

## 고섬광에 노출된 광센서의 손상 특성 : 열확산 모델

### Characteristics of Damage on Photosensor Irradiated by Intense Illumination : Thermal Diffusion Model

권 찬 호\*  
Chan Ho Kwon

신 명 숙\*  
Myeong Suk Shin

황 현 석\*  
Hyonseok Hwang

김 흥 래\*  
Hong Lae Kim

김 성 식\*\*  
Seong-shik Kim

박 민 규\*\*  
Min Kyu Park

#### Abstract

Pulsed lasers at the 613 nm and 1064 nm wavelengths on nanoseconds have been utilized to characterize the damage on Si photodiode exposed to intense illumination. Morphological damages and structural changes at sites on the photodiode irradiated during microseconds of laser pulses were analyzed by FE-SEM images and XRD patterns, respectively. The removal of oxide coating, ripple, melting marks, ridges, and crater on photodiodes were definitely observed in order of increasing the pulse intensities generated above the damage threshold. Then, the degradation in photosensitivity of the Si photodiode irradiated by high power density pulses was measured as a function of laser irradiation time at the various wavelengths. The free charge carrier and thermal diffusion mechanisms could have been invoked to characterize the damage. The relative photosensitivity data calculated using the thermal diffusion model proposed in this paper have been compared with the experimental data irradiated above the damage threshold.

Keywords : Shock Wave(충격파), Intense Illumination(고섬광), Energy Density Threshold(문턱 에너지 밀도), Thermal Diffusion(열확산), Photosensor(광센서), Free Charge Carrier(자유 전하 운반자), Photosensitivity(광감도), Optical Absorption Coefficient(광학 흡수 계수)

## 1. 서론

† 2012년 1월 18일 접수~2012년 3월 16일 게재승인

\* 강원대학교 화학과(Department of Chemistry, Kangwon National University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 권찬호(chkwon@kangwon.ac.kr)

진행성 교란의 한 종류인 충격파(shock wave)가 매질을 통과할 때 매질의 압력, 밀도, 속도 등의 급격한 변화가 발생한다. 지난 반세기 동안, 충격파에 의한 매질의 구조나 열역학적 성질의 급작스러운 변화에 관한 실험과 이론 연구들이 지속적으로 수행되어 왔다<sup>1~5</sup>. 특히, 충격관에서 발생한 충격파에 의해 압축, 가열된 아르곤, 크세논 등 비활성기체가 자외선~적외

선에 걸친 넓은 파장영역의 고선평광을 방출한다는 연구 결과는 섬광 발생 메커니즘 규명에 대한 이론적 연구 뿐 아니라 장치 개발에 대한 다양한 시도들을 유도하였다<sup>[4,5]</sup>. 더욱이 군사적 목적으로 고선평광 발생 장치는 고선평광을 이용하여 각종 광센서, 영상 추적 유도 무기 등을 일시에 마비/파괴하여 그 기능의 저하/상실을 유도할 수 있는 매우 효과적인 대응 무기체계에 적용될 수 있다. 그래서 일부 선진국들은 이미 미래 무기 체계에 고선평광 발생장치를 도입하려는 연구를 진행한 것으로 알려졌으나 비공개 연구 분야의 특성으로 인해 그 결과의 일부만이 보고된 실정이다. 이에 국내에서는 최근 충격파에 의한 아르곤 기체의 섬광 방출 메커니즘을 해석하고 고선평광 발생 장치 개발에 이론적 기초를 마련하기 위하여 비평형 분자동역학 모의실험을 연구하였다. 비평형 분자동역학 모의실험은 충격파 진행시 생성되는 아르곤 기체의 비평형 상태를 아르곤 개별 입자들의 운동으로 전산 모사하는 방법이다. 이 방법은 충격파에 의해 야기된 아르곤 분자들의 운동에너지 분포와 속도 분포를 얻어 들뜬 전자 상태에서 낮은 전자 상태로의 전이에 대한 논의를 가능하게 하였다<sup>[6~8]</sup>. 즉, 충격파에 의한 기체 분자들의 거동을 매우 정확하게 묘사할 수 있어 고선평광 발생장치를 효과적으로 설계하는 것이 가능한 기틀이 되고 있다.

한편, 전자기 복사 에너지를 전기 에너지로 변환하는 광센서가 고선평광에 노출될 때 발생하는 표면 손상의 메커니즘 및 문턱 에너지 밀도(energy density threshold)에 관한 연구는 고선평광 발생 장치 개발에 필요한 고선평광의 세기와 파장, 그리고 방사 시간에 대한 정보를 제시할 수 있게 한다. 이에 광센서와 고선평광의 상호작용에 의한 손상 특성 연구가 필요하다. 광센서의 손상 에너지(파워) 밀도 문턱 이상의 고선평광이 방사될 때 광센서의 손상 메커니즘은<sup>[9~14]</sup> 광센서의 광전류를 생성시키는 데 중요한 에너지 간격(energy gap)과 전자기 복사 에너지 차이에 따라 크게 두 가지로 제안되고 있다. 첫 째는 광센서의 에너지 간격보다 방사되는 전자기 복사 에너지가 조금 클 때 유한한 광학 흡수 계수(optical absorption coefficient)를 가지는 표면에 흡수되어 온도를 증가시켜 용융이나 재결정을 일으키며 물리적 성질을 바꾸고 결국 손상이 일어나는 것이다. 이 경우는 손상에 필요한 온도 변화를 손상의 문턱 에너지 밀도로 기술할 수 있다. 두 번째는 광센서의 에너지 간격에 비하여 입사되는 광자의 에너지가

훨씬 클 경우 광센서에 자유 전자-홀 쌍(free electron-hole pair)에 의한 광 전하 운반자(photon charge carrier)가 과도하게 생성되어 센서를 이루는 입자들의 물리적 상태를 변화시켜 손상을 유발한다. 이 경우 기화나 이온화, 나아가 플라스마 생성은 일부 에너지를 shock wave나 mechanical impulse 형태로 표면에 전달함이 논의 되었다.

본 논문에서는 광센서와 고선평광의 상호작용에 의한 손상 메커니즘을 이해하기 위해 방사되는 전자기 복사의 파장과 노출 시간에 따라 표면 손상의 특성을 전자현미경(FE-SEM)으로 관측하고 x-선 회절(XRD)을 측정하여 구조 변화를 논의한다. 이에 고선평광의 파장과 세기, 노출 시간 등을 펄스 레이저를 가지고 정확히 구현하여 400~1,100 nm의 전자기 복사를 검출하는 데 주로 사용하는 Si 광다이오드에 방사함으로써 손상 메커니즘에 관한 정보의 데이터베이스를 구축할 것이다. 또한 그 결과들에 방사된 고선평광에 의한 광센서 표면 근처의 온도 상승에 관련하는 열확산 모델을 적용하여 손상 메커니즘을 논의할 것이다.

## 2. 이론 해석

고선평광에 노출된 광센서의 손상 메커니즘에 대한 이론적 해석을 위한 시도로써 비교적 잘 정립되어 있는 열확산 모델을 이용할 것이다<sup>[10,11]</sup>. 대표적 광센서인 Si 광다이오드의 에너지 간격은 1.11 eV(1117 nm)이며 고선평광을 구현하는 펄스 레이저의 파장은 1064 nm와 613 nm를 사용하므로 제안된 열확산 모델의 유용성을 확인할 수 있다. 기본적으로 열확산 모델은 광센서 표면에 방사되는 고선평광의 광자에너지가 열에너지로 전환되어 온도 상승을 유발하기에 열전도식의 해를 구함으로써 다루어질 수 있다. 무한한 흡수 계수( $\alpha$ )를 가지는 물질이 가우시안 빔에 방사될 때 빔의 중심( $r = 0$ )과 물질의 표면( $z = 0$ )에서의 온도 변화는 아래 식처럼 유도되어 진다.

$$\Delta T(r, z, t)_{r=0, z=0} = \frac{(1-R)Pa}{\rho ck\pi^{1/2}} \tan^{-1} \left( \frac{4kt}{a^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

위 식에서  $R, \rho, c, k$ 는 각각 물질의 반사도, 밀도, 비열, 열확산율을 나타내며  $P$ 와  $a$ 는 빔의 파워 밀도와 반경을 의미한다. 또한,  $4kt \ll a^2$ 의 한계에서 손상

이 일어나는 데 필요한 최소한의 온도 변화는 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$\Delta T_{th} \cong \frac{(1-R)}{\rho c} \left( \frac{4}{k\pi\tau} \right)^{1/2} P_0 \tau \quad (2)$$

$P_0$ 와  $\tau$ 는 손상의 파워 밀도 문턱과 레이저 방사시간을 의미하며 짧은 방사 시간에 일어나는 손상의 문턱 에너지 밀도( $E_{th}$ )와의 관계는  $E_{th} = P_0 \tau$ 이다. 그러나 실제 물질은 유한한 광학 흡수 계수( $\alpha$ )를 가지며 긴 방사 시간의 경우 열확산을 고려하여야 한다. 그래서 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 방사 시간에 따른 문턱 에너지 밀도( $E_d$ )를 테일러 전개하면 식 (3)처럼 근사할 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$E_d \cong E_{th} \left[ 1 + \frac{k\tau\pi^{1/2}\alpha}{2a \cdot \tan^{-1}(4k\tau/a^2)^{1/2}} \right] \quad (3)$$

위 식으로부터 방사시간이 짧을 때는 문턱 에너지 밀도가 아주 천천히 증가하다 길어지면서 크게 증가하기 시작함을 알 수 있다. 이는 용융, 기화, 재결정 등의 손상이 일어날 때 초기에는 광센서 결정 구조의 비율이 여전히 높을 때라 문턱 에너지 밀도 증가가 미미하지만 무정형의 구조 비율이 커지면서 더 손상될 수 있는 문턱 에너지 밀도가 증가함을 암시한다. 따라서 고섬광의 방사시간에 따른 광감도의 감소는 문턱 에너지 밀도에 비례하므로 레이저 펄스마다 일어나는 상대적 광감도 감소는 상대적 문턱 에너지 밀도( $E_d(0)/E_d(\tau)$ )으로 표현할 수 있다. 또한 일반적인 경우  $4k\tau \ll a^2$ 이므로 식 (4)와 같은 간단한 모델을 얻을 수 있다.

$$E_d(0)/E_d(\tau) \cong 1 / \left[ 1 + \frac{1}{4} (k\pi\alpha^2\tau)^{1/2} \right] \quad (4)$$

고섬광 에너지를 흡수하는 광센서 표면의 가열 정도는 흡수되는 고섬광의 파장과 세기에 의존할 것이며 유도되는 thermal properties의 변화에 의존한다. 따라서 Si 광다이오드에 방사되는 고섬광의 파장과 세기에 따른 상대적 광감도의 변화(감소)를 측정하여 제안된 열확산 모델과 비교할 것이다.

### 3. 실험방법

고섬광의 파장, 세기, 방사시간을 구현하기 위해 Nd:YAG 레이저(Continuum, Surelite III-10)와 색소 레이저(Continuum, ND6000)를 사용하였다. 파장은 1064 nm와 613 nm를 사용하였으며 7 ns 지속시간의 펄스를 100 ms의 간격으로 연속 방사하여 총 방사시간을 조절하였다. 단, 100 ms 동안 표면의 온도의 감소 효과는 충분치 않음을 가정하였다. 레이저의 세기는  $3.5 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>이며 Si 광다이오드(Hamamatsu photonics, S2386-5K)에 방사하여 광전류의 변화를 오실로스코프(LeCroy, Waverunner 6300)를 사용하여 기록하였다. 사용된 Si 광다이오드는 350~1,100 nm 파장에 감응하는 것으로 960 nm에서 최대 광감도를 나타낸다. 볼록렌즈( $f = 500$  mm)를 사용하여 740  $\mu$ m(613 nm)와 390  $\mu$ m(1064 nm) 직경의 레이저 빔을 광다이오드에 방사하였다. 파장, 세기, 방사시간에 따른 광다이오드의 표면 손상과 구조 변화는 FE-SEM(Hitachi, S-4300)과 XRD(X'Pert PRO MPD)로 관측하였다.

### 4. 결과

#### 가. 표면 손상과 구조 변화

광센서에 손상 문턱 이상의 파워 밀도를 가진 섬광이 방사되는 경우 손상의 특징이 나타나며 직접적인 관측에 전자 현미경(FE-SEM)을 사용할 수 있다. Fig. 1은 613 nm와 1064 nm의 레이저 펄스를  $1.7 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>의 파워 밀도로 7  $\mu$ s 방사한 후 광센서의 표면 손상 변화를 전자 현미경으로 관측한 것이다.

613 nm 파장의  $1.7 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>의 파워 밀도로 방사된 광다이오드의 표면은 일부 코팅이 벗겨지고 수  $\mu$ m의 간격으로 잔물결이 나타났다. 선형 편광된 레이저의 파워 밀도가 고체 표면의 손상 문턱 근처일 때 방사되는 빔의 간섭에 의해 불균일한 에너지 침적이 표면의 회절 유형의 손상을 일으킴이 논의되어 왔다<sup>[12]</sup>. 또한 Si 광다이오드의 종류에 따라 약간의 차이가 있다 하더라도 나노펄스의 레이저에 의한 표면 손상의 정의를 용융으로 특징짓는 경우 파워 밀도 문턱을  $6 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>로 보고하고 있다. 실험에 사용된 광다이오드의 손상 문턱은  $\sim 2 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup> 정도로 예측되며 보고된 결과와 비슷함을 알 수 있다<sup>[11]</sup>. 레이저의  $\sim 6 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>의 파워 밀도 이상의 경우 용융과 함께

재결정화 되어 용기가 보이기 시작하였다. 파워 밀도가 3배 정도 커지면서 레이저가 방사된 Si 표면에서 용탈(ablation)에 의한 튀김(sputtering)이 보인다. 이 경우 열확산에 의한 현상보다는 다광자 흡수(multiphoton absorption)에 의한 이온화나 기화 등에 의한 mechanical impulse로 유추할 수 있다. 1064 nm 파장의 경우 손상 문턱 위 근처에서 보이는 손상 특징이  $\sim 3.0 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>의 파워 밀도에서 보이며  $1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>의 파워 밀도 정도에서는 튀김이 보이기 시작하였다.

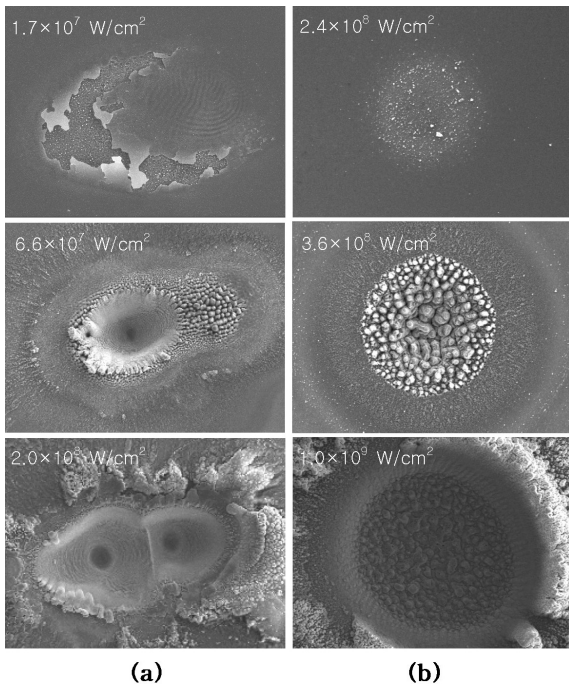


Fig. 1. FE-SEM images of the surface structures on Si photodiodes irradiated during 7  $\mu$ s with the power densities in the range of  $1.7 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup> at (a) the 613 nm and (b) the 1064 nm wavelengths, respectively

Fig. 2는 613 nm 파장에서 Si 광다이오드의 손상 문턱 훨씬 위 파워 밀도로 방사 전, 후에 XRD를 측정하는 것이다. Si의 결정에 의한 회절 피크가 방사 후 완전히 없어진 것을 관측하였다. 튀김에 의한 Si film의 XRD 유형과 일치함을 알 수 있다<sup>15)</sup>. 이는 광다이오드의 손상 문턱 이상의 파워 밀도를 갖는 고선티광을 방사하면 가열되어 많은 손상 과정을 거쳐 annealing 효과로 무정형 구조로 변화하였음을 알 수 있다.

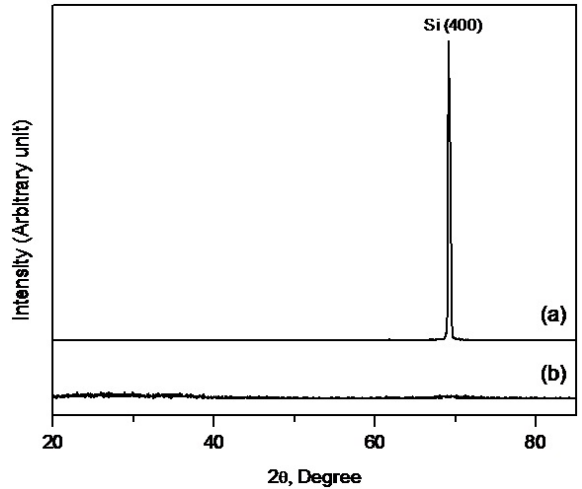


Fig. 2. XRD profiles of the surface on the Si photodiode (a) before and (b) after the irradiation from the power density of  $1.4 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> during 7  $\mu$ s at the 613 nm wavelengths

나. 광센서의 손상 메커니즘과 열확산 모델

펄스 레이저로 구현하는 고선티광에 유도되는 Si 광다이오드의 손상 메커니즘을 이해하기 위해 파워 밀도에 따른 광감도 변화를 측정하였다.

Fig. 3은 613 nm 파장의 레이저 단 펄스를 Si 광다이오드에 방사하여 파워 밀도에 따른 광다이오드의 광감도를 도시한 것으로  $\sim 2 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>의 단 펄스에 광감도가 포화상태에 이르면서 증가율이 0에 가까워진다. 그 후 광감도는 감소하기 시작하며 이는 Si 광다이오드가 고선티광에 영구 손상을 입기 시작하는 것으로 고선티광의 파워 밀도 증가 대비 상대적 광감도의 감소가 일어남을 유추할 수 있다. 이는 전에 언급한 표면 손상에 관련한 FE-SEM 이미지 해석 결과와 정확하게 일관성이 있다. Si 광다이오드의 에너지 간격 이상의 고선티광을 Si 광다이오드의 손상 파워 밀도 문턱보다 큰 파워 밀도로 표면에 방사할 때 유도되는 손상 과정을 조사하기 위해 파워 밀도에 따른 센서의 상대적 광감도를 측정하였다. Fig. 4 (a)는 613 nm의 레이저 펄스를 Si 광다이오드의 손상 파워 밀도 문턱 바로 위 파워 밀도로 연속 방사하면서 측정된 상대적 광감도 변화율이다. 본 논문에서 제안한 열확산 모델을 적용하여 적합도를 도시할 경우 정확하게 기술할 수 있음을 보여 준다. 그러나 파워 밀도가 손상 파워 밀도 문턱보다 많이 큰 경우(Fig. 4 (b) and (c)) 열확산 모

델에 비하여 초기 광감도의 감소가 급격히 일어남을 볼 수 있다. 이는 높은 파워 밀도에서 표면에 다광자 흡수에 의한 열확산 메커니즘이 아닌 excess charge carrier 형성의 다른 손상 메커니즘이 진행되는 것으로 유추된다.

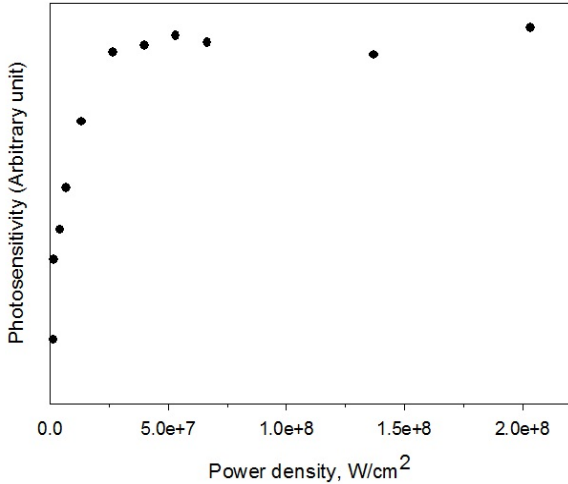


Fig. 3. Photosensitivity of Si photodiode measured from the 613 nm radiation as a function of irradiation power density

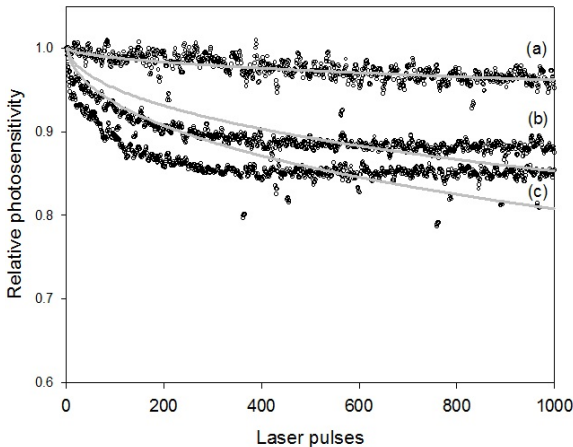


Fig. 4. Relative photosensitivities(the circles) of Si photodiodes irradiated by the 613 nm radiation as a function of the laser pulses from (a)  $3.4 \times 10^7$  W/cm<sup>2</sup>, (b)  $1.0 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, and (c)  $2.0 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, respectively. The gray solid curves are calculated using the thermal diffusion model

광센서의 레이저 유도 손상 중 열확산 메커니즘을 면밀하게 조사하기 위하여 Si 광다이오드의 에너지 간격(1117 nm)보다 조금 큰 에너지의 고섬광(1064 nm)을 방사하였다. Fig. 5는 1064 nm 파장의 레이저 펄스를 여러 파워 밀도로 방사하여 Si 광다이오드의 상대적 광감도 변화율을 측정하고 열확산 모델의 적합도를 도시한 것이다. Fig. 5 (a)와 (b)에 보이듯 1064 nm에서의 Si 광다이오드의 손상 파워 밀도 문턱은  $2.4 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>로 확인된다. 이는 Fig. 1 (b)에서 확인된 결과와 같다. 열확산 모델(식 (4))을 적용하여 구한 적합도가 Fig. 5 (b)와 (c)의 경우 매우 정확하며 이 경우 Si의 열확산을  $k = 0.91$  cm<sup>2</sup>/s를 사용하였다. 적합도에서 얻은 광학 흡수 계수( $\alpha$ )는 각각 27 cm<sup>-1</sup>과 99 cm<sup>-1</sup>였다. 이는 문헌에서 보고되는 Si의 1064 nm에서 광학 흡수 계수(40~100 cm<sup>-1</sup>)와 비교적 잘 맞는 결과이다<sup>[11]</sup>.

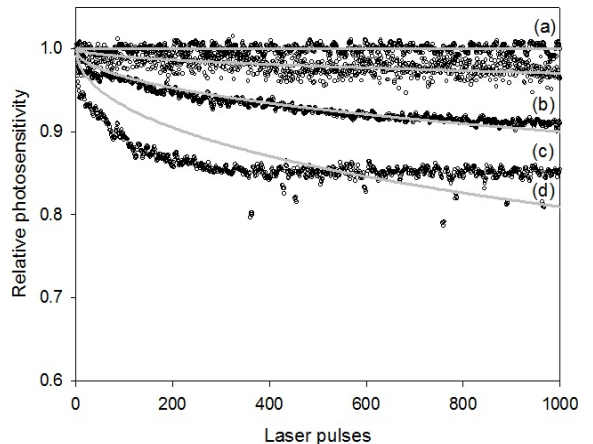


Fig. 5. Relative photosensitivities(the circles) of Si photodiodes irradiated by the 1064 nm radiation as a function of the laser pulses from (a)  $2.4 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, (b)  $4.0 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, (c)  $6.0 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, and (d)  $1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>, respectively. The gray solid curves are calculated using the thermal diffusion model

Fig. 5 (d)에 도시된 상대적 광감도 변화를 보면 1064 nm의 파워 밀도가  $1.0 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>로 광다이오드에 방사되는 경우 처음 레이저 펄스 만에 광감도가 10 % 감소함을 알 수 있다. 이는 일반적인 열확산에 의한 손상 메커니즘을 따르는 광감도 감소율 유형이

아니다. Fig. 1 (b)에 보이는 표면 손상 이미지처럼 용융이나 재결정화, annealing 등에 의한 특성보다는 방사된 곳이 깊이 파였으며 (crater) 둘레에 sputtering 유형이 보이는 것을 보면 free charge carrier 발생에 의한 mechanical impulse 효과로 보인다. 즉, 1064 nm의 다광자 흡수에 의한 효과로 여겨진다.

## 5. 결론

일반적인 광센서인 Si 광다이오드에 고섬광이 방사될 때 야기되는 표면 손상에 관하여 손상의 파워 밀도 문턱(power density threshold)과 에너지에 따른 손상 메커니즘 연구는 고섬광 발생장치 개발에 필요한 고섬광의 파장, 세기, 그리고 방사 시간에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이에 필요한 고섬광을 정확하게 구현할 수 있는 펄스 레이저를 Si 광다이오드에 방사하여 손상 특성을 조사하였다. 고섬광이 방사될 때 광센서의 손상 메커니즘은 광센서의 에너지 간격(energy gap)보다 조금 큰 에너지의 고섬광인 경우(열확산 메커니즘)와 아주 큰 경우(자유 전하 운반자 메커니즘)로 크게 두 가지 메커니즘이 논의되었다. Si의 에너지 간격(1117 nm)보다 조금 큰 에너지의 고섬광(1064 nm)의 경우 광자 에너지를 흡수하여 열에너지로 전환되어 표면의 온도가 올라가며 손상 파워 밀도 문턱 이상에서 표면의 코팅이 벗겨지고 회절 유형이 생기며 파워 밀도가 더 올라가면 용융이 일어나 annealing과 재결정화가 일어남을 관측하였다. 그러면 결정구조가 무정형화되면서 광감도가 감소한다. 상대적 광감도 변화율을 구조 변화에 따른 손상의 문턱 에너지 밀도 변화율로부터 얻어진 간단한 열확산 모델로 실험 결과에 정확하게 적합도를 도시하였다. 방사되는 파워 밀도가 아주 커지면 열확산 메커니즘보다는 다광자 흡수 효과에 의한 자유 전하 운반자 메커니즘이 주요한 것으로 관측되었다. 613 nm 파장 레이저의 경우 손상 파워 밀도 문턱이 정확하게 측정되었으며 Si의 에너지 간격보다 두 배 정도 큰 에너지의 고섬광이 방사될 때 손상 파워 밀도 문턱 바로 위에서는 열확산 메커니즘에 의해 손상이 일어나지만 파워 밀도가 증가하면 다광자 흡수 효과가 쉽게 나타나 자유 전하 운반자 메커니즘이 주요 원인으로 나타난다.

고섬광에 의한 광센서 표면 영구 손상 메커니즘은 크게 자유 전하 운반자 메커니즘과 열확산 메커니즘으

로 논의되었으며 손상에 의한 광감도 감소율은 짧은 방사시간(~나노초)에는 전자의 경우가 크며 비교적 긴 방사 시간(마이크로초)은 후자의 경우가 큼을 알 수 있다. 또한 광센서 물질의 에너지 간격보다 큰 에너지의 고섬광이 광감도 감소를 크게 함을 알 수 있다. 본 논문에서 논의된 데이터들은 광센서, 영상 추적 유도무기체계 등에 대한 기능 저하 또는 파괴에 매우 효과적인 고섬광 발생 장치 개발의 필요조건을 제시할 것으로 사료된다. 후속으로 자유 전하 운반자 메커니즘과 함께 적외선 광센서의 손상 특성 연구가 요구된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구사업 연구비(과제번호 : ADD-08-08-02)의 지원으로 수행되었다.

## References

- [1] H. M. Mott-Smith, "The Solution of the Boltzmann Equation for a Shock Wave", Phys. Rev., Vol. 82, No. 6, pp. 885~892, 1951. 6.
- [2] T. P. Cotter, "Collision Kinetics in a Shock Wave", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-1413, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1952.
- [3] A. G. Gaydon and I. R., Hurle, "The Shock Tube in High Temperature Chemical Physics", Reinhold Publishing Co., New York, 1963.
- [4] R. L. Conger, L. T. Long, J. A. Parks, and J. H. Johnson, "The Spectrum of the Argon Bomb", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 273~276, 1965. 3.
- [5] P. F. Logan, R. J. Stalker, and M. J. McIntosh, "A Shock Tube Study of Radiative Energy Loss from an Argon Plasma", J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 10, 323, 1977.
- [6] G. Phan-Van-Diep, D. Erwin, E. P. Muntz, "Nonequilibrium Molecular Motion in a Hypersonic Shock Wave", Science, Vol. 245, pp. 624~626, 1989. 8.
- [7] H. Hwang, C. H. Kwon, H. L. Kim, S. Kim, M. K.

- Park, "Development and Application of a Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation Method to Study Shock Waves Propagating in Argon Gas", J. Kor. Inst. Mil. Sci. Technol., Vol. 13, pp. 156~163, 2010. 2.
- [8] H. Hwang, J. H. Lee, C. H. Kwon, H. L. Kim, S. Kim, M. K. Park, "Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation Study of Kinetic Energy and Velocity Distribution Profiles of Argon Gases in Shock Waves", J. Kor. Inst. Mil. Sci. Technol., Vol. 14, pp. 147~153, 2011. 2.
- [9] M. Birnbaum, "Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers", J. Appl. Phys., Vol. 36, pp. 3688~3689, 1965. 6.
- [10] J. H. Bechtel, "Heating of Solid Targets with Laser Pulses", J. Appl. Phys., Vol. 46, pp. 1585~1593, 1975. 4.
- [11] M. Krueger, R. Allen, L. Esterowitz, and F. Bartoli, "Laser Damage in Silicon Photodiodes", Opt. Quantum Electron, Vol. 8, pp. 453~458, 1976. 3.
- [12] H. M. van Driel, J. E. Sipp, and J. F. Young, "Laser-induced Periodic Surface Structure on Solids : A Universal Phenomenon", Phys. Rev. Lett., Vol. 49, pp. 1955~1959, 1982. 12.
- [13] P. G. Datskos, S. Rajic, and I. Datskou, "Photoinduced and Thermal Stress in Silicon Microcantilevers", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, pp. 2319~2321, 1998. 10.
- [14] J. Martan, J. Kunes, and N. Semmar, "Experimental Mathematical Model of Nanosecond Laser Interaction with Material", Appl. Surf. Sci., Vol. 253, pp. 3525~3532, 2007. 9.
- [15] Y. H. Ogata, N. Yoshimi, R. Yasuda, T. Tsuboi, and T. Sakka, "Structural Change in p-type Porous Silicon by Thermal Annealing", J. Appl. Phys., Vol. 90, pp. 6487~6492, 2001. 12.