

차세대 리소그래피 빛샘 발생을 위한 플라즈마 집속 장치의 제작과 아르곤 아크 플라즈마의 발생에 따른 회로 분석 및 전기 광학적 특성 연구

이수범¹ · 문민욱¹ · 오필용¹ · 송기백¹ · 임정은¹ · 홍영준¹ · 이원주² · 최은하^{1*}

¹광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

²삼성 SDI, 용인 449-902

(2006년 1월 2일 받음)

본 연구에서는 극자외선(Extreme Ultra Violet) 리소그래피의 빛샘원 발생을 위한 플라즈마 집속장치 (Plasma Focus Device)를 설계, 제작하였으며, 이를 이용하여 단펄스 집속 플라즈마의 전류, 전압 방전 특성 및 장비의 저항, 인덕턴스의 중요 기초 연구를 수행하였다. 전압, 전류는 C-dot probe와 B-dot probe를 이용하여 측정하였다. Anode 전극에 1.5, 2, 2.5, 3 kV의 전압을 인가하고 Diode chamber 내의 Ar 기체압력을 1 mTorr ~100 Torr 로 변화시켰을 때 발생하는 전압, 전류는 300 mTorr 에서 가장 큰 값을 보였으며, 이때 측정된 LC 공진에 의한 전류 파형으로부터 계산된 시스템 내의 인덕턴스와 임피던스값은 각각 73 nH, 35 mΩ 였다. 300 mTorr, 2.5 kV 일 때 Emission spectroscopy를 이용하여 계산한 단펄스 집속 Ar 플라즈마내의 전자온도는 Local Thermodynamic Equilibrium(LTE) 가정으로부터 $T=13600$ K 이었고 이온밀도 및 이온화율은 각각 $N_i = 8.25 \times 10^{15}/cc$, $\delta = 77.8\%$ 이었다.

주제어 : 극자외선, 리소그래피, 플라즈마집속

I. 서 론

현재 실용화된 반도체 리소그래피(lithography)의 최고 정밀도 선폭은 90 nm 이며 빛샘원으로 ArF(파장 193 nm)가 사용되고 더불어 기존의 빛샘으로 액침기술을 이용하여 45 nm 이하의 회로 공정이 가능한 기술이 진행 중이다[1]. 이에 대해 차세대 가공기술인 극자외선(Extreme Ultra Violet)을 이용해 20 nm 급의 정밀도를 구현하기 위한 연구가 이미 국외에서 널리 연구 중이며 각광받고 있다[2]. 이 같은 EUV 리소그래피는 10 ~ 14 nm 극자외선 파장대를 이용하며 X-Ray 리소그래피, Ion-beam projection 리소그래피와 함께 "Next-Generation Lithographies" (NGL's)로 잘 알려져 있다[3].

본 연구에서는 극자외선 리소그래피의 빛샘을 만들기 위한 플라즈마 집속 장치를 설계 및 제작하고 플라즈마를 발생시켜 특성을 진단하였다. 최적의 플라즈마 발생 조건에 따른 플라즈마를 진단하기 위하여 C-dot 과 B-dot probe를 통해 플라즈마 집속 장치의

전압과 전류 특성을 진단함으로써 이 시스템의 인덕턴스와 저항을 계산하고 플라즈마 발생에 최적인 압력조건을 확인하였다. 또한 Emission spectroscopy를 이용하여 플라즈마 스펙트럼 파장을 분석해 전자온도를 구했으며, 이온밀도 및 이온화율을 계산하였다.

II. 실험장비 및 작동원리

플라즈마 집속 장치의 구성은 크게 DC Power supply 부, Capacitor bank 부 Spark gap switch 부, Diode chamber 부의 4개의 부분으로 구성이 되어있다. DC Power supply는 플라즈마 집속 장치 시스템의 전력을 공급하는 역할을 하며, 아울러 Spark gap switch 부의 Trigger pin에 15 kV의 단 펄스를 공급할 수 있도록 설계되어있다. DC Power supply는 최대 12 kV, 3.6 kW의 출력을 낼 수 있으며 이 실험에서는 1.5, 2, 2.5, 3 kV로 DC 전압을 변화시켜가며 실험을 하였다. Capacitor bank는 낮은 인덕턴스를 위해 커다란 디스크 형태로 제작했으며, 8

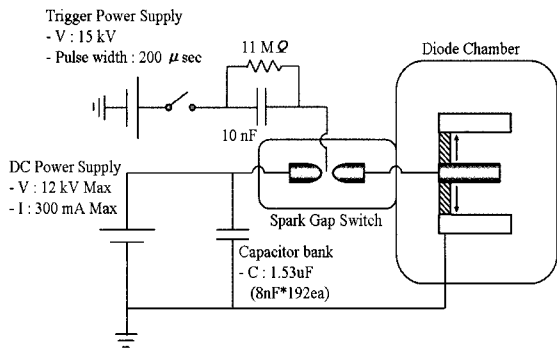


그림 1. 플라즈마 집속 장치의 구동회로

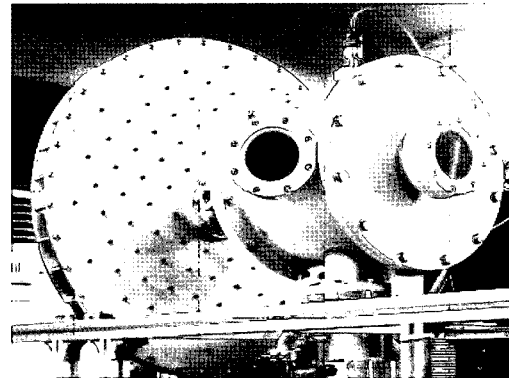


그림 2. 플라즈마 집속 장치

nF, 10 kV의 Capacitor 192개를 병렬 연결하여 1.53 μ F의 대용량 Capacitor를 구성하였다. Spark gap switch는 Coaxial type의 두 개의 전극 구조를 하고 있으며, Spark gap switch chamber에서 동전극의 간격을 4 mm로 setting했다. 또한 구동 방식에 있어 스위치 off시는 Self-discharge가 일어나지 않도록 1 ~ 1.2 bar의 질소 기체를 주입하고, 스위치 on시는 동전극 사이의 트리거 핀에 15kV의 단 펄스 전위를 인가하여 강제 트리거 시킴으로써 Capacitor bank에 축적된 에너지를 Diode chamber로 전달할 수 있게 하였다. Diode chamber 역시 Coaxial type의 이극관 구조를 하고 있으며 이극관 사이는 Ar 기체 압력을 1 mTorr ~ 100 Torr로 변화시켜가며 실험을 하였다.

코액셜 리튬 플라즈마 집속의 원리는 그림 3에서 보여준다. Switch on 시 강제 트리거에 의하여 Capacitor bank로부터 전달되는 고전압 단 펄스에너지는 Diode chamber의 Anode 전극을 따라 흐르게 되며 Anode 전극과 Cathode 전극 사이에서 Ar Gas 방전을 만들게 되는데, 이 과정에서 생성되는 플

라즈마 전류 J와 자기장 B에 의해 만들어지는 $J \times B$ 힘은 플라즈마를 가속시켜 밀어 올리며, 이때 Anode 전극 끝부분의 플라즈마는 집속되어 고온, 고밀도의 상태가 된다. 이 플라즈마를 이용하여 Anode 전극에 코팅되어 있는 리튬을 이온화시켜 발생된 플라즈마로부터 13.5 nm의 파장을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 Emission spectroscopy를 이용해 플라즈마 집속 장치에 의하여 발생하는 Ar 플라즈마의 파장을 분석하여 전자온도 및 이온밀도를 계산했으며, Capacitor bank에 축적되는 전압을 1.5, 2, 2.5, 3 kV로 변화시키고 Diode chamber 내의 Ar gas 압력을 1 mTorr부터 100 Torr로 변화시켜가며 전류 및 전압 특성을 보았다. 전압과 전류는 C-dot probe 및 B-dot probe를 이용하여 측정하였다. 또한 측정된 전류 신호를 통해 이 시스템의 저항 및 인덕턴스 값을 계산하였다.

III. 실험 결과

그림 4는 Capacitor bank의 축적된 전압이 2 kV

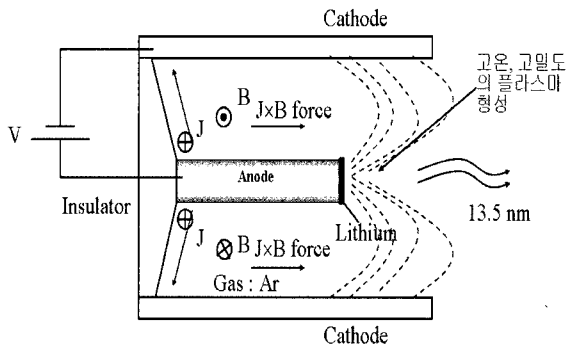


그림 3. 코액셜 리튬 플라즈마 집속의 원리

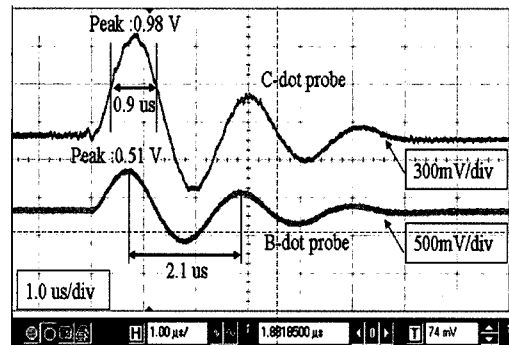


그림 4. 플라즈마 발생 시 전압, 전류

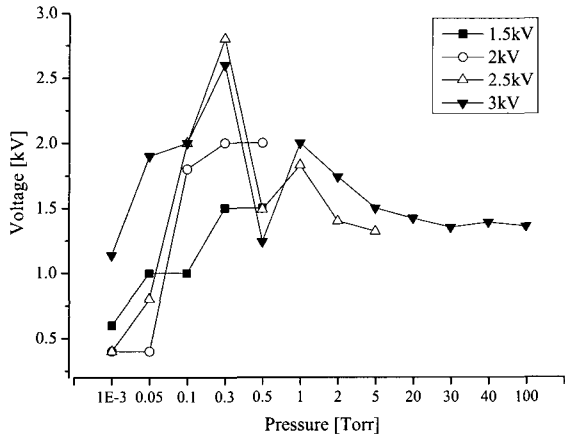


그림 5. 기체압력변화에 따른 전압특성

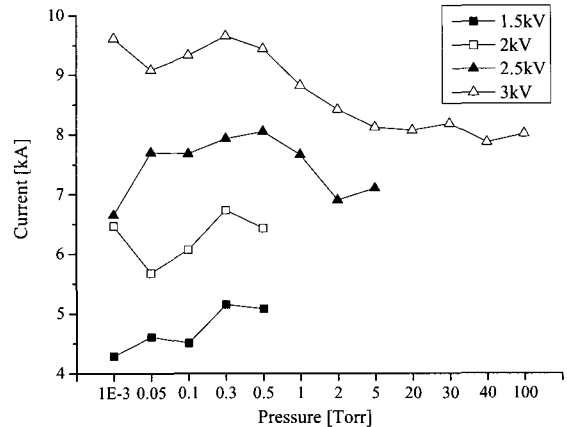


그림 6. 기체압력변화에 따른 전류 특성

이고 Diode chamber의 Ar 기체압력이 300 mTorr 일 때 C-dot probe 와 B-dot probe를 이용하여 측정 한 전압, 전류 신호이다. 이 시스템으로부터 만들어지는 단펄스의 펄스폭은 약 0.9 μ s 이며 전압의 peak 값은 C-dot probe의 calibration 인자 2 kV/volt에 의해 약 2 kV 로 인가한 전압과 동일하였다. Rising time은 약 0.4 μ s 이다. 또한 전류의 peak 값은 B-dot probe의 calibration 인자 13.2 kA/volt에 의해 약 6.7 kA 이었으며 전류신호로부터 공진주기($\tau = 2.1 \mu$ s)와 시스템 전체의 Capacitance, 1.53 μ F 으로부터 $\tau = 2\pi\sqrt{LC}$ 관계식에 의해 플라즈마 포커스 장 치의 Inductance 값 $L=73$ nH 를 구할 수 있었다. 그리고 전류 신호의 첫 번째와 두 번째 Peak 값 사이의 감쇄율을 이용해서 이 시스템의 저항을 산출 할 수 있다. RL회로에서의 전류 $i(t)$ 는 수식 (1)의 관계식을 갖고 있으며,

$$i(t) \propto e^{-\frac{R}{2L}t} e^{\pm j\omega t}, \quad \frac{i(t_1)}{i(t_2)} = e^{-\frac{R}{2L}(t_1-t_2)} \quad (1)$$

첫 번째 Peak의 전류 값 $i(t_1)=6700$ A 와 두 번째 Peak의 전류 값 $i(t_2)=3839$ A 그리고 공진주기 $\tau = t_1 - t_2 = 2.1 \times 10^{-6}$ sec 를 대입하였을 때 플라즈마 집속 장치의 저항 값 R 은 37 m Ω 이었다.

그림 5는 Diode chamber 내의 Ar 기체압력을 1 mTorr 부터 100 Torr 까지 변화시켜가며 C-dot probe를 이용하여 측정 한 전압신호의 첫 번째 Peak 값을 환산하여 그린 그래프이다. 측정 한 전압의 Peak 값은 1.5, 2, 2.5, 3 kV 를 인가했을 경우 300

mTorr에서 각각 1.5, 2, 2.8, 2.6 kV 이었다. 그리고 1.5, 2 kV 인가 시 1 Torr 이상에서는 방전이 일어나지 않았으며 2.5 kV와 3 kV 인가 시는 각각 20 Torr, 100 Torr 이상에서 방전이 발생되지 않았다.

그림 6은 Diode chamber 내의 Ar 기체압력을 1 mTorr 부터 100 Torr 까지 변화시켜가며 B-dot probe를 이용하여 측정 한 전류신호의 첫 번째 Peak 값으로 그린 그래프이다. 측정 한 전류의 Peak값은 1.5, 2, 3 kV 를 인가했을 경우 300 mTorr 에서 각각 5.1, 6.7, 9.7 kA 이었으며, 2.5 kV를 인가했을 때는 500 mTorr 에서 8 kA 이었다.

전압과 전류 신호를 종합적으로 보았을 때, 신호의 최대 출력을 볼 수 있었던 압력은 300 mTorr 근방이 었으며 이는 시스템 회로에서 Ar기체 압력에 따른 Impedance matching이 가장 잘 된 상태라고 볼 수 있다.

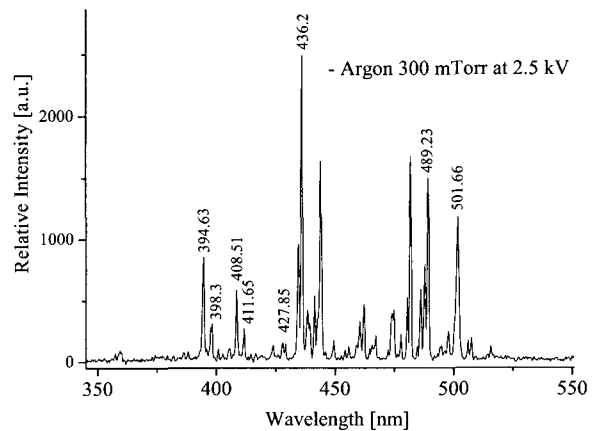


그림 7. Spectroscopy를 이용한 Ar 플라즈마과장 측정

인가전압 2.5 kV에 Ar 300 mTorr에서 측정한 Ar 분광 스펙트럼이 그림 7에 나타나있다. 이 조건에서 capacitor bank에 저장된 입력에너지는 4.8 J이다. 분광선 데이터로부터 플라즈마의 온도를 구하기 위해서는 평형상태에 대한 가정이 필요하다. 본 실험에서는 300 mTorr에서 발생하는 플라즈마는 Arc 플라즈마의 가까운 상태임을 방전사진(그림 9)을 통하여 알 수 있다. 따라서 국부적 열평형상태(LTE)라는 가정하에 그래프를 이용한 Boltzman plot 방법으로 온도를 다음 식(2)[4]의 관계를 통해서 구할 수 있다.

$$\ln\left[\frac{I}{\nu A_{ik} g_u}\right] = -\frac{E_u}{kT} + \ln\left[\frac{hn}{4\pi Z}\right] \quad (2)$$

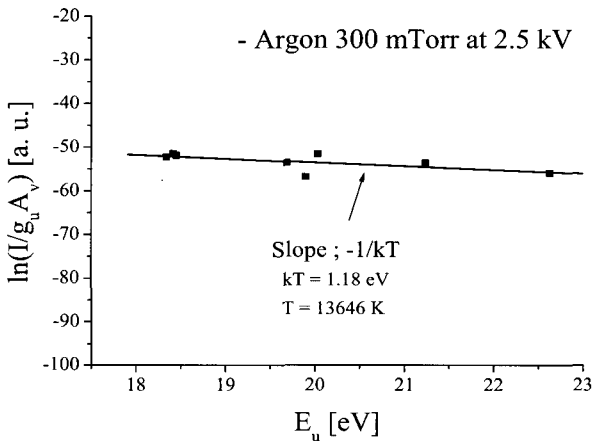


그림 8. Boltzman plot을 이용한 Ar 플라즈마의 전자 온도

여기에서, E_u 는 여기상태의 에너지, n 은 입자밀도, Z 는 온도 T 에서 계산된 partition function, g_u 는 여기상태에서의 축퇴도 (de generacy), A_{ik} 는 단

위 시간당 천이확률 (Transition Probability), k 는 볼츠만 상수이며 본 실험에서 측정된 Ar II 분광선에 따른 값들을 표 1에 나타내었다[5]. 좌변을 들뜬 에너지 E_u 의 함수로 그리면 그림 8과 같은 직선이 되며 이 직선의 기울기가 $-1/kT$ 가 되므로 온도를 결정할 수 있다. 본 실험에서는 $kT=1.18$ eV의 값을 얻었으며, 여기온도(excitation temperature)는 약 13646 K이었다. 본 실험에서 가정했듯이 발생한 플라즈마의 열적 평형상태에 의해 여기온도는 전자온도와 같으며 이를 알고 있다면 이온화 정도를 알 수 있다[6][7]. 플라즈마가 Ar 원자, 전자 그리고 이온으로 구성되어있다고 가정하고 Saha 방정식을 이용하면 수식 (3)[8] 과 같이 표기되며,

$$\frac{N_i^2}{N} = 2.4 \times 10^{15} \times T^{3/2} [^{\circ}K] \times e^{-\frac{15.69[eV]}{kT[eV]}} \quad (3)$$

with $N_i=N_e$.

전자온도 $T=13646$ K, 중성 Ar 기체의 밀도 $N(\text{Argon atoms density})=1.06 \times 10^{16}/cc$ 를 대입하였을 때 이온밀도 $N_i=8.25 \times 10^{15}/cc$ 이었으며, 이온화율은 $\delta = 77.8\%$ 이었다. 이 경우 발생한 arc 플라즈마는 순수한 Ar에 의해 발생한 것이다. Ar 기체에 의한 국소 열역학 평형상태(Local Thermodynamic Equilibrium)를 만족시키는 임계 전자 밀도 N_e^* 는 수식(4)[7] 와 같이 표기된다.

$$N_e^* \geq 7 \times 10^{18} Z^7 n^{-17/2} \left(\frac{kT[eV]}{E_{\infty}^z}\right)^{1/2} cc \quad (4)$$

표 1. 측정된 Ar II 분광선에 따른 정규화된 빛의 세기(I), 축퇴도(g_u), 천이확률(A_{ik}), 여기에너지(E_u)

$\lambda(\text{nm})$	Intensity (Normalized)	frequency(Hz)	g_u	A_{ik}	$E_u(\text{eV})$	$\ln\left[\frac{I}{\nu A_{ik} g_u}\right]$
394.63	0.343191917	7.60206E+14	6	1.4	22.6289642	-55.883
398.3	0.124898441	7.53201E+14	6	0.05	21.2347063	-53.5523
408.51	0.236173842	7.34376E+14	6	0.027	18.3386286	-52.2738
411.65	0.109137492	7.28774E+14	4	0.0082	18.4152273	-51.4409
427.85	0.063307922	7.0118E+14	4	1	19.896482	-56.7505
436.2	1	6.87758E+14	6	0.057	20.032696	-51.5122
489.23	0.603614425	6.13209E+14	2	0.159	18.4513893	-51.8295
501.66	0.474165992	5.98015E+14	6	0.231	19.6870198	-53.5179

Z와 n은 각각 Ar 플라즈마의 charge state 와 quantum level이며 E_z^Z 는 중성 Ar 원자의 이온화 에너지 15.69 eV 이다. 이 실험에 의해 측정된 전자온도 $kT=1.1$ eV를 대입하면 임계전자밀도 N_e^* 는,

$$N_e^* \geq 4 \times 10^{12} \text{ cc} \quad (5)$$

이 되며, 한편 이 실험에서 구한 Ar 전자밀도 $N_e = 8.25 \times 10^{15} / \text{cc}$ 는 임계전자밀도 N_e^* 보다 충분히 크므로 이 실험에서 가정한 국소 열역학 평형상태는 타당함을 보여준다.

그림 9는 인가전압을 2.5 kV로 하고 Diode chamber 내의 Ar 기체 압력을 변화시켜가며 촬영한 가시광 이미지이다. anode 전극 끝부분의 축으로부터 45°, 40 cm 떨어진 지점에서 촬영하였으며, 주변광의 효과를 막기 위하여 암실을 형성하여 측광을 모두 차단하였다. 1, 50, 100, 300 mTorr 의 경우 낮은 압력은 Arc 방전이 Diode 극 밖으로도 넓게 퍼져있는 모습을 확인할 수 있으며, 500, 700 mTorr 및 1, 2 Torr 의 상대적으로 높은 압력 상태에서의 방전 모습은 Diode 전극 사이에서 플라즈마가 발생되는 모습을 확인할 수 있었다. 이는 압력이 높아질수록 기체

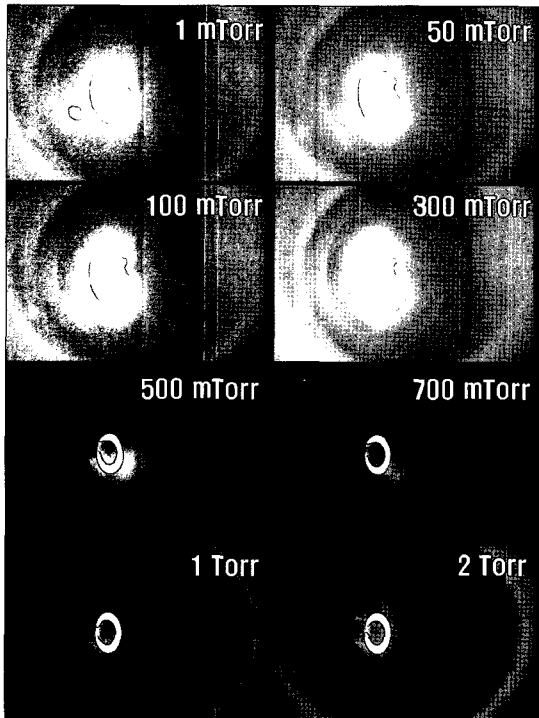


그림 9. Ar기체압력변화에 따른 이극관 사이에서의 플라즈마

의 평균자유행정(Mean free path)이 짧아짐에 따라 주 방전 경로가 Diode 전극 밖에서 형성되지 못하고 전극 사이에서 대부분 일어나기 때문이다. 본 실험의 경우 300 ~ 500 mTorr 사이에서 방전되는 모습이 급격히 변함을 관찰할 수 있었으며, 이를 통하여 플라즈마가 Anode 전극 끝부분에 집중될 수 있는 가스 압력의 임계점이 300 ~ 500 mTorr 사이에 존재함을 알 수 있다. 그림 9에서, 1 mTorr ~ 300 mTorr 사진의 Ar 플라즈마에 의해 방출되는 가시광의 이미지를 통해 anode 전극 끝에 집중되는 플라즈마는 LTE 상태를 만족하는 열평형상태임을 확인할 수 있으며, 압력이 높아질수록 anode 전극 끝에 형성되는 플라즈마의 집중은 약해지고 이는 Ar arc plasma 에서 Glow plasma 상태로 바뀔 수 있다. 본 실험에서 제시하는 300 mTorr 압력이 플라즈마 집중의 최적상태라고 볼 수 있다.

IV. 결 론

이 실험에서는 EUV lithography 의 빛샘을 만들기 위한 플라즈마 집중 장치를 설계, 제작하고 플라즈마를 발생 및 진단하였으며 인가전압과 Diode chamber 의 기체압력을 변화시켜가면서 플라즈마가 발생하는데 최적 상태를 확인하였다. 이 실험을 통해서 측정한 전압과 전류신호는 인가된 4가지 경우 전압 모두 300 mTorr 근방에서 가장 높은 값을 가졌으며 Emission Spectroscopy를 이용하여 인가전압이 2.5 kV, 기체압력이 300 mTorr 일 때 발생된 Ar 플라즈마의 전자온도 T는 국부적 열평형상태를 가정하고 Boltzman plot 그래프 방법을 적용하여 13000 K, 이온밀도는 $N_i = 8.25 \times 10^{15} / \text{cc}$ 이었고 이온화율은 약 $\delta = 77.8 \%$ 이었다.

V. 감사의 글

본 결과물은 핵융합연구센터의 출연금으로 수행한 한빛 플라즈마 이용자 육성 사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 디지털타임스 2005-08-22, 전자신문 2005-07-20.
- [2] Igor Fomenkov, William Partlo, and Daniel Birx, in *Proceeding Sematech International*

- Workshop on Extreme Ultraviolet Lithography* (1999).
- [3] E. Tejnil et al., *J. Vac. Sci. Technol.* **B15**, 2455 (1997).
- [4] Daniel L. Flamm, *Plasma Diagnostics* (ACADEMIC PRESS 1989), Vol. 1, pp. 379~380.
- [5] W. L. Wiese, M. W. Smith, and B. M. Miles, *Atomic Transition Probabilities* (National Technical Information Service, 1969), Vol. 2, pp. 187~224.
- [6] Richard H. Huddleston and Stanley L. Leonard, *Plasma Diagnostic Techniques* (ACADEMIC PRESS, 1965), pp. 319~322.
- [7] E. H. Choi, Y. S. Yoo, S. W. Park, S. Cho, S. K. Kim, J. W. Hahn, K. H. Kim, and Chunghi Rhee, *JKPS* **24**, 77 (1991).
- [8] Francis F. Chen, *Introduction to Plasma Physics* (PLENUM PRESS, 1977), pp. 1~3.

Fabrication of the Plasma Focus Device for Advanced Lithography Light Source and Its Electro Optical Characteristics in Argon Arc Plasma.

S. B. Lee¹, M. W. Moon¹, P. Y. Oh¹, K. B. Song¹, J. E. Lim¹, Y. J. Hong¹,
W. J. Yi², and E. H. Choi^{1*}

¹*Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701*

²*Samsung SDI Central Research, Yongin 449-902*

(Received January 20, 2006)

In this study, we had designed and fabricated the plasma focus device which can generate the light source for EUV(Extreme Ultra Violet) lithography. And we also have investigated the basic electrical characteristics of currents, voltages, resistance and inductance of this system. Voltage and current signals were measured by C-dot and B-dot probe, respectively. We applied various voltages of 1.5, 2, 2.5 and 3 kV to the anode electrode and observed voltages and current signals in accordance with various Ar pressures of 1 mTorr to 100 Torr in diode chamber. It is observed that the peak values of voltage and current signals were measured at 300 mTorr, where the inductance and impedance were also estimated to be 73 nH and 35 m Ω respectively. The electron temperature has been shown to be 13000 K at the diode voltage of 2.5 kV and this gas pressure of 300 mTorr. It is also found that the ion density N_i and ionization rate δ have been shown to be $N_i = 8.25 \times 10^{15}/cc$ and $\delta = 77.8\%$, respectively by optical emission spectroscopy from assumption of local thermodynamic equilibrium(LTE) plasma.

Keywords : EUV, lithography, Plasma focus

* [E-mail] ehchoi@daisy.kw.ac.kr