

非晶質 실리콘 태양電池



Amorphous Silicon Solar Cells

宋 鎮 洙

韓國動力資源研究所 太陽光研究室長, 工學博士

1. 序 論

1838年 E. Becquerel이 電解質 溶液中의 電極이 太陽光을 받으면 電氣가 發生한다는 光起電力 效果(Photovoltaic Effect)를 發見한 이후 1954年 RCA 그룹에서 최초로 pn接合에 의한 單結晶 실리콘(Single Crystal Silicon; C-Si) 太陽電池를 製造하였고, 1956년에 燈臺 및 通信中繼所, 1958년에는 人工衛星 Vanguard I 에 장착하여 사용함에 따라 太陽電池에 대한 관심이 高潮되기 始作하였다.

그후 1970년대 油類波動에 따라 化石燃料를 代替할 수 있는 에너지 開發의 필요성이 높아지고 또한 半導體製造分野 등의 획기적인 研究 및 技術開發에 힘입어 1987年 現在 結晶質 실리콘(單結晶 또는 多結晶) 太陽電池의 價格은 \$ 5 ~ 6 /Wp 수준까지 낮아져 落鳥, 산간벽지 등 送電設備의 설치가 곤란한 지역의 電源裝置에 實用化되고 있다.

그러나 結晶質 실리콘 太陽電池는 基板의 두께와 제조공정상의 制約때문에 약 \$ 3 Wp의 價

格限界値를 가지므로, 太陽電池를 實用化하기 위해서는 商用電源의 電氣料과 경쟁 가능한 低價·高效率의 薄膜型 太陽電池가 開發되어야 한다.

非晶質 실리콘(Amorphous Silicon, a-Si) 太陽電池는 이러한 薄膜型 太陽電池의 대표적인 예로서, 1969年 Chittick 등의 水素化 非晶質 실리콘(a-Si:H)에 관한 研究, 1975年 Spear의 非晶質 실리콘의 Pn接合形成 技術開發과 1976年 Carlson에 의해 최초의 非晶質 실리콘 太陽電池가 발표된 이후 美國, 日本을 中心으로 이에 관한 집중적인 研究開發이 推進되어 1980年 부터는 전자계산기, 전자시계 등의 電源用 太陽電池가 商品化 단계에 이르렀다.

이 글에서는 最近 각광받고 있는 非晶質 실리콘 太陽電池의 構造와 特性, 研究開發動向 및 앞으로의 市場展望에 관하여 記述하고자 한다.

2. 非晶質 실리콘 太陽電池의 構造와 特性

가. 非晶質 실리콘의 特性

a-Si膜은 그림 1¹⁾에서 보는 바와 같이 單結晶 실리콘과는 原子結合狀態, Energy Band Model이 다르다. 그림 1-b와 같이 水素를 含有하지 않은 非晶質 실리콘에는 未結合手(Dangling Bond)가 存在하고, 禁止帶中에는 約 10^{20} 個/cm³·eV의 局在準位가 存在하게 된다.

반면에, Glow 放電法 등으로 製作한 a-Si:H 膜中에는 10~30% 程度의 水素가 포함되어 있어 그림 1-c와 같이 未結合手를 채워주게 되고, 結果的으로는 局在準位를 $10^{15} \sim 10^{17}$ 個/cm³·eV 까지 減少시켜 주게 된다. 이와 같이 局在準位의 減少에 의해 a-Si:H의 경우에는 a-Si와 달리 價電子 制御가 可能해진다.*

위에서 說明한 바와 같이 a-Si:H는 原子配列에 長距離의 規則性(Long Range Order)이 없기 때문에 結晶質 실리콘과는 달리 物性值도 一定한 값이 없어 結晶質 실리콘에 없는 새로운 性質을 갖게 된다. 표 1에서 보는 바와 같이 a-

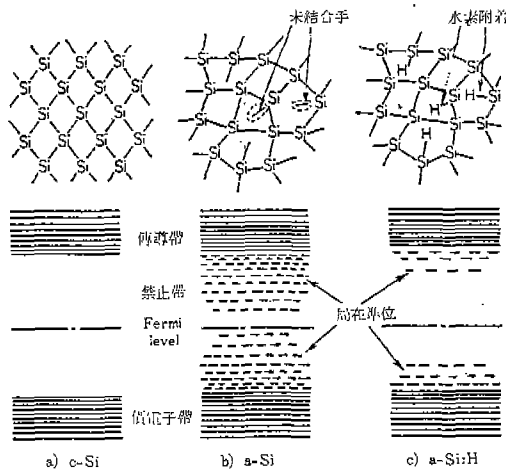
Si:H는 結晶質 실리콘에 비해 局在準位가 많기 때문에 Carrier의 移動度나 壽命은 작으나 可視光領域에서 光吸收係數가 크므로 薄膜에서도 충분히 光을 吸收할 수가 있다.

또 光學的 Band Gap(E_{opt}) 이 結晶質 실리콘의 경우보다 큰 1.7eV 程度로서 太陽光 스펙트럼 最大值에 가까운 點 등이 a-Si:H가 새로운 太陽電池 材料로 각광을 받는 主要因이다.

a-Si의 傳導를 制御하기 위해서는 III, V 族의 原子를 4 族의 실리콘과 置換(Substitutional Doping) 시켜야 한다. 이를 위해서는 SiH₄ 가스 注入時 B₂H₆이나 PH₃를 混入하여 Glow 放電으로 分解, 置換시킴으로써 p와 n型 傳導性膜을 얻을 수 있으며 상당히 넓은 범위에서 a-Si:H의 傳導率을 制御할 수가 있다²⁾.

나. 太陽電池의 構造와 特性

a-Si 太陽電池의 構造는 Schottky型, MIS (Metal-Insulator-Semiconductor)型, pin型 등이 研究되어 왔는데 現在는 變換效率이 우수한 pin型, nip型에 대하여 研究가 集中되고 있



註)* 非晶質太陽電池는 a-Si:H를 利用한 것이지만 通常 이를 a-Si로 부르고 있다.

〈그림 1〉 c-Si와 a-Si:H의 原子結合狀態 및 Energy Band Model

〈표 1〉 非晶質 실리콘과 結晶質 실리콘의 物性比較

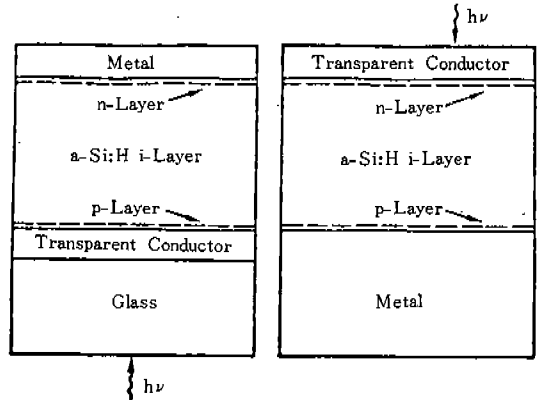
物 性 (300°K)	a-Si	c-Si	
局在準位密度 N_s (cm ⁻³ ·eV ⁻¹)	$10^{16} \sim 10^{17}$	$\sim 10^{12}$	
電子移動度 μ_e (cm ² V ⁻¹ sec ⁻¹)	$0.8 \sim 10^{-2}$	1,500	
正孔移動度 μ_p (cm ² V ⁻¹ sec ⁻¹)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	500	
正孔擴散長 L_p (μ m)	0.2~1	200	
電子壽命時間 τ_e (sec)	$\sim 10^{-5}$	2.5×10^{-3}	
正孔壽命時間 τ_p (sec)	$\sim 10^{-5}$	2.5×10^{-3}	
暗傳導率 (p-n層) σ_a (Ω^{-1} cm ⁻¹)	$1 \sim 10^*$	$10^3 \sim 10^4$	*: μ c
暗傳導率 (i層) σ_d (Ω^{-1} cm ⁻¹)	$10^{-8} \sim 10^{-11}$	4×10^{-8}	
光傳導率 σ_{ph} (Ω^{-1} cm ⁻¹)	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$\sim 10^9$	AM-100 mW/cm ²
光學 bandgap E_{opt} (eV)	1.5~1.8	1.1	
光吸收係數 α (cm ⁻¹)	$1.5 \sim 3 \times 10^4$	5×10^3	$h\nu = 2eV$

다.)

그림 2에서 보는 바와 같이 Glass/TCO(Transparent Conductive Oxide)를 基板으로 사용할 경우에는 光入射側에 p층을 먼저 製作하는 pin型이 되고, Stainless Steel과 같이 不透明材質을 使用하는 경우에는 p, i층 다음에 n층 그 위에 透明電導膜을 입혀 n층이 光入射側에 位置하게 되는 nip型으로 된다.

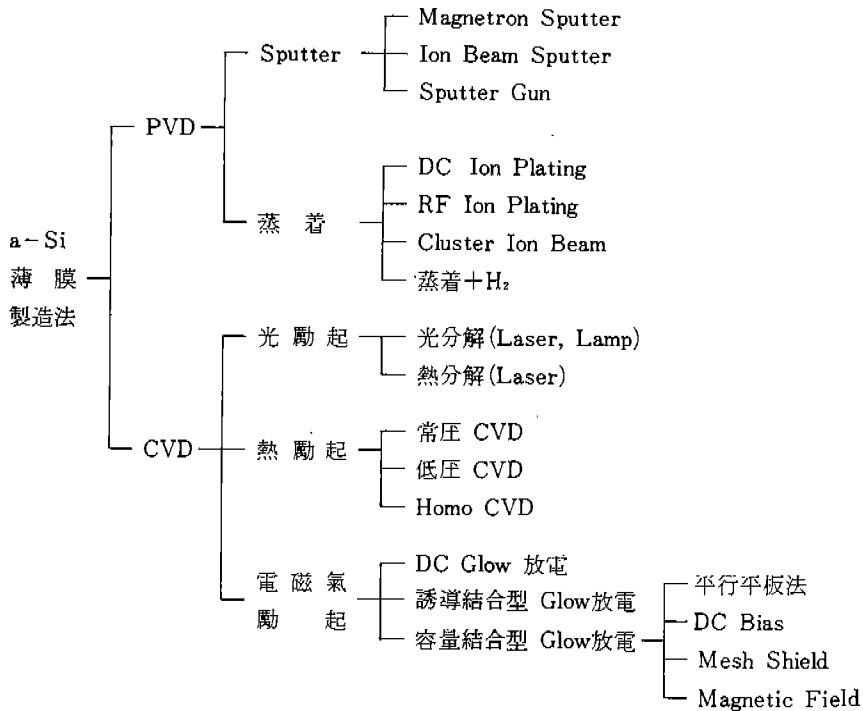
한편 最近에는 太陽光 스펙트럼의 보다 효율적인 이용측면에서 a-Si보다 Eopt이 큰 Wide Band Gap 材料, Eopt 이 작은 Narrow Band Gap 材料를 동시에 使用한 多重接合(Multijunction) 構造를 採擇한 高效率의 a-Si 太陽電池가 研究되고 있고 또한 集積型(Integrated) 構造를 利用한 大面積太陽電池도 集中的인 研究對象이 되고 있다.

非晶質 실리콘 薄膜의 製造法은 그림 3에 나타낸 바와 같이 SiH₄ 가스를 熱, 光 또는 플라



(a) Substrate p-i-n (b) Substrate n-i-p

〈그림 2〉 p-i-n과 n-i-p 구조



〈그림 3〉 a-Si 薄膜 製造法의 分類

즈마로 分解하여 膜을 形成하는 C. V. D. (Chemical Vapor Deposition) 法과 多結晶 실리콘을 原材料로 사용하는 P. V. D. (Physical Vapor Deposition) 法으로 大別할 수 있다.

現在는 蒸着法이나 Sputter 法 등으로 代表되는 PVD 法 보다는 CVD 法中에서 Glow 放電法이 가장 널리 使用되고 있으며 最近에는 光 CV D 裝置를 利用한 a-Si 薄膜製造技術이 주목받고 있다.

單結晶 실리콘과 比較할 때 a-Si 太陽電池가 製造面에서 低價 太陽電池로 기대되는 理由는 첫째 a-Si은 結晶質 실리콘에 비해 光吸收係數가 크기 때문에 두께 1 μm 内外의 薄膜化(結晶質 실리콘 경우는 約 200 μm)가 가능하고 또 結晶質 실리콘 Wafer 製造時 發生하는 材料損失이 없기 때문에 材料의 所要量이 극히 적다.

둘째 일반적으로 Glow 放電法으로 製作하는 a-Si에서는 原料 氣의 적절한 配合만으로 P 型 a-Si (SiH₄ 氣中에 B₂H₆ 첨가), n 型 a-Si (SiH₄ 氣中에 PH₃ 첨가)를 얻을 수 있는 등 製造 工程이 單純하다.

셋째 Glow 放電法에서 原料 氣의 分解에 要求되는 放電電力은 電極이 10cm² 程度의 面積일 때 數 W 程度이고 또 基板溫度도 250~300 °C로서 結晶質 실리콘 製造에 要求되는 溫度 1,412°C(실리콘의 熔融點)와 比較할 때 所要電力이 매우 적다.

넷째 a-Si는 基板의 種類에 상관없이 300°C 까지의 溫度에 견디는 것이면 어떤 材料든 선택할 수 있다는 것이다.⁴⁾

3. 研究開發 動向

10余年의 歷史를 가진 非晶質 실리콘 太陽電池는 그간 괄목할만한 成長을 거듭하고 있다. 大面積化, 低價化, 高效率化의 目標下에 雙頭馬車格인 日本과 美國의 競爭으로 研究開發이 急

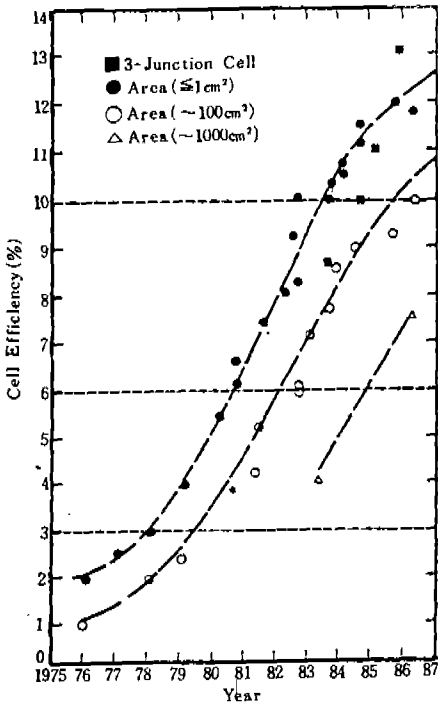
速으로 進行되고 있다(표 2 참조).

그림 4에서 보는 바와 같이 現在까지 面積 1 cm²에서 13%, 100cm²에서 9.7% 그리고 1,000 cm²의 大面積電池에서는 約 8%의 變換效率를 얻고 있다. 그리고 小面積에서 10% 이상의 效率를 달성한 민간기업 및 기관은 1988年 現在 22個에 이르고 있다.¹⁶⁾ 그러나 現在 效率는 아직 理論效率 18%와는 거리가 있고, 게다가 電池面積 增加에 따른 效率低下, 初期劣化 現象, 느린 膜成長速度等 技術上의 障壁이 남아 있기 때문에 이들 問題點 解決과 함께 基板으로 使用할 수 있는 低價의 透明電導膜 製造技術開發에 研究의 焦點을 맞추고 있다.^{5, 6, 7)}

日本은 工業技術院 Sun-Shine 計劃推進本部를 頂點으로 하여 基礎研究는 大學 및 電子技術研究所, 그리고 實用化研究에 대해서는 NEDO(新에너지 總合開發機構)를 中心으로 民間企業의 技術을 活用, 보다 빠른 研究成果를 얻기 위

〈표 2〉 非晶質 硅素 太陽電池 開發 歷史

年度	內 容	研究者(機關)
1975	a-Si 價電子制御	Spear
1976	最初 a-Si 太陽電池	Carlson
1977	光劣化 現象	Staebler & Wronski
1978	多重接合 a-Si 太陽電池	Hamakawa
1979	集積型 a-Si 太陽電池	Kuwano
1980	連屬分離反應裝置, a-Si 太陽電池 大量生産	Kuwano Sanyo, Fuji
1981	p型 a-SiC, 1kW 發電 시스템	Hamakawa Sanyo
1982	效率 10%, 1 cm ²	Catalano
1984	光CVD 製作 a-Si 太陽電池 發電用 관널 상업화	Konagi Sanyo
1985	效率 13%, 1 cm ²	ECD
1986	效率 10%, 100 cm ² 效率 8%, 1000 cm ² , 100KW 發電 시스템	Sanyo NEDO, Sloarex Alabama power



〈그림 4〉 a-Si Cell의 效率, 推移

해 委託研究을 하고 있는데 1988년까지 표 3 과 같은 研究內容과 目標을 세워 놓고 있다.⁹⁾

美國의 경우는 DOE(에너지省)/SERI(太陽 에너지 研究所) 또는 순수 民間次元의 研究等 日本 보다는 좀 더 多樣한 研究體制를 갖고 있다. 現在 1987년부터 1991년까지의 五箇年計劃으로 樹立된 美國의 研究開發目標은 표 4 와 같다.⁹⁾

4. 市場展望

가. 生産現況

1980年 日本에서 携帶用 計算器等の 電源용으로 商業化가 시작된 이래 非晶質 실리콘 太陽電池의 生産量은 每年 빠른 속도로 增加하고 있다^{10, 11)} (표 5 참조).

1987年의 경우 全世界 太陽電池 總生産量 29.1 MW 중 41%인 11.9MW가 非晶質 실리콘 太陽電池로서 12.4MW의 單結晶 실리콘의 뒤를 따

〈표 3〉 日本의 研究開發目標(1988年)

	開發項目	目 標	現在 達成狀況
高 效 率 化	(1) 高品質製造技術	• 高效率太陽電池開發로서 3層 Tandem構造 cell 開發 • 構成材料, 製法, 構造 最適化로 100cm ² cell 實效 效率平均 值 10% 以上	效率 9.15%
	(2) 大面積製造技術	• 大面積 cell 問題點 把握 1,200cm ² cell 實效效率平均値 9% 以上	效率 8.1%
低 價 化	(3) 高能率製造技術	• 變換效率·信賴性 損傷없는 效率的인 製造로 cost down 15Å/sec, 100cm ² cell 實效效率平均値 8% 以上	效率 6%
	(4) 低價透明導電膜 製造技術	• 光透過性 좋고, 電力 loss 적은 透明導電膜의 開發 光透過率 85% 以上 sheet抵抗 5 Ω/□ 以下 低價化 100円/100cm ² 以下	光透過率 85% sheet抵抗 5 Ω/□
高 信 賴 化	(5) 高信賴性技術開發	• 光照射下에서 性能劣化없는 cell 製造 初期實效效率平均値 10% 以上 劣化率, 初期實效效率 10%/年 以下 cell面積 1cm ²	效率 10.4% 劣化率 15%/10H

〈표 4〉 美國의 a-Si 研究開發 計劃

	1987	1988	1989	1990	1991
	FY 87	FY 88	FY 89	FY 90	FY 91
Single Cell	△ Assess stability issues	△ 12% 1cm ²	△ Understand device stability	△ 14% 1cm ² 10% 1000cm ²	▲ Assess R&D direction
Tandem	△ Assess stability issues	△ 14% 1cm ²	△ Understand device stability	△ 18% 1cm ² 13% 1000cm ²	▲ Assess R&D direction

△ : Program Milestone
▲ : Program Decision Points

〈표 5〉 年度別 a-Si 太陽電池 生産現況

年度	나라				計
	日本	美國	유럽		
1980	0.3				0.3
1981	0.6				0.6
1982	1.0				1.0
1983	3.0				3.0
1984	5.5				5.5
1985	8.0	1.0			9.0
1986	9.0	1.5	0.3		10.8
1987	9.0	2.5	0.4		11.9

르고 있고 나머지는 多結晶 실리콘 태양電池가 6.2MW, 기타 集光型 및 리본型 電池이다.

非晶質 실리콘 태양電池의 主生産國은 日本으로서 全体의 約 83%를 점유하고 있다. 표 5에서 보는 바와 같이 1984년까지는 日本에서만 生産이 되었고 美國은 1985년에 처음으로 商業化를 始作하였다.

1986년에 유럽에서도 非晶質 실리콘 태양電池가 生産되기 시작했는데 이는 주로 英國과 프랑스에서 美國 Chronar 社와의 合作, 技術 指導에 의한 것이다.

이들 非晶質 실리콘 태양電池의 거의 대부분은 卓上用 計算器, 時計, 라디오, Battery 充電器等 民生用 電子製品의 電源용으로 利用되고 있으며, 극히 一部分이 1~2kW 규모의 實驗 및 示範目的의 電力生産용으로 쓰이고 있다.

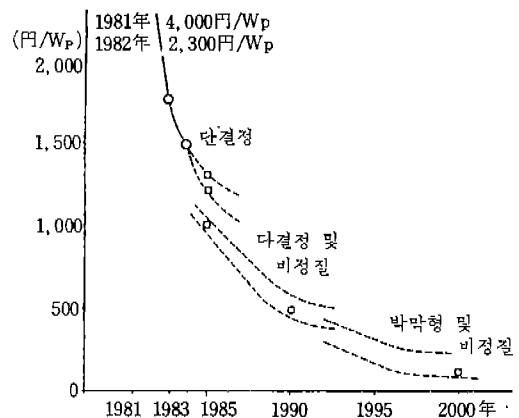
全世界에서 太陽電池의 市場規模는 電力用 및 民生用을 中心으로 1990년에는 300MW, 1995년에는 거의 1,000MW 정도에 이를 것으로 展望되고 있다.¹²⁾

나. 價格 展望

지난 10余年間 太陽電池 모듈의 價格은 技術開發 및 大量生産의 結果 매년 상당한 速度로 下落하고 있다. 日本 NEDO에서는 現在 1Wp 당 1,000円인 生産 Cost를 1990년에 500円, 2000년까지는 100円程度로 낮출 計劃으로 있다(그림 5)^{13, 14)}

그리고 Paul Maycock은 1984年 美國 달러貨 基準으로 1985년에 \$ 5~6.5인 非晶質 실리콘 태양電池의 價格은 1990년에 \$ 2~3, 1995년에 \$ 1.66~2.5이 될 것으로 豫測한 바 있다(표 6).

그러나 美國 Chronar 社에서는 이미 1987年初에 1Wp당 \$ 1.3(負債의 元利金, 管理·運營費



〈그림 5〉 太陽電池 모듈 價格推移 및 展望

〈표 6〉 硅素太陽電池 類型別 價格 豫測

年度 類型	1985	1990	1995
單 結 晶	6.5	4~5	3
集 光 型	5~6	3.3~4	2.5
리 본 型	7.5	3.3	2~3
多 結 晶	7.0	3.5	3
非 晶 質	5~6.5	2~3	1.66~2.5
平 均	6.5	3.5	2.5

(Wp당 1984년 U. S \$ 기준)

를 제외한 直接 製造原價)에 生産하고 있으며, 1988년까지는 Power System의 設置費까지 包含하여 \$ 4 까지도 計劃하고 있다. 이 밖에도 Arco Solar社에서는 大量生産(年産 70MWp)을 통하여 製造價를 1988년까지 \$ 1/Wp로 낮출 計劃을 推進하고 있다.¹⁵⁾

5. 結 論

從來 結晶質 실리콘 太陽電池의 普及이 價格의 限界性이라는 障壁에 부딪쳐 있는 상황에서

非晶質 실리콘 太陽電池는 代替 에너지源으로서의 太陽 에너지 利用에 밝은 展望을 주고 있다.

지난 10余年間 日本, 美國을 中心으로 한 研究開發結果 非晶質 실리콘 太陽電池는 1987年度 全世界 太陽電池 總生産量의 41%를 차지하고 있고, 現在 研究開發中인 低價, 高效率의 電力用 非晶質 실리콘 太陽電池의 生産단계에 이르면 그 需要는 急増할 것으로 豫測되고 있다.

이와 같이 2000年代 에너지源으로서 밝은 展望을 던져주고 있는 非晶質 실리콘 太陽電池에 대한 世界的인 研究開發 趨勢에 발 맞추고 나아가서 國內 獨自의인 技術 開發을 도모하기 위해 政府에서는 1989년부터 太陽光發電分野를 國內 最初로 汎國家的 研究事業으로 選定하였으며, 2000年代까지의 中長期 開發目標를 단계별로 設定하고, 國內의 大學, 研究所, 企業체가 共同參與하는 研究體系를 구성하여 汎國家的으로 推進中에 있어 그 結果가 기대된다. 따라서 이러한 長期 研究開發計劃의 효율적인 推進과 技術開發에 따른 太陽光發電의 實用化를 위해서는 관련 전문가와 企業의 적극적인 참여와 政府의 지속적인 정책·행정지원이 要望된다.

參考文獻

- 1) 中嶋行雄, 工業材料, 33(3), 25(1985)
- 2) W. E. Spear In Doped Amorphous Semiconductor, ed by M. H. Brodsky, Springer-Verlag, p251, 1979
- 3) K. W. Mitchell, Ann. Rev. Energy, 10, (1985)
- 4) 高橋 清 他, 最新アモルファスSiハニドブック, サイエンスフォーラム, p253, 1983
- 5) E. S. Sabisky, Solid State Technology, p87, Dec. 1986
- 6) Yukinori Kuwano, 7 th International PVS EC-I, Kobe Japan, p571, 1984
- 7) 行本 善則, 電子材料, p130, 1986年 6月
- 8) 若松 清司, エネルギー, 20(5), 48(1987)
- 9) Five Year Research Plan 1987~1991, DOE, DOE/CH10093-7, May 1987.
- 10) 日本能率協會, 太陽光發電システムシンポジウム, 東京, 1988.
- 11) Photovoltaic Insider's Report, Feb. 1988
- 12) Paul Maycock, Photovoltaic International, p5, Dec/Jan. 1986.
- 13) NEDO NEWS 1987年 1月
- 14) NEDO NEWS 1985年 9~10月
- 15) Photovoltaic Insider's Report, Jan. 1987.
- 16) Sonet Systems, 39, 36(1988)