

## 이온빔 기술 리뷰

### A Review of Ion Beam Technology

이 태 호\*

Tae-Ho Lee

#### Abstract

In this paper, ion beam technology was investigated through the published papers. Ion beam technology is mainly used by the focused ion beams. There are two different types of application methods. One method is to remove the material from the substrate, the other one is to deposit the materials on the surface of the substrate or specimen. Based on the literature review there are 1.5 times more published research papers related to the deposition than those of the removal.

Keywords : Ion Beam Milling(이온빔 밀링), Ion Beam Deposition(이온빔 증착), Ion Beam Implantation(이온빔 주입), Ion Coating(이온 코팅), Focused Ion Beam(집속 이온빔)

#### 1. 서론

이온빔 가공 기술은 21세기를 살아가는 우리에게 가장 현실적으로 다가오는 기술 분야 중에 하나이다. 거대한 기계 가공이 있는가하면 아주 미세한 부품의 정밀 가공이 필요한 시기이기 때문이다. 집적회로, 웨이퍼 등 반도체 산업과 RF, 마이크로 서킷 등 정밀 미소 전자기기의 전자, 통신 산업이나 마이크로 렌즈, 비구면, 무반사경 등의 광학 소자 산업, 나아가 의료기 부품, 윤활과 내구성 제품 등에 이르기까지 이온빔 가공기술의 적용범위는 다양하다.

이 기술은 특히 방위산업 군사용 부품 분야인 광학 분야나 미소 전자 기기를 포함하는 특수 재료의 이온

코팅 분야 등에 그 용도가 확대되고 있다. 이온빔 가공기술은 한 가지 기법만 있는 것이 아니라 여러 가지 방법으로 적용되고 있어, 그 적용성이 또한 다양하다. 이온빔은 부품의 표면을 깎아내는 일반적인 밀링이나 에칭에서부터 3차원적인 가공에까지 이용되고 있다. 이 기술은 또한 부품 표면에 새로운 이온을 입히는 증착에도 적용된다.

이온을 이용한 가공 기술은 어휘에서 보듯이 이온을 이용하는 것이므로 기술 자체가 첨단이며 또 가공 방법과 적용 범위도 다양하여 꾸준히 연구 개발되어 오고 있다. 이러한 상황에서 세계 여러 나라의 기술과 연구 개발 상황을 체계적으로 분류 조사하는 것은 매우 중요한 일이다. 이런 관점에서 집속 이온빔의 연구, 개발 및 발달 상황을 정리하며 이온빔의 응용으로 삭마형 가공과 이온 증착 기술에 대하여 조사하고자 한다.

† 2011년 10월 2일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

\* 한국과학기술정보 연구원(KISTI) ReSeat 프로그램

책임저자 : 이태호(taeho0547@reseat.re.kr)

## 2. 집속 이온빔

집속이온빔(FIB : Focused Ion Beam)은 재료 표면을 미세한 주사선의 형태로 주사(scanning)함으로써 표면 성질을 개질하거나 시료의 특정 부위에 선택적으로 주사하여 시료를 분석하는 용도에 적합하다. 그러므로 입자 빔을 작게 집속시켜 조사하여 재료의 특정 부위를 연구하는 데에 사용되기 시작하였다.

집속 이온빔 가공 기술은 Seliger와 Fleming이 실리콘에 불순물 조사를 위하여 마스크 없이 첨가물을 주입한 것을 보고한 1974년부터 시작되었다<sup>[1]</sup>. 이 연구는 마이크로 단위 레벨까지 이온빔을 사용할 수 있는 가능성을 보여준 것으로, 물체의 개구(aperture) 직경은 150  $\mu\text{m}$ 에 최소 빔 직경은 3.5  $\mu\text{m}$ 이었고 빔 에너지는 60 keV이었다.

Krohn과 Ringo가 1975년에 세슘, 갈륨, 수은 등의 원소들을 액체 소스로서 사용할 수 있는지의 가능성에 대하여 시험하였다<sup>[2]</sup>. 그들은 시험을 통하여 약 15  $\mu\text{m}$ 의 직경 표적 위에 집속 점(focal spot)을 만드는 가장 효과적인 것은 갈륨임을 알아내었다. 갈륨은 용점이 낮아 상온에서 액체 상태로 존재하며 아주 정밀한 크기로 집속이 잘되었기 때문이다.

1987년 Melngailis는 물질들에 대한 다른 이온 에너지들의 상호작용과, 이온빔 시스템에서 스퍼터링과 가공 기술에 의한 가열 현상, 그리고 마이크로 전자 조립 등에 대한 FIB 기술의 응용 가능성을 조사하였다<sup>[3]</sup>. 마이크로 전자와 반도체 산업은 FIB 실험 장비에 응용되어, 50 nm LMIS(Liquid Metal Ion Source) 빔의 생산과 금속 증착, 이온빔 강화 화학 증기 증착 등의 기술을 발전시켰다. 1989년 Kirk 등이 집속 이온빔을 사용하여 시료 단면을 가공하는 새로운 기법을 발표하였다<sup>[4]</sup>. 집속 갈륨 이온빔을 시료 표면에 수직으로 조사하여 시편에서 스퍼터링(sputtering)을 일으키고, 이렇게 하여 생긴 트렌치(trench)를 연속적으로 얇은 시편조각(slice) 양단으로부터 안쪽으로 수 마이크로씩 절단하여 가공하였다. 가공할 부위에 집속 갈륨이온을 사용하여 스퍼터링을 통한 밀링을 하면 스퍼터링으로 일부는 재 증착이 일어나기도 한다. 이를 방지하기 위하여 양쪽 방향으로 가공을 하며, 보통 금속선을 가공 부위에 설치해 놓아 스퍼터링에 의한 손상을 방지하고 있다<sup>[5]</sup>.

## 3. 삭마형 이온빔 가공

### 가. 이온빔 밀링기술

이온빔 밀링은 불활성 가스의 이온빔을 기질의 표면에 투사하여 표면의 원자를 튕겨나가게 함으로서 표면을 깎아내는 기술로 이온빔 에칭이라고도 불린다.

이온빔 밀링은 특히 정밀한 얇은 홈(grooves) 가공에 효율적이며, 규칙적인 피트 어레이(array) 생산에 효과적이다. 피트의 폭은 5에서 200  $\mu\text{m}$ 이고 깊이는 1 mm까지 가능하다.

Fig. 1에 집속이온빔 밀링 가공의 일반적인 개략도를 표시하였다. 가공하고자 하는 영역을 빔이 주사(scanning)해 가면서 지나가고 한 방향으로만 진행하고 있어 가공이 끝난 지점에서는 다시 돌아오는데 이때는 블랭킹(blanking)이 되어 빔이 스캐닝하지 않는다.

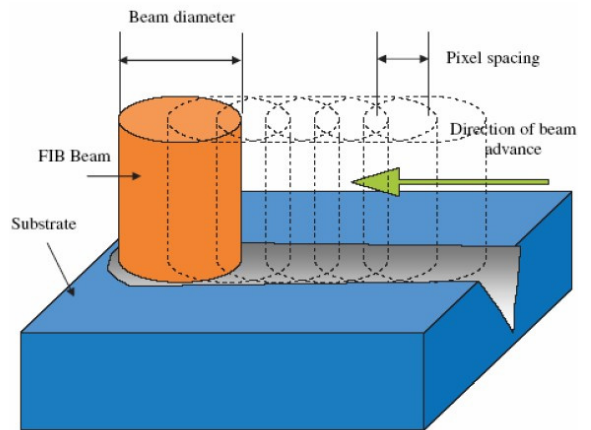


Fig. 1. Schematic of ion beam milling<sup>[6]</sup>

집속이온빔 밀링의 작동은 이온원이 되는 액체금속의 추출로부터 시작된다. Giannuzi 등은 갈륨 저장소를 뿔족한 텅스텐 바늘에 접촉하도록 위치시켜, 갈륨이 바늘을 적시면서 텅스텐 팁으로 흘러가게 하였다<sup>[5]</sup>. 반경이 5~10 nm인 갈륨 콘을 형성시키기 위해서  $10^8$  V/cm 이상의 전기장을 인가하여 전기장에 의해서 갈륨이 이온화되고 전기적 방출이 발생하도록 하였다. 형성된 이온은 가속 전기장에 의해 집속 이온빔의 형태로 가속되었다. 가속 전압은 5~50 keV에서 조절된다. 렌즈의 정전기 강도 제어와 직경 5 nm에서 5  $\mu\text{m}$  이온빔 크기를 효과적으로 조정하기 위하여 침(probe)의 전류 강도를 수 십 pA에서 수 nA로 조정하였다<sup>[5]</sup>.

2008년 Fu 등이 이온빔 투사각을 변경시킴으로서 이온빔이 조사되는 충격 시간 동안에 피조사 재료에 상이한 표면 형태를 형성시킬 수 있음을 발표하였다<sup>[7]</sup>. 그들은 아주 작은 투사각(grazing angle)을 사용하여 매끈한 재료 가공 표면을 얻었는데, Fu 등은 이러한 작은 투사각의 기하학적 형상을 얻는 방법에 대하여 기술하였고 이 밀링 형상으로 표준 밀링 각도의 한계를 극복하였다.

Fig. 2와 같은 트렌치 기법에 의한 이온빔 밀링에 대하여는 Stevie 등이 그들의 TEM 시편 준비 과정에서 자세히 기술하였다<sup>[5]</sup>. 집속이온빔 밀링을 시작하기 전에 밀링 시간을 줄이기 위하여 길이는 3 mm 미만의 시편을 가능한 한 얇게(50  $\mu\text{m}$  미만) 기계적으로 연마하였다. Anderson 등(1997)은 삼각(tripod) 연마가 이상적이라고 하였다<sup>[8]</sup>.

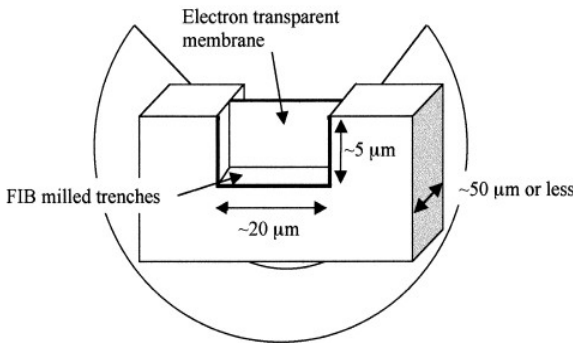


Fig. 2. Trench milling<sup>[5]</sup>

미국의 이온빔 밀링 회사인 Ion beam milling, Inc<sup>[9]</sup>에서 발표한 자료를 보면, 이온빔 밀링은 항공 우주분야에서는 인공위성, 우주비행체에 사용하는 감쇄기(attenuator), 나선형 유전체(inductor), 필터, 트랜스미션 라인 등의 제작에 사용되고 있으며 텔레커뮤니케이션 분야의 RF 마이크로 서킷의 박판 필름제작과 포토닉스(photonics) 분야의 BeO, 다이아몬드, 질화알루미늄 서킷 등의 제작에 사용되고 있음을 알 수 있다.

나. 이온빔 머시닝

이온빔의 가공 기술은 광학 분야에도 많이 활용되고 있다. 특히 마이크로 제어가 가능한 이온빔을 이용하면 비구면(aspheric) 표면 형상의 렌즈 가공도 가능하여 반도체 레이저에 부착하는 반사경(reflector) 등의 정밀 가공에 이 방법을 사용하고 있다.

Kitamura 등은 집속이온빔을 사용하여 마이크로 렌즈를 가공하였다(2002)<sup>[10]</sup>. 그의 이온빔 장치에서는 갈륨 이온 소스로부터 추출된 이온들이 집광렌즈와 대물렌즈를 통해 집속된다. 대물렌즈 뒤에 장착된 편향기는 집속 이온빔을 주사(scan)하면서 작업물을 가공한다. 주사 체류 시간은 매 지점에서마다 필요 시간만큼 디지털로 정해진다.

두께 1 mm에 직경 10 mm인 석영 샘플을 이온빔 가공한 예가 Fig. 3에 나타나 있다. 이 때 사용한 가공 표면에서 반사되는 전자에 의해 전기장이 형성되기 쉬우므로 이를 중화시키기 위하여 홍수 총(flood gun)이라 불리는 전자총에서 전자 빔을 함께 보낸다<sup>[10]</sup>.

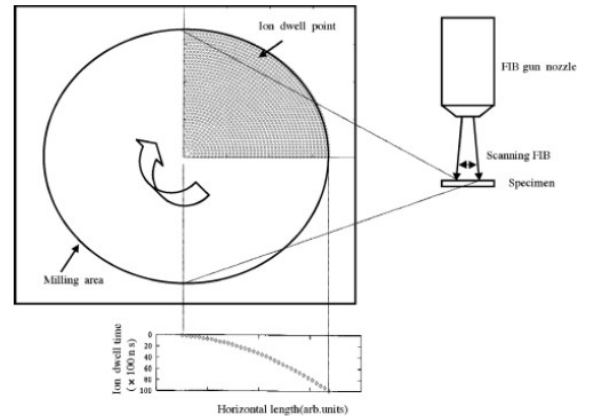


Fig. 3. Duration of ion beam<sup>[10]</sup>

이온 체류 시간은 중심에서 원주 방향으로 나가면서 점차 증가시켜, 가공 표면이 구(球)형이 되도록 한다. 총 가공 시간은 석영의 가공율을 계산하여 얻으며 형상에 따라서 반복적으로 빔을 주사한다. 이렇게 하여 처음에는 평면이었던 가공 표면이 점차로 구형 렌즈로 되는 것이다.

집속이온빔 가공은 보통 진공에서 작업이 이루어진다. 커다란 작업물 가공에는 하나의 큰 진공실을 사용하거나 국부적 진공실을 사용하는 두 가지 방법의 진공 방법을 사용한다. 큰 진공실을 사용하는 경우에는 용량 증가에 따라 경비가 지수 함수적으로 증가하며, 장착, 탈착, 배기 등의 작업에도 경비가 크게 소요된다. 이를 개선하기 위해서 Masuzawa 등은 2009년에 작업물을 대기 중에 놓아두고 비접촉(noncontact) 방식으로 작업물 표면에 국부적 진공을 만들어 가공하는 기술을 개발하였다<sup>[11]</sup>.

#### 4. 이온빔 증착 기술

##### 가. 이온빔 주입

이온빔 주입은 소재 속으로 다른 종류의 이온들을 강제적으로 집어넣어 물질의 물리적, 전기적 성질을 바꾸는 과정이다. 이 기술의 시작 시기는 1940년대 Oak Ridge Laboratory에서 Manhattan Project를 개발하던 시절부터로 보고 있다<sup>[12]</sup>. 1970년대에 들어 이온빔 주입은 반도체, 금속, 절연체, 세라믹 등의 전기 특성을 변형시키는 분야에 대단히 중요한 기술이 되었다. 근년에 와서는 계속되는 집적회로 트랜지스터의 소형화로 컴퓨터 칩의 생산에 이온빔 주입이 표준 기술로 되었다.

전형적인 이온빔 주입기 개략도가 Fig. 4에 표시되었다. 이온이 생성되고 가속되는 이온화 실이 있고, 여기서 이온들이 목표 물체에 진입할 수 있을 정도로 충분히 가속되어 필요한 깊이까지 주입된다. 일반적으로 이온들은 원자에서 전자가 이탈되어 이온과 전자들이 혼합되어 존재해 있는 플라즈마 상태에서 추출된다. 추출되는 이온들은 질량 분석 장을 통과하면서 서로 다른 종들로 분류되어 사용된다<sup>[13]</sup>.

이 기술은 적은 수의 입자들을 주입시켜 대상 물질의 전기적 물리적 성질을 크게 변화시킬 수 있어 반도체 같은 재료에 가장 적합하게 사용되는 기술이다. 이온 주입에 의한 표면 개질은 이온의 종류, 에너지 그리고 플럭스(flux)에 의존되며, 고체 속으로 들어가는 이온의 총 수량은 이온 플럭스와 이온 주입 시간에 따라 정해진다.

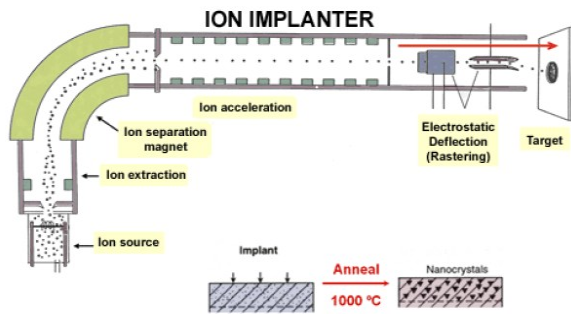


Fig. 4. Schematic of ion implantation<sup>[12]</sup>

##### 나. 이온빔 증착

이온빔 증착은(IBD : Ion Beam Deposition) 이온빔을 기관에 조사시켜 얇은 피막(film)을 형성시키는 코팅

기술이다. 많은 경우에 제 2의 이온 소스를 사용하는 이온 보조 증착이나 화학 증발 증착과 병행하여 운용한다. 이온빔 증착은 특히 금속 산화물이나 금속 질화물 피막을 형성하여 소재의 안정성(stability), 밀도, 유전성(dielectric)과 광학적 특성을 개선시키는데 유용하다<sup>[14]</sup>.

이온빔 증착 시스템은 보통 압력이  $10^{-4}$  Torr 이내에서 작동된다. 따라서 분출되는 이온 소스나 타겟 표면에서 스퍼터링되는 이온들의 분산이 극히 드물며 빔의 직진성이 매우 좋고 효과적이다<sup>[14]</sup>.

재료의 코팅은 내마모성이나 부식에 대한 저항을 갖는 이온들이 채택 사용되어 공구 수명을 향상시키고 있다. 코팅의 또 하나의 큰 분야는 광학 분야로서 코팅을 통하여 빛의 반사를 없애 투명한 렌즈를 만드는 데 필수로 사용된다<sup>[15,16]</sup>.

렌즈를 코팅하여 무반사 렌즈를 제작할 때는 소재의 굴절률(refractive index)과 상쇄간섭 효과를 최대한으로 활용하여 위상차에 의한 반사율을 영(zero)으로 만드는 과정이 수반된다. Fig. 5와 같이 코팅에 의해 형성된 두 반사면의 거리가 입사광의 1/4 파장이라면, 첫 번째 면에 의하여 반사되는 빛은 두 번째 면에 의하여 반사되는 빛에 비하여 1/2 파장만큼 지연된다. 1/2만큼의 지연은 위상으로 환산하면 180도이고 이들은 완전히 상쇄되는 상이 된다. 즉 180도 위상차가 있는 파는 서로 간섭하여 상쇄 간섭이 일어나고 반사율은 영이 된다. 이를 이용하여 반사가 없는 코팅을 렌즈나 거울에 이용할 수 있다.

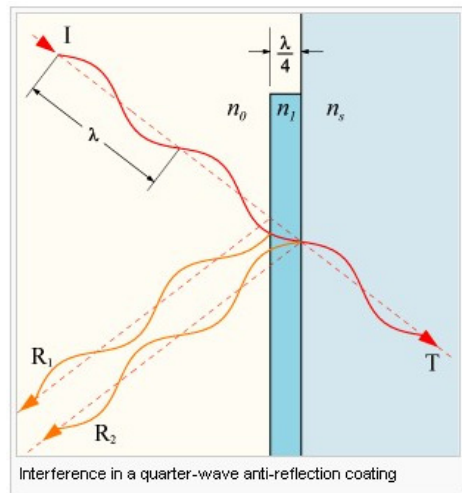


Fig. 5. Interference in a quarter wave

이와 같은 무반사(AR : Anti Reflection) 코팅 기술은 1935년 독일의 Carl Zeiss Optics Company에서 개발되었다<sup>[17]</sup>. 이 기술은 2차 세계 대전 동안에는 독일에서 군사 기밀로 보호되기도 하였고, 현재까지도 이러한 코팅 기술은 각 회사마다 고유한 노하우로 거의 공개되지 않고 있다.

다. 이온빔 보조 증착

이온빔 보조 증착은 다른 증착 방법과 함께 작업되는 과정으로, 진공 증발 증착과 함께 수행되거나, 화학 증착 또는 펄스 레이저 등과 같이 사용되기도 한다.

대표적인 이온빔 보조 증착으로 진공 분위기 속에서 이온빔과 증발을 같이 하는 과정을 들 수 있다. 보조 증착 코팅의 예를 보면, 진공 속에 놓여진 부품에 코팅될 원자나 분자들이 응축되면서 표면에 부착되어 코팅이 이루어지는데, 이때 고 에너지(100~2000 eV) 이온을 부품 표면으로 보내는 것이다. 부품은 코팅 증발 재료와 이온빔의 교차점에 위치하고 있다<sup>[13]</sup>. 이러한 이온 충격을 통한 이온빔 보조 증착은 얇은 피막 형성에 뛰어난 장점을 보이고 있다. 접착력이 매우 증대될 뿐 아니라, 형태, 밀도, 응력 레벨, 결정도(crystallinity) 및 화학적 구성의 조절이 가능하다<sup>[13]</sup>.

이온빔 증착의 다른 방법은 이온빔을 기질에 직접 투사하지 않고, 목표물(target)에 투사시켜 목표물에서 스퍼터된 이온을 기판에 증착시키는 방법이다. 이것은 증착시키고자 하는 물질을 직접 이온화시키기가 용이하지 않을 때에 아주 적합하다. 이 방법은 광학 코팅에 많이 사용되고 있으며 이온빔 보조 증착이라기보다는 이온빔 간접 증착이라 할 수 있다. Fig. 6에 그 개략도가 표시되어 있다.

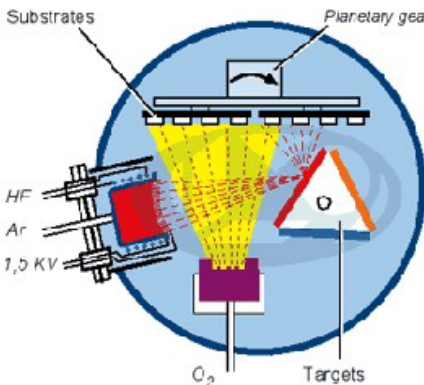


Fig. 6. Ion beam sputtering deposition<sup>[18]</sup>

중요하게 이온빔 보조 증착이 활용되고 있는 분야는 컨덕터(conductor) 코팅 분야이다. 일본에서는 2005년 Iijima<sup>[19]</sup> 등이 컨덕터에 GZO(Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 이온빔을 사용하여 보조 증착한 바 있으며, 미국에서는 산화마그네슘(MgO) 이온 보조 증착을 사용하고 있다. 이외에도 컨덕터에 사용되고 있는 이온빔 보조 증착으로는 질화 티타늄(TiN)이나 YSZ(Yttria-Stabilized Zirconia) 이온빔 보조 증착 템플리트를 고온 초전도체에 사용하고 있다. 유명한 한 회사는 이미 길이가 500 m 이상인 컨덕터 테이프를 생산하고 있다<sup>[6]</sup>.

5. 학술 정보 분석

ISI Web of Knowledge 플랫폼에서 Web of science를 활용하여 1986년부터 현재(2010.9)까지 발표된 이온빔에 관한 학술 정보를 조사하였다. “이온 빔 밀링”을 제목에서 검색 결과 202편이 검색되었으며 토픽으로 검색한 결과는 657편이 검색되었다. 가공기법의 소분류대로 토픽에서 검색한 결과 “이온 빔 머시닝”은 91편, “이온빔 에칭”은 1,107편, “이온빔 주입”은 452편, “이온 빔 증착”은 897편 등이 검색되었다. 또, “이온빔 보조증착”은 1,447편, 별도로 “이온빔 스퍼터링”은 1,755편이 검색되었다. 참고로 중복 토픽을 보기 위하여 “이온빔 밀링” 또는 “이온빔 에칭”을 검색한 결과 1,755로 검색되어 각각의 검색 편수의 합계 1,764 보다 큰 차이가 없었다.

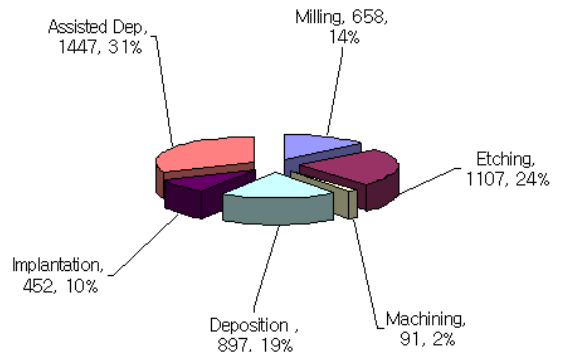


Fig. 7. Distribution of papers in the technological fields

Fig. 7에 이온빔 가공과 관련하여 소분야별로 토픽으로의 검색 건수를 비교하여 보았다. 삼각형 가공으로 볼 수 있는 밀링과 머시닝 에칭이 40%이고, 증착

형인 주입, 증착과 보조증착에 관한 것이 60%이었다. 스퍼터링은 삭마나 증착에 모두 관계되므로 이를 제외하고 비교하였다.

같은 분류를 제목별로 검색하여 보니 이온빔 밀링이 202편, 머시닝이 25편, 이온빔 에칭이 359편이고, 이온빔 주입은 205편, 증착은 280편, 이온빔 보조 증착은 616편 등이 검색되었다. 삭마와 증착 비율은 34:66으로 토픽 검색과 비교하면 제목에서 증착이 더 많은 편이다. 이러한 분야별 내용을 볼 때 삭마형 가공보다는 증착형 가공기술에 더 많은 노력을 경주하고 있음을 알 수 있다.

2000년대의 연도별 논문 발표 수를 살펴 본 결과, 2005년에 가장 많았고 220편에서 230편 사이의 발표 실적을 보여 꾸준한 추세를 보이고 있다. Fig. 8은 10대 국가 별 논문 발표수를 분포로 나타낸 것이다. 국가별로 논문 발표가 활발했던 나라는 역시 미국이 단연 우위를 차지하고 있고 뒤이어 일본, 중국, 독일 순으로 나타나고 있다. 프랑스, 영국에 이어 우리나라는 10대 국가 중 7위에 위치하고 있다. 전 세계적으로 보아 10대 국가 중에 7위에 속한다는 것은 상대적으로 활발한 활동으로 여겨지나 논문의 절대 양을 보면 233편으로 전체 논문 수 대비로는 5%에 불과하다. 미국과 일본이 각각 1,164, 866편으로 25%와 19%를 차지하고 있다.

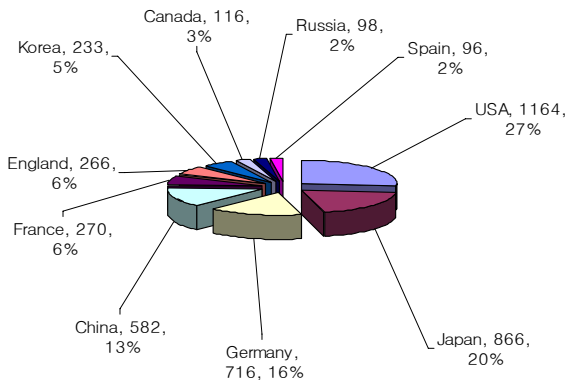


Fig. 8. Top 10 countries which published papers

세계 25대 기관들의 발표물들을 조사했는데 가장 많은 기관들이 4.2% 정도이고 대부분이 1% 대를 보여 많은 기관들이 이 기술에 골고루 관심을 갖고 있음을 알 수 있었다. 또 대부분의 나라에서는 대학이 연구기관으로 나타나는 것에 비하여 미국은 LOS ALAMOS

NATL LAB, OAK RIDGE NATL LAB과 같이 연구기관이 보인다.

## 6. 결론

문헌 검색을 통하여 기술의 연구 개발 상황을 보면 삭마형 가공 기술에 비하여 증착형 가공기술에 관한 논문이 약 1.5배 정도 많았다. 삭마형 가공기술은 주로 이온빔 밀링이고, 흡착형은 이온빔 보조 증착이 이온빔 증착 보다 많아, 이온빔 단독으로 증착하는 것보다는 보조 증착으로 다른 기법과 같이 수행하는 것이 많음을 알 수 있었다.

이온빔 밀링을 사용하여 주사전자 현미경, 투과전자 현미경과같이 시료 제작을 시작으로 하여, 반도체의 고밀도 집적회로, 웨이퍼 등의 반도체 산업에 적용하고 있다. 이외에도, 디스플레이, 감쇄기, 유전체, 공명기, 등에 미소전자 기기 제품 등의 표면 광택에 사용하고 있다.

이온빔 주입은 표면 재질의 개질에 주로 사용되는 기법으로 질소 주입은 내마모성 증대를 통한 수면 연장으로 고속강, 몰딩 스크류 등에, 티타늄과 카본은 철강의 마찰 감소와 내마모 증대, 크롬은 구멍의 강도 유지 등을 목적으로 사용하고 있다.

이온빔 증착은 주로 재료의 코팅에 사용하는데 일반적인 재료의 코팅은 내마모성이나 부식에 대한 저항을 갖는 이온을 채택하여 공구 수명을 향상시키고 있다. 또 하나의 큰 분야는 광학 분야로서 코팅을 통하여 빛의 반사를 없애 투명한 렌즈를 만드는데 필수로 사용된다.

화학 증착이나 증발 증착에 이온빔 보조 증착을 하면 이온 충격을 통한 증착이 얇은 피막 형성 기술에 뛰어난 장점을 보이고 있다. 즉 접착력이 매우 증대될 뿐만 아니라, 형태, 밀도, 응력 레벨, 결정도(crystallinity), 화학적 구성을 조절할 수 있다.

## References

- [1] R. L. Seliger and W. P. Fleming, "Focused Ion Beam in Micro-fabrication", Journal of Physics, 45, pp. 1416~1422, 1974.
- [2] V. E. Krohn and G. R. Ringo, "Ion Source of High

- Brightness using Liquid Metal”, Applied Physics Lett, 27. pp. 479~518, 1975.
- [3] J. Melngailis, “Critical Review : Focused Ion Beam Technologies and Applications”, J. Vac. Sci. Technol. B5, pp. 469~495, 1987.
- [4] E. C. G. Kirk et al, “Cross-sectional Transmission Electron Microscopy of Precisely Selected Regions from Semiconductor Devices, Inst Phys Conf Ser, 100, pp. 501~506, 1989.
- [5] A. Giannuzzi, F. A. Stevie., “A Review of Focused Ion Beam Milling Techniques for TEM Specimen Preparation”, Micron, 30, pp. 197~204, 1999.
- [6] Vladimir Matias, et al, “Coated Conductors Textured by Ion Beam Assisted Deposition”, Physica C 460~462, pp. 312~315, 2007.
- [7] J. Fu, et al, “A Study of Angular Effects in Focused Ion Beam Milling of Water Ice”, Journal Micromech., Microeng. 18, pp. 1~8, 2008.
- [8] R. Anderson and S. J. Klepeis, “Combined Tripod Polishing and FIB Method for Preparing Semiconductor Plan View Specimen”, Material Research Society Symposium Proceedings, 480 Pittsburgh PA, p. 187, 1997.
- [9] <http://ionbeammilling.com/>(이온빔 밀링 회사).
- [10] M. Kitamura, E. Koike, N. Tkasu, T. Nishimura, “Focused Ion Beam Machining for Optical Microlens Fabrication”, Japan Journal of Applied Physics, 41, pp. 4019~4021, 2002.
- [11] T. Masuzawa, Y. Yishida, H. Ikeda, K. Oguchi, H Yamagishi and Y. Yakabayashi, “Development of a Local Vacuum System for Focused Ion Beam Machining”, Review of Scientific Instrument, 80, pp. 0737081-5, 2009.
- [12] [http://www.vanderbilt.edu/exploration/print/pdfs/news/news\\_shutter2.pdf](http://www.vanderbilt.edu/exploration/print/pdfs/news/news_shutter2.pdf)(이온빔 주입).
- [13] <http://www.spirecorp.com/spire-biomedical/surface-modification-technology/ion-beam-assisted-deposition.php>.
- [14] <http://www.4waveinc.com/ibd.html>(증착).
- [15] <http://www.rare-metal.com/en/bigclassmemo.aspx?id=40> (이온빔 코팅).
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-reflective\\_coating#Index-matching](http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-reflective_coating#Index-matching)(무반사 코팅).
- [17] [http://www.fabtech.org/images/uploads/Companies/Carl\\_Zeiss/zeiss\\_9\\_him\\_column\\_300.gif](http://www.fabtech.org/images/uploads/Companies/Carl_Zeiss/zeiss_9_him_column_300.gif).
- [18] [http://www.laseroptik.de/index.php?Coating\\_Guide:Prod.\\_Methods:Ion\\_Beam\\_Sputtering](http://www.laseroptik.de/index.php?Coating_Guide:Prod._Methods:Ion_Beam_Sputtering)(이온빔 스퍼터링).
- [19] Y. Iijima et al, Physica C 426, p. 899, 2005.