

산화막 식각 기구 연구를 위한 QMF Ion Beam 장치의 제작

주 정 훈*

군산대학교 재료공학과

QMF Ion Beam System Development for Oxide Etching Mechanism Study

Junghoon Joo*

Kunsan National University, Department of Materials Science and Engineering,
 Kunsan 573-701, Korea

(Received 7 June 2004 ; accepted 14 August 2004)

Abstract

A new ion beam extraction system is designed using a simple ion mass filter and a micro mass balance and a QMS based detecting system. A quadrupole Mass Filter is used for selective ion beam formation from inductively coupled high density plasma sources with appropriate electrostatic lens and final analyzing QMS. Also a quartz crystal microbalance is set between a QMF and a QMS to measure the etching and polymerization rate of the mass selected ion beam. An inductively coupled plasma was used as a ion/radical source which had an electron temperature of 4-8 eV and electron density of 4×10^{11} #/cm³. A computer interfaced system through 12bit AD-DA board can control the pass ion mass of the qmf by setting RF/DC voltage ratio applied to the quadrupoles so that time modulation of pass ion's mass is possible. So the direct measurements of ion - surface chemistry can be possible in a resolution of 1Å/sec based on the qcm's sensitivity. A full set of driving software and hardware setting is successfully carried out to get fundamental plasma information of the ICP source and analysed Ar⁺ beam was detected at the 2nd QMS.

Keywords : QMS, Inductively coupled plasma, Ion beam, Etch

1. 서 론

플라즈마를 사용한 반도체의 식각 및 박막 합성 공정은 이제 소자를 만드는 데 필수적인 요소가 되었다. 그 중 고밀도 플라즈마를 가장 먼저 사용하기 시작한 산화막의 식각은 분자 가스를 사용함으로써 파생되는 분자 이온과 전자 충격으로 깨어진 이온들이 기판에 가해진 교류 바이어스를 따라서 움직이면서 여러가지 이온-표면 반응을 일으킨다. 그 중 가장 중요한 요소의 하나가 식각과 폴리머 생성 반응이다. 여러가지 이온과 중성 입자가 입사하는 플라즈마 분위기에서는 정확한 반응에 대한 정보를 구하기가 쉽지 않으므로 많은 연구자들이 이온빔을 만들어 단계적으로 반응에 대한 정보를

구해왔다¹⁻³⁾. H. H. Sawin 등은 두 개 이상의 이온빔을 만들어 조사하면서 각각의 영향을 모델과 함께 제시하였고, 그 이전에 Winters⁴⁾ 등도 XeF₂를 주가스로 하여 표면에 존재하는 F원자가 식각에 미치는 영향을 발표하였다. 그러나 고선택비 산화막 식각이 중요한 문제로 떠오른 현재의 반도체 공정에서는 C/F ratio가 큰, 즉 polymer를 많이 형성하는 가스를 주 식각 가스로 삼고 있다. 그러나 이런 가스를 사용하게 되면 측벽에 제거하기 어려운 폴리머가 많이 부착되고, 이것에 의한 차폐효과로 이온이 바닥까지 도달하지 못하여 식각이 중지되는 일도 발생하고, 식각 단면의 형상이 수직에서 많이 벗어난 향아리 구조를 갖는 경우도 있다. 현재 가장 많이 쓰이는 폴리머 형성 가스는 C₄F₈인데 여기서 분해될 수 있는 중성 및 이온들은 C, F, CF, CF₂, CF₃, C₂F₂ 등으로 매우 다양하다. 이들이 플라즈마내

*Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

에 존재하는 양은 Appearance Mass Spectroscopy를 사용하여 상당히 정량적으로 측정이 가능한 것으로 알려지고 있다⁵⁾. 그러나 플라즈마 공간에 존재하는 입자의 농도와 고체 표면에서 일어나는 반응에 참여하는 입자의 농도간에는 차이가 존재하는데, 특히 고밀도 플라즈마원을 이용하는 경우에 두드러진다. 이는 쉬스에 의하여 이온이 빠른 속도로 제거되는 이른바 ion pumping effect 때문이며 H. Y. Chang 등에 의해서 실험적으로 보고되고 있다⁶⁾. 선택적 식각 반응은 식각과 폴리머 생성 반응이 동시에 일어나는 분위기에서 어느 반응이 더 빠른 속도로 일어나는가 하는 것이 관건이 된다. 따라서 어느 입자가 폴리머 형성의 선인자(pre-cursor)인지를 제대로 밝히는 것이 아주 중요한 과제가 되며, 이 선인자가 히스테리시스 현상, 즉 어떤 입자의 층이 미리 존재하는 경우에만 폴리머 형성을 일으키는 것인지를 판단하려면 시간적으로 질량을 조절할 수 있는 이온빔을 이용해서 실험을 하여야 한다.

위와 같은 조건을 만족시키는 이온빔 장치는 자석식 질량 분석장치를 이용하는 방법과 이 보다 훨씬 간단한 사중극자 질량 분석 필터를 사용하는 방법이 있는데, 전자의 경우, 분해능은 높으나, 효과적으로 질량을 분석하기 위해서는 입사 이온의 에너지를 상당히 크게 해야만 하는 단점이 있다. 후자의 경우에는 질량 분해능은 0.1 amu 정도로 낮으나, 짧은 이온 비행 거리를 장점으로 하며 10^{-4} Torr의 압력까지 동작을 시킬 수 있으므로 실제로 사용하는 고밀도 플라즈마원으로부터 직접 작은 오리피스로 짧은 거리내에서 이온을 추출할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이 점에 착안하여 간단한 구조의 가변식 이온원을 만들고 이를 이용하여 플라즈마 - 고체 표면의 반응을 플라즈마 추출 이온 - 고체 표면의 반응으로 모델화 하여 이해하고자 장치를 구성하고 시험하였다. 향후에는 반응성 분자 가스인 C_4F_8 을 사용하여 SiO_2 가 피복되어 있는 QCM sensor에 질량 분리된 이온빔을 이용한 식각 및 폴리머 형성 속도와 히스테리시스 현상등을 연구할 계획이다.

2. 실험방법

그림 1에 나타낸 것이 본 연구에서 제작한 장치의 기능적 개념도이며, 이와 같은 기능을 갖는 플라즈마원 및 이온 추출, 반응, 분석을 가능하도록 실제 시스템을 MCAD를 이용하여 실제 설계, 검토 작업을 하였다. 이렇게 완성된 장치의 실물 사진을 그림 2에 실었다.

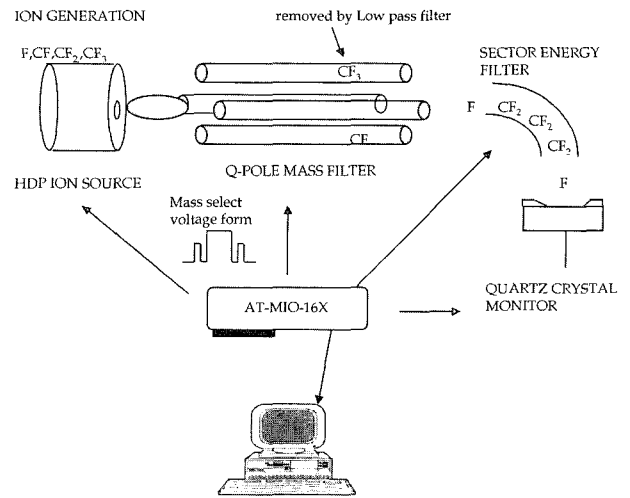


Fig. 1. A functional schematics of quadrupole mass filtered ion beam machine.

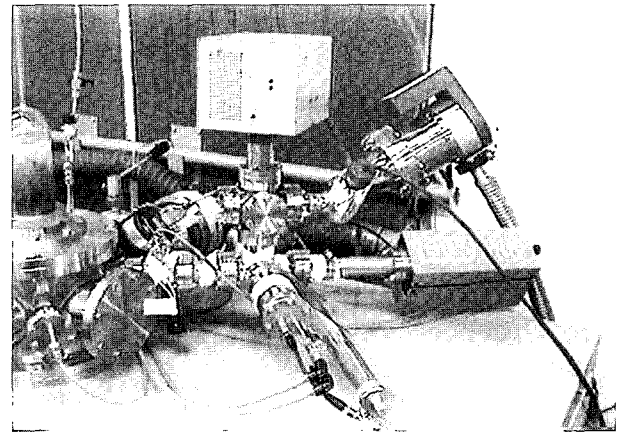


Fig. 2. Analyzing section installed on main plasma vacuum chamber with complex motion and electrical wiring.

고밀도 플라즈마원으로는 Inductively Coupled Plasma를 사용하였는데 석영관 외벽에 고주파 코일을 감은 형태와 직접 플라즈마 챔버내부에 RF Coil을 넣은 두 가지의 형태를 모두 시도하였다. QMF (quadrupole mass filter)에 인가하는 RF/DC 전압의 비가 통과 이온의 질량을 결정한다. 여기서 사용한 QMF는 ANELVA사의 AQA-100 QMS를 분해하여 이온원부와 Faraday cup detector부위를 제거하고 사용하였다. 이 장치의 controller에는 0-10 V에 해당하는 전압을 National Instrument사의 AT-MIO-E-10 board의 analog output 단자를 통해서 입력하면 1-100 amu에 해당하는 통과 이온의 질량에 맞도록 RF/DC 전압의 비가 맞추어 지도록 되어있다. 그러나 Q-pole과 cover housing 사이에는 capacitive coupling이 조절 회로의 출력 임피던스값에 맞도록 조절 되어있어서, 다른 형상의 진공챔버에 삽입할 때에는 세밀한 RF tuning이 필요하다. 이 Q-pole의

길이는 120 mm이며, 내부의 원형 공극은 지름이 6.5 mm이다. 현재까지 sector energy analyser는 설치하지 않고 일렬로 QCM과 QMS가 설치되어 있다. Sycon사의 STM-100F모델의 QCM은 MDC사의 100 mm선형 운동이 가능한 linear mount table에 실려있어서 QMF와 QMS사이에 직각으로 삽입하여 이온빔을 이용하여 식각 반응에 의한 질량 감소와 폴리머 형성에 의한 질량 증가를 모두 감지할 수 있도록 되어있다. 이 QCM의 노출 분석 면적은 직경 6 mm의 원형으로 되어있으며, 민감도는 0.1 Hz/sec의 주파수 변화를 감지할 수 있으며, IEEE-488로 PC와 interface되어 있다. 두 번째로 설치되어 있는 분석용 QMS는 Stanford사의 SRS-200EM 모델로서 Continuous Dynode Electron Multiplier를 장착한 모델이다. PC와는 28.8 kbps로 RS-232C를 사용하여 연결되어 있다. 이 시스템들은 모두 MS-Windows 상에서 National Instrument사의 LabWinodws/CVI 4.0.1을 사용하여 본 연구자가 제작한 software로 구동된다. 플라즈마 원은 외부에 헬리컬 코일을 이용한 ICP 시스템은 13.56 MHz의 RF를 Advanced Energy사의 RFX-600을 사용하여 최대 600 Watt까지 사용하였고, 내부에 설치한 RF coil에는 ANELVA사의 PRF-153B를 사용하여 1500Watt까지 사용하였다. 챔버 하단 부에 설치된 식각용 기판 홀더에는 영신엔지니어링의 YSE-300모델과 AE사의 ATX-600 tuner를 이용하여 기판 바이어스를 조절하였다. 시스템의 진공 배기계에는 주플라즈마 챔버는 Alcatel사의 5150CP(140 l/sec)를 사용하였고, 분석기들이 장착되어 있는 쪽에는 ATP-100(100 l/sec)을 사용하였다. 진공계이지는 주 방전 챔버는 Alcatel사의 MicroPascal Penning gauge와 MKS-127A Baratron gauge, 분석용 챔버는 Granville-Phillips의 GP-330 Ionization gauge를 사용하였다. 주 방전 챔버의 기본 진공도는 1×10^{-6} Torr이었고, 분석용 챔버의 기본 진공도는 4×10^{-7} Torr이었다.

3. 실험결과 및 고찰

주방전 챔버의 방전 특성을 조사하기 위하여 double sided-Single Langmuir probe를 사용한 전자 온도, 밀도의 측정을 RF power와 가스 압력에 따라서 측정하였다. 여기서 전자 밀도는 포집 전극의 쉬스의 표면적에 비례 하는데 음의 전압을 인가하면 이 표면적이 팽창하므로 Laframboise의 보정 이론을 도입하여 사용하였다⁷⁾. 측정결과, 전형적인 저압 플라즈마의 전류-전압 곡선을 나타내었고, 여기서 보정 계산을 거친 전자 온도를 그림 3에 보였

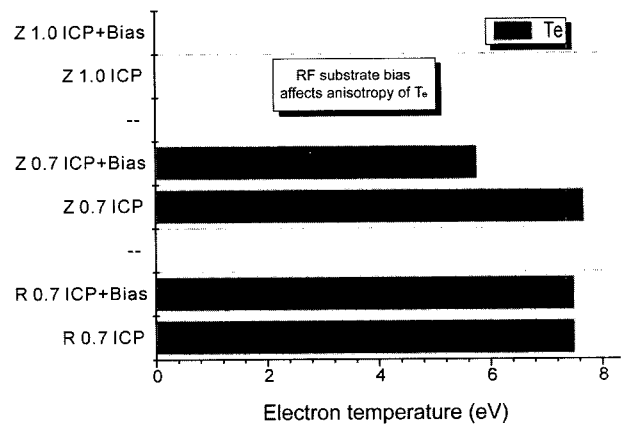


Fig. 3. Electron temperatures at different directions of Langmuir probe tip shows anisotropy of electron temperature when substrate bias is applied.

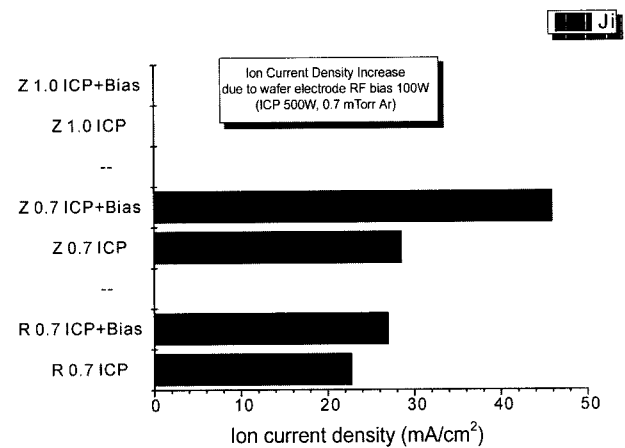


Fig. 4. Ion current density as a function of RF power. RF bias increases ion current density in two different directions of Langmuir probe tip.

는데, 기판 바이어스를 100 W 정도 인가하면 Z방향의 전자 온도가 1eV 정도 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기서 유도 가열에 의한 경우보다 용량성 결합으로 쉬스 충돌 가열을 하는 경우가 낮은 압력에서는 더 낮은 효율을 보임을 알 수 있다. 반면 이온 전류 밀도를 측정하여 보면(그림 4) ICP source power 500 W, RF bias 100 W에서 20 mA/cm²에서 40 mA/cm²를 나타내고 있다. 바이어스가 인가됨에 따라 축방향의 이온 전류 밀도가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이온을 효율적으로 추출하여 사용하려면 기판 지지대 부위에 추출공을 만들어 사용하던가 내부 직접 삽입형 ICP를 만들어서 사용하는 것이 높은 이온 밀도를 얻을 수 있는 방법임을 알 수 있다.

이온 추출에 적절한 압력을 결정하기 위하여 0.6 mTorr부터 20 mTorr까지 Ar 압력을 바꾸어 가면서 플라즈마 전위와 전자 밀도등을 측정하였다. 그림

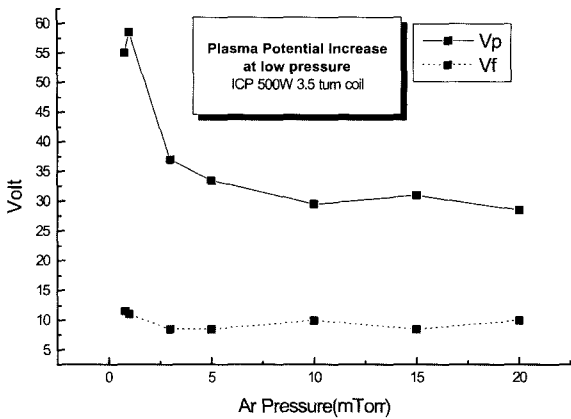


Fig. 5. Plasma potential as a function of pressure (ICP 500 W, 3.5 turn coil).

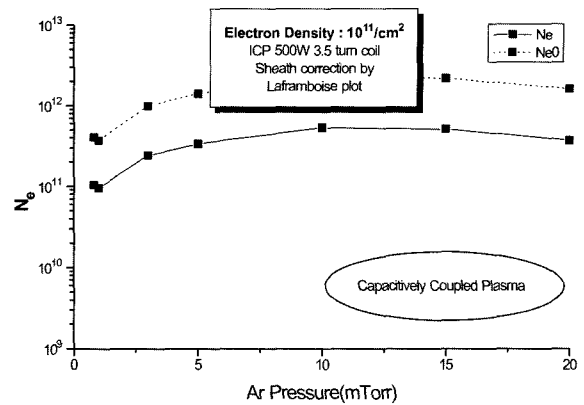


Fig. 7. Electron density change as neutral gas pressure increase from 0.6 mTorr to 20 mTorr of Ar.

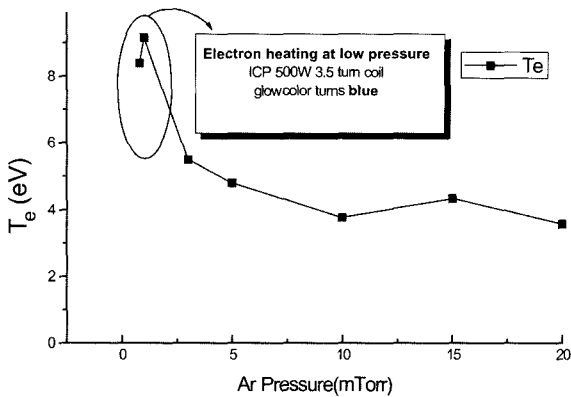


Fig. 6. Electron Temperature changes as neutral gas pressure increase from 0.6 mTorr to 20 mTorr of Ar.

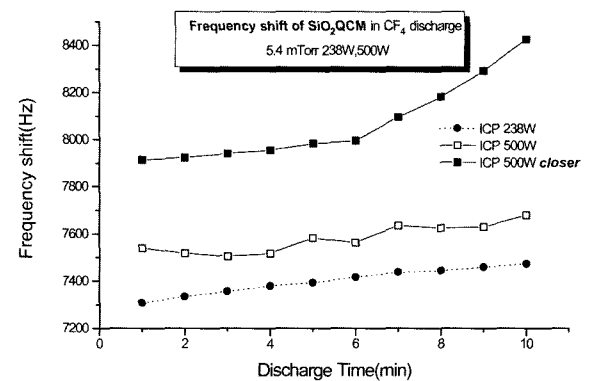


Fig. 8. Frequency shift of QCM in CF₄ discharge at 5.4 mTorr, 238 W, 500 W RF power and 500 W at closer position toward ICP region.

5에 보인 플라즈마 전위는 주방전 챔버에서 이온을 추출할 때의 기본 운동에너지를 결정하므로 너무 높지 않도록 할 필요가 있다. 실제로 사중극자 질량 필터에서 이온의 입사 에너지가 높으면 120 mm의 Q-pole을 지나가는 진동 횟수가 작아져서 질량의 분해능이 현저히 나빠지기 때문이다. 여기서 측정된 플라즈마 전위의 경우 최고치가 약 55 V, 최저가 30 V로 측정되었다. 여기서 계산된 전자의 온도는 가장 낮은 압력에서 약 8 eV 정도이고 5 mTorr에서 부터는 3-4 eV 수준을 유지하였다(그림 6). 그림 7에서 보이는 전자의 밀도는 $4 \times 10^{11} \text{ #/cm}^3$ 이 Ar 가스 압력 10 mTorr에서 최고치로 나타난다. 이 때, 점선과 실선은 Laframboise 수정식으로 정정한 경우의 차이를 보여 주고 있다. 즉 보정하지 않고 직접 읽은 이온 포화 전류 밀도에서 계산된 전자의 밀도는 최대 50%이상 과장되어 있음을 알 수 있다. 플라즈마 밀도가 10^{12} #/cm^3 라고 하면 직경 1 mm의 orifice로 추출할 수 있는 이온의 최대 밀도는 7.9×10^9 가 된다. 여기에 QMF의 투과 효율을 감안

하면 기관상에서 얻을 수 있는 최대 이온 플럭스는 대략 10^8 정도가 될 것임을 알 수 있다. 따라서 이 값에 의한 시료 표면의 변화(식각에 의한 질량 손실)를 민감하게 읽어내기 위해서는 nano gram이하의 분해능을 갖는 quartz crystal monitor를 사용할 필요가 있다.

이온빔에 의한 폴리머 형성과 식각 반응의 분석기로 사용할 Quartz Crystal Monitor의 성능을 시험하기 위하여 QCM head를 플라즈마 내부에 삽입 장치하고 주파수의 변화를 방전 전력과 유지 시간을 바꾸어 가면서 측정한 결과가 그림 8에 나타나 있다. QCM의 정밀도는 온도와 진동에 매우 민감하게 변화하는데, 냉각수를 이용하여 헤드 부분을 계속 냉각하고 있으나, 플라즈마로부터 유입되는 이온 및 전자의 충돌 가열은 순간적인 온도 상승을 유발함을 알 수 있다. 유도결합 플라즈마 영역에서 약 10 cm 떨어진 구역에서 측정한 아래의 두 곡선에서는 10분이 경과하여도 100 Hz 이내의 주파수 변화밖에는 없지만 유도 결합 플라즈마원에 가깝게 위치시킨 경우에는 600 Hz까지 주파수가 증가(즉,

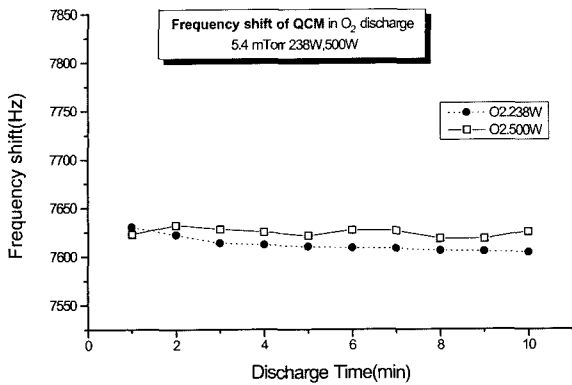


Fig. 9. Frequency shift of QCM in O₂ discharge in 5.4 mTorr, 238 W, 500 W to show flat.

온도가 증가)함을 알 수 있다. 또한 산소를 방전 가스로 사용하여 같은 조건에서 주파수의 변화를 측정하면 그림 9에 보인 것과 같은 평탄한 경향을 보인다. 따라서 실제로 식각이 발생한 경우의 식각 속도를 정확히 측정하려면 이와같은 온도 변화를 사전에 측정하여 기준값으로 차감하여 실제값을 계산하는 방법을 채택한다음 플라즈마 소멸 후 온도가 내려간 다음 주파수를 확인하여 실제 식각량을 재확인 하는 작업을 거친다.

이 장치들을 구동하는데 사용한 소프트웨어는 realtime OS를 사용하여야 하나 전문 CPU board, multi-bus backplane등의 추가 장치가 필요하므로 IBM-PC에서 다중 작업을 지원하는 Windows를 OS로 선택하고 실험용 코드 작성 전문툴인 32 bit version의 LabWindows/CVI로 작성되었으며, 각각 RS-232C, GPIB, 12bit AD-DA의 interface로 PC와 제어회로가 구성되어 있다. 여기서 사용한 프로그래밍 방식은 사건 중심형으로써 각각의 모듈을 통합하여 운용하는 것이 용이하도록 작성하였다. 그

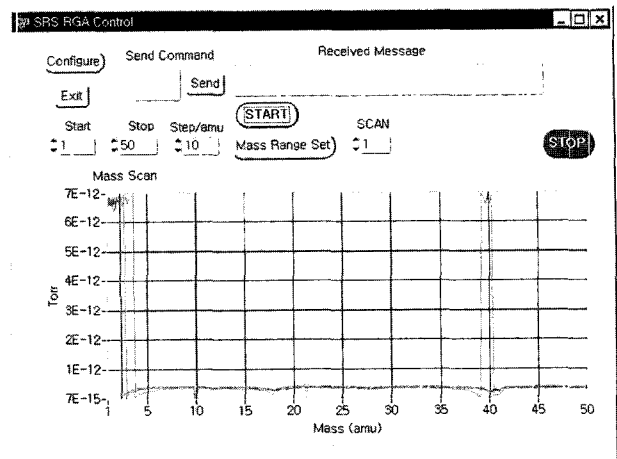


Fig. 11. QMF is set to 40 amu, so only Ar⁺ can pass through the QMF and was detected by the analyzing QMS at 40 amu.

림 10에 QMF에서 질량 필터 기능을 하지 않고 모든 이온을 통과시킨 경우의 분석용 QMS에서 얻은 질량 스펙트럼을 나타내었다. 이 때 QMF에 질량 수 40에 해당하는 전압을 AD-DA board를 통해서 인가하면 그림 11에 보인 것과 같은 성공적인 이온 질량 스펙트럼을 얻을 수 있다. 즉, 플라즈마를 이온원으로 하여 추출한 이온빔에 대해서 QMF가 질량 필터로서의 역할을 제대로 하고 있는 것을 보여주는 데이터다. 여기에 1, 2 amu에 나타난 피크는 QMF의 특성상 나타나는 zero blast(고스트 피크)이다. 추후에 이온 추출부위의 이온 광학계를 개선하고 분석기 부위의 기저 진공도를 UHV 수준(10⁻⁹ Torr)으로 유지할 수 있도록 한다면 백그라운드 불순물에 의한 영향을 줄인 상태에서 식각에 영향을 주는 이온빔의 역할을 구분해낼 수 있게 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

고밀도 플라즈마원을 사용하여 이온을 추출하고 사중극자 질량 필터로 원하는 통과 이온을 시간적으로 PC를 사용하여 제어할 수 있고, 이 질량 제어 이온빔을 QCM의 표면에 충돌시켜서 가스에 의한 식각과 폴리머 형성 속도를 직접 측정할 수 있는 시스템을 설계하고 제작하였다. 전체 시스템을 구동할 수 있는 소프트웨어는 PC와 RS-232C, GPIB, 12bit AD-DA의 interface를 갖고 있으며 다중 작업이 가능하도록 사건 중심형 프로그램으로 이루어져 있다. 이 장치의 기본적인 성능, 즉 플라즈마원의 동작과 질량 분석부의 성능을 평가한 결과 Ar을 방전 가스로 사용하였을 때, 전자 온도 4-

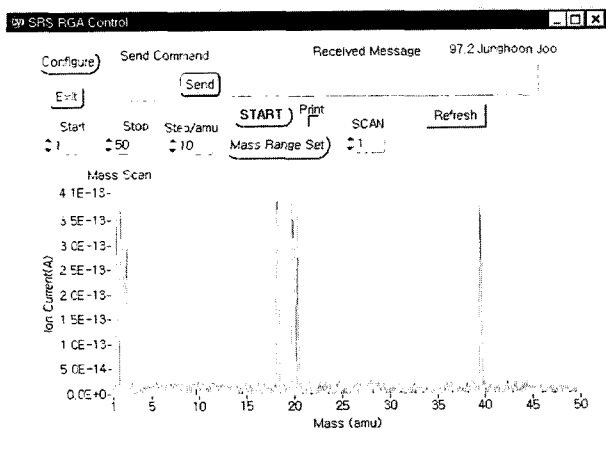


Fig. 10. Whole mass spectra obtained from Ar discharge without mass filtering action in QMF.

8 eV, 전자 밀도 $4 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 가 얻어졌으며, 질량 분석부의 기능은 Ar을 이용하였을 때 효과적으로 QMF의 기능을 하고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. J. W. Coburn, H. F. Winters, J. Appl. Phys., 50 (1979) 3189-3196.
2. H. F. Winters, J. W. Coburn, Surface Science Reports, 14 (1992) 164-269.
3. H. F. Winters, J. W. Coburn, J. Vac. Sci. Tech., B9 (1991) 197-207.
4. David C. Gray, Vivek Mohindra, H. H. Sawin, J. Vac. Sci. Tech., A12(2) 354.
5. H. Sugai, K. Nakamura, Y. Hikosaka, M. Nakamura, 41st American Vacuum Society National Symposium Proceedings, (1994) 226.
6. H. Y. Chang, 97 Plasma Forum Program by Korean Vacuum Society, Jeju National University (1997).
7. Laframboise, University of Toronto, Institute for Aerospace Studies Report, No.100 (1966).
8. 김명수, 질량분석학, 대우학술총서*자연과학45, 민음사, (1987) 38-42.