

◆ 특집 ◆ 태양광 활용기술

태양전지 개발동향 및 향후 전망

Current Status and Future Prospects of Solar Cells

✉ 이재형¹

✉ Jae Hyeong Lee¹

¹ 군산대학교 전자정보공학부 (School of Electronic and Information, Kunsan Nat. Univ.)

✉ Corresponding author: jhyi@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-4707

Key Words: Photovoltaic or Solar Cell (태양전지), New and Renewable Energy (신재생에너지), Silicon (실리콘), Thin Film (박막), Compound Semiconductor (화합물 반도체), Conversion Efficiency (변환효율)

1. 서론

최근 석유자원 고갈의 위기감 및 자원 민족주의, 달러화 약세 등이 형성시킨 고유가 기조가 지속되고, 지구 온난화 방지를 위한 교토 의정서의 기후변화협약 발효에 따른 국제적인 온실가스 규제 움직임이 강화됨에 따라 청정 에너지관련 기술이 최대 관심 사업으로 떠오르고 있다. 특히 햇빛으로 전기를 생산하는 태양전지(solar cell 또는 photovoltaic cell)를 활용한 태양광발전 산업은 불과 3년 사이에 연간 47%씩 성장하여 150억 달러 규모의 시장으로 성장하였다. 이러한 빠른 성장에 힘입어 최근 미국 실리콘 벨리에서는 닷컴 대신 에너지 기업인 왓컴(watt com, Watt는 전력의 기본 단위) 기업이 새로운 주류로 등장하고, 태양광 발전 기업이 크게 늘면서 '솔라(Solar) 벨리'라는 별칭이 붙기도 했다. 국내에서도 삼성전자, LG 전자, 현대중공업, 한국철강 등 많은 기업들이 태양광 발전의 핵심 부품인 태양전지 관련 사업을 차세대 성장 동력으로 적극 육성하고 있다.¹ 특히, 실용 정부는 '저탄소 녹색성장'을 국가 발전의 새로운 비전으로 제시하고, 녹색기술과 청정에너지로 신성장 동력뿐만 아니라 일자리를 창출하는 신국가

발전 패러다임으로 정하였다. 이를 위해 태양광발전과 같은 신재생에너지(new and renewable energy) 사용 비율을 현재 2%에서 2030년에는 11% 이상, 2050년에는 20% 이상으로 높이기로 하였다. 구체적으로는 신재생에너지를 확충한 '그린홈' 100만호를 보급하고, 친환경 고효율 '그린 카'를 신성장 동력산업으로 중점 육성하겠다는 계획이다.

태양광발전 기술이 새로운 대체 에너지원으로 사용되기 위해서는 현재의 화석연료와 비교하여 가격 경쟁력을 갖추어야 한다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 태양광발전의 핵심 소자인 태양전지의 효율이 크게 증가하여야 하고, 제조 가격 또한 감소해야 한다. 지난 수십년간 다양한 반도체 재료들, 예를 들면 실리콘 (silicon; Si) CdS (cadmium sulphide), GaAs (gallium arsenide), CdTe (cadmium telluride), CIS (copper indium diselenide) 등의 물질들을 사용하여 새로운 전지 구조 및 공정 개발을 통해 저가화와 고효율화가 진행되어 왔다.

본 논문에서는 현재 상용화되었거나 개발 중인 태양전지들을 중심으로 기술개발 현황 및 앞으로의 전망들에 대해 기술하고자 한다. 다만 최근 저가형 태양전지로 많은 관심을 받고 있는 염료감응형(dye-sensitized) 및 유기 태양전지(organic solar

cell)은 지면 관계상 다루지 않았다.

2. 태양전지 구조 및 종류

태양전지는 태양으로부터의 빛 에너지를 직접 전기로 변환시키는 태양광발전의 핵심소자이다. 태양전지의 사용은 1839 년 프랑스의 물리학자 E. Becquerel² 가 전해질(electrolyte)속에 담긴 전극에 빛 조사 시 발생하는 광전효과(photovoltaic effect)를 처음으로 발견한 이후 관심을 가지기 시작하여, 1954 년 D.M. Chapin³이 Bell Telephone 연구소에서 5% 효율의 최초의 p-n 접합 실리콘 태양전지 개발을 시작으로 태양전지는 차세대 에너지 자원으로 주목을 받게 되었다. Fig. 1(a)는 전형적인 태양전지 구조를 나타낸 것으로 기본적으로 에미터(emitter)인 n 층과 베이스(base)인 p 층으로 구성되어 있다. 표면에는 보통 빛이 투과할 수 있도록 전극을 총 표면적의 5~15% 사이로 만들고, 후면에는 전 면적에 걸쳐 전극이 형성되어 있다. 또한 표면에는 빛 반사 방지용의 산화막이 코팅되어 있다. 태양전지 동작원리는 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 빛 에너지를 흡수, 전하 캐리어(정공, 전자)를 생성, 분리, 수집하여 외부에 전기에너지를 공급한다. 태양전지 내부에 서로 다른 극성을 가지는 n-형과 p-형 반도체를 접합하면 태양전지 내부에 생성된 전위차에 의해서 빛에 의해 생성된 전하가 분리되고 전극으로 수집됨으로써 전류를 흐르게 한다. 이것이 태양전지의 p-n 접합에 의한 태양광발전의 원리이다.

태양전지는 전기 제작에 사용되는 재료, 형태, 원리 등에 따라 분류할 수 있다. 재료에 따라서는 크게 실리콘계, 화합물계, 유기물계 등으로 구분할 수 있고, 형태에 따라서는 결정질 벌크(crystalline bulk), 박막(thin film)형, 집광(concentrator)형 등으로 구분될 수 있으며, 원리에 따라서는 크게 p-n 접합으로 구성된 반도체 접합형, 염료감응형 태양전지로 대표되는 광전기화학형으로 구분될 수 있다. 한편, 현재 시장현황 및 기술개발 상황을 고려하면 결정질 실리콘 태양전지, 박막형 태양전지, 초고효율 태양전지, 차세대 태양전지로 나눌 수 있다. 특히, 최근에는 박막형, 유기물 태양전지 등 차세대 태양전지에 대한 관심이 높아지고 이에 대한 연구개발이 활발히 진행되어 변환효율이 빠른 속도로 향상되고 있다.

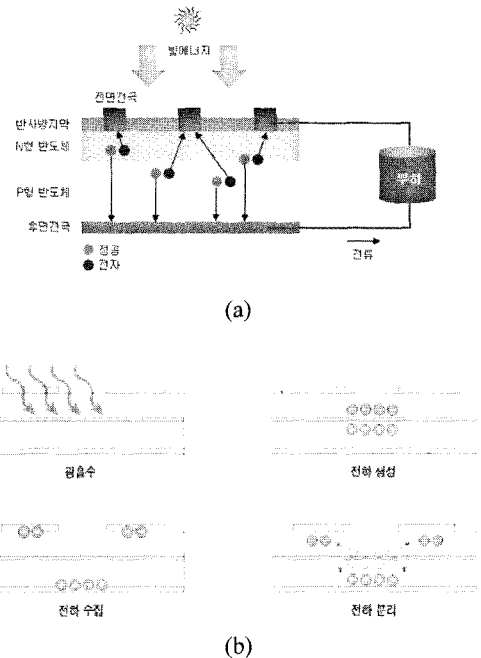


Fig. 1 Structure (a) and operation principle of a solar cell

3. 결정질 실리콘 태양전지 개발 동향

결정질 실리콘 태양전지는 단결정(single 또는 mono crystalline) 또는 다결정(poly 또는 multi crystalline) 실리콘 웨이퍼를 이용한 p-n 동종접합(homojunction) 형태의 태양전지로 지금까지 가장 많은 연구개발이 진행되어 기술적으로도 가장 성숙되어 있는 1 세대 태양전지이다. 단결정은 순도가 높고, 결정 결함 밀도가 낮은 고품위의 재료로서 당연히 높은 효율을 달성할 수 있으나 가격이 비싸다. 최근에는 원재료 비용을 낮추기 위해 단결정 실리콘 대신 대부분 다결정 실리콘 웨이퍼를 이용한 태양전지가 생산, 판매되고 있다. 다결정 실리콘 태양전지의 저가, 고속 제조 방법의 개발, 웨이퍼 두께 감소, 전극 구조 및 표면 요철 조절 등 가격은 낮추면서 단결정 실리콘 태양전지에 가까운 효율을 얻기 위한 연구 개발이 진행되고 있다.

3.1 단결정 실리콘 태양전지

단결정 실리콘은 공업화 면에서나 자원적인 면에서 풍부하고 우수한 재료이다. 태양전지 개발 초기부터 현재까지의 단결정 태양전지 효율 변화

를 Fig. 2 에 나타내었다.⁴

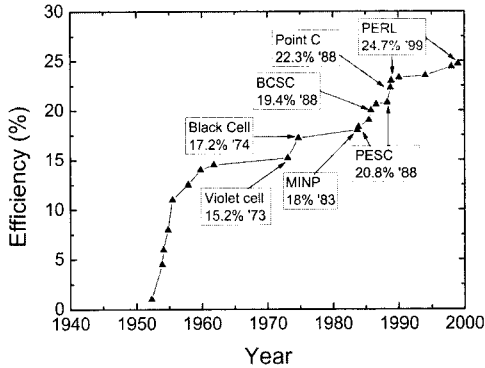


Fig. 2 Development of conversion efficiencies for single crystalline solar cells

1960 년대에는 우주용 태양전지가 15%의 효율을 나타내었다. 현재 최고의 변환 효율은 호주의 UNSW(University of New South Wales) 대학에서 개발한 PERL(Passivated emitter Rear Locally-diffused) 구조 태양전지에서의 24.7%이다.⁵ PERL 태양전지의 특징은 광 흡수 면이 역 피라미드 표면구조를 가지며, 후면이 부분적으로 P+층을 갖고, 태양전지 기관의 전, 후면에 200Å의 산화층을 입혀 표면에서의 재결합을 줄이도록 하고 있다. 또한 전면 전극 아래의 실리콘 층을 n+층으로 처리하여 전극과 실리콘 층과의 접촉 저항을 줄이고자 하였으며, 빛 흡수를 극대화하기 위하여 역 피라미드 표면 위에 이중 반사 방지막을 채택하고 있다. 그림 3 은 이러한 PERL 태양전지 구조를 나타낸 것이다. 그러나 이러한 초고효율 태양전지는 제작 공정이 30 단계 이상이고, 고난도, 고가의 장비와 고비용 공정을 사용하고 있어 현재 연구실 수준에서 이루어질 뿐 산업계에 적용하기에는 현실적인 어려움이 있다. 양산화와 대면적화의 요구조건을 만족하는 실리콘 태양전지는 스크린 인쇄법(screen printing)에 의한 전극을 갖는 구조로써 변환 효율이 16% 내외이다. 현재 태양전지 공정에 대한 연구는 태양전지 제조 공정 단순화, 대량 생산용 연속 제조공정, 저온 급속 열처리 공정 개발과 고효율을 달성하기 위한 표면처리 기술에 집중되어 있다.

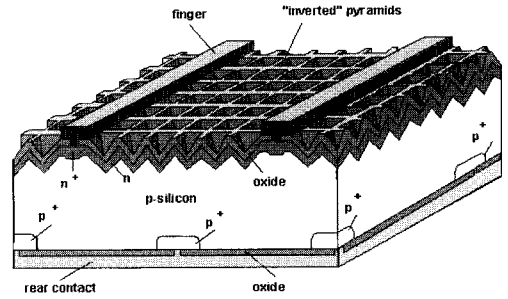


Fig. 3 Structure of PERL solar cell

3.2 다결정 실리콘 태양전지

다결정 실리콘 태양전지의 효율은 Fig. 4 에서와 같이 지난 20 년 동안 꾸준히 발전되어 왔다. 이러한 발전은 고품질 재료의 개발과 태양전지 제작 공정의 개발에 의해 이루어진 것이다. 현재는 양산용의 일반적인 다결정 태양전지의 효율은 14~16%이다. 다결정 태양전지의 생산은 21 년 전부터 시작하여⁶ 현재는 단결정 실리콘 태양전지보다 높은 시장 점유율을 나타내고 있다. 특히, 1995 년 이후로 다결정 실리콘 기관의 사용은 매년 증가하여 향후 더욱 더 가속화 될 것으로 예상된다.⁷ 다결정 태양전지 효율은 1980 년의 8%에서 2000 년 14.5%(양산 기준)로 증가하였으며, 태양전지용 웨이퍼 절단 기술 발전에 따라 태양전지의 면적은 90 에서 230 cm²으로 커졌다.

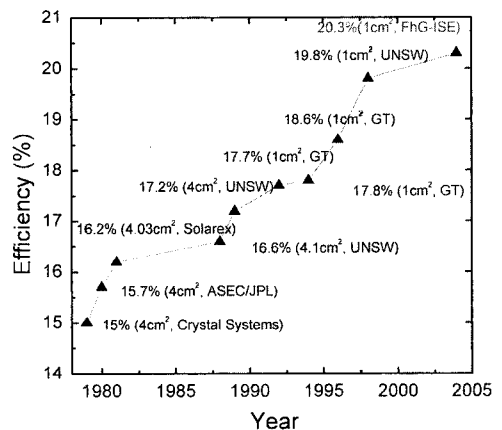
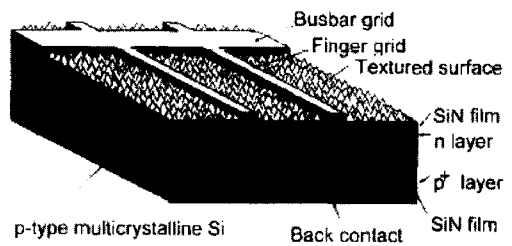


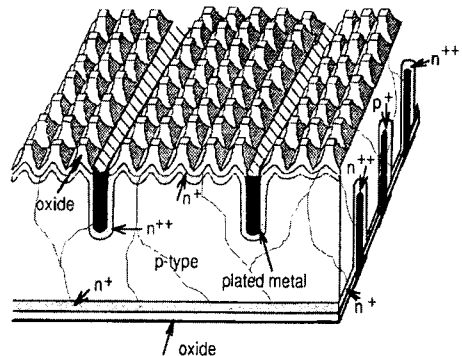
Fig. 4 Progress in mc-Si cell efficiency over the past two decades

다결정 실리콘 분야에서도 단결정 실리콘과 유사하게 고가, 고난도의 공정을 사용하여 16% 이상의 고효율을 달성하기 위한 노력이 진행되고 있다. 특히, 게터링(gettering)과 결함 패시베이션(passivation)을 통해 변환 효율이 크게 향상되었다. Fig. 5 에는 개발된 고효율 다결정 실리콘 태양전지 구조 예⁴를 나타내었다. Kyocera 사에서는 다결정 실리콘 태양전지를 n+p-p+ 형태로 전면과 후면의 실리콘 질화막(SiN) 표면처리⁸와 RIE(reactive ion etching)법으로 표면을 텍스처링시켜 고효율을 달성하였다. 수소를 포함하고 있는 실리콘 질화막(SiN:H)막은 금속 접촉을 위한 열처리시 웨이퍼 속으로 확산하여 벌크 내 결정 결함을 패시베이션 시키는 역할뿐만 아니라^{9,10} 부분적인 반사방지막(antireflection coating)의 역할을 한다. SiN 막을 이용한 산업용 다결정 태양전지는 1984 년에 개발되었으나¹¹ 1990 년대 말까지 이러한 패시베이션 공정이 널리 쓰이지는 않았다. 그러나 최근에는 실리콘 질화막을 이용한 패시베이션은 고효율 실리콘 태양전지 제작에 있어 매우 중요한 공정으로 평가되고 있다. 또한 RIE 기술의 향후 연구는 기존에 독성이 있는 CI 을 기반으로 한 건식식각에서 환경친화적인 SF6 계열의 반응가스를 이용한 표면 텍스처링을 구현하는 것이다. 한편, UNSW 에서는 단결정 고효율 태양전지 제조기술인 BCSC(Buried Contact Solar Cell)를 다결정 기관에 적용하는 방법과 불순물 제거기술, 그리고 접합부의 누설 전류를 억제하기 위해서 사진 석판기술(photo lithography)을 이용하여 17.1%의 효율을 달성하였다. 이때 다결정 기관 내에 존재하는 철, 니켈, 코발트 등의 불순물은 n+p 접합 형성을 위한 불순물 확산 후에 전기로의 온도를 천천히 식히는 방법으로 석출하고, 이 불순물을 포함한 표면층을 다시 식각(etch back)하였다. 또한 표면 재결합을 줄이기 위해서 열 산화막을 성장하였다. 한편, Sharp 사에서는 multi-blade wheel grinding 방법으로 표면에 V-형 홈을 형성하여 1 cm²의 면적에서 18.6%, 10 cm×10 cm의 면적에서 17.2%의 변환 효율을 얻었다. 현재는 기계적으로 V-형 홈을 형성하고, 원형 고무 막대에 Ag 금속선을 자동으로 인쇄하는 기술을 이용해 상용화하기 위한 노력을 하고 있다. 미국 조지아 공대(GIT)에서는 HEM(heat exchange method) 방법으로 제작된 다결정 실리콘 이용하여 n+-p-p+ 형태의 태양전지를

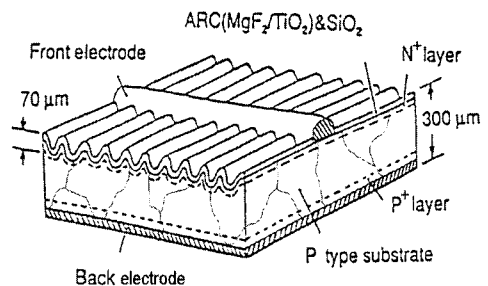
제작하였고, 1 cm²의 면적에서 변환효율은 18.6%를 보였다.¹² 한편, UNSW 에서는 PERL 구조와 유사한 벌집 모양(honey comb)의 표면구조를 이용하여 변환효율 20%에 근접한 태양전지를 제조하였다¹³. 독일의 프라운호퍼 연구소에서는 후면에 국부적인 금속접촉을 이용하여 20.3% 변환효율을 달성하였다.



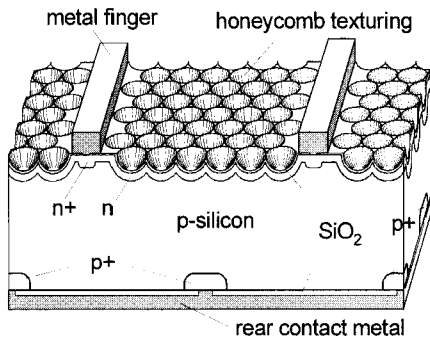
(a) Kyocera, 17.2% (1996)



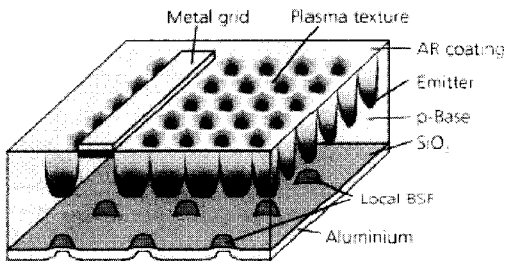
(b) UNSW, 16.9% (1996)



(c) Sharp, 17.2% (1993)



(d) UNSW, 19.8% (1999)



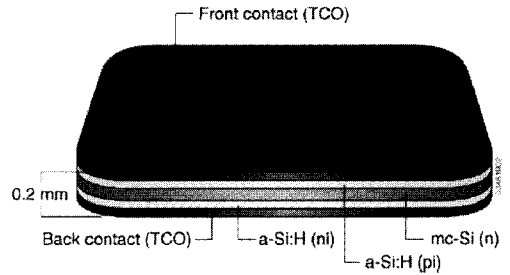
(e) Fraunhofer, 20.3% (2004)

Fig. 5 Several structures of high efficiency multi-crystalline solar cells

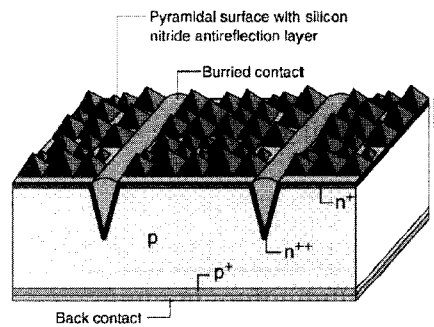
한편, 이러한 변환효율 향상뿐만 아니라 저가화와 대량생산 기술 또한 발전하였다. 1980년대 말까지 대부분의 태양광 회사들은 리소그래피 대신에 스크린 인쇄를 이용하였다. 또한 Solarex(현 BP Solar)는 튜브 형의 확산 공정을 벨트 퍼니스 확산 공정으로 개발시키면서 특허를 내었다.¹⁴ 또한 IMEC 은 한 번의 열처리로 금속 접촉을 이루는 동시 열처리 공정과 SiN 를 뚫고 열처리하는 공정을 개발하였다.¹⁵ 이러한 공정은 16.3%의 효율의 다결정 태양전지를 가능하게 하였으며 열처리 공정의 단계를 축소시켰다.

3.3 초고효율 실리콘 태양전지

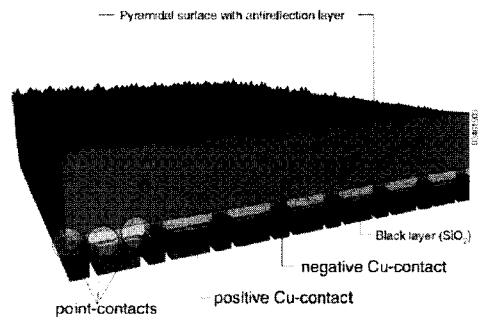
한편, 단결정 실리콘 웨이퍼를 이용하여 생산 단가는 높으나 새로운 기술 적용을 통해 고효율의 태양전지가 개발되고 있다. 그 중에서 Sanyo 는 n-type 단결정 실리콘 웨이퍼의 양면에 얇은 비정질 실리콘 박막을 성장하는 이중접합 구조인 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) 태양전지



(a) Sanyo "HIT" solar cells



(b) BP Solar "Saturn"



(c) SunPower "A-300"

Fig. 6 Structures of several solar cells with very high efficiency

(Fig. 6(a))로 양산기준 19.5%의 변환효율을 달성하여 200 Watt 모듈을 시장에 선보이고 있다. 실험실 수준에서는 22.3% 내외의 에너지 변환 효율을 달성하여 고효율 실리콘 태양전지 제조분야 기술력을 확보하였다.¹⁶ 또한 BP Solar 사에서는 호주의 UNSW 에서 개발한 함몰 전극(buried contact) 구조를 적용하여 빛 흡수를 최대화하고 전면 전극 면적을 최소화함으로써 20.5%의 변환효율을 구현하

었다. 이 BCSC(Buried Contact Solar Cell)는 2003 년부터 BP Solar 사에서 Saturn 이라는 상품명으로 연간 30 MW 규모로 생산하고 있다. 미국의 Sun power 사의 경우, 모든 전극을 후면 point 접합 구조(point contact 또는 back integrated cell)로 형성함으로써 전면 전극 형성에 의한 빛 손실문제를 제거하여 21.5%의 효율을 구현하였다.¹⁶

4. 박막 태양전지 연구개발 동향

벌크 형태의 반도체를 이용한 태양전지의 경우, 매우 높은 변환효율(예를 들어 단일 접합(single junction)의 GaAs 태양전지의 경우 25% 이상의 변환효율을 나타냄)을 보이지만, 비싼 제조가격으로 인해 현재 우주용 전원으로만 사용이 제한되어 있다. 특히, 현재 태양전지의 주류를 이루고 있는 단결정 및 다결정 실리콘 태양전지는 최고 24%와 19.8%의 변환 효율을 보이며 이미 상품화되어 있으나, 전지 면적이 제한되고 기본 재료인 실리콘 웨이퍼의 가격 한계성 때문에 상용 전원과 경쟁 가능한 발전 단가를 얻을 수 있는 제품 생산은 불가능하다.

박막 태양전지는 실리콘 웨이퍼 대신에 저렴하면서 넓은 면적의 유리, 얇은 금속 및 플라스틱 판과 같은 기판 위에 수 마이크로론 이하의 두께로 코팅된 반도체 박막을 전기를 생산하는 활성층으로 이용하는 태양전지이다. Fig. 7 은 결정질 실리콘 및 박막 태양전지의 개념도를 나타낸 것이다.¹⁷ 기존의 실리콘 벌크형 태양전지는 180~220 μm 의 기판에 p-n 접합을 형성하여 제조되는 반면, 박막 태양전지는 코팅 막의 두께가 1/100 이하이기 때문에 가격에서 원재료가 차지하는 비중이 작고, 유리와 같은 값싼 기판을 적용할 수 있어 생산단가가 낮다는 장점이 있다. 또한 상대적으로 공정 온도가 낮고, 웨이퍼의 크기 제한으로 인해 전지 면적이 제한되는 결정질 태양전지와는 달리 인라인(in-line) 방식으로 대면적 기판에 모듈 형태로 제조하기 때문에 저가화가 가능한 장점을 가지고 있다. 사용되는 기판에 따라 반투명(유리 기판) 또는 유연한(금속 또는 플라스틱 판) 형태로 제조가 가능하여 더욱이 얇기 때문에 단위 radiation flux 에 의한 실제 손상이 덜하여 결정질 전지에 비해 우주용 전원으로도 적합하다. 그러나 효율이 상대적으로 낮아 동일한 면적에서 생산되는 발전량이

적다는 단점이 있어 효율을 증가시키기 위한 연구가 주로 진행되고 있다. 현재 상용화된 박막 태양전지로는 비정질(amorphous) 또는 미세 결정질(microcrystalline) 실리콘 박막 태양전지, 다결정 실리콘 박막 태양전지, Cu(In,Ga)Se₂ 박막 태양전지, CdTe 박막 태양전지 등이 있다.

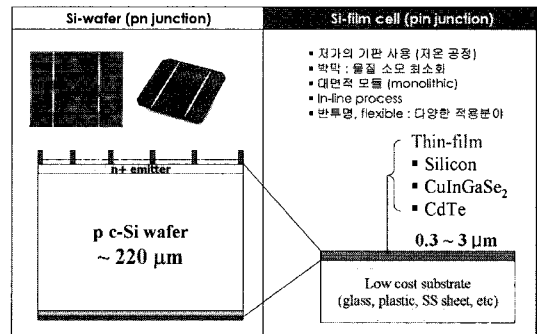


Fig. 7 Comparison of crystalline silicon solar cells and thin film solar cells

4.1 실리콘 박막 태양전지

Fig. 8 은 결정질 실리콘 태양전지와 실리콘 박막 태양전지의 구조 및 동작원리를 나타낸 것이다.¹⁷ 결정질 실리콘 태양전지는 p-n 접합 구조를 갖는 반면, 비정질 또는 나노 결정(nanocrystalline) 실리콘을 이용한 박막 태양전지는 일반적으로 p (p-type Si) - i (intrinsic Si) - n (n-type Si)의 구조로 제작된다.¹⁸ 이때 순수(intrinsic) 실리콘 층은 입사되는 빛 에너지를 흡수하여 전자-정공 쌍(electron-hole pair, EHP)을 생성하며, p형 및 n형 실리콘 층은 생성된 EHP 를 효과적으로 수집하기 위해 순수 실리콘 층 내부에 전기장(electric field)을 유도한다. 비정질 또는 나노 결정 실리콘은 결정질 실리콘과는 달리 박막 내부에 결정(grain)이 없거나 매우 작기 때문에 전자나 정공의 이동도(mobility)가 매우 낮다. 따라서 내부 전기장의 도움 없이는 이동하여 외부로 수집될 확률이 매우 낮기 때문에 반드시 p-i-n 구조로 제작된다.¹⁹

Fig. 9 는 다양한 형태로 제작된 실리콘 박막 태양전지 모듈 형태 및 적용 사례를 나타낸 것이다.¹⁸ 유리 기판을 사용할 경우 반투명 형태의 see-through 모듈로 제작이 가능하므로 기존의 창문을 대신하여 건물의 지붕이나 외벽 또는 특정 구조물에 설치할 수 있다. 또한 금속판 또는 플라스틱

기판에 제작된 모듈의 경우 무게가 가볍고, 두루마리 형태로 말 수 있기 때문에 휴대용 전원으로 도 적용이 가능하다.

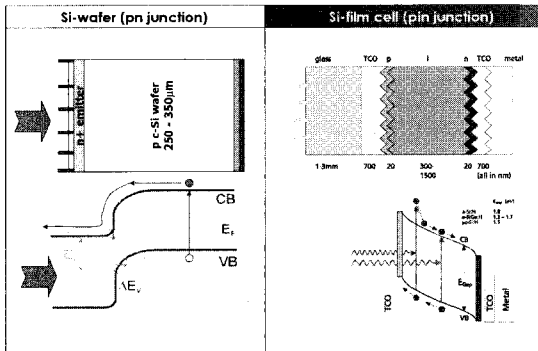


Fig. 8 Comparison of structure and operation principle of two different solar cell types

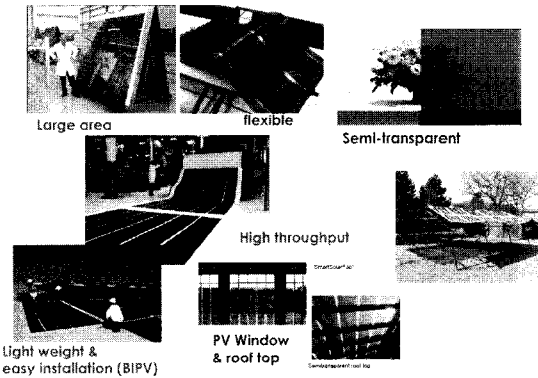


Fig. 9 Various module types and applications of thin film silicon solar cells

실리콘 박막 태양전지는 기존의 TFT (Thin Film Transistor) 제조에 사용되는 장치 (주로 PECVD) 및 제조 공정이 매우 유사한 특징으로 인해, 박막 태양전지 중에서 가장 먼저 상용화에 진입하였다.¹⁸ 실리콘 박막 태양전지는 물질특성 및 구조에 따라 다양하게 분류되는데, Fig. 10 은 비정질 실리콘계 박막을 이용한 태양전지 종류 및 기술개발 수준을 나타낸 것이다.²⁰ 가장 기본적인 태양전지의 구조는 비정질 실리콘(a-Si:H)을 이용한 p-i-n 단일접합 (single junction) 태양전지로 1980 년대부터 이미 상용화가 이루어 졌으나, 광 흡수층인 a-Si:H 의 높은 광학적 밴드 갭 및 광 열화 특성

1 st generation (single junction)	Tandem (double junction)				Triple Junction
	2 nd generation	3 rd generation	4 th generation	5 th generation	
Efficiency: 5-6 %	Efficiency: 6-7 %	Efficiency: 7-8 %	Efficiency: 11-12 %	Efficiency: 13-14 %	
	Mass Production Stage		Pilot Stage	R&D Stage	
	Japan: Kaneka(20MW), Sharp(15MW), Fuji Elec., Mitsubishi Heavy Ind.,		Kaneka, Sharp	Kaneka	
	US: Uni-Solar, EPV				
	EU: Oerlikon, Shott Solar				

Fig. 10 Progress of silicon thin film solar cells

(Stabler-Wronski Effect)²¹ 으로 상용 모듈의 효율은 6%에 머물고 있는 실정이다. 단일접합 a-Si:H 태양전지의 열화를 최소화하고 효율을 높이기 위해 이중접합(tandem) 구조의 태양전지가 개발되어 일부 상용화가 진행 중이다. 이중접합 태양전지는 상부전지(top cell)로 광학적 밴드 갭이 1.7~1.8 eV 로 기존의 실리콘에 비해 큰 수소화된 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon: a-Si:H)을 사용하고 하부 전지(bottom cell)로는 밴드 갭이 작은 a-SiGe:H(~1.4eV) 또는 나노결정 실리콘 (nc-Si:H)을 전기, 광학적으로 직렬 연결함으로써 빛을 효율적으로 이용하고 개방전압(open circuit voltage: Voc)을 높임으로써 모듈의 효율을 9%까지 증가시켰다. a-Si:H/nc-Si:H 적층형 태양전지는 이상적인 밴드구조와 nc-Si:H 안정성 등의 장점으로 인해 잠재력이 매우 높은 구조로 각광받고 있으나,²² a-Si:H 박막에 비해 상대적으로 10 배 이상의 두께를 갖는 nc-Si:H 박막의 고속 증착이 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있으며, 12% 이상의 모듈제조 가능성에 대해서도 전망이 밝지는 않다. 삼중접합 (triple) 태양전지의 경우 현재까지 소면적 효율 13%의 기술개발이 이루어진 상태이며, 일본의 Sharp 를 포함한 몇몇 기업에서 상용화를 시도하고 있다. 삼중접합 태양전지의 경우, 각 전지의 광 흡수층 선택이 매우 중요하다. 미국의 United Solar 는 이미 a-Si/a-SiGe/a-SiGe 구조의 모듈을 금속판에 roll-to-roll 방식으로 상용화하였는데,²³ 모듈의 효율은 ~7%에 머물고 있다. 삼중 접합 태양전지의 상부전지 물질로는 a-Si:H 과 함께 a-SiC:H 등이 연구되고 있으며, 중간 전지 (middle cell) 물질로는 a-SiGe:H, nc-Si:H 등이, 하부전지 (bottom cell)로는 nc-Si:H,

nc-SiGe:H 등의 물질이 현재 연구되고 있다.

한편, 상용화 현황으로 유리 기판의 경우, a-Si:H 단일접합과 a-Si:H/nc-Si:H 이중접합 구조의 모듈이 현재 상용화 되었으며, 모듈의 효율은 a-Si:H 의 경우 6~7%, a-Si:H/nc-Si:H 는 9~10%를 기록하고 있다. 스테인리스(SUS) 기판의 경우 미국의 United Solar 에서 a-Si/a-SiGe/a-SiGe 삼중접합 구조를 이용해 30MW/년 규모로 상용화중이다.

4.2 CuInSe₂ 박막 태양전지

CuInSe₂ 로 대표되는 I-III-VI 족 칼코게나이드(chalcopyrite)계 화합물 반도체는 직접 천이형(direct transition) 에너지 밴드 구조를 가지고 있고, 광흡수계수가 10⁵ cm⁻¹ 로 반도체 중에서 가장 높아 두께 1~2 μm 로도 고효율의 태양전지 제조가 가능하다. 또한 장기적으로 전기·광학적 안정성이 매우 우수한 특성을 가지고 있어 태양전지의 광흡수 층으로 매우 이상적이다.⁴ 이러한 장점으로 인하여 실험실 수준에서 19.9%의 변환효율을 얻었는데,²⁴ 이는 다른 박막 태양전지에 비해서도 높을 뿐만 아니라 기존의 다결정 실리콘 태양전지의 최고 효율인 20.2%에도 근접하는 것이다. 모듈의 최고 효율 또한 14%대에 근접하고 있어 효율 면에서 매우 뚜렷한 장점을 가지고 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 고가의 결정질 실리콘 태양전지를 대체하여 태양광발전의 경제성을 향상시킬 수 있는 저가 및 고효율의 태양전지 재료로 부각되고 있다. CuInSe₂는 밴드 갭이 1.04 eV 로 이상적인 밴드 갭인 1.4 eV 를 맞추기 위해 In 의 일부를 Ga 로, Se 의 일부를 S 로 치환하기도 하는데, 참고로 CuGaSe₂의 밴드 갭은 1.6eV, CuGaS₂는 2.5eV 이다. In 의 일부를 Ga 로, Se 의 일부를 S 로 대체한 오원계 화합물은 CIGSS(Cu(In_xGa_{1-x})(Se_yS_{1-y})₂)로 표기되는데, 대표적으로 이들은 CIS, CIGS 로 표기하기도 한다. CIS 계 태양전지의 장점 중의 하나인 장시간 신뢰성의 경우 1988 년 11 월에 시작한 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 장기 옥외시험 결과 10 년 이후에도 효율의 변화가 없는 것으로 조사되었다.

CIS 를 광흡수 층으로 하는 태양전지의 구조는 Fig. 11 과 같다. 일반적으로 유리를 기판으로 5 개의 단위 박막 - 후면전극, 광흡수층, 버퍼(buffer)층, 전면 투명전극, 반사 방지막을 순차적으로 형성시켜 만든다. 단위 박막별로 다양한 종류의 재료와

조성, 그리고 다양한 물리적, 화학적 박막 제조방법이 사용될 수 있다. 태양전지의 면적이 커지면 면저항(sheet resistance)의 증가로 인하여 효율이 감소하게 된다. 따라서 대면적 모듈의 경우는 Fig. 12 와 같이 일정한 간격으로 직렬 연결이 되도록 패터닝한다. 유연한(flexible) 기판을 사용하는 경우, 패터닝을 적용하지 않고 금속 그리드를 사용한다.

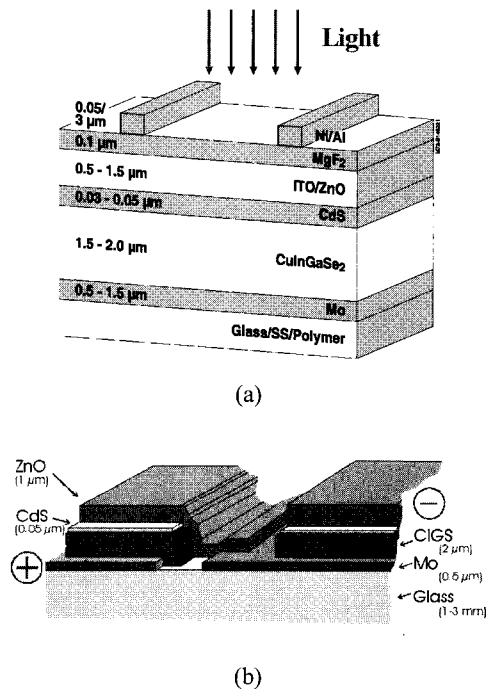


Fig. 11 Structures of CuInSe₂ thin films solar cell (a) and module (b)

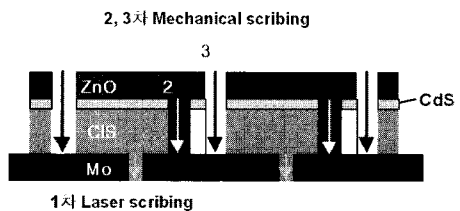


Fig. 12 Patterning process of large area CIS module

CIS 계 박막 태양전지는 다양한 구성 성분들로 인해 성분 제어가 어렵고, 저가 및 대면적으로 대량 생산하기 어려운 문제점들과 더불어 그간 성

숙되지 않은 박막 태양전지 시장으로 인하여 2000년대 초반에서야 몇몇 기업체를 중심으로 대면적 모듈 기술이 개발되었다.²⁵ 모듈 개발에 있어서도 소면적 태양전지와 모듈의 효율 차이가 다른 태양전지보다 크게 나타나는 문제가 발생하였으나, 여러 연구기관의 공정 기술 개발과 대면적 스퍼터링 및 진공 증착 장치들의 개발로 인하여 모듈의 효율 및 안정성이 개선되었다. 독일의 Wurth solar의 경우, 2000년을 전후하여 ZSW와 공동으로 60 x 1200 cm² 모듈의 시제품 연구를 시작하였고, 2007년 도에 15 MW급 대량 생산 라인을 구축하게 되었다. 일본의 Showa Shell Sekiyu 및 Honda Soltec, 독일의 Solibro, 미국의 Global solar 등 현재 CIS 박막 태양전지 생산을 주도하고 있는 모든 기업들의 발전과정 역시 이와 유사하다.²⁵ Table 1은 현재 CIS 박막 태양전지를 생산하고 있는 대표적인 회사들을 정리한 것이다.²⁵

Table 1 Mass production status of the CIS solar cell module

회사	생산량 (MW)	기판 종류 /크기 (m ²)	효율 (최대/평균)	생산 계획 (MW)	CIGS 제조 공정
Honda Soltec (일본)	27.7 (2008)	유리 0.72x 0.45 3장	125Wp		셀렌화
Showa Shell Sekiyu (일본)	20 (2007)	유리 0.3(0.6)x 1.2	14.2% / 11.8%	60 (2009)	셀렌화
Global Solar (미국)	4.2 (2006)	Metal foil 1ft wide	10% / 8%	40 (2008)	진공 증착
Miasole (미국)	40 (2008)	Metal foil	10% / 8%	100 (2010)	셀렌화
Avancis (독일)	30 (2008)	유리 0.8x1.4	13.1%	80 (2010)	셀렌화
Wurth Solar (독일)	15 (2007)	유리 0.6x1.2	14% / 12%	30 (2008)	진공 증착
Johanna Solar	30 (2008)	0.5x1.2	11.1% / 10%	60 (2010)	셀렌화
Solibro	25 (2008)	0.6x1.2	> 10%	100 (2010)	진공 증착
Sulfur cell	0.5 (2007)	0.65x 1.25	8.7% / 7.5%	4 (2008) 50 (2010)	셀렌화

일본의 Honda는 1995년부터 CIGS 박막 태양전지 개발을 시작했음을 최근 발표한 바 있으며,

30 MW 정도의 생산 라인을 가동하고 있다. 특히 기존의 CIS 모듈과는 달리 0.72 x 0.45 m² 모듈 세장을 연결하는 형태의 모듈을 생산하고 있다. Showa Shell Sekiyu의 경우 가장 높은 모듈 효율을 보유하고 있으며, 0.3 x 1.2 m² 크기의 모듈을 주로 생산하였으나 최근 0.6x1.2 m² 모듈을 생산하고 있으며 13%대의 최고 효율을 얻었다.²⁶ 미국의 Global Solar와 Miasole는 대표적인 flexible CIS 태양전지 생산 기업으로 효율은 유리 기판을 사용했을 때보다 낮지만 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 향후 생산량의 증가가 기대된다. 독일의 Avancis, Wurth solar, Solibro, Surfur cell은 0.6 x 1.2 m² 이상의 크기를 가지는 모듈을 생산하고 있다. 모듈 제조 공정에 있어서 가장 핵심이라고 할 수 있는 CIS 박막 제조공정에 있어서는 대면적 증착이 용이한 스퍼터링법을 이용한 셀렌화 공정이 대다수이지만, Wurth solar, Solibro, Global solar 등은 진공 증착법을 이용하여 대량 생산을 하고 있다. 이 밖에도 현재 많은 회사들이 각자의 독창적인 기술을 바탕으로 CIS 박막 태양전지 분야에 진출하고 있다. Fig. 13은 기업별로 생산하고 있는 CIS 박막 태양전지 모듈을 나타낸 것이다.²⁵

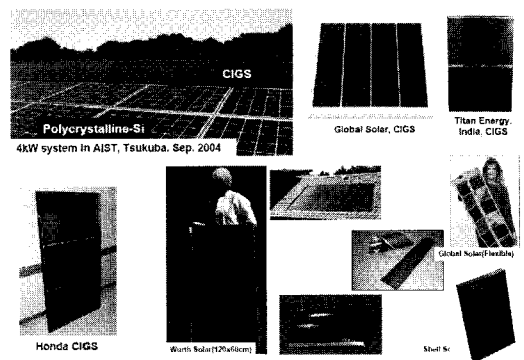


Fig. 13 Various CIS solar cell modules produced by different companies

한편, CIS 관련 회사들의 급격한 시장진출로 인하여 2010년에는 1.5 GW 이상의 CIS 박막 태양전지 시장이 창출될 것으로 전망하고 있다. 이는 2010년 기준으로 전체 태양전지 시장의 10%에 달하는 것이다. 또한 향후에는 점차적으로 전체 태양전지 시장에서 차지하는 비중을 높일 것으로 전망된다.

4.3 CdTe 박막 태양전지

주기율표상의 II 족의 원소(Zn, Cd 등)와 VI 족 원소(S, Se, Te 등)로 구성되는 II-VI 족 화합물 반도체는 모두 직접 천이형 에너지 밴드 구조를 가지고 있으며, 흡수단(absorption edge) 이하의 파장영역에서 광 흡수 계수가 매우 크다. 변환효율이 높은 태양전지를 제작하기 위해서는 태양광 스펙트럼과의 정합관계에서 광흡수층 재료의 에너지 밴드 갭(금지대 폭)은 1.4 eV 전후가 적당하며, 전자의 확산길이와 정공의 확산길이에 비해 길기 때문에 p-형 반도체가 유리하다. 에너지 밴드 갭이 1.4 eV 에 가까운 물질로는 CdTe 와 CdSe 가 있지만 p, n 양측의 전도를 나타내는 것은 CdTe 뿐이므로, II-VI 족 화합물 반도체 중 광흡수층 재료로는 CdTe 가 가장 적합하다. CdTe 는 에너지 밴드 갭이 1.45eV 로서 태양광 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 최적 이론 값에 해당하는 금지대 폭을 가지고 있으며, 밴드 갭 이상의 파장영역에서의 광 흡수계수가 10^4 cm^{-1} 이상으로 매우 크기 때문에 1 μm 정도의 두께로도 90%의 태양광을 흡수할 수 있어 박막 형태의 태양전지 제작이 가능하다.²⁷ 또한 CdTe 를 이용하여 태양전지를 제작할 경우 광 흡수 거리가 짧고 표면재결합속도가 크기 때문에 대부분 동종접합(homojunction)보다는 이종접합(heterojunction) 형태로 제조된다. 이종접합 형태의 태양전지에 요구되는 조건은 접합을 형성하는 두 반도체의 격자상수(lattice constant) 및 열팽창계수(thermal expansion coefficient)의 정합이 좋고, 광흡수층과 창층(window layer)의 밴드 갭 차이(ΔE_g)가 될수록 크고, 큰 밴드 갭을 갖는 창층으로 빛의 입사가 가능한 것 등이다. 이러한 조건들을 만족하는 II-VI 족 화합물 반도체의 이종접합 중에서 (n)CdS/(p)CdTe 의 경우 ΔE_g 도 크고, 접합 근방에 에너지 스파이크도 없다는 점에서 태양전지로 기대되는 접합이다.⁴

CdTe 태양전지는 Fig. 14 에서 보듯이 일반적으로 두 가지 다른 화합물 반도체층(CdS, CdTe)과 한 개의 투명전극(ITO 또는 SnO₂:F) 및 전면과 후면의 금속전극으로 구성되어 있고, 각 구성 요소들의 전기적, 광학적 특성 및 각 층간의 계면 상태에 따라 태양전지의 효율 및 안정성이 결정된다.⁴ CdTe 태양전지를 구성할 때는 Fig. 11(a)의 CIS 계 태양전지("substrate" 구조)에서와는 달리 빛이 입사되는 층을 먼저 코팅하는 소위 "Superstrate" 구

조를 일반적으로 채택한다.⁴ CdS 가 2.4 eV 의 에너지 밴드 갭을 가지고 있기 때문에 가시광 영역의 빛은 창층인 CdS 를 통과하여 CdTe 에 의해 흡수되며, 전하를 생성하게 된다. CdTe 에 비해 CdS 의 도핑 농도는 매우 높고, 두께 또한 얇아서 공핍층(depletion layer)은 거의 CdTe 영역에 형성된다. 빛에 의해 생성된 전하는 공핍층에 형성된 전기장에 의해 움직이게 된다. 이때 전자는 CdS 쪽으로, 정공은 CdTe 쪽으로 움직이고, 이로 인해 에너지 준위의 차가 발생하는데, 이 에너지 준위 차이가 광기전력에 해당한다.

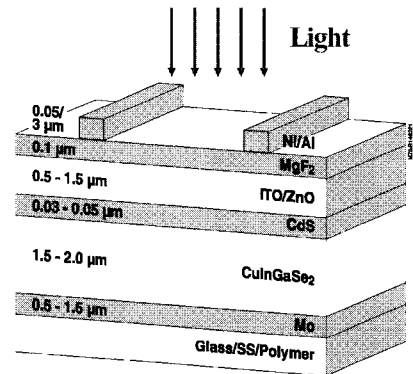


Fig. 14 Structure of CdTe thin film solar cell

이러한 태양전지로서의 성능을 결정짓는 요인으로 여러 가지가 있지만 가장 중요한 것은 CdTe/CdS 접합 특성과 후면 전극 특성이다. 앞서 언급했듯이 CdTe 는 광흡수계수가 매우 커, CdS 를 투과한 빛은 CdTe 표면 즉, 접합 근처에서 모두 흡수되어 전하가 생성되며, 이러한 전하들은 전기장의 영향으로 이동하게 된다. 따라서 접합 특성이 우수하지 못하면 전하를 잘 생성하기 어렵고, 잘 이동시키지도 못한다. 한편, CdTe 은 높은 일함수(work function)로 인해 좋은 저항성 접촉(ohmic contact)을 형성하기 어렵다. 접합 특성이 좋더라도 후면 전극에서의 저항이 커지게 되면 전체적으로 전기 특성이 저하된다.⁴

CdTe 를 사용한 태양전지는 다결정 박막 형태로 제작되며, 비정질 Si 전지와 CIS 계 전지와 함께 가장 실용화 가능성이 있는 박막형 전지로 평가 받고 있다. 특히, 비정질 Si 전지에 비해서는 에너지 전환효율이 높고, 성능의 안전성이 우수하며, CIS 계 전지에 비해서는 대량 생산에 용이하다

는 장점을 갖추고 있다. 현재 CdTe 태양전지의 변환효율은 미국 NREL 의 16.5%가 최고 기록으로서, 투명 전극으로 전도도와 투과도가 좋은 cadmium stannate(Cd₂SnO₄)를 사용하였고, Cd₂SnO₄ 와 CdS 층 사이에 zinc stannate(Zn₂SnO₄, or ZTO) 버퍼층을 사용하였다.²⁸ 앞으로 후면 전극(back contacts)의 전기 저항을 낮추는 등의 기술적인 문제가 해결되면 18%까지 향상 될 전망이다.

현재 연구되고 있는 분야로는 전기 저항이 낮은 후면 전극(또는 배면전극, back contact)개발, CdTe 층의 전기 전도도 향상, CdTe/CdS 계면의 최적화, 밴드 갭이 크고 격자상수가 CdTe 와 비슷한 창층 재료의 개발, 투명전극의 개발 등이 있다. Table 2 와 3 은 소면적 및 대면적 CdTe 태양전지 모듈의 효율을 나타낸 것이다. 표에 보듯이 여러 그룹에서 다양한 방법을 사용하여 CdTe 층을 합성하였는데, 이는 CdTe 가 합성하기 쉽고, 따라서 대량 생산에 적합하다는 사실을 뒷받침한다.

Table 2 Efficiencies of small area CdTe solar cells

	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Effi. (%)	Comments
NREL	1.03	0.845	25.9	75.51	16.5	CTO/ ZTO/ CdS/ CdTe CSS
IEC	-	0.840	24.4	65.00	13.3	SnO ₂ / Ga ₂ O ₃ / CdS/ CdTe VTD
Univ. of Toledo	0.16	0.814	23.56	73.25	14.0	ZnO/ CdS/ CdTe/ Metal Sputter -ed

Table 3 Efficiency and area of CdTe modules

Company	Device	Area (cm ²)	Efficiency (%)	Power(W)
First Solar	CdTe	6623	10.2	67.5
Antec Solar	CdTe	6633	7.3	52.3

Table 4 Top thin film PV manufacturers in 2006

Manufacturer	Thin-film Technology	2006 Production (MW)	Market Share (%)
First Solar	CdTe	60	31
Antec Solar Energy GmbH	CdTe	8	4
Kaneka Silicon PV	a-Si	30	15
United Solar	a-Si (3)	28	14
Shenzhen Topray Solar	a-Si (2)	20	10
Mitsubishi Heavy Industries	a-Si, μc/a-Si (2)	13	7
Sharp	μ-Si/a-Si	8.2	4
Bangkok Solar	a-Si (2)	5	3
Sanyo Solar	a-Si (HIT)	5	3
Sinonar	a-Si	4	2
SCHOTT Solar GmbH	a-Si (2)	3	2
Global Solar	CIGS	2.5	1
ICP Solar (Intersolar)	a-Si	2.5	1
Wuerth Solar GmbH	CIS	2.4	1
Energy Photovoltaics (EPV)	a-Si (2)	1.5	1
Tianjin Jinneng Solar Cell Co.	a-Si	1.5	1

5. III-V 족 화합물 반도체 기술개발 동향

GaAs, InP 로 대표되는 III-V 족 화합물 반도체는 직접 천이형 에너지 밴드 구조를 가지고 있으며, 40% 이상의 고효율 태양전지를 만들 수 있는 물질로 각광받고 있다. 갈륨비소(GaAs)는 에너지 밴드 갭이 1.4eV 정도로 단일 전지로 최대 효율을 낼 수 있는 최적의 밴드 갭을 가지고 있으며, 현재 최고의 변환효율을 내고 있다. InP 또한 밴드 갭이 1.35eV 로 최적의 밴드 갭과 거의 일치하며, 이론적 한계 효율도 GaAs 에 버금간다.⁴

한편, III-V 화합물 반도체 태양전지는 높은 변환효율에도 불구하고, 기판으로 사용하는 GaAs 등의 원재료비가 비싸고, 고가격의 증착 장비인 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 나 분자선 에피층 성장법(MBE; Molecular Beam Epitaxy)를 사용하므로 제조단가가 높다는 인식 때문에 지금까지는 인공 위성용 태양전지 등 특수한 용도로만 그 사용이 제한되어 왔다.³⁹ 그러나 최근 40% 이상(40.7%, 미국 Spectrolab)의 높은 광전 변

환 효율을 갖는 고효율 III-V 화합물 반도체 태양 전지가 개발되고,³² 500 배 이상의 고배율 집광장치를 사용하여 태양전지 모듈의 가격 비중이 많이 낮아져서, 단결정 실리콘 모듈 및 시스템과 가격 경쟁을 할 수 있는 수준이 되었다

한편, GaAs 태양전지의 개발에는 고효율화와 박막화라는 두 개의 큰 흐름이 있다.⁴ 고효율화는 주로 GaAs 또는 AlGaAs 와 다른 물질간의 이종접합으로 이루어지고 있다. 또한 전지의 고효율화를 위해 적층(tandem) 또는 다중 접합(multi-junction) 구조의 태양전지가 활발히 연구되고 있다. 적층 구조는 여러 밴드 갭을 갖는 물질을 성장시켜 단락전류와 개방전압의 손실을 줄일 수 있는 구조이다. 박막화는 AlGaAs/GaAs 를 액상 성장법에 의해 형성되나, 양산성을 고려한 방법으로는 할로겐 화합물 수송법, 열분해법 등의 기상성장법이 있다.

GaAs 태양전지의 연구 자체는 오래 전부터 행하였으나 그 특성이 주목되게 된 것은 1972 년 Hovel, Woodall 등이 (p)AlGaAs/(p)GaAs/(n)GaAs 태양전지를 발표한 이후이다. 그 전 해에 Alferov 등도 (p)AlGaAs/(p)GaAs/(n)GaAs 구조인 태양전지를 제작하여 효율 11%를 얻어 태양전지 고효율화의 전망을 밝게 하였다. 지금까지 GaAs 태양전지에서 고효율화가 되지 못한 이유는 GaAs 의 표면 재결합 속도가 크기 때문에($s=10^6 \sim 10^7 \text{ cm s}^{-1}$) 표면 부근에서 생성된 캐리어가 거의 표면에서 재결합하여 손실되기 때문이다.⁴ GaAs p-n 접합 표면에 AlGaAs 층을 두면 AlGaAs 의 장 효과에 의해 표면 재결합의 영향이 감소하여 변환효율이 향상된다. 이러한 이유 때문에 AlGaAs/GaAs 구조는 아직도 GaAs 태양전지에 이용되고 있다. Andreev 는 같은 구조로 태양전지에 대한 이론분석을 통해 직렬저항의 영향을 고려한 (p)AlGaAs/(p)GaAs/(n)GaAs 구조의 최적화를 검토하였다. 지금까지 p-p-n 구조에 의해 18~25%의 효율을 얻고 있다.¹⁶ 단층 구조의 bulk 나 박막 III-V 태양전지는 실리콘 계열보다 효율 측면이나 가격측면에서 비교 우위성을 보기 어렵다. 그러나 다중접합 III-V 태양전지는 30% 이상의 에너지 변환 달성이 가능하다. Fig. 15 에는 복잡하기는 하지만 고효율 달성이 가능한 이중접합(double junction) 태양전지 구조를 나타내었다. 효율 향상의 핵심기술은 i) 태양광 스펙트럼을 최대한으로 활용하기 위하여 단파장을 흡수하는 InGaP 상부전지와 ii) 장파장 영역을 흡수

하는 GaAs 하부전지로 구성하고, iii) 이를 광학적 전기적으로 연결해 주는 p^+-n^+ InGaP 터널접합이다.

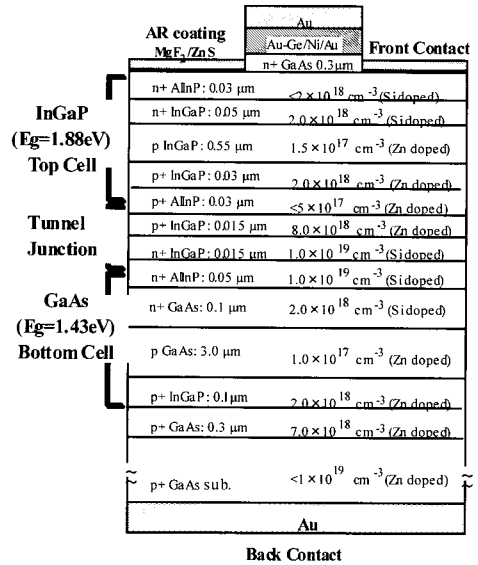


Fig. 15 Structure of high efficiency III-V solar cell which consists of double junctions

최근에는 변환효율을 더욱 높이기 위해 이중 접합대신 삼중 접합(triple junction) 태양전지가 미국의 NREL 과 Spectrolab 에서 개발되었다. 이 삼중 접합 태양전지의 구조를 Fig. 16 에 나타내었다.⁴ 이 태양전지는 밴드 갭이 0.65eV 인 Ge 를 하층 전지(bottom cell)로 사용하고, 그 위에 대략 1.4eV 근처의 InGaAs 중간층 전지(middle cell)와 1.9eV 의 InGaP 상층 전지(top cell)가 있는 구조이다. 각 전지의 전기적 연결은 터널 접합을 통해 연결하였다. 태양광 스펙트럼을 흡수하는 측면에서 보면 InGaP 상층 전지에서 650nm 파장 대역까지 흡수하고, InGaAs 중간층 전지에서 대략 900nm 까지 흡수를 하며, Ge 하층 전지에서 1900nm 까지 파장까지 전 영역에 걸쳐 골고루 흡수할 수 있게 하였다. 즉, 단락 전류의 손실을 최대한 줄일 수 있는 것이다. 또한 이러한 파장영역에서 단일 전지로 동작을 하기 때문에 개방전압의 손실을 줄여 고효율의 태양전지를 만들 수 있는 것이다. 특히 GaAs 에 비해 값이 싼 Ge 위에 전지를 성장시킬 수 있어 고효율의 장점과 더불어 제작 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 Spectrolab 에서는 격자 부정합(lattice

mismatched) 구조를 사용하여 극적으로 240 배의 집광상태에서 40.7%의 초고효율 태양전지를 보고 하였다.³⁰ 이와 같이 여러 밴드 갭을 가진 재료를 잘 선정하여 적층된 태양전지의 개수를 늘리면 이론적으로는 변환효율을 50 % 이상으로 크게 할 수도 있으나 지금까지는 3 개의 태양전지 셀을 적층한 삼중접합구조의 태양전지 효율이 가장 높고, 4 나 5 개의 셀을 접합한 구조의 효율이 오히려 낮다. 그 이유는 아직도 충분히 좋은 전기적 및 광학적 특성을 갖는 재료가 개발되지 않았기 때문이다.²⁹

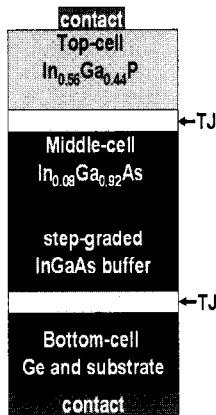
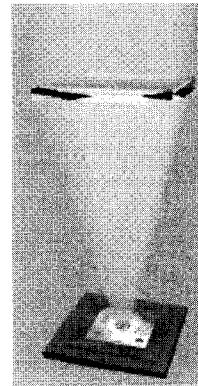


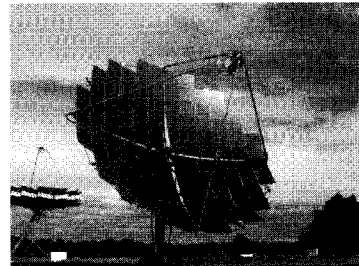
Fig. 16 Structure of “metamorphic” triple junction solar cell produced by Spectrolab

III-V 족 화합물 반도체 태양전지가 지상용 발전 소자로 경쟁력을 갖추기 위해서는 고효율뿐만 아니라 집광 시스템(concentration system)을 통해 생산 단가를 낮추어야 한다. Fig. 17 은 집광형 태양전지 개요도 및 시스템 예를 나타낸 것이다. 집광 시스템은 태양빛을 광학적 장치로 모아서 태양전지에 보내주는 것이다. Fig. 18 에서 볼 수 있듯이 집광배율이 증가함에 따라 태양전지의 변환효율이 증가함을 볼 수 있다.³¹ 집광 시스템의 중요한 이점은 특정 전력을 출력해 내기 위해 요구되는 전지의 수를 줄일 수 있다는데 있다. 따라서 가격이 비싼 태양전지 대신 비교적 싼 가격의 광학적 장치를 대신할 수 있기 때문에 에너지 생산 단가를 낮출 수 있다. III-V 화합물 반도체는 고온 특성이 우수하여 온도 안정성 및 신뢰성이 우수하고, 또한 집광을 함에 따라 광전 변환 효율이 상승하는 특성이 있으므로 고배율 집광형

(concentration) 태양광 발전 시스템에 가장 적합하다.³¹ 실리콘 태양전지의 경우에도 경우에 따라 집광이 가능하지만 실리콘은 간접 천이형 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.³²



(a)



(b)

Fig. 17 Schematic of photovoltaic concentration system (a) and CS500 solar concentrator system of Solar Systems Inc. (b)

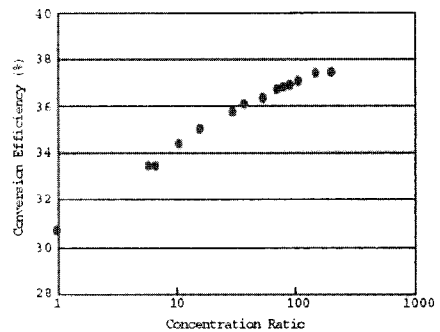


Fig. 18 Concentration ratio vs. conversion efficiency of III-V solar cells

GaAs 관련 태양전지는 미국의 ASEC, Spire, NASA 등의 관련 기관에서 많은 연구를 진행하고 있다. 특히 GaAs/Ge 태양전지의 경우는 미국의 Motorola 에서 '95 년도에 이동통신 사업인 이리듬 프로젝트의 주 전원용 태양전지로 개발하여 사용 중에 있다. 그리고 현재는 상용 변환효율이 19%선인 GaAs/Ge 태양전지를 20% 이상으로 향상시키는데 주안점을 두고 있다. 또한 유럽의 경우, 아리안 프로젝트와 관련하여 영국의 EEV 에서 GaAs/Ge 태양전지를 생산하고 있을 뿐만 아니라, 일본의 경우도 미쯔비에서 Si 또는 GaAs 를 생산하고 있다. 미국의 항공우주국(NASA: National Aeronautics & Space Administration)이나 국방부(DOD : Department of Defence)에서 제시하고 있는 미래의 태양전지 개발 방향은 10 년 안에 단위 무게당 초기(BOL ; beginning of life) 출력을 130W/kg, 말기(EOL ; end of life) 출력을 110W/kg 까지 올리는 것을 목표로 하고 있다. 미국의 Varian 사에서는 GaAs 기판을 이용하여 상층부에는 Ga(Al)As 태양전지를, 하층부에는 Ga(Al)As 또는 Ge 태양전지를 가진 3 중 밴드 갭 태양전지의 개발을 추진하고 있다. 프랑스의 국립중앙연구소 CNRS(Centre National de la Recherche Scientifique) 산하의 LPSES(Laboratoire de Physique du Solide et Energie Solaire)에서는 두개의 다층 태양전지를 적층시켜서 4 개의 밴드 갭을 가진 태양전지를 제안하였다. 이 태양전지는 단일 적층(monolithic tandem) 구조의 태양전지인 Ga(Al)As/ GaAs 태양전지를 만들고, 그 밑에 Ga(In)As(P) + Ga(In)As/InP 구조로 하층 태양전지를 구성한다. 이와 같은 태양전지의 장점은 각각의 태양전지가 적정한 두께와 최대 변환효율을 갖도록 만들고, 이를 다시 적층시킴으로써 40% 이상의 높은 변환효율을 실현할 수 있다는 점이다. 그러나 그 제조 공정이 까다롭고, 고가의 소재를 사용해야 하므로 태양전지 가격이 대단히 비싸게 된다는 것이 단점으로 지적된다.

III-V 족 태양전지와 관련되어 현재 상용화가 진행 중인 몇 가지 프로젝트들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 미국의 DARPA 에서는 2005 년 11 월부터 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 영역

별로 분류한 후 각 파장 영역에서 가장 효율이 높은 재료로 제작한 태양전지를 수평으로 배열하는 방법을 사용할 예정이다. 2007 년 7 월 세계 최고 효율인 42.8% 를 달성했다고 보고하고 있다.³³ 일본에서는 NEDO 프로젝트를 통하여 Sharp, Daido Steel, Toyota 등의 기업 및 대학을 중심으로 초고효율 태양전지 개발 및 시스템 신뢰성 테스트 연구를 수행 중이다. 2010 년까지의 개발목표로는 셀 효율 40 %, 모듈 효율 28 % 및 모듈가격 100 엔 /W 등이다. 호주의 Solar Systems 사에서는 Victoria Project 를 시작하였다. 프로젝트 기간은 2007 년부터 2013 년까지이고, 154 MW, Large Power Plant (420 M\$ 규모)를 세우는 프로젝트이다. III-V 다중접합 태양전지 모듈은 Spectrolab (x500)으로부터 공급 받고, Concentrator 는 Heliostat (대형 거울 어셈블리) 형을 사용한다. 프로젝트가 끝나면, 연간 270 GWh 전력을 생산하고 약 45,000 가구에 전력공급이 가능할 것으로 예상된다.

6. 결론

지금까지 전 세계 태양전지의 기술 개발은 변환효율의 향상과 발전단가를 낮추는 연구가 병행해서 진행되어왔다. 발전단가는 시장의 규모나 생산 기술에 의존하는 경향이 크고, 변환 효율은 새로운 구조, 재료, 공정, 이론 등의 발전에 의존하는 경향이 크다. 한편, 최근의 태양전지 연구 개발 동향은 전지의 효율 향상보다는 공정의 단순화 등을 통한 제조 가격 절감 및 대면적화에 초점이 맞추어져 있다. 그 이유는 태양전지의 효율이 거의 한계점에 도달했으며, 기존의 방법으로는 더 이상 전지 효율을 크게 향상시키기 어렵기 때문이다. 따라서 변환 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 태양전지 구조 및 재료 개발이 절실히 필요한 실정이다.

후기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발 사업의 일환 (R-2005-7-147)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jang, Y. H., "Photovoltaic Industry, the game rule

- changes," LG Weekly Economic, pp. 23-27, 2007.
2. Becquerel, A. E., Comt. Rend. Acad. Sci. Vol. 6, p. 561, 1839.
 3. Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," J. Appl. Phys., Vol. 25, Issue 5, pp. 676-677, 1954.
 4. Lee, J. H., Lim, D. G. and Yi, J. S., "Principle of Solar Cell," Hongneung Science Pub., chapter 5, 2005.
 5. Zhao, J., Wang, A., Green, M. A. and Ferrazza, F., "Novel 19.8% efficient 'honeycomb' textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells," Appl. Phys. Lett., Vol. 73, Issue 14, pp. 1991-1993 1998.
 6. Hoelscher, J. F., "The SOLAREX BLOCK IV MODULE," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 745-749, 1981.
 7. PV industry information service Report PC-11, "Strategies Unlimited and Private communications," Bob Johnson Strategies Unlimited, 2000.
 8. Shirasawa, K., Okada, K., Hirose, M., Yamashita, H. and Watanabe, H., "Large area high efficiency multicrystal silicon solar cell," Proc. 3th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-3), pp. 97-100, 1987.
 9. Sopori, B. L., Deng, X., Benner, J. P., Rohatgi, A., Sana, P., Streicher, S., Park, Y. K. and Roberson, M. A., "Hydrogen in Silicon: Current Understanding of Diffusion and Passivation Mechanisms," Proc. 1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vol. II, pp. 1615-1620, 1994.
 10. Aberle, A. G., "Overview on SiN surface Passivation of Crystalline Silicon Solar Cells," Proc. 11th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-11), pp. 569-572, 1999.
 11. Kumar, B., Koval, T., Narayanan, S. and Shea, S., "Commercialization of a Silicon Nitride CO-Fire Through (SINCOFT) process for manufacturing high efficiency mono-crystalline silicon solar cells," Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference pp. 274-276, 2002.
 12. Rohatgi, A., Narasimha, S., Kamra, S., Doshi, P., Khattak, C. P., Emery, K. and Field, H., "RECORD HIGH 18.6% EFFICIENT SOLAR CELL ON HEM MULTICRYSTALLINE MATERIAL," Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 741-744, 1996.
 13. Zhao, J., Wang, A., Campbell, P. and Green, M. A., "A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol. 46, Issue 10, pp. 1978-1983, 1999.
 14. Koval Tim, US Patent 4360393, 1982.
 15. Duerckx, F., Szlufcik, J., Ziebakowski, A., Nijs, J. and Mertens, R., "Simple and efficient screenprinting process for multicrystalline solar cells based on firing through silicon nitride," 14th E.C. PVSEC, pp. 792-795, 1997.
 16. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y. and Warta, W., "Solar Cell Efficiency Tables (Version 31)," Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 16, pp. 61-67, 2008.
 17. Lee, J. C., "Current Status and Mission of Silicon Thin Film Solar Cells," 2008 Workshop of Current Status and Industrialization Technology of Solar Cell, 2008.
 18. Lee, J. C., "Technologies, Commercialization, Market Status, and Prospect of Thin Film Silicon Solar Cells," The Magazine of the IEEK (in Korean), Vol. 35, No. 6, pp. 596-604, 2008.
 19. Takahashi, K. and Konagai, M., "Amorphous Silicon Solar Cells," North Oxford Academic, Chapter 1, 1986.
 20. Lee, J. H., "Silicon Thin Film Solar Cells," 2008 KAIST EMDEC Seminar, 2008.
 21. Staebler, D. L. and Wronski, C. R., "Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si," Appl. Phys. Lett., Vol. 31, Issue 4, pp. 292-294, 1977.
 22. Meier, J., Dubail, S., Cuperus, J., Kroll, U., Platz, R., Torres, P., Selvan, J. A. A., Pernet, P., Beck, N., Vaucher, N. P., Hof, Ch., Fischer, D., Keppner, H. and Shah, A., "Recent progress in micromorph solar cells," J. Non-Crystalline Solids, Vol. 227-230, pp. 1250-1256, 1998.
 23. <http://www.uni-solar.com>
 24. Repins, I., Contreras, M. A., Egaas, B., DeHart, C., Scharf, J., Perkins, C. L., To, B. and Noufi, R.,

- “19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ Solar Cell with 81.2% Fill Factor,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol. 16, pp. 235-239, 2008.
25. Yoon, J. H., “Industry Status and Future Technology of CIGS Thin Film Solar Cells,” *The Magazine of the IEEK(in Korean)*, Vol. 35, No. 6, pp. 614-622, 2008.
26. Kushiya, K., “Key Near-term R&D Issues for Continuous Improvement in CIS-based Thin film PV Modules,” *Proc. 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-17)*, pp. 44-47, 2007.
27. Lee, J. H., “Characterization of CdS Thin Films and CdS/CdTe Heterojunction Prepared by Different Techniques,” *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 18, No. 3, pp. 199-205, 2005.
28. Wu, X., Keane, J. C., Dhere, R. G., DeHart, C., Duda, A., Gessert, T. A., Asher, S., Levi, D. H. and Sheldon, P., “16.5%-efficient CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cell,” *Conf. Proceedings 17th European Photovoltaic Solar Energy*, pp. 995-1000, 2001.
29. Kim, S. I., “Overview of Technology Development of High Efficiency III-V Compound Semiconductor Solar Cells,” *The Magazine of the IEEK(in Korean)*, Vol. 35, No. 6, pp. 605-613, 2008.
30. King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., Sherif, R. A. and Karam, N. H., “40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, Issue 18, pp. 183516, 2007.
31. Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K. and Ekins-Daukes, N., “Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential,” *Solar Energy*, Vol. 79, pp. 78-85, 2005.
32. Luque, A. L. and Andreev, V. M., “Concentrator photovoltaics,” *Springer*, Chapter 3, 2007.
33. Kintisch, E., “SOLAR POWER: Light-Splitting Trick Squeezes More Electricity Out of Sun's Rays,” *Science*, Vol. 317, pp. 583-584, 2007.