

레이저 미세가공 기술을 이용한 초소형 전자빔 장치용 정전장 전자렌즈의 제작

안승준[†] · 김대욱 · 김호섭 · 김영정* · 이용산**

선문대학교 자연과학대학 신소재과학과

*선문대학교 공과대학 재료공학부

**대전대학교 이공대학 물리학과

Fabrication of Electrostatic Electron Lens for Electron Beam Microcolumn using the Laser Micromachining

S. J. Ahn[†], D. W. Kim, H. S. Kim, Y. J. Kim*, and Y. S. Lee**

Department of Physics and Advanced Material Science, Sun Moon University

*Division of Materials Engineering, Sun Moon University

**Department of Physics, Daejin University

(2001년 4월 20일 받음, 2001년 8월 31일 최종수정본 받음)

Abstract For electron beam lithography and SEM(scanning electron microscopy) applications, miniaturized electrostatic lenses called a microcolumn have been fabricated. In this paper, we report the fabrication technique for 20~30 μ m apertures of electron lenses based on silicon and Mo membrane using an active Q-switched Nd:YAG laser. Experimental conditions of laser micromachining for silicon and Mo membrane are improved. The geometrical structures, such as the diameter and the preciseness of the micron-size aperture are dependent upon the total energy of the laser pulse train, laser pulse width, and the diameter of laser spot.

Key words: microcolumn, electron lens, laser micromachining, active Q-switched Nd:YAG laser, electron beam lithography

1. 서 론

FEA (field emission array) 실리콘 tip과 결합된 전자빔 장치에서는 실리콘의 전자들이 FEA의 전자원(source)으로 사용된다.^{1,2)} 전자빔의 분해능은 구면수차, 색수차, 비점수차, 코마 등과 같은 수차들에 의해 결정되는데 이것은 전자렌즈를 이루고 있는 aperture의 크기, aperture의 roundness, 그리고 각 components의 정렬에 달려있다. 일반적으로 금속박막이나 비저항이 낮은 실리콘 membrane의 다층박막, PR(photoresist), etching 등과 같은 반도체 공정을 이용하면 정교한 micron-size의 초소형 전자렌즈용 aperture를 얻을 수 있다.^{3,4)} 그러나 반도체 장비가 고가이기 때문에 제조 단가가 비싸고 공정이 복잡하며 aperture를 제작한 다음 각각의 렌즈들을 조합하기 때문에 정렬이 어렵고 인하여 수차가 발생하는 단점이 있다.

반면에 레이저를 이용한 소재의 가공은 기계적인 가공방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 공구의 소모가 없으며, 가공 외력이 전달되지 않기 때문에 단단하고 깨지기 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다.⁵⁾ 특히 극초단 레이저에 의한 미세가공(micromachining)은 열원으로 사용되는 레이저의 펄스 폭이 매우 짧아서 열에 민감한 요

소를 보호할 수 있으며 가공부위에 국소적으로 레이저 빔을 집중하기 때문에 상대적으로 다른 가공방법과 비교하여 볼 때 에너지 전달 부분이 매우 작기 때문에 가공물질의 변형을 방지할 수 있는 등 많은 장점들을 가지고 있다.^{6,7)} 레이저를 이용한 미세가공에는 파장이 10.6 μ m인 CO₂ 레이저와 파장이 1.06 μ m인 Nd:YAG (Nd³⁺ doped yttrium aluminum garnet) 레이저가 많이 이용되는데, 세라믹은 ~10 μ m의 파장 영역에서 강한 흡수 분광선(spectrum)을 가지기 때문에 세라믹을 가공하기 위해서는 CO₂ 레이저가 Nd:YAG 레이저보다 더 적절하다. 반면 실리콘은 ~1 μ m의 파장 영역에서 강한 흡수 분광선을 가지므로 CO₂ 레이저보다 오히려 Nd:YAG 레이저가 더 유용하다.⁸⁾ 그러나 aperture를 가공할 경우 aperture의 깊이와 직경의 비(ratio)가 클 경우에는 세라믹이나 Mo(molybdenum), 그리고 Cr(chromium)과 같은 금속의 경우에도 레이저 빔에 대한 흡수도는 떨어지지만 파장이 짧고 반복율 특성이 우수한 Nd:YAG 레이저가 더 유리하다.

따라서 본 연구에서는 TEM₀₀ 모드로 발진하는 펄스형 active Q-switched Nd:YAG 레이저를 사용하여 초소형 전자빔 장치용 전자렌즈를 제작한 다음, 회절무늬를 관찰함으로써 렌즈 aperture의 roundness와 렌즈계의 정렬상태

[†]E-mail: sjan@emailsunmoon.ac.kr

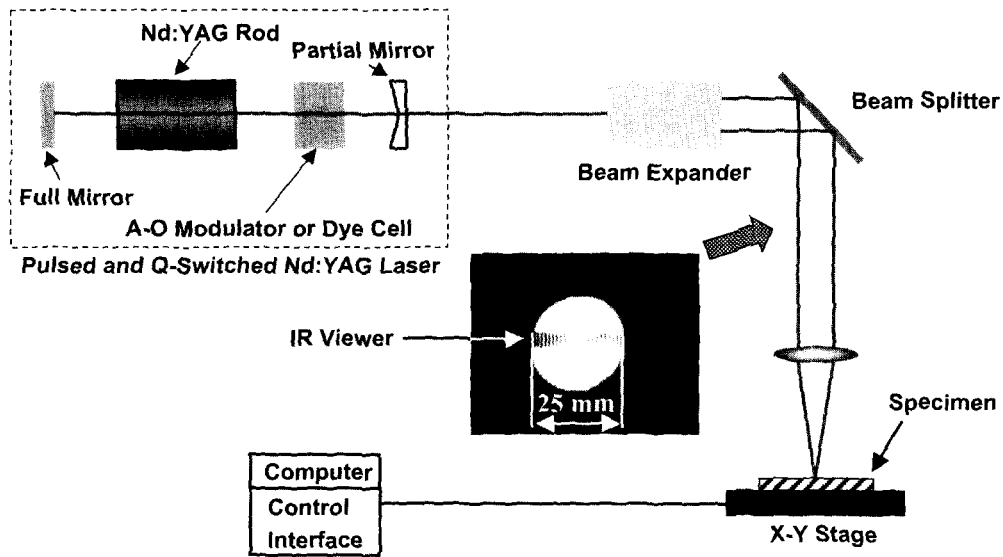


Fig. 1. Schematic diagram of the laser micromachining set-up.

를 평가하였다.

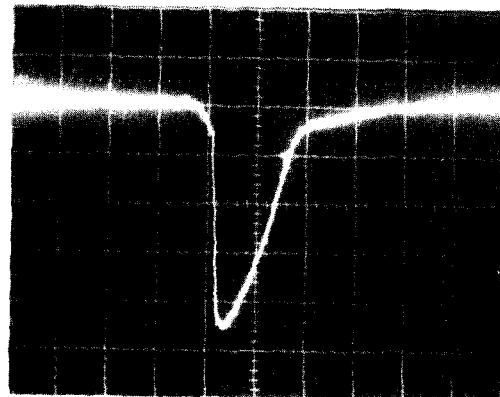
2. 실험 방법

레이저를 이용하여 실리콘이나 세라믹과 같은 비금속 물질을 가공할 때 가장 중요한 인자 중의 하나가 레이저의 펄스 폭과 에너지이다. 본 연구에서는 초소형 전자빔 장치의 핵심 부품인 전자렌즈를 제작하기 위하여 제조 단가가 비싸고 공정이 복잡하며 수차가 발생하기 쉬운 반도체 공정을 대신하여 펄스 폭이 짧은 극 초단 펄스 레이저를 열원으로 사용하였다.

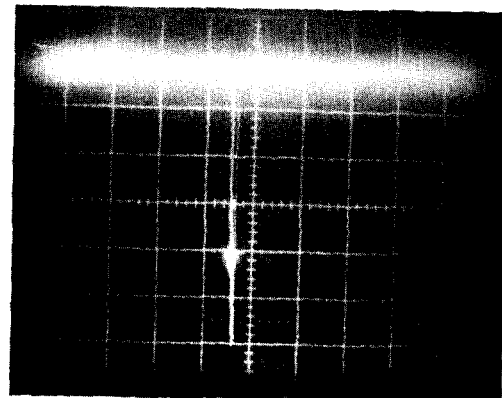
레이저 미세가공에 적합하도록 펄스 폭이 짧은 고출력의 레이저 빔을 얻기 위하여 레이저 공진기에 AO (acousto-optic) 변조기를 삽입하여 최대 반복율이 25 Hz, 펄스 폭이 $\sim 220 \mu s$ 인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 active Q-switching 하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭은 $\sim 200 ns$ 이며 peak power는 $\sim 67 kW$ 까지의 출력을 얻을 수 있었다. Fig. 1은 초소형 전자빔 장치의 전자렌즈를 레이저 미세 가공하기 위한 실험장치도이다. 가공조건을 최적화하기 위하여 에너지를 1~10 mJ/pulse 까지 변화시키며 modulator (빔 확대기, aperture, pinhole 등)를 사용하여 레이저 빔의 질을 개선하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저 펄스를 배율이 10 배인 빔 확대기를 사용하여 레이저 빔의 spot 크기를 확대하였다. 빔 단절기 (beam splitter)와 프리즘을 사용하여 x-y stage 위에 놓여있는 실리콘 membrane에 레이저 빔을 정렬한 다음 초점거리가 10 cm인 볼록렌즈로 집속시켰다. 전자빔 장치용 전자렌즈계의 가공은 Pyrex 유리에 anodic bonding된 실리콘 membrane을 수~수십 개의 레이저 펄스를 집속시켜 layer-by-layer로 aperture를 가공하였다. 개선된 가공조건으로 집속한 레이저 빔의 spot 크기는 직경이 $\sim 1 \mu m$, 펄스당 에너지는 1~10 mJ이다.

일반적으로 초소형 전자빔 장치에서 전자렌즈들(통상 두께 수 μm 정도의 membrane 중앙에 수~수 백 μm 정도의

원형 홀이 가운데 뚫려있는 구조임)을 정렬할 때에 aligner와 같은 장비를 활용하여 기초 정렬을 한 다음에 추가적으로 PZT (piezo electric transducer), STM (scanning tunneling microscope) 등의 방법으로 정렬을 하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 2. The pulse width by the pulsed and Q-switched Nd:YAG laser; (a) $220 \mu s$ ($200 \mu s/div.$): pulsed mode. (b) $200 ns$ ($1 \mu s/div.$): Q-switched mode.

그러나 이러한 방법은 정밀하기는 하지만 aligner와 같은 고가 장비를 구입해야 하고, STM을 내부적으로 장착해야만 하므로 STM 기법 등의 첨단 기술을 알고 있어야만 활용 가능한 단점이 있다.

본 연구에서는 일정한 위상을 가진 레이저 빔이 일정 모양의 aperture를 통과할 때에 형성되는 회절무늬와 정밀한 linear stage 등의 상대적으로 간단한 장치를 활용하여 레이저 미세가공 기술로 가공된 전자렌즈들을 정렬하였다.

3. 결과 및 고찰

레이저를 이용하여 micron-size의 미세한 aperture를 가공하기 위해서는 여러 가지의 물리적인 인자들을 고려해야 하겠지만 그 중에서도 가장 중요한 인자 중의 하나가 레이저의 펄스 폭과 에너지이다. 극 초단 레이저 펄스는 빛 에너지가 물체에 조사되는 시간이 짧기 때문에 긴 펄스보다 가공 부위로부터의 열 확산 길이가 짧게되며 상대적으로 낮은 thermal stress를 주게 된다.⁹⁾ Thermal stress의 크기는 온도 profile에 의존하므로 레이저를 이용한 실리콘이나 세라믹의 바람직한 가공조건은 주어진 가공물질의 덩어리를 제거할 수 있는 최소시간 동안 충분히 높은 레이저 빔 강도를 유지해야 한다. 그러므로 레이저 가공의 품질을 향상시키기 위해서는 펄스 폭이 짧은 고출력 레이저가 필요하다. 본 연구에서는 짧고 안정적인 레이저 펄스를 확보하기 위하여 레이저 공진기에 AO 변조기를 삽입하여 최대 반복

율이 25 Hz, 펄스 폭이 $\sim 220 \mu\text{s}$ 인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 active Q-switching하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭은 $\sim 200 \text{ ns}$ 이며 peak power는 $\sim 67 \text{ kW}$ 까지의 출력을 얻을 수 있었다. Fig. 2는 펄스형 Nd:YAG 레이저의 레이저 펄스 (a)와 active Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭 (b)을 Tektronix사의 2432-A storage oscilloscope를 이용하여 관찰한 사진이다.

레이저 빔과 실리콘이나 금속과 같은 물질들 사이의 상호작용에 있어서 레이저 빔의 강도가 $\sim 5.0 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 정도 이상이 되면 레이저빔은 금속이나 실리콘과 같은 가공물질을 녹이기보다 가공물질의 표면에 플라즈마를 형성하여 가공물질을 기화시키는 현상이 주된 현상으로 일어나게 된다.¹⁰⁻¹²⁾ 본 실험에서 사용한 레이저 빔 (spot 크기는 직경이 $\sim 1 \mu\text{m}$, 펄스 당 에너지는 $1 \sim 10 \text{ mJ}$)의 power 밀도 영역은 $2.0 \times 10^{12} \sim 2.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 으로 실리콘에 대한 기화 (vaporization) 잠열 ($10.6 \times 10^6 \text{ J/kg}$)¹³⁾을 고려해 볼 때, 본 실험에서 사용한 power 밀도 영역에서는 시료의 표면이 용융 (melting)보다 기화현상이 주된 상호작용으로 작용하게 됨으로 Q-switching을 하지 않은 펄스형 레이저를 사용하여 aperture를 가공한 경우보다 가공 부위가 훨씬 정교하게 된다. 그리고 강한 강도의 레이저 빔을 위하여 레이저 빔의 spot 크기를 가능한 작게 집중해야 하는데 모드가 TEM₀₀인 레이저 빔의 강도분포를 Gaussian으로 가정

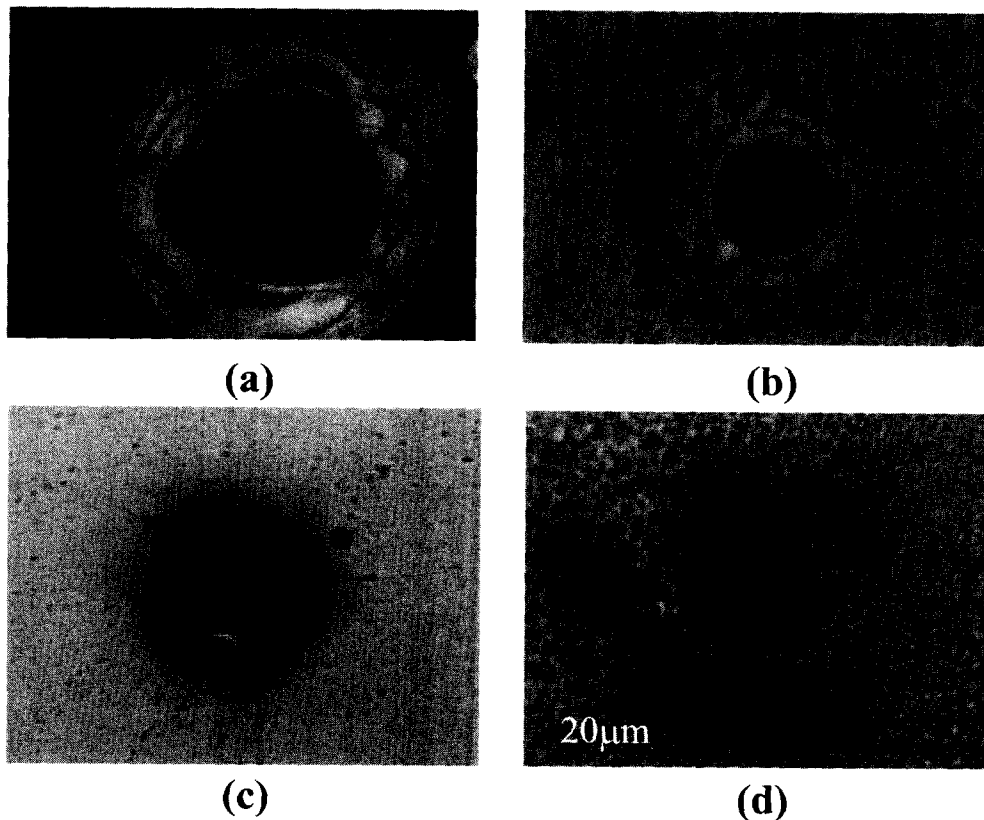


Fig. 3. (a) and (b) are optical microscopic photographs of the apertures fabricated by the pulsed Nd:YAG laser with $220 \mu\text{s}$ pulse width. (c) and (d) are optical microscopic photographs of the apertures fabricated by the active Q-switched Nd:YAG laser with 200 ns pulse width.

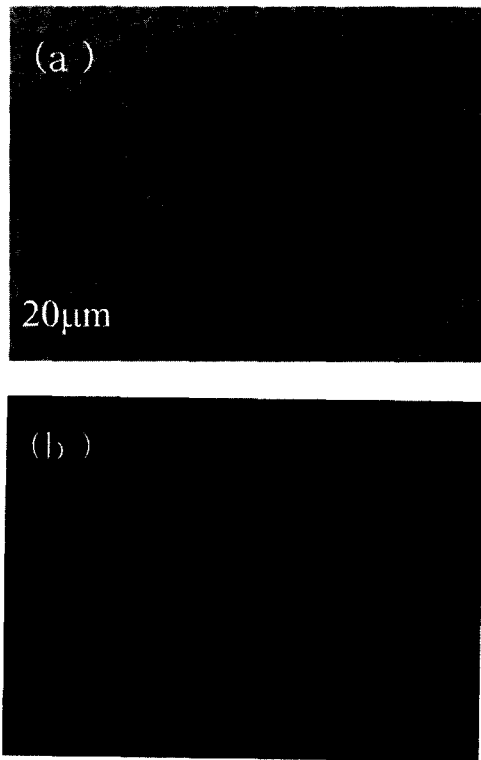


Fig. 4. (a) is a micro-size aperture fabricated by improved laser micromachining. (b) is the diffraction pattern of (a).

할 때, 집속된 레이저 빔의 spot 크기는 집속 렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경에 반비례하며 집속 렌즈의 초점거리에 비례한다.¹⁴⁾ 따라서 집속된 레이저 빔의 spot 크기를 작게 하기 위해서는 집속 렌즈에 입사하는 레이저 빔의 직경을 가능한 크게 해야한다.

Fig. 3 (a), (b)는 Q-switching을 하지 않은 펄스형 레이저를 사용하여 aperture를 가공한 것인데 aperture의 가공부위가 용융되어 제거된 것을 볼 수 있다. 이것은 레이저의 펄스 폭이 길기 때문에 가공물질의 표면에 형성한 레이저 빔의 power 밀도 영역이 $\sim 5.0 \times 10^{10}$ W/cm² 보다 훨씬 낮아져 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용은 기화현상보다 용융현상이 우세하게 된다. 반면에 Fig. 3 (c), (d)는 AO 변조기를 공진기에 삽입하여 active Q-switching한 레이저를 이용하여 전자렌즈로 사용할 aperture를 가공한 것인데 (a), (b)의 경우보다 aperture의 가장자리가 정교하고 용융된 흔적이 훨씬 적음을 알 수 있다. 이 경우에는 레이저의 펄스 폭이 ~ 200 ns로 훨씬 짧아져 가공물질의 표면에 형성한 레이저 빔의 power 밀도 영역이 $\sim 5.0 \times 10^{10}$ W/cm² 보다 높아지게 되므로 가공 부위와 레이저 빔과의 상호작용은 용융현상보다 기화현상이 우세하게 된다. 따라서 레이저의 펄스 폭이 훨씬 더 짧은 mode-locked 레이저(펄스 폭이 ~ 100 ps)나 CPA(chirped-pulse amplification) 기술^{15,16)}에 의한 극 초단 펄스(펄스 폭이 수 백 fs)를 레이저 미세 가공의 광원으로 사용한다면 submicron-size의 미세한 aperture도 가공이 가능할 것으로 생각된다.

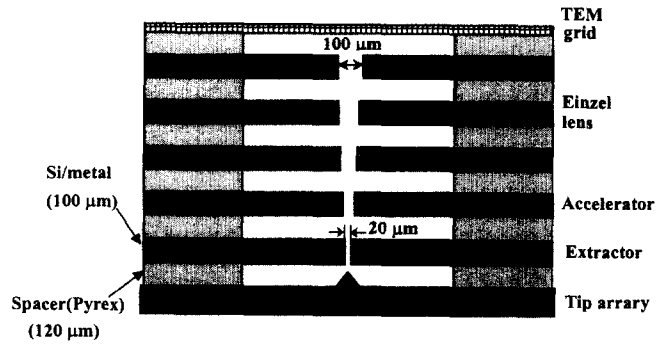


Fig. 5. Structure of electrostatic electron lens system for electron beam microcolumn combined with FEA.

전자렌즈를 이루는 aperture가 아무리 완벽하게 가공될 지라도 이들의 정렬 정도에 따라 전자빔의 분해능이 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 전자렌즈용 aperture가 가공된 실리콘 membrane을 정렬하기 위하여 aligner나 PZT, STM과 같은 고가의 장비를 사용하는 대신에 s-polarized He-Ne 레이저를 광원으로 이용하여 레이저 빔이 일정 모양의 aperture를 통과할 때에 형성되는 회절무늬와 0.1 µm의 정밀도를 가진 linear stage 등과 같은 상대적으로 간단한 장치를 활용하여 전자렌즈들을 정렬하였다. Fig. 4 (b)는 개선된 조건으로 미세가공된 전자렌즈, (a)를 정렬한 다음 이들 전자렌즈계에 대한 회절무늬를 관찰한 것으로 회절무늬가 찌그러지지 않고 roundness가 좋은 것으로 보아 전자빔 장치용 전자렌즈의 정렬과 전자렌즈의 aperture가 공이 정확히 이루어진 것을 알 수 있었다. Fig. 5는 FEA 실리콘 tip과 전자렌즈들이 assemble된 전자렌즈계의 도면이다.

4. 결 론

레이저에 의한 미세가공은 가공 부위와 레이저 빔과의 상호작용이 용융현상보다 기화현상이 더 우세할 경우 가공부위가 더욱 정교하게 되므로 본 연구에서는 전자렌즈계의 레이저 미세가공을 위하여 최대 반복율이 25 Hz, 펄스 폭이 220 µs인 펄스형 Nd:YAG 레이저를 active Q-switching 하였다. Active Q-switched Nd:YAG 레이저의 펄스 폭은 ~ 200 ns이고 펄스 당 에너지를 ~ 10 mJ, 빔의 spot 크기를 ~ 1 µm로 하여 레이저를 동작하였을 때 $\sim 2.0 \times 10^{13}$ W/cm²의 레이저 빔 강도를 얻을 수 있었다. 실리콘 membrane을 가공할 경우에, 이와 같은 조건에서는 가공부위와 레이저 빔과의 상호작용시 용융현상보다 기화현상이 더 우세하게 된다.

본 연구에서는 active Q-switched Nd:YAG 레이저를 1~10 mJ/pulse로 동작시킨 다음 두께가 2~5 µm인 실리콘 membrane과 320 µm인 Mo membrane을 기화현상이 우세한 조건으로 가공하여 20~30 µm의 용융된 흔적이 없는 정교한 전자렌즈용 aperture를 얻었으며, 이렇게 가공된 전자렌즈들의 정렬을 위하여 파장이 632.8 nm인 s-polarized He-Ne 레이저를 이용한 회절무늬 aligner로 정렬하여 전자렌즈계를 제작하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF 2000-2-11400-005-3)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. C. Davis, C. C. Williams, and P. Neuzil, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 18 (1995).
2. B. D. Clymer, *Appl. Opt.*, **28**, 5375 (1989).
3. J. Y. Park, J. D. Lera, M. A. Yakshin, S. S. Choi, Y. Lee, K. J. Chun, J. D. Lee, D. Jeon, and Y. Kuk, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **15**, 2749 (1997).
4. S. J. Ahn, D. W. Kim, H. S. Kim, K. H. Cho, and S. S. Choi, *Appl. Phys. A*, **69**, s527 (1999).
5. S. S. Charschan, *Laser in Industry*, Van Nostrand Reinhold Company (1972).
6. H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, and W. Viol, *J. Appl. Phys.*, **70**, 75 (1991).
7. V. Oliveira and R. Vilar, *J. Mater. Res.*, **12**, 3206 (1997).
8. Kunihiko Washio, *SPIE*, **3618**, 230 (1999).
9. U. C. Paek and F. P. Gagliano, *IEEE. J. of Quantum Electronics*, **QE-8**, 112 (1972).
10. X. Liu, D. Du, and G. Mourou, *IEEE. J. of Quantum Electronics*, **QE-33**, 1706 (1997).
11. M. K. Chun and K. Rose, *J. Appl. Phys.*, **41**, 614 (1970).
12. F. W. Dabby and U. C. Paek, *IEEE. J. of Quantum Electronics*, **QE-8**, 106 (1972).
13. J. F. Ready, *Industrial Application of Lasers*, Academic Press (1997).
14. D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, and G. Mourou, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 3071 (1994).
15. D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
16. S. J. Ahn and H. W. Kwak, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, L789 (1998).