

이온 주입 기술 현황



김 종 국

(KIMM 표면기술연구부)

- '84 - '88 서울대학교 원자핵공학과(학사)
- '88 - '90 서울대학교 원자핵공학과(석사)
- '90 - '00 서울대학교 원자핵공학과(박사)
- '92 - '95 미래상공(주) 과장
- '95 - '98 삼성전자(주) 생산기술센터 선임연구원
- '99 - '00 한국과학기술연구원 위촉연구원
- '00 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 구 현

(KIMM 표면기술연구부)

- '70 - '74 동아대학교 금속공학과(학사)
- '74 - '79 국방부 조병창 근무
- '80 - '83 동아대학교 금속공학과(석사)
- '80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



이 상 료

(KIMM 표면기술연구부)

- '73 - '79 서울대학교 금속공학과(학사)
- '78 - '81 (주) 삼미사
- '81 - '83 한국기계연구원 제조아금실 근무
- '83 - '85 Stevens Institute of Technology 재료공학(석사)
- '85 - '89 Stevens Institute of Technology 재료공학(박사)
- '98 - '00 한국기계연구원 창원분원 분원장
- '89 - '01 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

이온주입이란, 이온화된 원자를 수십~수백 kV로 가속하여 처리품에 강제적으로 주입해서, 그 표면에서 재료의 조성, 결합 상태, 결정구조 등을 변화시킴으로써 경도, 내마모, 내부식, 내피로성을 향상시키는 첨단 표면 개질 기술이다.

이 기술의 특징은 그림 1과 같이 가속된 고에너지 이온이 물리적으로 고체에 투입되는 비평형 반응에 기초하므로 종래의 상평형 원리에 기초를 둔 화학적·합금학적으로는 얻을 수 없었던, 즉 화학적 용해율에 지배받지 않는 조성 및 구조를 갖는 새로운 물질을 생성할 수 있다. 따라서 종래의 표면처리 방법으로는 얻을 수 없었던 독특한 성질을 갖는 신 물질을 창출할 수 있는데 응용에 대한 잠재력이 매우 크다.

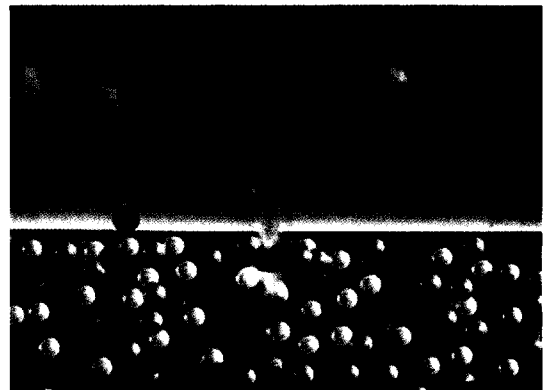


그림 1. 이온주입의 원리

또한 이 기술은 소재 내에 침투되는 이온의 깊이가 소재의 원소종류, 이온의 에너지 및 질량 등에 관계하며, 에너지를 조종함으로써 개질되는

표면의 깊이를, 조사량을 조절함으로써 조성비를 정밀하게 제어할 수 있다. 보통 수백 keV 에너지를 갖는 이온의 고체내의 침투 깊이는 1 μ m 이내이므로 이 방법은 고체의 얇은층(shallow depth)의 성질만을 변화시키는 특성을 가지고 있다(그림 2).

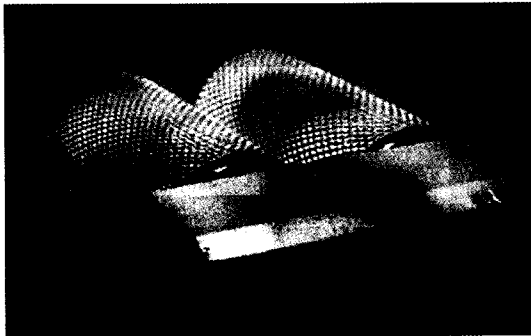


그림 2. 이온주입에 의한 제품처리

이온주입법의 산업적 응용에 가장 먼저 사용된 분야는 반도체 제조분야로서, shockley^[1]에 의하여 최초로 반도체 불순물 Doping에 사용된 이래, 많은 공정 개발을 통하여 60년대 후반부터 반도체 생산 공정에 본격적으로 사용되기 시작하였다(표 1).^[2] 또한 비 반도체 분야의 이온주입기술 개발은 70년대 초 영국 Harwell 연구소에서 최초로 시작하여^{[3], [4]} 각 국의 국립연구소(Sandia, Oak Ridge National Lab., Lawrence Berkeley Lab.(미), Harwell Lab.(영))와 장비 제조회사(Westinghouse, Zymet (USA), TecVac (UK))에서 비반도체 응용에 대한 기술개발을 주도적으로 수행하였다. 특히 80년대에는 Spire, BeamAlloy, Ion Atlanta, Ion Surface Technology, Implant Sciences 등 수많은 회사들이 설립되어져 비반도체 이온주입 서비스 시장을 개척하였다.

표 1. 이온 주입법 개발사

- 2차 대전후 핵물리, 특히 동위원소 분리 분야의 저에너지(수백 kV이하) 가속기 기술 발달
 - '54 년 W. Schockley가 반도체의 Doping 방법 이온주입법 제안
 - '60 년 J. Lindhard 등이 이온주입 현상 연구
 - '65 년 영국 Harwell 연구소가 Freeman형 이온원 개발
 - '69 년 K. G. Aubuchon이 MOS(Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터를 이온주입법에 의해 만들
 - '71 년 EXTRION, LINTOTT, ORTEC사 등이 가속 에너지 150 kV, 이온전류 수 μ A의 장치 개발, 상용화 돌입.
 - '71 년 영국의 Harwell 연구소에서 금속 이온 주입 연구 시작
 - '74 년 G. Dearnaley 등 비 반도체 분야의 이온주입법 시도
 - '74 년 금속 모재에 대한 첫 번째 Harwell prototype 이온주입 장치 제작
 - '78 년 N. Hartley 등이 철 등에 질소 이온빔 조사, 경도와 내마모성, 내부식성 현상 발견
 - '82 년 이온주입기술에 대한 Navy MANTECH* program(미국) 시작
 - '83 년 최초의 비 반도체용 이온주입기 생산회사 Zymet Inc. 설립, 5 mA급 질소 이온주입기 생산 (Z-100 Model)
 - '85 년 두 번째 Harwell prototype metal implanter 제작
 - '85 년 영국 TECVAC사와 Hawker Siddely사가 Harwell 연구소로부터 License를 받아 5 mA급 질소 이온주입기 생산
 - '85 년 일본의 AMMTRA** project 시작
 - '80년대 중반 수 mA급의 반도체용 이온주입기 개발. 초집적회로 생산라인에 사용되기 시작함.
 - '90 년 Prototype PIII*** 이온주입기 개발 (미국 Wisconsin 대학)
 - '90 년 유럽 공동으로 스페인에 이온주입 연구센터인 AIN 설립
 - '92 년 MEVVA**** metal ion source 상용화
 - '96 년 PIII 기술의 상용화
- * MANTECH : Manufacturing Technology
 ** AMMTRA : Advanced Material Processing and Machining Technology Research Association
 *** PIII : Plasma Immersion Ion Implantation
 **** MEVVA : Metal Vapor Vacuum Arc

비반도체 분야의 이온주입기술의 개발은 크게, 처리 용량의 대형화와 주입되는 원소의 다양화 등 두 방향으로 진행되어졌다. 먼저 처리 용량의 대형화는 Multi-cusp ion source나 DuoPIGtron과 같은 수백 mA급의 대 전류용 이온원 개발을 통한 이온빔 처리 능력을 확대시키거나, 1980년대 중반에 J. R. Conrad에 의해서 개발된 이래 Los Alamos National Lab 등을 중심으로 많은 발전을 거듭한, 이온원을 통한 이온빔의 가속 방식이 아닌 진공 챔버 내에 플라즈마를 발생시키고, 기판에 고전압 필스를 인가하여 3차원적인 이온 주입처리가 가능한 PIII(Plasma Immersion Ion Implantation) 방식으로 진행되었다. 이러한 대용량 처리 기술의 개발로 이온 주입 방식을 이용한 표면처리 기술은 대형 기계 부품의 처리 및 처리 단가의 감소로 이온주입 시장의 활성화에 기여하고 있다. 두 번째는 주입되는 원소의 다양화로, 초기 이온 주입은 쉽게 이온화할 수 있고, 일반적인 철계 금속의 질화나 탄화에 대한 개념

으로 질소나 탄소와 같은 gas형 원소의 이온주입이 주류를 이루었다. 그러나, 점점 금속 표면에 다양한 물성을 가진 합금층의 생성 요구로 인하여, MEVVA(Metal Vapor Vacuum Arc) 소스나 FCVA(Filtered Cathodic Vacuum Arc) 소스 및 UBM(Unbalanced Magnetron) 소스와 같은 금속이온을 주입할 수 있는 소스들이 개발되어, 기체 이온 주입에만 한정되어 있던 이온 주입 시장을 확대시키는 계기가 되었다.

따라서 본 고에서는 이온주입장치의 종류와 특징에 대해 간략히 살펴보고 이 기술의 현황에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 이온 주입 특성

2.1 이온 주입 반응 기구

이온빔 처리후의 표면 특성의 변화는 그림 3에서 보는 바와 같이 이온 주입된 재료의 표면에

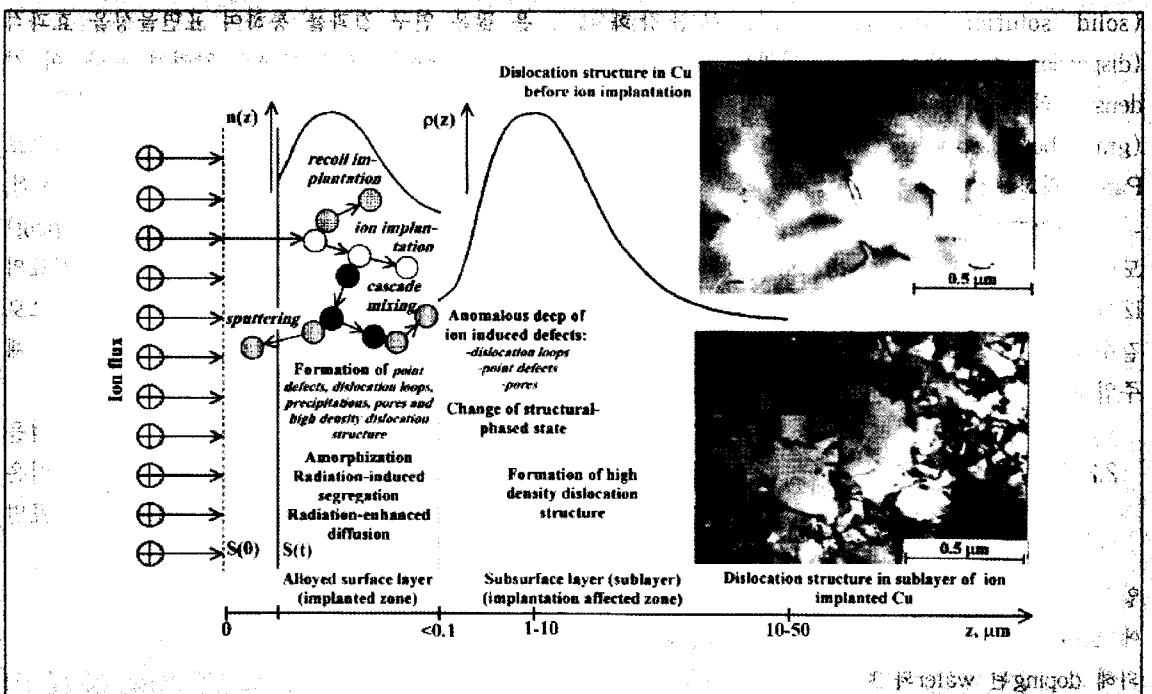


그림 3. 이온주입에 의한 표면 미세구조 상태 및 개략도

존재하는 미소구조 (microstructure)와 상(phase)의 변화를 가져온다. 이온빔 효과는 두 개의 영역으로 나타나는데, 표면 바로 아래 위치한 첫 번째 영역은 $R_p + (2-3)\delta R_p$ 의 두께를 가지며 개질된 화학적 성분(합금층 또는 이온주입영역 : IZ)을 가지고 있다. 여기서 R_p 는 입사된 이온의 비정이며, δR_p 는 입사된 이온 비정의 습동 크기이다. 이 층은 point defect와 dislocation loop등이 생성되며, 높은 residual stress의 형성, 비정질화, 방사유도 segregation 및 방사향상 확산이 일어난다. 20-200 keV의 에너지를 가진 이온에 의해 발달한 IZ의 두께는 수천 Å을 초과하지 않는다. 두 번째 영역은 long range effect이며, 고밀도 dislocation 구조(implantation affected zone : IAZ)가 발전된 sub-surface layer이다. 종종 알려지지 않은 보다 깊은 깊이에서 이온조사에 의해 야기되는 결합 (Dislocation loops, pores and point defects)이 발전되기도 하였다.^{[5], [6]} 이 IAZ의 두께는 수천 Å에서 수십 마이크로까지 형성된다.

이온주입에 의한 표면경도의 증가는 고용강화 (solid solution strengthening), 분산강화 (dispersion strengthening), 전위밀도(dislocation density)의 증가와 같은 작업 경화와 입계강화 (grain boundary strengthening)와 같은 Hall-Patch 경화에 의해 일어난다. 또한 이온주입에 의해 증가한 전위밀도는 재료 표면층의 항복강도(yield strength)를 국부적으로 증가시키는데, IZ에서 최대 값을 가지며 표면에서 내부로 들어갈수록 점차 감소하여 재료의 내부는 초기 이온주입하지 않는 상태의 항복강도를 가지게 된다.

2.2 이온 주입의 특징 및 응용분야

이온주입법은 wafer 내부에 dopant 원소를 도입하여 전기적인 특성을 변화시키는 반도체 산업에 많이 사용되고 있다. 이것은 다른 확산공정에 의해 doping된 wafer와 비교할 때 수 order 크기의 농도 제어 및 높은 재현성을 이룰 수 있기 때

문이다. 금속 야금학적인 분야에서 이온 주입은 수십~수백 keV의 에너지를 가진 이온을 가지고, 어떤 재료의 표면 부근 지역에서 특정한 원소를 주입하여 열역학적인 용융성이나 확산성에 관계없이 합금을 형성할 수 있다는 것이다. 이온 주입은 반도체 산업 이외의 분야에서도 최적의 표면처리 기술이다.

이온주입의 장점은 이온주입동안 180°C 이하의 온도를 유지할 수 있기 때문에 hardening, tempering, grinding 또는 polishing 된 마무리 상태의 공구 및 부품의 처리가 가능하며, 코팅이 아니므로 박리가 일어나지 않으며, 표면 마무리에 영향을 미치지 않는다. 또한 공구 및 부품의 크기가 표면에 더해지는 것이 없기 때문에 정확히 똑같은 상태로 있으며, 저온 공정으로 인하여 변형이 발생되지 않는다. 이러한 특징을 가지고 있는 이온 주입이 응용되고 있는 분야는 의학, 우주항공, 자동차, 공구 및 금형 그리고 비금속 등의 처리에 이용되는데 자세한 것은 표 2에 서술하였다.

앞에서 서술한 이러한 이온주입 기술의 특성은 많은 연구 결과를 통하여 표면물성을 효과적으로 개질하는 좋은 도구로 알려져 왔다. 이 결과 지난 30년간 방대한 양의 문헌들이 편찬되었다. 이온 주입법은 두 가지 원리적인 방법으로 접근되어졌는데, i) 야금학적인 도구로써 부식, 고온산화와 야금학적인 현상(impurity trapping)과 같은 분야의 기본적인 기구 연구, ii) 재료의 기계적 또는 화학적 특성을 개질하는 수단으로 연구되었다. 이온주입법에 의한 영향을 받는 재료의 특성을 표 3에 요약하였다.

이온주입이 표면개질 도구로서 명확히 장점을 가지고 있지만, 단점이 없는 것은 아니다. 이온주입의 장점과 단점을 코팅과 같은 다른 표면개질 방법과 비교하여 표 4에 나타내었다.

3. 이온 주입 장치의 종류

이온 주입 장치는 장치의 구성에 따라 3가지,

표 2. 이온 주입 응용 분야

| Application Area | Example Applications | II Technology | Competing Technology |
|------------------------|--|----------------------|---------------------------|
| Medical | hip replacements, knee joints, shoulder implants, spinal screws, dental implants, optical filters, X-ray mirrors | nitrogen II | CVD, PVD |
| Aerospace | ball bearings, hinge pin bearings, gear box bearings, gears, pillow blocks, turbine blades, turbine vanes | nitrogen II | thermal spray ion plating |
| Automotive | cylinder liners, piston rings, cam shafts, cam followers | nitrogen II | thermal spray sputtering |
| Tools & Dies | cutting tools, punches, tool inserts, knives | nitrogen II metal II | CVD, PVD |
| Non-metallic Materials | ceramic internal combustion engine components, plastics, glass | metal II | |

표 3. Surface-sensitive material properties influenced by ion implantation

| Mechanical | Chemical | Optical/Electronic |
|---|---|--|
| Adhesion Friction Hardness Wear Fatigue Stress | Electrochemistry Catalysis Oxidation resistance Corrosion resistance Compatibility with lubricants Wetting angle | Refractive index Magnetic properties Reflectance Conductivity |

표 4. Advantages and limitations of ion beam implantation for surface modification of materials

| Advantages | Limitations |
|---|--|
| Solid solubility limit can be exceeded Alloy preparation independent of diffusion Allows fast screening of the effects of changes in alloy composition No sacrifice of bulk properties Low-temperature process No significant dimensional changes No adhesion problems since there is no sharp interface Controllable concentrations-vs.-depth profile Clean vacuum process Highly controllable and reproducible | Line-of-sight process (beamline ion implantation, not PIII) Shallow penetration Relatively expensive equipment and processing cost Process unfamiliar to most new users |

사용하는 물질의 상태에 따라 2가지로 분류할 수 있다.

3.1 장치의 구성에 따른 분류

3.1.1 질량 분석기가 부착된 이온 주입 장치

초기 이온 주입법은 앞에서 서술한 바와 같이 반도체의 dopant를 주입할 목적으로 제작되었다. 따라서 주입하고자 하는 이온의 에너지, 하전 상태 및 주입량을 정확히 제어할 필요가 있었다. 그래서 초기의 이온주입기는 양이온 가속장치를 응용한 형태의 장비로 제작되어졌고, 현재도 반

도체용 이온주입기는 정량적·정성적 제어를 위하여 그림 4와 같은 형태로 제작되어지고 있다. 이온원으로부터 이온은 분자 및 원자상태 또는 1가 및 다가의 이온형태로 인출되어지게되는데, 반도체의 물성을 제어하기 위해서는 동일한 상태의 이온을 이용하여야 한다. 따라서 처리물과 이온원 사이에 이러한 여러 가지 이온 중 원하는 이온만을 이용하기 위해 질량 분석용 전자석이 부착되어 있다. 이 형태의 장비는 원하는 이온을 정확히 처리물에 주입할 수 있으나, 시편에 도달하는 이온의 양이 상대적으로 적은 단점을 가지고 있다.

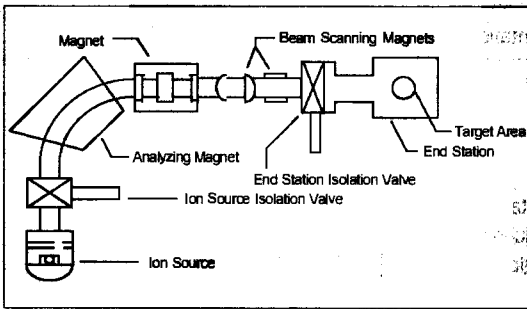


그림 4. 질량 분석기가 부착된 이온 주입 장치의 개략도

3.1.2 직접 이온 주입 장치

(Ion Beam Ion Implantation : IBI)

일반적으로 비 반도체용으로 이용되는 이온주입은 처리물의 표면 물성을 변화시키기 위하여 이용되는데, 질소 이온의 경우 10^{17} dose/cm² 이상의 이온을 주입하여야 한다. 이 dose량은 반도체 공정과 같이 전기적 특성을 변화시키기 위해 도입하는 불순물의 량 10^{14} dose/cm²의 수천 배 많은 양이다. 따라서 반도체 공정과 같이 정성적인 제어가 필요 없이 기계적인 물성 변화만을 요구하는 비 반도체 공정은 단순하면서도 처리물에 도달하는 이온 빔 전류량이 많은 방향으로 장비가 개조되어, 그림 5와 같이 이온원에서 인출된 이온이 직접 처리물에 도달하여 이온 주입되도록 단순화된 장치들이 사용되고있다. 그리고 DuoPIGtron(그림 6) 및 multi-cusp 이온원(그림 7)와 같은 대전류형 이온원들이

개발되면서 비 반도체 응용 이온 주입기술은 더욱 발전하게 되었다.

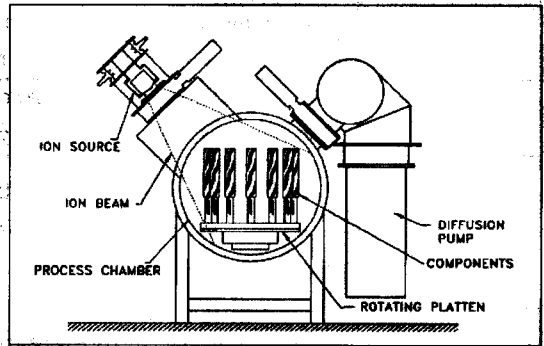


그림 5. 직접 이온 주입 장치의 개략도

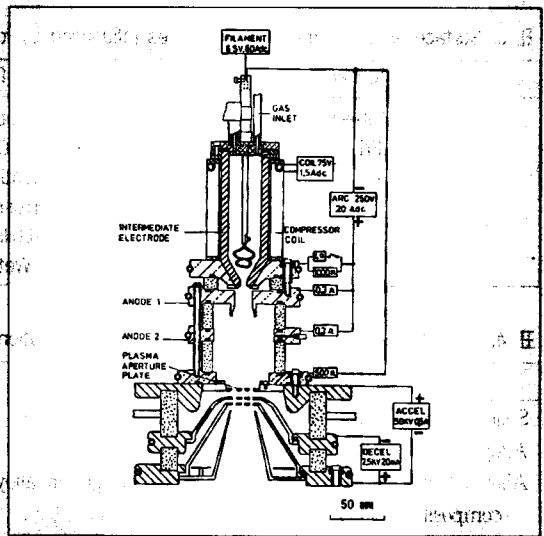


그림 6. DuoPIGtron 이온원

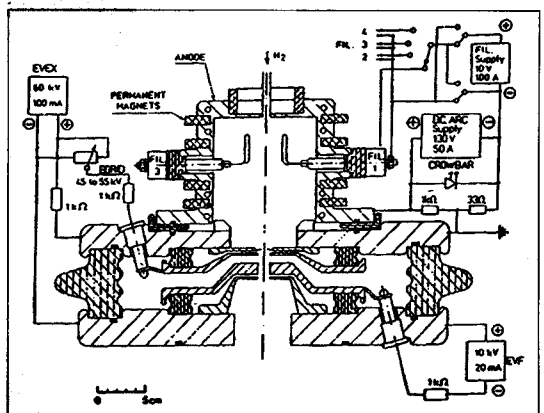


그림 7. Multi-cusp형 이온원

3.1.3 플라즈마 이온 주입 장치

(Plasma Immersion Ion Implantation : PIII)

플라즈마 이온주입 기술은 1980년 중반 Conrad 등에 의하여 제안되어지고 개발된 기술이다.^{[7], [8]} 그림 8에서 보는바와 같이 플라즈마를 발생시키는 소스가 있고, 이 플라즈마내에 처리물을 위치시킨 다음, 직접 처리물에 펄스형 고전압을 인가하여 이온을 주입하는 방식이다. 이 방식은 빔 방식의 이온주입의 최대 단점인 직선적인 공정(Line-of-sight process)이 아니고, 처리물 전체적으로 균일하게 이온을 주입할 수 있으므로, 공정적인 측면에서 경제성이 뛰어나다. 또한 빔 방식의 이온 주입의 경우 대전류의 이온빔을 얻기 위해서는 높은 빔 인출전압이 필요하나, 플라즈마 이온 주입의 경우는 장치 내의 플라즈마 농도를 조절함으로써 주입되는 이온의량을 쉽게 제어할 수 있고, 또한 수 kV의 낮은 전압에서도 이온주입 처리를 할 수 있어, 반도체공정의 shallow junction 에도 응용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 항상 같은 공정을 유지하기 위해서는 아무리 작은 처리물이 있더라도 항상 같은 부피의 dummy 처리물을 넣어 처리하여야 하며, 빔 방식의 이온주입과는 달리 낮은 주입 전압에서도 많은 X-ray가 나오는 단점이 있다. 표 5는 장치적 측면에서 본 이온주입 장치들의 장단점을 비교한 것이다.

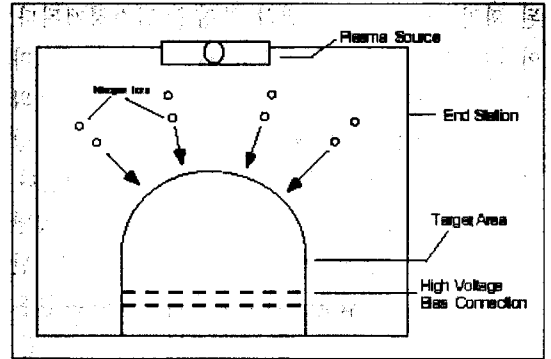


그림 8. 플라즈마 이온 주입(PIII) 장치의 개략도

3.2 사용 물질에 따른 분류

초기 이온주입의 비반도체 산업 응용에서는 질소 및 탄소와 같은 가스 이온주입이 많이 이용되어 왔다. 이 질소 가스의 이온주입은 전통적으로 시행하여 온, 철계의 재료에 질화 및 탄화를 유도한데에서 기인한 것이다. 하지만 점점 철계의 재료 이외에 합금과 같이 물질의 조성이 복잡하여지고, 이에 따라 요구되는 부품의 물성이 다양해짐에 따라, Ti, Cr, V, Y, Al 과 같은 금속의 주입이 이루어지게 되었다.

IBII의 경우는 이온원으로부터 이온을 인출하는데 이 이온원은 크게 두 요소를 가진다. 즉, 플라즈마 생성부와 이온빔 형성부(인출부)가 그것이다. 플라즈마 생성부와 이온 인출부와 관련

표 5. 빔 방식의 이온 주입방식과 비교했을 때의 PIII의 장단점

| 장 점 | 단 점 |
|---|---|
| Non-line-of-sight 공정으로 대형, 중량, 복잡한 형상의 작업물의 3차원적 처리가 가능하다. 표면적에 독립적으로 공정시간을 제어할 수 있다. 저온공정이다. 하전입자의 축적이 없다. 이온주입과 증착을 쉽게 결합할 수 있다. 저에너지(1 keV)에서도 높은 빔 전류를 얻을 수 있다. MOS에서의 더 나은 성능향상. | 하전 및 질량을 분리할 수 없다. 불균일한 이온주입 에너지 분포를 가진다. 많은 이차전자 방출로 인한 효율 저하 및 X-ray의 발생. 실제 작업 전압을 제한한다. in situ dose의 정확한 측정이 어렵다. 금속 플라즈마를 이용할 때는 3차원공정의 장점을 얻을 수 없다. |

된 파라미터들이 이온빔의 특징을 결정하게된다. 이러한 파라미터로서는 플라즈마 밀도, 플라즈마 전자, 이온의 온도, 인출 전압, 그리고 인출부의 기하학적 특징 등이 있다. 플라즈마 상태를 형성하기 위해, 중성 원자의 이온화가 필요하게된다. 이온화의 방법에는 가스의 경우, 아래에서 설명될 PIII에서 이용한 플라즈마 생성기법이 이용된다. 이러한 방법을 이용한 가스 이온원은 Duoplasmatron 이온원, DuoPIGtron 이온원, ECR 이온원, 마이크로파 이온원, CHORDIS 이온원, Multi-cusp형 이온원 등이 있다.^[9]

PIII에서 가스 플라즈마 발생원으로 이용하는 방법은 크게 세 가지이다. 하나는 전자 충돌을 이용하는 방법으로서 자장이 부가되어진 진공용기 내에 Thoriated tungsten이나 LaB₆ 등의 필라멘트를 가열해서 발생하는 열전자 방출(Thermionic emission)을 이용하여 반응가스를 이온화시켜서 플라즈마를 발생시키는 것이다. 두 번째는 직접 소재 표면에 반응가스와 불활성가스를 함께 도입하여 1~50 mTorr 수준으로 압력을 유지하면서 고전압을 인가하여 글로 방전(Glow discharge)을 발생시켜 이 플라즈마를 이용하는 방법과 세 번째 수백 kHz 영역에서부터 수십 MHz까지의 RF나 고주파를 이용하여 플라즈마를 발생시키는 방법이다.

금속이온을 이용한 방법은 1990년대 초기에는 IBII에서만 이용되었다. 그 후 쉽게 금속 플라즈마를 생성시키는 기법이 개발되어 PIII에도 이용되기 시작하였다. 초기 이온주입에 이용된 이온원은 CHORDIS 와 Freeman type으로 대부분 저온에서 녹는 금속들을 사용하였다. 그림 9는 Freeman type 이온원의 개략도이다. 하지만 점점 W, Mo, C 등 고온용 용접을 가진 물질의 주입도 이용되어, 효율은 낮지만, sputtering법을 이용하여 금속을 원자나 분자상태로 만든 후 이온화시키는 방법과, 진공아크를 이용한 방법의 이온원이 이온주입공정에 이용되기 시작하였다. 그림 10은 초기에 이용된 MEVVA(Metal Vapor Vacuum Arc) 소스의 개

략도 이다. 요즘은 쉽게 금속들을 이온화시킬 수 있는 MEVVA형 금속이온원들이 금속이온주입에 대부분 이용되고 있다.^[11] 또한 FCVA(Filtered Cathodic Vacuum Arc)나 UBM (Unbalanced Magnetron) 소스와 같이 쉽게 금속 이온을 생성할 수 있는 소스들이 개발되어 PIII에서도 금속 이온을 주입할 수 있게 되었다. 그림 11은 FCVA를 이용한 PIII 공정을 시행하고 있는 사진이다.

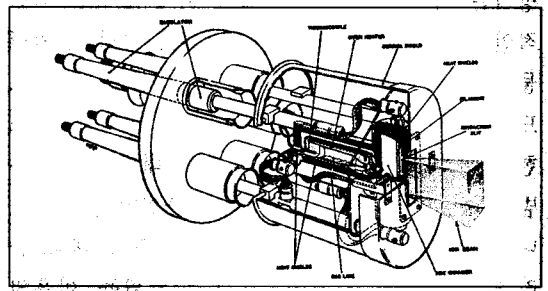


그림 9. Freeman source

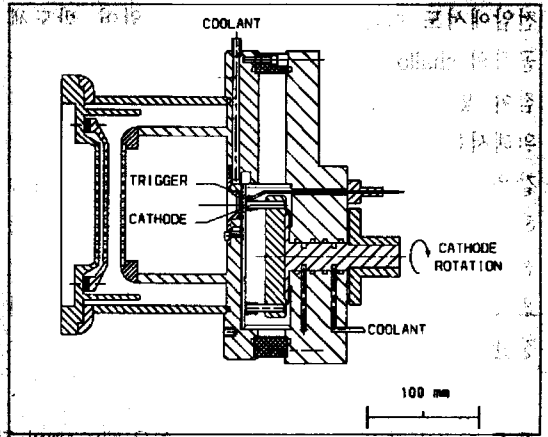


그림 10. MEVVA V

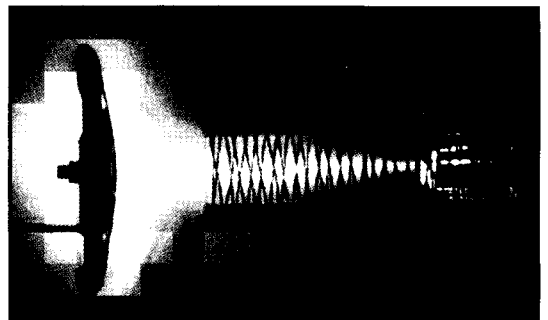


그림 11. FCVA를 이용한 PIII 공정

4. 이온주입 기술의 연구 현황

4.1 국내 이온 주입기술의 현황

국내의 표면처리용 이온주입기술 개발은 1980년대 말부터 시작되었다. IBII 장치의 기술 개발은 1980년대 말 원자력 연구소(그림 12), 표준연구소, 서울대 및 연세대에서는 거의 동시에 이온주입 장비를 개발 제작하기 시작하였으며, 1990년도 초에 미래상공(주)에서는 금형이나, 공구 등에 질소이온을 주입하여 서비스를 시도하기도 하였다. 하지만 1990년대 초반의 이온 주입시장은 국내에서 활성화되질 못하였다. 그 당시 국내는 플라즈마 표면처리 기술(CVD 및 PVD 기술)을 활용한 TiN 코팅 박막 시장의 성장기에 있었다. 금형이나 공구에 코팅된 TiN 박막은 그 코팅 두께가 2~10 μm , 경도가 2000kg/ mm^2 이며, 특히 황금색의 색상을 가지고 있었다. 이에 비하여 동일한 환경에 사용하는 금형 및 공구에 이온 주입된 처리품은 최대 질소이온의 깊이가 0.2~0.3 μm (이온에너지 100KeV에서)로 경화층이 상대적으로 얇고, 처리된 물품의 색상변화가 없어, 시각적인 면에서 TiN의 황금색의 색상변화와 구별되어 동일시장에의 진입을 이룰 수가 없었다. PIII의 기술 개발은 KIST에서 1990년 초에 처음 시도하였다.



그림 12. 원자력 연구소에 설치된 대전류 이온 주입기

현재는 IBII 기술은 원자력 연구소에서 폴리머 등에 이온 주입하여 전도성을 부여하여 반도체

chip tray에 응용하여 상업화하여, 국내 벤처 기업에 기술을 이전하였으며, 장비의 제작 판매도 시작하고 있다. 또한 한국과학기술원, 자원연구소, 표준연구소에서도 IBII을 이용한 고 부가가치의 item을 개발하고 있다. PIII 기술은 한국과학기술원에서는 폴리머 등의 전도성 부여, 기초과학연구원센터에서는 미세 드릴의 경화 및 폴리머 처리, 한국기계연구원에서는 c-BN 박막의 밀착력 증가 등에 사용하고 있으며, RIST 등에서는 장축 roller 등의 처리를 위하여 장비를 도입할 예정이다. 특히 전기연구소의 경우 PIII 기술 발전의 가장 큰 문제인 전원 개발에 참여하여 PIII 장비의 상용화에 힘을 쏟고 있다. 이외에도 2~3개의 업체가 PIII 기술을 이용한 서비스를 시행하려고 하고 있다.

4.2 국외 이온 주입기술의 현황

미국

미국은 1970년대 초에 Naval Research Laboratory(NRL)에서 이온주입 기술에 대한 MANTECH(Manufacturing Technology) program을 시작하였다. 이때, Spire사가 주로 기술 개발을 선도하여, hybrid implantation 공정을 개발하였으며, 현재 Spire사는 의학용에 사용되는 부품에 이온주입을 진행하고 있다. 비 반도체용의 이온주입기 시장은 이 MANTECH program이 진행되는 동안 Eaton사에서 벤처 형식으로 나온 Zymet사가 발전을 시켰다. Zymet사는 값싼 상업용 이온주입기를 설계하고, 공정서비스를 시행하여 시장을 활성화시키고자 하였으나, 이온주입 처리된 제품의 "visibility quality control" 문제와 시장의 보수성으로 인하여 '90년대 초 회사는 폐쇄되고 말았다. 하지만, Zymet사가 폐쇄되기 전, 판매한 30여대의 이온주입기는 현재에도 여전히 가동되고 있다. 표 6은 현재 이온주입 기술을 연구 발전시키고 있는 미국의 회사들을 표시한 것이다. 미국은 현재 Wisconsin 대학을 중

표 6. 이온주입 기술 활용 회사

| Company | Hardware Provider | Service Provider | Nitrogen Ion Implantation | Metal Ion Implantation | Plasma Immersion Ion Implantation |
|---------------------|-------------------|------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Beamalloy | | ○ | ○ | | |
| Boeing | | | | | ○ |
| Eaton Corp. | ○ | | | | ○ |
| Empire Hard Chrome | | ○ | | | ○ |
| Epion Corp. | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| GM R&D Center | | ○ | | | ○ |
| Hughes Research Lab | | ○ | | | ○ |
| Implant Sciences | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| ISM Technologies | ○ | ○ | | ○ | |
| Spire Corp. | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| SwRI | | ○ | ○ | ○ | |

심으로 PIII기술을 대용량처리에 응용 상용화에 힘을 기울이고 있으며, GM 및 보잉사에서는 이를 이용 자체 제품처리에 이용하고 있다.

일본

일본의 경우는 이온주입기술을 생산품의 부가 가치 증대를 위하여 사용하였다. 일본 통산성(MITI)와 철강업계가 주축이 되어, 1985년부터 시작된 AMMTRA(Advanced Material Processing and Machining Technology Research Association) program의 지원을 받아, 1980년대 중반 질소 이온 주입기술을 이용하여 자동차 산업에 응용하기도 하였으며, 1994년 ISM Tech.으로부터 6개의 MEVVA가 장착된 금속 이온 주입설비를 도입하였다. 이 program에 따라 ULVAC Japan, Ltd는 대면적 철판에 이온을 주입하는 장비를 개발하였으며, 향상된 고전류 이온빔 시스템을 개발하였다. Nissan Electric Co. Ltd는 금속 표면 개질을 위한 고전류 MEVVA형 금속이온주입 장치와 IBAD장치 개발에 주력하였으며, 그들이 개발한 IBAD 장치는 많은 비반도체 분야에 사용되고 있다. Mitsubishi Electric Co.는 높은 증착률을 위한 ionized multiple beam IBAD 기술 개발에 주력하였으며,

목적은 처리된 철강의 생산량과 부식강성을 향상시키는 것이다. JEOL Ltd는 steel 용융품에 대한 대전류 질소 이온주입기를 개발하는 것이며, Kobe Steel Ltd는 이온주입에 의한 내마모, 내부식, 경도의 향상을 통한 금속 표면 개질에 주력하였다.

최근 일본의 이온공학연구소(오사카 府사장 早川茂氏)는 종래보다 저코스트로 강판 등의 표면을 개질 할 수 있는 새로운 이온 주입법을 개발하였다. 고가의 질량 분리가 없더라도 예열에 의해 이온 확산 운동을 촉진하여 균일하게 주입, 가속 전압도 대폭으로 삭감되는 방법이다. 이 방법에 의하면 이온을 표면의 얇은 부분에만 주입하여도 그 효과를 크게할 수 있게 되었다. 이온의 가속 전압을 통상의 300keV에서 1keV로 대폭 삭감하더라도 수미크론 깊이의 개질이 가능하였다고 한다. 또한 개질하는 데에 필요한 시간도 100 밀리 경의 원판인 경우, 종래의 1일에 비해 이번 수분으로 비약적으로 단축하였다.

참고로 일본의 경우 이온주입기술에 많은 투자를 하는 이유가 여러 가지 있다. 첫째, 제품에 대하여 코팅을 사용하지 않고도 좋은 결과를 얻을 수 있고, 둘째, 높은 재현성이 있고, 양질의 제어가 가능하며, 생산량을 향상시키며, 쓰레기

및 재 작업을 최소화 할 수 있으며, 셋째, 환경 친화적인 공정으로 인하여 처분 및 재처리를 요구하는 산업 폐기물을 생산하지 않기 때문이다. 이중에 세 번째 항목의 경우 일본의 경우와 같은 폐기물의 운반, 보관 및 처리에 작은 공간이 있는 국가에서는 이 기술을 이용하는 가장 결정적인 요인이라고 미국의 한 보고서에 적고있다.

러시아

러시아 및 다른 동구권에서의 이온주입 기술의 개발은 대전류 이온원의 개발에 맞추어 발전하였다. 소련 연방시절 Ukraine Kiec의 Institute of Physics에서 1950년대 Gabovich 등에 의해 대전류 이온원이 개발하였다. 이 소스는 50 kV, 30 mA 대용량을 가지는 Penning ion source로 이온 주입기에 장착되었다.^[12] 초기 duoplasmatron ion source는 Sukhumi Physical Technol Institute의 R. A. Demirhanov 와 공동 연구자가 개발하였는데, 이 소스는 수소 이온빔의 경우 275 mA, 45 kV를 제공한다. 초기 소련형 vacuum arc metal ion source는 Sukhumi Physical Technol Institute 의 Plyutto에 의해 개발되어 핵융합 program에 이용되기도 하였다. 1970년대에 high dose의 질량분류기를 포함하지 않은 이온주입기가 개발되어 금속의 내마모, 내부식 향상에 사용되기도 하였다. 러시아 플라즈마 이온몰리의 가장 혁혁한 공헌은 vacuum arc를 이용한 금속 이온원의 개발이다.^[13] Tomsk의 High Current Institute에서 개발한 Titan ion source는 기체 및 금속 이온빔을 생성할 수 있으며, 100 kV의 가속 전압에 dose rate는 30분 이내에 10^{17} ions/cm²를 처리할 수 있다.^[14]

러시아는 MEVVA형 금속이온주입기의 개발을 선도하고 있다. 러시아의 MEVVA형 장치는 미국의 ISM Technologies의 장치와 유사하다. 현재 러시아에서는 50여개의 MEVVA형 금속이온주입기를 산업에 적용하고 있으며, 이 장치는 공구각인, 편칭 공구, 프레스 및 몰드 금형과 절삭 공구의 성능향상에 이용되고 있다.

유럽

비반도체 분야에 대한 이온 주입 기술은 약 15년 동안 유럽에서 성숙한 시장을 형성하기 위하여 꾸준히 노력하여왔다. 이온 주입 관련 시장은 영국, 덴마크, 프랑스, 독일 및 상업용 이온주입 서비스를 위해 2개의 산업 연구 센터를 설립한 스페인에 집중되어 있다. 스페인에는 1990년 (Whickham ion implanter)에 AIN(Cordovilla-Pamplona)을 설립한 것이 처음이다. 그 후 3년 뒤 Danfysik Model 1090 대전류 이온주입기가 INASMET(CNPlasma branch at Irun)에 세워졌다. 두 장비 모두 연구 개발, 기술 이전 및 산업적 응용에 이용되고있다.

영국은 이온주입기술의 연구 및 이용에 많은 참여를 하고 있다. 이 기술을 활용하여 자동차 부품, 베어링, 공구, 드릴, 노즐, 기어, 인젝션 포트 스크루 등 다양한 분야에 응용하고 있다. AEA Technology의 Harwell 연구소는 30여 년 동안 이 기술을 주도적으로 연구·개발·이용하고 있다. 이 연구소는 multipole source 등을 포함한 주입기술의 선두주자로 활동하고 있다. Harwell 연구소에는 가장 큰 이온주입설비 중 하나를 제작하여 이용하고 있다. 또 다른 영국의 연구 개발자는 Tech-Ni-Plant로 유럽에서 가장 큰 이온주입 서비스 센터를 운영하고 있다. 그들은 공구 및 금속과 비철재료로 만들어진 기계류 부품에 질소 이온을 주입하고 있으며, 지난 20년간 이 서비스를 행하고 있다.

중국

중국은 PIII 기술이 발달되었다. 중국은 PIII 공정에 포함된 기본적인 물리적 현상과 플라즈마 측정 기술을 연구 발견하였으며, 주입된 이온과 타겟 물질사이의 충돌에 의한 수치모사 모델을 개발하였을 뿐만 아니라, 모재 표면에서의 미소 구조 변화와 마모 부식 특성 관계를 규명하였다. 이들의 연구는 이온주입된 모재의 표면특성을 본질적으로 향상시킬 수 있는 시도로 보고되었다.

“all orientation ion implantation”이라 불리는 중국의 PIII 실험장비는 개조된 일반적인 이온 코팅 장치로 구성되어있다. 이런 실험 장비들은 Harbin Institute of Technology, Southwestern Institute of Physics, Dalian University of Technology, Sichuan University 및 China Textile University에 설치되어 있다. 실험 장비로 사용된 PIII의 부품은 중국에서 개발된 것으로 고전압 펄스 공급장치, 대용량 진공 챔버 및 진공펌프, 그리고 MEVVA 이온원이다. 중국은 MEVVA 이온원에 대하여 이온, 원자, 전자 빔 동시 주입이라는 3가지 진행 이온주입 공정 방식을 개발하였다.

중국은 자체적으로 PIII를 상용화하였을 뿐 아니라, 또 다른 공정을 혼합한 새로운 기술도 개발하였다. PIII-ion beam mixing, PIII-ion beam enhanced deposition, PIII-high pressure operation, DLC 박막의 생성 과 더불어 고온 PIII 이온주입 기술이 그것이다. 이들 기술은 우주항공 베어링 및 부품, 자동차 엔진 부품 및 공구와 금형 등에 사용되고 있다.

5. 맺음말

지금까지 이온주입기술의 종류, 장치의 개발 현황 및 여러 나라의 기술 현황을 간략히 알아 보았다.

이온주입기술은 초기 태동에 비하여 많은 변화를 가져왔으며, 현재 시행되고 있는 다른 코팅 공정에 비하여 그렇게 고 비용이 들어가지 않으면서도, 고부가가치의 상품을 창출할 수 있다는 데 주목할 만하다. 또한 금속 이온주입 기술의 발달로 질소 및 탄소 이온을 응용한 표면처리와는 다른 금속 표면 얇은 영역에서 원하는 합금을 만들 수 있어, 새로운 신물질 창조 등 재료 분야에 획기적인 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구소에서는 이 기술과 관련하여, PIII 방법을 이용 c-BN 박막의 밀착력 증진을 위한 공

정을 시행하고 있으며, 자체 기술로 개발되어진 FCVA 및 UBM과 같은 금속 플라즈마원을 이용하여, 빔 방식 및 플라즈마 방식의 금속이온주입 공정 개발을 시도하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] W.Shockely, US patent No. 787 (1957) 564.
- [2] P.H.Rose, Nucl. Instru & Meth., B6 (1985) 1.
- [3] N.E.W.Hartley, G.Dearnaley and J.F.Turner, Proc. Int. Conf. in Ion Implantation in Semiconductors and Other Materials, ed B.L.Crowder (Plenum, New York, 1973) 423.
- [4] N.E.W.Hartley, Wear 34 (1975) 427.
- [5] Yu P. Sharkeev, E.V. Kozlov, A.N. Didenko, S.N. Koluoaeva, N.A. Vihor, Surf. Coat. Technol., 83 (1996) 15.
- [6] A.J. Perry, R.R. Manory, R. Nowak, D. Rafaja, Vacuum 49 (1998) 89.
- [7] J.R.Conrad, J.L.Radtke, R.A.Dodd, F.J.Worzala and N.C.Tran, J. Appl. Phys. 62 (1987) 4591.
- [8] J.R.Conrad, US Patent 4,764,395 (1988).
- [9] I.G.Brown, The Physics and Technology of Ion Source, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [10] S.M.Malik et al., J. Vac. Sci. Technol., B12 (1994) 843.
- [11] J.R.Treglio, A.Elkind, R.J.Stinner, A.J.Preey, Surf. Coat. Technol. 96 (1997) 1.
- [12] M.D.Gabovich, Physic and Technology of Plasma Ion source [in Russian] (Moscow : Atomizdat, 1972).
- [13] E.M.Oks, Rev. Sci. Instrum. 69 (1998) 786.
- [14] E.Oks,G. Yushkov, P.Schanin, and A.Nikolaev, Rev. Sci. Instrum. 67 (1996) 1213.