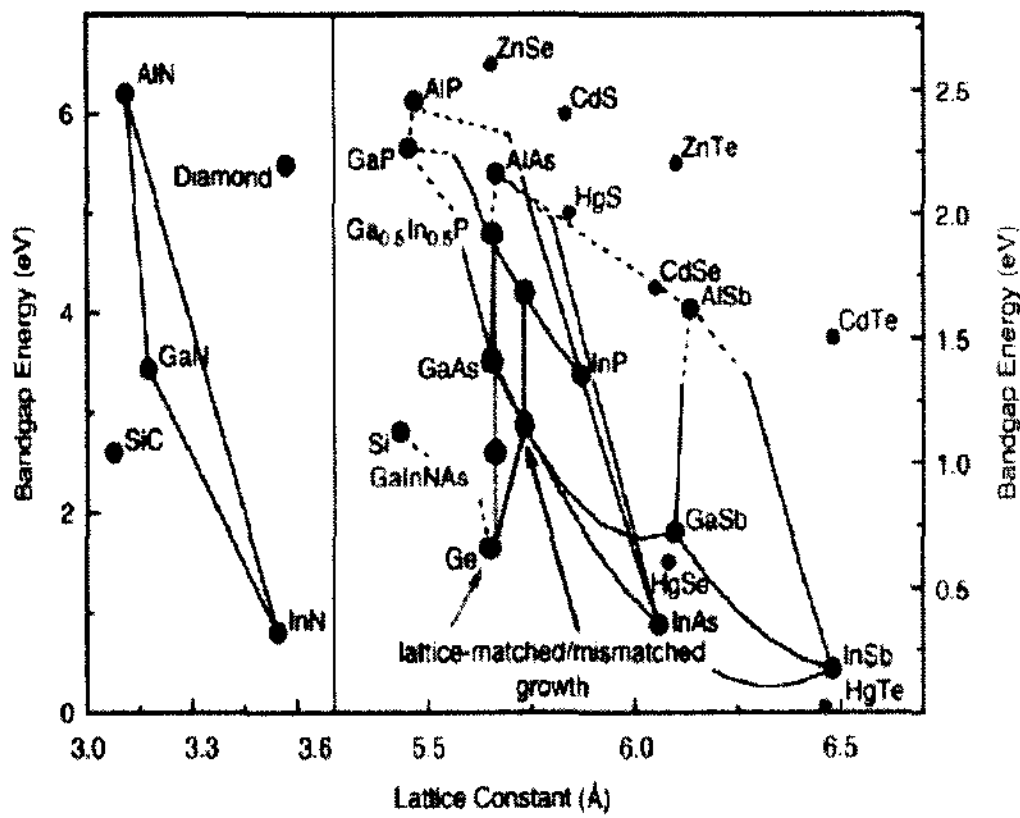
고효율의 태양전지를 개발하기 위한 순서를 그림4에 나타내었다. [3] 먼저 여러 가지 재료 및 밴드갭을 조합하여 개략적인 효율을 얻기 위한 재료 및 밴드갭을 먼저 계산 한다. 그 다음으로는 태양전지 소자의 최적화를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 수행하게 된다. 실험으로 바로 들어갈 경우 소요되는 시간 및 경비가 많이 소요되기 때문에 컴퓨터 기법으로 사전에 태양전지의 최적구조를 설계할 수 있다면 매우 유용한 방법이 될 수 있다. 비교적 많이 사용되는 상용 프로그램으로는 Crosslight

사의 APSYS 와 Silvaco 사의 ATLAS 등이 있다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 통하여 실제 실험 결과와 더 유사한 결과를 얻으려면 실제 태양전지에 사용되는 재료들의 전기적 및 광학적 특성들의 정확한 측정 값이 제공되어야 한다. 반도체 재료의 여러 가지 전기적 특성 즉, 도판트 타입, 도핑농도 및 이동도 특성을 얻기 위해서는 Hall 효과 측정이 주로 이용된다. 그리고 파장의 함수로 측정된 여러 가지 광특성을 구하기 위해서는 spectroscopic ellipsometry 방법이 주로 사용 된다. 또한 태양전지 표면위에 태양광이 입사될때 반사로 인하여 손실되는 부분을 최소로 만들기 위해 반사방지막 코팅(antireflection coating; AR coating) 이 사용되는데, 이 경우에도 각각 광학박막의 정확한 두께 정보 뿐만 아니라 단일 광학박막 또는 다층 광학 박막의 정확한 광학적 특성 및 반사율 등을 측정하기 위해서도 ellipsometry 측정이 사용된다.

III-V, 즉 3-5족 화합물 반도체 재료 및 소자 구조의 성장을 위해서 주로 갈륨비소(GaAs) 기판이 많이 사용된다. 밴드갭이 더 작은 장파장 영역의 재료 및 소자를 위해서는 InP 재료



〈그림 4〉 태양전지 설계 및 제작 순서도 [3]



〈그림 5〉 여러 가지 III-V 족 화합물 반도체에 대한 격자 상수의 함수일때 밴드갭

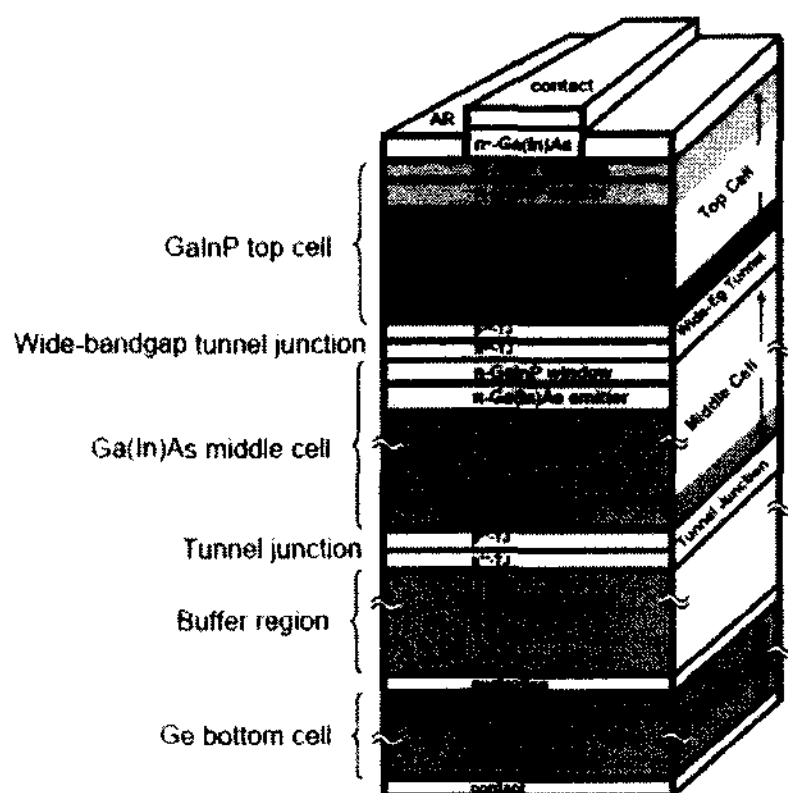
가 사용된다. GaAs 등의 기판위에 반도체 재료나 소자구조를 성장하기 위해서는 MOCVD 나 MBE 등의 에피층 성장 장치가 주로 사용된다. 이 경우 기판의 격자상수와 거의 유사한 격자상수를 갖는 재료를 선정하는 것이 매우 중요하다. 성장하려는 에피층과 기판의 격자상수가 많이 다를 경우 격자상수의 차이로 인하여 성장된 박막에 스트레인이 인가되거나 더 심한 경우에는 dislocation 이 에피층 내부에서 생성되어 성장된 에피층의 전기 및 광학적 특성을 현저하게 나빠지게 된다.

그림 5는 여러 가지 반도체 재료들의 격자 상수와 에너지 밴드갭의 특성을 나타낸 그림이다. 기판을 GaAs 로 사용할 경우 AlAs, Ge 및 GaInP 재료가 거의 격자상수가 일치함을 알 수 있다. 또한 ZnSe 도 비슷한 격자상수를 가지고 있다. 효율이 태양전지 효율이 40.7% 를 보여준 태양전지는 Ge, InGaAs 및 GaInP 재료로 이루어져 있으며 격자상수가 거의 비슷한 재료로 구성되어 있음을 알 수 있다.

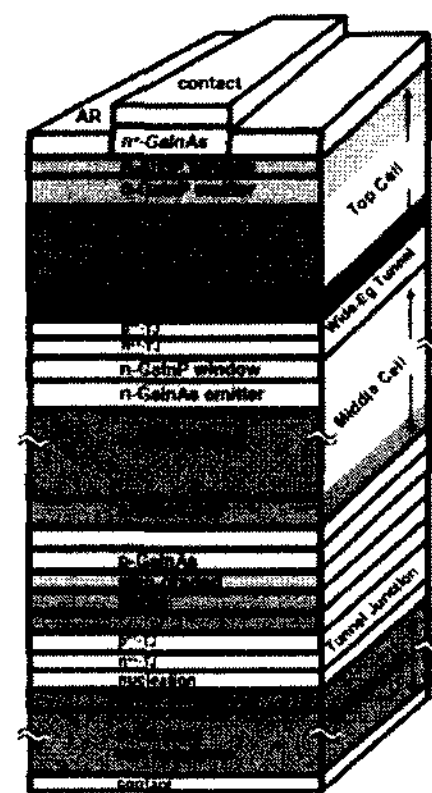
### 3. 격자정합 및 격자부정합 구조 태양전지

그림 6(a)는 격자 정합구조를 갖는 3중접합 태양전지의 구조를 나타낸다. 이 구조는 수년 동안 독일, 스페인 등의 나라를 포함한 유럽의 여러 나라 및 일본, 미국의 여러 연구소 및 대학 등에서 집중적으로 연구를 해온 구조이다. 그동안 많은 노력 및 연구가 집중되었지만 40% 미만의 광전변환 효율만을 달성하였다.

그러나 2006년 말에 미국의 Spectrolab에서 그림 6(b) 과 같은 격자 부정합 구조를 사용하여 극적으로 240 배의 집광상태에서 40.7%의 초고효율 태양전지 효율을 보고하였다. [4] 격



(a) Lattice-matched



(b) Lattice-mismatched or Metamorphic

〈그림 6〉 (a) 격자 정합 및 격자 부정합 3중 접합 태양전지 구조 (Spectrolab) [4]

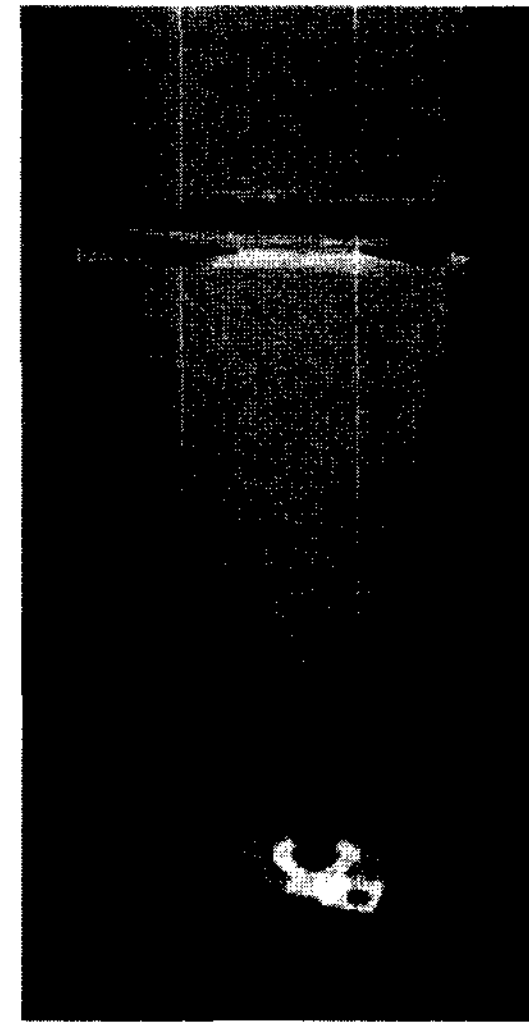
자 부정합 구조를 사용하면 그림 5에서 볼 수 있는 것과 같이 격자 상수와 밴드갭이 약간씩 달라지게 된다. 이 경우에는 태양전지의 이론 효율 값도 약간 달라지게 된다. Spectrolab 에서는 이러한 metamorphic 구조를 성장하기 위해 MOCVD 장치에다 실시간으로 성장되는 에피층의 스트레인을 관측할 수 있는 장치를 부착하여 에피층 성장 중에 스트레인을 제어하는 기술을 사용하였다.

#### 4. 반사방지막 (Antireflection(AR) coating)

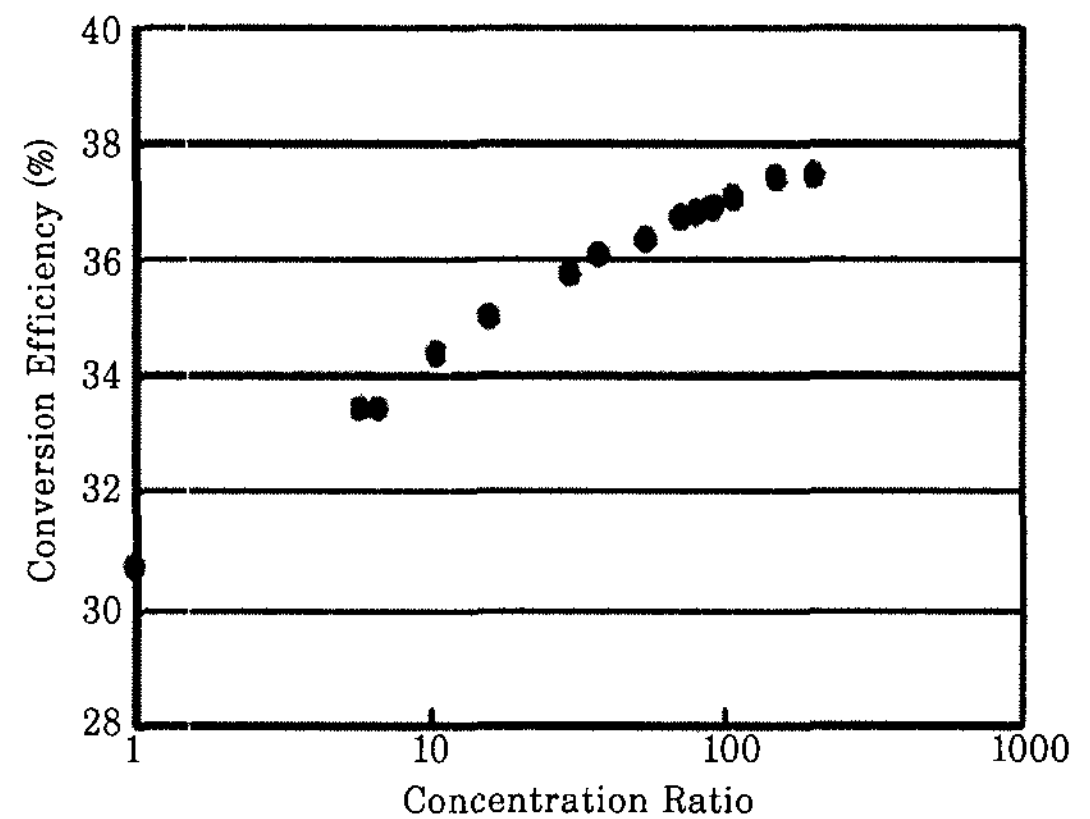
태양전지 표면에 입사되는 모든 태양에너지가 태양전지 흡수층 안쪽으로 모두 흡수될 수 있으면 가장 바람직하게 된다. 그러나 태양전지 표면에 아무런 처리도 하지않는 경우에는 약 30% 이상의 태양에너지가 표면에서 반사되어 손실된다. 이런 반사가 발생하지 않도록 하기위해 반사방지막을 표면에 증착하는 것이 필요하다. 적당한 두께의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  광학 박막(약 70 nm)을 GaAs 기판위에 증착하면 반사율을 현저하게 줄일 수 있다. 또한 특정 파장 영역의 반사율을 줄이기 위해서는 ZnS,  $\text{MgF}_2$  등 다양한 재료들이 사용될 수 있으며 단일 광학 박막 보다는 2층 또는 3 층의 광학 박막을 사용하면 반사율을 더 많이 줄일 수도 있다.<sup>[5]</sup>

#### 5. 집광형 태양전지

집광형 태양전지의 핵심 아이디어는 가격이 비싼 태양전지는 조금만 사용하고, 그 대신 광학렌즈(Fresnel lens) 등을 사용하여 태양 빛을 태양전지에 집광시켜서 시스템의 단가를 낮



(a)

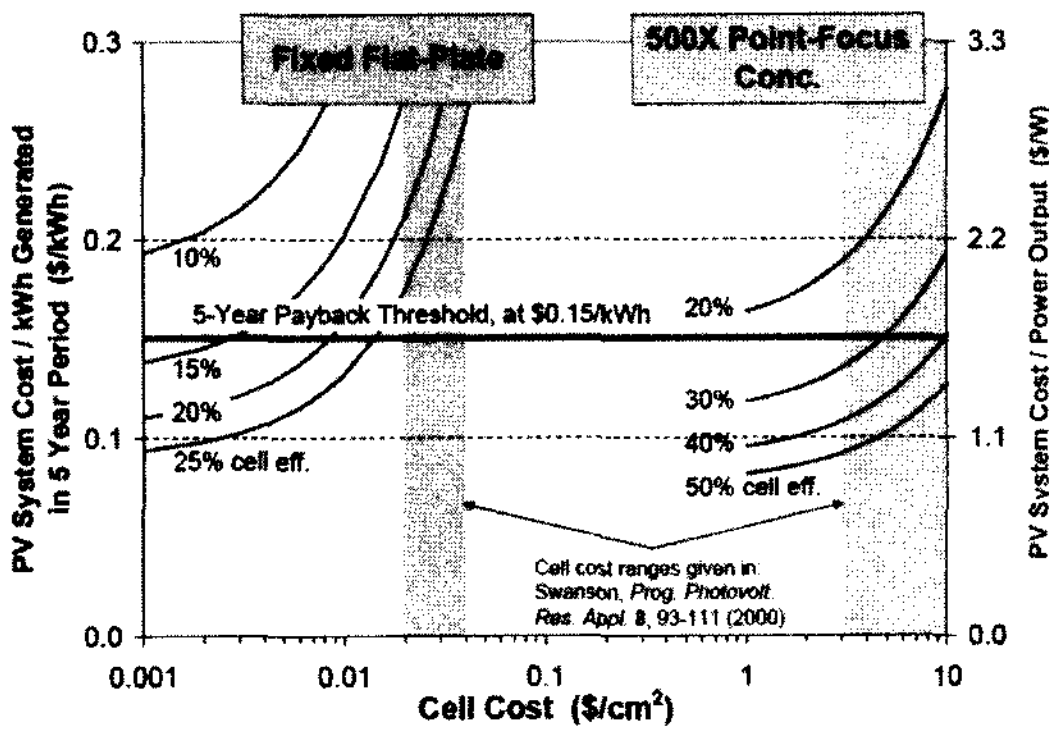


(b)

〈그림 7〉 (a) 집광형 태양전지의 개요도.

(b) III-V 화합물 반도체 태양전지의 집광비 vs. 효율변화.<sup>[7]</sup>

추는 것이다. 실리콘 태양전지의 경우에도 경우에도 집광이 가능하지만 실리콘은 간접천이형 반도체이므로 온도가 증가하면 효율이 민감하게 감소하므로 약 20 배 정도까지의 집광에만 사용된다. 그 이상의 집광도 가능하지만 이 경우 소자 제작 단가가 상승하므로 큰 이득이 없는 것으로 알려져 있다.<sup>[6]</sup>



〈그림 8〉 태양전지의 단위 셀의 단가 및 효율이 시스템 투자 후 비용회수에 미치는 영향을 비교한 그림. [8]

한편 III-V 화합물 반도체는 고온 특성이 우수하여 온도 안정성 및 신뢰성이 우수하고, 또한 집광을 함에 따라 광전 변환 효율이 상승하는 특성이 있어 고배율 집광형 태양광 발전 시스템에 가장 적합한 것으로 생각 된다. 그림 7(a)에 집광형 모듈의 개요도를 나타내었다. 또한 집광시 유리한 장점으로서는 그림 7(b)에 나타낸 바와 같이 집광배율이 증가됨에 따라 태양전지의 효율이 증가하는 것이다. [7]

그림 8은 태양전지의 단위 셀의 단가 및 효율이 시스템 투자 후 비용회수와 관련하여 계산한 자료를 보여 준다. [8] 태양전지의 제작 단가가 비싸지더라도 태양전지의 증대되면 태양전지 시스템 전체로 놓고 보면 가격 경쟁 면에서 이득이 됨을 알 수 있다.

### 6. MOCVD 및 MBE 를 사용한 에피층 및 태양전지 구조 성장

III-V 화합물 반도체 태양전지를 대량생산 하기위해서 MOCVD 장치가 주로 사용되고 있다. MOCVD 의 경우 4인치 기판을 6매 또는 7매의 기판을 동시에 리액터에 장입하여

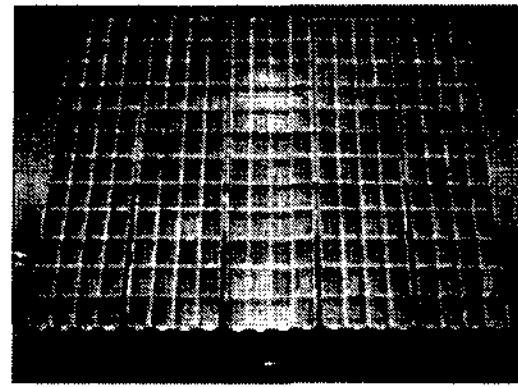
에피층 및 태양전지 구조 성장을 하게 된다. 비교적 균일한 성능을 갖는 에피층 및 구조가 성장되는 것으로 알려져 있다. 실험실 수준에서는 MOCVD 뿐만 아니라 MBE 장치도 많이 사용되고 있다. 비록 초고진공 장비이므로 비록 고가이기는 하지만 두께 및 도핑 제어에 있어서 유리한 점도 있기 때문이다.

### 7. 화합물 반도체 태양전지 상용화 분야

III-V 고효율 화합물 태양전지는 그 동안 주로 인공위성 및 우주용으로만 사용되어 왔다. 그러나 최근 500 배 이상의 집광형 및 고효율 태양전지의 개발로 인하여 모듈 및 시스템의 단가가 현저하게 낮아져서 결정질 실리콘 시스템과 경쟁할 수 있는 수준이 되었다. 그림 9는 현재 세계 여러 나라에 설치되어 있는 여러 회사의 III-V 화합물반도체 태양전지 시스템 들이다. 주로 미국, 유럽 그리고 일본에서 활발한 연구 및 상용화가 진행 중이다.

현재 상용화가 진행 중인 몇 가지 프로젝트들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 미국의 DARPA 에서는 2005년 11월부터 53M\$를 투자하여 야심적인 VHESC (Very High Efficiency Solar Cell Project) 프로젝트를 시작하였고, 효율 50% 이상의 초고효율 태양전지 개발을 목표로 하고 있다. 이 과제에서는 입사된 태양광을 프리즘 등의 방법을 사용하여 여러 가지 파장 영역별로 분류한 후 각 파장 영역에서 가장 효율이 높은 재료로 제작한 태양전지를 수평으로 배열하는 방법을 사용할 예정이다. 2007년 7월 세계 최고 효율인 42.8% 를 달성했다고 보고하고 있다. [9]

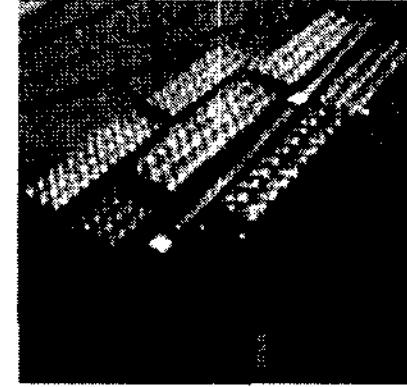
일본에서는 NEDO 프로젝트를 통하여 Sharp, Daido Steel, Toyota 등의 기업 및 대학



Amonix Inc., USA



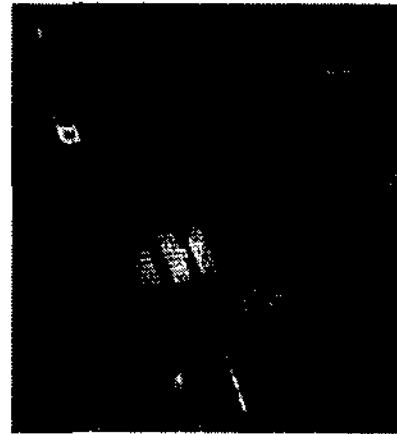
Isofoton, Spain



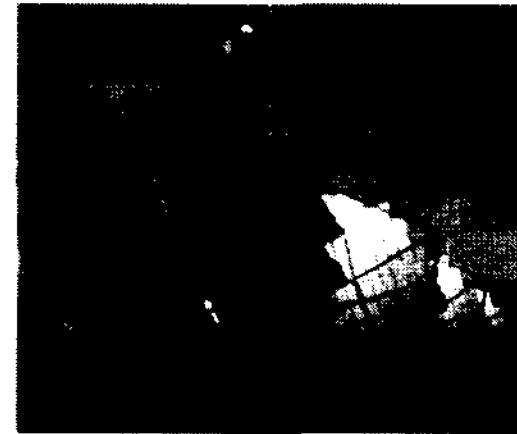
Daido Steel, Japan



SolFocus, USA



Concenirix Solar, Germany



Solar Systems, Australia

〈그림 9〉 세계 여러 나라에 설치되어 있는 III-V 집광형 태양전지 시스템 모습

을 중심으로 초고효율 태양전지 개발 및 시스템 신뢰성 테스트 연구를 수행 중이다. 2010년까지의 개발목표로는 셀 효율 40%, 모듈 효율 28% 및 모듈가격 100 엔/W 등이다.

호주의 Solar Systems 사에서는 Victoria Project 를 시작하였다. 프로젝트 기간은 2007년 부터 2013년 까지이고, 154 MW, Large Power Plant (420 M\$ 규모)를 세우는 프로젝트이다. III-V 다중접합 태양전지 모듈은 Spectrolab (x500)으로부터 공급 받고, Concentrator는 Heliostat (대형 거울 어셈블리)형을 사용한다. 프로젝트가 끝나면, 연간 270 GWh 전력을 생산하고 약 45,000 가구에 전력 공급이 가능할 것으로 예상된다.

### III. 끝맺는 말

우리나라에서는 그 동안 III-V 화합물 반도체 분야의 투자가 매우 제한적으로만 있어 왔

고, 그 중에서도 특히 화합물 반도체 태양전지에 대한 투자는 거의 없었다. 최근부터 KIST와 ETRI 등에서 III-V 족 화합물 반도체 태양전지 연구가 새로 시작되었다.

우리나라에서는 그 동안 화합물 반도체 LED 분야에 많은 투자가 있었다. LED에 사용되는 재료, 소자 구조 및 성장 장치 등이 구조는 태양전지와 매우 유사하므로 지금부터라도 화합물 반도체 태양전지 분야에 관심을 기울이고, 연구 및 투자를 시작한다면 매우 급속한 속도로 기술적 발전을 이룰 수 있을 것으로 예상된다.



## 참고문헌

- [1] S.M. Sze, Physics of semiconductor devices, 2nd ed. (Wiley, New York, 1981).
- [2] D.J. Friedman et al., Journal. of Crystal Growth 195, 409-415 (1998).
- [3] 김성일, "태양전지", Focus Session, 춘계물리학회, 대전 컨벤션센터, April (2008).
- [4] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif, and N. H. Karam, Applied Phys. Lett., 90, 183516 (2007).
- [5] A.L. Luque and S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, Chap. 9 (Wiley, England, 2003).
- [6] A.L. Luque and V.M. Andreev, Concentrator photovoltaics, Chap. 3 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007).
- [7] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, N. E. Daukes, Solar Energy 79, 78 (2005).
- [8] Swanson, Prog. Photovolt. Res. Appl. 8, 93 (2000).
- [9] www.sciencemag.org SCIENCE, 317, 583 (2007).

## 저자소개



김성일

1983년 2월 전남대학교 계측제어공학과 학사  
 1986년 2월 KAIST 물리학과 석사  
 1994년 2월 KAIST 물리학과 박사  
 1986년 3월-현재 KIST 나노과학 연구부 책임연구원  
 2001년 3월-현재 고려대학교 공대 대우 부교수  
 주관심 분야 : 태양전지, 반도체 소자, 반도체 장비

## 용어예설

## 제한적 본인확인제

## 制限的本人確認制 [정보보호]

사용자명을 실명이 아닌 별명이나 ID만 표시하도록 하는 제도. 일종의 인터넷 실명제로 허위사실이나 불법정보 유포 및 과도한 욕설이나 타인의 명예를 훼손하는 글 등 인터넷 질서를 어지럽히는 게시글이나 댓글을 일정부분이라도 방지해 보자는 취지에서 마련한 것이다. 정부는 일방문자수 30만명 이상의 포털과 일방문자수 20만명 이상의 인터넷 언론 등에 제한적 본인확인제를 도입토록 하고 있다.