



펨토초 레이저 가공 기술

손익부*, 고명진*, 김영섭*, 노영철*

머리말

레이저를 이용한 마이크로 머시닝 기술은 1970년대 초에 처음 소개되기 시작하여 지금은 반도체, 전자, 자동차, 메카트로닉스 등의 첨단산업 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 환경 친화적이며, 비접촉 공정으로서, 수십 마이크로 사이즈의 형상을 갖는 부품 가공영역에서 기존의 공정을 대체하는 신 공정 개발에 기여하여 왔다. 초기의 레이저 가공은 연속파 또는 긴 펄스를 주로 사용하였는데 레이저 빔과 재료의 상호 반응시 발생하는 열적 가공현상 및 분해능의 한계로 인하여 경량, 박판, 고밀도, 고집적화 되어가고 있는 산업의 추세를 따라가기 힘들어졌다. 이를 극복하기 위하여 1990년대에 이르러 극초단 펄스 레이저가 개발되기 시작하였다. 그림1 은 기존의 긴 펄스의 레이저와 극초단 펄스 레이저의 재료가공 특징을 잘 보여주고 있다. 극초단 펄스 레이저의 경우 열확산 길이가 나노초에 비해서 매우 짧아서 플라즈마나 유동장의 형성 이전에 어블레이션이 일어나므로 열영향부 생성으로 인한 가공정밀도 저하를 크게 줄일 수 있다.

펨토초 레이저가 처음 등장한 것은 이미 35년 전이다. 1974년 Bell lab의 Shank와 Ippen이 처음으로 색소레이저에서 펨토초 영역의 시간폭을 갖는 펄스를 생성하였다[1]. 레이저가 발명된 직후 Q-스위칭이라는 방법에 의해서 나노초의 펄스가 생성되었고 모드잠금(mode-locking) 방법이 등장하면서 피코초에 이어 펨토초 영역의 펄스가 나오기 시작한 것이다. 펨토초 레이저 연구에 획기적인 기술은 1985년 처프 펄스 중폭(chirped pulse

amplification: CPA) 방식이다[2]. 이는 피코초 미만의 펄스를 매질의 손상 없이 효과적으로 증폭함으로써 10GW 이상의 첨두출력(peak power)을 얻을 수 있다. 이러한 펨토초 레이저 펄스의 짧은 시간폭(pulse width)으로 인하여 작은 에너지로도 큰 첨두출력을 낼 수 있다. 모든 물질에는 고유의 흡수 스펙트럼이 존재하여 그 흡수 파장의 레이저 광을 조사하여 가공을 하게 된다. 펨토초 레이저는 첨두출력이 매우 높아서 비선형 현상인 다광자 흡수(multi-photon absorption)가 가능하게 된다. 펨토초 레이저는 이러한 메커니즘에 의하여 모든 물질에 대한 흡수가 가능하여 자외선에서만 가공이 가능한 물질을 포함한 다양한 물질의 3차원 정밀 가공이 가능하다. 기존의 긴 펄스 레이저 빔을 물질에 조사하면 레이저광의 에너지가 열로 변환되어 가공부 주변의 열변형을 발생시킬 뿐 아니라 미세한 크랙(crack)을 발생하는 등의 문제가 생긴다. 펨토초 레이저는 이러한 열영향이 최소화되기 때문에 온도 상승에 의해 물성 변화를 하는 반도체 재료를 손상 없이 정밀하게 가공하는 것이 가능하여 최근에는 반도체, 컴퓨터 산업, 광통신 산업, 바이오, 의료 산업, 나노, 신소재 산업, 환경, 원자력 산업 등의 다양한 응용분야와 큰 시장을 형성하고 있다. 그러나 아직까지 펨토초 레이저의 산업체 응용을 위해서 해결해야 할 문제점이 적지 않다. 그것은 펨토초 레이저 광원의 장기 안정성(long-term stability), 고속 가공을 위한 고출력과 고반복률(high repetition rate) 등이 필요하다[3-5].

광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실에서는 펨토초 레이저의 미세 가공 기술 및 응용 연구를 진

* 광주과학기술원 고등광기술연구소

펨토초 레이저 가공 기술

행하고 있으며, 산·학·연에 레이저 가공 기술 지원 및 공동 연구를 수행하고 있다. 또한 초미세 펨토초 레이저 나노 가공 센터 설치운영 사업을 통하여 고출력 고반복률 펨토초 레이저 가공 시스템과 UV 펨토초 레이저 가공 시스템을 구축하여 산업체 적용을 위한 고속 미세 가공 연구를 진행하고 있다. 본 고에서는, 고등광기술연구소 미세광학연구실에서 최근에 다양한 펨토초 레이저 가공 시스템과 이를 이용한 초미세 레이저 가공 기술에 대한 내용을 소개하고자 한다.

펨토초 레이저 고속 가공 기술

펨토초 레이저를 이용한 레이저 가공에서 가장 큰 특징은 레이저의 펄스폭이 재료의 열 전파 시간보다 짧기 때문에 재료의 열적 손상이나 구조변화를 발생시키지 않는 장점이 있다. 다시 말하면, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열 확산 현상은 발생되지 않으며 기존 레이저의 열적 가공보다 정밀한 가공이 가능하다. 그림 1은 장펄스 레이저와 극초단 펄스 레이저의 가공 특성을 보여준다. 펨토초 레이저는 가공물의 주변에 형성되던 용융물 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고 발생된다 하더라도 매우 미세한 파우더 형태이며 이는 쉽게 세척이 가능하다는 장점이 있어 현재 전 세계적으로 각광을 받고 있다. 또한, 펨토초 레이저는 다광자 흡수에 의한 가공 원리에 의해서 가공물질에 제한적이지 않으며 금속, 유전체, 세라믹 등 다양한 재질의 정밀 가공이 가능하다.

그림 2는 광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학

연구실 전경이다. 그림 3(a)는 펨토초 레이저 가공 시스템은 파장이 785 nm, 펄스폭이 184 fs, 펄스 반복률이 1kHz, 그리고 최고 펄스 에너지는 1 mJ(1 W)인 사이버레이저사의 IFRIT, 그림 3(b)는 파장이 1030/515/257 nm, 펄스폭이 250 fs, 펄스 반복률이 100kHz, 그리고 펄스 에너지는 60/30/10 μ J(6 W)의 사양을 가지는 LightConversion사의 Pharos 펨토초 레이저로 구성되어 있는 펨토초 레이저 가공 시스템을 보여준다. 펨토초 레이저 가공 시스템은 가공 영상을 얻을 수 있는 비전 시스템, 정밀도 1 μ m와 최대 이송속도 300 mm/s의 3차원 정밀 구동 스테이지와 고속 스캐너 장치에 펨토초 레이저 펄스 제어, 세기 조절 장치들로 구성되어 있다. CAD 프로그램을 이용한 다양한 형태의 3차원 가공이 가능하다.

현재 반도체 소자 재료용 재료로서 광범위하게 사용되고 있는 실리콘웨이퍼(Silicon Wafer)는 다결정 실리콘(Si)을 원재료로 하여 만들어진 단결정 실리콘 박판을 말한다. 실리콘으로 만들어진 실리콘 웨이퍼는 넓은 Energy Band gap(1.2eV)을 가지고 있기 때문에 비교

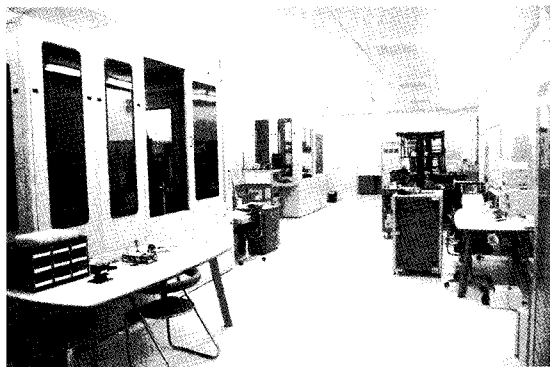


그림 2. 미세광학연구실 전경(고등광기술연구소)

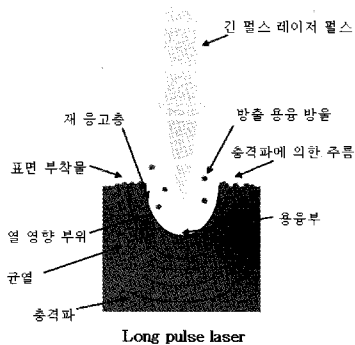
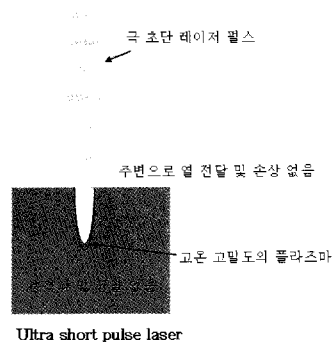
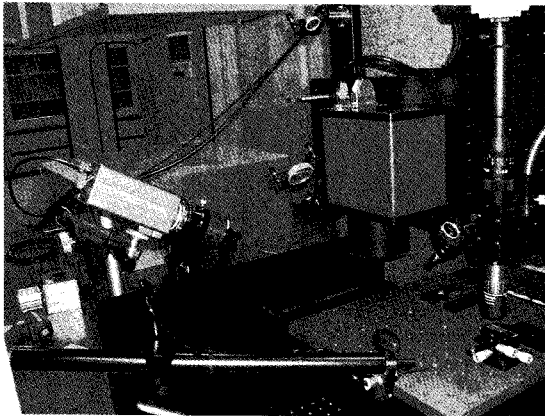
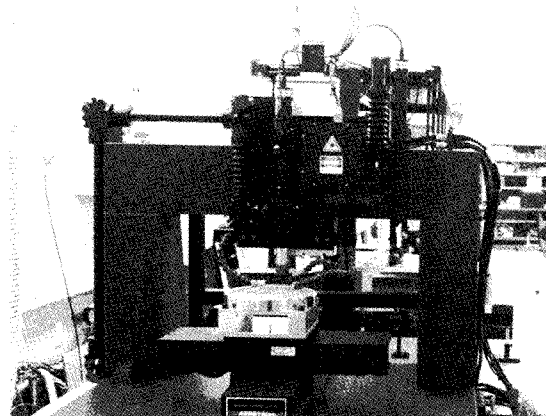


그림 1. 장펄스 레이저와 극초단 펄스 레이저의 가공 특성 비교





(a)



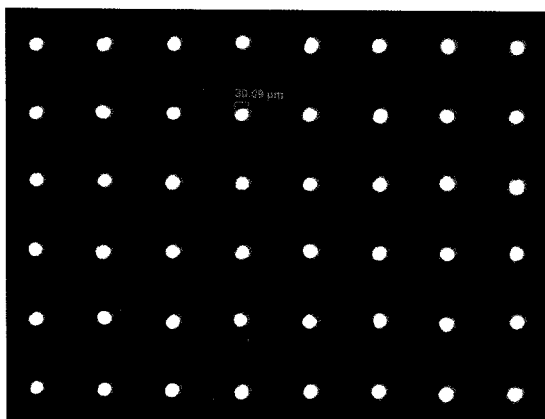
(b)

그림 3. 펨토초 레이저 가공 시스템, (a) 1kHz 펨토초 레이저 가공 시스템, (b) 100kHz 펨토초 레이저 가공 시스템.

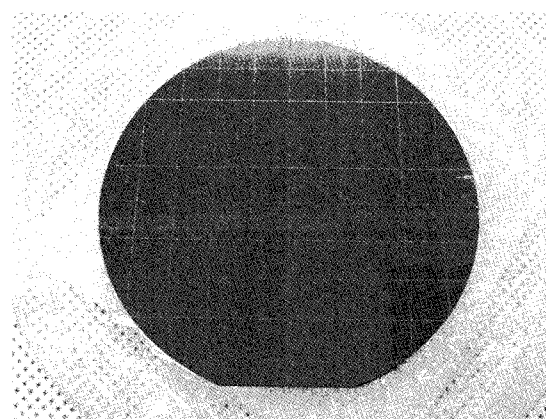
적 고온(약 200°C 정도까지)에서도 소자가 동작할 수 있는 장점이 있다. 모래에서 추출된 실리콘은 정제과정을 거쳐 고순도 다결정 실리콘으로 형성되고 이를 단결정 실리콘 웨이퍼로 제조하여 DRAM, ASIC, TR, MOSFET, CMOS, PMOS, ROM, EP-ROM 등 다양한 형태의 Device를 만드는데 이용된다. 이들 Device는 오늘날 산업분야 전체에서 없어서는 안 될 중요한 부품들로 각종 전자제품, 컴퓨터, 인공위성 등에 쓰이고 있다. 반도체 소자가 고집적화 될수록 반도체 소자의 수율 및 품질에 미치는 원재료 특성의 민감도가 점차 커지고 있다. 최근에는 실리콘 웨이퍼의 두께가 100 μm 이하로 매우 얇아지고 있는 추세이며 기존의 기계적인 절단 방법으로 한계가 있으며, 레이저를 이용한 정밀 가공 기술이 필요하게 되었다. 그림 4는 펨토초 레이저를 이용한 실

리콘 기판의 미세 홀 가공 및 실리콘 웨이퍼 스크라이빙(scribing) 결과를 보여준다. 그림 4 (a)는 1kHz 펨토초 레이저와 스캐너 가공 시스템을 이용하여 실리콘 기판에 직경이 30 μm인 주기적인 홀을 가공하였으며, 홀 하나의 제작 시간은 1초 정도이다. 그림 4 (b)는 실리콘 기판에 100kHz 펨토초 레이저를 이용하여 초당 300 mm의 속도로 스크라이빙한 결과이며, 펨토초 레이저 펄스에 의한 열영향부(Heat affected zone, HAZ)는 기존의 나노초 레이저에 비해서 절반 정도 줄어드는 것을 알 수 있었다. 앞으로 펨토초 레이저는 반도체 산업에서 없어서는 안 될 중요한 가공 툴(tool)로써 역할이 기대된다.

펨토초 레이저를 이용한 정밀 미세 패턴 가공은 최근에 각광받고 있는 LCD와 PDP 같은 디스플레이나 모바일 분야에 활용이 가능하다. 새로운 공정 개발로 비용을 최



(a)



(b)

그림 4. 펨토초 레이저를 이용한 (a) 실리콘 기판 홀 드릴링 및 (b) 스크라이빙 결과

펄토초 레이저 가공 기술

소화하는 것이 중요하며, 그 중에서 식각 기술을 이용한 강화유리 절단에 대한 대체 기술로써 레이저 가공 기술이 최근에 많은 관심을 끌고 있다. 고등광기술연구소 미세광학연구실에서는 최근에 LG 디스플레이와 공동으로 펄토초 레이저를 이용한 강화유리 절단에 대한 가능성 실험을 하였다. 강화유리는 일반 판유리를 연화온도에 가까운 670℃-710℃로 가열하고 압축해 냉각공기로 급냉시켜 유리 표면부를 압축, 변형시키고 내부를 인장 변형시켜 강화한 유리를 말한다. 보통유리에 비해 굽힘 강도는 3-5배, 내충격은 5-8배 강화되며, 내열강도(열충격 저항)는 일반유리의 경우 약 80℃(유리 두께 3mm, 크기 10cm×10cm)가 파손되지 않는 온도차의 한계이지만, 강화유리의 경우 약 180℃(일반유리 시편과 동일) 정도로, 약 2배 이상 열충격 저항이 크다. 유리가 깨지는 이유는 유리에 외력이 가해지면 유리 표면에는 압축응력이, 그 반대측 유리 표면에는 인장응력이 작용하기 때문이다. 반대측 유리면에 압축응력이 작용하도록 하면, 인장응력에 저항 할 수 있는 힘이 형성되므로 유리는 깨지기 어렵게 된다. 강화유리는 이와 같이 일반 유리와 달리 유리 표면에 압축응력이 형성되어 있기 때문에 강도가 높다.

강화유리를 기계적으로 다시 절단하는 것은 사실 불가능하다. 즉 강화처리하기 전에 정해진 크기 혹은 모양으로 절단해 두어야 한다. 강화유리의 유리 표면에는 외부 하중에 견딜 수 있도록 압축응력이 형성되어 있으며, 유리 내부에는 이를 보완하기 위해 인장응력이 형성되어 균형을 이루고 있는 상태이다. 따라서 절단에 의한 외부 균열이 가해질 경우 원하는 절단방향으로 균열이 진행되는 것이 아니라 순간적으로 잘게 파괴되는 현상이 나타난다. 펄토초 레이저를 사용하면 가공부 주변에 미세 크랙이나 열영향을 최소화 하여 매우 정밀한 가공을 할 수 있다(그림 5). 펄토초 레이저를 이용하여 표면에 스크라이빙 하였을 때 열영향부(HAZ : Heat Affected Zone)를 측정하기 위해 다양한 가공조건으로 스크라이빙 실험을 하였으며 광학 현미경을 이용하여 유리 표면과 단면을 측정된 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험 조건은 모두 120 μJ의 펄스 에너지와 1 mm/s의 스캔속도를 사용하였으며, 왼쪽에서부터 각각 1번, 2번, 4번 반복하여 가공하였다. 반복수에 따라서 폭은 거의 변화가 없는데 깊이가 깊어지게 된다. 하지만 실제 산업체 적용을

위해서는 가공특성 외에 가공속도 문제가 중요한 변수가 된다. 본 연구실에서는 실제 산업체 적용 가능성을 높이기 위하여 고반복률 펄토초 레이저 가공 시스템을 이용하여 100-300 mm/s의 속도로 스크라이빙과 절단 실험을 수행하였다. 펄토초 레이저를 이용하게 되면 렌즈에 의한 집광점에서 다광자 흡수가 발생하므로 재료의 표면을 가공하지 않고 투명 재료의 내부나 바닥면을 가공할 수가 있다. 그림 6은 두께가 0.7 mm인 강화유리에 펄토초 레이저 펄스를 유리의 아래 면에서 부터 위로 가공(back-side ablation)하여 절단한 실험 결과를 보여준다. 강화유리 절단 실험에 사용된 펄토초 레이저 빔의 펄스폭은 1030 nm에서 250 fs 였다. 펄스 반복률은 100kHz이고 평균 최고 출력 에너지는 6 W 정도이고, 출력 빔의 편광상태는 선형 편광이다. 출력 레이저 빔은 10배율(f=20 mm, NA=0.26) objective lens를 통하여 샘플에 집속하고, 위치는 X-Y-Z Linear stage를 움직이면서 가공하는 방법이 사용되었다. 펄토초 레이저 출력은 3.5 W가 사용되었으며, 가공속도는 150-300mm/s로 가공으로 하였다. 이번 실험을 통하여 펄토초 레이저의 강화유리 절단 응용 가능성을 확인하였으며, 앞으로 펄토초 레이저 가공 기술 개발과 더불어 절단된 강화유리의 다양한 성능 평가를 통하여 펄토초 레이저의 강화유리 절단에 대한 산업체 적용을 기대해 본다.

펄토초 레이저 가공은 많은 장점을 가지고 있으나 수 마이크로미터에서 수십 나노미터까지의 표면 거칠기를 가지고 있다. 따라서 수십 나노미터 이하의 표면 거칠기를 요하는 광소자 제작에는 필수적으로 뒤따라야 할 문제가 표면 연마(polishing) 기술이다. 표면연마는 제조공

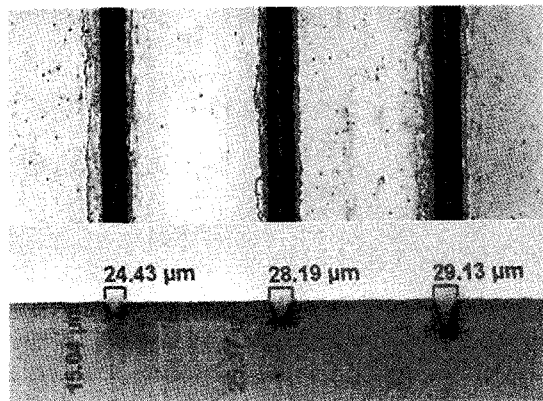


그림 5. 펄토초 레이저를 이용한 유리 스크라이빙(scribing) 현미경 측정 사진 (x200)

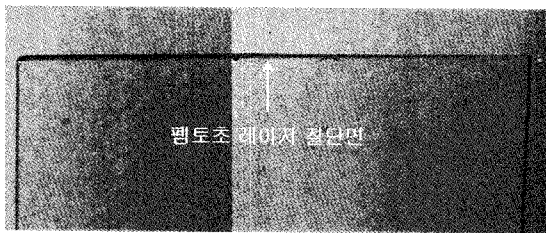
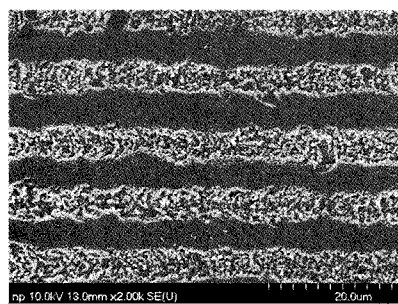


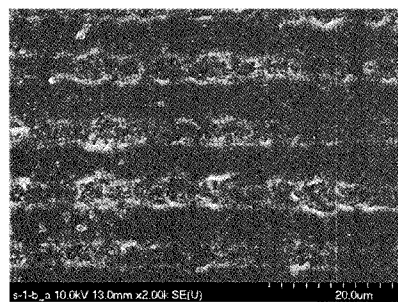
그림 6. 펨토초 레이저를 이용한 강화유리 절단 현미경 측정 사진 (x60)

정에 의해 구성된 피가공물을 연마 또는 연삭 작업을 통해 표면의 평면도를 높이는 부계조 공정으로 물리적으로 문지르거나 화학작용 또는 전기 분해적 방법을 이용하여 시료 표면에서의 표면 반사율을 증대시키는 것으로 표면의 거칠기를 최소화 시키는 공정으로 폴리싱이라고 한다(6-7). 표면 연마 방법으로는 연마제를 사용하여 물리적인 공정을 거치는 기계적 표면 연마 방법과 식각(etching)이나 착색(tinting) 또는 산화 피막(anodizing)과 같은 화학적 표면 연마 방법, 그리고 이들보다 최근에 소개된 레이저를 이용한 비기계적 표면 연마 방법, 자기장을 적용한 자기 유변 유체 연마(Magnetorheological fluid) 등이 있다(8-10). 기계적 연마 방법은 유체 또는 무계 연마제를 사용하여 석재나 버프 연마(buffing)에 주로 사용되어 미세한 수준의 표면 연마는 어려우며 지속적으로 연마제를 소모하거나 화학약품 사용하기 때문에 환경오염의 문제도 고려하여야 한다. 또한 3차원 구조와 같이 연마하고자 하는 영역이 비대칭의 곡률을 가지고 있는 피가공물의 연마에 있어 어려움을 가지고 있다. 자기 유변 유체 연마는 비대칭 3차원 구조물의 연마가 가능하다는 점에서는 기계적인 연마와 비교해 장점을 가지고 있으나 연마를 하는 동안 유체를 지속적으로 흘려주어야 하는 점과 오목한 미세한 3차원 구조나 국부적인 연마가 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 고등광기술연구소 미세광학연구소에서는 CO₂ 레이저를 이용한 국부 연마 기술을 펨토초 레이저 가공 후 공정기술로 개발하였다. 그림 7(a)는 펨토초 레이저를 이용하여 가공한 SiO₂ 표면 SEM 측정 사진이며, 가공한 부분에는 1 μ m 전후의 거칠기(roughness)가 존재하게 된다. 이러한 거칠기는 빛의 반사와 투과도 감소의 원인이 된다. 펨토초 레이저는 미세하고 정밀한 가공 특성 때문에 최근에는 광학소자 제작에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다. 광학소자의 특성

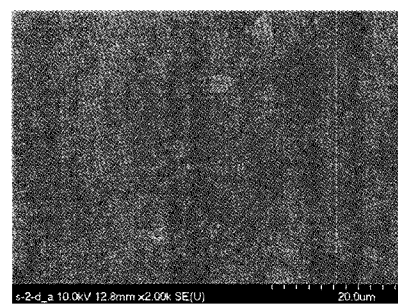
을 향상시키기 위해서는 이러한 표면거칠기를 제거해 주는 것이 필요하다. 본 연구실에서는 CO₂ 레이저를 펨토초 레이저 가공부에 조사하여 표면연마를 수행하였다. 그림 7(b)와 (c)에서는 CO₂ 레이저를 이용한 표면 연마 결과를 보여준다. CO₂ 레이저 빔을 펨토초 레이저로 가공된 실리카 표면에 조사하여 용융과 냉각에 의해 표면 조도를 향상시키기 때문에 시료의 오염이 거의 없고 피가공물의 형태에 관계없이 표면 연마가 가능하며 국부적 연마가 가능할 뿐만 아니라 조사 레이저의 출력을 조절하여 표면의 연마 정도를 쉽게 조절할 수 있다. 이와 같이 펨토초 레이저 가공 및 CO₂ 레이저 연마 하이브리드 기술은 정밀 광학소자와 같은 응용 연구에 매우 유용할 것으로 기대된다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. CO₂ 레이저를 이용한 표면 연마. (a) 펨토초 레이저 가공시 발생하는 표면 거칠기를 보여주는 SEM 측정 이미지, (b, c) CO₂ 레이저를 이용한 표면 연마 후 SEM 측정 이미지.

펨토초 레이저 리소그래피 기술

포토리소그래피(Photolithography)는 마이크로와 나노 가공과 패터닝 기술에 있어 전통적인 방법으로 사용되고 있다. 포토리소그래피는 PR(Photoresist) 층에 레이저 빔을 포토마스크(Photomask)를 통하여 빛을 조사한다. 원하는 마스크 패턴 모양대로 빔을 조사하여 PR 패터닝을 할 수 있으며 해상도를 높이기 위해 파장이 짧은 자외선(UV: Ultraviolet) 레이저가 사용된다. 회절한계(Diffraction limit)에 따라서 레이저의 파장은 짧아지고 있으며 극자외선(EUV: Extreme Ultraviolet)이나 X-선 리소그래피에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 포토마스크의 선폭(Resolution)을 향상시키기 위해 위상천이마스크(Phase-shift mask)와 같은 것들이 개발되었으며 마스크 프로젝션(Mask projection)을 통하여 샘플 표면 전체에 패터닝이 가능하게 되었다. 그러므로 현재 포토리소그래피 기술은 패터닝 기술의 선두주자이다. 그러나 리소그래피 공정장비와 마스크 세트의 가격이 비싸기 때문에 최근에는 대체 패터닝 기술에 대한 요구가 증폭되고 있다. 리소그래피를 통해서 마스크 가격문제를 해결할 수 있다면 미세 가공 응용에서는 좀 더 효율적일 것이다. 펨토초 레이저는 이러한 마스크를 사용하지 않고 회절한계를 극복하여 PR을 패터닝 하는 것이 가능하다. 가공 샘플의 어블레이션 임계값(Threshold) 보다

조금 높은 레이저 펄스 에너지로 빔의 중심부분으로 가공을 하게 되면 펄스폭(Pulse width)이 극히 짧은 펨토초 레이저 펄스의 비선형 효과에 의하여 회절한계 이하 선폭을 얻는 것이 가능하다[11-13].

펨토초 레이저를 이용한 PR 패터닝 기술은 먼저 포토레지스터(PR)를 도포(coating)하게 된다. 고속 회전하여 샘플의 표면에 포토레지스터 막을 형성한다. Spin coater라는 회전을 하는 장치 위에 샘플을 올려놓고 PR을 떨어뜨리는데 위에 약 1 μ m의 두께로 층을 형성하기 위해서는 약 5000 rpm의 속도로 회전시키면서 떨어뜨린다. PR 코팅에는 Positive(양)와 Negative(부) 방식 등이 있는데 Negative Resist는 노출되지 않은 부분만 남겨놓고 PR을 제거하는 방법을 말한다. 오늘날의 대부분의 반도체 제조공정에서는 Positive Resist 공정을 사용하는데 이는 Negative와는 반대로 노출된 부분이 제거된다. 펨토초 레이저를 이용한 PR 패터닝 기술은 펨토초 레이저를 조사하여 PR을 원하는 형태로 패턴으로 경화하는 단계와 현상(Development) 공정을 포함하는 기존의 포토 마스크가 필요 없이 쉽고 간단하며, 극히 좁은 펄스폭에 의한 펨토초 레이저의 비선형 현상에 의해서 가공이 이루어짐으로 회절한계 이하의 서브미크론급의 패터닝을 할 수 있는 기술이다(그림 8). 현상(Development) 공정은 PR에 조사된 펨토초 레이저 빔을 받은 부분과 받지 않은 부분으로 구분되는데, Positive PR을 사용하면 빛을 받은 부분은 날아가고 빛을 받지 않은 부분은 그대로 남는다. 실험에 사용된 PR의 종류는 310-440 nm의 흡수 파장대역을 가지는 AZ GXR-601이며 코팅 두께 800 nm, 코팅 속도 5000 rpm, 현상 시간 3초, 베이킹(Baking)은 하지 않았다. 가공에 사용한 objective lens 배율에 따라서 가공 선폭을 조절할 수 있으며, 50 배율 대물렌즈(Objective lens, NA=0.42), 65 nJ 펄스 에너지, 10 μ m/s의 스캔속도를 사용하여 0.9 μ m의 선폭을 얻었다(그림 9). 또한 펨토초 레이저 lithography 공정을 이용한 dot 형태의 PR 패터닝과 circular 형태의 PR 패터닝을 구현하였다(그림 9). 이와 같이 펨토초 레이저 lithography PR 패터닝 기술은 기존의 E-beam lithography 공정에 비하여 쉽고 간단하게 서브미크론급 PR 패터닝을 수행할 수 있으며 Fresnel lens와 같은 회절 광학 소자 제작에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

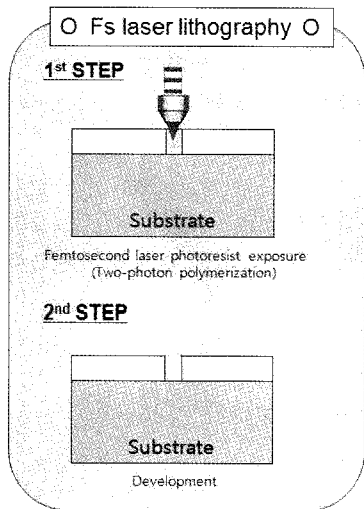
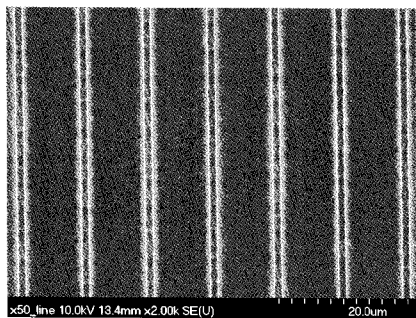
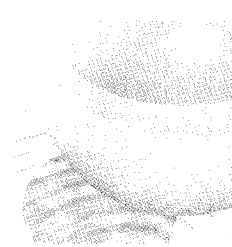
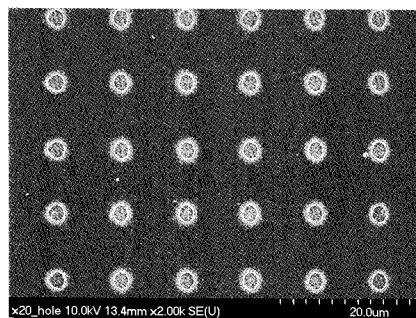


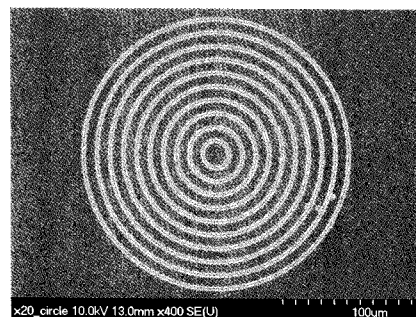
그림 8. 펨토초 레이저 lithography 공정 개념도



(a)



(b)



(c)

그림 9. 펄트초 레이저 lithography 공정을 이용한 PR 패터닝 SEM 이미지. (a) line patterns, (b) dot patterns, (c) circular patterns

레이저를 이용한 통기성 필름 가공 기술

최근에는 포장의 고유 목적을 만족시키면서 내용물의 특성과 맛을 유지하고 목적에 따라서는 오히려 그 특성과 맛을 향상시키는 기능성 포장 재료의 개발과 연구의 필요성이 점차적으로 증대하고 있다. 식품을 효과적으로 보호하고 부가적인 목적을 위해서 기존의 식품 포장에 특수한 기능을 부여한 것이 바로 기능성 포장(active packaging)이다. 즉 기능성 포장이란 식품 고유의 영양학적 품질과 안전성을 유지하면서, 포장 물질과 식품간

의 상호작용을 유발하여 포장재에 부여된 특수한 기능성이 효과적으로 발휘되도록 만든 포장재 및 포장 부자재를 말하며 포괄적으로는 포장재료 외에 특정 포장기법과 사용상의 편리한 기능 등을 포함한다. 포장 필름에 대한 시장은 점점 다양한 기술이 등장하고 있으며, 특히 식품 포장 필름에 대해서는 신선도 유지를 배려한 것을 기본으로 유기농 식품과 같은 다양한 소비자의 요구에 맞춰 공기 투과 필름과 같은 새로운 기능성 제품이 등장하고 있다[14,15]. 공기 투과 필름은 공기 또는 기체 등은 투과할 수 있지만, 액체는 투과할 수 없는 플라스틱 필름을 말한다. 부패하기 쉬운 내용물을 담고 있는 포장용기 내의 발생 가스를 배출시키면서 포장용기 내의 수분은 외부로 증발되는 것을 막아 줄 수 있도록 식품 포장용 필름에 공기 투과용 미세 기공을 형성함으로써 부패되기 쉬운 과일이나 음식물의 신선도 유지할 수 있다. 또한, 일회용 기저귀와 생리대 등의 위생용품으로, 현재 국내에 유통되는 거의 모든 기저귀는, 외부 방향의 바깥 층(back-sheet)에 공기 투과 필름을 채용하고 있다. 장판 채용으로, 바닥에서의 습기를 통과시킴으로써 부패를 막아 기존 장판재보다 수명을 2-3배 정도 연장할 수 있는 공기 투과 필름이 개발되어 있다. 과수봉지 제조용으로, 종래에 전량 수입되는 종이 과수 봉지 대신에 공기 투과 필름을 사요하려는 시도가 진행되고 있다. 잡초의 제거 및 햇빛의 반사를 위하여 과수원의 바닥재로도 검토되고 있다. 이와 같이 식품 포장, 과수봉지, 기저귀 및 생리대, 일회용 의류 및 시트 등 통풍과 방수가 필요한 곳이라면 어디든지 응용될 수 있다. 지금까지 이러한 공기 투과 기능을 가지는 필름 가공 기술에는 탄산칼슘, 황산바륨이나 아황산칼슘 입자를 도입한 합성수지 필름으로부터 연신을 통해 얻어지는 통기성 필름은 대량 제조되고 있다(그림 10). 그러나 이러한 통기성 필름 제조 기술은 별도의 생산 설비 및 제조 공정이 필요하며 공기 투과도 조절이 어려워 응용성이 낮다는 문제점이 있다[16]. 포장용 필름에 천공핀이 부착된 천공 로울러를 이용하여 기계적으로 구멍을 형성하거나 체크밸브 설치나 섬유막 부착을 통하여 공기 투과 효과를 충분히 확보하여 습기와 가스를 제거할 수 있지만, 구멍의 크기가 커서 개미나 해충들이 포장지 내부로 들어오게 되는 문제와 기계적 천공의 한계점인 장기 안정성과 균일한 50미크론 이하의 미세 천공과 연속적인 생산이 어려워 경제성과 실용성 낮다는

펄토초 레이저 가공 기술

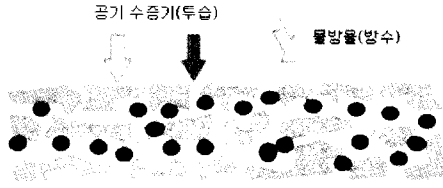
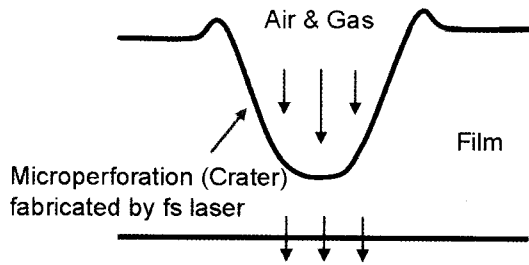


그림 10. 탄산칼슘, 황산바륨이나 아황산칼슘 입자를 도입한 합성수지 필름으로부터 연신을 통해 얻어지는 통기성 필름 모식도

문제점이 있다[17]. 레이저를 이용하게 되면 이러한 문제점들을 극복할 수 있으며, 공기 투과도 조절이 자유롭다는 장점이 있다[18].

그림 11(a)는 레이저를 이용한 통기성 필름 가공에 대한 개념도이다, 레이저를 이용하여 필름에 홈을 형성하

게 되면 공기의 투과도는 증가하게 되면서 물과 수증기는 차단하는 효과를 얻을 수 있다. 그림 11(b)는 펄토초 레이저에 의해서 가공된 필름의 홈 SEM 측정 이미지이다. 펄토초 펄스 레이저를 가공분야에 이용하게 되면, 빛의 흡수에 의하여 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 가공이 끝나게 되어 가공부의 주변에 어떠한 손상이나 구조변화를 일으키지 않는 장점이 있다. 펄토초 가공은 일반적인 다른 가공과 달리 매질을 녹이는 것이 아니고 매질의 화학적 결합을 끊어내어 날려버리기 때문에 일반적인 가공에서 나타나는 열에 의한 매질의 변형이 발생하지 않는다. 또한, 펄스폭이 극도로 짧은 반면 침투출력은 아주 높기 때문에 매우 높은 광세기에는 물질 내에 다광자 흡수가 가능하게 하여 자외선 파장에서 흡수가 이루어지는 이러한 필름의 가공이 가능한 것이다.

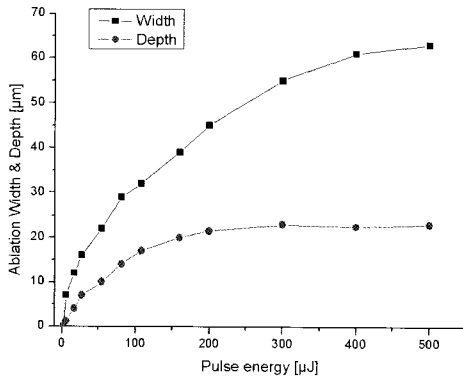


(a)

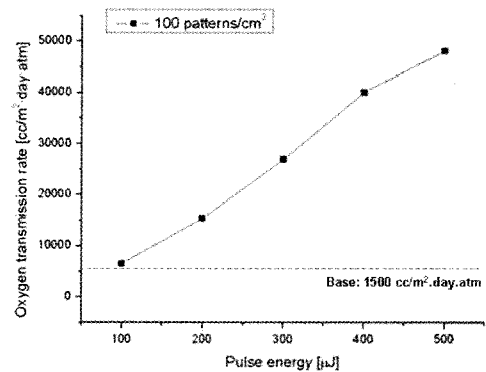


(b)

그림 11. (a) 레이저를 이용한 통기성 필름 가공 개념도, (b) 펄토초 레이저에 의해서 가공된 필름의 홈 SEM 측정 이미지

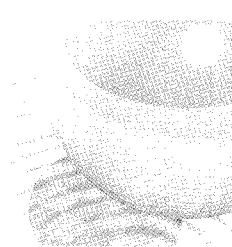


(a)



(b)

그림 12. (a) 펄스에너지에 따른 가공된 홈의 폭과 깊이, (b) 펄스에너지에 따른 공기투과도



본 실험에서는 파장이 785.5 nm, 펄스폭이 184 fs, 펄스 반복률이 1kHz, 그리고 에너지가 91 μ J의 펨토초 레이저 펄스와 스캐너 가공 시스템을 사용하였다. 실험에 사용된 OPP 필름의 두께는 30 μ m이다. 그림 12는 펨토초 레이저 펄스 에너지에 따라서 필름에 가공된 홈의 폭과 깊이, 공기투과도에 대한 그래프이다. 펨토초 레이저 펄스 에너지에 따라서 폭과 깊이가 커지고 깊어지게 되며, 이러한 원리를 이용해서 레이저 펄스 에너지를 조절하여 원하는 공기투과도를 얻을 수 있다. 이와 같이 펨토초 레이저를 이용한 공기 투과 필름 홈 가공은 레이저 펄스 세기, 빔 사이즈, 초점 거리 등과 같은 가공 조건에 따라서 필름에 가공된 홈의 형상, 즉 폭과 깊이를 조절할 수 있으며 이에 따른 공기 투과도 조절이 가능하다는 장점이 있다. 기존의 천공편을 사용한 기계적 천공 방식은 직경이 0.1 mm 이하인 통기공 형성이 어려우며, 통기공의 직경이 0.1 mm 보다 커질 경우에는 내부의 공기를 신속하게 방출할 수 있으나, 보편 및 진열을 하는 과정에서 몸집이 작은 벌레나 이물질이 내부로 유입될 수 있는 문제가 생긴다. 공기 투과도는 가공된 홈의 폭과 깊이뿐만 아니라 단위면적당 가공된 홈의 개수에 의해서 결정된다. 이것은 공기 투과도 조절이 자유롭지 않은 기존 방법에 비하여 매우 획기적인 통기성 필름 제조 기술이라고 할 수 있다. 그러나 레이저를 이용한 통기성 필름 제조에는 해결해야 할 문제도 적지 않다. 레이저를 이용한 이와 같은 광학적 방법으로 폭이 1 mm 이상의 통기성 필름 제조 가공 시스템의 초기 투자비용 및 안정성은 해결해야 할 과제이다.

맺음말

레이저 가공 분야는 연구 개발뿐만 아니라, 산업적으로 광범위하게 활용되고 있지만, 레이저를 이용한 나노미터 급 가공 기술은 국내 어떤 기관에서도 확보하고 있지 못하고, 전 세계적으로도 기술 경쟁이 치열한 분야이다. 이 분야에서 과감한 투자를 통하여 선도적인 기술을 개발하면 광범위한 파급효과가 예상되며, 펨토초 레이저 가공 기술 개발을 통하여 초정밀 가공 기술경쟁에서 우위를 선점할 수 있을 것으로 예상된다. 레이저를 이용한 초미세 초정밀 가공에 대한 기술 선점과 선진국에 대한 기술적 종속을 탈피, 기술 및 제품의 수출에 대한 산업경쟁력

을 확보하고, 잠재적 국내외 초미세 레이저 가공 관련 시장을 선점할 수 있으므로 파급효과가 매우 클 것으로 판단된다. 초미세 레이저 가공 기술은 IT/NT/BT 소자 제작 기술 보유와 고부가가치 소자의 국산화로 수입대체효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 신개념 미세부품 개발, 신산업 및 고용 창출, 국가 주력산업화 조기달성, 고부가가치화, 기술시장 선점, 국제경쟁력 확보 등의 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한 펨토초 레이저를 이용한 신뢰성 있는 초미세 가공 기술이 가능하다면 기존 광-리소그래피 및 화학 에칭, 전자빔 리소 및 이온빔 에칭 등의 반도체 공정의 대체효과와 친환경적이며 공정을 간소화로 인한 경제적인 공정으로 자리매김할 수 있을 것이다. 위에서 살펴본 바와 같이 펨토초 레이저를 이용한 초미세 가공기술은 열손상이 거의 발생하기 않기 때문에 다양한 과학기술 분야뿐만 아니라 자동차산업, 광통신산업, 반도체, 컴퓨터 산업, 바이오, 의료산업 등 다양한 산업 분야의 응용도 급속하게 모색되고 있다. 최근 고출력 펨토초 레이저가 지속적으로 개발되고 있고, 장기 안전성이 향상되고 있는 것을 감안하면 산업 현장에 적용되는 것도 그리 멀지 않을 것으로 여겨진다. 고등 광기술연구소는 펨토초 레이저 분야에서 세계적인 기술력이 집적되어 있으며, 이를 바탕으로 초미세 레이저 가공 기술력을 확보하고 있다. 앞으로도 공간적으로 기존의 한계를 뛰어넘는 극미세 가공기술을 연구하고, 새로운 기능을 갖는 마이크로 및 나노 소자 개발 연구를 추진해 나갈 예정이다.

참고문헌

- (1) C. V. Shank and E. P. Ippen, *Appl. Phys. Lett.* 24, 373 (1974).
- (2) D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* 55, 447 (1985).
- (3) A. Courjuad, "Diode pumped multikilohertz Yb:KGW femtosecond amplifier," *CLEO 2002*, pp. 62-63, 2002.
- (4) M. Delaigue, "300 kHz femtosecond Yb:KGW regenerative amplifier," *CLEO/QELS 2006*, pp. 1-2, 2006.
- (5) T. Miura, S. Ito, M. Yoshioka, K. Mukaihara, "Femtosecond Yb:KGW Regenerative Amplifier for Industrial Application," *CLEO/Pacific Rim 2007*, pp. 1-2, 2007.
- (6) T. Gumpenberger, J. Heitz, D. Bauerle, and T. C. Rosenmayer, "F2-laser polishing of polytetrafluoroethylene surfaces," *Europhysics Letters*, 70 (6) 831-835 (2005).
- (7) Bauerle D., *Laser Processing and Chemistry*, 3rd edition (Springer, Heidelberg) 2000.

펄초 레이저 가공 기술

- (8) Mircea Udrea, Hamdi Orun, Ali Alacakir, "Laser polishing of optical fiber end surface", *Optical Engineering*, 40(9) 2026-2030 (2001).
- (9) J. M. Bennett and R. J. King, "Effect of polishing technique on the roughness and residual film on fused quartz optical flats", *Applied Optics*, 9, 236-238 (1970).
- (10) R. S. Taylor, K. E. Leopold, R. K. Brimacombe, and S. Mihailov, "Dependence of the damage and transmission properties of fused silica fibers on the excimer laser wavelength", *Applied Optics*, 27, 3124-3134 (1988).
- (11) Koch, J., Fadeeva, E., Engelbrecht, M., Ruffert, C., Gatzel, H. H., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Maskless nonlinear lithography with femtosecond laser pulses," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 82, Issue 1, pp. 23-26, 2006.
- (12) Lin, Y., Hong, M. H., Wang, W. J., Law, Y. Z. and Chong, T. C., "Sub-30 nm lithography with near-field scanning optical microscope combined with femtosecond laser," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 80, Issue 3, pp. 461-465, 2005.
- (13) Ik-Bu Sohn, Myeong-Jin Ko, Young-Seop Kim, Young-Chul Noh, "Direct femtosecond laser lithography for photoresist patterning", *Optical Engineering*, Vol. 48, No. 2, 2009.
- (14) 한진피앤씨(주), "부직포가 합지된 압연 통기성 필름과 그 제조방법 및 장치", 국내등록특허 10-0514905-0000, 2005.09.07.
- (15) 신길수, "공기방출기능을 구비한 농산물 포장용기", 국내실용신안 20-0252526, 2001.10.18
- (16) 차상철, "초음파 진동을 이용한 비닐포장지의 천공장치", 국내실용신안 20-0398070, 2005.10.04
- (17) Elizabeth Varriano-Marston, "Registered microperforated films for modified/controlled atmosphere packaging", US 6,441,340 B1, Aug. 27, 2002.
- (18) 손익부, 최성철, 노영철, 고도경, 이종민, 최영진, "펄초 레이저를 이용한 공기 투과 필름 가공 기술", 추계레이저가공학회, 2006.11.17.

약 력



손익부

손익부 박사는 인하대학교 전자공학과에서 학사와 석사를 경북대학교 전자공학과에서 광통신 전공으로 박사학위를 취득하였다. 한국정보통신대학교에서 박사후연구원으로 펄초 레이저를 이용한 광도파로 제작에 대한 연구를 하였으며, 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 선임연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 펄초 레이저를 이용한 초미세 가공 기술 및 응용 연구이며, 현재 펄초 레이저 가공 특성 및 고집적 광소자 제작에 대한 연구를 수행하고 있다.

약 력



고명진

고명진은 2007년 광주과학기술원 정보기전공학부에서 석사학위를 취득하였고, 현재는 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 펄초 레이저 초미세 가공 기술 및 광섬유 광소자 응용 연구이다.

약 력



김영섭

김영섭 박사는 조선대학교 물리학과에서 학·석사를 광응용공학과에서 레이저가공으로 박사학위를 취득한 후 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 박사후 연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 펄초 레이저 초미세 가공 기술 및 바이오 응용 연구이다.

약 력



노영철

노영철 박사는 서울대학교에서 물리학과 이학박사 학위(2001)를 취득한 후 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실에서 책임연구원 및 연구실장으로 재직 중이다.