

레이저 微細加工 기술

이 천

(인하대학교 공과대학 전기공학과 조교수)

레이저의 첨단기술에의 응용은, 의학, 생물학, 화학, 물리계측, 가공, 통신, 정보처리 등 다분야에 걸쳐, 수 mW에서 수 십 kW까지의 출력 영역의 레이저가 이용되고 있다. 本稿에서는, 첫째, 레이저를 이용한 첨단기술의 하나인 超微細加工 기술로서, 특히, 반도체의 레이저 프로세스로 화제를 모으고 있는 1) 에칭, 2) CVD(Chemical Vapor Deposition), 3) 積層成長(epitaxy), 4) 리소그래피, 5) 홀로그래피 등에 대하여, 다른 프로세스(이온 빔 프로세스, 플라즈마 프로세스, X선에 의한 프로세스 등)와 비교하여 원리, 특징, 응용상태, 장래의 전망에 대하여 논하고, 둘째, 엑시머 레이저의 응용 분야에서 가장 실용화에 접근한 것 중의 하나인 애블레이션(ablation) 가공에 대하여 논한다.

1. 레이저 미세가공

1.1 레이저 가공의 개요

레이저를 局部加工에 이용하려는 시도는, 루비 레이저가 개발된 후 바로 이루어졌으며, 그 원리는, 레이저에 의한 국부 급속가열, 용융, 증발, 냉각 등의 열과정에 의한 것이 중심으로, 주로 금속재료에 대하여 각 열과정에 의한 제거가공이나 표면처리 등으로 응용되고 있다[1]. 또한, 최근에는 레이저를 단지 熱源으로 이용하는 방법이 아닌, 氣相 또는 고체 표면에서의 光化學 반응이나 熱化學 반응을 誘起시켜 고체 표면층을 가공하는, 소위, 레이저 誘

起 化學과정에 의한 가공이 반도체의 프로세스 기술로서 주목되고 있다[2]. 이러한 추세에 따라, 레이저 가공의 精度도 서브 마이크론이나 쿼터 마이크론이 요구되어, 레이저 가공기술은 기존의 가공기술인 플라즈마 이온 빔, 또는 X선을 포함하는 빔 프로세스 기술의 하나로서 기대된다.

여기서는, 금속을 중심으로 한 除去가공이나 표면처리에 대해서는 원리와 특징의 概說만 하고, 앞에서 말한 레이저 유기 化學과정을 이용한 초미세가공과 레이저를 보조적으로 이용함으로써 새로운 가공의 가능성이 생기는 응용 例 등에 대하여 소개한다.

1.2 제거가공과 표면처리

레이저를 제어성이 좋은 局部的인 熱源으로서 이용한 가공법은 금속재료에 적용되고 있다. 표 1에 반응원리와 가공의 종류를 나타낸다. 급속 가열과 냉각 과정은 레이저 광의 에너지가 국부적으로 고 밀도로 흡수되어, 소재 기관의 다른 부분은 열 sink로서 작용하므로 일어난다. 이 국부 온도상승을 융점 이하로 유지하면서 상변화를 일으킴으로 硬化시키는 처리법이 담금질 경화이며, 용융 후의 組成 변화를 이용한 경화법이 용융 경화법이다. 용융시에 異種 금속과 液相에서 합금화를 행하는 처리법이 합금화법으로, 가격이 싼 금속재료의 일부분을 내마모성, 내열성, 내부식성을 갖는 비싼 合金層으로 처리하는데 이용된다. 또한, 합금화 할 때 이종 금

표 1. 레이저 열가공의 반응과정과 가공의 종류

반응과정	가공의 종류
급속 가열·냉각	담금질 경화·아닐링·非晶質化용접
용	용 硬化·아닐링·합금화·세라믹화·절단 구멍 형성·줄 굿기·트리밍
증발	에칭·마킹(marking)

속재 대신에 산화물, 붕소화합물, 질화물 등을 첨가하여, 소재의 일부분을 세라믹화 하는 처리법도 이용되고 있다.

아닐링[3]은, 주로 반도체의 이온 주입 층의 재결정화법으로서 연구 되었는데, 아닐링 후의 상태가 준안정 상태이므로 아닐링 후의 다른 열처리 과정에 의하여, 레이저 아닐링에 의해 얻어진 특성이 변하는 것과, 국부 처리이므로 처리 효율이 낮은 것 등의 문제가 남아있다.

국부 온도상승의 결과 생기는 증발과정을 제거가공에 이용하는 방법은, 그 응용 범위가 금속, 세라믹, 반도체 등에 폭 넓게 이용되고 있지만, 특히 전자부품의 트리밍(기능부분의 수정), 마킹에의 응용이 많다.

이러한 레이저 열가공의 특징은,

- 1) 국부가열이므로 선택적으로 가열 할 수 있다,
- 2) 다른 부분의 영향이 거의 없다,
- 3) 부부가열로 입력 열량이 작으므로 냉각속도가 빠르다(103~107K/s),
- 4) 가공부 위치 결정의 精度가 높다,

등이다. 실제 응용에 있어서는 정확하게 온도제어를 하여, 효율 좋게 레이저 출력을 흡수시켜, 균일한 온도 분포를 얻을 필요가 있다. 특히 금속은 레이저 광의 반사율이 높으므로, 표면 코팅에 의한 흡수율의 증가와 레이저 빔의 走査 방법에 여러가지가 시도되고 있다. 또한 뒤에서 논할, 금속에 대한 흡수율이 좋은 엑시머 레이저를 이용하는 방법도 많이 연구되고 있다. 열가공에 사용되는 레이저에는, 재료의 열적·광학적 성질 및 필요한 출력에 따라 다르나, 주로 數百 W의 연속발전 모드의 CO₂ 레이저나 평균 출력 數十 W의 Nd:YAG 펄스 레이저가 사용되고 있다.

1.3 초미세가공

레이저 광의 集束性を 이용한 미세가공 중에서

도, 가장 발전이 현저한 반도체 분야에 있어서의 레이저 가공기술로는 앞에서 말한대로 여러가지가 있으므로, 하나하나에 대하여 논하겠다.

1.3.1 SOI(Silicon On Insulator) 기술

SOI 기술은[3], 레이저 아닐링 기술로부터 파생된 기술로 비정질 절연기판 위에 단결정 실리콘을 성장시키는 방법이다. 이 기술은 耐放射線 특성이 우수한 집적회로 소자, 液晶 디스플레이 등의 평판 표시 소자의 구동회로에 이용되는 박막 트랜지스터나 3차원 집적회로를 실현하는 방법으로서 주목되고 있다. 레이저 SOI 기술로는 실리콘의 산화막이나 질화막 위에 CVD 법으로 퇴적시킨 다결정 또는 비정질 실리콘 층을 연속 발전 아르곤 이온 레이저의 走査 照射에 의해 용융시켜, 액상으로 부터의 재결정화에 의하여 단결정 성장시킨다. 이 때, 결정성장의 씨앗으로 밑바닥의 단결정 기판의 일부를 노출시켜 사용하거나[4], 다결정 실리콘 층을 섬 모양으로 연결가공 후 재결정시켜, 연결 가공부분에 의한 필터 효과를 이용하여 結晶粒界의 발생을 억제함으로써 단결정화 하려는 시도도 행하여지고 있다[5]. 또 레이저 광의 흡수를 표면 보호막의 두께를 제어함으로 변화시켜, 냉각 때의 온도분포를 규칙적으로 되게하는 것에 의해 粒界를 제거하여 단결정화하는 방법도 연구되고 있다[6]. 이러한 방법으로, 3층 이상의 積層 SOI 구조를 갖는 3 차원 소자가 발표되었다[7].

1.3.2 광화학 및 열화학 에칭, 化學氣相 퇴적(CVD)

에칭과 CVD는 레이저에 의해 분위기 반응 가스와 기판 사이에 誘起되는 화학반응을 이용하는 것으로[2], 종래의 열반응만을 이용한 경우와 비교하여 가공면이 매끄럽고, 가공온도를 낮게 억제하며, 수 order 높은 반응속도가 얻어진다[8,9]. 또한, 레이저를 파장 한계까지 집중함으로써, 서브 마이크론으로 부터 쿼터 마이크론 까지의 영역에서 프로세스가 가능하다[10]. 마스크레스 레이저 에칭과 CVD를 이용함으로써, 집적회로의 개별화(범용회로를 개별의 회로로 수정하는 기술)나 마스크의 부분수정을 하려는 연구도 이루어지고 있다[11]. 그림 1에 광화학 반응과 열화학 반응의 차이에 의해 얻어지는

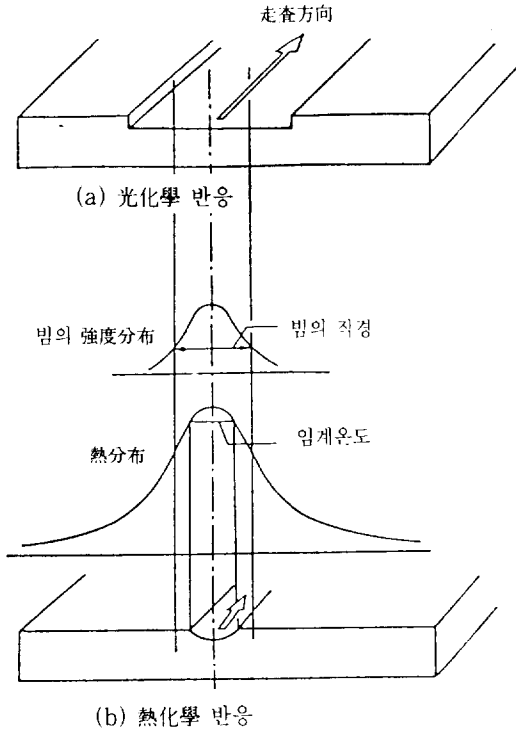


그림 1. 광화학 반응과 열화학 반응에 의한 가공 단면의 비교

임계온도는 열화학 반응이 일어나는 문턱 온도를 나타낸다. 열화학 반응에서는 빔 직경보다 좁은 영역의 가공이 가능하다.

가공형상, 최소 가공 선폭의 비교를 나타낸다. 레이저 誘起 화학반응을 이용한 마스크레스 미세가공의 하나에, 기관의 온도상승에 의한 표면의 열화학반응을 이용한 에칭과 CVD가 있다. 이 경우에는 기관 표면의 온도 분포를 제어하는 것으로, 反應種의 확산효과가 커지는 광화학반응 보다 미세한 가공이 가능하다. 광화학 반응에서는, 반응 가스가 레이저 波長域의 광을 흡수할 필요가 있으므로, 그 組合이 중요하지만, 원리적으로 기관 온도상승은 수반되지 않는다. 열화학 반응에서는 기관의 온도상승을 이용하므로, 반응온도가 낮은 가스를 선택하는 것에 의하여, 처리온도의 저온화를 도모할 필요가 있다 [8]. 지금 까지의 연구 보고에서는 광화학 반응에 의한 에칭이나 CVD에 있어서도, 반응의 촉진과 膜 質향상을 위하여 기관온도를 수 백 °C로 올리는 예

가 많으므로[12,13], 열화학 반응에 의한 프로세스 보다 기관온도가 낮다고는 단정할 수 없다.

1.3.3 積層成長(epitaxy)

레이저 적층성장 기술은, 종래의 분자선 적층성장(Molecular Beam Epitaxy)이나 MOCVD (Metal Organic CVD) 장치에 레이저 광을 도입하여, 국부적으로 결정 박막의 성장을 제어하는 방법으로[14,15], 이것에 의해 임의의 장소에 있어서 국부적으로 결정성장을 제어할 수 있는 가능성이 보인다. 레이저 광 照射의 효과로는, 국부 가열에 의한 온도상승[14]과 기관 표면층에서의 光勵起 효과[15]가 생각되고 있다.

1.3.4 리소그래피

레이저 리소그래피 기술은, 엑시머 레이저 등의 단파장 레이저를 사용하여, 마스크 패턴을 레지스트 위에 投影 複寫하는 방법으로, $0.20\mu\text{m}$ 이상의 디자인 룰이 요구되는 1 Gbit 이상의 高集積度 DRAM의 量産 프로세스 기술로서 유망하므로, SR(Synchrotron Radiation)·X선 리소그래피 기술과 함께 주목되고 있다. 그림 2에 엑시머 레이저 리소그래피에 의해 실리콘 위에 패턴을 轉寫加工한 예를 나타낸다[16]. 이 방법의 문제점은 短波長에 흡수가 작은 광학계의 개발과 高感度 레지스트의 개발에 있다.

1.3.5 홀로그래피

레이저 홀로그래피 기술은, 서브 마이크론의 周期

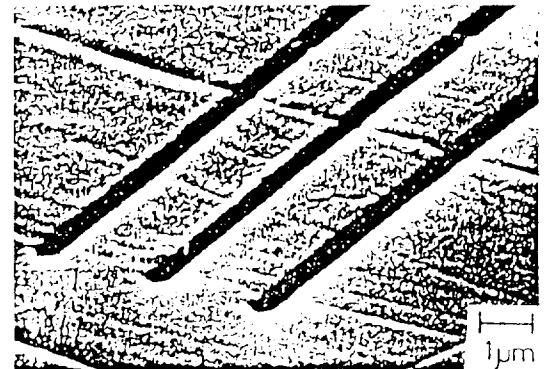


그림 2. 엑시머 레이저 리소그래피에 의한 포토 레지스트 위의 $0.5\mu\text{m}$ 폭의 轉寫 패턴

를 갖는 회절격자(grating) 등의 光學素子의 제작에 응용될 뿐 아니라[17], 次世代的 고집적도 IC의 리소그래피 기술로서 이용하려는 연구도 시행되고 있다[18]. 이 홀로그래피 露光法은, 2 光束 간섭고를 이용하여 레지스트를 感光시키는 방법으로, 간섭고와 기판 위에 형성된 패턴 사이에 고도의 정확한 위치 결합 방법, 포토 리소그래피와의 조합에 의한 효율적인 패턴 형성법, 간섭 패턴에 대응한 회로 패턴의 설계법 등 해결해야 할 문제가 있지만[18], 가시광인 He-Cd 레이저(波長 441.6nm)를 이용해서도 0.11 μm 의 선폭을 解像할 수 있으므로 차세대 리소그래피 기술로서 기대되고 있다.

2. 레이저 애블레이션(ablation)

2.1 애블레이션 가공의 개요

애블레이션 가공은 레이저의 리소그래피에의 응용과 함께, 가까운 시일내에 생산 라인에의 도입이 기대되고 있다. 엑시머 레이저를 이용하여 짧은 시간 동안 고분자 재료 표면에 고밀도의 자외선을 照射하면, 고분자 결합의 분리 과정이 순간적으로 진행되며, 解離 조각은 잉여 에너지를 운동에너지로 변환하여 飛散한다. 이것이 레이저 애블레이션이라고 부르는 현상으로, 기본 원리는 光子(photon)의 높은 에너지를 이용한 光分解 반응이다. 펄스 레이저 光의 에너지가 재료에 흡수되어, 원자나 분자의 결합을 해리시킨 결과이다. 이것은 1 광자 뿐 만이 아닌 多光子의 흡수과정이 관계한다고 생각된다. 애블레이션 가공에 있어서도 에너지 밀도가 높아지면 용융이 생긴다. 따라서 에너지 밀도의 제어가 高精度·미세가공에서 특히 중요하다. 애블레이션 가공의 메커니즘은 충분히 규명되지 않아서, 큰 과제로 남아있다.

그림 3에 엑시머 레이저에 의한 애블레이션 가공의 전형적인 예를 나타낸다[19]. 구멍의 둘레가 매우 예리하게 제거되어 화학가공의 특징을 단적으로 나타낸다. CO₂ 레이저나 YAG 레이저로도 직경 100 μm 정도의 구멍 가공은 가능하다. 그러나 이 경우에는 加工部の 둘레에 열전도에 의한 진부름이나 열증발에 의해 쥐어 뜯은 듯한 흔적이 남는다. 이것이 화학가공과 열가공의 본질적인 차이이다. 이외에 플라스틱에 아스펙트 比(깊이/직경의 比)가 크

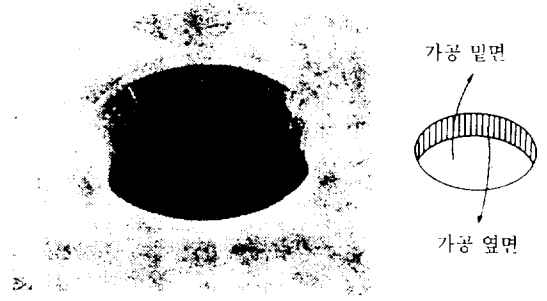


그림 3. KrF 레이저에 의한 폴리 이미드 필름의 구멍 가공
(두께 125 μm , 구멍의 직경 500 μm)

고 미세한 형상의 가공이나 가는 毛髮 등에의 가공이 연구되어[20], 단파장의 엑시머 레이저가 미세 가공에 유효한 수단이라는 것이 입증되었다.

애블레이션 가공이 생산 라인에 도입된 유일한 예로써, 독일 Siemens 社에서의 컴퓨터용 프린트 기판의 구멍형성 가공이 있다[21]. 이것은 다층 구조의 LSI 모듈 사이를 접속하는 銅配線用的 직경 80 μm 의 구멍(via hole)을 형성하는 가공으로 위층의 동배선과 아래층의 동배선 사이에 있는 아크릴 수지와 폴리이미드에 마스크를 통하여 엑시머 레이저를 조사함으로써 한번에 여러개의 구멍을 형성하는 가공법이다. 0.5~1.0J/cm²의 펄스 에너지를 300~400펄스 조사하여, 깊이 65 μm 의 구멍을 형성하는 가공으로 면적 10cmx10cm의 프린트 기판 전체에 걸쳐 구멍형성을 하기 위해서는 일부분씩 처리하여 순차적으로 장소를 이동하는 방법을 써도, kW 급의 대출력이 필요하다.

2.2 마킹(marking)

파장 0.2~0.3 μm 의 자외선은 금, 은, 동 등에 흡수가 잘 되므로 종래의 적외선 레이저 가공으로는 곤란하던 가공을 가능하게 한다. 예를 들면 마스크를 통하여 글자나 그림을 새기는 마킹은 CO₂ 레이저나 YAG 레이저에 의해 실용화 되어 있지만, 엑시머 레이저를 이용하면 금, 은, 동 등의 재료에도 가능하다. 더욱이, 애블레이션 효과로 인하여, 명확한 콘트라스트의 마킹이 가능하다.

TEA-CO₂ 레이저나 YAG 레이저에 의한 마킹은, 지금까지의 스탬프나 잉크 분사에 의한 마킹과

비교하여, 문자가 지워지지 않는다는 것과 미세가공이 가능하다는 이유로 이미 실용화 되어 있다. 그러나 이러한 레이저로는 마킹하기 어려운 대상, 예를 들면 반사율이 높은 금, 은, 동 등의 금속, 또는 미세한 균열이 생기기 쉬운 세라믹이나 유리재료에 대해서는 엑시머 레이저 마킹이 유망하다. ArF 레이저를 이용한 유리의 마킹은 5~6년 전 부터 보고 되어, 실제로 안경 등에의 마킹이 실용화 되어 있다. 보급율은 낮지만 리소그래피 보다 먼저 실용화 되었다고 할 수 있다.

마킹은 표면 층만이 가공 대상이며, 그 뒷면은 가능한 한 영향을 미치지 않는 것이 좋다. 엑시머 레이저에 의한 마킹은 열에 의하지 않고 화학결합을 직접 절단하므로 가장 바람직한 가공법이다. 앞으로 集積도가 점점 높아지는 반도체에의 마킹 또는 마킹 情報의 微細化 등에의 요구가 높아짐에 따라 발전이 기대되는 분야이다.

2.3 박막 형성

박막의 형성에는 증착이나 스퍼터링, 이온 빔이나 전자 빔에 의한 방법 등 여러가지가 있지만, 레이저 PVD(Physical Vapor Deposition)는 CVD와 함께, 새로운 박막형성 방법으로서 차세대의 LSI 프로세스 기술 또는 宇宙 器械 등에 사용 가능한 耐環境性의 보호막 형성법으로서 기대되고 있다. 레이저 PVD의 최대의 특징은 저온에서의 박막형성이 가능하다는 것이다. 또, 에너지 밀도가 높으므로 고속으로 박막을 형성할 수 있으며, 대출력의 엑시머 레이저가 개발되면 대면적의 박막형성도 가능하다.

최근에 화제를 모으는 것은 고온 초전도체의 박막형성이다. 이것은 그림 4와 같은 구성으로 되어, 고온 초전도체의 표적, 예를 들면 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($x=0.1$)의 벌크 초전도체에 엑시머 레이저를 조사하여, 애블레이션 작용에 의해 증발시켜 박막을 퇴적시키는 방법이다. 기판 온도 600°C 이하의 저온에서 박막형성이 가능하며, 벌크의 組成比를 정확히 박막에 반영시킬 수 있으며, 또한 특성이 좋은 초전도 박막형성에 유효한 산소 분위기의 저진공에서 成膜이 가능하다. 기판 온도 700°C 에 있어서, 임계온도 90.5K, 임계전류 $8\text{MA}/\text{cm}^2$ 의 고온 초전도 박막이 얻어져[22], 초전도 IC 등 응용기술의 개발이 기대된다.

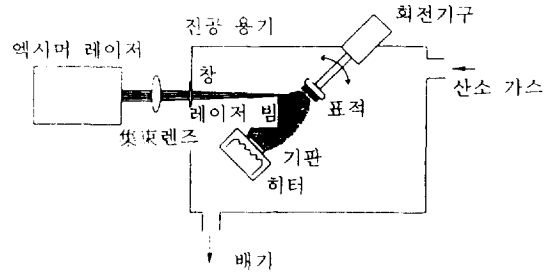


그림 4. 애블레이션에 의한 고온 초전도 박막형성 실험장치의 개략도

2.4 表面改質

CO_2 레이저나 YAG 레이저에 의한 표면개질은 표면층의 온도 변화나 용융 등 열 프로세스를 이용한 것이다. 이에 대하여, 엑시머 레이저에 의한 표면개질은 위에서 논한 마킹이나 에칭과 같이, 재료의 표층부에 있어서의 애블레이손을 이용한 화학적 프로세스이다.

최근 고분자 재료의 표면에 엑시머 레이저를 照射하는 폴리머 애블레이션의 연구가 여러가지로 진행되고 있다. 이것은 엑시머 레이저의 조사에 의한 표면의 물리적·화학적 변화를 이용한 것으로, 미세구조의 형성이나 표면 전위의 변화를 이용한 응용연구가 행하여지고 있다. 일본의 화학기술연구소에서는, 폴리에틸렌(PES) 필름에 XeCl 레이저 빔을 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$ 의 에너지 밀도로 조사하여, 표면에 간격 $1\mu\text{m}$ 정도의 指紋狀의 미세구조를 형성했다. 이 미세구조의 配向은 照射 빔의 강도에 의해 제어할 수 있다는 것을 이용하여, 이런 방법에 의해 제작되는 nematic 液晶의 배향막을 제안하고 있다[23]. 또 폴리머 표면의 조사에 의한 표면 전위의 변화에 착안하여, 이것을 이용한 無電解 도금에 대해서도 검토하여, 폴리에틸렌 화합물의 표면에 금속 팔라듐 막을 퇴적하는 기술을 개발하고 있다[23].

2.5 기타의 애블레이션 가공

이상의 것 외에도, KrF 레이저를 이용하여 유리 섬유 強化 에폭시 樹脂 기판의 가공을 한 예가 있다. $1\text{J}/\text{cm}^2$ 이하의 照射 에너지 밀도에서는 에폭시 수지 층만 제거되며, $2.2\text{J}/\text{cm}^2$ 정도의 조사 에너지 밀도에서는 유리 섬유도 제거되어, 복합 재료의 각

각의 성분을 균일하게 분해 제거할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 또 유기재료 뿐 만 아니라, 알루미늄 세라믹, 실리콘, 인듐 인 등의 무기재료의 애블레이숀 가공 결과도 보고되고 있다. 예를 들면, 취성이 강하여 부서지기 쉬워서 기계가공이 곤란한 니오브酸리튬(표면 彈性波 소자용 재료)에 대해서도, ArF 레이저의 照射 에너지 밀도 $2\text{J}/\text{cm}^2$ 로 가공 놀래가 예리한 애블레이숀 가공이 가능하다[24].

테프론은 180 nm 이상의 파장 영역에서는 광흡수계수가 작아서, 엑시머 레이저로는 가공하기 어려운 대상이었다. 그러나, F_2 레이저 (파장 157 nm)를 이용하면 高精度의 애블레이숀이 가능하다는 것이 명확해 졌다[25]. 조사 에너지 밀도 $0.3\text{J}/\text{cm}^2$ 과 $1.2\text{J}/\text{cm}^2$ 에 대하여, 에칭 깊이는 각각 $0.15\mu\text{m}/\text{pulse}$ 및 $0.3\mu\text{m}/\text{pulse}$ 이다.

3. 맺는 말

반도체의 초미세가공을 중심으로 레이저 가공의 현상의 소개와 장래의 전망에 대하여 논했다. 레이저 가공에는 레이저 광의 集束性에 주목한 초미세가공의 길과 다른 에너지源으로는 얻을 수 없는 높은 출력 밀도에 주목한 대형 가공의 길이 있는데 本稿에서는 초미세가공의 흐름을 좇아 보았다. 이 초미세가공의 분야에서는, 레이저 광 뿐 만 아니라 제어성이 좋은 이온이나 전자 빔의 이용도 활발히 연구되고 있어, 이러한 각종 빔에 의한 直接描畫 프로세스(마스크레스 프로세스)와 X선이나 광학계의 개량에 의해 포토 리소그라피를 이용한 대면적 패턴 轉寫 프로세스(마스크 프로세스)의 병용에 의해, 더욱 미세하며 생산성이 높은 가공법의 개발이 기대된다. 또한, 이러한 초미세가공 기술이 반도체 뿐 만 아니라, 세라믹이나 자성체 재료, 마이크로 메카닉스 분야에도 응용될 것을 기대한다.

레이저 애블레이숀 가공에 있어서는 다음과 같은 과제가 남아 있는데, 1) 애블레이숀 가공 현상의 메카니즘의 규명, 2) 애블레이숀 가공과 엑시머 레이저 파장과의 관계, 3) 發振器로부터 나온 빔을 가공에 대한 最適의 특성(強度分布, 發散角 등)으로 만드는 빔 整形 기술을 비롯한 가공계의 기술 개발 등이다.

참 고 문 헌

- [1] 難波 進 著 : 레이저와加工 (共立出版, 1983)
- [2] D. Bäuerle : Chemical Processing with Laser (Springer-Verlag, Berlin, 1986)
- [3] 高井幹夫 : 레이저研究 Vol. 11, 649 (1983)
- [4] J.C.C. Fan, et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 38, 365 (1980)
- [5] M. Takai, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 22, L 624 (1983)
- [6] J.P. Colinge, et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 41, 346 (1982)
- [7] T. Nishimura, et al. : Technical Digest of IEDM, Washington D. C. , p.111, 1987
- [8] M. Takai, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 22, L 757 (1983)
- [9] C. Lee, et al. : Appl. Phys. Vol. A56, 343 (1993)
- [10] M. Takai, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 23, L 852 (1984)
- [11] M. Delfino and T. A. Reifsteck, Appl. Phys. Lett. Vol. 42, 715 (1983)
- [12] S. Yokoyama, et al. : Inst. Phys. Conf. Ser. Vol. 79, 325 (1985)
- [13] P.K. Boyer, et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 40, 716 (1982)
- [14] W. Roth, et al. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 17, 193 (1983)
- [15] A. Doi, et al. : Inst. Phys. Conf. Ser. Vol. 79, 331 (1985)
- [16] Y. Kawamura, et al. : J. Appl. Phys. Vol. 53, 6489 (1982)
- [17] Y. Aoyagi, et al. : Opt. Commun. Vol. 29, 253 (1979)
- [18] N. Nomura, et al. : Proc. Symp. VLSI Technology, 1984
- [19] 大森 等 : 日本 電氣學會研究會資料, 光·量子デバイス研究會, OQD-89-54, 45 (1989)
- [20] Lambda Physik 社 カタログ
- [21] F. Bachmann : MRS Bulletin /December, p. 49 (1989)

- [22] 糸崎：第3回超先端加工システム技術シンポジウム豫告集, p. 62 (1990)
- [23] 新納 等：レーザー學會研究會報告, RTM-92-21, 15 (1992)
- [24] 大森 等：精密工學會春季大會論文集 '90, p. 591 (1990)
- [25] Lambda Physik 社, Highlights, No. 25 (1990)



이 천(李天)

1960년 6월 11일생. 1982년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 3월 일본 오사카대학 대학원 기초 공학연구과 전기공학전공 졸업(공학박). 1992.4~93.10년 일본 理化學研究所 레이저과학그룹 연구원. 1993.10~93.2년 한국과학기술연구원 정보전자연구부 Brain Pool 연구원. 93.3~현재 인하대 공대 전기공학과 조교수.