

태양전지 제조 기술과 전망

李 鍾 德

韓國電子技術研究所(理博)

1. 태양전지의 오늘과 내일

1973년 이래 산유국(OPEC)의 석유수출 제한으로 빚어진 'energy crisis' 이후 석유 대체에너지 개발에 미국을 비롯한 몇몇 부유국들이 상당한 금액의 투자를 해왔으며 태양전지 개발은 그중 하나이다. 지난 6년 동안의 발전상을 보면 1973년 1peak watt(Wpk)의 전력을 생산하기 위하여 \$ 30 이상이 소요되었으나 현재는 같은 양의 전력을 얻기 위하여 \$ 10 - \$ 15 정도로 떨어졌고 내년쯤에는 \$ 6 - 8/Wpk로 내려갈 전망이다. 제조 기술 면에서도 상당한 발전을 보여 단결정 silicon (Si), gallium arsenide (GaAs), cadmium sulfide (CdS) 등을 사용할 때 거의 이론적으로 예견하는 최대값에 가까운 변환효율(conversion efficiency)을 얻었고 더욱 경제성을 높이기 위하여 다결정(poly crystal)이나 비결정(amorphous)물질에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

태양전지는 근본적으로 반도체 다이오드를 제조하는데 사용되는 물질과 태양광의 조건에 따라 0.5 - 1volt의 전압과 20 - 40mA/cm²의 전류밀도를 주는 것이 보통이며 현재 silicon 태양전지의 경우 250W/m²를 얻는 것은 그리 어렵지 않다. 한달 전기 사용량이 300KWH를 쓰는 가정을 위하여 태양전지를 설치한다면 일년 일조시간이 우리나라의 경우 약 2,000시간(미국, 사우디아라비아, 알제리아, 호주등의 사막지대는 약 4,000시간)으로 보아 1.8KW 용량의 태양 발전

기가 필요하며 \$ 10/W로 보아 900만원의 건축비가 추가되며 태양전지가 차지하는 지붕면적은 7.2m²이다.

현재 진행되고 있는 각국 태양전지 개발계획 및 투자계획은 표 1에서 보는 바와 같다. 미국은 어느 나라 보다도 확실한 계획을 가지고 있으며 투자액도 가장 많다. ERDA(Energy Research and Development Administration)의 Photovoltaic Program^[1, 2]에 의하면(1978년까지 1MWpk 전력 생산시설을 목표대로 완성하였음) 1986년까지는 연간 500MWpk를 \$ 0.5/Wpk 가격으로 시설할 능력을 갖추며 2,000년에는 \$ 0.1 - 0.3/Wpk 가격으로 연간 5,000MWpk 생산시설을 한다는 것이다. 이 계획대로 하면 2,000년에는 약 50,000MWpk의 전체 시설을 갖추게 되며 이 전력은 현재 미국 전체 전력의 5% (현재의 핵 발전량)에 해당하고 2,000년 당시로 보면 전체 전력의 1-3%에 해당하여 보잘 것 없다고 생각되나 실제 이때부터 대량 설치되기 시작하여 전체 전력에 대한 태양전지 발전량의 급격한 증가가 시작된다는 것이다. 연차적 생산가 목표^[2]는 1982년까지 \$ 2.80/W, 1986년까지 \$ 0.5/W, 1990년까지는 \$ (0.15 - 0.50)/W이며 이 목적을 위하여 향후 10년간 15억불이 태양전지의 연구, 개발 및 전시에 사용될 것이며 금년도에는 1억 300만불을 내년에는 1억 3,000만불을 투입할 예정이다.

France는 미국 다음으로 많은 \$ 115 M을 향후 6년간 태양전지개발에 투자할 예정이며 서

표 1. 각국의 태양전지 개발투자 현황 및 계획^[1, 2]

	\$ M	Period	\$ M	Period
France	7.7	1977 ~ 1979	115	1980 ~ 1985
West Germany	2.2	1976 ~ 1980	76	1980 ~ 1987
Japan	1.0	1977		
U. S. A.	65.0	1977	1,500	1980 ~ 1989
EEC	9.0	1974 ~ 1979	240	1980 ~ 1983
Canada	1.0	1979		

독은 향후 8년간 \$ 76M을 주로 재료 개발에 투자할 계획이다. 일본은 아직 뚜렷한 계획이 발표된 바 없지만 1981년에서 1985년에 걸쳐 시험 생산을 1986년에서 1990년에 걸쳐 저가 전력 생산계획을 세우고 있다. EEC는 참가 9개국이 공동 또는 단독 개발에 \$ 240M을 투자할 예정이다며 표 1에 나타난 France의 개발자금은 EEC에서 넘어오는 자금을 추가하고 있어 일부는 중복이 되어 있다. 영국의 경우 확실하지는 않으나 \$ 12M의 solar program을 가지고 있으며 Canada에서는 1979년 \$ 1M project를 수행하고 있으며 1982년까지 2~3종의 poly-silicon 생산을 위한 연구 개발을 하고 있다.

태양전지는 생산가가 \$ 10/W이상이면 연구 목적이나 기존 전력이용이 불가능한 지역에 대한 전력용으로, \$ 1 - \$ 10/W의 범위에서는 10kw 이하의 소형발전, magic number인 \$ 1/W 이하로 떨어지면 GW (Giga Watt)급 발전에 이용될 것이다. 본 논문에서는 2항에서 어떤 재료들이 태양전지에 쓰이는가를 알아보고, 3항에서는 silicon이 왜 우리의 목적에 부합한가를 살펴보고 태양전지용 silicon을 어떻게 값싸게 얻을 수 있을가를 중점적으로 알아 보았으며, 4항에는 현재 가장 많이 이용하는 태양전지 제조 공정을 소개하였으며, 아울러 효율을 높이기 위하여 어떤 특별한 제조공정이 필요한가를 소개

하였다. 5항에서는 집광시의 이점과 문제점을, 6항에서는 array가 어떻게 응용되나를 알아 보았다. 마지막으로 결론에서는 전체적인 요약과 우리도 무엇인가 해야 되지 않을까 하는 생각에서 우리가 해야 할 태양전지 개발을 위한 필자의 소견을 적어 두었다.

2. 태양전지의 종류 및 전망

태양전지는 여러 가지 재료를 써서 여러가지 공정을 도입하여 만들지만 그 원리는 반도체와 반도체, 반도체와 유전체, 반도체와 금속을 접합시켜 에너지 장벽을 만들고 이 에너지 장벽을 사이에 두고 electron과 hole이 분리되어 존재하도록 하는 것이다. electron-hole pair의 분리는 바로 태양에너지에 의하여 이루어진다. 분리되어 존재하는 시간은 수 μ s에서 수십 μ s 정도이며 electron이 모이는 쪽이 -극 hole이 모이는 쪽이 +극이 되어 전극을 연결하면 전지로서의 역할을 하게 된다. 재료의 선택이나 공정의 개발은 이 두 가지를 항상 전제 조건으로 한다는 것은 당연하다. 태양전지를 구조에 따라 PN junction, MIS (Metal-Insulator-Semi-conductor), Schottky barrier cell로 나눌 수 있으며 재료에 따라 구분하면 다음과 같다.

1) Silicon 태양전지^[1, 2, 3]

최근 단결정 silicon으로 P⁺/N, N⁺/P, N⁺/

P/P⁺ junction cell 을 만들어 최대효율이 20%까지 얻어지고 있으며 이 값은 이론적으로 얻어지고 있으며 이 값은 이론적으로 얻을 수 있는 값(22%)에 가깝다. 그러나 경제성을 고려하여 제조 판매되는 태양전지는 10 - 13%의 효율을 가지는 것이 대부분이다. 단결정을 이용한 silicon 과 metal 사이에 10 - 30Å의 절연체 박막을 가지는 MIS cell 역시 18%에 가까운 효율을 나타낸다고 보고^[4] 하고 있으나 아직은 대량생산 단계에 와 있지 않아 앞으로 연구 개발의 결과가 주목된다. 그러나 이들 단결정을 이용하는 태양전지는 효율이 높긴하지만 생산가격이 높아 단결정 재료를 저렴하게 생산하는 연구와 값싼 poly/amorphous 재료를 쓰는 태양전지 개발에 힘쓰고 있다. 근래 수년간 값싼 poly silicon P/N junction cell 개발에 많은 진전을 보여 현재 10%정도의 효율을 가지는 polysilicon cell 이 개발되어 있으며, amorphouse silicon 을 이용한 Schottky cell^[2,5] 이 연구되고 있지만 2 mm² 정도의 크기에서 효율 6% 정도에 그쳐 아직도 실용화는 멀다고 하겠다. SnO₂/Si과 ITO (Indium Tin Oxide)/Si 에서는 각각 12.24%, 10%의 효율이 보고 되어 있으며 이론치인 20%에 접근하도록 연구가 진행중이다.

2) III - V 화합물 태양전지^[1,2,3]

가장 높은 효율(23%)를 보여준 GaAs / Ga_{1-x}Al_xAs hetero-junction cell이 보고 되어 있으며 GaAs 단결정 homo-junction cell 에서도 20.5%의 효율을 나타내는 cell 을 만들었다. InP/Cdcell 은 효율도 높지만 온도 특성이 좋아 집광장치와 같이 쓸 수 있는 cell로 등장하였으며, pGaAs/n ZnSe 도 개발할 가치가 있는 것으로 간주된다. 특히 GaAs/GaAlAs cell 은 재료가 고가이고 공정이 silicon에 비하여 어렵긴 하지만 100°C보다 낮은 온도에서는 온도 특성이 좋고 효율이 높기 때문에 렌즈나 거울을 이용하

여 1000 : 1 까지 집광해도 22%의 효율을 유지할 수 있어 1000 Sun에서 20 W/cm² 이상의 전력도 얻을 수 있다. Junction cell 이외에도 GaAs MIS cell 에서 15%를 얻어 \$0.7/W의 목적을 달성하려고 재료비 절약을 목적으로 강판위에 GaAs 박막을 입히고 laser 로 재결정화하여 만드는 방법을 연구중이며 흑연을 기판으로 사용하기도 한다.

3) II - IV 화합물 태양전지^[1,2,3]

이들 화합물은 주로 박막형태로 입혀져서 cell 을 만드는데 이용되며 pCdTe/nCdS는 효율이 10%로 가장 높은 것으로 보고되어 있다. CdS/Cu_{2-x}S cell 은 silicon cell 이외에 유일하게 시장에서 구매할 수 있는 태양전지이며 현재 9%의 효율을 주지만 1990년까지는 효율을 14 - 16%까지 올리는 동시에 박막형태로 만들기 때문에 재료비가 저렴하여 \$0.1/W - \$0.3/W까지 생산가를 내리는 것이 가능하다고 보고 있다.

4) 기타

태양전지의 재료가 되려면 적절한 energy gap 을 가지며, 화학적으로 안정되고, 불순물 doping 이 쉽고, 제조가 간단한 물질이어야 된다. 이러한 여러 가지 까다로운 조건이 요구되는데도 불구하고 여러 물질에 대한 여러형태의 cell, 예컨대, CdTe Schottky 또는 MIS cell, Cu/CuO Schottky, Cu₂O Schottky, ITO/InP Schottky, ITO/GaAs Schottky^[3] 등에 관한 연구가 진행되고 있으며 8 - 10%의 효율을 나타내는 electrochemical cell 도 보고되고 있다. 무기물 반도체 뿐만 아니라 anthracene, tetracene, chloro-Phyll, N-vinylcarbazole, PVK-TNF, squarylium dye 등의 유기물 반도체를 이용한 Schottky cell 에 관한 연구^[1,3]도 진행중인데 근본적인 문제는 Photon 에 의하여 생성된 carrier 의 mobility가 낮아 비저항이 대단히 높으며(10⁵ - 10⁸ Ω·cm) ohmic contact 를 만들기 어려워 효율이

대단히 낮아(유기물 cell의 효율은 10^{-2} - 10^{-4} %) 현재로는 실용화가 요원한 실정이다.

3. Si material process

제 2항에서 논의한 여러가지 재료중에서 silicon이 solar cell material로 가장 적합한 이유는 ㄱ) 표 2에서 보는 바와 같이 단일 원소로는 가장 많이 존재하며, ㄴ) 현재 Si을 만드는 공정이 발달되어 있으며, ㄷ) 에너지 gap이 1.11 eV로 이론적으로 22%의 높은 효율을 기대할 수 있으며^[3], ㄹ) Silicon을 기판으로 사용할 때 cell을 만드는 공정이 비교적 쉽고 많이 연구되어 있다는 것이다.

표 2. 지구 지각을 구성하고 있는 물질 1 ton에 들어 있는 각 원소의 평균량^[6]

원 소	평균량(g)	원 소	평균량(g)
Si	277,200	Ge	7
Al	81,300	Gd	6.4
Fe	50,000	As	5
Zn	132	Ag	0.1
Cu	70	Au	0.005
Ga	15		

표 4. 미국 LSSA(Low-cost Silicon Solar Array) 계획에 의한 태양전지 제조의 생산가 저하 계획^[7]

Ingot 기술	단 위	1976	1978	1980	1982	1984	1986
Poly silicon	\$/kg		60	45	25	17	10
	\$/Wpk		2.3	1.4	0.49	0.30	0.158
Ingot 성장 및 가공	\$/m ²		295	130	782	35.4	21.0
	\$/Wpk		2.5	1.3	0.7	0.3	0.171
Cell 제조 및 array 제작	\$/m ²		211	135	97	51	23
	\$/Wpk		2.2	1.3	0.81	0.40	0.171
Array 가격목표	\$/Wpk	20	7	4	2	1	0.5

미국에서 소모될 silicon 량을 표 3에서 보면 태양전지용 silicon이 discrete 또는 I.C. 소자용 silicon에 비하여 1979년에는 35배나 적지만 1986년에는 11배나 많아진다는 견해이다. 소모량의 증가는 주로 solar cell을 만드는데 필요한 silicon 양이 급격히 증가하고 있기 때문이다.

표 3. 연도별 미국의 silicon 소모량 (단위 : $\times 10^4 m^3$)^[6]

년 도	1978	1979	1980	1986
태양전지용*	0.52	2.45	8.19	410.64
기타소자용	18.19	20.0	21.26	38.39

* JPL (Jet Propulsion Lab.)에서 계산한 것으로 1986년도의 $410.64 \times 10^4 m^3$ 는 약 3,000 metric tons (MT)으로 환산됨.

제조공정에 따라 다르기는 하지만 표 4에서 보면 태양전지를 만드는 생산가중에서 재료인 silicon이 차지하는 비중이 60% 이상이다. 따라서 생산가가 현재보다 약 20배 저하되려면 poly silicon을 뽑아내는 과정과 poly silicon으로 ingot나 ribbon/sheet의 형태로 결정화하는 과정에서 주로 이루어져야 할 것이다.

(표 4 계속)

Non - Ingot 기 술	단 위	1976	1978	1980	1982	1984	1986
Poly silicon	\$/kg			45	25	17	10
	\$/Wpk			0.7	0.26	0.15	0.07
Ribbon / sheet 성장 및 가공	\$/m ²			143	79	31.4	13
	\$/Wpk			2.0	1.01	0.36	0.131
Cell 제조 및 array 제작	\$/m ²			117	69	49	13
	\$/Wpk			1.3	0.73	0.49	0.299
Array 가격목표	\$/Wpk			4	2	1	0.5

그 외에도 표 4에서는 polysilicon 가격, poly - silicon 으로 단결정을 가공하는데 드는 비용, solar cell 제조 및 array 제작비가 연도에 따라 얼마만큼 떨어지게 되나를 자세히 볼 수 있다. LSSA 목표년도인 1986년에는 polysilicon 제조 가격을 현재의 \$ 65/kg에서 \$ 10/kg로 내리고 polysilicon 을 단결정으로 만들어 cell의 형태로 짜르고 표면을 연마하는 비용을 15배 정도 낮추어, 현재의 \$ 10/Wpk 를 \$ 0.5/Wpk 로 내려 연간 500MW의 규모로 전력을 생산하는데 주도 역할을 한다는 계획이다. 표 4에서 cell의 제조나 array 제작 과정에서 이루어져야 할 비용 절감이 금액으로 보아 중요하지 않게 보일 수 있지만 이 통계는 어디까지나 효율을 10 - 11% 정도로 가정하고 계산된 것이므로 만일 1986년에 20% 효율을 가지는 cell 을 쓴다면 cell 면적이 반으로 줄며 따라서 대개 생산가도 반으로 떨어지게 되는 것은 물론이다. LSSA 계획 이외에도 1990년대에는 \$ 100 - \$ 300/KW 의 polysilicon/amorphous silicon film 을 사용하여 생산가를 내리는 계획^[7]이 진행되고 있으며, grain size 가 큰 ($\geq 100 \mu m$) poly silicon wafer cell⁽²⁾을 만드는 것이 요즈음은 유망시되어 있으며, 아직은 효율이 10% 이하이긴 하지만 빠른 시일내에 10 × 10 cm 면적에서 15% 효율을 내는 cell 을 만들어 \$ 4 - \$ 6/W로 생산가를 저하시킬 전망이다.

LSSA 목표 달성을 위하여 silicon 화합물에서 98% 순도를 가지는 MG - Si (metallurgical silicon) 을 뽑아내어 고순도 polysilicon 을 만드는 것^[2, 8]은 Battelle 에서 zinc 환원으로 MG - Si 을 만들고 Union Carbide 에서는 이것으로 silane 을 만들어 고순도 poly silicon 을 얻는 연구를 하는데 전망이 밝다. 한편 Westinghouse 와 SRI International 에서도 silicon halide 를 Na로 환원하여 고순도 poly silicon 생산가를 \$ 10/kg로 저하시키는 연구를 하고 있다.

순도가 높은 polysilicon 으로 cell 제조에 적합한 ingot, ribbon / sheet 의 단결정 wafer 를 만드는 데 필요한 비용^[2]이 1976년 \$ 5.85/W 이었는데 1982년에는 \$ 0.94/W로 내려갈 전망이다. 이중 Czochralski 방법으로 ingot를 만들어 wafer 로 가공하면 ribbon / sheet 에 비하여 고가임에는 틀림없으나 ingot 모양을 네모지게 하고 wafer 가공법을 발전시키면 1986년에는 ribbon / sheet 에 비하여 몇 C/W 정도 높을 것이라는 추측이다 (표 4 참조). 효율이나 면적 점유율을 좋게 하기 위하여 Crystal Systems Inc. 에서는 square ingot 를 만들고 있으며 현재 면적 25cm²의 ingot 생산에 성공하였으며 목표는 30cm × 30cm이다. 뿐만 아니라 이 회사에서는 2.5cm ingot 를 64개의 4 mil (100 μm) 두께의 wafer 로 잘라 소모율을 50%에서 33%로 저

하 시키는데 성공하였다.

이러한 ingot wafering 작업을 없애기 위하여 단결정 성장을 할 때 바로 얇은 ribbon이나 casting에 의한 박막으로 만드는 것^[1,2,9]이 Mobil Tyco Solar Energy Corp., Motorola Inc., Westinghouse Electric Corp., Honeywell Inc. 등에서 연구중이며 이미 성장속도 $55\text{cm}^2/\text{min}$. 로 ribbon을 기를 수 있게 되었으며, 이렇게 길러 낸 ribbon으로 16%의 효율을 보여주는 cell을 만들었다고 보고하고 있다. Film 만드는 것도 진전이 있어 Mobil Tyco에서는 EFG(Edge Defined Film - Fed Growth) process^[2,9]로 하나의 crucible에서 5개의 5cm 폭의 ribbon을 뽑아낼 수 있으며 이 process 특허를 이미 Japan Solar Energy Corp.에서 구입하여 생산중이다. poly silicon의 양을 적게 써서 가격을 저하시키기 위하여 값싼 ceramic 기판위에 탄소를 입히고 그 위에 silicon film을 만드는 작업이 Honeywell에서 진행되고 있으며 이렇게 만든 2cm^2 cell에서 5.5%의 효율을 얻은 바 있다. 0.1-0.2mm 두께의 단결정을 사용하지 않고 바로 소자를 만드는데 충분한 20-30 μm 두께의 polysilicon film을 저렴한 흑연기판에 입혀서 cell을 만들려는 노력이 진행중인데 문제는 grain size가 100 μm 보다 커야한다는 것으로 Helitonic^[2]에서 소위 Silso라고 불리우는 실 같이 긴 polysilicon의 성장에 성공하여 10cm \times 10cm 크기로 sample를 만들어 공급하고 있으며 이것으로 10%의 효율을 가지는 cell을 만든다고 보고하였으며, 5-8년내에 대량 생산의 경우 \$ 0.25/W로 떨어뜨릴 수 있다고 한다. 이외에도 SMU(Southern Methodist University)에서는 MG-Si 위에 CVD에 의한 얇은 polysilicon film을 만들고 이것을 재결정화하여 grain 크기를 개선하는 연구를, Motorola에서는 electron-beam을 사용하여 Mo이나 W기판에

polysilicon film을 입히고 laser로 재결정화하는 연구를, 프랑스에서는 탄소 ribbon 위에 silicon을 입히고 이것을 crucible내에 넣어 silicon 단결정을 film 형태로 뽑아 올리는 연구를 진행 중이다.

단결정에 대한 것은 단결정이나 다결정이나 미국의 LSSA 목표년도내에 목적이 실현될 가능성이 크고 기대해 볼만하다. 그러면 더욱 저렴한 것이 예상되는 amorphous silicon은 어떤가? Amorphous cell은 이론적으로 15%의 효율을 줄 수 있는 것으로 되어있으나 현재까지 보고된 것중에서 가장 높은 6% 효율을 얻은 것^[2,5]은 RCA 연구소에서 만든 Schottky cell로 glow discharge technique를 써서 1 μm 정도의 두께로 비정질 Si를 입힐 때 수소를 적당히 넣어 Si-Si 사이의 공유결합을 약화시켜 photon에 의하여 생성된 전자와 전공의 재결합을 감소시킬 수 있다는 원리를 이용한 것이다. 다른 방법으로는 수소 대신에 다른 gas를 사용하는 것이며(예컨대, Ovshinsky의 fluorine 사용) glow-discharge 대신 자동화에 용이한 rf-sputtering를 이용하는 법도 개발중이다.

GaAs는 silicon보다 효율이 높은 cell을 만드는데 쓰이지만 silicon에 비하여 양이 적고(표2참조) 고가이기 때문에 대량으로 cell을 만들어 석유에너지를 대체하기는 적합하지 않다. 그러나 GaAs cell에 집광을 하면 1 cm^2 에서 수십 watt의 전력을 얻을 수 있다는 점에서 재료개발보다는 오히려 온도 특성이 좋은 cell 개발이나 고집광시에 일어나는 문제 해결을 위한: 집광장치를 포함한 array system의 개발에 중점을 두어야 할 것이다. CaS/Cu₂S cell도 유망한 것이나 역시 재료개발이 관건이 아니며 효율을 올리는 제조기술 개발이 문제이다.

4. 태양전지 제조 공정

3항에서 언급한 각종 재료로 만들어지는 태

양전지는 구조에 따라 PN junction, MIS, Schottky로 구분되며 그 중에서도 제조 판매되고 앞으로 대량 생산되어 석유의 대체 역할을 할 수 있는 것이 Si 이라고 판단되며, 현재 사용하는 제조 공정은 주로 diffused N⁺P junction을 대부분 쓰지만 MIS나 Schottky도 개발하여 따라 대량 생산체계를 갖추는데 전망이 밝다. 전항에서 이야기한 재료는 생산 공정에서 생산가를 떨어뜨리는데 주 목적이 있으며 제조 공정은 효율을 높여 일정한 전력 생산에 소요되는 재료비, 공정비, 차지하는 공간의 축소에 의한 array 제작비 및 설치비등의 감소를 가져오는 결과를 얻는데 목적이 있다.

그림 1에서는 diffusion을 지양하고 앞으로 대량 생산과정에서 자동화가 용이한 ion implant를 이용한 태양전지 제조 공정이 소개되어 있다. 여기서 불순물(B, P)의 doping이 diffusion을 이용하느냐 ion implant를 이용하느냐에 따라 공정과정의 순서가 달라질 수 있으나 근본적인 공정은 마찬가지로 되겠다. 표 5에서는 현재 많이 사용하고 있는 제조공정의 각 단계별 yield와 공정비를 3" wafer를 사용하여 0.5 watt를 얻을 때를 기준으로 실어 놓았으며, 표 6에는 연구가 진행되어 좀더 발전된 공정을 자동화 하였을 때 3" wafer를 사용하여 0.72 watt를 얻을 수 있으며 공정비도 현재의 standard process에 비하여 1/3로 저하시킬 수 있음을 보여준다. 현재 실험실에서 얻어지고 있는 silicon solar cell이 18% 정도의 효율을 주는데 이러한 고효율 cell 제작에는^[10] 0.2μm 이하의 얇은 접합(junction)을 만들어 태양광선중 단파의 기여도 가능하게 하여야 하며(violet cell), -) AR coating이나 표면의 texturizing에 의하여 표면에서 반사되는 것을 5% 이하로 내려야 하며(black cell), =) diffused back contact에 의하여 open circuit voltage(V_{oc})를 높여야 하며

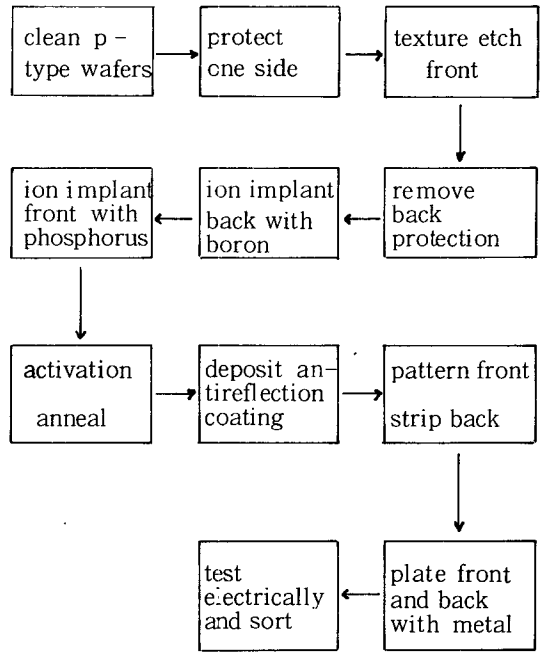


그림 1. 대량 생산을 위한 태양전지 제조 과정^[2]

표 5. Standard process을 사용한 0.5 watt 태양전지(3" wafer) 공정비^[10]

Step	Yield (%)	Process	Cost	
			\$	%
1	99.0	cleaning	0.038	2.0
2	95.0	spin-on source	0.056	3.0
3	99.0	200 °C bake	0.028	1.5
4	99.0	P-diffusion	0.079	4.2
5	99.5	glass removal	0.055	2.9
6	95.0	rim etch	0.078	4.1
7	100.0	post diffusion inspection	0.008	0.4
8	98.0	front metal	0.375	19.9
9	98.0	back metal	0.371	19.7
10	99.0	AR coating	0.359	19.0
11	80.0	test	0.039	2.0
12	96.0	array fab.	0.397	21.0
	63.6	Totals	1.885	100.0

표 6. Advanced process를 이용한 0.72 watt 태양전지(3" wafer) 공정비^[10]

Step	Yield (%)	Process	Cost	
			\$	%
1	99.0	wafer cleaning	0.025	5.0
2	99.0	ion implant - front	0.048	9.6
3	99.0	ion implant - back	0.048	9.6
4	98.0	diffusion	0.024	4.8
5	100.0	post diffusion inspection	0.006	1.2
6	98.0	front metal - auto	0.027	5.4
7	98.0	back metal - auto	0.025	5.0
8	95.0	AR coating: spin - on	0.071	14.2
9	80.0	test	0.027	5.4
10	96.0	array fab.	0.200	39.9
	66.6	Totals	0.501	100.0

(BSF, P⁺ cell), ㄷ) 적은 접촉 저항을 가진 금속 electrode를 개발하고 전면의 grid 면적을 줄여야 한다.

1) Violet 또는 Hybrid cell 제조^[11]

Shallow junction (0.1 - 0.15 μm)을 만드는데 주안점이 있다. N⁺를 만들기 위하여 phosphorus pentoxide를 diffusion source로 사용하여 저온(800-900°C)에서 짧은 시간동안 확산시키는 것이 보통이다. 이 cell의 contact pattern은 grid 폭이 좁고 density가 높아야 하는데 사진 식각을 이용하면 공정비가 높아지므로 metal mask를 밀착하여 금속을 evaporating 하는 screen 증착 방법을 사용한다. 예를들면 0.075 mm 두께의 stainless steel을 이용하여 grid 폭을 0.15 mm까지 얻을 수 있는데 1 cm에 8-12 개의 grid를 넣어 cell 면에 떨어지는 태양광의 약 90%를 이용케 한다. 효율이 높고 안정된 cell을 만드는데는 대부분 Ti/Pd/Ag의 삼층 금속전극을 사용하지만 가능하면 Ti/Ag와 같은 이중 금속전극 개발이 필요하다. (현재 Ti/Ag 전극은 시간에 따라 degrade 됨) 그 이유는 표 5와 6

에서 볼 수 있는데 전극을 붙이는데 전체 공정비의 40%를 차지하기 때문이다.

AR coating은 TiO_x, Ta₂O₅ 등을 증착 또는 spin-on source를 이용하여 적당한 두께로 입히는 것인데 이렇게 하여 short circuit current (I_{sc})를 40% 이상 개선할 수 있어 결과적으로 4-5%의 효율을 증가시킨다.

2) BSF cell 제조^[11]

Spectrolab에 의하여 개발된 BSF (back surface field) cell은 P substrate의 뒷면에 boron이나 aluminum을 얇게 확산시켜 P⁺를 만들면 N⁺ PP⁺ 형태의 cell이 되는데 N⁺ P cell에 비하여 Voc가 8-9%, I_{sc}가 15-20%, fill factor (FF)가 5% 정도 개선된다. N⁺ PP⁺ cell을 만드는 공정에서는 N⁺ P junction과 PP⁺ junction의 깊이를 같이 조정하여야 하므로 더 복잡하여 지지만 전체 전력에서 얻는 이득이 N⁺ P cell에 비하여 30-40% 증가되므로 앞으로는 대부분 N⁺ PP⁺ cell을 만들게 될 것이다.

3) Nonreflecting (무반사) 제조^[11]

1974년 Comsat Corp. 이 "nonreflecting" 또는 "black" cell이라 불리는 태양전지의 개발을 발표하였다. AR coating이나 black etch를 적절히 하여 반사에 의하여 잃은 에너지를 전체 유용한 태양에너지의 4% 정도로 감소시켜 I_{sc}를 30-40% 개선시켜 약 5% 정도의 효율을 증가시키는 결과를 준다. Black etch는 표면을 sodium 또는 potassium hydroxide의 silicon 결정의 (111) 방향과 (100) 방향의 etching속도가 다른 것을 이용하는 것이다. (111) wafer를 etching 한 후에는 면이 texturized되어 거의 빛의 반사를 없애주기 때문에 black etch만으로 I_{sc}를 4-6% 개선시킬 수 있다. 소자 제조에 관하여는 공정비를 감소시키는 것도 중요하겠지만 그보다는 좀 어려운 공정이 되더라도 효율을 올리는 것이 더욱 전체적인 생산가를 줄이는데 기

여하기 때문에 제조공정 개발의 주안점은 효율을 높이는데 있다고 하겠다.

BSF cell은 보통 14-15%의 효율을 가진다. 그러나 BSF cell을 P doping concentration을 증가시키고, P⁺ 층의 두께를 줄이고, P층의 두께를 100 μ m 정도로 하고, 비저항을 0.3 $\Omega \cdot cm$ 로 하며, AR coating을 개선하며, N⁺ 층에서의 carrier life time을 증가시켜 약 20%의 효율을 얻는 것이 가능하게 될 것이다. 이상 cell 제조 공정에 관한 것은 silicon을 사용한 homojunction cell에 관하여 자세히 언급하였으나 이외에도 P⁺NN⁺Si junction cell,^[12] silicon MIS cell,^[4,13] ITO/Si^[3], SnO₂/Si hetero-junction cell,^[14,15] GaAs와 CdS hetero-junction cell^[1,2,3] 제조 공정도 중요하다.

5. Concentration and Tracking^[1,2]

Solar concentration의 목적은 저렴한 optical system의 설치로 태양광의 세기를 높여 고가인 태양 전지의 면적을 줄여 보자는 것이다. 1982년 까지 미국 DOE (Department of Energy)의 목표는 집광없이 \$ 2.80/W를 달성하는 것인데 현재 차질없이 진행되고 있으며 1982년 경에는 10 MW/year의 생산 판매가 가능하다고 판단하고 있다. 집광에 적절한 태양전지는 Si cell, GaAs cell 그리고 소위 multi-bandgap cell들이다. 그러나 100 Sun 이상의 집광시에 높은 효율을 유지할 수 있는 것은 특수한 공정을 거친 것이어야 한다.

전통적인 Si 태양전지는 10-20 Sun 이상에서 효율이 떨어져 사용할 수 없게 된다. 그러나 특별히 만들어진 solar cell을 1000 Sun까지도 14%의 효율을 나타낸다. 이러한 cell을 만들려면 기판의 비저항이 낮은 것을 사용하여 고온에서의 전압 강하를 최소화하여야 하며, N⁺PP⁺ cell의 N⁺나 P⁺의 전자 및 전공의 밀도를 극

도로 높여 ohmic contact를 좋게하여 전압강하를 줄이고, grid 사이의 간격을 되도록 줄여 cell 내에서의 전류 증가를 충분히 뽑아낼 수 있도록 하여야 한다. Microwave Associates Inc.에서는 600 Sun에서 20%의 효율을 유지시킨 기록을 남겼으며, 20-250 Sun에서 14-18%의 효율을 유지시키는 것은 어렵지 않다고 보고되어 있다.

GaAs cell에 관해서는 Si cell에 비하여 고집광시에 문제는 적어지는데 대개 효율의 온도 특성은 $-0.25\%/^{\circ}C$ ^[2]이며 GaAs와 GaAlAs의 hetero-junction은 특히 온도 특성이 좋은 것으로 알려져 있다. 현재 1cm²에 1000 Sun이 떨어질때 22% 효율을 유지하여 20 watts 이상의 전력을 얻는다. multi-bandgap cell은 GaAs cell과 Si cell을 결합시킨 것으로 태양광의 장파와 단파를 모두 이용하는 방법으로 Varian에서 개발하였다. Dichroic filter를 이용하여 165 Sun를 high energy와 low energy 광선으로 분리하여 low energy 광선을 16% 효율을 가지는 Si cell에 high energy 광선을 20% 효율을 가지는 GaAlAs cell에 떨어뜨려 전체 cell의 효율을 31.4%로 개선할 수 있었다. Varian은 현재 500 Sun을 넣어 35% 효율을 얻는 것을 목표로 연구중이다. 다른 multiband gap cell은 Research Triangle Institute에서 low energy를 통과하고 high energy만 흡수하는 cell을 위에 두고 low energy를 흡수하는 cell은 아래에 두어 dichroic filter를 사용할 필요가 없으며 25%의 효율을 주는 cell 개발에 성공하였으며 목표는 역시 35% 효율을 얻는데 있다.

집광에는 optical system으로 렌즈도 사용되지만 거울의 사용도 가능하다. Parabolic-trough concentrator와 Fresnel lens가 가장 유명한 것으로 나타나 있는데 parabolic-trough concentrator는 Spectrolab에서 uniaxial Sun

tracking 하여 10 KW 용을 만들었으며 Martin - Marietta Corp. 에서는 272 개의 Si cell 각각에 40 Sun 을 집광하여 3.3 KW를 낼 수 있는 acrylic Fresnel lens 의 개발에 성공하였다. 이 system 은 biaxial Sun tracking 으로 설계되었다. 이 외에도 DOE의 계획에는 General Electric Co. 에서 \$ 3.4M으로 110 KW parabolic - trough system 을, Arizona Public Service Co. 에서 \$ 6.5M으로 283 KW lens system 을, E - systems Inc. 에서 \$ 0.65M으로 27 KW Fresnel - lens system 을, BDM Corp. 에서 \$ 1.1 M으로 42 KW reflective -trough system 등의 개발이 포함되어 있다.

6. Array and application ^[1,2]

Array 제작은 집광하느냐, 하지 않느냐에 따라 달라진다. Array 를 만드는 재료는 aluminum, plexiglass, fiberglass, glass 등을 쓰며, array supporting frame 으로는 steel 이나 aluminum 을 쓰게 된다. 이들 물질은 습기, 공기오염, 새의 분비물, 바람, 소금기, 구름, 안개, 비, 눈에 강해야 하며 어느 정도의 충격에도 견디어야 한다. 특히 cell 을 덮는 판은 빛을 통과하여야 하는데 plexiglass 인 경우 약 5%, silicon rubber 나 soda - lime glass 인 경우 약 6 - 10 %의 태양광을 차단시킨다. 값비싼 optical glass 은 장파의 태양광선을 거의 100% 통과시켜 준다. 따라서 몇%의 loss 가 있더라도 값싼 glass 의 개발이 기대되는데 Corning 에서는 이 목적에 맞는 borosilica glass 를 개발중이다. 그 외에도 acrylic, FEP teflon, Saran, Tedlar 와 Mylar 도 쓰여지고 있다. LSSA project 목표는 array 최소 수명이 20년이며 제작 원가가 \$ 0.1/W로 설정되어 있다. cell 의 배치나 연결에 관한 문제로는 되도록 series resistance 를 줄이고 packing density 를 높여야 한다는 것이다. 집광시의

array 제작은 재료 뿐만 아니라 어떤 형태로 만드느냐가 문제가 되는데 lens 로 집광하느냐, 거울로 집광하느냐에 따라 다르며, Sun tracking 을 어떻게 하며, heat rejection 은 어떻게 해야 하는가 하는 것도 중요한 연구과제가 된다.^[2]

태양전지 system 에서는 array로부터 voltage regulator(interface circuit)를 거쳐 나온 전력을 밤이나 날씨가 좋지 않을 때를 위하여 조건이 좋을때 사용하고 남은 전력을 저장하는 것이 필수적인데 이러한 저장시설의 필요성은 태양전지 이용의 큰 약점이기도 하다. 현재 많이 사용하고 있는 것^[1,2] 으로는 lead - acid 와 nickel - cadmium 전지가 쓰여지고 있으나 값이 비싸고 방전이 빠르며 유지가 힘들고 비교적 수명이 짧아 DOE에서는 lead - acid 전지, reduction - oxidation (redox) 전지, Zinc - bromine 전지 등의 개선이 요구되는 것으로 판단하고 1979년 \$ 2.1M을 투자하고 있으며, \$ 5M을 1980년에 쓸 예정이다. 화학적인 저장 이외에도 진공중에서 고속으로 flywheel를 돌려 관성(inertia)의 형태로 energy 를 저장하는 시도가 MIT의 Lincoln Lab.에서 진행중이다. 이 방법은 낮에 7,500 - 15,000 회전을 할수 있게 하면 밤에 deceleration 되는 과정에서 AC 전력을 뽑아 낸다는 것이다. 이 system 은 전지보다 생산가가 저렴하고 효율이 좋으며 20년 동안 거의 유지비가 들지 않아 경제성이 있는 것으로 판단하고 개발중이다. 기후조건에 영향을 받지 않는 태양 에너지 이용을 위하여 DOE에서는 3개년에 걸쳐 \$ 20M을 투자하는 SPS (Solar Power Satellite) 계획으로 25 - 30개의 인공위성을 띄울 예정인데 각 위성은 Si cell 이나 GaAs cell 을 싣고 올라가 전력을 생산하여 microwave 형태로 지상으로 송전한다는 것이다.

태양전지의 응용은 현재 생산가가 \$(10 - 15) /W로 높긴하지만 신뢰도가 높고 유지비가 거

의 들지 않는다는 장점을 감안하여 인공위성, 산정의 microwave repeater, 철로의 신호등, 등대의 전력공급용으로 쓰이며 전자시계나 계산기의 전원으로도 쓰인다. 생산가가 $\$10/W$ 이하로 떨어지면 1-5 KW용 전원이 많이 만들어져 벽촌에 전력을 공급하여 양수기, 군용장비, 원거리 통신장비의 전원으로 적합하게 될 것이다. 1980년대 중반으로 예상되는데 생산가가 $\$1/W$ 이하로 되면 비로소 가정용 공장용 전원으로 쓰이게 될 것이며 날씨가 밤낮의 제한없이 전력공급을 위하여 거대한 GW급 발전용 위성이 올려지고 microwave의 형태로 전력을 지상으로 보내 줄 것이다. 기술개발에 여러 가지 문제점이 있지만 현재의 석유로 일어나는 정치적 경제적 문제 특히 비합리적인 유가인상의 결과는 위에 언급한 태양전지 개발 및 응용 계획보다 앞당겨질 가능성도 보인다.

7. 결 론

지금까지 미국의 에너지 개발계획의 하나인 LSSA Project (1976 - 1986)를 중심으로 어떻게 하면 전력 생산가를 1976년 석유를 사용하여 발전할때의 생산가인 $\$0.5/W$ 로 내릴 수 있느냐에 관한 계획, 진전, 현황 및 전망에 관하여 알아보았다. 한마디로 요약해서 두가지 방안이 있는데 첫째는 silicon 재료의 생산가를 내리는 일이고, 둘째는 태양전지 제조기술을 개발하여 효율을 올리는 일이다. 그외에 보조 방안으로 태양광의 집광장치, array 제조 및 전력 저장수단의 개발을 들 수 있다. Silicon의 생산가를 내리는 단계는 silicon 화합물에서 MG-Si을 만드는 단계, MG-Si을 순도가 높은 solar grade polysilicon으로 뽑아내는 단계, 이 polysilicon으로 ingot를 길러 wafer로 가공하거나, 직접 cell을 만들 수 있는 ribbon/sheet의 형태로 결정화하는 단계로 구분할 수 있다. 단결정 형태

가 아닌 polysilicon이나 amorphous 형태로 cell을 만드는 것은 재료 문제이기 보다는 cell 제조의 기술적 문제로 아직은 연구과제이다. 태양전지의 제조기술 개발은 효율을 높이는 문제와 효율을 10-13%로 묶어두고 제조 공정비를 감소시킨다는 문제인데 대량생산 체제를 갖추면 후자는 해결될 것이고 전자는 BSF cell, violet cell, black cell 또는 이들의 복합형태를 가지는 cell을 만들어 효율을 15% 이상으로 개선하는 것이 충분히 가능하다고 판단된다.

재료나 공정개발에서 silicon 태양전지의 가격을 떨어 뜨리려는 LSSA 프로젝트는 비교적 순조롭게 진행되어 목표 달성의 전망이 밝으며 태양전지에 의한 전력 생산가를 날로 가격이 치솟는 석유에 의한 그것과 맞먹는 것을 목표로 삼았다는 경제적인 면에서 볼 때 목표 년도가 당겨질 가능성도 크다. 미국과 같이 수십억불씩 태양전지 개발에 투자할 수는 없지만 미국의 연구 결과가 현실점에서 태양전지 개발의 방향을 제시해 주고 있기 때문에 우리도 전망이 밝은 부문에 투자하는 것이 바람직하다고 판단된다. 예컨대, 3-4개년 계획을 세워 일차로 투입하면 1980년대 중반에는 양산을 할 수 있는 기반을 마련할 수 있어 석유 수출국의 횡포를 덜 겪을 것이고 수출에도 크게 기여할 것이다. 현재 우리나라의 생산공장은 기술도입으로 시설하고 대부분의 부품도 수입하여 완제품을 생산하고 있다. 이런 생산방식에서 생기는 문제점으로는 기술도입에 의존도가 높아 수출 경쟁력이 약화되고 도입된 기술보다 더 나은 기술이 필연적으로 생기게 되는데, 이런 경우 기술도입에 추가하여 또 다른 생산시설을 마련해야 한다는 것을 들 수 있다. 정부나 기업들이 이점을 잘 인식하여 기술개발을 중요시하고 있는 이때에 태양전지는 기술개발을 합리적인 생산에 연결시켜 유리한 수출조건을 줄 수 있는 대상품목의 하나가 될 수

있을 것이다.

태양전지 개발에 일차적으로 포함해야 할 과제로는 :

- 1) MG-Si 으로 고순도 polysilicon 제조
- 2) 고순도 polysilicon 으로 ingot 성장
- 3) Ingot wafering
- 4) 고순도 polysilicon 으로 ribbon 성장
- 5) N^+PP^+ standard cell 제조
- 6) N^+PP^+ advanced cell 대량 생산
- 7) 15% 이상의 고효율 cell 제조
- 8) 100 - 1000 Sun 을 얻을 수 있는 집광 장치
- 9) Array 재료 및 전력 저장 수단 개발이 되겠다.

계획이 만들어지기 전에 전문가에 의하여 지금까지 외국에서 이루어진 성과를 면밀히 검토한 후 위의 과제당 가장 전망이 좋은 방법을 선정하여 집중적으로 투자하면 효과적일 것이다.

参 考 文 献

1. David L. Pulfrey, "Photovoltaic power Generation", Van Nostrand Reinhold Company, 1978.
2. John Javetski, "A Burst of Energy in Photovoltaics Special Report", Electronics / July 19, 1979.
3. E. Bucher, "Solar Cell Materials and Their Basic Parameters", Appl. Phys. 17, 1 - 25 (1978).
4. R. B. Godfrey and M. A. Green, "655mV Open-Circuit Voltage, 17.6% Efficient Silicon MIS Solar Cells", Appl. Phys. Lett. 34 (11), pp. 790-793, June 1979.
5. D.E. Carlson, C. W. Magee and A. R. Triano, "The Effect of Hydrogen Content on the Photovoltaic Properties of Amor-

- phous Silicon", J. Electrochem. Soc. : Solid-State Science and Tech. Vol. 126, No. 4, pp. 688 - 691, 1979.
6. Malcolm J. Finlayson, 2nd Annual SEMI Information Services Seminar Transcripts, pp. 111 - 127, 1979.
7. John A. Zoutenkyk, "An Overview and Device Technology for Photovoltaic Solar Energy Conversion", Electrochem. Soc., Proc. of 3rd Int'l Symp. On Silicon Materials Science and Technology, Vol. 77-2, pp. 796 - 801, 1977.
8. Lee P Hunt, "Low-Cost, Low-Energy Processes for Producing Silicon", Electrochem. Soc., Proc. of 3rd Int'l Symp. on Silicon Materials Science and Technology, Vol. 77-2, pp. 803-819, 1977.
9. K. V. Ravi and F.V. Wald, "Solar cell Material Preparation Techniques - A Review", Electrochem. Soc. Proc. of 3rd Int'l Symposium on Silicon Materials Science and Technology, Vol. 77-2, pp. 820 - 835, 1977.
10. R. V. D'Aiello, "Current Trends in Silicon Cell Technology", Electrochem. Soc., Proc. of 3rd Int'l Symp. on Silicon Materials Science and Technology, Vol. 77-2, pp. 836 - 849, 1977.
11. John A. Scott - Monck, "Advanced Silicon Solar Cell Production Technology", J. Energy, Vol. 2, No. 3, May - June 1978.
12. M. S. Bae and R. V. D'Aiello, "P⁺N High-Efficiency Silicon Solar Cells", Appl. Physics Letters, Vol. 31, No. 4, 1977.
13. David L. Pulfrey, "MIS Solar Cells : A Review", IEEE Trans. on Electron Devices,

- Vol. ED - 25, No. 11, pp. 1308 - 1317, 1978.
14. Stephen Franz, Gordon Kent and Richard L. Anderson, "Heterojunction Solar Cell of SnO_2/Si ", J. Electronics Materials, Vol. 6, No. 2, pp. 107 - 123, 1977.
15. Amal K. Ghosh, Charles Fishman, and Tom Feng, "Theoretical Efficiency of SnO_2/Si Solar Cells", J. Appl. Phys. 50(5), pp. 3454 - 3458, May 1979.

