

전극함몰형 태양전지의 제조를 위한 레이저 scribing

논문
9-6-8

Laser Scribing for Buried Contact Solar Cell Processing

조은철*, 조영현*, 이수홍*

(Eun-Chel Cho, Young-Hyun Cho, Soo-Hong Lee)

Abstract

Laser scribing of silicon plays an important role in metallization including the grid pattern and the front surface geometry which means aspect ratio of metal contacts. To make a front metal electrode of buried contact solar cell, we used Nd:YAG lasers that deliver average 3~4W at TEM₀₀ mode power to sample stage. The Q-switched Nd:YAG laser of 1.064 μm wavelength was used for silicon scribing with 20~40 μm width and 20~200 μm depth capabilities. After silicon slag etching, the groove width and depth for buried contact solar cell are ~20 μm and 30~50 μm respectively. Using MEL 40 Nd:YAG laser system, we can scribe the silicon surface with 18~23 μm width and 20~200 μm depth controlled by krypton arc lamp power, scan speed, pulse frequency and beam focusing. We fabricated a buried contact Silicon Solar Cell which had an energy conversion efficiency of 18.8 %. In this case, the groove width and depth are 20 μm and 50 μm respectively.

Key Words(중요용어) : Solar Cell(태양전지), Buried Contact(전극함몰), Metallization(전극형성), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저)

1. 서 론

단결정 및 다결정 실리콘 태양전지로 시판되고 있는 스크린 프린팅(Screen Printing) 태양전지의 금속전극용 페이스트는 석영성분을 포함하므로 낮은 전기전도도를 갖는다. 따라서 금속전극과 실리콘의 접촉저항을 낮추기 위하여 실리콘 표면의 에미터를 강하게 도핑하며, 금속전극의 직렬저항에 의한 손실을 방지하기 위하여 큰 전극면적을 필요로 한다. 스크린 프린팅 태양전지의 최소 금속전극 폭은 약 200 μm이며, 높이는 10 μm으로 전극의 가로:세로비가 약 0.05로 금속전극에 의한 전체 빛에너지 손실(shading loss)은 약 10~12 %로 매우 높다.¹⁾

금속전극에 의한 빛에너지 손실을 해결하기 위해 고안된 태양전지 구조가 전극 함몰형 태양전지(BCSC: Buried Contact Solar Cell)로 표면에 넓게

퍼진 금속전극을 90° 회전시켜 실리콘 내부로 함몰시켜 형성한다. 함몰된 전극의 형성은 고출력의 레이저를 이용하여 실리콘 표면에 홈(groove)을 형성한 후, 구리를 무전해 도금하여 얻어진다. 금속전극 형성을 위하여 홈을 형성하는 기술이 laser scribing이며, 홈에 도금된 구리는 SP에 사용되는 금속 페이스트보다 3배 이상의 전기전도도를 갖으며, 높은 전기전도도는 작은 홈면적으로 큰 전류를 흘릴 수 있다. 도금된 금속전극의 가로:세로비가 약 2.5~4로 금속전극에 의한 빛손실은 3 %이하로 매우 낮다.

홈을 형성하기 위한 laser scribing은 실리콘 태양전지 표면구조와 금속전극 형성에 큰 영향을 미치므로 직렬저항, 접촉저항, 금속전극간의 간격 및 금속에 의한 빛의 손실등을 고려하여 최적의 전극 패턴과 조건을 설정해야 한다. 전극함몰형 태양전지 제조시 레이저의 응용은 주로 고출력의 레이저에 의하여 실리콘 표면의 용융과 증발을 이용하여 실리콘의 표면에 홈을 파서 금속전극 형성을 위한 영역을 만든다. 금속전극의 형성은 실리콘 표면위에 형성된 홈위에 Ni, Cu, Ag을 무전해 도금 기술

* : 삼성종합기술원 신소재응용연구소

접수일자 : 1995년 9월 15일

심사완료 : 1996년 6월 25일

을 이용하여 도금한다. scribing은 금속전극의 모양을 결정하므로 최적의 전극패턴 및 빛에너지 손실, 직렬 저항, 접촉저항 등을 고려하여 전극용 패턴을 제작한다.

본 논문에서는 BCSC 태양전지의 제조를 위한 실리콘의 scribing 이론과 이를 이용한 전극함몰형 태양전지의 제조에 대하여 연구조사하였다.

2. BCSC 태양전지

전극함몰형 태양전지는 그림 1과 같이 표면에서 낮은 빛손실을 갖는 폭이 좁은 금속전극, 에미터의 낮은 면저항, 단파장 영역에서 좋은 특성을 가지는 표면의 passivation, 금속전극을 위한 높은 가로:세로비와 단면적, 낮은 전기저항과 금속/실리콘 계면에서 새결합 효과를 최소화 하기 위한 금속전극 아래에 강하게 도핑된 영역(n^{++} 층, $10\Omega/\square$)과 후면에 증착된 알루미늄을 980 °C에서 수 시간 열처리하여 후면전계(Back surface electric field)를 형성한다. 전극함몰형 태양전지의 개략적인 제조공정은 표 1과 같다.

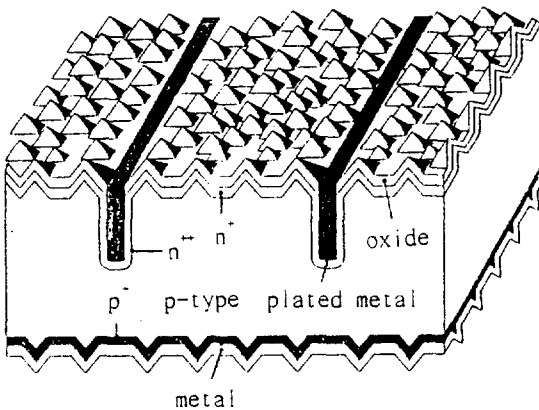


그림 1. 대략적인 전극함몰형 태양전지의 구조
Fig. 1. Schematic diagram of Buried Contact Solar Cell

표 1. 전극함몰형 태양전지의 제조공정의 흐름도

Table 1. Buried Contact Solar Cell processing sequence
1. texturing
2. chemical cleaning
3. emitter diffusion
4. oxidation
5. front laser scribing

6. groove etching
7. groove diffusion
8. rear aluminum deposition
9. Al sintering
10. nickel plating
11. copper plating
12. silver plating
13. edge isolation

3. 실리콘 scribing의 원리

태양전지 산업계에서 레이저의 응용은 고효율의 펄스형 laser가 실리콘 표면에 조사되었을 때 고체상태의 실리콘은 액상 또는 기상으로 상변화를 일으키는 현상을 응용한다.²⁾ 레이저는 웨이퍼 자르기, silicon ribbon trimming, 박막 태양전지의 patterning, 불순물의 확산^{3),5)}, 이온주입된 표면의 열처리용⁶⁾으로 사용되어 왔으며, 실리콘 태양전지의 금속전극 패턴형성 및 표면의 texturing에 이용된다.^{7,8)}

실리콘의 scribing을 위한 레이저는 실리콘이 증발할 동안 식 (1)과 같은 열의 흐름에 의하여 주변에 손상(damage)을 최소화하여야 하며, 펄스의 주기를 조절할 수 있고 파장이 694.3 nm인 루비(ruby), 1.06×10^3 nm인 Nd:glass와 1.06×10^3 nm인 Nd:YAG 레이저가 적합하다. 단위 면적당 열의 흐름은 실리콘 표면에서부터 식 (1)과 같이

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서, k 는 열전도도이며, ρ 는 밀도, C_p 는 heat capacity, T 는 온도, z 는 거리, t 는 시간이다. 식 (1)을 경계 조건 $T(0, t) = T_s$, $T(x, 0) = 0$, T_s 는 $t > 0$ 을 이용하여 계산하면 식 (2)와 같은 상보에러 함수로 표현되며⁹⁾,

$$T(z, t) = T_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \quad (2)$$

이는 실리콘의 scribing시 홈의 모양은 식 (2)와 같이 형성된다.

실리콘 표면의 도핑 효과, 산화막 등의 효과를 무시하면 상온에서 실리콘의 가전대-전도대(valance-conduction band)로의 광학적인 흡수는 실리콘의 밴드갭 근처인 1130 nm이하에서 일어나며, 700 nm~1100 nm에서 표면의 반사율은 큰 차

이가 없다. 레이저 빛의 흡수를 이용한 실리콘 표면의 scribing을 위하여 레이저의 파장이 1130 nm 보다 작은 루비(Ruby)나 Nd:glasss 레이저는 펄스의 주기와 scribing 속도에 제한이 있다. 그러므로 연속적인 레이저 펄스로 만들 수 있으며 10 KHz 이상의 Q-switch를 갖는 Nd:YAG 레이저가 적합하다.¹⁰⁾

그림 2는 Q-switch를 갖는 Nd:YAG 레이저의 상온에서부터 실리콘의 증발점까지의 흡수계수를 나타낸다. 상온에서 실리콘의 흡수계수는 낮지만, 실리콘 표면의 온도가 증가함에 따라 흡수계수가 급격히 증가하게 되어 더 많은 레이저의 에너지를 흡수할 수 있게 된다.¹¹⁾ 그림 3은 실리콘 표면에 레이저가 조사되었을 때, 시간의 함수로 나타낸 표면온도의 분포이다. 레이저를 이용한 실리콘 표면의 scribing시 레이저와 실리콘은 서로 연속적으로 상호작용을 한다. 즉, 레이저는 Q-switch를 이용하여 고출력의 펄스를 발생시키며, 광학계를 이용하여 실리콘 표면에 에너지를 전달한다. 실리콘에 흡수되는 레이저의 에너지는 표면온도를 증가시킨다. 표면에서 레이저빔에 의한 열의 흐름은 실리콘의 증발점(2900°C)까지 충분히 온도가 올라가며 실리콘의 증발이 일어난다. 레이저 펄스의 폭은 열적

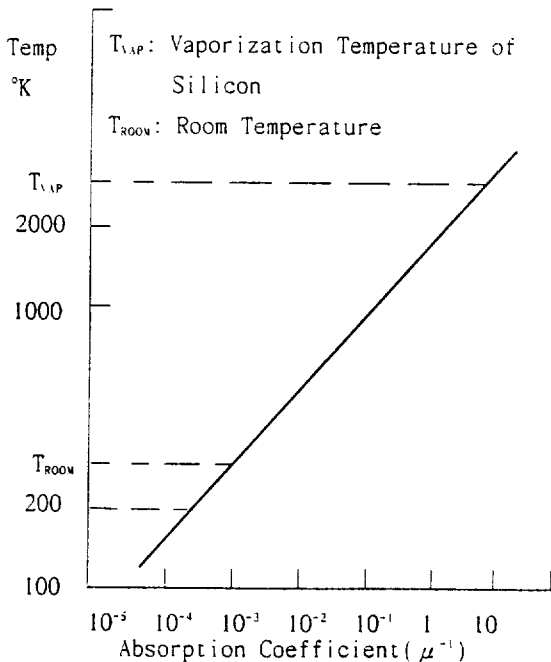


그림 2. 실리콘 표면에 1.06 μ m의 빛이 조사시 온도의 함수로서의 흡수계수

Fig. 2. Absorption coefficient for 1.06 μ m radiation in silicon as a function of temperature.

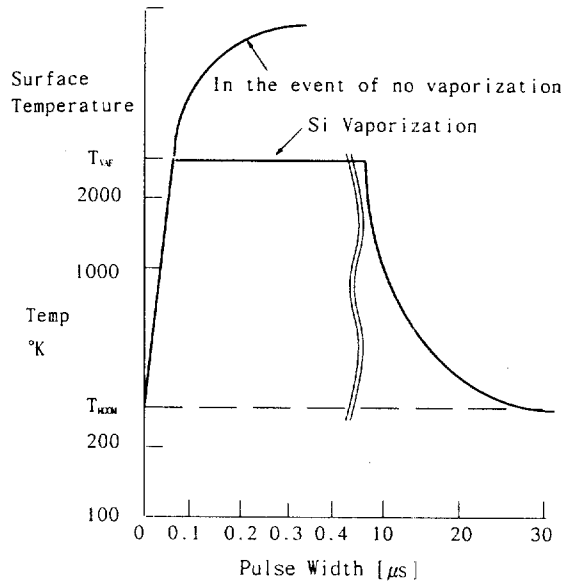


그림 3. Q-switch를 갖는 Nd:YAG 레이저에 노출된 실리콘 표면의 전형적인 온도분포

Fig. 3. Typical temperature profile for the silicon surface region exposed to a pulse from a Q-switched Nd:YAG laser

시상수보다 대단히 짧기 때문에 조사된 점으로부터 열의 흐름은 없다. 대부분의 흡수된 레이저 에너지는 실리콘을 증발시키게 소모되며, 실리콘의 순간적인 증발은 작은 원뿔모양의 홈(hole)을 형성한다. 연속되는 펄스의 중첩은 최고출력, 펄스의 폭, 중첩의 정도, spot의 크기 등에 의존하는 groove를 형성한다. 증발된 실리콘들은 매우 큰 속도를 가지고 groove의 주변으로 방출된다. 이런 실리콘 입자들은 대물렌즈의 초점 맞추기에 문제가 생기게 하며, 웨이퍼에 결함을 생기게 할 수 있다.

2.3 Nd:YAG 레이저 시스템의 구성

실리콘의 scribing을 위한 Nd:YAG 레이저 시스템은 TEM₀₀ 모드에서 3~4 W의 평균 출력을 시편까지 전달할 수 있어야 한다. 레이저 빔이 가우시안 분포를 가지는 TEM₀₀ 모드는 매우 높은 출력과 레이저 빔의 광축의 좁은 영역에 출력이 집중되어 실리콘 표면의 열의 흐름에 의한 결함이 적기 때문에 많이 사용된다. Nd:YAG 레이저는 Nd³⁺의 이온의 형태로 에너지를 축적하고 있으며, Q-switch를 사용하여 펄스모드에서 이용할 때 매우 높은 peak power를 낼 수 있다. 레이저 빔은

광학계를 통하여 실리콘 표면에 조사되며, 조사된 레이저빔은 국부적으로 실리콘을 증발하기 충분한 에너지를 갖는다. Q 스위치는 0-50 KHz로 조절이 가능하며 수십 μ s의 펄스폭을 갖는다. 레이저 빔은 광학계를 이용하여 빔을 전달하여 실리콘 표면에 도달된다. 이 때 가공가능한 groove의 깊이는 20~400 μ m, 폭은 15~40 μ m로 미국 LEE laser사의 TQ812 Nd:YAG 레이저를 이용한 Florod사의 MEL 40 레이저 시스템을 사용하였으며, 시스템의 구성은 그림 4와 같다.

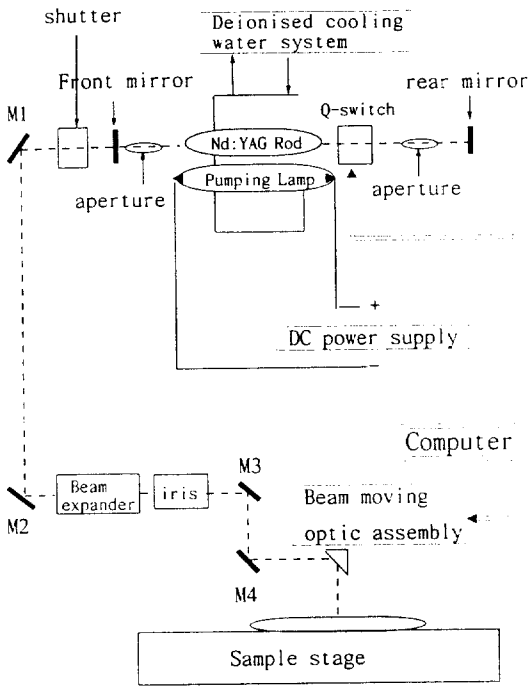


그림 4. 대략적인 Nd:YAG 레이저 시스템의 구조
Fig. 4. Schematic diagram of Nd:YAG Laser Scribing System

3. 전극함몰형 태양전지 제조를 위한 laser scribing

일반적으로 scribing시 홈의 폭과 깊이, 모양 등의 특성은 실리콘 표면에 레이저 빔의 초점을 맞추는 광학계, Q-switch의 주파수, 가공 속도, 펄스의 평균 및 최대 출력, 실리콘 표면의 평탄도와 표면구조 및 구성등에 의하여 달라진다. 또한 Nd:YAG 결정의 온도, pumping lamp에 공급되는 전류, 펄스발생기(Q-switch)의 왜곡등에 의해 영향을 받는다. 특히 레이저 빔의 표면적이 7x7 cm인

태양전지 표면을 가로와 세로로 scribing하므로 좋은 초점을 유지하기 위해 표면의 평탄도를 유지하지는 것이 중요하다.

전극함몰형 태양전지의 금속전극은 주로 구리(Cu)이며, 구리의 전기전도도는 높기 때문에 태양전지의 면적과 직렬저항 성분을 고려하여 전극 제조를 위한 홈의 넓이는 약 20 μ m, 깊이는 30~50 μ m이다. 스크린 프린팅 태양전지의 에미터는 접촉 저항을 줄이기 위하여 50~60 Ω/\square 로 강하게 도핑하는데 반하여, 전극함몰형 태양전지는 100~200 Ω/\square 의 낮은 에미터 도핑효과를 고려하여 두 금속전극간의 거리는 1.2 mm로 한다.^{11,12)} 제조된 전극함몰형 태양전지의 면적이 45 cm²이며, 전면 패턴은 그림 5와 같다.

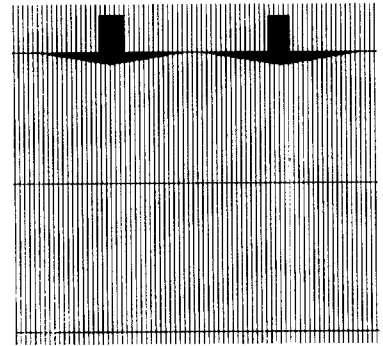


그림 5. 전극함몰형 태양전지의 전면 전극패턴
Fig. 5. Groove pattern for laser scribing

BCSC의 홈패턴을 형성하기 위하여 사용된 MEL 40 시스템은 광학렌즈와 반사경을 조합하여 레이저의 빛을 시편표면까지 전달하였다. MEL 40 시스템을 이용한 레이저 scribing은 홈이 형성후 12% KOH 용액에서 20분간 에칭하여 실리콘 슬래그(slag)를 제거한다. 이 때 beam expander와 iris 사이에서 측정된 Nd:YAG 레이저의 출력은 TEM₀₀ 모드에서 최대 6 W이었다. 레이저를 이용한 scribing은 실리콘 표면의 용융 및 증발을 이용한 과정이다. 실리콘이 증발하기 위한 레이저 펄스의 최대 및 평균 출력은 레이저에 공급되는 pumping 램프의 출력에 의하여 결정되어 groove의 폭과 깊이를 일차적으로 결정한다. 그림 6은 pumping lamp의 출력변화에 의한 groove의 폭과 깊이를 나타내며, laser의 pumping lamp에 비례하여 groove 깊이가 변함을 알 수 있다.

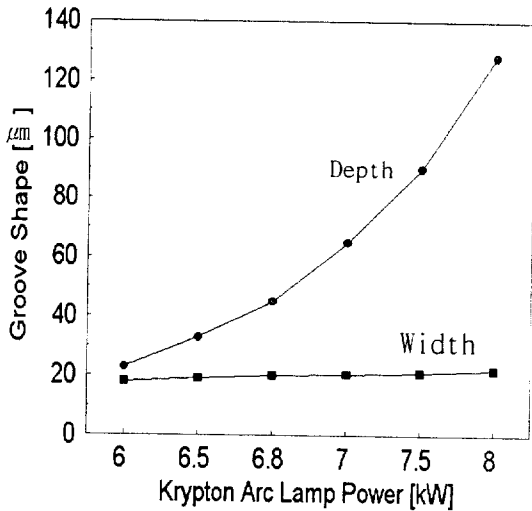
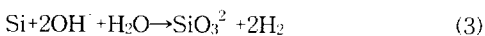


그림 6. 레이저 출력에 따른 홈의 폭과 깊이의 변화(scan rate: 2.5cm/s, pulse frequency: 10.5 kHz, Beam expander: 20, iris: 100)

Fig. 6. Variations of groove width and depth with changes in pumping lamp power (scan rate: 2.5 cm/s, pulse frequency: 10.5 kHz, Beam expander: 20, iris: 100)

레이저 헤드에서 샘플까지 정교하게 정렬된 MEL 40시스템은 2개의 렌즈가 조합된 beam expander에 의하여 진공척위의 샘플에서 초점의 위치가 변화한다. 그림 7은 scribing에 영향을 미치는 요소들 중 광학계에 의하여 초점거리가 달라졌을 때 beam expander의 위치변화에 따른 groove의 폭과 깊이를 나타낸다.

그림 8은 레이저를 이용하여 scribing한 후 groove에 남아 있는 실리콘 슬래그를 KOH 용액으로 20분간 에칭한 후의 홈모양을 나타낸다. KOH용액은 12%(2.1 M)이며, 온도는 52 °C이다. 이 때의 화학반응은 식 3과 같으며, 실리콘은 수산화 이온에 의해 산화되어 potassium (meta)silicate와 수소를 발생시킨다. 그림 8의 실리콘 표면은 KOH 용액이 (100)면과 (111)면의 원자배열의 밀도차에 의한 이방성 에칭(anisotropic etching)된 모양을 나타내며, 이때의 홈의 폭은 22 μm이며 깊이는 38 μm이다.



Nd:YAG 레이저를 이용하여 폭이 20 μm, 깊이가 50 μm인 groove를 형성한 후 Ni, Cu, Ag의 무전해 도금을 이용하여 제조된 전극합물형 태양전지를 표 1과 같은 공정을 이용하여 제조하였다. 제조후

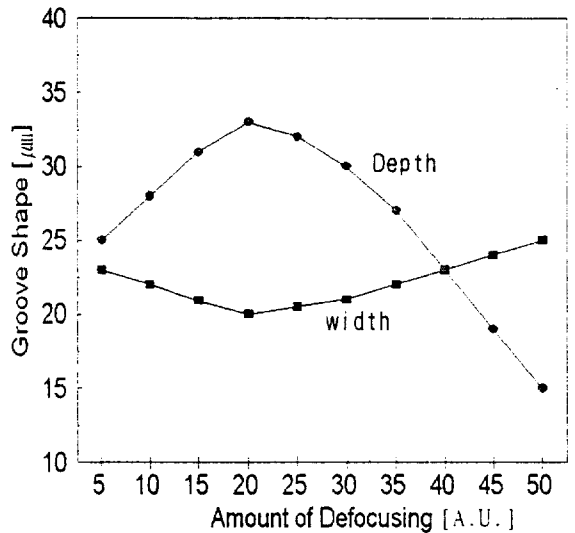


그림 7. 대물렌즈에서 시편거리의 초점거리에 따른 홈의 폭과 깊이의 변화

(lamp power: 6.5 kW, pulse frequency: 10.5 kHz, scan rate: 2.5 cm/s, iris: 100)

Fig. 7. Variation of groove width and depth with changing of object lens to sample spacing(lamp power: 6.5 kW, pulse frequency: 10.5 kHz, scan rate: 2.5 cm/s, iris: 100)

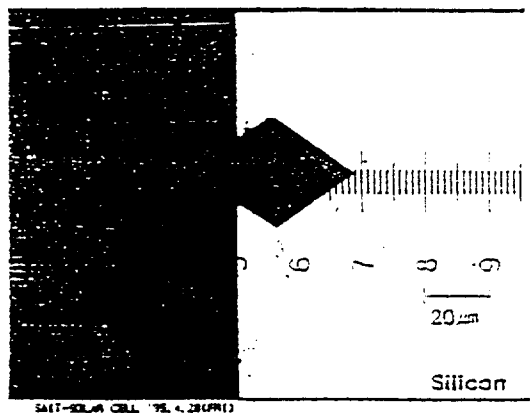


그림 8. KOH 에칭후의 홈의 모양(x 500 배율, lamp power:6.5 kW,scan speed:2.5 cm/s, pulse frequency:6.5 kHz,beam expander: 20, iris: 100)

Fig. 8. Phptgraph of Groove after KOH etching(x500 mag, lamp power:6.5 kW, scan speed:2.5 cm/s. pulse frequency: 6.5 kHz, beam expander: 20, iris: 100)

효율을 측정하였을 때 상업용으로 널리 시판되는 스크린 프린팅 태양전지의 효율 12.8 %와 비교하여, 전극함몰형 태양전지의 제조시 세계최고 수준인 18.8 %의 높은 효율을 얻었다. 효율 측정은 자체 제작된 측정기를 이용하였다.¹³⁾ 제작된 전극함몰형 태양전지의 효율과 상업용 스크린 프린팅 태양전지의 효율 및 기타 특성상수의 차이는 표 2와 같다.

표 2. 스크린 프린팅 태양전지와 전극함몰형 태양전지의 특성

Table 2. The characterization of sreen printing solar cell and buried contact solar cell

상수 cell	Eff (%)	Voc (mV)	Isc (A)	Jsc (mA)	Fill factor
SP ¹⁾	12.8	588.5	1.57	31.47	66.3
BCSC ²⁾	18.8	651.0	1.67	37.1	77.8

- 1) SP - 스크린 프링팅 태양전지(screen printing solar cell)
- 2) BCSC - 전극함몰형 태양전지(Buried Contact Solar Cell)

5. 결 론

BCSC 태양전지 제조시 금속전극 영역을 형성하기 위하여 파장길이가 1.064 μm 인 고효율 Nd:YAG 레이저를 이용한 실리콘의 scribing은 BCSC 제조시 태양전지의 구조를 결정하므로 금속전극 사이의 거리, 직렬저항, 금속전극에 의한 빛의 손실, 접촉저항 등을 고려하여 최적의 홈 모양을 결정해야 한다.

Nd:YAG 레이저 시스템을 이용한 실리콘의 scribing시 홈의 폭과 깊이, 모양 등의 특성은 시편 표면에 레이저 빔의 초점을 맞추는 광학계, Q-switch의 주파수, 가공 속도, 펄스의 평균 및 최대 출력, 실리콘 표면의 평판도와 산화막과 같은 표면구조 및 구성등에 의하여 달라진다. 전극함몰형 태양전지의 제조를 위해 사용된 레이저 시스템은 MEL 40 시스템이며, TEM₀₀ 모드에서 최대 6 W의 출력을 광학계에 의하여 시료까지 전달할 수 있는 Q-switch를 갖는 Nd:YAG 레이저 시스템이다. 이 시스템을 광학계를 정렬한 후, 실리콘 시편을 scribing하였을 때 18~23 μm 의 폭과 20~200 μm 의 홈을 형성시킬 수 있었다.

전극함몰형 태양전지 제조를 위해 본 실험에서는 홈의 폭을 20 μm , 깊이를 50 μm 로 형성시켰으며, 금속전극간의 거리는 1.2 mm로 전극패턴을 형성하였다. 홈내를 무전해 도금으로 전극을 형성한

후, I-V 측정기로 효율을 측정하였을 때 상업용으로 널리 시판되는 스크린 프린팅 태양전지의 효율 12.8 %와 비교하여, 전극함몰형 태양전지는 세계최고 수준인 18.8 %의 높은 효율을 얻었다.

참 고 문 헌

1. A. Cuevas, "Solar Electricity", E. Lorenzo Ed., PROGENSA, pp.270-279, (1994).
2. A. Polman, W. Sinke, M. Urtormark, and M. Thompson, J. Material Res., Vol. 4, Jul/Aug, p.843. (1989).
3. G. Turner, D. Tarrant, D. Aldrich, R. Pressley, and R. Press, Conf. Rec. of 16th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, p.775, (1982).
4. J. Fan, T. Deutsch, G. Turner, D. Erhlich, R. Chapman and R. Osgood, Conf. Rec. of 16th IEEE Photovoltaic Specialist conference, p.432, (1982).
5. K. Ibbs and R. Osgood, Laser chemical processing form microelectronics. Cambridge Univ. Press, pp.146-166, (1989).
6. J. Katzef, M. Lopez, and D. Burger, Conf. Rec. of 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, p.437, (1981).
7. M. Green, C. Chong, F. Zhang, A. Sproul, J. Zolper and S. Wenham, conf Rec. of 20th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, p. 411, (1988).
8. S. Narayanan, S. Wenham and M. Green, Proc. of 4th international Phovoltaic Science Engineering Conference, p.111, (1989).
9. S. S. Charschan, "Laser in industry", Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 159-176, (1972)
10. W. W. Duley, "Laser Processing and Analysis of Materials", Plenum Press, New York, pp.177-235, (1983) .
11. S. Wenham, "Ph.D. Thesis - Laser Grooved Silicon Solar Cell", Univ. of New South Wales, Australia, (1986).
12. Chee Mun Chong, "Ph.D. Thesis - Buried Contact Solar Cell", Univ. of New South Wales, Australia, (1989).
13. 조영현, 조은철, 이수홍, "태양전지의 효율측정", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, pp. 163-166, (1995)