

차세대 리소그래피 빛샘 발생을 위한 플라즈마 집속장치의 아르곤 아크 플라즈마의 방출 스펙트럼 진단

홍영준¹·문민욱¹·이수범¹·오필용¹·송기백¹·홍병희¹·서윤호¹·이원주²·신희명¹·최은하^{1*}

¹광운대학교 전자물리학과 / PDP 연구센터, 서울 139-701

²삼성 SDI, 용인 446-577

(2006년 10월 27일 받음)

차세대 리소그래피 기술인 극자외선(EUV : Extreme UltraViolet) 빛샘 연구의 기초단계로써, 동축타입의 전극구조가 설치된 다이오드 챔버를 통해 Ar 플라즈마를 생성하였으며, 방출 분광기술(emission spectroscopy)을 이용하여 방출된 가시광선 영역의 빛을 조사하였다. 장치의 입력 전압을 0.5 kV씩 변화를 주어 2 ~ 3.5 kV까지 인가를 했으며 이극챔버의 최적 압력인 330 mTorr 일 때 각 전압에 따른 방출 분광선 데이터를 얻었다. 이때 Ar I과 Ar II 방출선을 관측하였으며 국소적인 열적평형(LTE : Local Thermodynamic Equilibrium) 상태의 가정 하에 볼츠만 도표(Boltzmann plot)와 사하(Saha) 방정식을 이용해 Ar I 및 Ar II의 전자온도와 이온밀도를 각각 계산하였다. 각 입력전압에 대해 이온밀도는 Ar I과 Ar II에서 각각 $\sim 10^{15}/\text{cc}$ 및 $\sim 10^{13}/\text{cc}$ 의 값으로 계산되었다.

주제어 : 극자외선, 리소그래피, 플라즈마 집속, 방출 스펙트럼, 볼츠만 도표

I. 서 론

현재 개발된 반도체 리소그래피 기술은 빛샘의 파장대가 193 nm로 선폭 100 nm의 공정이 가능하다.[1] 여기에 액침(Liquid Immersion) 리소그래피 기술이 개발되어 웨이퍼를 물에 담근 채로 가공하여 45 nm의 정밀도를 구현할 수 있다.[2] 하지만 이런 액침기술은 노광 효율을 극대화 시키기 위해 시스템 내에서 물을 어떻게 조절하느냐가 관건이 된다. 기존의 개발된 기술로는 40 nm이하의 공정은 힘든 것이 현실이다. 좀더 새로운 개념의 리소그래피 공정기술이 나오지 않는다면 반도체 회로를 집적하는데 한계에 다다를 것으로 전문가들은 예상하고 있다.[3] 최근 들어 극자외선을 이용한 EUVL (Extreme UltraViolet Lithography) 기술이 각광을 받고 있다. 이 기술은 22 nm급의 정밀도를 구현할 수 있을 것으로 전망하고 있다.[4] 현재 미국, 일본, 유럽이 주축이 되어 극자외선 리소그래피 연구가 활발하게 진행되고 있는데 극자외선을 발진시키기 위해서는 대표적으로 3가지 방법을 채택하고 있다. 고출력의 펄스 레이저를 플라즈마에 입사시켜 극자외선을 발진시키는 레이저 생성 플라즈마(Laser produced plasma) 기술, 방사광 가속기를 이용하여 휘어진 전자에 의해 발생하는 극자외

선을 얻는 방법인 방사광(Synchrotron radiation) 기술, 기체 플라즈마의 방전을 이용하는 방전 플라즈마(Discharge plasma) 기술로 요약할 수 있다. 이 중 방전 플라즈마 기술은 구조가 간단하며 입력에너지에 대한 변환 효율이 10%에 달하기 때문에 효율적이다.[5]

본 연구실에서는 이 방전 플라즈마 기술을 채택하고 있으며 그림 1과 같은 장치를 통해 고밀도 플라즈마 집속단계로 가기 위한 기초 진단기술을 연구하고 있다. 플라즈마 방전 현상을 관찰할 수 있는 다이오드 챔버 안의

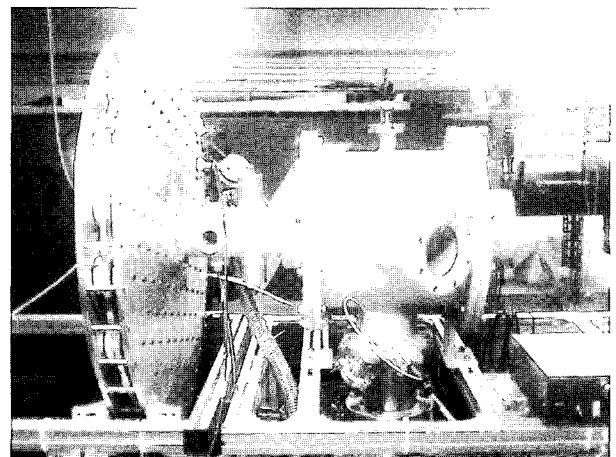


그림 1. 플라즈마 집속장치

* [전자우편] ehchoi@kw.ac.kr

Ar 기체를 방전시켜 국소적인 열적 평형상태의 가정에 의해 전자온도와 이온밀도를 진단하였다. 방출 분광 분석기를 이용하여 스펙트럼의 데이터를 얻었으며 Ar I과 Ar II의 전자온도 및 이온밀도를 각각 계산하였다. 이러한 기초 데이터는 고밀도 플라즈마 집속을 시키기 위한 조건을 찾는 데 중요한 자료가 될 것이다.

II. 실험장비 및 원리

플라즈마 집속 장치는 그림 2에서와 같이 전원 공급기(DC power supply), 축전기 저장소(Capacitor bank), 스파크 갭 스위치(Spark gap switch), 이극챔버(Diode chamber)로 총 4가지 부분으로 구성되어 있다.

전원 공급기는 최대 12 kV, 3.6 kW의 출력을 낼 수 있으며 본 실험에서는 2, 2.5, 3, 3.5 kV로 전압을 변화시켜 가면서 측정하였다. 이것은 전원 공급 외에 스파크 갭 스위치에 1~10 Hz의 15 kV 펄스를 제공하는 기능도 가지고 있다. 단 펄스 뿐만 아니라 10 Hz이하의 연속적인 펄스 형태의 신호를 출력할 수 있다. 실험에서는 10 Hz로 고정해서 실시하였다. 축전기 저장소는 낮은 인덕턴스를 위해 8 nF, 10 kV의 축전기 192개를 병렬로 연결하여 총용량 1.52 μ F로 구성하였다. 스파크 갭 스위치 사이의 거리는 4 mm 간격으로 트리거 핀과는 각각 2 mm 정도로 설치하였다. 10 Hz의 15 kV 펄스 신호를 전달하는 트리거 핀은 텅스텐 재질을 사용하였다. 스파크 갭 스위치의 진공도는 대기압인 760 Torr로 유지하였다. 이극챔버는 동축형태의 전극 구조를 가지고 있으며 방전 기체로는 순수한 Ar을 사용하였다.

그림 3은 본 연구진의 최종목표인 13.5 nm의 극자외선을 발진시키기 위한 원리를 개략적으로 표현한 것이

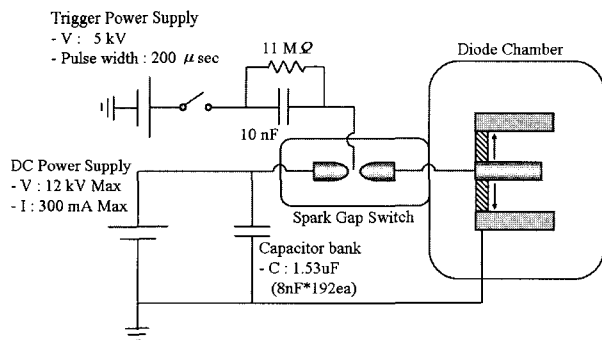


그림 2. 플라즈마 집속장치의 회로도

다. 이극챔버 내부의 전극구조를 확대한 것이다. 스파크 갭 스위치가 펄스 신호에 의해 강제 트리거 된다.

축전기 저장소에 저장된 에너지는 스파크 갭 스위치가 닫힘(ON)에 따라 이극챔버의 전극으로 에너지를 전달하게 된다. 양극(Anode)과 음극(Cathode) 사이의 Ar 기체는 플라즈마 상태가 되며 이것은 양극에 흐르는 전류에 의한 자기장의 영향으로 바깥쪽으로 밀려나게 된다. 유전체 표면을 따라 형성된 전류 밀도 J 는 자기장 B 에 의해 로렌츠 힘을 발생하며 $J \times B$ 의 힘으로 가속받게 된다. 이때 양극 끝부분에 플라즈마가 고밀도로 집속되어 높은 온도를 유지하게 된다. 이 현상을 이용하여 리튬을 들뜬상태로 만드는 것이다. 리튬의 EUV 영역대의 빛은 2가 대전 리튬 방출선(doubly ionized Lithium emission line)인 13.5 nm에 해당된다. 이 빛을 방출시키는 데 필요한 에너지는 81 eV로 알려져 있다.[6] 본 실험의 목표는 고밀도의 플라즈마를 형성시키는 것이며 이때 발생하는 플라즈마를 진단하여 전자온도와 이온밀도를 계산하는 것이다. 이것을 구하기 위해서는 Ar 기체 방전 시 방출되는 스펙트럼 데이터가 필요하다.

열적 평형상태의 들뜬 에너지 레벨의 기체 개수는 볼츠만 분포를 따른다고 가정하였다. 빛의 세기는 이 들뜬 기체의 개수에 비례하며 상위 에너지 준위에서 하위 에너지 준위로 떨어질 때 방출되는 광자의 에너지 및 천이되는 확률에 비례한다.[7]

$$I = \frac{1}{4\pi} A_{ul} n_h \nu_{ul} \frac{1}{Z} g_u \exp\left(-\frac{E_u}{k T_e}\right) \quad (1)$$

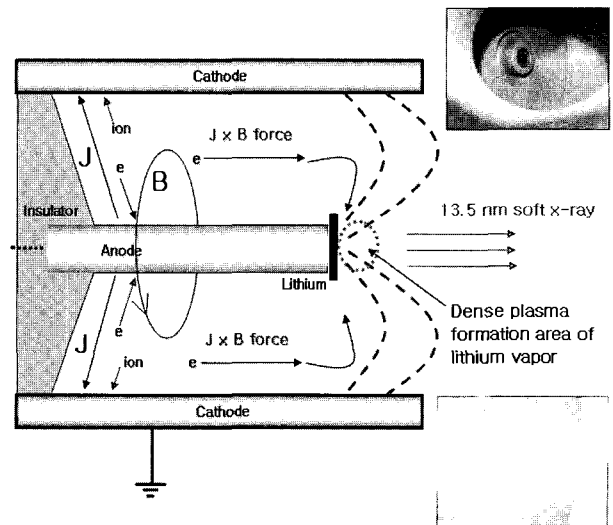


그림 3. 플라즈마 집속에 의한 EUV 발진 원리

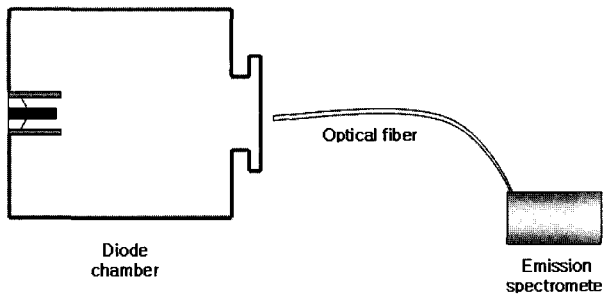


그림 4. 방출 스펙트럼 실험 개념도

E_u 는 상위준위의 들뜬 에너지, n 은 하위 에너지 준위에 존재하는 입자의 밀도, Z 는 분배함수(partition function)이며 g_u 는 들뜬상태의 축퇴도(degeneracy), k 는 볼츠만 상수, ν_{ul} 는 상위준위 u 에서 하위 준위 l 로 천이가 일어날 때 방출되는 빛의 주파수, A_{ul} 는 상위준위 u 에서 하위 준위 l 로 천이가 일어날 때 단위 시간당 천이 확률(transition probability), h 는 플랑크 상수이다. 이 식에서 빛의 세기와 들뜬 상태의 에너지 사이의 관계식을 이용하여 전자온도를 계산할 수 있다.

그림 4에서와 같이 방출 분광 분석기를 이용하여 빛의 파장에 대한 세기를 측정하였다. 위의 (1)식을 이용하여 국소적인 열적평형이라는 조건하에 전자온도를 각각 계산할 수 있고 이것을 사하 방정식에 대입함으로써 Ar I과 II의 이온밀도를 알 수 있다. 본 실험에서는 장치의 최적화된 조건인 330 mTorr의 압력에서 방전을 시켰으며 방출 스펙트럼 데이터를 통해서 플라즈마를 진단하였다.[8]

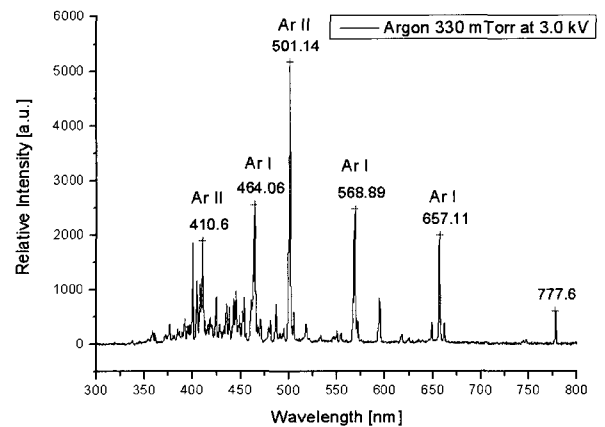


그림 5. 방출 분광분석기를 이용한 Ar 파장 측정

III. 실험 결과

실험은 본 연구진의 선행된 결과를 바탕으로 다이오드 챔버의 집속 최적점인 Ar 압력 330 mTorr에서 진단을 실시하였다. 인가전압은 2 kV, 2.5 kV, 3 kV, 3.5 kV으로 변화를 주었으며 외부 트리거 신호인 15 kV, 10 Hz를 인가하였다.

이극챔버는 순수한 Ar 기체를 채웠으며 각 입력전압에 대해 플라즈마의 전자온도와 이온밀도를 측정하였다. 입력 전압 3 kV일 때 방출 스펙트럼 데이터는 그림 5에 나타내었다. 전자온도를 계산하기 위해서는 현재 시스템이 국소적인 열적평형 상태에 있다는 가정이 필요하다. 위 식(1)을 통해 다음 식(2)으로 표현할 수 있다.[9]

표 1. 입력 전압 3 kV, 다이오드 챔버 압력 330 mTorr 에서 측정된 Ar 플라즈마의 분광 데이터.

구분	wavelength (nm)	intensity (a. u.)	frequency (Hz)	gu	A_{ik} (10^8 sec^{-1})	Eu (eV)	$\ln\left[\frac{I}{\nu A_{ik} g_u}\right]$
Ar I	464,21	2562,59	6,46E+14	5	0,001	14,51	-39,38
Ar I	568,19	2081,32	5,29E+14	7	0,0021	14,31	-40,46
Ar I	568,37	2484,59	5,27E+14	5	0,0021	14,31	-39,95
Ar I	653,81	1841,59	4,57E+14	7	0,0011	13,95	-39,79
Ar I	659,61	2001,59	4,57E+14	5	0,0024	13,94	-40,15
Ar II	399,48	1850,59	7,49E+14	2	1,6	22,22	-46,31
Ar II	465,79	2155,59	6,45E+14	2	0,81	18,45	-45,33
Ar II	410,39	1898,52	7,31E+14	6	1,2	20,98	-47,07
Ar II	500,93	5165,31	5,99E+14	6	0,147	17,91	-43,77

$$\ln\left(\frac{I}{\nu_{ul}A_{ul}g_u}\right) = -\frac{E_u}{kT_e} + \ln\left(\frac{hn}{4\pi Z}\right) \quad (2)$$

식(2)의 $\ln\left(\frac{I}{\nu_{ul}A_{ul}g_u}\right)$ 과 들뜬 에너지 E_u 사이의 선형 그래프를 이용하여 기울기 값을 계산하면 전자온도 kT_e 를 알 수 있다.

표 1에 나타낸 Ar I과 Ar II의 분광 정보를 이용해서 $\ln\left(\frac{I}{\nu_{ul}A_{ul}g_u}\right)$ 과 각 파장대에 따른 들뜬 에너지 E_u 에 대한 그래프를 얻는다. 그리고 선형 조정법 (linear fitting) 과정을 거쳐 그래프의 기울기 값을 얻어 역수를 취해주면 Ar 플라즈마의 전자온도가 된다. 이 과정을 거쳐 얻은 그래프는 입력 전압 3 kV일 경우 그림 6과 같다. 선형조정법에 의한 기울기의 절대값은 0.93이며 이것의 역수는 전자온도 값이 된다. kT 는 1.076 eV로 계산되며 켈빈(Kelvin) 단위로 환산하면 12471 K로 표현된다. 각 입력 전압에 대한 전자온도 그래프는 그림 7에 표현 하였다. 전압이 2.5 kV와 3 kV에서 1.07 eV로 전자온도가 동일하게 나왔고 3.5 kV에서 0.99 eV로 가장 낮은 수치를 보였다. 국소적인 열적평형 상태에 있다고 가정하였으므로 Ar 플라즈마의 전자온도와 이온온도는 국소적으로 같다. 이 정보를 이용하여 사하 방정식으로 이온 밀도를 계산하였다.

사하 방정식은 다음 수식(3)과 같이 표기할 수 있다.[10]

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

$$N_i = N_e$$

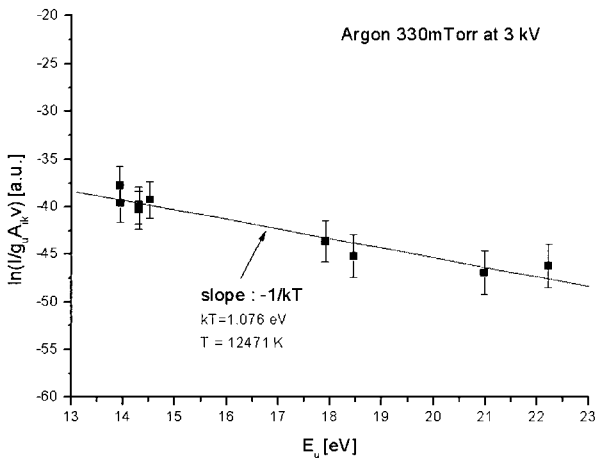


그림 6. 입력 전압 3 kV일때 볼츠만 도표에 의한 Ar I과 II의 전자 온도 계산

이 방정식에서 E는 이온화 에너지에 해당된다. 본 실험에서는 Ar I과 Ar II를 측정하였으므로 각각의 이온화 에너지인 15.69 eV와 27.63 eV의 값을 이용하였다. 위에서 얻은 온도 정보와 330 mTorr 일때 Ar 중성기체의 밀도 $N = 1.16 \times 10^{16} / \text{cc}$ 를 대입하여 풀면 Ar I과 Ar II의 이온밀도를 각각 계산할 수 있다. 각 입력 전압에 따른 이온밀도는 그림 8로 나타내었다. 2.5 kV와 3 kV에서 Ar I 및 II의 이온밀도가 가장 높았으며 각각 $4.1 \times 10^{15} / \text{cc}$ 및 $1.6 \times 10^{13} / \text{cc}$ 으로 계산되었다. 대체적으로 Ar I과 Ar II의 이온밀도 N_i 는 각각 $\sim 10^{15} / \text{cc}$ 및 $\sim 10^{13} / \text{cc}$ 의 값으로 나왔다. 이온화율 δ 는 평균적으로 각각 27% 및 0.06%로 Ar I의 이온화율이 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서 가정했던 국소적인 열적 평형상태를 만족시키는 임계 전자밀도 (criterion electron density) N_e^* 는 다음 수식 (4)으로 표현할 수 있다. [11]

$$N_e^* \geq 7 \times 10^{18} \frac{z^7}{n^{17/2}} \left(\frac{kT_e}{z^2 E}\right)^{1/2} \quad (4)$$

z 는 유효전하수 (number of effective charges), n 은 주 양자수 (principal quantum number), E 는 Ar의 이온화 에너지에 해당된다. 위에서 얻은 전자온도를 대입하여 Ar I과 Ar II의 임계 전자밀도 범위를 구할 수 있다.

Ar I과 Ar II의 플라즈마 밀도는 입력전압에 따라 표 2에 나타난 임계전자밀도 (N_e)의 최소값보다 훨씬 큰 값이므로 국소적인 열적 평형상태를 충분히 만족한다고 볼 수 있다.

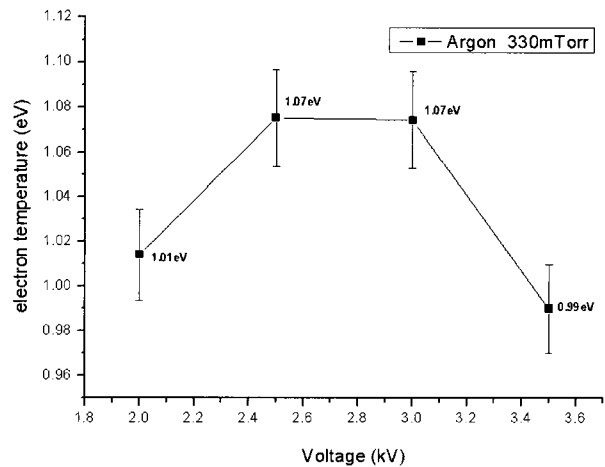


그림 7. 각 입력 전압에 따른 전자온도 결과

표 2. 각 전압에 따른 Ar I 및 II의 임계전자밀도

전압 (kV)	임계전자 밀도의 최소값 (/cc)	
	Ar I	Ar II
2	3.94E+12	2.97E+12
2.5	4.06E+12	3.05E+12
3.0	4.06E+12	3.05E+12
3.5	3.89E+12	2.93E+12

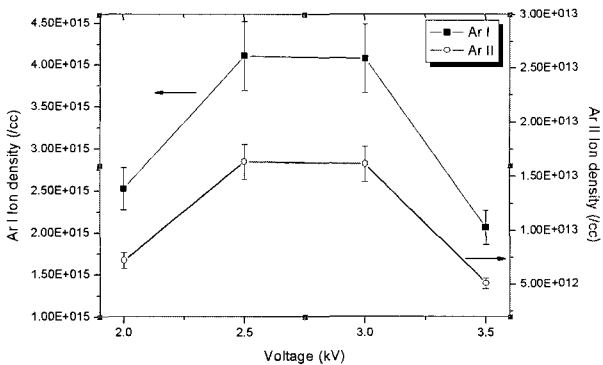


그림 8. Ar 압력 330 mTorr에서 각 입력전압에 따른 Ar I과 II의 이온밀도

V. 결 론

방출 분광 기술을 이용한 플라즈마 진단 실험을 통해 국소적인 열적평형의 가정에서 Ar I과 Ar II의 전자온도와 이온밀도를 측정했다. 입력 전압 2.5 kV와 3 kV에서 Ar I과 II의 전자온도가 1.07 eV로 가장 높게 나타났으며 밀도는 각각 $4.1 \times 10^{15}/\text{cc}$ 및 $4.06 \times 10^{13}/\text{cc}$ 로 계산되었다. Ar I의 플라즈마 밀도는 $\sim 10^{15}/\text{cc}$, 그리고 Ar II의 플라즈마 밀도는 $\sim 10^{13}/\text{cc}$ 의 값을 얻었다. 따라서 Ar I이 Ar II 보다 이온화율이 높으며 밀도 또한 높다는 것을 실험적으로 확인했다. 이것은 Ar I이 Ar II보다 이온화 에너지가 낮으므로 이온화될 확률이 상대적으로 높음에 기인한다. 본 실험의 볼츠만 도표법으로 구한 전자온도는 플라즈마 집속현상을 관측하는데 활용 가능하다.

감사의 글

본 결과물은 핵융합 연구센터의 출연금으로 수행한 한빛 플라즈마 이용자 육성 사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] John E. Bjorkholm, "EUV Lithography-The Successor to Optical Lithography?", pp. 1.
- [2] 디지털 타임스 2005. 08. 22, 전자신문 2005. 07. 20.
- [3] Prashant Singh Sankhla, "Extreme Ultraviolet Lithography-Imaging the Future", pp. 3.
- [4] 배일한, "미, 유럽 반도체업체들 '차세대 칩 개발' 컨소시엄 구성", 전자신문 2005. 07. 20.
- [5] Rainer Lebert, Klaus Bergmann, Larissa Juschkina, Oliver Rosier, Willi Neff, "Comparison of Different Source Concepts for EUVL", pp. 6~7.
- [6] Igor Fomenkov, William Partlo, Daniel Birx, "Characterization of a 13.5 nm Source for EUV Lithography based on a Dense Plasma Focus and Lithium Emission", Sematech International Workshop on Extreme Ultraviolet Lithography (1999).
- [7] R. Kenneth Marcus, "Glow Discharge Spectroscopies" (Plenum Press 1993), pp. 115~116.
- [8] 이수범, 문민욱, 오필용, 송기백, 임정은, 홍영준, 이원주, 최은하, 한국진공학회지 **15**, 380 (2006).
- [9] Daniel L. Flamm, "Plasma Diagnostics" (Academic Press 1989), Vol. 1, pp. 379~380.
- [10] Francis F. Chen, "Introduction to Plasma Physics" (Plenum Press, 1977), pp. 1~3.
- [11] Hans R. Griem, "Plasma Spectroscopy" (McGraw-Hill 1964), pp. 148.

Emission spectroscopic diagnostics of argon arc Plasma in Plasma focus device for advanced lithography light source

Y. J. Hong¹, M. W. Moon¹, S. B. Lee¹, P. Y. Oh¹, K. B. Song¹, B. H. Hong¹, Y. H. Seo,¹
W. J. Yi², H. M. Shin¹, and E. H. Choi^{1*}

¹*Department of Electrophysics / PDP research center, Kwangwoon University, Seoul 139-701*

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

(Received October 27, 2006)

We have generated the argon plasma in the diode chamber based on the established coaxial electrode type and investigated the emitted visible light for emission spectroscopy. We applied various voltages 2 ~ 3.5 kV to the device by 0.5 kV, and obtained the emission spectrum data for the focused plasma in the diode chamber on the argon pressure of 330 mTorr. The Ar I and Ar II emission line are observed. The electron temperature and ion density have been measured by the Boltzmann plot and Saha equation from assumption of local thermodynamic equilibrium (LTE). The Ar I and Ar II ion densities have been calculated to be $\sim 10^{15}$ /cc and $\sim 10^{13}$ /cc, respectively, from Saha equation.

Keywords : EUV, Lithography, Plasma focus, Emission spectroscopy, Boltzmann plot

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