

액막 보조 레이저 충격파 세정 공정

Liquid-assisted laser shock cleaning process

포항공과대학교 기계공학과 장덕석, 김동식

I. 서론

최근 반도체 산업 및 정보 저장 매체 산업 분야의 발달로 나노미터 수준의 입자 세정 공정에 대한 관심이 크게 증가하면서 새로운 세정 방법들이 연구되고 있다. 고 에너지 펄스 레이저를 이용한 방법은 비접촉 및 건식 방법으로 최근 관심이 크게 증가하고 있는 공정법이다. 그러나 레이저 빔을 이용한 건식 세정 방법(dry laser cleaning)은 입자의 제거 한계가 수백 나노미터 수준으로 100 nm 이하의 입자 제거에 이용하기 힘들다.¹⁾ 이러한 점을 극복하기 위해서 시편의 표면에 액막을 도포한 후 레이저 빔을 조사하는 액막 보조 공정(steam cleaning: SC)이 최근 연구되고 있으나 이 또한 100 nm 이하의 입자 제거에서는 그 효율이 낮은 단점을 지닌다.²⁾ 최근 고 에너지 펄스 빔을 집속할 때 발생하는 충격파를 이용하여 입자 세정을 이루는 충격파 세정 공정(laser shock cleaning: LSC)이 개발되어 넓은 표면의 시편 세정에 이용되고 있으나, 이 또한 세정 가능한 입자의 크기가 100 nm에 미치지 못하고 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 이러한 레이저를 기반으로 하는 세정 공정을 접목하여 100 nm 수준의 입자 세정 공정을 개발하고 그 결과를 고찰하였다. Fig. 1은 본 연구에서 제시된 충격파 세정 공정과 액막 도포에 의한 습식 공정을 접목한 액막 보조 레이저 충격파 세정 공정(liquid-assisted laser shock cleaning: LLSC)의 개념도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 레이저 빔에 의해 유도되는 충격파 및 폭발적 기화를 동시에 입자 세정에 적용하여 입자 세정 능력의 향상을 도모하였으며, 100 nm 수준의 입자 제거에 적용하여 그 결과를 도출하였다.

II. 실험방법

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 충격파를 야기하기 위하여 Q-switched Nd:YAG 레이저(펄스 폭: $\tau = 6$ ns, 파장: $\lambda = 1064$ nm, 최대 펄스 에너지: $E = 520$ mJ)를 이용하고, KrF 엑시머 레이저($\tau = 24$ ns, $\lambda = 248$ nm, $E = 600$ mJ)의 플루언스를 조절하면서 액막이 도포된 시편에 조사하여 폭발적 기화를 유발하였다. 시편과 평행하게 Nd:YAG 레이저를 조사한 후, 100 mm의

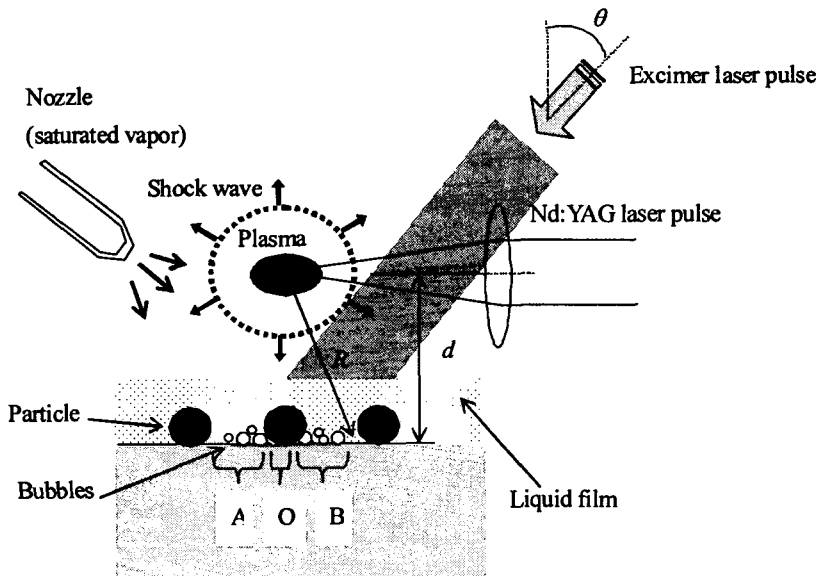


Fig.1 Concept of the novel liquid-assisted laser shock cleaning (LLSC) method.

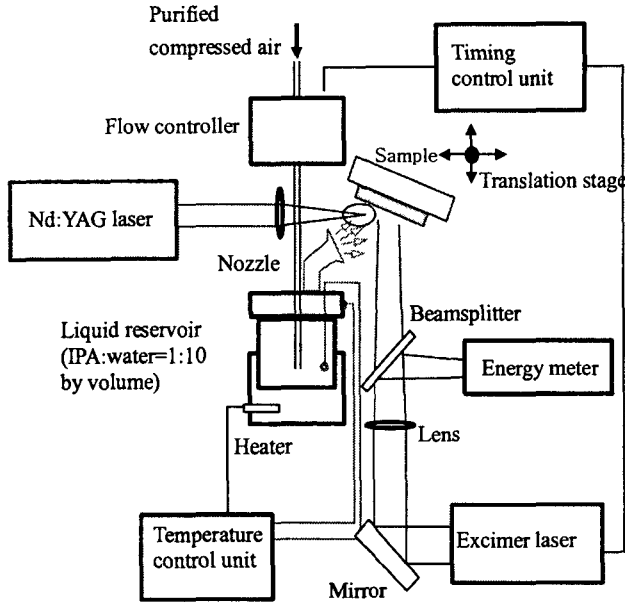


Fig.2 Experimental setup for LLSC.

초점 거리를 가지는 집광 렌즈를 이용하여 시편으로부터 2 mm 떨어진 지점에 충격파를 발생시켰다. 엑시머 레이저는 플루언스 $100\sim 300 \text{ mJ/cm}^2$ 의 범위 내에서 시편에 $\theta = 30^\circ$ 의 각도로 조사하였다. 60°C 로 유지된 액체(isopropanol : 증류수 = 1 : 10)에 의해서 만들어진 증기를 시편에 수십 ms 동안 분사하여 액막을 형성하였다. 액막 형성 후 약 100 ms 이후, Nd:YAG 레이저에 의해 형성된 충격파가 시편에 도달하여 입자에 세정이 이루어지는 시점($1\sim 2 \mu\text{s}$)⁵⁾과 엑시머 레이저에 의해 유발되는 폭발적 기화(약 1 μs 의 시간 구간 이내에 발생)⁶⁾가 발생하는 시점을 동기화하여 두 가지 세정력이 입자에 동시에 작용하도록 레이저 조사 시점을 설정하였다.

세정 실험에 이용된 입자는 50 nm, 100 nm의 평균 지름을 가지는 Al_2O_3 와 50 nm의 평균 지름을 가지는 CuO 입자를 이용하였다. 위 입자들을 sonic bath 및 magnetic stirrer를 이용하여 증류수에 분산시킨 후, 실리콘 웨이퍼를 이 용액에 담근 후 건조시켜 입자가 웨이퍼 위에 일정하게 분포되도록 하였다. 입자 세정 공정 후 scanning electron microscope(SEM)를 이용하여 세정 결과를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 3은 100 nm의 평균 지름을 가지는 알루미늄 입자에 대한 세정 결과를 SEM을 통하여 분석한 결과이다. LLSC 공정을 통한 세정 결과와 습식 레이저 세정 공정(SC)과 레이저 충격파 세정 공정(LSC)을 일정한 시간 간격을 두고 교대로 적용한 결과와 비교하였다. 세정 결과, Fig. 3의 (b)와 (c)에서

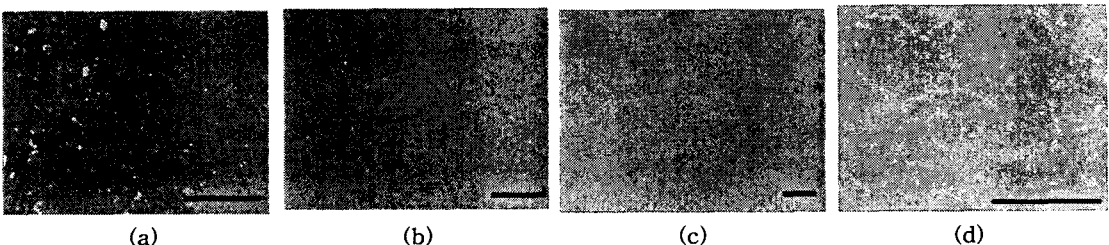


Fig.3 SEM images of a silicon substrate with Al_2O_3 particles 100 nm in nominal mean diameter, excimer laser fluence = 270 mJ/cm^2 : (a) before cleaning, (b) after 20 SC cycles followed by 20 LSC cycles, (c) after 20 LLSC cycles, and (d) after 100 LSC cycles (scale bar: 10 μm).

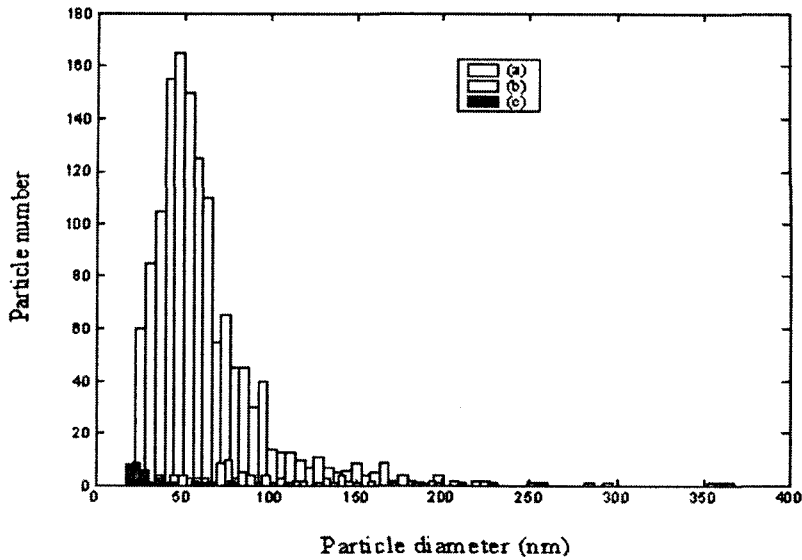


Fig.4 Particle-size distribution (100 nm nominal mean diameter): (a) before cleaning, (b) after 20 SC cycles followed by 20 LSC cycles, and (c) after 20 LLSC cycles.

볼 수 있듯이 LSC 공정과 SC 공정을 교대로 적용한 방식은 LLSC 공정에 비하여 입자 세정 능력이 낮음을 볼 수 있다. Fig. 4의 (d)에서 볼 수 있듯이 LSC 공정만을 적용한 방식에서는 100 nm 수준의 입자 제거가 불가능함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 약 $700 \mu\text{m}^2$ 의 시편 면적으로부터 얻은 입자 크기에 따른 세정 결과를 도표화 한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 가지 세정 공정을 별도로 시행한 결과에서는 100 nm 이하의 크기를 가지는 입자가 세정 이후에도 다수 발견되며 100 nm 이상의 크기를 가지는 입자도 발견된다. 그러나 LLSC 공정에 의한 세정 결과에서는 100 nm 이상의 입자는 모두 제거 되었으며 50 nm 수준의 입자도 다수 제거됨을 볼 수 있다.

Fig. 5는 50 nm 알루미늄 입자에 의해 오염된 시편을 두 가지 세정 방식에 통해 입자 제거를 수행한 후의 SEM 사진이다. 입자 제거 정도는 100 nm 입자에 대한 세정 결과와 매우 유사하게 나타났다. SC 공정 및 LSC 공정이 별도로 수행된 이후에는 미세한 입자들이 어느 정도 관찰되지만 LLSC 공정에 의해 세정된 시편에서는 상대적으로 남아 있는 입자가 거의 발견되지 않았다.

Fig. 6은 50 nm 알루미늄 입자에 대한 세정 효율을 나타낸 그래프이다. 100 nm 수준의 입자 제거는 두 방법에 모두에서 100 % 이루어지나 입자의 크기가 100 nm 이하로 작아질 때에는 제거 효율이 다소 감소하게 된다. 그러나 LLSC 공정에 의한 입자 제거 효율의 90~100 % 수준으로 두 가지 세정 공정을

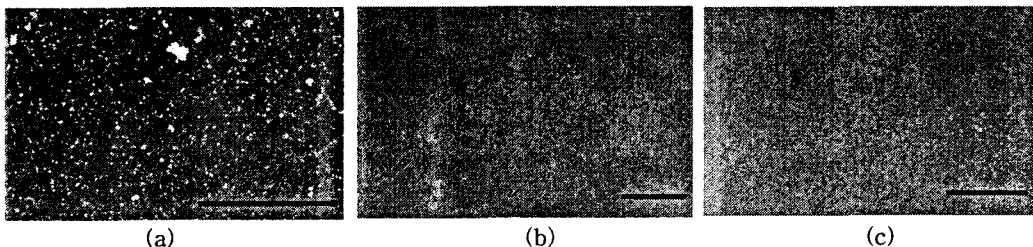


Fig.5 SEM images of a silicon substrate with Al_2O_3 particles 50 nm in nominal mean diameter, excimer laser fluence = 270 mJ/cm^2 : (a) before cleaning, (b) after 20 SC cycles followed by 20 LSC cycles, and (c) after 20 LLSC cycles (scale bar: $10 \mu\text{m}$).

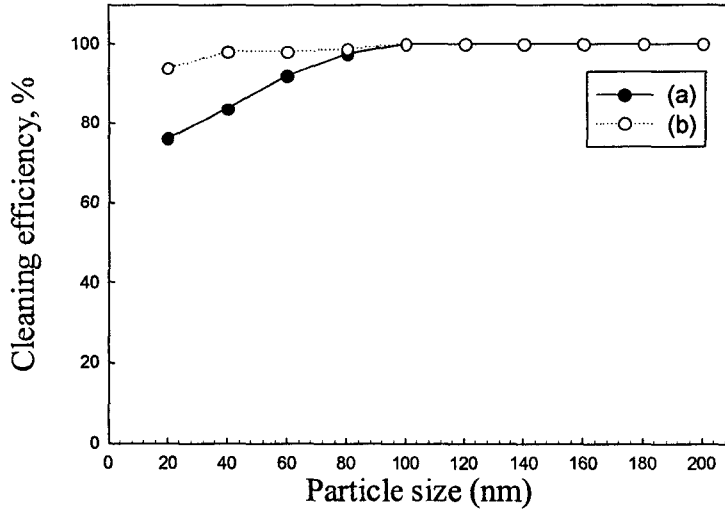


Fig.6 Cleaning efficiency (50 nm nominal mean diameter): (a) after 20 SC cycles followed by 20 LSC cycles, and (b) after 20 LLSC cycles

별도로 수행한 결과에 비해서 높음을 볼 수 있다.

50 nm의 평균 지름을 가지는 CuO 입자에 대해 LLSC 공정을 수행하였을 때 역시 알루미늄 입자 세정 결과와 유사한 모습을 보였다. 100 nm 이상의 입자에 대해서는 100 % 세정이 이루어 졌으며, 50 nm 수준까지 높은 세정 효율을 보였다.

IV. 결론

본 연구에서는 충격파 세정 공정 및 습식 레이저 세정 공정을 접목하여 입자 세정력을 극대화한 새로운 입자 세정 공정(LLSC)을 제시하였다. LLSC 공정과 기존의 레이저 빔을 이용한 SC 및 LSC 세정 공정을 비교한 결과, 100 nm 이하의 입자 제거 효율이 LLSC 공정을 이용할 시 기존의 레이저 기반 세정 공정에 비해서 크게 증가함을 알 수 있었다. 본 연구의 실험 결과에 의하면 두 가지 펄스 레이저 (Nd:YAG 및 엑시머 레이저)의 조사 시점의 변화에 따라 세정력의 크기가 변화하였다. 따라서 이를 최적화 시키면 수십 nm의 크기를 가지는 Al_2O_3 및 CuO와 같은 미세 입자의 세정에 이용할 수 있다.

V. 참고문헌

1. W. Zapka, et al : Efficient pulsed laser removal of 0.2 μm sized particles from a solid surface, *Appl. Phys. Lett.*, 58(20), pp. 2217-2219, (1991)
2. M. She, et al : Liquid-assisted pulsed laser cleaning using near-infrared and ultraviolet radiation, *J. Appl. Phys.*, 86, pp. 6519-6524, (1999)
3. J. M. Lee, et al : Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves, *J. Appl. Phys.*, 89, pp. 6496-9500, (2001)
4. C. Cetinkaya, et al : Nanoparticle removal from substrates with pulsed-laser induced plasma and shock waves, *J. Adhesion Sci. Technol.*, 16(9), pp. 1201-1214, (2002)
5. H. Lim, et al : Optical diagnostics for particle-cleaning process utilizing laser-induced shockwave, *Appl. Phys. A*, 79, pp. 965-968, (2004)
6. D. Kim, et al : Interferometric probing of rapid vaporization at a solid - liquid interface induced by pulsed-laser irradiation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 44, pp. 3843-3853, (2001)