

A Study on the Scribing of FTO using Pulsed Nd:YAG Laser

金熙濟\* · 朴盛駿\*\* · 孫珉圭\*\*\* · 李東吉\*\*\* · 李庚俊†  
 (Hee-Je Kim · Sung-Joon Park · Min-Kyu Son · Dong-Kil Lee · Kyoung-Jun Lee)

**Abstract** - In material processing, a laser system with optimal laser parameters has been considered to be significant. Especially, the laser scribing technology is thought to be very important for fabricating DSSC(Dye sensitized solar cell) modules with good quality. Moreover, the TEM<sub>00</sub> mode laser beam is the most dominant factor to decide the IPCE(Incident photon to current conversion efficiency) characteristics. In order to get the TEM<sub>00</sub> mode, a pin-hole is inserted within a simple pulsed Nd:YAG laser resonator. And the spatial field distribution is measured by using three size pin-hole diameters of 2.0, 6.0 mm respectively. At that moment, each case has the same laser beam energy by adjusting the discharge voltage and pps(pulse per second). From those results, it is known that the pin-hole size of 2.0 mm has the perfect TEM<sub>00</sub> mode. In addition, at the charging voltage of 1000 V, 10 pps and the feeding speed of 1.11 mm/sec, the SEM photo of FTO(Fluorine-doped tin oxide) thin film layers shows the best scribing trace.

**Key Words** : Nd:YAG Laser, Scribing, FTO(Fluorine doped tin oxide), PIC, DSSC(dye sensitized solar cell)

1. 서 론

최근 레이저는 물질가공, 산업장비, 의료장비 등 많은 응용 분야에서 활용되어 각광을 받고 있다[1-5]. 물질 가공 분야에서 레이저 기술의 응용 분야는 더욱 더 증가하고 있는 추세에 있다. 레이저 가공의 특징은 비접촉이며, 고속의 플렉시블한 가공이 가능하므로 산업 현장에서의 정밀가공에 적합하다. 이러한 레이저 시스템은 발전 방법에 따라 연속형 레이저와 펄스형 레이저로 분류된다. 특히 펄스형 레이저 시스템은 연속형 레이저 시스템과 달리, 펄스폭을 조절함으로써 피크출력을 높일 수 있으며, 펄스 반복율의 적절한 제어를 통하여 스크라이빙, 에칭, 트리밍, 마킹 등의 가공에 탁월한 성능을 보인다[6-7].

지난 수십 년 간 신형 태양전지개발을 위해서 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중에서 염료감응형 태양전지(DSSC: dye sensitized solar cell)는 1991년 스위스 연방기술연구소의 Graetzel Lab.(LPI)에 의해 개발된 이래, 단가가 Si 태양전지의 1/3에 지나지 않고, 공정이 단순하여 많은 연구자들로부터 관심을 불러 일으켰다[8-10]. 이에 많은 연구가 진행되고 있으며, 실용화를 위한 여러 가지 노력이 진행 중이다. Si 태양전지 수준의 상용 출력을 얻기 위해서는 DSSC의 대면적화가 필수적이다. 그러나 DSSC는 FTO와 같은 투

명 전도성 기판(TCO: Transparent conduction oxide)으로 제작되므로 제한적인 전도성으로 인한 성능 저하로 인하여, 대면적화를 이루기가 어려운 결점을 가지고 있다. 더욱이 DSSC가 대면적화 됨에 따라 효율이 떨어지는 현상은 상용화를 앞두고 해결해야 할 시급한 과제로 대두되고 있다. 대면적화를 이루기 위함과 동시에 내부저항을 저감시키기 위한 방법에는 여러 가지가 있다. 일반적으로 내부에 그리드 전극을 넣게 되는데, 보통 Ag 그리드를 전하 수집자로 사용하여 대면적 DSSC셀의 성능을 향상시키고 있다[11-14]. 그리드 전극을 넣기 위해서는 먼저, 투명 전도성 박막층인 FTO 부분을 원하는 그리드 패턴으로 식각하는 공정이 매우 중요하다. 또한 다른 방법으로는 TiO<sub>2</sub> 전도층이 도포되는 유효면적과 DSSC 상판과 하판의 실링이 되는 부분사이의 공간을 레이저 식각하여 투명전극의 면적을 최소화하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방식을 적용하였다.

제 3세대 태양전지로써 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있는 DSSC의 효율을 향상시키기 위해서는 유리판 위의 투명도전 층인 FTO 박막부분만을 식각하는 기술이 요구되고 있다. 이러한 투명 도전 층의 식각을 위하여 기존의 방법인 Sand-Blasting 방법을 이용하여 물리적인 식각을 할 경우, 공정속도와 정밀도가 현저하게 떨어지는 단점이 있다. 그리고 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용할 경우 FTO 박막 식각은 가능하지만 필요이상의 고출력에 따른 에너지 낭비와 미세 가공(MEMS)이 어렵다는 문제점이 있다. 이에 비해 Nd:YAG 레이저는 식각에 필요한 최저 에너지로 미세가공이 가능하며 X-Y 테이블을 활용할 경우, 선택된 영역을 정확하게 신속하게 가공할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 PIC (Programmable integrated circuit) 원 칩 마이크로프로세서로 제어되는 펄스형 Nd:YAG

\* 正 會 員 : 釜山大學 電子電氣工學科 敎授  
 \*\* 正 會 員 : 釜山大學 電子電氣工學科 博士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 釜山大學 電子電氣工學科 碩士課程  
 † 敎 授 助 手, 學 生 會 員 : 釜山大學 電子電氣工學科 碩士課程  
 E-mail : kyoungjun@pusan.ac.kr  
 接 受 日 子 : 2008年 5月 20日  
 最 終 完 了 : 2008年 6月 5日

레이저를 이용하여 최적의 FTO 표면 식각 특성을 결정하는 4 가지 파라메타인 충전전압, 펄스 반복율, 핀 홀 개구직경, 그리고 X-Y 테이블 이동속도에 대한 결과를 제시하였다. 위에서 얻어진 파라메타를 바탕으로 한 레이저 식각을 통해 DSSC를 제작한 결과 7.04%의 향상된 출력전류를 얻었다.

2. 실험 장치

식각을 위한 펄스형 Nd:YAG 레이저 시스템은 공진기 내부를 타원 구조로 하여, 그 초점 위치에 Xe 플래시 램프 및 Nd:YAG 로드(직경 6.0mm)를 설치하고, 램프에서 나온 모든 빛이 Nd:YAG 로드(직경 6.0mm)에 모이게 한다. 양쪽의 두 개의 거울(전반사경 반사율: 99.5%, 반반사경 반사율: 80%)에 의하여 레이저 작용을 일으킨다. 그리고 수냉식 냉각장치, 전원 공급장치, 출력 빔 무손실 전달을 위한 전반사경, Pin hole, 집광기(Focusing lens), X-Y 테이블로 구성되어 있다. 전체 시스템의 개략도는 그림 1에 나타내었다.

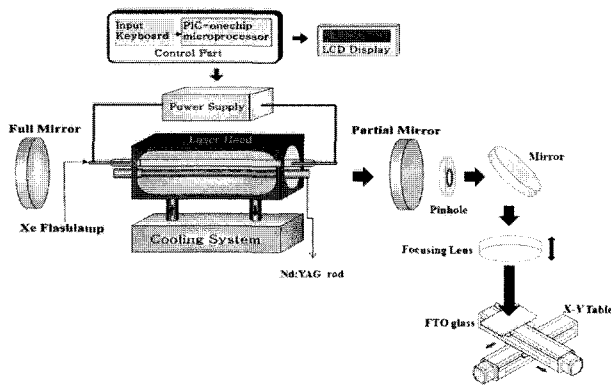


그림 1 FTO 식각을 위한 펄스형 Nd:YAG 레이저 시스템 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of pulsed Nd:YAG laser system for FTO scribing

펄스형 Nd:YAG 레이저를 구동하기 위한 전원장치로서 순차 충전방전 회로(SCADC : sequential charge and discharge circuit)를 사용하였다. 그림 2는 SCADC의 전체적인 구조를 나타내고 있다.

펄스형 Nd:YAG 레이저의 동작 순서는 다음과 같다. 먼저, 시머(Simmer)회로를 통해 Xe 플래시 램프에 DC 1 kV를 인가한 후, 시머 트리거(Simmer trigger) 회로를 수 초간 동작시킨다. 플래시 램프에서 스트리머(Streamer) 방전이 일어난다. 이 상태에서, SCR Switch 1 이 ON 되면 커패시터 C1에 입력 에너지가 충전된다. 충전전압이 입력전압과 같아지게 되면 SCR은 자동적으로 turn off 되게 된다. 그 다음에 SCR Switch 2 가 ON 되는 순간 커패시터 C1에 충전되어 있던 에너지는 플래시 램프로 전달된다. 두 개의 SCR에 대한 트리거 신호는 제어부의 16F877 PIC one-chip microprocessor 에 의해서 순차적으로 제어된다. 펄스 반복율(pps)은 제어부와 연결된 키 보드에 의해서 외부적으로 설정할 수 있다. 그림 3은 각각의 SCR에 들어가는 게이트 트리거 신호를 나타내고 있다. 플래시 램프를 발진시키기 위

한 두 개의 펄스 신호는 키 보드에서 입력된 pps에 따라 정확하게 발생되고 있음을 알 수 있다. 그리고 SCR 게이트 신호로 24V가 들어가고 있는데 이것은 레이저 전원 회로부의 고압 환경으로 인한 신호 왜곡 현상을 줄이고 SCR의 turn on을 확실하게 하기 위함이다.

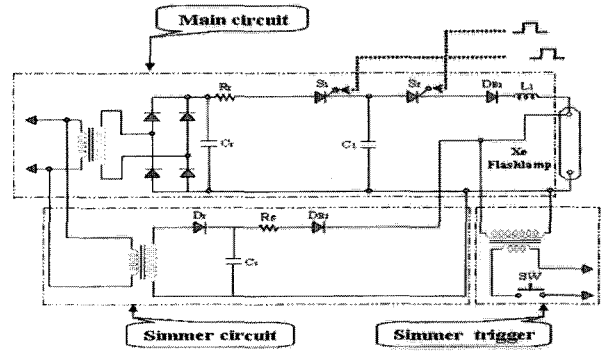


그림 2 순차 충전방전 회로

Fig. 2 The sequential charge and discharge circuit

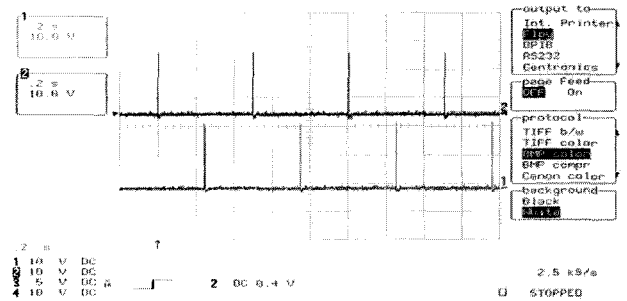


그림 3 플래시 램프 구동을 위한 두 개의 게이트 트리거 신호

Fig. 3 Two gate trigger signals which ignite the flash lamp

DSSC 제작 공정 중에서 수십  $\mu\text{m}$  두께의 나노 산화물 전극을 투명전도성 기판에 만들기 위해서 450°C에서 1시간 정도 소성하는 공정이 있다. 따라서 DSSC 용 투명전도성 기판으로 온도 안정성을 가지는 FTO를 사용한다. FTO 식각을 위한 열전달 모델은 그림 4와 같다. 투명 전도성 기판은 유리 기판과 FTO로 구성된다. 레이저 빔이 FTO 표면에 조사 되면 빛이 열에너지로 변환되어 흡수된다. 이 열에너지는 유리 기판에는 흡수되지 않고, FTO 층에 흡수되어 식각된다. 레이저 빔의 에너지가 커질수록 식각되는 정도도 증가한다. 따라서 레이저 빔의 에너지는 FTO를 식각하는데 있어서 중요한 요인 중의 하나이다. 레이저 빔의 에너지는 다음 식에 의해서 계산된다.

$$Energy = \frac{1}{2} CV^2 \times (pps) \quad (1)$$

위 식에서 C는 커패시터의 용량, V는 커패시터에 충전되는 전압, pps는 펄스 반복율을 의미한다. 레이저 출력 에너지는 충전되는 전압과 pps를 조절하여 변환할 수 있으며, 충전 전압과 pps는 FTO를 식각 조건에 영향을 주는 변수가 된다. FTO 표면에 집광기를 통과한 집중된 레이저 빔이 도달하면 열에너지로 변환되어 국부적인 온도변화에 의해 식

각된다. 다음은 FTO 표면에서의 열확산 방정식[15]을 나타낸 것이다.

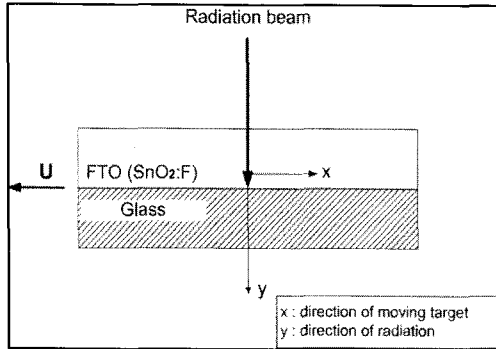


그림 4 FTO 식각을 위한 열전달 모델

Fig. 4 The heat transfer model for FTO scribing

$$\rho c U \frac{\partial T}{\partial x} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial q_{rpi}}{\partial y} \quad (2)$$

$$q = I_0 \exp(-\beta y) \quad (3)$$

(T : 온도[°C], ρ : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>], c : 온도상수[J/kg°C], k: 열전도도[W/m°C] β : Nd:YAG 레이저 빔의 흡수계수[1.06 μm/m], I<sub>0</sub> : 레이저 빔의 초기 에너지-빔 사이즈에 의해 결정됨.

$$Dia. = 1.22 * \left( \frac{\lambda * F}{D} \right) \quad (4)$$

(Dia. : 빔의 직경, λ : 파장, F : 초점 거리)

(2)식에서 열 확산은 X-Y 테이블의 이동 방향과 속도에 영향을 받고 있음을 보여준다. 이 식에서 알 수 있듯이 X-Y 테이블의 이동 속도를 제어함으로써 열 확산을 조절할 수 있다. 그리고 (3)식에서 레이저 빔의 반경 또한 식각 조건에 영향을 주는 것을 보여준다. 빔 크기는 다음 식[16]에 의해서 계산된다. 따라서 본 연구에서는 FTO 식각에 영향을 주는 4 개의 파라메타인 충전전압, 펄스 반복율, 빔 직경, 그리고 X-Y 테이블의 이동속도에 따른 최적의 식각 특성을 파악하고자 반복적인 실험을 수행하였다. 먼저 실험에 사용된 TCO의 광학적 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1 TCO의 광학적 특성

Table 1 Optical Characteristics of TCO

Characteristics	Value
Glass type	sodalime
Glass thickness	3.0mm
Conducting layer	FTO (fluorine tin oxide, SnO <sub>2</sub> :F)
Resistivity	~8 Ω/square
Transmission	> 65% from 500nm to 1000nm

### 3. 결과 및 검토

펄스형 Nd:YAG 레이저의 출력경을 통하여 나오게 되는 빔의 직경은 6.00mm이며, 핀 홀을 사용하여 최대 빔 직경을 2.00mm까지 줄였다. 그리고 최종적으로 집광기를 통하여 빔 에너지의 집중도를 높여 FTO 표면 식각을 위한 반복적인 실험을 수행하였다. 펄스 반복율 제어 프로그램을 C-언어로 작성하여, PIC one-chip microprocessor 에 탑재하여 외부적으로 키 보드에 입력시켜 pps를 조절하였다. 또한 집광된 레이저 빔의 위치는 고정된 상태에서 X-Y 테이블의 이동 속도를 변화시켜 가며 식각특성을 파악하였다. X-Y 테이블의 안정적인 동작과 탈조 방지를 위해 Mitsubishi electronics.의 400W급 HC-PQ43 시리즈의 AC 서보 모터를 사용하였다. 특히 HC-PQ43 시리즈는 분해능이 4000 p/rev 에 이르는 엔코더를 탑재하여 다양한 구동조건에서도 부드러운 운전이 가능하다. 일정한 속도로 진동 없이 시료를 이동시키기 위하여 속도를 최대한 늦춰 1.11 mm/s의 이동속도로 실험을 진행하였다. 최적 이동속도에서 커패시터에 충전되는 전압과 펄스 반복율 조절하면서 반복적인 실험을 수행하였다. 전압과 펄스 반복율이 증가하면 (1)식에 따라 레이저 빔 에너지도 증가한다. 레이저 빔이 FTO 박막 층에 도달하여 표면 온도가 증가하게 되고, 끓는점까지 도달하면 표면이 기화하기 시작하므로, 기화 시점의 부근에서 실험을 진행하며 최적인 파라메타를 도출하였다. 커패시터에 충전되는 전압은 100V 단계로 승압시켜 가며, 600V에서 1200V까지 변화시켰으며, 펄스 반복율은 최소 5 pps에서 최대 15 pps까지 가변시켜 가며 최적의 펄스반복율을 도출하였다.

표 2 충전 전압과 pps에 따른 FTO 식각

Table 2 FTO scribing according to the charging voltage and pps at 1.11 mm/s and d=2.00mm (s: short circuit, ∞: open circuit)

Voltage \ pps	600	700	800	900	1000	1100	1200
5	s	20(s)	26(s)	43(s)	54(s)	104	180
6	s	24(s)	25(s)	42(s)	55(s)	128	216
7	s	26(s)	34(s)	43(s)	58(s)	140	∞
8	s	25(s)	40(s)	45(s)	63	149	∞
9	s	26(s)	42(s)	47(s)	79	∞	∞
10	20(s)	26(s)	44(s)	51(s)	∞	∞	∞
11	22(s)	27(s)	47(s)	77	∞	∞	∞
12	22(s)	27(s)	47(s)	80	∞	∞	∞
13	25(s)	28(s)	49(s)	∞	∞	∞	∞
14	26(s)	29(s)	50(s)	∞	∞	∞	∞
15	29(s)	37(s)	55(s)	∞	∞	∞	∞

표 2에서 보는 것처럼 600에서 800V까지는 pps를 변화시켜도 식각이 되지 않았다. 충전전압이 900V이고 13 pps 일 때부터 식각이 되기 시작하여서 무한대(∞)의 저항값을 보인다. 식각이 되는 조건들 중에서 최저 에너지로 식각이 될 때가 최적이라 할 수 있다. (1)식을 이용하여 충전 에너지를 계산한다. 이 때, 커패시터(C)값은 20μF용량의 커패시터 18 개를 병렬 연결하여 360μF가 된다. 그리고 Nd:YAG 레이저 시스템의 최대 효율은 3%임을 고려하였다.

이러한 계산을 통하여 최저 에너지로 최적 식각 상태를

얻을 수 있는 조건은 충전 전압은 1000V, 10 pps, X-Y 테이블 이동속도는 1.11 mm/s 그리고 핀 홀 개구직경이 2.00mm 일 때이다. 그림 6에서 점선 위 부분이 식각이 되는 영역이며, 최저 지점이 10 pps 지점에서 발생함을 확인하였다.

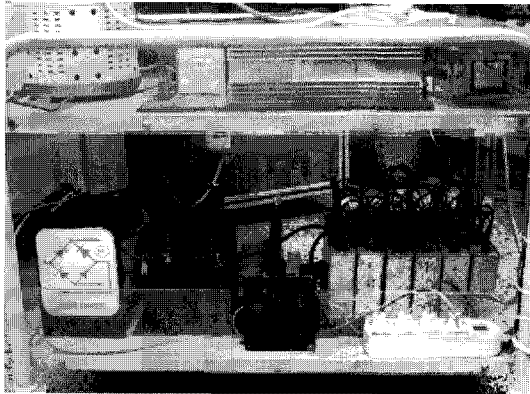


그림 5 펄스형 Nd:YAG 레이저 전원 회로부  
Fig. 5 Power supply for a pulsed Nd:YAG laser system

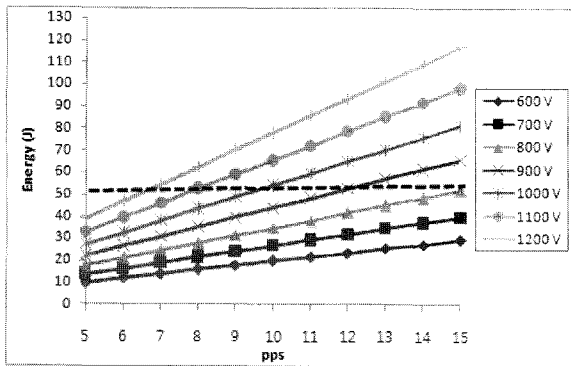


그림 6 충전 전압과 pps에 따른 레이저 빔 에너지  
Fig. 6 Laser beam energy according to charging voltage and pps

식각된 FTO의 표면은 전자 주사 현미경(SEM: scanning electron microscope, Hitachi S-4200)으로 관찰하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 (a)는 (b)의 조건에 비해 전압이 낮고, 핀 홀 직경(d)이 커서 식각된 부분이 매끄럽지 못함을 보여주고 있다.

$$N_F = \frac{a^2}{\lambda L} \tag{5}$$

여기서,  $\lambda$  : Nd:YAG 레이저의 파장(=1.064 $\mu$ m) L : 공진기의 길이(=0.85m) a: 핀 홀 개구 반경

일반적으로 Fresnel 수가 0.5 ~ 2인 경우 회절 손실은 크나 TEM<sub>00</sub> 모드를 만들기 쉽다고 알려져 있다[17]. 식 (5)에 대입해 보면, 핀 홀 개구 직경 d가 2.00mm, 6.00mm 일 때, 각각 N<sub>F</sub>는 1.11, 9.95이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 개구직경이 작은 경우 Gaussian 에너지 분포를 가지는 TEM<sub>00</sub> 모드이므로 최적의 식각 상태를 보이고 있다.

그림 7의 (b) 조건에서 FTO를 식각하여 유효면적이 0.25 cm<sup>2</sup> 인 DSSC를 제작하였다. 그림 8은 제작한 DSSC를

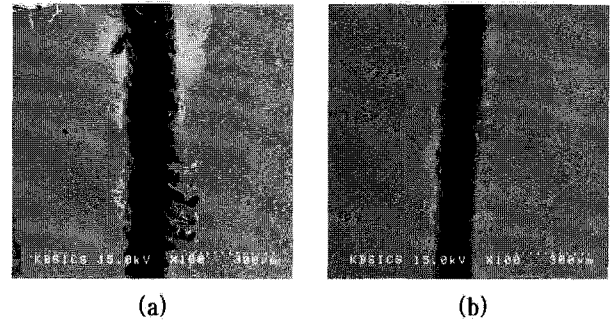


그림 7 FTO 식각 면의 주사 현미경 사진  
Fig. 7 The SEM image of scribed FTO surface  
(a) 600V, 10 pps, 1.11 mm/s and d=6.00mm  
(b) 1000V, 10 pps, 1.11 mm/s and d=2.00mm

솔라 시뮬레이터(Model 2400, Keithley Instrument, Inc.)로 표준 시험 조건(AM 1.5, 100mW/cm<sup>2</sup>, 온도 25°C)에서 측정하여 얻은 I-V 곡선이다. 회색선이 기존 방식으로 제작한 DSSC의 곡선이고, 검은선이 식각된 FTO로 제작한 DSSC의 곡선이다. 그 결과 7.04%의 출력 전류가 향상되었으며, 그래프를 통해 출력전류에 따른 효율 향상을 확인하였다.

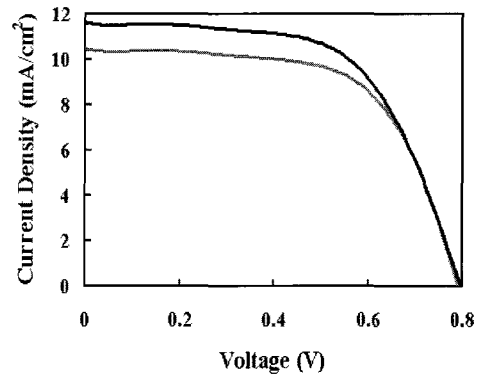


그림 8 염료감응형 태양전지(유효면적: 0.25 cm<sup>2</sup>)의 I-V Curve  
Fig. 8 I-V curve of 0.25 cm<sup>2</sup> DSSC

#### 4. 결 론

레이저 시스템 구동을 위한 전원 장치로서 SCADC회로를 사용하였으며, 출력 펄스 제어를 위하여 PIC one-chip microprocessor를 탑재하였다. 식각에 영향을 주는 파라메타를 열 전달 모델과 에너지 밀도 방정식으로 설명하였고, 충전 전압, 펄스 반복율, 핀 홀 개구직경, 그리고 X-Y 테이블 이동속도의 4 가지 중요 파라메타를 파악하고자 반복적인 실험을 수행하였다. 그 결과, X-Y 테이블 이동속도를 1.11 mm/s로 고정한 상태에서, 충전 전압 1000V, 펄스 반복율 10 pps, 그리고 TEM<sub>00</sub> 모드가 얻어지는 핀 홀 개구직경이 2.00mm인 것을 확인하였다. DSSC의 투명전극 식각을 통해 표면저항을 감소시킨 결과, 향상된 전지의 출력 특성을 얻었다. DSSC 제작시 투명전극의 면적을 줄이는데 한계가 있지만, 레이저 식각을 이용하여 투명전극의 전도성을 감소 시킴으로써 광 입사면적을 줄이지 않고도 표면 저항을 감소시키는 효과를 얻어 7.04%의 향상된 출력 전류를 얻었다.

**감사의 글**

본 과제는 2008년도 한국학술진흥재단 (과제번호: D00283)의 학술연구비 지원에 의한 연구이며 교육과학기술부, 지식경제부, 노동부의 출연금으로 수행한 산학협력 중심대학 육성사업의 연구결과물입니다. 관계부처에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

[1] Hee-Je Kim, Eun-Soo Kim, Dong-Hoon Lee, "The development of a high repetitive and high power Nd:YAG laser by using by a zero-current switching resonant converter", Optics & Laser Technology 30, pp.199-203, 1998

[2] Hee-Je Kim, Jin-Young Choi, Su-Ypung Kwak, Su-Weon Kim, Byoung-Dae Min, Jong-Han Jung and Jung-Hwan Hong, "Long pulse generation technology of an Alexandrite laser system for hair removal", KIEE International Transactions on EA, Vol. 3-C, No.4, pp.155-160, 2003

[3] Hee-Je Kim, Keun-Ju Song, Sung-Jin Park, Hyun-Woong Seo, Ho-Sung Kim, Jin-Young Choi and Sung-Joon Park, "Deduction of optimal conditions for acrylic etching technique by using CO2 laser", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol 2, No 1, pp.106-111, 2007

[4] Orazio Svelto, Principle of lasers (Plenum, New York, 1982)

[5] Kugler T R, Branch H N in : Photonics Spectra , USA, Vol. 26, no. 5, pp.165-166, 1992

[6] Yasutomo Fujimori, Proc. of LAMP'92, Nagaoka, pp.981 - 986, 1992

[7] Kenichi Iga, Miles R B, Fundamentals of laser optics (Plenum, New York, London), pp.318 - 337, 1994

[8] B. O'Regan, M. Grätzel, "Optical electrochemistry I: steady-state spectroscopy of conduction band electrons in a metal oxide semiconductor electrode", Chemical Physics Letters, Vol.353, pp.737-739, 1991

[9] A. Hagfeldt, B. Didriksson, T. Palmqvist, H. Lindstrom, S. Sodergren, H. Rensmo, S.E. Lindquist: Solar Energy Mater. Solar Cells 31, pp.481, 1994

[10] A. Hagfeldt and M. Grätzel, "Molecular Photovoltaics", Acc. Chem. Res. 33, pp. 269 - 277, 2000

[11] R.Sastrawan, J.Beier, U.Belledin, "A glass frit-sealed dye solar cell module with integrated series connection", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 90, Issue 11, pp.1680-1691, 2006

[12] Won Jae Lee, Easwaramoorthi Ramasamy, Dong Yoon Lee, Jae Sung Song, "Grid type dye-sensitized solar cell module with carbon counter electrode", Journal of Photochemistry and Photobiology A, Vol. 194, Issue 1, pp.27-30, 2008

[13] Won Jae Lee, Easwaramoorthi Ramasamy, Dong Yoon Lee, Jae Sung Song, "Dye-sensitized solar cells: Scale up and current - voltage characterization", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, Issue 18, pp.676-1680, 2007

[14] Easwaramoorthi Ramasamy, Won Jae Lee, Dong Yoon Lee, Jae Sung Song, "Portable, parallel grid

dye-sensitized solar cell module prepared by screen printing", Journal of Power Sources, Vol. 165, Issue 1, pp.446-449, 2007

[15] Yasuo Kurosaki, "Radiative heat transfer in plastic welding process", Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 93, pp.25-41, 2005

[16] Ming-Fei Chen, Yu-Pin Chen, Wen-Tse Hsiao, Zhi-Peng Gu, "Laser direct write patterning technique of indium tin oxide film", Thin Solid Film, 515, pp.8515-8518, 2007

[17] Fox, A.G., Tingye Li, "Modes in a maser interferometer with curved and tilted mirrors", Bell Systems Tech. J., 40, pp.453, 1961

**저 자 소 개**



**김희제 (金熙濟)**

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교 공대 전기공학과 졸업. 1982년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 전기공학과 교수 재직 중.



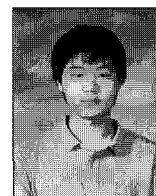
**박성준 (朴盛駿)**

2000년 동의대학교 공대 전기공학과 졸업. 2002년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 현재 한국수력 원자력 발전소(고리) 근무 중.



**손민규 (孫珉圭)**

1982년 6월 7일생. 2008년 부산대학교 공대 전자전기통신공학부 졸업. 현재 동대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



**이동길 (李東吉)**

1982년 6월 30일생. 2008년 부산대학교 공대 전자전기통신공학부 졸업. 현재 동대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



**이경준 (李庚俊)**

1983년 2월 23일생. 2008년 부산대학교 공대 전자전기통신공학부 졸업. 현재 동대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.