

유도결합형 제논의 가스압력 및 RF전력에 따른 플라즈마의 전기적 특성

최 용성, 이 경섭
동신대학교 전기공학과

Electrical Properties of Plasma According to Gas Pressure and RF Power of Xe-Inductively Coupled Plasma

Yong-Sung Choi, Kyung-Sup Lee
Dept. of Electrical Eng., Dongshin University

Abstract : In this paper, parameters of electron temperature and density for the mercury-free lighting-source were measured to diagnosis and analyze in Xe based inductively coupled plasma (ICP). As results at several dependences of 20~100mTorr Xenon pressure, the brightness of discharge tube was higher ($4,900 \text{ cd/m}^2$) than other conditions when Xe pressure was 20mTorr and RF power was 200W. In that case, the electron temperature and density were 3.58eV and $3.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, respectively. The key parameters of Xe based ICP depended on Xe pressure more than RF power that could be verified. A high electron temperature and low electron density with a suitable Xe pressure are indispensable parameters for Xe based ICP lighting-source.

Key Words : Electron temperature, Electron density, Mercury-free lighting-source, Inductively coupled plasma, Xe

1. 서 론

반도체 공정용 플라즈마는 미세화와 대면적화가 급속도로 진행되고 있으며 저 압력에서 보다 넓은 면적의 균등한 플라즈마원의 연구 개발이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 고안된 플라즈마원으로서 전자 사이클로트론 공명 플라즈마, 헬리콘파 플라즈마와 유도결합 플라즈마 등이 있다. 유도결합형 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma: ICP)는 저압가스 방전에서 약 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 정도의 높은 플라즈마 밀도를 만들 수 있다. 특히 반응영역의 체적 내부에 금속 전극을 삽입하지 않고도 고 순도의 박막 증착, 표면 가공, 예칭, 식각 등을 위한 플라즈마 발생이 용이하기 때문에 반도체 분야 및 기타 많은 산업에서 이용 되고 있다[1].

광원 분야의 응용은 ICP의 장점을 활용하여 플라즈마 내부에 무전극형 가스 방전으로 수은 여기의 254 nm UV 발생 및 형광체 발광원리를 갖는 무전극 형광 램프가 있다. 내부에 전극이 없기 때문에 기존 형광 램프들이 가지고 있는 문제점인 전극에 의한 산화·휘발로 전자방출 능력 상실, 점등 실패와 에너지 손실로 램프의 수명을 단축하는 단점이 보완 되었다. 또한 높은 효율, 연색성, 10,000 시간에 상당하는 장수명의 특징을 가지고 있다. 상용화된 대표적 무전극 형광램프는 Philips의 QL Lamp, Osram의 Endura 제품들이 있지만[2], 기존 형광램프와 같이 수은(Hg)을 사용하고 있기 때문에 환경문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 수은을 사용하지 않는 광원시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. UV의 매체인 수은을 대체할

물질로 제논 (Xe), 중수소 (D_2), 일산화탄소 (CO), 이산화탄소 (CO_2) 등이 있다. 이 가운데 제논은 수은과는 달리 친환경적이고, 주위 온도에 의한 광 방출 특성에 영향을 주지 않으며 UV부터 가시광선 까지 넓은 광 특성을 가지고 있다[3].

본 논문에서는 광원용 제논 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였고, 플라즈마의 기초 특성인 전자 온도와 밀도의 파라미터를 측정하였다. 이러한 실험적 결과는 고 성능 및 고효율 특성을 가진 광원 개발의 필수 요소이다. 방전관 내부에 20~100 mTorr의 제논 압력 변화와 50~200W의 RF 전력 변화에 따른 제논 가스의 발광휘도 특성을 측정하였다. 플라즈마 상태를 이해하기 위해 Langmuir Probe를 이용한 정전 탐침법을 사용하여 플라즈마 변수인 수 eV의 전자 온도와 $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 의 전자 밀도를 측정 및 계산하였다. 이를 통해 광원에서 사용되어질 제논의 유도결합형 플라즈마에 대한 광학적인 특성과 물리적인 변수를 확인하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 유도결합형 플라즈마 발생장치의 개략도는 그림 1과 같다. 기본구성은 1) 13.56MHz의 고주파를 발생시키는 RF 전원과 플라즈마 및 부하 임피던스와의 매칭을 위한 매칭 회로, 유도코일, 2) RF전력에 의해 방전이 발생되는 진공챔버와 진공을 발생 및 유지시키는 진공 시스템, 3) 챔버에 유입되는 제논의 양을 조절

하는 유량조절장치 (Mass Flow Controller: MFC)로 이루어진다.

가시적으로 플라즈마를 관찰하기 위해 원통형 스테인레스 챔버에 연결된 파이렉스 방전관은 길이 130 mm, 외경 100 mm로 설계 및 제작하였다. 투명한 방전관의 외부에서 RF전력을 공급 받는 유도 코일은 RF전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 외경이 1 mm인 테프론 전선을 20 mm간격으로 4회 나선형 (Helical)으로 방전관 외부에 감아서 사용하였다. RF 전원에서 발생하는 13.56MHz의 고주파는 매칭회로를 통해 유도 코일의 한쪽 끝으로 보내어지고 다른 반대쪽은 접지되어 있다. 제논 가스는 순도 99.999 %를 사용하였고, 진공도는 로터리 펌프를 사용하여 1.0×10^{-3} Torr까지 배기시킨 후 유지시켰다. 유량조절장치를 이용하여 일정량의 제논을 진공 챔버 안에 유입하였다. 13.56MHz RF 전력은 매칭 회로를 통해 반사전력이 0 W가 되도록 조정하여 플라즈마를 발생시켰다. 유도결합형 플라즈마에서 방출되는 광학적 특성을 측정하기 위하여 방전관의 1 m 거리에서 휘도계 (Minolta LS-100)를 사용하여 휘도를 측정하였다.

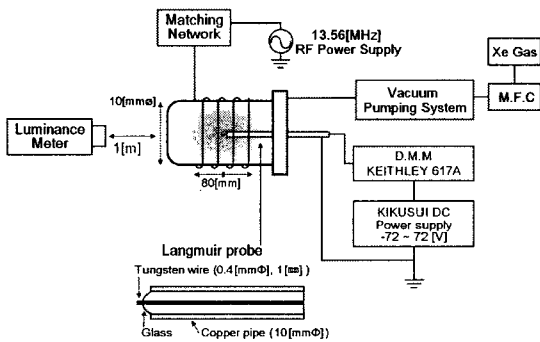


그림 1 실험 장치 개략도
Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Equipments

일반적으로 플라즈마를 진단한다는 것은 플라즈마 내부의 전자와 이온 밀도, 온도, 전계, 자계 등을 측정해서 물리적인 현상이나 동작을 판단하는 것을 말한다. 진단의 변수는 플라즈마 밀도를 표시하는 전자 밀도 N_e , 입자의 에너지 상태를 표시하는 에너지 분포함수 $f(\xi)$, Maxwell 분포일 때 정의되는 전자 온도 T_e , 이온 온도 T_i , 플라즈마 공간 전위 V_p 등이 있다. 이 중 전자의 온도와 밀도는 특정의 플라즈마 상태를 이해할 수 있게 하는 대표적인 변수라 할 수 있다[4]. 제논의 유도결합형 방전 플라즈마를 Langmuir 단일 탐침법을 통해 주 에너지원인 전자/이온의 온도 및 밀도를 실험적으로 진단과 해석하였다.

플라즈마 내에서의 전자들이 가지는 에너지를 의미하는

전자 온도는 탐침 전압 V_{p1} 과 V_{p2} 를 및 이들 전압에 대한 탐침 전류 I_{e1} 과 I_{e2} 로서 다음 식 (1)과 같이 나타낸다

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{V_{p1} - V_{p2}}{\ln\left(\frac{I_{e1}}{I_{e2}}\right)} \quad (1)$$

즉, 전자 온도는 측정에서 얻은 전자전류 $I_e(V)$ 를 전압 V 에 대해 대수농도를 취하면 직선이 되고, 기울기로 유도된다. 전자 밀도는 공간전위 V_s 부근에서의 전류는 열확산 전자전류 I_{eo} 이므로 전류의 기울기에서 구한 전자 온도와 I_{eo} 를 다음 식 (2)에 대입하여 실용적 단위로 변환된다[5].

$$N_e = 3.73 \times 10^{11} \frac{I_{eo}}{S \cdot \sqrt{T_e}} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (2)$$

(S는 시스를 포함한 탐침의 표면적)

단일 Langmuir 탐침은 전기 전도도와 녹는점이 높은 직경 0.4 mm의 텅스텐을 사용하였다. 전자나 이온이 텅스텐과 상호 작용하는 것을 막기 위해 경화점이 1,400 [°C] 이상인 $\text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ 계열의 유리를 이용하여 절연시켰다.

탐침은 챔버 후면에서 방전관 중심축으로 삽입하였고, 인가 전압은 Bipolar Power Supply (KIKUSUI)를 사용하여 -72 ~ +72 V 까지 전압을 인가해 주었다. 전류 측정은 Digital Multi Meter (KEITHLEY 193A)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

유도결합형 플라즈마 방전은 RF 전력에 의해 전기적 모드에서 자기적 모드로 변환된다. 방전이 전기적 모드에서 자기적 모드로 전이될 때 휘도는 급격히 증가한다. 전기적 모드에서 낮은 RF 전력 범위는 넓은 면적의 약한 발광과 함께 낮은 플라즈마 밀도가 관측된다. 이러한 전기적 모드의 발생 원인은 각각의 유도코일 루프의 전위차로 기인한 전계에 의한 것이다. 자기적 모드에서 RF전력의 증가에 따라 전자밀도와 발광이 급격히 증가함이 관측된다. 이것은 자계의 공진에 의해서 형성되는 수직 축의 RF 전계에 기인한 것이다. 자기적 모드에 도달하기 위해서는 공급되는 전력의 전류가 임계한계를 넘어서야 하며, 유도코일 내부에만 높은 발광과 플라즈마 밀도의 특징을 보인다.[6]

전· 자기적 모드 관점에서 그림 2는 자기적 모드에서 제논의 압력 및 RF 전력 변화에 따른 휘도 특성이다. 제논의 압력은 20 mTorr씩 변화시켜 20 ~ 100 mTorr까지 주

입시켰다. 측정 결과 20 mTorr, 200 W에서 $4,900 \text{ cd/m}^2$ 의 가장 높은 휘도 특성을 보였다. 전체적으로 RF 전력이 증가하면 휘도도 증가하였다. 그러나 제논의 압력이 증가하면 휘도는 점차 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 결과의 원인은 유도결합형 플라즈마 내부에 제논의 압력이 증가함에 따라 중성기체입자 수가 증가하고, 입자간의 충돌단면적이 좁아져 제논이 쉽게 여기-발광될 수 없기 때문이다. 또한 RF 전력의 증가에 따른 휘도 증가는 중성기체 입자의 충돌확률이 증가하기 때문으로 사료된다.

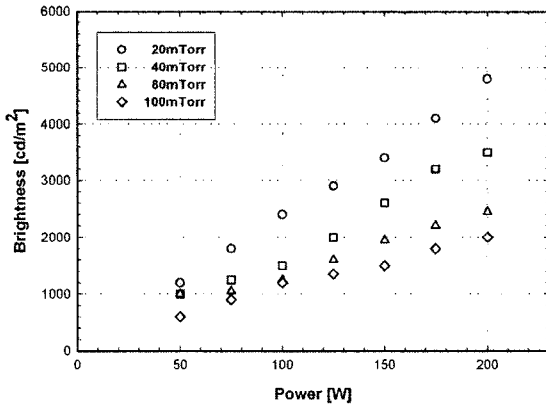


그림 2 제논 압력 및 RF 전력 변화에 따른 휘도 특성
Fig. 2 Brightness Dependence of Xe Pressure and RF Power

그림 3은 제논을 이용한 유도결합형 플라즈마에서 가스 압력에 따른 방전관 내부의 전류-전압 특성 곡선이다. 탐침된 전류는 이온 전류와 전자 전류로 분류할 수 있으며, 이온전류는 음의 부분인 수 μA 인데 반해 전자 전류는 수십 mA 이므로 탐침 전류는 이온 전류를 무시하고 전자 전류로 대체할 수 있다. 전류-전압 특성 곡선에서 직선적으로 증가하는 기울기로 전자 온도 T_e 를 구하였고 식 (2)에 대입하여 전자 밀도 N_e 를 구하였다.

RF 전력은 200W로 고정하고, 제논의 압력을 그림 2의 휘도 특성과 같이 20 mTorr씩 20~100 mTorr까지 변화시키며 탐침하였다. 제논의 압력이 증가할수록 전자 전류의 기울기가 감소하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 감소하였다.

제논 압력 변화에 따라서 그림 3과 같이 측정된 전류-전압 특성 곡선은 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 그림 4와 같이 전자 온도 및 밀도가 유도되었다.

제논의 압력이 20mTorr로부터 증가할 수록 전자 온도는 $3.5 \sim 2.7\text{eV}$ 로 약간 감소하였고, 전자 밀도는 $3.5 \sim 7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 로 증가하였다. 제논의 압력이 높아지면서 중성기체분자의 수와 충돌빈도의 증가로 전자 온도가 감소되었고, 짧아진 전자의 자유이동 경로와 더불어 전자

밀도는 상대적으로 증가하였다. 전기적 중성인 제논분자 질량($2.18 \times 10^{-22} \text{ g}$)과 전자 질량($9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$) 사이의 큰 차이로 전자는 전계에 의해 쉽게 가속된다. 중성분자는 제논압력에 의한 분자의 진동과 회전에 의해 탄성충돌이 증대되어 전리 및 여기 현상이 감소되며, 그 결과 상대적인 제논분자의 밀도가 커지므로 전자 온도가 감소되는 것으로 여겨진다.

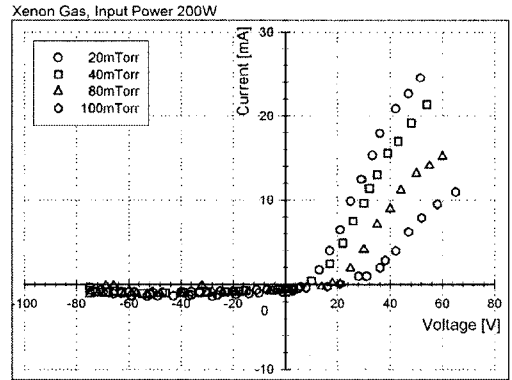


그림 3 200W RF 전력에서 제논 압력 변화에 따른 전류-전압 곡선
Fig. 3 Current-Voltage Curve Dependence of Xe Pressure at 200W RF Power

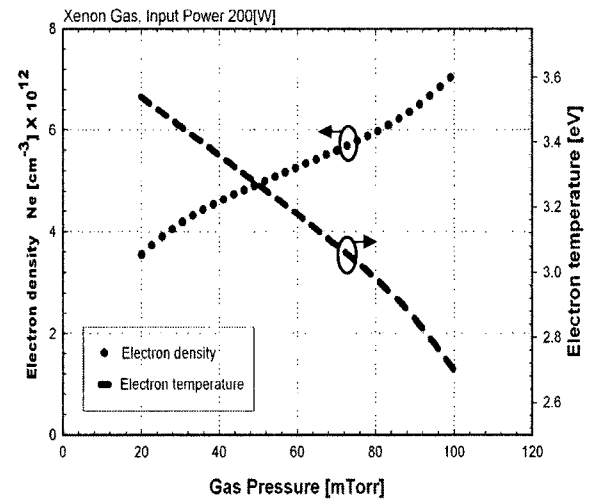


그림 4 200W RF 전력에서 전자 온도 및 밀도의 제논 압력 의존성
Fig. 4 Electron Temperature and Density Dependence of Xe Pressure at 200W RF Power

20mTorr에서 그림 2 및 4와 같이 최대 휘도 $4,900 \text{ cd/m}^2$, 전자 온도는 3.54 eV , 전자 밀도는 3.48

$\times 10^{12} cm^{-3}$ 의 결과를 얻었다. 동일한 제논 압력 조건에서 RF 전력 변화에 따른 플라즈마 진단의 결과는 그림 5와 같다. RF 전력은 50W씩 50~200W까지 변화시켰다. 그 결과 RF 전력의 증가로 탐침된 전류의 기울기가 선형적으로 증가하였고, 탐침된 전자의 포화 전류도 증가하였다. 이는 RF 전력의 증가가 입자들의 충돌빈도의 증가에 기인하였기 때문이고, 그림 2의 휘도 증가 특성과 동일한 결과이다.

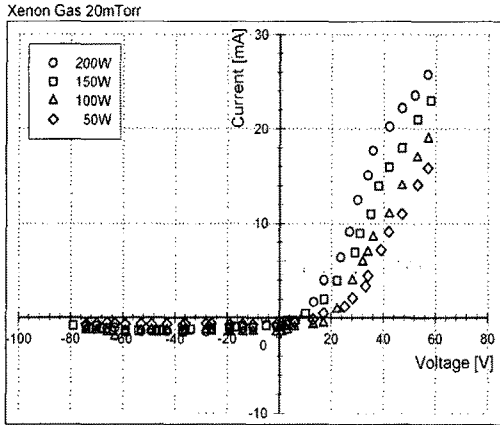


그림 5 20mTorr 제논의 RF 전력 변화에 따른 전류-전압 곡선
 Fig. 5 Current and Voltage Curve Dependence of RF Power at Xe 20mTorr

그림 6은 제논의 압력이 20mTorr일 때 RF 전력 변화에 따라 탐침된 전류-전압 특성 곡선으로 전자 온도와 밀도를 계산하여 나타낸 것이다. RF 전력 증가에 따라 전자 온도는 3.3~3.5eV로 증가하였고 전자 밀도는 $2.4 \sim 3.7 \times 10^{12} cm^{-3}$ 로 증가하였다. 그림 4의 결과와 비교해 볼 때 전자 온도와 밀도의 RF 전력 의존성은 상대적으로 완만하였다. 입력 전력의 증가는 플라즈마 생성 측면에서 볼 때 플라즈마 밀도 및 이온 전류 밀도의 증가를 가져오며 중성 기체의 해리율을 증가시켜 라디칼의 밀도를 증가시킨다.

제논 20mTorr, RF 전력 200W 조건에서 전자 온도와 밀도에 대한 중심 축 방향의 공간적 분포를 그림 7과 같이 분석하였다. 전류-전압의 측정은 탐침의 위치를 챔버 중심으로부터 코일이 감겨진 좌, 우 40mm씩 축 방향으로 변화 시켜가며 중심 축 상에서 측정하였다. 중심축에서 플라즈마 외부로 갈수록 플라즈마의 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전자기유도법칙에 의해 원통형 방전관의 중심에서 전자계의 세기가 강하고, 주변부로 갈수록 전자계의 세기가 약해짐에 따라서 형성된 공간분포 특성 때문에 사료된다.

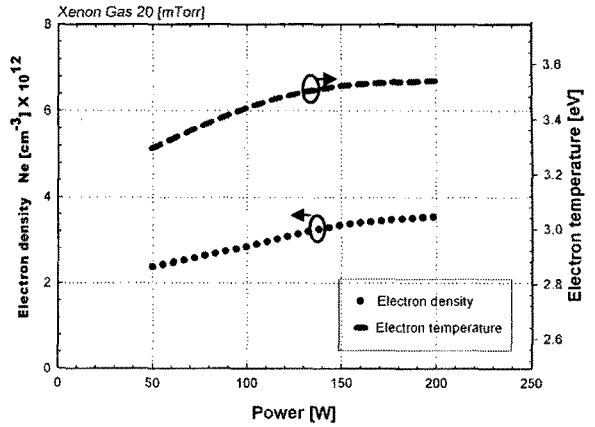


그림 6 20mTorr 제논의 전자 온도 및 밀도에 대한 RF 전력 의존성
 Fig. 6 Electron Temperature and Density Dependence of RF Power at Xe 20mTorr

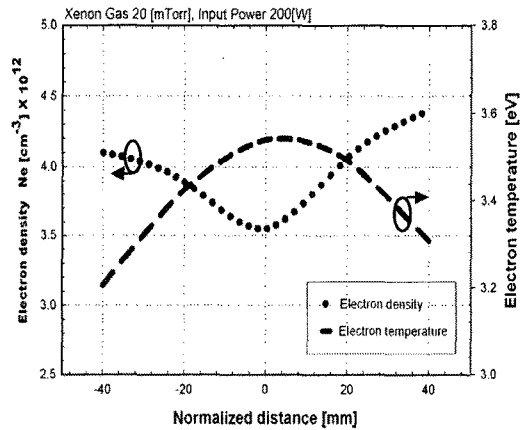


그림 7 20mTorr 제논, 200W RF전력의 방전관 축 방향 탐침 위치 변화에 따른 전자 온도 및 밀도
 Fig. 7 Electron Temperature and Density of Normalized distance at Xe 20mTorr and 200W RF Power

분석 결과 중심을 기준으로 전자 온도와 전자 밀도가 좌우 대칭의 분포와 유사하였고, 중심부에서 (0mm) 전자 온도 3.58eV, 전자 밀도 $3.56 \times 10^{12} cm^{-3}$ 를 나타내었다. 그러나, 전자온도와 밀도의 변화는 그림 3의 제논 압력 변화 (전자온도 2.7~3.5eV, 전자밀도 $3.5 \sim 7.3 \times 10^{12} cm^{-3}$)와 비교하였을 때 공간적 분포(전자온도 3.27~3.58eV, 전자밀도 $3.56 \sim 4.4 \times 10^{12} cm^{-3}$)는 변화율이 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 RF 전력 의존성과 결부 지었을 때 제논 압력의 의존성이 지배적임을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 수은을 사용하지 않는 광원용 제논 플라즈마의 체계적 이해, 효율화 및 최적화를 도모하기 위해서 유도결합형 플라즈마원을 설계하였다. 고성능 및 고효율 특성을 가진 신광원 개발의 기초 자료이며 방전 플라즈마 진단 및 해석에 있어, 필수 요소인 전자 온도와 밀도의 파라미터를 계측하였다. 방전관 내부에 20~100 mTorr의 제논 압력 변화, 50~200W의 RF 전력 변화, 중심 축 방향의 공간적 분포 특성을 측정하였다.

- 1) 자기적 모드에서 제논의 압력 및 RF 전력 변화에 따른 휘도 특성은 20 mTorr, 200 W에서 $4,900 \text{ cd/m}^2$ 의 가장 높은 결과를 보였다. 제논 압력이 증가함에 따라 중성기체입자 수가 증가하고, 입자간의 충돌단면적이 줄어들어 제논이 쉽게 여기/발광 될 수 없기 때문에 휘도는 감소하였다. 또한 RF 전력의 증가에 따른 중성기체 입자의 충돌확률이 증가로 휘도는 증가하였다.
- 2) RF 전력 200W, 제논 압력 20~100 mTorr까지 변화시키며 탐침한 결과, 전자 온도는 3.5~2.7eV로 약간 감소하였고, 전자 밀도는 $3.5\sim 7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 로 증가하였다. 제논의 압력이 높아지면서 중성기체분자의 수와 충돌빈도의 증가로 전자 온도가 감소되었고, 전자 밀도는 상대적으로 증가하였다. 유효체적내의 제논 압력 증가는 플라즈마 에너지의 매개변수인 전자온도를 상대적으로 감소시키는 결과를 나타냈다.
- 3) RF 전력 변화는 압력 의존성에 비해 상대적으로 둔감하였다. 제논 20mTorr, RF 전력 변화를 50~200W로 변화시키며 플라즈마의 진단 결과, 전자 온도는 3.3~3.5 eV, 전자 밀도는 $2.4\sim 3.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 로 변화하였고, 따라서 제논의 유도결합형 플라즈마 매개변수 제어는 RF 전력 보다 제논 압력에 대해 큰 영향력이 있음을 확인할 수 있다.
- 4) 전자 온도와 밀도의 중심 축 방향의 분포는 전자기유도법칙에 의해 원통형 방전관의 중심에서 전자계의 세기가 강하고, 주변부로 갈수록 전자계의 세기가 약해짐에 따라서 형성된 공간분포 특성 때문으로 사료된다. 제논 20mTorr, RF 전력 200W의 방전관 중심부에서(0mm) 최대 전자온도 3.58eV, 최소 전자 밀도 $3.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 를 나타내었다. 전자 온도와 밀도의 공간적 분포 변화율은 제논 압력 변화 특성과 비교하였을 때 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 RF 전력 의존성과 결부 지었을 때 제논 압력의 의존성이 지배적임을 나타낸다.

본 실험에서 제논을 사용한 유도결합형 플라즈마 광원의 효율화를 위한 매개변수로 가장 높은 휘도를 나타낸 제논 압력 20mTorr, RF 전력 200W의 방전관 중심부에서 전자온도 3.58eV, 전자 밀도 $3.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 를 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 전력산업 기초인력 양성사업 (I-2006-0-092-01)에 의해 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] Czerwiec, T, Graves, D B, "Mode transitions in low pressure rare gas cylindrical ICP discharge studied by optical emission spectroscopy", Journal of physics D, applied physics, Vol.37, No.20, p.2827-2840, 2004.
- [2] Wharmby, D.O., "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A , Vol.140, Issue 6, p. 465-473, Nov. 1993.
- [3] Depond, J.M, "High voltage, mercury-free fluorescent lamps with cold cathodes: state of art and future developments" Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , Vol.5, p.3322-3325, 8-12 Oct. 2000.
- [4] Richard H.Huddleston and Stanley L. Leonard, "Plasma Diagnostic Techniques", Academic Press, New York, p.133-140, 1965.
- [5] Lai, C., Breun, R. A, Sandstrom, P. W., Wendt, A. E., "Langmuir probe measurements of electron temperature and density scaling in multidipole radio frequency plasmas", Journal of vacuum science & technology. an official journal of the American Vacuum Society, A, Vacuum, surfaces, and films, Vol.11, No.4, p.1199, 1993.
- [6] Demidov, V I, DeJoseph Jr, C A, Kudryavtsev, A A "Ionization kinetics and E-H mode transition in a noble gas, low-pressure pulsed ICP discharge", Plasma sources science & technology, Vol.13, No.4, p.600-603, 2004.