

光 CVD 法에 의한 a-Si 太陽電池의 高効率化에 관한 研究

The High Efficiency of Amorphous-Si Solar Cells Prepared by Photo-CVD System.

金 泰 成*

(Tae-Seoung Kim)

ABSTRACT

Hydrogenated amorphous silicon solar cells which are fabricated by photo-chemical vapor deposition (photo-CVD) system has been investigated. In the photo-CVD system which consists of three separate reaction chambers, low-pressure mercury lamp has been used as a light source. The main reactant ($\text{Si}_2\text{H}_6/\text{He}$) gases which are premixed with a small amount of mercury vapor in a mercury-vaporizer kept at 50°C have been used.

Using C_2H_2 and $\text{SiH}_2(\text{CH}_3)_2$ as the carbon source, p-type wide band gap a-SiC:H films have been obtained. The result has been found that the undoped layers of the pin/substrate solar cells are influenced by the residual impurities, such as phosphorus and boron during the deposition process. By minimizing the effect of the impurities in the i-layer and optimizing conditions at the p-layer and p/i interface, the energy conversion efficiency of 9.61% under AM-1 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) has been achieved for pin/substrate solar cells illuminated through their p-layers, using the three separate reaction chamber apparatus.

It is expected that a-SiC:H solar cells with the energy conversion efficiency over 10% have been fabricated by Photo-CVD method.

I. 序 論

太陽光 發電이 今後 大規模로 實用化되기 위
해서는 現在 太陽光 發電 原價가 約 $\$1/\text{W}^{1)}$ 로
既存 電力에 比하여 顯著하게 높으므로 太陽電
池 製造 原價를 大幅 引下시킬 必要가 있다. 또한
아직까지 太陽光 發電 system 技術이 未確立되
어 있는 實情이므로 system 技術을 開發하고
system에 따른 周邊機器의 低廉化를 圖謀하여
大規模的인 實用化를 目標로 하여야 한다. 그 뿐

만이 아니라 太陽電池를 實用化하려면 高速製造,
低價格化 및 量産體制等이 先行되어야 한다.

이와 같은 點들을 充足시키기 위해서는 新技
術에 依한 새로운 太陽電池를 새로운 裝置로 製
造하여 太陽電池의 高効率化를 指向해야 한다. 이
러한 추세에 따라 第3世代 太陽電池時代²⁾를 맞
고 있는 現在 世界的인 太陽電池 研究의 目標은
太陽電池의 高効率化, 低價格化, 高速製造, 新材
料 및 良好한 膜質等을 目標로 이 方面의 技術開
發에 力點을 두고있는 實情이다.

그런데 現在 太陽電池의 核心部分인 水素化am-

* 正會員 : 全南大學校 工科大學

orphous silicon (a-Si:H) 薄膜堆積法은 지금까지 高周波 Plasma CVD法이 많이 사용되어 왔는데 이 方法을 利用하여 製造된 太陽電池의 效率가 10%를 超過하였다는 報告³⁾를 듣고있다.

Plasma CVD法^{4,5)}은 減壓雰圍氣中에서 發生된 glow放電 plasma가 原料 gas를 分解시켜 膜을 堆積시킨 方法으로 一般的으로는 13.56[MHz]의 高周波電壓을 平行平板電極에 印加시킨 容量結合型 高周波 plasma CVD法이 主로 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 plasma CVD法은 다음과 같은 問題點이 있다.

첫째, plasma中에 섞여있는 高energy 荷電粒子가 高電界에 依하여 加速되어 堆積된 膜에 충돌되어 膜을 損傷시킨다.

둘째, 加速된 ion의 sputter 效果에 의해 電極이나 反應室壁等으로 부터 不純物이 混入될 可能性이 많고 이 때문에 太陽電池의 效率가 不良하게 된다.

셋째, gas의 流量과 壓力, 電極의 크기와 位置等에 의해 plasma의 狀態가 微妙하게 變하므로 良好한 a-Si:H膜을 形成시키기 위해서 行하는 放電 parameter의 制御는 대단히 어려워진다.

이와같이 從來 太陽電池의 薄膜 製造法으로 가장 많이 사용되어온 plasma CVD法으로는 薄膜의 高品質化가 어려우므로, 本研究에서는 이제까지의 plasma CVD法과는 다른 새로운 太陽電池 製造法으로 光CVD法(光化學的 氣相成長, photo-chemical vapor Deposition)을 提案하였다.

光CVD法은 紫外線의 光energy에 依하여 原料 gas를 分解시켜 膜을 堆積시킨 方法으로, 여기서 사용한 光energy는 原料 gas를 ion化시키지 않으므로 從來의 plasma CVD法에서 觀察할 수 있었던 高energy粒子에 依한 膜損傷을 避할 수 있다. 또 sputter 效果에 依한 不純物의 混入도 없고 process parameter의 制御도

容易하므로 高品質의 膜을 얻을 수 있다고 생각된다.

따라서 本研究에서는 三室分離型 光CVD 裝置를 利用하여 a-Si:H 薄膜을 製造하여 그 膜質을 評價하는데 主眼點을 두고, 또 水銀增減法을 利用한 太陽電池의 高効率화를 研究하였다.

지금까지 光CVD法으로 製造한 太陽電池의 energy 變換效率는 9.61%이었다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2-1 實驗裝置

2-1-1. 光源

光勵起에 依해 radical 反應을 일으킨 光CVD法에서는 光化學的 反應을 하는데 알맞은 光을 長時間 安定하게 또 光量도 큰 狀態로 供給하지 않으면 안된다. 本研究에서는 低壓水銀 lamp (USH10, 紫外線照射裝置)를 光源으로 사용하였고 또 膜堆積을 高速化하기 위해서 水銀增感法을 사용하였다. 低壓水銀 lamp는 2537[Å]과 1849[Å]인 두 共鳴線을 갖었는데, 이 中에서 1849[Å]波長은 空氣中の 酸素와 反應하여 오존을 많이 發生하기 때문에 管壁에 吸收시켜 外部로 放出하지 않는다. lamp의 構造는 管壁은 熔融石英製이고, 길이는 約 18[cm], 直徑 15[mm]의 U字型 lamp가 2灯 並列로 接續되어 있으며, 管內에는 Neon gas와 水銀 gas가 封入되어있고, 兩端에는 電極이 設置되어 있다. 各 lamp에 印加된 電力은 30[W]로 光出力後 1lamp面으로부터 3[cm]直下의 面에 2537[Å] 共鳴線이 約 6[mW/cm²]의 세기로 照射된다.

2-1-2. 光CVD裝置

初期에는 單室光CVD裝置를 써서 a-Si 太陽電池를 製造하였는데 이 境遇 長時間 使用하면 反應室內的 溫度가 上昇하여 殘留不純物의 影響을 크게 받아 太陽電池의 特性이 不良해진다. 그래서 殘留不純物의 效果를 격감시켜서 太陽電池

의 効率을 一層 向上 시킬 目的으로 3室分離型 光CVD裝置를 利用하여 pin型 太陽電池를 製造하였다. Fig.1에 3室 分離型 光CVD裝置의 概略圖를 나타냈다.

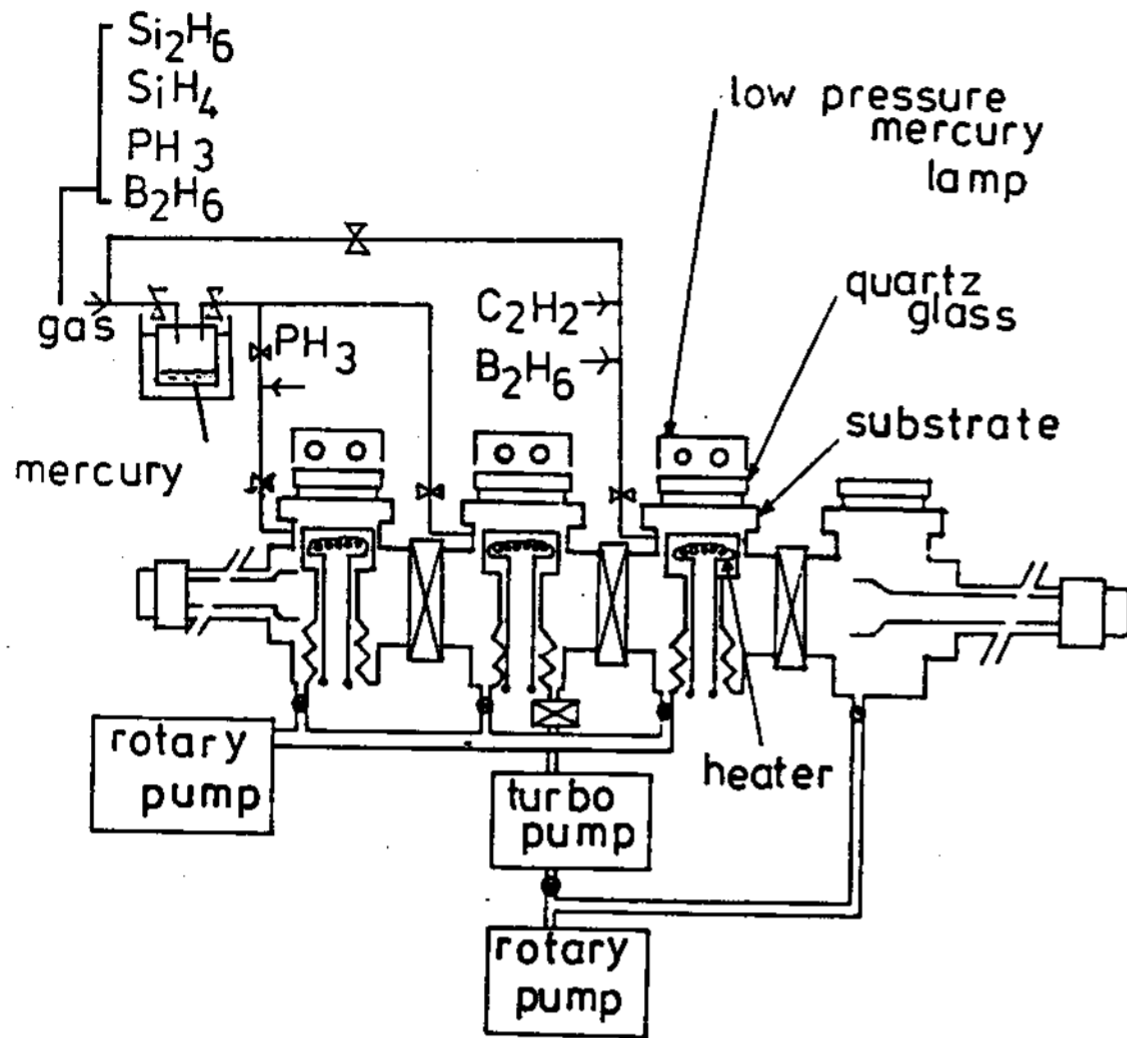


Fig. 1. Schematic diagram of photo-CVD system with three-separated-reaction chamber.

Fig.1에서 右側으로 부터 順次로 試料準備室, P層堆積用 反應室, i層堆積用 反應室 및 n層堆積用 反應室等 4個의 反應室로 構成되어 있고, 反應室의 上部는 紫外光이 入射되는 窓이 있는데, P層反應室에는 合成石英製窓이, i層과 n層反應室에는 熔融石英製窓이 各各 設置되어 있다.

各 原料 gas의 配管은 Fig.1에 表示된 바와 같이 i層과 n層用 反應室에 連結된 Si₂H₆ gas가 水銀槽를 通해서 反應室에 流入되게 되어 있는데, 水銀槽의 溫度를 50[°C]로 維持시켜서 發生된 水銀蒸氣와 gas가 反應室에 混入된다.

基板台는 直徑 10[cm]크기의 stainless製로, 內部에 熱電對와 電熱線이 埋立되어 있어 이 電熱線에 依하여 基板은 100~400[°C]로 加熱된다.

2-2-3 薄膜두께 및 透過率 測定 裝置

太陽電池의 膜質을 評價하는데는 導電度를 調査해야 하는데, 그러자면 薄膜의 두께를 測定해

야 한다. 膜두께는 薄膜段差測定器(日本, 小坂研究所製 Model ET-10)를 利用하여 測定하였다. 이 測定器의 特徵은 20[Å]의 超微小變位量의 分解能이 可能하고 縱倍率 50萬, 橫倍率 1萬倍까지 擴大되며 觸針先端半徑 R은 0.5[μm]이고 測定荷重은 0~50[mg]사이에서 任意로 선정할 수 있는 特性이 있다.

太陽電池의 薄膜試料에 光을 照射했을때 導電率과 光學的 禁制帶幅을 求하기 위해서 入射光의 反射率, 透過率 및 吸收率을 計測하였다. 이 값들을 求하기 위해서는 可視紫外分光 光度計(日本 分光會社製 Model UVIDEC-430型)를 利用하였다. 이 測光器의 特徵은 分光光度計에 Personal computer가 付着되어 있고 完全自動으로 操作되며 測定內容은 吸收 spectrum의 測定(#1), 波長 固定 時間經過에 따른 變化測定(#2), 定量分析(#3), 一定 波長 間隔의 測光值의 測定(#4), 波長 program(#5) 및 光源의 切換(#7) 등의 測定 領域을 갖고 있다.

2-2. 實驗方法

2-2-1. 太陽電池의 構成

3室分離型 光CVD裝置를 利用하여 試作한 太陽電池의 構造를 Fig.2에 나타냈다.

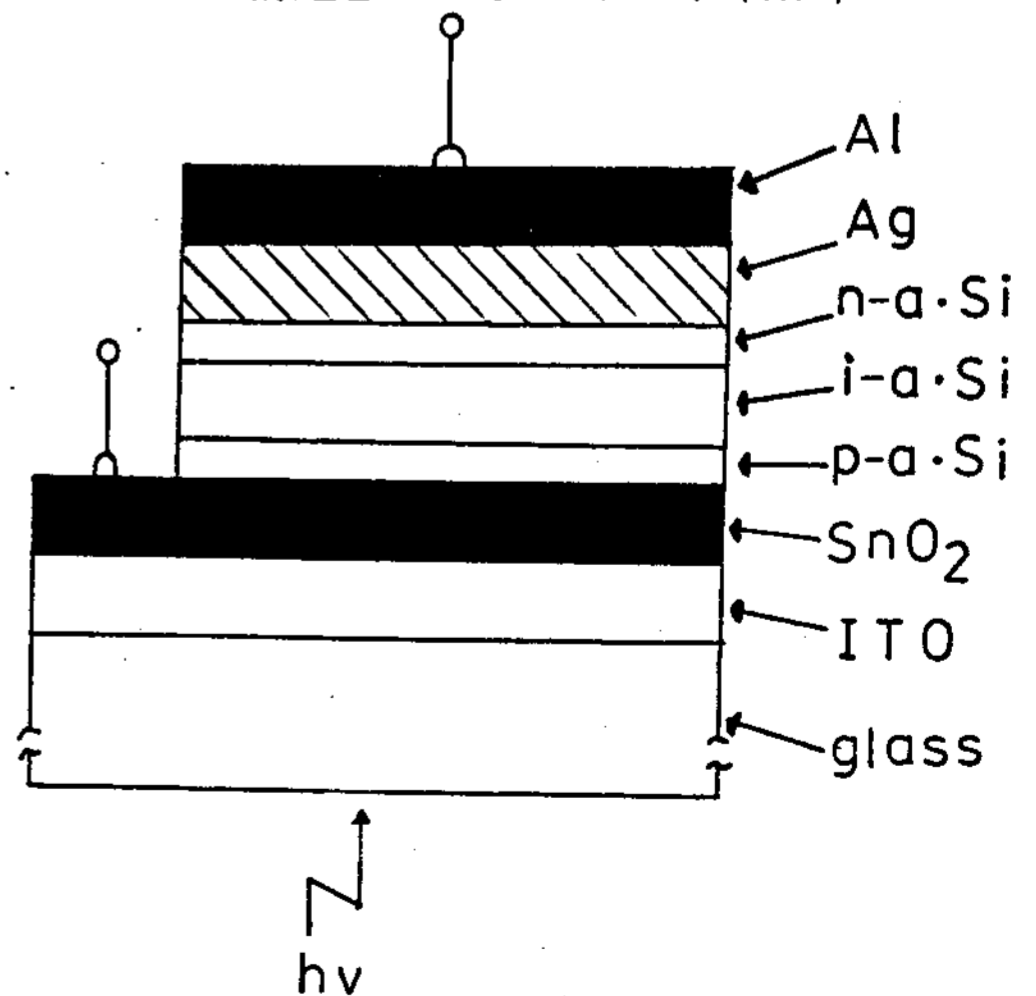


Fig. 2. Schematic structure of a-Si nip/sub-type solar cell.

基板위에 P형의 a-SiC:H膜, i형의 a-Si:H膜 및 n형의 a-Si:H膜을 順次로 堆積시킨후, pin形 태양電池를 試作하였다.

電極으로는 처음에 Ag를 蒸着시킨後 그 위에 Al를 蒸着하였는데 그 理由⁶⁾는 反射率이 높은 Ag를 使用함으로써 裏面電極에서의 光의 反射率을 增加시키고, i層에서 吸收되는 光量을 增加시키기 위해서이고, 特히 Ag위에 Al을 蒸着시킨것은 Ag의 離脫을 방지하기 위해서이다.

基板은 두께 約 1 [mm]의 靑板 glass로 凹凸한 片面에 透明導電膜으로 ITO가 800[Å], SnO₂가 200[Å]정도 coating된 2.5(cm)×1.3(cm)크기의 G-27 glass를 使用하였다.

2-2-2 pin層의 形成條件

a-Si 태양電池의 pin各層은 3室分離型 光CVD裝置에 依해 形成시켰는데 各層의 主된 形成條件은 Table 1과 같다.

Table 1. The forming conditions of p-i-n solar cell.

條件 / 層	p	i	n
形成法	1849Å 共鳴線에 의한 直接分解法	2537Å 共鳴線에 의한 水銀增感法	2537Å 共鳴線에 의한 水銀增感法
原料 gas	Si ₂ H ₆ (10% He 希釋) 100 cc/min B ₂ H ₆ (1% H ₂ 希釋) 10cc/min C ₂ H ₂ (10% H ₂ 希釋) 0.5~8 cc/min	Si ₂ H ₆ (10% He 希釋) 50cc/min	
反應 gas 壓力	6 Torr	6 Torr	4 Torr
基板溫度	200 ~ 300 °C(設定值)	260 °C (設定值)	270 °C (設定值)
堆積時間	5 ~ 10 分	1 ~ 3 時間	6 ~ 15 分

太陽電池의 特性은 堆積된 pin層의 膜에 對해서 暗導電率, 光導電率, 光學的禁制帶幅 등을 測定하여 調査하였다.

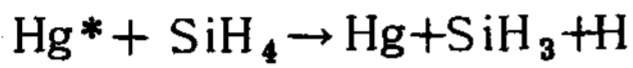
導電率은 形成된 膜위에 幅 50 [μm], 길이 2 [mm]의 크기로 Al 電極을 眞空蒸着한 後 兩電極間에 電壓을 印加할 때 흐르는 電流를 計測하여 測定하였으며, 光導電率은 solar simulator 에 依한 AM-1(100mw/cm², WACOM R&D Corp. Model WXS-85-H) 下에서 測定하였다. 光學的禁制帶幅은 光의 吸收率 α을 波長으로 變化시켜서 測定하여 (αhν)^{1/2}-hν의 graph로 부터 求하였다.

2-2-3. 光勵起 方法

光CVD에서는 水素化物, 金屬 alkyl[M(CH₃)_x] 및 金屬 carbonyl[M(CO)_x] 등을 光分解하여 膜을 形成시킨다.^{7,8)} 그런데 光化學反應의 基板은 反應 gas가 勵起光을 吸收해야 한다. 따라서 Si-device에 必要한 Silane系 gas(SiH₄)를 光分解시키려면 波長 160 [nm] 以下의 短波長光源이 必要한데, 이 波長 領域에 屬하는 實用的인 光源이 現在 나와있지 않다. 그러므로 이와같은 境遇에 光增減反應이 必要하다.

本 研究에서 利用한 水銀增減反應은 反應-gas에 極微量(~1 m Torr 以下)의 水銀을 첨가시키

고, 勵起光으로는 低壓水銀 lamp 를 使用하였는데, lamp 가 照射한 波長中에서 1849[Å] 이나 2537[Å] 光은 水銀의 共鳴線이므로, 이 光子는 効率的으로 反應室內의 水銀에 吸收되며 水銀原子가 勵起된다. 勵起된 水銀(Hg*) 는 反應 gas (SiH₄)와 충돌할 때 光子로 부터 받았던 energy 를 放出하는데 이때의 方應式은 다음과 같다.



上式에서 알 수 있는 바와 같이 水銀增減反應에서는 먼저 光子의 energy 를 水銀原子에 吸收시킨 後, 충돌反應에 依하여 gas 分子에 energy 를 주는 方法이다. 따라서 이러한 要求에 알맞도록 Fig.1 에서 보는바와 같은 水銀槽에서 勵起된 水銀 gas가 主 gas와 混合하여 反應室에 流入되어 反應 gas 를 光分解시켰다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1. 堆積速度的 時間變化

太陽電池의 特性中에서 高速製造, 大量生産 및 高品質化 등은 現在 研究者들이 追求하고 있는 重要한 研究目標^{9,10)} 이므로 膜 두께의 堆積時間 依存성을 調査하였다. 膜 두께의 堆積時間 依存성은 入射光과 gas가 良好하게 反應해야 한다. 그런데 低壓水銀燈으로 부터 光을 反應室에 照射시키면 石英窓의 內面에 膜이 堆積되어 反應室內에 紫外線이 入射되는 것을 妨害한다. 그러므로 窓에 膜이 附着되지 않게 하기 위하여 窓 內側에 Fluorinated fluids를 塗布하여 紫外線의 透過를 良好한 狀態로 維持하면서 膜두께의 堆積時間 依存성을 調査하여 Fig.3에 나타냈다.

Fig.3은 反應室의 壓力이 5[Torr]이고 紫外線의 세기가 6[mW/cm²]인 低壓水銀燈으로 부터 3[cm]直下에 놓인 基板에 堆積된 膜으로, 그림에서 보는 바와 같이 40[分]에서 膜 두께는

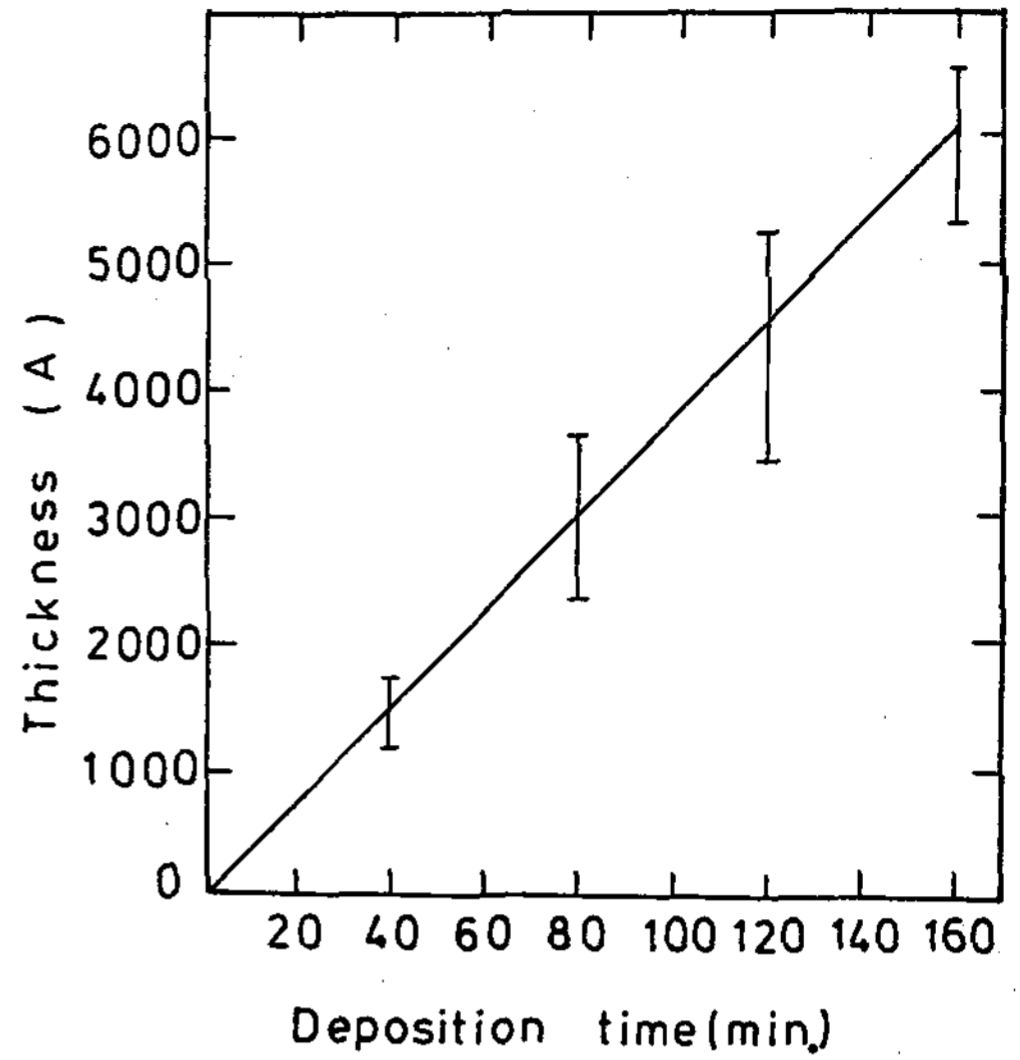


Fig. 3. Deposition time dependence of film thickness.

1800[Å], 100[分]에서 3900[Å], 140[分]에서 5300[Å] 堆積되었고 160[分]까지도 石英窓에 不況性 gas 는 보이지 않았다.

3-2. P層의 特性

P層의 特性은 P層膜에 對한 光導電率 및 光學的 禁制帶幅 등을 測定하여 調査하였다. P層의 doping은 水素를 希釋한 B₂H₆ gas와 紫外線

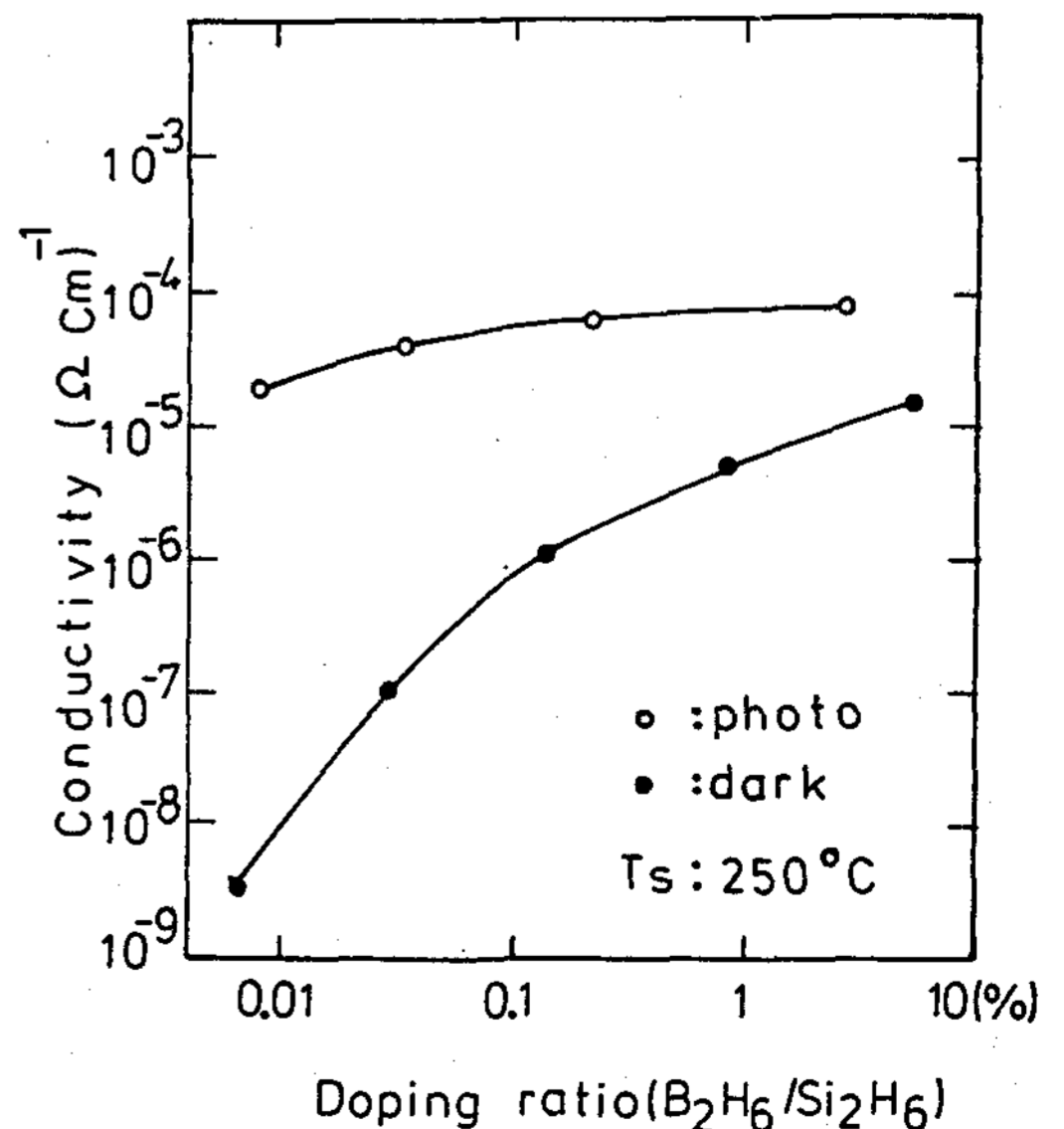


Fig. 4. Conductivity of p-layers as a function of doping ratio.

光이 反應하여 堆積된 膜의 導電率을 測定하여 Fig.4에 나타냈다.

Fig.4에서 基板溫度 $T_s=250^\circ\text{C}$ 일 때 光導電率은 約 $10^{-4}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 이었고, 暗導電率은 $10^{-9}\sim 10^{-5}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 로 diborane 量이 增加할수록 또 基板溫度가 上昇할수록 크게 增加하고 있었다. 또 이때의 活性化 energy는 $0.45[\text{eV}]$ 이다.

基板溫度와 diborane 濃도가 上昇함에 따라서 光學的 禁制帶幅은 $1.7\sim 1.6[\text{eV}]$ 程度로 좁아지고 있었다. 따라서 光CVD法으로 a-Si:H 膜을 堆積시킬 때 dopant gas B_2H_6 를 알맞게 doping시키면 導電率이 向上된다고 判斷된다.

이 結果는 從來의 單室光CVD 裝置를 使用해서 얻는 結果와 比較하면 3室光CVD 裝置를 使用할 때가 光導電率은 2乘程度, 暗導電率은 4乘程度 높은 結果로 나타났다. 그 原因으로는 單室光CVD 裝置쪽이 殘留不純物 濃도가 많아 膜質이 不良하기 때문이라고 생각된다.

3-3 i層의 特性

i層의 特性은 i層膜에 對한 光導電率, 基板溫度 特性 및 光學的 禁制帶幅 등을 測定하여 調査하였다.

Undoped a-Si:H의 i層薄膜에 對한 光導電率 및 暗導電率의 基板溫度 依存性을 調査하여 Fig. 5에 나타냈다.

그림에서 보는바와 같이 光導電率은 基板溫度에 따라 그 값이 많이 달라졌는데 基板溫度가 250°C 까지 光導電率은 서서히 增加하였다가 그以後에는 다시 감소하였다. 특히 基板溫度 250°C , 壓力 $5[\text{Torr}]$ 에서 光導電率은 $8\times 10^{-3}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 로 가장 큰 값을 나타냈고 暗導電率은 $5\times 10^{-5}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 이었다.

i層의 光學的 禁制帶幅은 $1.7\sim 1.8[\text{eV}]$ 로 基板溫度가 높을수록 좁아지는 경향이였다. 또 活性化 energy는 $0.7\sim 0.9[\text{eV}]$ 로 band gap의 中央附近에 Fermi level이 位置해 있음을 볼

수 있었다.

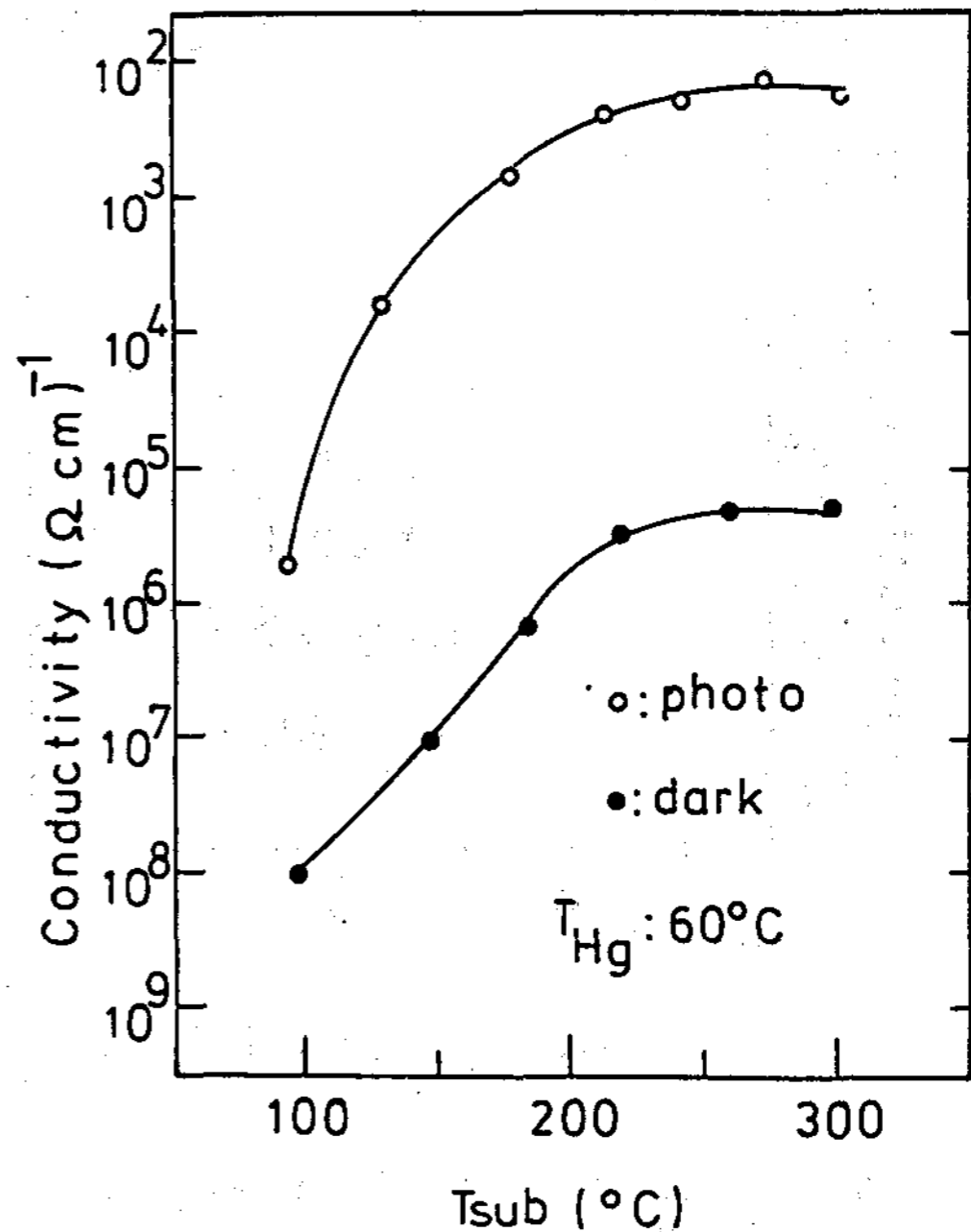


Fig. 5. Sub-glass temperature dependence of conductivity on i-layers.

이와 같이 3室分離型 CVD法이 plasma CVD法이나 單室CVD法보다 導電率이 1乘 높은 값을 나타냈는데 그 理由는 移動도와 時定數 값이 크고 또한 反應室內에 不純物이 적어서 膜質이 優秀하기 때문인 것으로 判斷된다.

3-4 n層의 特性

n層의 特性은 n層膜에 對한 光導電率, 暗導電率, 基板溫度 特性 및 光學的 禁制帶幅 등을 測定하여 調査하였다. 光CVD法에 의한 a-Si:H의 n形 doping 特性을 Fig.6에 나타냈다.

dopant gas로는 $0.1\sim 1[\%]$ 水素를 希釋한 PH_3 를 使用하였는데 光導電率은 $0.01[\%]$ 程度의 PH_3 의 doping ratio에서 $3\times 10^{-2}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 이었고, 暗導電率은 doping ratio가 增加함에 따라 $0.07[\%]$ 까지는 急速히 上昇하고 그 이후는 $0.7[\%]$ 까지는 서서히 增加하여 $4\times 10^{-2}[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$ 로 最大值를 나타냈다.

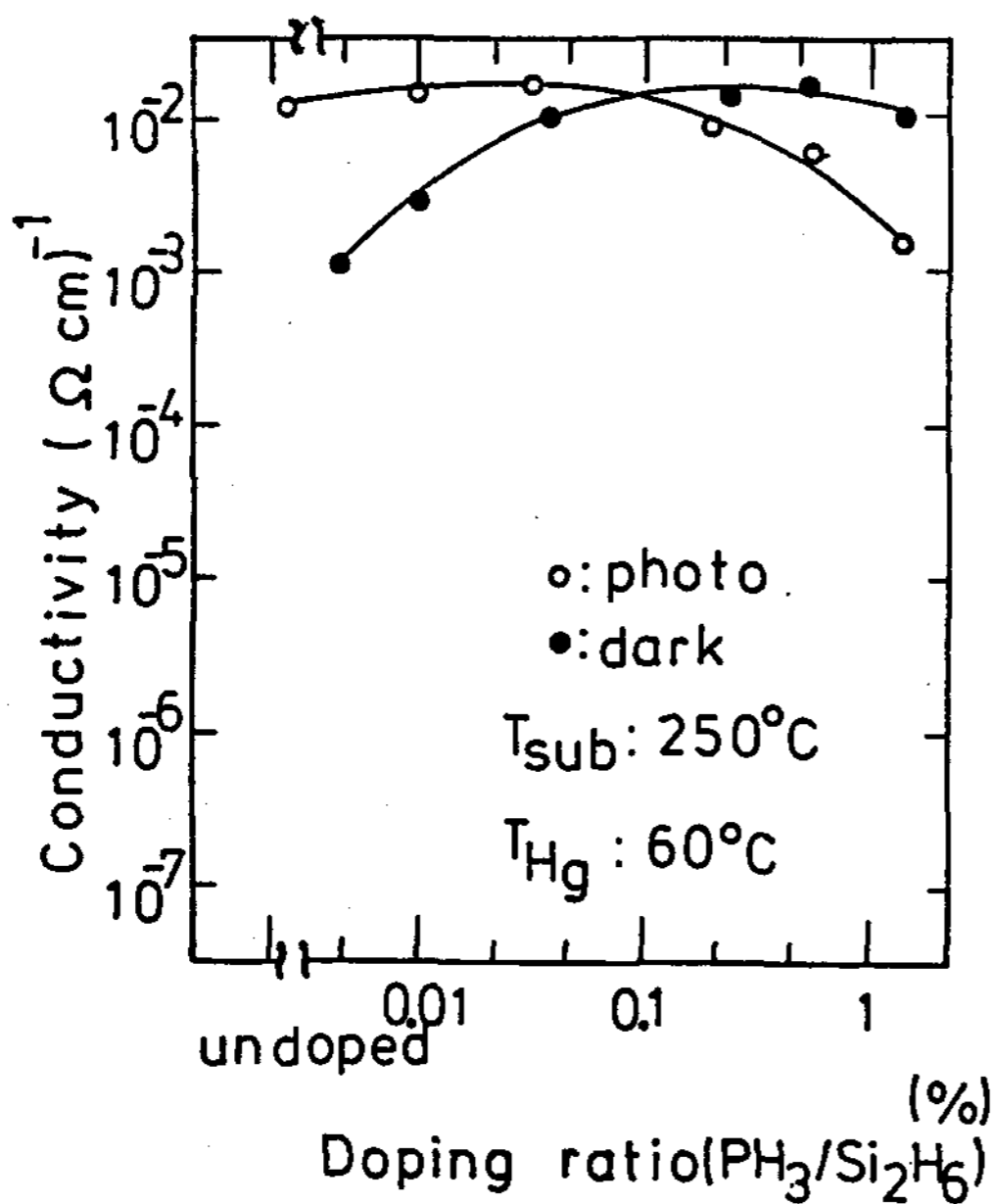


Fig. 6. Conductivity of n-layers as a function of doping ratio.

3-5 電壓-電流의 特性

太陽電池의 膜質이 太陽光의 energy 變換效率을 決定짓는 重要한 要因이 되므로, 製造된 薄膜에 太陽光을 照射시켜 電壓, 電流 特性을 調査하였다. 太陽電池의 電壓-電流 特性은 開放電壓, 短絡光電流, 曲線因子 및 變換效率 等에 依하여 달라지는데, 그 特性測定은 solar simulator 光의 AM值, 入射光의 強度 및 素子溫度 等이 重要한 測定因子이거니와, 入射光의 強度는 100[mW/cm²], 素子溫度는 28 ± 2[°C]가 標準測定條件이며 特히 AM值는 從來 AM-1를 主로 使用하여 왔으나 점차 AM-1.5로 移行하는 傾向이다. 本研究에서는 GaAs 標準 太陽電池의 短絡光電流에 依하여 入射光의 強度를 決定하였는데, AM-1, 100[mW/cm²]의 光照射下에서 測定하였다.

Fig.7은 3室光CVD 裝置로 製作한 太陽電池 中에서 最高의 太陽光 energy 變換效率을 얻은 것으로 그 때의 電壓-電流 特性을 나타냈다.

Fig.7에서 Voc, Isc, FF, EFF는 各各 開放電壓, 短絡光電流, 曲線因子 및 變換效率을 나타

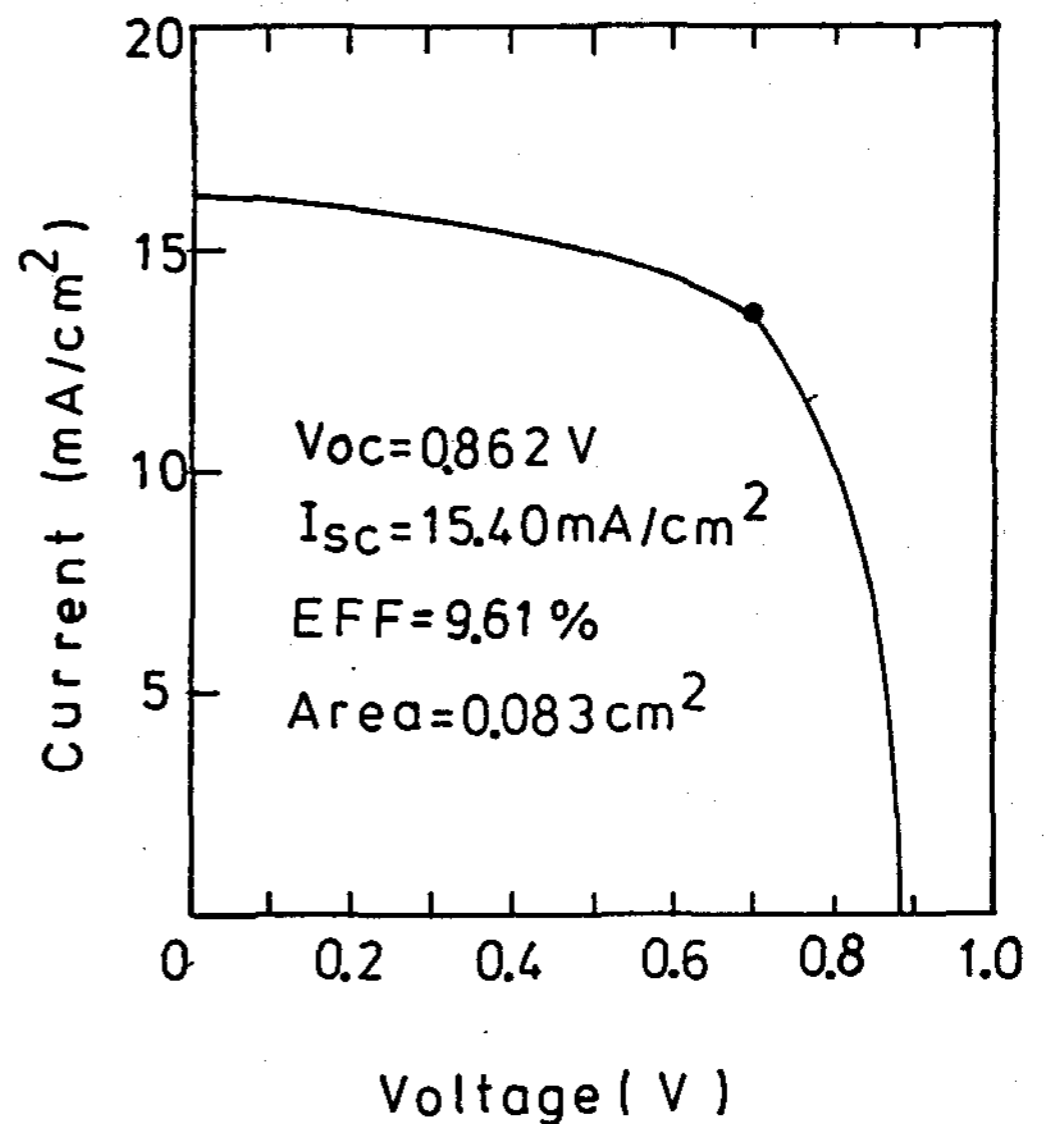


Fig. 7. Illuminated I-V characteristics of the p-i-n type solar cell.

내고 있다.

이 太陽電池의 形成條件은 P層은 C₂H₂/Si₂H₆=1.6%, B₂H₆/(Si₂H₆+C₂H₂)=1%의 gas를 使用하여 10分間 堆積시켰고, i層은 90分間 堆積시켜서 5000[Å]의 膜두께를 形成시켰으며, n層은 PH₃/Si₂H₆=0.2%의 gas를 使用하여 10分間 堆積시켰다. 이때의 太陽電池의 面積은 0.083[cm²]이었고 energy 變換效率은 9.61[%]이었다.

光CVD 裝置를 써서 energy 變換效率이 10[%]를 超過하면 發電原價가 \$0.5/W로 되어 太陽光發電의 第4世代의 門을 열게될 것이고, 集中型 大規模發電의 經濟性이 있으리라고 본다.

以上에서 考察한 바와 같이 光CVD 裝置를 使用하면 plasma CVD法보다 裝置가 簡單하고 膜質이 優秀하여 高energy 變換效率의 太陽電池를 얻을 수 있음을 알았다.

4. 結 論

Disilane 系의 混合 gas 로 부터 光CVD 方法

으로 a-Si 태양電池를 製造하여 그 特性을 測定, 分析한 實驗結果와 考察에서 얻어진 結論은 다음과 같다.

(1) 廣域 band gap 를 갖는 a-SiC:H를 窓層으로 利用하는 太陽電池製造는 光CVD法으로도 可能하였고, plasma CVD法보다 膜質이 優良하였는데 그 理由는 光CVD法에서는 高energy 荷電粒子가 堆積된 膜에 충돌하지 않고, 또 不純物 混入이 적어서 膜質이 優秀하다고 생각된다.

(2) 炭素源으로 C₂H₂ 또는 Si(CH₃)₂H₂를 使用하여 製造한 a-SiC:H膜의 光導電率은 10⁻⁴ [S·cm⁻¹]이었는데 이 값은 plasma CVD法보다 1~2승 높았다.

(3) 3室分離型 光CVD裝置를 使用하면 單室光CVD裝置를 使用할 때 보다 反應室壁 等に 殘留

해있는 不純物이 極少量이여서 膜質이 優秀하였는데 그 例로 3室分離型 光CVD裝置로 a-Si 태양電池를 形成하여 1板의 基板에 15個所에서 測定한 變換效率은 ± 2%以內的 均一性을 나타냈다.

(4) 光CVD裝置를 써서 만든 a-Si 태양電池는 短絡 光電流가 增大하였고 9.61%의 energy 變換效率을 얻었다.

以上과 같은 結論으로부터 光CVD法이 膜質이 優秀한 高効率 a-Si의 太陽電池의 製作法으로 有望하다. 앞으로 光CVD法을 利用한 薄膜 製作 技術을 좀더 開發하여 energy 變換效率을 10 [%] 초과시키면 第4世代 太陽電池 時代가 開膜되어 集中型 大規模 發電이 一般化되어 電力用 a-Si 태양電池 時代가 오리라고 確信한다.

References

1. 高橋清, 小長井誠, "アモルファス 태양電池" pp.157-184. 昭晃堂(東京), (1984)
2. P. Sichanugrist, M. Kumada, M. Konagai, K. Takahashi & K. Komori, "Amorphous silicon solar cells with graded boron-doped active layers", J. Appl. Phys. 54(11), 1983, pp. 6705-6707.
3. J. Kenne, M. Konagai & K. Takahashi, "Effects of mercury and krypton on the glow discharge decomposition of disilane." Appl. Phys. Lett. 44(10), 1984, pp. 965-967.
4. P. Sichanugrist, M. Konagai, & K. Takahashi, "Theoretical analysis of amorphous silicon solar cells." J. Appl. Phys. 55(4), 1984, pp 1155.
5. 濱川圭弘, "太陽光發電入門" pp.43 ~ 123, 才一ム社(東京) (1982)
6. K. Ito & T. Nakazawa, "A New Fabrication Process for High Efficiency Indium Oxide/Silicon Solar Cells," 1st Inter. Photo. Sci. and Engi. Conf., 1984, pp. 759-762.
7. G. Nakamura, K. Sato & Y. Yukimoto, "High Performance Tandem Type Amorphous Solar Cells." 16th IEEE, 0727-82-5131, 1982, pp. 1331-1337.
8. K. S. Lim, M. Konagai & K. Takahashi, "A novel structure, high conversion efficiency P-SiC/graded P-SiC/i - Si/n - Si/metal substrate-type amorphous silicon solar cell." J. Appl. Phys. 56(2), 1984, pp. 538-542.
9. Y. Nakayama, K. Akiyama, N. Haga & T. Kawamura, "Hole Transport in Glow-Discharge Produced a-Si : H : Film." J. J. of Appl. Phy. 23(9), 1984, pp. 1703-1705.
10. 森垣和夫外 5人, "アモルファス半導體の基礎" pp.149 ~ 172, 才一ム社(東京) (1981)