

레이저빔 응용 가공기술

황 경 현

한국기계연구원 자동화연구부

I. 서 론

엑사이머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로젠족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발진되는 157~350nm 파장대에 자외선 레이저이다. UV 레이저를 이용하면 종래의 기계 가공 공정으로 실현할 수 없는 극소형 및 초정밀의 기계구조, 센서 또는 액츄에이터를 비접촉식으로 할 수 있고 가공시 열손상이 거의 없다. 최근 제품의 소형화 및 박막화 추세에 따른 미세가공 기술의 급속한 발전을 살펴보면, UV 레이저를 이용한 실리콘 표면의 도핑(doping)에 관한 연구^[1], 알루미늄 기판에 UV 레이저를 이용한 LAD (Laser-assisted deposition) 패키징 기술에 관한 연구^[2], 미소전자 패키징에 레이저를 이용하는 방법^[3]뿐만 아니라, 레이저 유도에 의한 금속과 혼합물의 물질전달 현상을 활용한 마이크로 패터닝에 관한 연구도 진행되고 있다.^[4] 본 글에서는 여러 가지 응용분야중 레이저 어블레이션, 레이저유도 화학에칭, 레이저 PVD등에 대하여 기술한다.

1. 레이저 어블레이션

레이저 어블레이션은 전자적 여기, 결합파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발등의 여러 가지 프레스스가 복합적으로 작용하여 일어난다. 이 경우 가공대상물의 주변 분위기 가스는 가공프로세스에 큰 영향을 주지 않으므로 응용목적에 따라 진공중, 대기중 또는 특별히 제어된 분위기 가스를 사용하기도 한다.

그리고 어블레이션 가공을 위해서는 High peak intensity 레이저가 필요하며, 따라서 펄스길이가 아주 짧은 레이저가 사용된다. 일반적으로 펄스길이는 Nanosecond 범위가 사용되며, 경우에 따라서는 Picosecond 또는 Sub-Picosecond 범위의 펄스 레이저를 사용하기도 한다. 펄스 길이가 짧을수록 가공된 단면의 품질이 우수하다. 어블레이션 가공을 하면 원자, 분자 또는 가공물의 파편등이 생성되며 이러한 부산물의 종류와 분포는 어블레이션 메카니즘과 레이저의 에너지 세기에 따라서 결

정된다. 그리고, 가공물로 부터 분리되는 부산물은 부분적으로 활성화되거나 이온화되어 가공표면으로부터 팽창하는 플라즈마를 형성하며, 어블레이션 공정중 화학반응에 의해 가공물의 성질을 변경시키고자 할 때는 분위기 가스를 활용하기도 한다.

가공 대상물은 금속, 반도체, 폴리머, 유리, 세라믹, 염료, 전기·광학 소재, 생체조직, 고온초전도체, 다이아몬드 또는 Diamond-like carbon 등과 같이 대부분의 재료가 가공가능하며, 응용분야는 마이크로 electronics, 광학, 초전도체 박막, 생물학, 의료분야 및 공업적인 절단, 마킹, 드릴링 등과 같이 다양하다

2. 레이저 유도 화학에칭

레이저 유도 화학에칭은 레이저에 의해 활성화된 가스가 고체표면과 반응하며 가공을 하는 프로세스으로써 활성화되지 않은 가스와 고체표면사이에는 에칭 반응이 일어나지 않는다.

레이저 어블레이션 프로세스와는 다르게 레이저 유도 화학에칭은 다음과 같이 몇 단계로 나뉘어져 일어난다. 첫단계에서는 고체표면과 분위기 가스 사이의 화학반응으로 고체표면의 원자와 가스분자가 몇 단계의 과정(표면에 가스의 흡착, dissociative chemisorption, 고체표면 아래로의 가스확산에 의한 새로운 화합물층 형성)을 거쳐 반응을 하게 된다. 레이저빔의 조사는 분위기 가스의 활성화, 고체표면의 가열 등에 의해 모든 반응 프로세스를 촉진시킨다.^[6-8]

그리고 두 번째 단계에서는 반응된 물질들의 분리공정으로 레이저 빔을 조사시키면, 빔이 조사된 부분에 한해서 표면이 활성화 되거나 가열되어 분리 반응이 일어나게 된다.^[9]

일반적으로 에칭가스는 할로젠족 가스(Cl_2 , Br_2 , Cl_4 , CF_2Br_2 , ...)를 사용하고, 압력의 범위는 10-7 ~ 500 Torr까지 다양하다.

그리고 사용되는 레이저는 CW, 펄스 모두 사용되며 응용분야는 레이저 direct writing 또는 projection patterning 방식에 의해 미세 전자회로의 연결, 수정 등에 활용되고 있다. 최근에는 레이저 기술의 발달과 더불어 레이저 어블레이션, 레이

저 유도 화학에칭 기술의 실용화가 점진적으로 진척되고 있다.

3. Laser physical vapor deposition(LPVD)

특히 고기능의 마이크로 센서 액츄에이터를 제조하기 위해서는 기능성 재료(intelligent material)를 수십 μm 이상의 두께로 막을 형성하는 기술과 3차원 정밀 진공스테이지의 제어 및 반송 초미립자의 혼합·교환에 따라 각종 patterning 및 경사 기능적 구조를 형성하고, 레이저를 이용하여 적층막의 일부 또는 전체를 가공 어닐링하는 기술이 필요하다. 일본의 기계기술연구소(MEL)에서는 이 방식을 이용하여 마이크로 미러를 제조하는 기술에 관한 연구를 진행하고 있으며 그 내용은 PZT를 실리코넬이피에 증착시키면서 경사구조를 만들고 최종적으로 금속박막을 코팅하여 거울을 만들고 전원을 부가하여 거울의 기울기를 제어하는 것이다. 이처럼 LPVD를 이용하여 마이크로 액츄에이터나 센서를 제작하는 연구는 그 응용범위가 넓다고 할 수 있다.

II. 금속박막의 레이저 어블레이션 연구

금속박막 제거의 기본 메카니즘은 증발(evaporation)로, 레이저 빔이 금속표면에 조사되면 표면에서 에너지가 흡수되어 금속이 증발온도(T_b)까지 가열되어 증발이 일어나며 이때의 임계 에너지(E_{th})가 중요한 가공 인자가 된다.

레이저 펄스에 의해 금속박막이 가열되는 공정을 좀더 자세히 살펴보면 금속박막과 저층으로 레이저빔 에너지 흡수와 열전달 과정은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} (c\rho)_{film} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{film} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right] + \\ &+ (1-R)a \exp(-\alpha x) I(x, t) \\ (c\rho)_s \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[k_s \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right] + \end{aligned} \quad (1)$$

$$k_{film} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=h} = k_s \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=h}$$

$$T(x, 0) = 0 \text{ and } T(\infty, t) = 0$$

상기의 방정식에서는 용융 프로세스는 고려하지 않았다.

여기서, $T(x, t)$ 는 금속박막의 온도

R 은 금속박막의 반사계수

h 는 금속박막의 두께

k_{film} 은 금속박막의 열전도율(Wcm/k)

k_s 는 저층의 열전도율(Wcm/k)

C 는 열용량

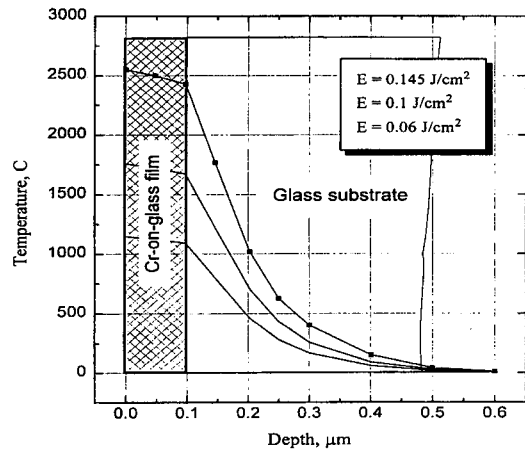
ρ 는 밀도

α 는 금속박막의 흡수율

$I(x, t)$ 는 레이저빔 강도(W/cm²)이다.

수치해석으로 본 방정식을 계산하여 레이저 에너지 밀도 변화에 따른 온도 분포곡선을 그래프로 표시하면 다음 Fig. 1과 같다 여기서 크롬 박막의 물성치는 문헌에 알려진 바가 없어 bulk 소재의 물성치를 그대로 인용하였으나, 금속박막의 물성값과 bulk 소재의 물성값은 서로 다르기 때문에 실제의 실험결과와는 다를 수 있다.

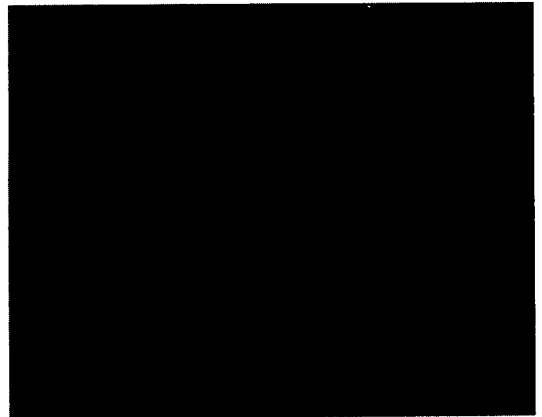
크롬박막의 두께를 1000Å으로 한 경우 에너지 밀도를 140mJ/cm²으로하면 크롬박막의 표면에서



〈그림 1〉 레이저 조사에 의한 표면온도곡선

온도가 2500℃ 정도가 되어 어블레이션이 발생하는 것으로 예상된다. 그러나, 이 경우 용융에 관한 에너지가 고려되지 않았으므로, $\lambda\rho h/(1-R)$ 으로 고려하여 임계에너지 밀도를 다시 계산하면 $\approx 180\text{mJ/cm}^2$ 가 되어 실제 실험에서 얻은 값 250mJ/cm²에 좀더 가깝게 된다. 여기서 금속박막의 두께를 물리적으로 좀더 자세히 관찰해보면 $h \ll \sqrt{x_{film}t}$ 이므로 금속박막을 레이저 펄스가 충돌하는 순간 균일하게 가열된다는 것을 알 수 있다.

위 어블레이션을 이용하여 인코더(encoder)의 중요부품인 옵티컬 슬릿의 가공을 할 수 있다. 옵티컬 슬릿은 유리 판위에 크롬 코팅이 되어 있는 소재를 엑사이머 레이저를 이용하여 코팅층을 제거 하므로써 만들어 진다. 제거되는 코팅층의 폭은 수 마이크로에서 수십 마이크로이며 코팅층의 두께는 수천 옴스트롱의 dimension을 갖는다. 이때 코팅층을 제거하기 위하여 가해지는 레이저에 의하여 코팅층은 evaporation되며 조사되는 레이저의 출력에 따라 제거되는 코팅층 주변과 유리 소재의 열영향이 어블레이션 가공의 품질을 결정하는 인자가 된다. 그 가공예는 Fig. 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 레이저 어블레이션에 의한 금속 박막가공

III. 폴리머 어블레이션 및 미세 구조를 가공

폴리머를 구성하는 유기분자와 레이저의 광자사이의 반응은 금속이나 무기화합물의 경우와는 다른 방식으로 이루어진다. 유기분자에 적외선(IR) 레이저의 광자가 흡수되면 회전 및 진동여기가 일어나면서 최종적으로 열적 분해에 의해 재료가 제거되는데 반해서 자외선(UV) 레이저의 광자가 흡수되면 상위의 전자상태(electronic state)로의 다광자 여기가 일어나면서 이온화와 분해가 이루어진다. 가시 또는 적외선 레이저 펄스와 자외선 레이저 펄스를 구별할 수 있는 이와 같은 현상의 가장 두드러진 특징은 펄스수와 레이저의 에너지 밀도(fluence)의 조절에 의해 제거의 깊이를 정확하게 제어할 수 있다는 것과 재료에는 어떠한 열적 손상도 일어나지 않는다는 점이다. 폴리머의 표면과 레이저 펄스의 상호작용은 레이저 펄스 조사후 약 30 μ s 이내에 이루어진다.

폴리머의 가공특성을 이용하여 마이크로머신에 사용될 수 있는 3차원 미세구조물을 제작할 수 있는데 이는 레이저 빔을 시편에 조사하는 동안 MASK를 이동시키면 레이저빔과 시편의 Interaction time이 변해서 가공되는 깊이가 MASK 이동속도에 따라 변해서 가공되는 깊이가 MASK 이동속도에 따라 결정됨으로 해서 가능하

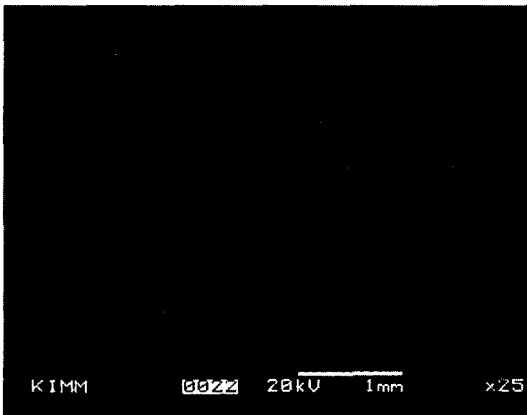
다. MASK를 고정시키고 레이저 빔을 조사하면 2차원 형상이 되지만 레이저 빔의 집광현상을 이용하면 테이퍼 형상의 가공이 가능하다. 이렇게 형성된 부분에 전해 또는 무전해 도금방법을 이용하여 몰드를 제작한 다음 이를 이용하여 미소 3차원 구조물을 제작할 수 있는 것이며 그 예는 다음 Fig. 3과 같다.

IV. 실리콘 표면 미세 가공

1. 레이저 유도 화학 에칭 표면 미세 가공

1975년경 발명된 엑사이머 레이저는 광자당 에너지가 다른 광원에(수은등) 비하여 매우 크기 때문에 마이크로 리소그래피 분야에서 주목을 받고 있다. 가장 대표적으로 사용되는 엑사이머 레이저의 파장을 살펴보면 351nm(XeF), 308nm(XeCl), 248nm(KrF)과 193nm(ArF)로 엑사이머 레이저는 통상적으로 10~20ns의 펄스폭을 갖고 있으며 펄스당 에너지는 수십 mJ~수J 정도이고, 파장이 짧으므로 기존의 리소그래피에서 사용한 감광재가 필요없는 직묘법이(direct dry patterning technology) 가능하고, 현재의 기존 램프투영 방식의 경우에는 최소 선폭이 0.5 μ m 이하까지의 최소 선폭 가공이 가능한 것으로 알려져 있다. 엑사이머 레이저를 이용한 기술에는 레이저 유도화학 증기 증착, 에칭, 도핑 그리고 증발(laser-assisted chemical vapor deposition, etching, doping and ablation)이 있다. 레이저 유도화학 에칭장치는 레이저와 에칭장치가 조합된 것으로 기본적 가공 모델은 다음의 공정으로부터 이루어진다.

- ① 레이저광에 의해 화학액 또는 가스내에 활성 이온이나 플라즈마가 생성되던가, 국부적으로 재료의 온도가 상승하여 열적으로 활성화된다.
- ② 재료와 활성이온 또는 플라즈마가 결합하던가, 열적으로 활성화되니 재료가 주변의 분위기 gas와 반응하여 용해성 또는 휘발성이 있는 생성물을 형성한다.



〈그림 3〉 폴리머의 3차원 미세가공

가스분자와 고체표면의 반응은 흡착(adsorption), 해리흡착(dissociative chemisorption), 표면 위의 원자들과의 흡착작용, 새로운 화합물의 형성, 표면으로부터 반응물의 분리(desorption)와 같은 여러 공정을 거쳐 이루어지는데 레이저빔의 조사는 가스나 흡착층 분자의 광여기, 고체면의 광/열 여기, 레이저 유도 분리반응과 같은 세가지 메카니즘에 의해서 이러한 공정에 영향을 줄 수 있고, 많은 경우에 공정을 증진시킬 수 있다.

실제 반응에서 반응 가속도는 위에서 언급된 것 중의 한 메카니즘에 의해 증진되는 경우는 거의 없고, 대부분의 경우 여러 공정이 동시에 일어나거나 세가지 메카니즘이 모두 관여하게 된다.

가장 효과적이고 자주 이용되고 에칭액은 여러 종류의 할로젠을 포함하는 가스로서 고체표면에서의 이러한 할로젠 가스분자들의 흡착은 해리 흡착반응과 표면 위의 할로젠화(halogenization)를 유도하여 할로젠층이 표면에 형성되게 된다. 고체의 레이저 에칭은 표면의 반응과정과 반응 생성물의 분리과정으로 이루어지는데 이와 같은 반응 생성물의 형성 메카니즘과 반응물 재료-에칭액 조합의 휘발능력에 따라 결정된다.

앞에서 언급된 화학 에칭반응은 보통상태에서는 일어나지 않으므로 열이나 광과 같은 외부의 영향이 필요하다. 현재까지 가장 많이 연구된 재료 에칭 조합은 Si : F₂와 Si : Cl₂이다. 순수 클로린은 매우 화학 반응성이 높기 때문에 잘 사용하지 않고, 클로린을 포함하고 있는 가스(F₄, NF₃, COF₂)를 주로 사용한다.

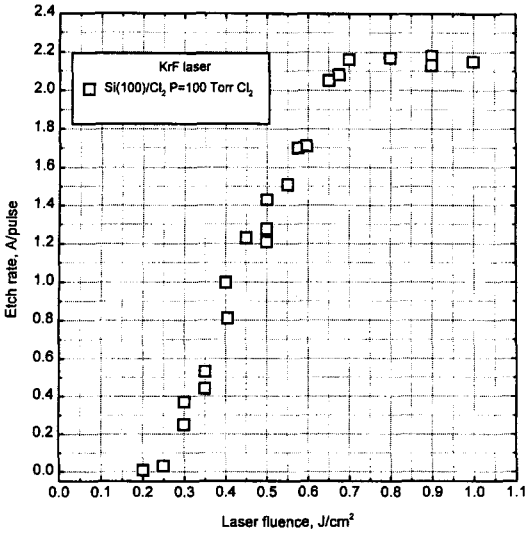
레이저 유도 화학에칭의 특징은 레이저 광을 광화학 반응을 일으키는 여기원으로 사용하든지 재료에 열을 부여하기 위하여 사용하기 때문에 통상의 레이저 가공에서와 같은 대출력은 필요 없으며 거의 모든 레이저를 사용할 수가 있다. 현재까지 레이저 유도 화학에칭에 의해 실용화되니 부품은 거의 없지만 현재 레이저의 종류와 에칭액 또는 가스의 종류와 재료의 조합에 대한 많은 연구가 진행중에 있으며 그중에서도 반도체(Si, GaAs, InP)의 클로린 에칭에 관한 연구가 가장 활발하게

이루어지고 있다.

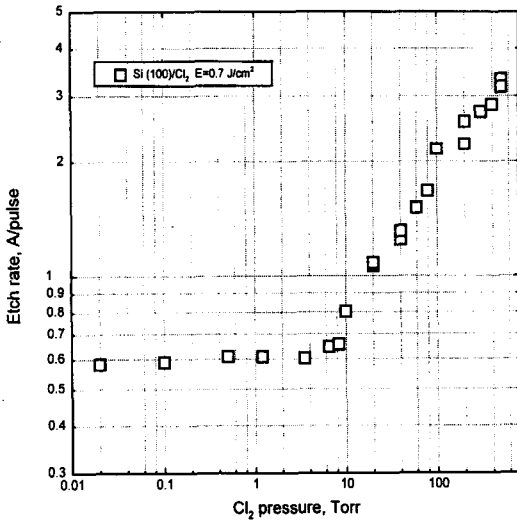
2. 에칭속도와 레이저 에너지 밀도 및 염소가스 압력

에너지 밀도가 0.2J/cm² 이하에서는 에칭은 거의 발생하지 않고, 0.2~0.7J/cm² 영역에서는 에칭속도(A/pulse)가 증가하며 0.7J/cm² 이상에서는 에칭 속도의 변화가 거의 없다. 염소가스의 압력을 100Torr로 높이면 실리콘 염화물이 많이 생성되어 포화에칭 속도가 2.2Å/Pulse로 높게 된다. 염소분위기 속에서 레이저 에칭 공정은 크게 흡착공정과 분리공정 두 부분으로 나눌 수 있다. 에칭은 염소 분자의 열반응(pyrolytic reaction) 공정으로 이루어지며 염소 분자가 해리되어 실리콘 표면에 흡착하여 염화물(SiCl_x)을 생성하고 레이저에 의해 가열된 염화물은 진동 에너지가 점점 증가하여 실리콘 웨이퍼 표면으로부터 분리를 하게 된다. 따라서 에칭 속도는 레이저의 에너지 밀도와 염소가스의 압력에 의해 영향을 받게 되고 0.7J/cm² 이상의 에너지 밀도에서는 표면에 형성된 염화물이 모두 분리되어 증발되는 것으로 판단되며, 이 영역에서는 실리콘 표면의 온도가 높아 반응속도가 매우 빠르기 때문에 반응영역으로 유입되는 염소가스 분자의 확산속도 제한으로 에칭속도의 포화현상이 발생하는 것으로 생각된다. 레이저 에너지 밀도가 ~450mJ/cm² 이 넘는 경우 실리콘 표면의 온도는 용융 온도(1683℃) 이상이 되는 것으로 이론적으로는 계산이 되지만 물성값이 정확하게 알려져 있지 않고, 특히 엑사이머 레이저 빔의 에너지 분포 형태가 큰 영향을 미치므로 이 값은 정확하지 않다. 그렇지만 에너지 밀도가 1J/cm² 이상에서는 10~30nm정도의 용융층이 발생된다. 다음의 Fig. 4은 염소가스압력 100Torr에서 실시한 에칭속도 결정에 관한 실험 결과이다.

염소가스 압력에 조건에 대해서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 염소가스 압력 0.01~10Torr 범위에서 1번째의 saturation이 발생되고 염소가스 압력이 10Torr 이상이면 실리콘 웨이퍼의 에칭 속도가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 염소가스 압력이



〈그림 4〉 레이저 에너지 밀도와 에칭속도의 관계



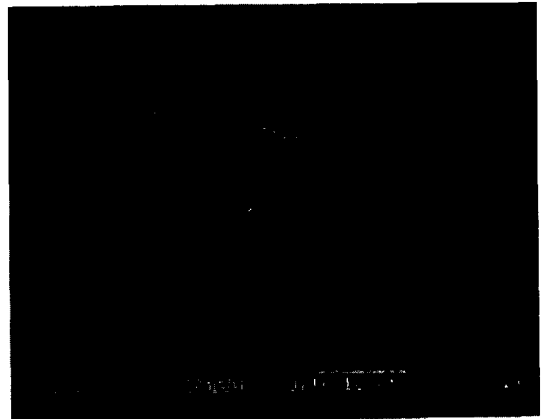
〈그림 5〉 염소 가스압력과 에칭속도의 관계

10Torr까지는 실리콘 표면에 형성된 염화물의 개수가 거의 일정하여 에칭 속도에 변화가 없다. 이 영역에서 레이저 빔의 에너지 밀도를 0.75J/cm²으로 하면 실리콘 표면에 형성된 염화물은 전량 분리된다.

즉 염소 가스의 압력이 10Torr 이하인 경우 최

대 에칭 속도는 0.6Å/pulse가 된다. 그리고 염소 가스 압력이 10Torr 이상인 영역에서는 염화물 구조가 변하여 분리 공정에 적합하게 되고 염화물의 두께도 증가되어 결과적으로 에칭 속도가 증가하게 되는 것으로 판단된다. 즉 10Torr 이상의 압력에서는 반응속도가 증가하여 에칭 속도가 증가하게 된다. 현재까지 실리콘 염소화합물의 정확한 구조는 아직 알려져 있지 않으므로 이 분야에 대한 연구는 더욱 진행 되어야 한다.

위와 같은 실험으로 실제 실리콘 표면을 미세 가공한 형상은 다음 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 유도 화학 에칭에 의한 가공에서는 조사되는 레이저 펄스수를 제어하여 미소가공 깊이를 Å order로 정확하게 가공할 수 있고, 실리콘 웨이퍼의 초기 가공면 상태(경면가공)는 에칭 공정 중에도 어느정도 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다.



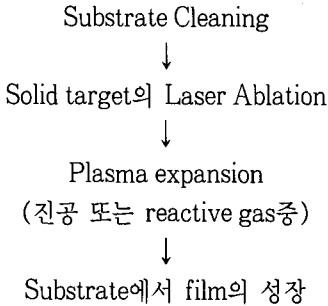
〈그림 6〉 Si(111), Cl₂ pressure 100 Torr, E=0.4J/cm², 8000, 6000, 3000 pulse

V. PZT 박막의 레이저 PVD 기술연구

Laser physical vapor deposition(LPVD)은 Nano technology 기술 개발에서 매우 유용한 수단으로 특히 고성능 박막제조에 그 활용도가 크다.

현재까지는 multi-layer X-ray mirror, Diamond or DLC film 등을 제조하는데 활용되고 있다.

LPVD는 다음과 같은 몇 단계의 Step으로 구성 된다.



이 기술을 이용하여 마이크로액츄에이터 제작에 응용할 수 있는데 그 응용의 한 예와 그 제작과정 중의 LPVD기술을 도식적으로 Fig. 7에 나타내었다.

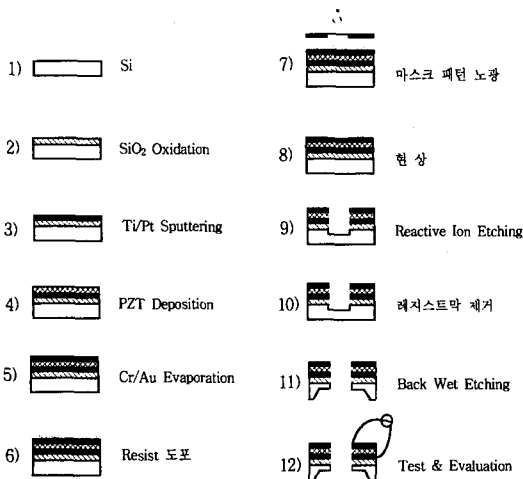
엑시머레이저 Ablation에 의한 Deposition 프로세스는 피에조일렉트릭 재료, 슈퍼얼로이재료, 형상기억합금등과 같은 기능성 재료 분야에서 주목을 끌고 있다. 증착된 박막은 벌크재료와 다른 성질을 가지며 그 이유중 하나는 원재료인 타겟과 증착된 막과의 화학적 성분 변화라 할 수 있다. 화학적 성분은 스퍼터링에 비해 고전적 진공기술에

서의 진공압의 차이에 따라 다르며 따라서 엑시머 레이저 어블레이션을 이용한 박막제조는 성분변화를 최소화 할 수 있는 것으로 기대되어 연구되어 왔다. 이 과정에서의 타겟은 열적 변화라기보다는 다소 광화학적으로 분해된다고 할 수 있다.

VI. 결 론

엑시머 레이저를 이용하여 미세가공 기술에 관한 응용분야로서 레이저 어블레이션, 폴리머 가공, 레이저유도 화학에칭, LPVD등을 검토하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 엑시머 레이저 어블레이션에 의한 금속박막에 미세제거 메카니즘의 이론해석을 통하여 어블레이션이 시작되는 임계에너지 밀도를 구하고, 이를 실험값과 비교하였다.
2. 금속박막 (Cr-on-glass)의 최적가공 조건을 실험을 통하여 구하고, 가공특성을 전자현미경, 광학현미경, 레이저 profile meter를 사용하여 조사하였고, 그 응용 예로 로타리 엔코더 가공에 본 기술을 적용하였다.(최소 선폭 14 μ m)
3. 폴리머의 가공특성을 조사하고 이를 통하여 ink jet nozzle, micro filter, 내시경 카테타 튜브의 유연성 그루브, 배선그루브, port 등에 응용할 수 있으며 미소 3차원 구조물을 제작할 수 있다.
4. 레이저 유도 화학에칭 장치를 구성하여 Si의 에칭속도와 에너지 밀도의 연관성, 염소가스 압력 의존성을 조사하였고, SiC 표면의 레이저 어블레이션 특성과 Å단위의 미세가공 특성을 조사하였다.
5. LPVD 기술을 이용하여 PZT deposition 특성을 조사하고, PZT micro cantilever 제조공정을 개발하였고, 그 활용 가능성에 대해서 검토했다.

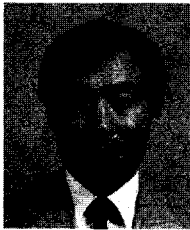


〈그림 7〉 미소 액츄에이터의 제조공정

참 고 문 헌

- [1] Richard M Osgood, "Laser-fabrication for solid-state electronics", IEEE circuits devices MAG vol.6 NO5 PP25~31, 1990.
- [2] A Bauer, J.Ganz, K.Hesse and E.Kohler, "Laser-assisted deposition for electronic packaging applications", Applied Surface Science Vol.46, PP113-120, 1990.
- [3] Robert F. Miracky, "Laser advance into microelectronic packaging", Laser Focus, Vol.27, NO.5, PP85-98, 1991.
- [4] Zolt Toth, Zoltan Kantor, Peter Mogyrosi and Tamas Szorenyi, "Surface patterning by pulsed laser induced transfer of metals and compounds", SPIE Vol.1279, PP150-157, 1990.
- [5] 황경현 외 10명, "광응용 기술 및 정밀가공 기술개발", 과학기술처 보고서(레이저 응용 기술개발), 1996.
- [6] F.A. Houle Non-thermal effects in laser enhanced etching of silicon by XeF₂ Chem. Phys.Lett., V.95(1), PP.5-8, 1983.
- [7] F.A. Houle Photochemical etching of silicon: The influence of photogenerated charge carries. Phys. Rev. B V39, N14, PP10120-10132, 1989.
- [8] J.R. Engstrom, M.M.Nelson and T.Engel. The adsorption of fluorine on the Si<100> surface. Surf. Sci. V. 215, PP.437-500, 1989.
- [9] J.W. Florio and W.D. Rorverson Chlorine reaction on the Si<111> surface. Surf. science. 18. PP.398-427, 1969.

저 자 소 개



黃 璟 珉

1952年 7月 23日生

1976年 2月 서울대 기계과졸 학사

1978年 2月 한국과학원 기계과졸 석사

1986年 12月 오하이오주립대 기계과졸 박사

1976年 2月~1997年 9月 현재 한국기계연구원

주관심 분야: 정밀가공기술, 마이크로머시닝