

특집

박막형 실리콘 태양전지 기술개발, 상용화, 시장현황과 전망

이정철(한국에너지기술연구원)

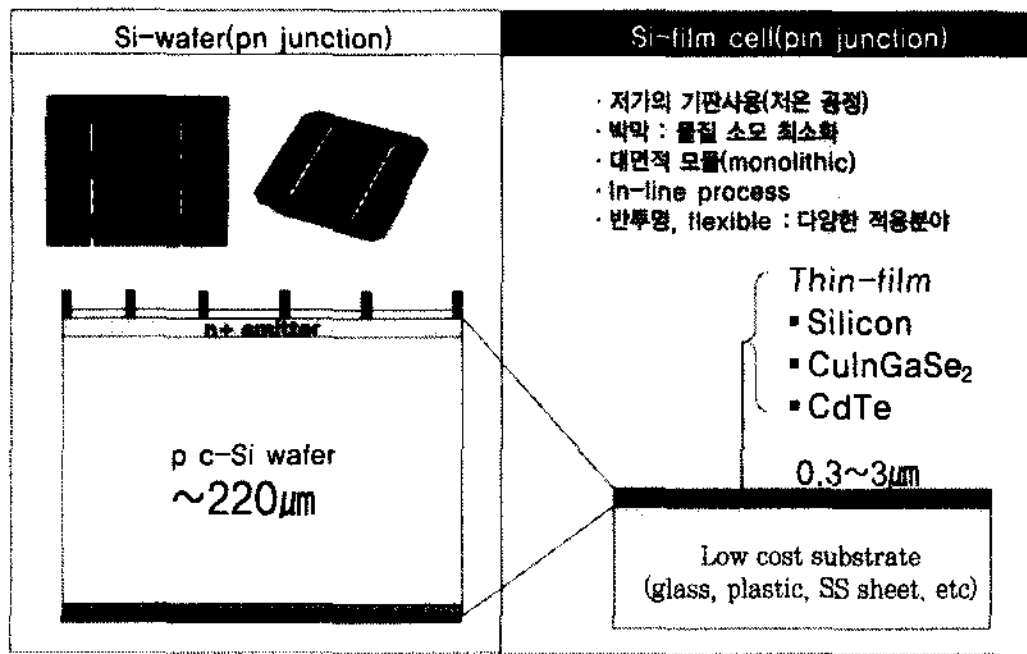
I. 서론

최근 몇 년사이 에너지, 환경문제에 따른 지속가능한 클린 에너지원 확보에 관한 관심이 날로 고조되고 있다. 태양광발전은 태양에너지를 이용한 발전방식으로서 에너지, 환경, 지속가능성에 있어 그 잠재력이 무한한 기술이다. 최근 태양전지 시장의 급속한 성장은 에너지, 환경보존이라는 큰 틀을 넘어 국가의 새로운 산업 아이템으로 연결되고 있다. 현재까지 태양전지역사는 실리콘 기판(wafer)을 이용한 벌크형 태양전지 역사라 해도 과언은 아니다. 기존의 반도체 인프라를 활용한다는 측면에서 볼 때 이러한 실리콘 벌크형 태양전지의 선 기술 및 시장점유는 당연한 것으로 볼 수 있다. 그러나 태양광발전이 지상전원용으로 그 시장성을 넓히기 위해서는 부득이하게 기존의 발전방식과의 경쟁이 불가피한데, 더욱더 값싼 태양전지 개발에 관한 필요성이 높아지고 있는 것이다. 박막형 태양전지는 기존의 벌크형 태양전지가 갖고 있는 물질 소모량을 최소화하여 값싼 태양전지를 구현할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 본고는 현재 관심이

고조되고 있는 박막형 태양전지중 실리콘을 소재로 한 태양전지의 기술개발, 상용화 및 시장현황을 살펴보고 향후 전망에 대해서 논의하고자 한다.

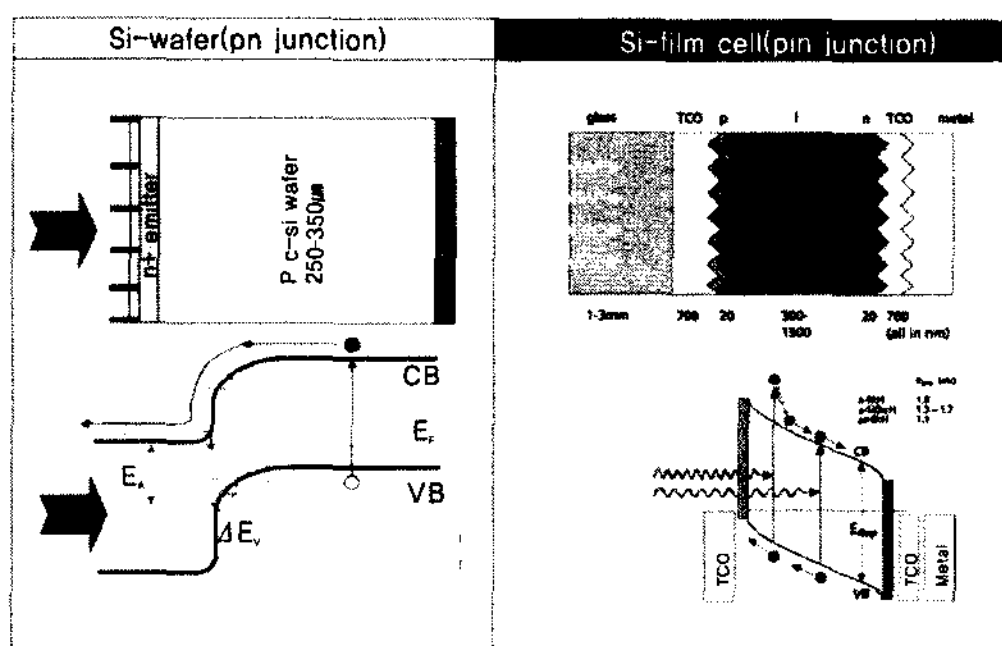
II. 실리콘 박막 태양전지 구조, 제조방법 및 특징

박막 태양전지는 실리콘 기판(wafer)보다 값이 싸고, 면적이 넓은 유리, 얇은 금속 판, 플라스틱 등을 기판으로 사용하여 태양전지를 구성하는 물질을 두께 수 마이크론의 박막 형태로 증착하여 제조된다. 그림 1은 실리콘 벌크형과 박막형 태양전지의 개념도를 비교한 것이다. 기존의 실리콘 벌크형 태양전지는 두께 180-220 μm 의 기판에 pn 접합을 형성하여 제조되는 반면, 박막 태양전지는 저가의 기판을 이용하여 박막 형태로 제조됨으로 물질 소모량을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 또한, 태양전지의 공정온도가 낮고 in-line 방식으로 대면적 기판에 모듈을 제조하기 때문에 공정의 저가화가 가능한 장점을 가지고 있다. 사용

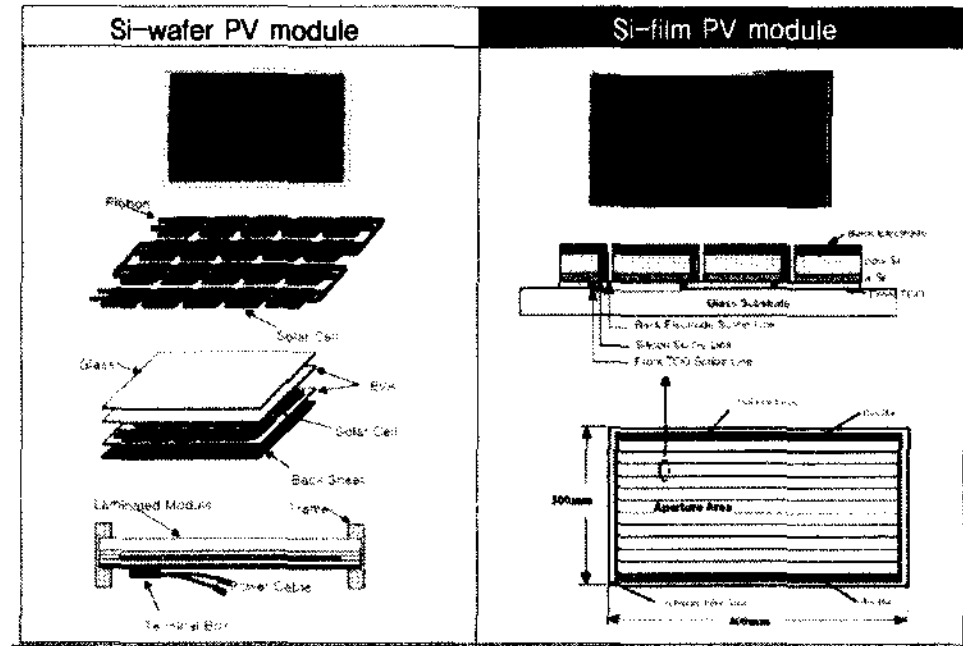


〈그림 1〉 실리콘 벌크형 (Si-wafer)과 박막형 태양전지 구조

되는 기관특성에 따라반투명 (유리기판) 또는 flexible (금속 판) 형태로 제조가 가능하여 다양하게 응용될 수 있는 점도 장점으로 들 수 있다. 그림 2는 실리콘 벌크형과 박막형 태양전지의 구조 및 동작원리를 비교한 것이다. 실리콘 벌크형 태양전지는 pn 다이오드의 구조를 갖는 반면, 비정질 (amorphous) 또는 나노 결정 (nanocrystalline) 실리콘을 이용한 박막형 태양전지는 p(p-type Si)-i(intrinsic Si)-n(n-type Si)의 구조로 제조된다. 이때 intrinsic Si 박막은 입사되는 태양에너지를 흡수하여 전자-정공 쌍 (electron-hole pairs)을 생성하며, p-type 과 n-type Si 박막은 intrinsic Si 박막내부에 전

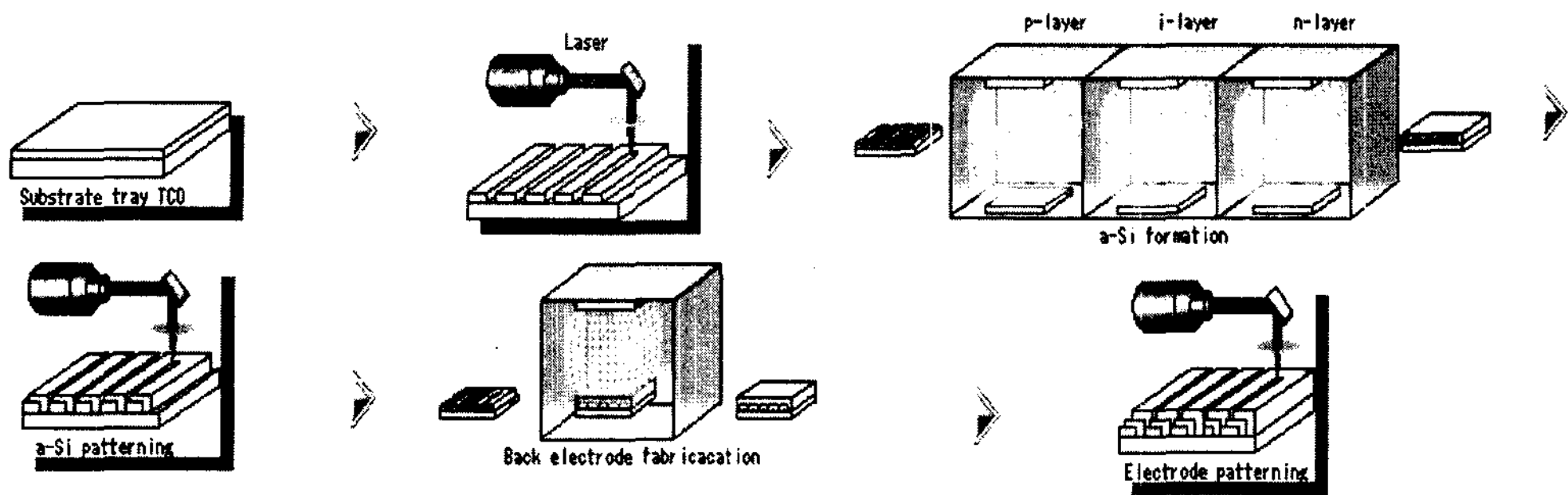


〈그림 2〉 실리콘 박막 태양전지 구조 및 동작원리 비교



〈그림 3〉 실리콘 벌크형과 박막형 태양전지 모듈 구조 비교

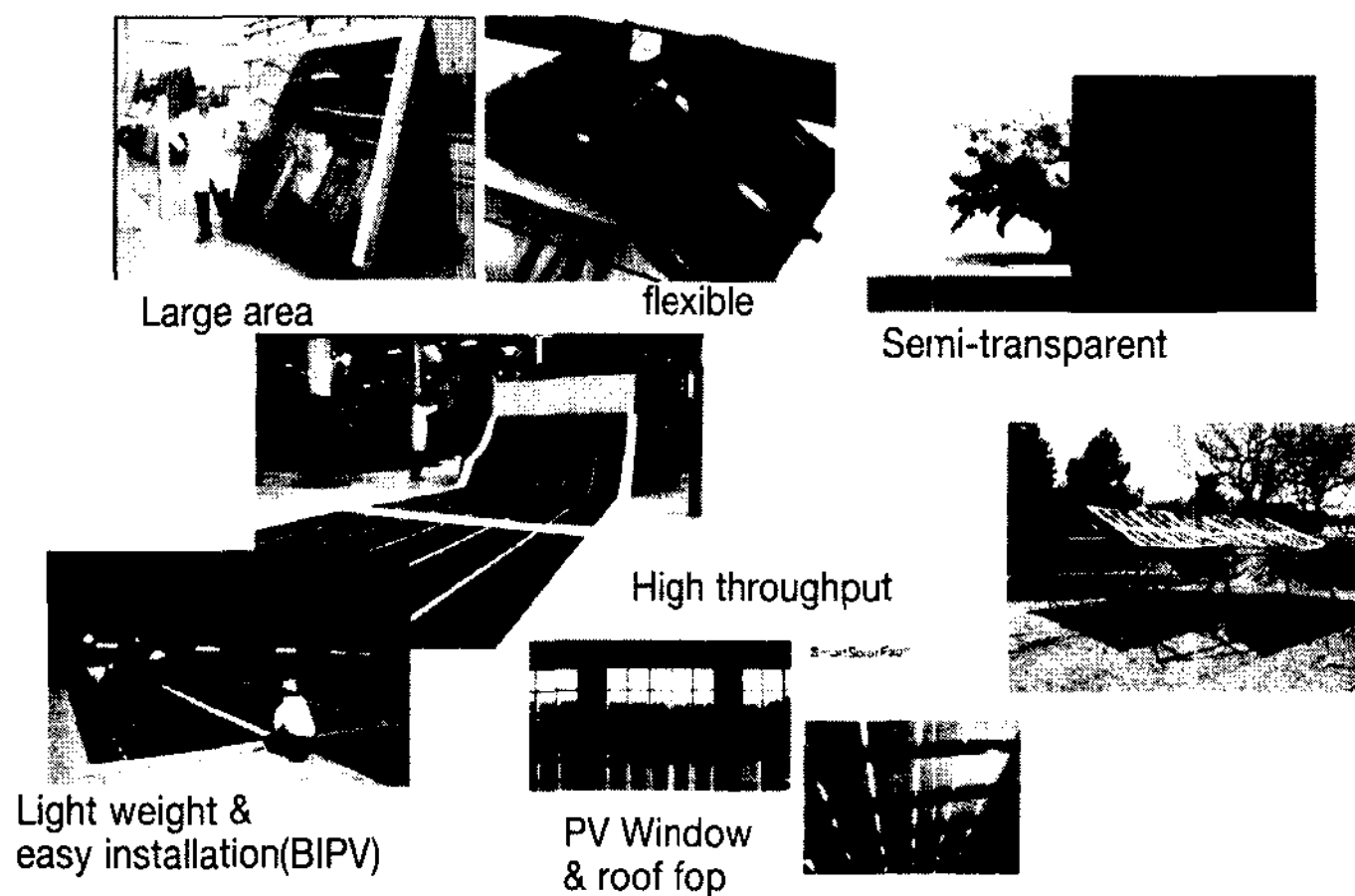
기장 (electric field)을 발생시키게 된다. 입사 광에 의해 생성된 전자-정공쌍은 광 흡수층 내부에 발생된 전기장에 의해 n층과 p층으로 수집되게 된다. 비정질 또는 나노결정의 실리콘 박막은 벌크형 실리콘 기관과는 달리 결정 (grain)이 없거나 크기가 매우 작아 전자-정공의 이동도(mobility)가 낮아 내부 전기장의 도움 없이는 이동이 어렵기 때문에 반드시 p-i-n 구조로 제조되게 된다¹⁾. 그림 3은 실리콘 벌크형과 박막형 태양전지 모듈 구조와 제조방법을 비교한 것이다. 벌크형의 경우 5-6" 크기의 실리콘 기관에 태양전지를 제조한 다음, 각각의 태양전지를 리본을 이용해 직렬연결하고 EVA, Back Sheet, 전면 강화유리를 진공 lamination하여 제조하는 반면, 박막형은 5 ~ 8세대 크기 (1-5 m²)의 대면적 기관에 박막증착 및 laser scribing 공정을 이용하여 모듈을 제조하므로 벌크형에 비해 재료 소모량 및 공정 면에서 저가화가 유리하다. 박막 태양전지 모듈 제조공정도를 그림 4에 나타내었다²⁾. 먼저 유리기판에 투명전도막을 증착하고 laser를 이용해 약 1cm 간격으로 1차 scribing을 하고 p-i-n 실리콘 박막을 순차적으로 증착한 후 2차 scribing 공정을 통해 실리콘 박막을 제거한다.



〈그림 4〉 실리콘 박막 태양전지 모듈 제조 공정도

다음으로 후면 전극을 형성한 후 3차 scribing 을 통해 전극과 실리콘 박막을 제거하고 마지막으로 가장자리 절연을 위해 4차 scribing 공정을 통해 투명전극, 실리콘 박막, 금속전극을 동시에 제거하게 된다. 그림 5는 다양한 형태로 제조된 실리콘 박막 태양전지 모듈의 형태, 제조 및 적용사례를 나타낸 것이다. 유리기판을 사용할 경우 반투명 형태의 see-through 모듈로 제조가 가능하므로 기존의 창문을 대신하여 사용할 수 있으며, flexible 모듈로 제조하여 건물의 지붕이나 외벽 또는 특정 구조물에 설치할 수 있다. 또한 금속판 또는 플라스틱

기판에 제조된 모듈의 경우 무게가 가볍고 두루마리 형태로 말수 있기 때문에 포터블 (portable) 형태의 비상전원용으로도 적용가능하다. 표 1은 실리콘 벌크형과 박막형 태양전지의 특징을 비교한 것으로, 박막형의 경우 제조공정의 In-line화, energy payback time, 원재료 소모량, energy rating, 적용성 등에서 벌크형에 비해 우위에 있다. 반면 모듈 효율, 양산화 및 시장규모, 초기 장치투자비, 설치면적에 있어 기존의 벌크형에 비해 열세에 있어 향후 이러한 부분에 대한 집중적인 기술개발이 요구된다.



〈그림 5〉 실리콘 박막 태양전지 적용 사례

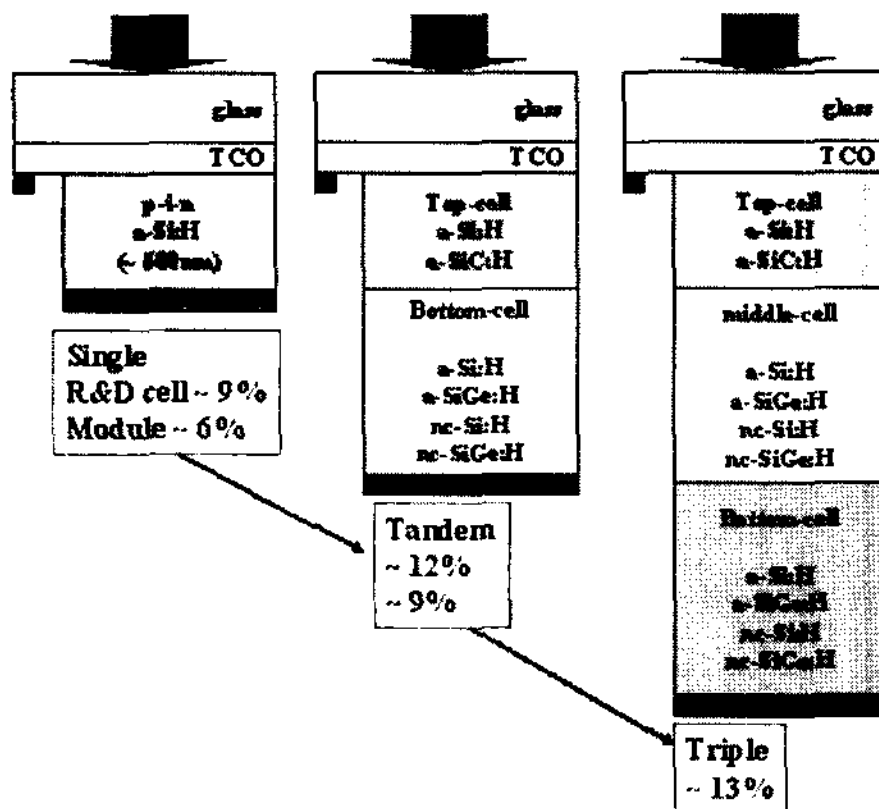
	Bulk Silicon	Thin-film Silicon
Substrate cost	Si-wafer (single, multi) high	Glass, SUS, plastic film low
Cell structure Sub. thickness	pn junction (single junction) ~ 220 μm	pin (single, tandem, triple junction) ~ 5 μm
Record cell efficiency	24.7% (UNSW, small area)	~ 9.4% (pin a-Si:H single junction) ~ 12.5% (a-Si:H/nc-Si:H tandem) ~ 13.0% (a-Si/a-SiGe(nc-Si)/nc-Si triple)
Production module efficiency	13 ~ 17%	~ 7% (single pin, 5 th glass size) ~ 10 % (tandem pin/pin, 5 th glass size)
Mark share (2006)	~ 90% (~ 2,100 MW)	~ 4% (~ 100MW)
Major companies	Sharp, Q-Cells, Suntech, Kyocera, etc	Kaneka, United Solar, Sharp, MHL, etc
Mass production Facilities	Wet bench (wafer cleaning & texturing), Furnace (pn junction), PECVD (SiN), Screen printer, belt furnace, dry etcher, Tabbing & string, laminator	Wet station (glass clean), CVD or sputter (TCO), PECVD (a-Si), Sputter (back metal), 4 laser scribe, laminator
In-line	MEDIUM	HIGH

	Bulk Silicon	Thin-film Silicon
Energy payback time	5-6 years (high energy consumption processes)	2-3 years (low energy consumption processes)
Use of Si /kW	20 kg Si (high material cost)	250g SiH ₄ (low material cost)
Si in final module (per kW)	6kg Si	50g Si
Area needed/kW	7 m ²	14m ² (based on single pin a-Si:H, 6% module)
Energy rating	-	10% higher than bulk Si solar cells : higher electricity than bulk-Si cells in the field
BIPV applicability	medium	High (frameless flexible, See-through) portable power sources
Module Production complexity	High (MG-Si → poly-Si → ingot → wafer → Cell → module)	Low (SiH ₄ gas → CVD deposition → laser scribing → module)
2010 Prospect	Module efficiency ~ 17% Cost ~ 2.0\$/Wp	Module efficiency ~ 12% Market share ~ 10% (2GW), cost ~ 1\$/Wp

〈표 1〉 실리콘 벌크형 및 박막형 태양전지 특성 비교

III. 기술개발 현황

실리콘 박막 태양전지는 물질특성 및 구조에 따라 다양하게 분류되는데, 그림 6은 비정질과 나노결정 실리콘계 박막을 이용한 태양전지 종류 및 기술개발 수준을 나타낸 것이다. 가장 기본적인 태양전지의 구조는 비정질 실리콘(a-Si:H)을 이용한 p-i-n 단일접합(single junction) 태양전지로 1980년대부터 이미 상용화가 이루어 졌으나, 광 흡수층인 a-Si:H의 높은 광학적 밴드갭 및 광 열화 특성(Stabler-Wronski Effect^{[3])}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 진행중이다. 이중접합 태양전지는 상부전지(top cell)로 광학적 밴드갭이 큰 a-Si:H (1.7-1.8eV)을 사용하고 하부전지(bottom cell)로 밴드갭이 작은 a-SiGe:H (-1.4eV) 또는 나노결정 실리콘(nc-Si:H)을 전기, 광학적으로 직렬연결함으로써 입사광을 효율적으로 이용하고 개방전압(open circuit voltage: Voc)을 높임으로써 모듈의 효율을 9%



〈그림 6〉 실리콘 박막 태양전지 종류 및 기술개발 수준

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^[4], a-Si:H 박막에 비해 상대적으로 10배 이상의 두께를 갖는 nc-Si:H 박막의 고속증착이 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 Sharp를 포함한 몇몇 기업에서 상용화를 시도하고 있다. 삼중접합 태양전지의 경우 각 전지의 광 흡수층 선택이 매우 중요하다. 미국의 United Solar^[5]는 이미 a-Si/a-SiGe/a-SiGe 구조의 모듈을 금속판에 roll-to-roll 방식으로 상용화하였는데 모듈의 효율은 ~7%에 머물고 있다. 삼중접합 태양전지의 상부전지 물질로는 a-Si:H과 함께 a-SiC:H 등이 연구되고 있으며, 중간전지(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.

IV. 상용화 현황

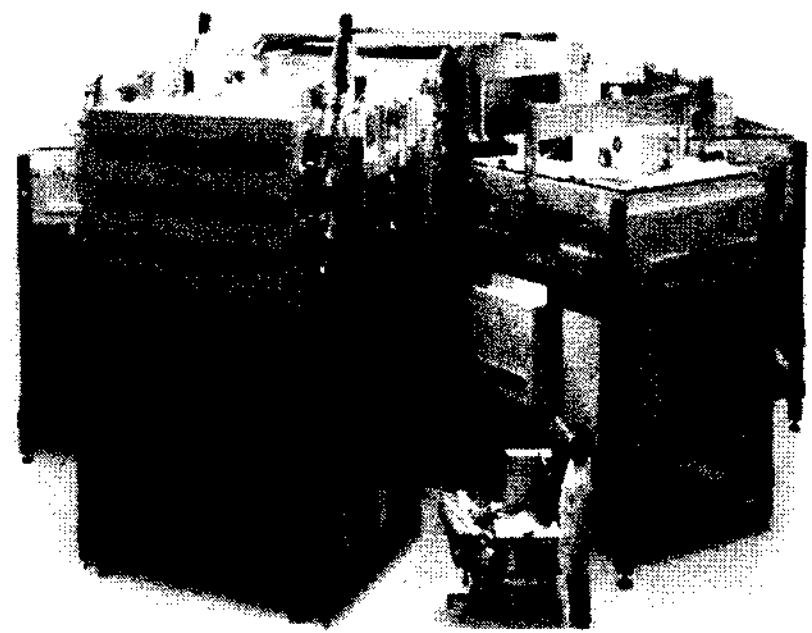
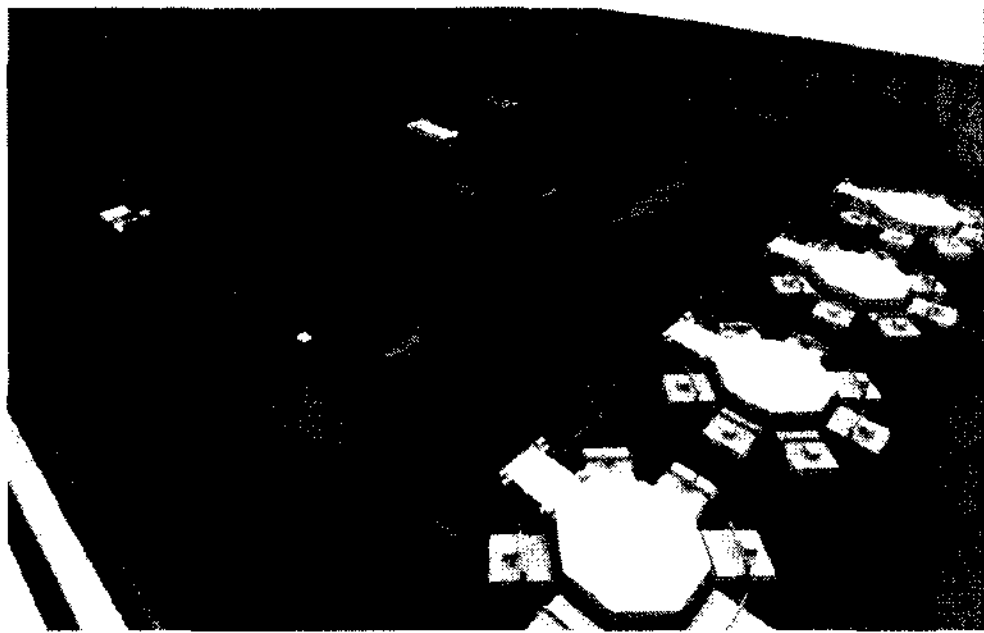
실리콘 박막 태양전지는 기존의 TFT (Thin Film Transistor) 제조에 사용되는 장치(주로 PECVD) 및 제조 공정이 매우 유사한 특징으로 인해, 박막 태양전지 중에서 가장 먼저 상용화에 진입하였다. 그림 7은 유리기판과 SUS 기판을 이용한 상용화 모듈을 나타낸 것이다. 유리기판의 경우 a-Si:H 단일접합과 a-Si:H/nc-Si:H 이중접합 구조의 모듈이 현재 상



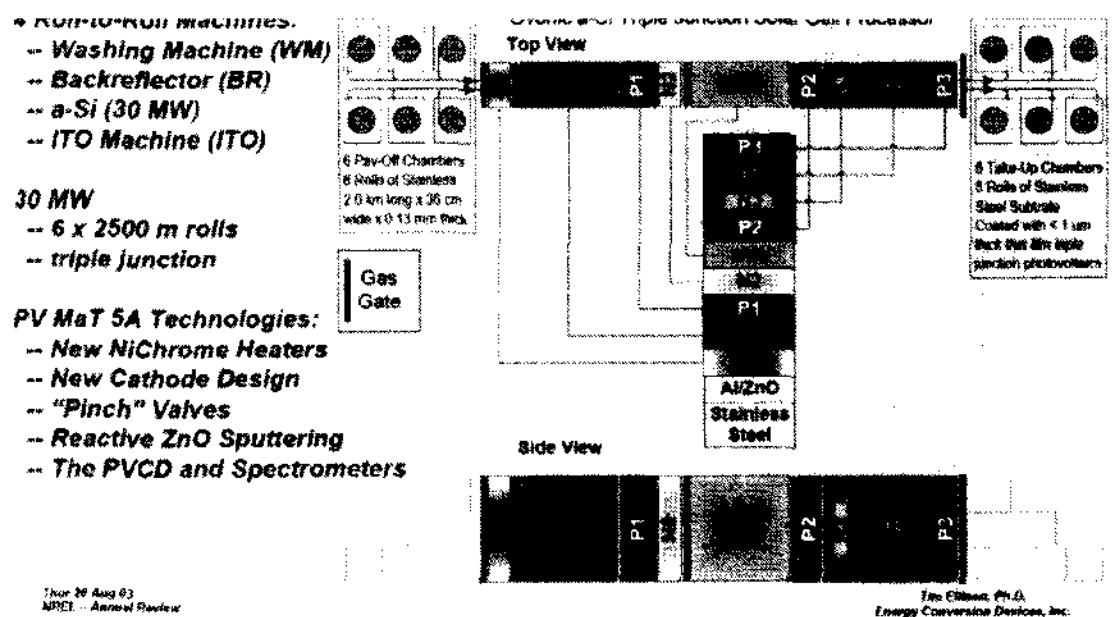
〈그림 7〉 유리기판^[6]과 flexible SUS sheet^[5]를 이용한 실리콘 박막 태양전지 모듈 사진

용화 되었으며 모듈의 효율은 a-Si:H 6-7%, a-Si:H/nc-Si:H 9-10%를 기록하고 있다. SUS 기판의 경우 미국의 United Solar에서 a-Si/a-SiGe/a-SiGe 삼중접합 구조를 이용해 30MW/

년 규모로 상용화중이다. 그림 8은 대면적 유리기판을 이용한 실리콘 박막 태양전지 양산화 개념 및 장치를 나타낸 것으로서 제조방식은 크게 cluster와 in-line 방식으로 구분된다.



〈그림 8〉 유리기판을 이용한 실리콘 박막 태양전지 양산화 장치^[7]

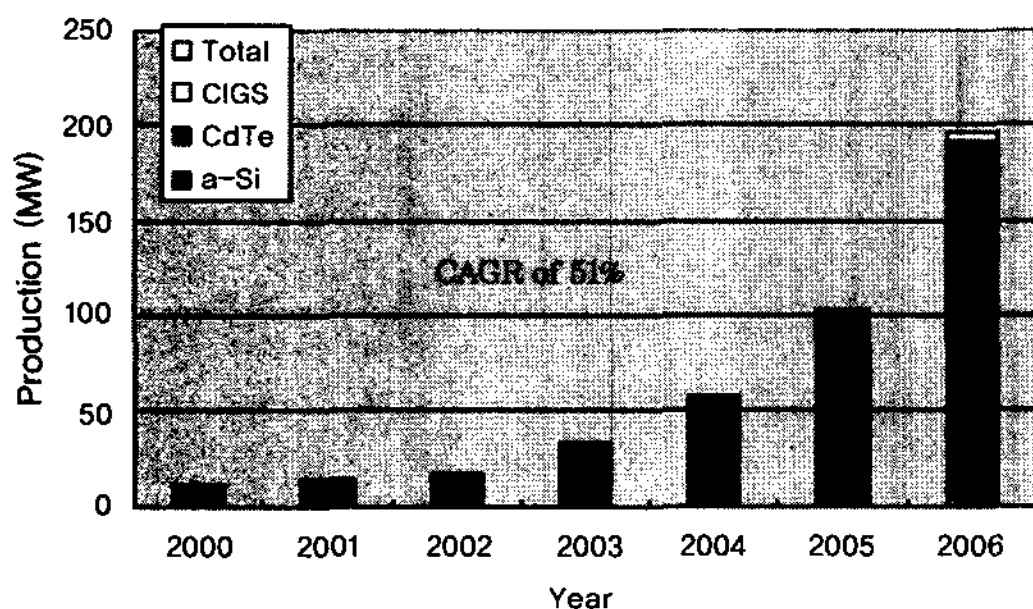


〈그림 9〉 Flexible SUS 기판을 이용한 roll-to-roll 제조장치^[5]

또한 p층, I층, n층의 박막을 서로 다른 반응실에서 증착하는 방식과 동일 반응실에서 증착하는 방식이 있는데, 각각의 반응실을 이용할 경우 두께가 두꺼운 I층의 증착속도를 높여 p층, n층의 밸런스 조절, 동일 반응실의 경우 도우핑 가스의 상호 오염을 최소화 하는 것이 중요하다. 그림 9는 Flexible SUS 기판을 이용하여 a-Si/a-SiGe/a-SiGe 삼중접합 태양전지 제조장치와 공정 개념도를 나타낸 것이다. 수 km의 roll 기판을 연속적으로 투입해 삼중구조의 태양전지를 제조함으로써 전체 반응실은 in-line 형태로 구성되는데 roll의 속도 및 각 반응실에서의 박막 증착속도 조절이 핵심기술이다.

V. 시장현황 및 전망

2006년 전세계 태양전지 생산량은 약 2500MW이며, 이중 박막 태양전지 (Si, CdTe, CIGS) 점유율은 약 7.8%로서 196MW가 생산되었다(그림 10 참조). 박막 태양전지중 Si 박막 태양전지는 비정질 실리콘 위주로 약 123MW가 생산되어 전체시장의 약 5%, 박막전지 분야에서 63%를 점유하였다. 박막 태양전지의 시장 증가율은 최근 2-3년사이 50% 이상 고속 성장

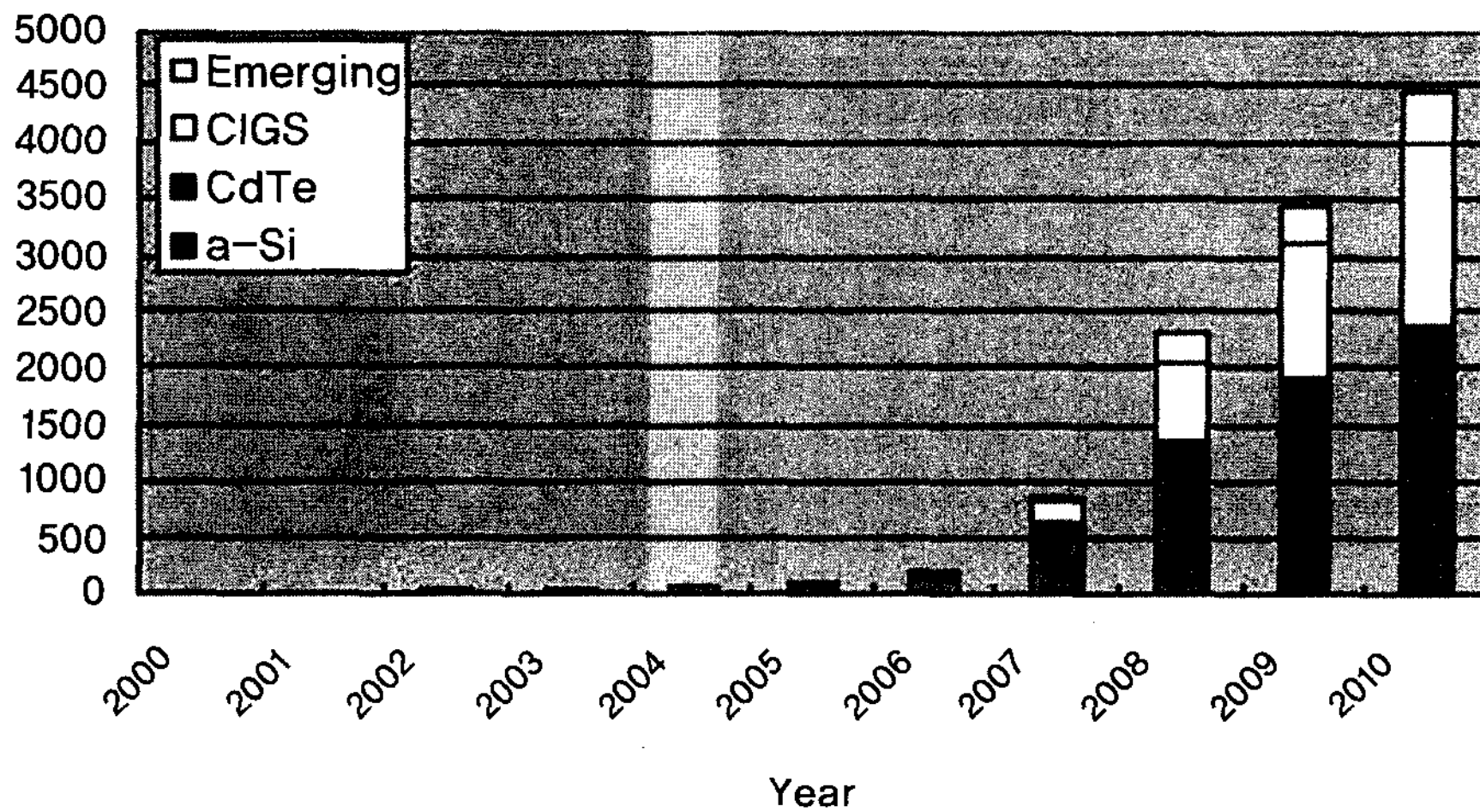


〈그림 10〉 박막 태양전지 연도별 시장 증가율 [8]

Manufacturer	Thin-film Technology	2006 Production (MW)	Market Share (%)
First Solar	CdTe	60	31
Antec Solar Energy GmbH (CdTe)	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	13	7
Sharp	a-Si-nc-Si (2)	8.2	4
Bangkok Solar	a-Si (2)	5	3
Sanyo Solar	a-Si	5	3
Sinonar Solar	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
Total		196	7.5%

〈표 2〉 2006년 박막 태양전지 생산기업 현황 및 시장 점유율 비교[8]

을 이루고 있는데, 이러한 급속한 시장증가는 기존 실리콘 벌크형 태양전지가 갖는 원재료 수급 및 가격 문제에 기인한다. 대표적인 실리콘 박막 태양전지 생산업체로 (표 2 참조)는 United Solar (미국, 30MW/yr, flexible 기판, roll-to-roll), Kaneka (일본, 30MW/yr, 유리기판), Mitsubishi 중공업 (일본, 13MW/yr), Shenzhen Topray Solar (20MW/yr), Sharp (8MW/yr), Bangkok Solar (5MW/yr), SCHOTT Solar (3MW), Energy Photovoltaics (1.5MW), Tianjin Jinneng Solar Co (1.5MW) 등을 들 수 있다. 박막 태양전지 생산기업의 특징으로 실리콘 벌크형에 비해 생산규모가 작은 점을 들 수 있는데, First Solar (CdTe)의 60MW를 제외하고는 모두 30MW/년 이하의 소규모 생산을 진행중이다. 앞서 언급하였듯이, 박막 태양전지는 기술개발 수준이 실리콘 벌크형에 비해 낮으며 초기의 높은 장치 투자비가 요구된다. 특히 실리콘 박



〈그림 11〉 박막 태양전지 시장예측¹⁸⁾

막의 경우 비정질 실리콘 모듈의 효율이 6%에 머물러 왔기 때문에 생산규모의 확대가 사실상 어려웠는데, 최근 일본 Kaneka, Sharp를 중심으로 다중접합 모듈의 효율이 10%를 넘어 생산규모 확장의 기틀이 마련되었다고 볼 수 있다. 박막 태양전지 기술개발에 따른 효율 상승과 최근 실리콘 원료 수급문제 등의 원인으로 인해 박막 태양전지 시장의 급속한 증가를 예상할 수 있는데(그림 11 참조), 최근 태양전지 생산 B3업체인 일본 Sharp의 2012년 1GW 플랜트 건설, 독일 Q-cell과 중국 Suntech의 실리콘 박막 태양전지 플랜트 건설 발표¹⁹⁾와 더불어 기존 박막 태양전지 업체의 증설계획 발표는 향후 박막 태양전지뿐만 아니라 태양전지 산업의 전개방향을 잘 설명해주고 있다.

VI. 결 론

현재 태양전지 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 단·다결정 c-Si 태양전지는 높은 원

재료(poly-Si) 가격으로 인해 태양전지 및 태양광발전 시스템의 저가화를 가로 막는 가장 큰 장애요인이 되고 있다. 또한 최근 태양전지 시장의 급속한 성장으로 인해 실리콘 기판 수급이 큰 문제로 대두됨으로써 박막 태양전지에 대한 필요성이 한층 부각되고 있는 실정이다. 비정질 및 나노결정 실리콘 박막 태양전지는 현재 실리콘 벌크형 태양전지에서 사용되는 실리콘의 약 1%(수 μm) 만을 저가의 기판위에 박막형태로 사용하므로 태양전지의 저가화가 가능하며, 적층형 구조로 태양광을 효율적으로 이용함으로써 태양전지의 효율향상 또한 가능하다. 또한 유리를 기판으로 한 모듈의 경우 기존 건물의 창문 대신 활용할 수 있어 모듈의 상대적인 저가화가 가능하며, 금속 기판을 이용한 flexible 구조의 모듈로 제작할 수 있어 그 적용분야가 다양한 장점이 있다. 그러나, 실리콘 박막 태양전지는 벌크형 태양전지에 비해 변환효율이 낮고 고가의 진공증착 장비(높은 초기 투자비)가 요구되며 현재로서는 벌크형에 비해 생산용량 또한 낮아 충분한 가

격 경쟁력을 갖지 못하는 실정이다. 일본, 유럽, 미국을 중심으로 한 태양전지 선진국에서는 산·학·연을 중심으로 효율향상 및 생산성 향상을 위한 기술개발에 많은 비중을 두고 있다. 국내의 경우 이제 겨우 몇몇 기업들이 상용화에 움직임을 보이고는 있지만, 모두 외국의 장치기술에 의존하는 수준에 머물고 있다. 한국의 앞선 반도체 공정 및 장치기술, 연구 인프라를 십분 활용하여 단기간에 걸친 생산위주보다는 경쟁력 있는 기술확보를 통한 보다 장기적인 전략수립이 더욱더 필요한 시점이라고 볼 수 있다.

저자소개



이정철

1995년 2월 경남대학교 전자공학과 학사
 1997년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
 2008년 2월 성균관대학교 전자공학과 박사수료
 1997년 4월-현재 한국에너지기술연구원 태양전지연구단
 선임연구원

주관심 분야 : 실리콘 박막 태양전지, a-Si/c-Si 이종접합 태양전지

참고문헌

- [1] K. Takahashi and M. Konagai, Amorphous Silicon Solar Cells, North Oxford Academic, 1986.
- [2] Y. Tawada*, H. Yamagishi, K. Yamamoto, Solar Energy Materials & Solar Cells 78 (2003) 647-662
- [3] D.L. Staebler and C.R. Wronski, Appl. Phys. Lett. 31, 292--294 (1977).
- [4] J. Meier, et al, Journal of Non-Crystalline Solids 227-230 (1998), 1250-1256
- [5] <http://www.uni-solar.com/>
- [6] <http://www.orelikon.com>
- [7] www.appliedmaterials.com/products/solar_3.html
- [8] The Future of Thin Film Solar, greentech media, Prometheus Institute, Vol. 1, No. 1, August 2007
- [9] www.pv-tech.org

용어에설

블루 페이지 방식

Blue Phase Mode, -方式 [기초]

액정 구조가 기존 방식과 달리 액정의 방향을 결정하는 얇은 막인 배향막없이 자발적으로 배열을 하고 빛이 액정을 통과할 때 굴절하는 정도가 달라지는 특성을 가지고 있는 차세대 LCD 기술. 초고속 동영상 구현이 가능하고 양산 공정을 단순화해 생산 효율도 크게 높일 수 있다. 또한 외압에 의해 휘도가 달라지는 이른바 멍듦 현상(Bruising)도 원천적으로 차단할 수 있다.