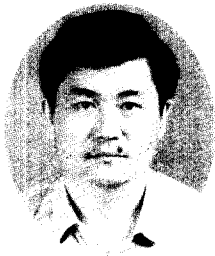


레이저빔 응용 가공기술

.....

윤경구, 김재구, 이성국, 황경현



윤경구

한국기계연구원 자동화연구부 선임연구원
전공은 레이저가공이며, 관심분야는 레이저
어블레이션, LPVD, Laser Assisted chemical
etching, Laser surface treatment 등이다.



이성국

한국기계연구원 자동화연구부 선임연구원
전공은 기계공학이며, 관심분야는 U·V 레이저
어블레이션, LPVD, 레이저절단 트리밍기술이다.



김재구

한국기계연구원 자동화연구부 연구원
전공은 기계공학이며, 관심분야는 레이저 응용
미세가공과 정밀가공이다.



황경현

한국기계연구원 자동화연구부 부장 책임연구원
전공은 기계공학이며, 관심분야는 레이저
응용가공기술, 초정밀가공, 고에너지빔 응용
미세가공이다.

머리말

엑시머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로젠족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발전되는 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, 알루미늄 기판에 UV 레이저를 이용한 LAD(Laser-assisted deposition) 패키징 기술에 관한 연구, 미소전자 패키징에 레이저를 이용하는 방법뿐만 아니라, 레이저 유도에 의한 급속

과 혼합물의 물질전달 현상을 활용한 마이크로 패터닝에 관한 연구도 진행되고 있다. 본 글에서는 여러 가지 응용분야 중 레이저 어블레이션, 레이저유도 화학에칭, 레이저 PVD 등에 대하여 기술한다.

레이저 어블레이션

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

그리고 어블레이션 가공을 위해서는 고강도점두출력 레이저가 필요하며, 따라서 펄스길이 아주 짧은 레이저가 사용된다. 일반적으로 펄스길이는 나노초 범위가 사용되며, 경우에 따라서는 피코초 또는 서브-피코초 범위의 펄스 레이저를 사용하기도 한다. 펄스 길이가 짧을수록 가공된 단면의 품질이 우수하다. 어블레이션 가공을 하면 원자, 분자 또는 가공물의 파편 등이 생성되며 이러한 부산물의 종류와 분포는 어블레이션 메커니즘과 레이저의 에너지 세기에 따라서 결정된다. 그리고 가공물로부터 분리되는 부산물은 부분적으로 활성화되거나 이온화되어 가공표면으로부터 팽창하는 프라즈

마를 형성하며, 어블레이션 공정중 화학반응에 의해 가공물의 성질을 변경시키고자 할 때는 분위기 가스를 활용하기도 한다.

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

레이저 유도 화학에칭

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

레이저 어블레이션 프로세스와는 다르게 레이저 유도화학에칭은 다음과 같이 몇 단계로 나뉘어 일어난다. 첫 단계에서는 고체표면과 분위기 가스사이의 화학반응으로 고체표면의 원자와 가스분자가 몇 단계의 과정(표면에 가스의 흡착, 해리흡착, 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.

그리고 두 번째 단계에서는 반응

된 물질들의 분리공정으로 레이저 빔을 조사시키면, 빔이 조사된 부분에 한해서 표면이 활성화 되거나 가열되어 분리 반응이 일어나게 된다.

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 직접 묘화 또는 투영패턴 방식에 의해 미세 전자회로의 연결, 수정 등에 활용되고 있다. 최근에는 레이저 기술의 발달과 더불어 레이저 어블레이션, 레이저 유도 화학에칭 기술의 실용화가 점진적으로 진척되고 있다.

레이저 PVD

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 초기립자의 혼합·교환에 따라 각종 패터닝 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 실리콘웨이퍼에 증착시키면서 경사구조를 만들고 최종적으로 금속박막을

코팅하여 거울을 만들고 전원을 부가하여 거울의 기울기를 제어하는 것이다. 이처럼 LPVD를 이용하여 마이크로 액츄에이터나 센서를 제작하는 연구는 그 응용 범위가 넓다고 할 수 있다.

레이저 어블레이션 연구

금속박막 제거의 기본 메커니즘은 증발(evaporation)로, 레이저 빔이 금속표면에 조사되면 표면에서 에너지가 흡수되어 금속이 증발온도까지 가열되어 증발이 일어나며 이때의 임계 에너지가 중요한 가공 인자가 된다.

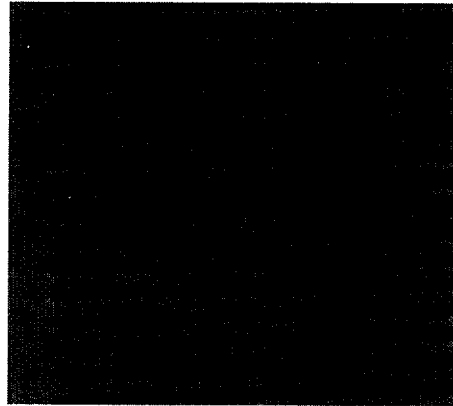
크롬박막의 두께를 1000Å으로 한 경우 에너지 밀도를 140mJ/cm²으로 하면 크롬박막의 표면에서 온도가 2500°C 정도가 되어 어블레이션이 발생하는 것으로 예상된다. 그러나 이 경우 용융에 관한 에너지가 고려되지 않았으므로, 이를 고려하여 임계에너지 밀도를 다시 계산하면 ≈ 180mJ/cm²가 되어 실제 실험에서 얻은 값 250mJ/cm²에 좀더 가깝게 된다. 여기서 금속박막의 두께를 물리적으로 좀더 자세히 관찰해 보면 금속박막은 레이저 펄스가 충돌하는 순간 균일하게 가열된다는 것을 알 수 있다.

위 어블레이션을 이용하여 인코더(encoder)의 중요부품인 옵티컬 슬릿의 가공을 할 수 있다. 옵티컬 슬

릿은 유리 판위에 크롬 코팅이 되어 있는 소재를 액시머 레이저를 이용하여 코팅층을 제거 하므로써 만들어진다. 제거되는 코팅층의 폭은 수 마이크로에서 수십 마이크로이며 코팅층의 두께는 수천 옴스트롱의 치수를 갖는다. 이때 코팅층을 제거하기 위하여 가해지는 레이저에 의하여 코팅층은 가열증발되며 조사되는 레이저의 출력에 따라 제거되는 코팅층 주변과 유리 소재의 열영향이 어블레이션 가공의 품질을 결정하는 인자가 된다. 그 가공예는 그림 1에 나타내었다.

한편 폴리머 어블레이션을 살펴보면 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 조

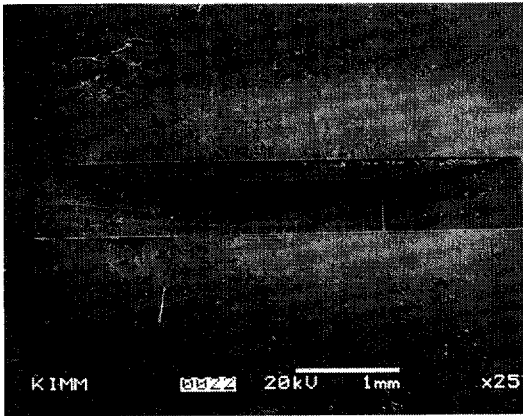
〈그림 1〉 레이저 조사된 금속박막의 형상



절에 의해 제거의 깊이를 정확하게 제어할 수 있다는 것과 재료에는 어떠한 열적 손상도 일어나지 않는다는 점이다. 폴리머의 표면과 레이저 펄스의 상호작용은 레이저 펄스 조사 후 약 30μs 이내에 이루어진다.

폴리머의 가공특성을 이용하여 마이크로머신에 사용될 수 있는 3차원 미세구조물을 제작할 수 있는데 이는 레이저 빔을 시편에 조사하는 동안 마스크를 이동시키면 레이저빔과 시편의 반응시간이 변해서 가공되는 깊이가 마스크 이동속도에 따라 변해서 가공되는 깊이가 마스크 이동속도에 따라 결정됨으로 해서 가능하다. 마스크를 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 3차

(그림 2) 폴리머 3차원 미세가공



원 구조물을 제작할 수 있는 것이며 그 예는 다음 그림 2와 같다.

실리콘 표면 미세 가공

1975년경 발명된 엑시머 레이저는 광자당 에너지가 다른 광원에(수은 등) 비하여 매우 크기 때문에 마이크로 리소그래피 분야에서 주목을 받고 있다.

가장 대표적으로 사용되는 엑시머 레이저의 파장을 살펴보면 351nm(XeF), 308nm(XeCl), 248nm(KrF)과 193nm(ArF)로 엑시머 레이저는 통상적으로 10~20ns의 펄스폭을 갖고 있으며 펄스당 에너지는 수십 mJ~수 J 정도이고, 파장이 짧으므로 기존의 리소그래피에서 사용한 감광재가 필요없는 직묘법(direct dry patterning technology) 가능하다.

현재의 기존 램프투영 방식의 경우에는 최소 선폭이 0.5 μ m 이하까지의

최소 선폭 가공이 가능한 것으로 알려져 있다.

엑시머 레이저를 이용한 기술에는 레이저 유도화학 증기 증착, 에칭, 도핑, 증발(laser-assisted chemical vapor deposition, etching, doping and ablation)이

있다. 레이저 유도화학 에칭장치는 레이저와 에칭장치가 조합된 것으로 기본적인 가공 모델은 다음의 공정으로부터 이루어진다.

① 레이저광에 의해 화학액 또는 가스 내에서 활성 이온이나 플라즈마가 생성되든가, 국부적으로 재료의 온도가 상승하여 열적으로 활성화된다.

② 재료와 활성이온 또는 플라즈마가 결합하든가, 열적으로 활성화된 재료가 주변의 분위기 gas와 반응하여 용해성 또는 휘발성이 있는 생성물을 형성한다.

가스분자와 고체표면의 반응은 흡착(adsorption), 해리흡착(dissociative chemisorption), 표면 위의 원자들과의 흡착작용, 새로운 화합물의 형성, 표면으로부터 반응물 분리(desorption)와 같은 여러 공정을 거쳐 이루어지는데 레이저빔의 조사는 가스나 흡착층 분자의 광여기, 고체면의 광/열 여기,

레이저 유도 분리반응과 같은 세가지 메커니즘에 의해서 이러한 공정에 영향을 줄 수 있고, 많은 경우에 공정을 증진시킬 수 있다.

실제 반응에서 반응 가속도는 위에서 언급된 것 중의 한 메커니즘에 의해 증진되는 경우는 거의 없고, 대부분의 경우 여러 공정이 동시에 일어나거나 세 가지 메커니즘이 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 표면 위에 형성되게 된다. 고체의 레이저 에칭은 표면의 반응과정과 반응 생성물의 분리과정으로 이루어지는데 이와 같은 반응 생성물의 형성 메커니즘과 반응물 재료-에칭액 조합의 휘발능력에 따라 결정된다.

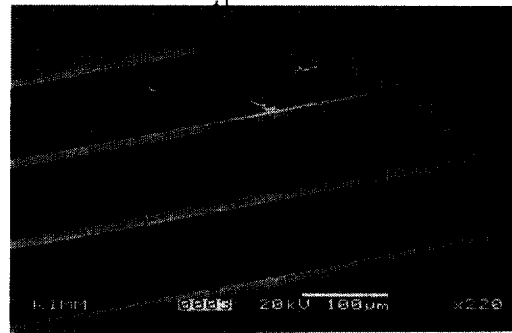
앞에서 언급된 화학 에칭반응은 보통상태에서는 일어나지 않으므로 열이나 광과 같은 외부의 영향이 필요하다. 현재까지 가장 많이 연구된 재료 에칭 조합은 Si:F₂와 Si:Cl₂이다. 순수 플로린은 매우 화학 반응성이 높기 때문에 잘 사용하지 않고, 플로린을 포함하고 있는 가스(F₄, NF₃, COF₂)를 주로 사용한다.

레이저 유도 화학에칭의 특징은 레이저 광을 광화학 반응을 일으키

는 여기원으로 사용하든지 재료에 열을 부여하기 위하여 사용하기 때문에 통상의 레이저 가공에서와 같은 대출력은 필요가 없으며 거의 모든 레이저를 사용할 수가 있다. 현재 까지 레이저 유도 화학에칭에 의해 실용화되니 부품은 거의 없지만 현재 레이저의 종류와 에칭액 또는 가스의 종류와 재료의 조합에 대한 많은 연구가 진행 중에 있으며 그 중에서도 반도체(Si, GaAs, InP)의 클로린 에칭에 관한 연구가 가장 활발하

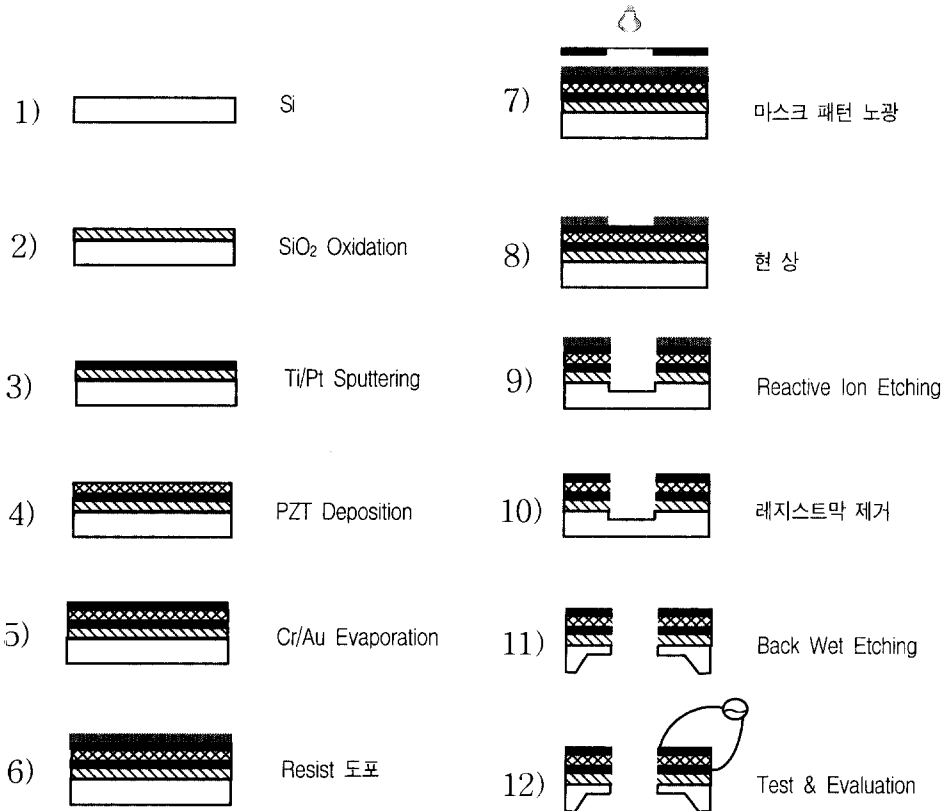
게 이루어지고 있다. 위와 같은 실험으로 실제 실리콘 표면을 미세가공한 형상은 다음 그림 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 유도 화학 에칭에 의한 가공에서는 조사되는 레이저 펄스수를 제어하여 미소가공 깊이를 음스크 단위로 정확하게 가공할 수 있고, 실리콘 웨이퍼의 초기 가공면 상태(경면 가공)는 에칭 공정 중에도 어느 정도

〈그림 3〉 Si(111), Cl₂ 압력 100 Torr, E=0.4J/cm², 8000, 6000, 3000 pulse



콘 웨이퍼의 초기 가공면 상태(경면 가공)는 에칭 공정 중에도 어느 정도

〈그림 4〉 마이크로 액츄에이터 제조공정 순서도

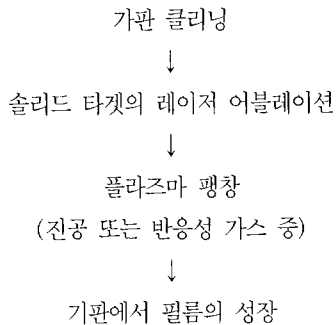


그대로 유지되고 있음을 알 수 있다.

PZT박막의 레이저 PVD기술연구

레이저 PVD는 나노테크놀로지 기술 개발에서 매우 유용한 수단으로 특히 고성능 박막제조에 그 활용도가 크다. 현재 다층 X-ray 거울, 다이아몬드 또는 DLC film 등과 광학 부품 즉 옵티칼스위치, 옵티칼웨이브 가이드변조기 등을 제조하는 데 활용되고 있다.

레이저 PVD는 다음과 같은 몇 단계의 단계로 구성된다.



이 기술을 이용하여 마이크로액츄에이터 제작에 응용할 수 있는데 그 응용의 한 예와 그 제작과정 중의 레이저 PVD기술을 도식적으로 그림 4에 나타내었다.

엑시머레이저 어블레이션에 의한 증착 프로세스는 피에조일렉트릭 재료, 슈퍼앨로이재료, 형상기억합금 등과 같은 기능성 재료 분야에서 주목을 끌고 있다. 증착된 박막은 벌크

재료와 다른 성질을 가지며 그 이유 중 하나는 원재료인 타겟과 증착된 박막의 화학적 성분 변화라 할 수 있다. 화학적 성분은 스퍼터링에 비해 고전적 진공기술에서의 진공압의 차이에 따라 다르며 따라서 엑시머레이저 어블레이션을 이용한 박막제조는 성분변화를 최소화 할 수 있는 것으로 기대되어 연구되어 왔다. 이 과정에서의 타겟은 열적 변화라기보다는 다소 광화학적으로 분해된다고 할 수 있다.


맺음말

엑시머 레이저를 이용하여 미세가공기술에 관한 응용분야로서 레이저 어블레이션, 레이저 PVD 등을 검토하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

① 엑시머 레이저 어블레이션에 의한 금속박막에 미세제거 메커니즘의 이론해석을 통하여 어블레이션이 시작되는 임계에너지 밀도를 구하여, 금속박막 (Cr-on-glass)의 최적가공 조건을 실험을 통하여 구하고, 그 응용 예로 로타리 엔코더 가공에 본 기술을 적용하였다.

② 폴리머의 가공특성을 조사하고 이를 통하여 잉크젯 노즐, 마이크로필터, 내시경 카테타 튜브의 유연성 그루브, 배선그루브, 포터 등에 응용할 수 있으며 미소 3차원 구조물을 제작할 수 있다.

③ 레이저 유도 화학에칭 장치를 구성하여 Si의 에칭속도에 따른 여러 실험조건을 살펴보고 SiC 표면의 레이저 어블레이션 특성과 Å단위의 미세가공 특성을 조사하였다.

④ LPVD 기술을 이용하여 PZT 증착 특성을 조사하고, PZT 마이크로 캔틸레버 제조공정을 살펴보았으며 그 응용분야는 폭넓다고 할 수 있다. 

(이규정 위원)