Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 17, No. 5, p. 560, May 2004.

논 문 17-5-17

Ar 가스 압력과 RF 전력에 따른 유도결합형 플라즈마의 전기적 및 광학적 특성

Electrical and Optical Characteristics of Inductively Coupled Plasma by Ar Gas Pressure and RF Power

최용성[1,a], 허인성[2], 이영환[2], 박대희[1]
(Yong-Sung Choi[1,a], In-Sung Her[2], Young-Hwan Lee[2], and Dae-Hee Park[1])

Abstract

In this paper, the electrical and emission properties of electrodeless fluorescent lamp were discussed using the inductively coupled plasma (ICP) with the variation of argon gas pressure and RF power. The RF output was applied to the antenna in the range of 5~50 W at 13.56 MHz. The internal plasma voltage of the chamber and the probe current were measured while varying the supply voltage to the Langmuir probe in the range of -100 V~+100 V. When the pressure of argon gas was increased, electric current was decreased. There was a significant electric current increase from 10 to 30 W. Also, when the RF power was increased, electron density was increased. Also, the emission spectrum, Ar- I line, luminance were investigated. At this time, the input parameter for ICP RF plasma, Ar gas pressure and RF power were applied in the range of 10~60 mTorr, 10~300 W, respectively. This implies that this method can be used to find an optimal RF power for efficient light illumination in an electrodeless fluorescent lamp.

Key Words : Plasma diagnosis, Langmuir probe, Bias voltage, Electron density, RF power Inductively coupled plasma

1. 서 론

다양한 방법으로 생성된 플라즈마들은 박막 디바이스 제작, 반도체 식각, 증착, 용접, 조명용 광원 및 신소재 개발 등에 많이 이용되고 있다[1,2]. 그러나, 플라즈마는 복잡하고 불안정하기 때문에 플라즈마의 온도를 측정하기 위해서는 일반적으로 사용되는 온도계나 열전대 등을 사용하지 못하고, 측정을 위한 진단 기술이 발전하게 되었다[3]. 진단 방법으로는 Langmuir 전극을 이용하는 probe 법, 전자파를 이용하는 전자파법 등이 사용되고[2] 있는데 probe법 중에서도 단탐침법이 널리 사용되고 있다[4].

고주파 방전에는 용량 결합형, 유도 결합형이 있다. 유도 결합형 플라즈마는 고주파 발생원과 플라즈마가 안테나 코일을 통해 전자적으로 결합하는 것에 의해 발생한다. 즉, 유도 회로에 큰 고주파 전류를 흐르게 하면, 이 전류에 의해 발생되는 자기장이 플라즈마 발생 영역에 침입하고 패러데이의 법칙에 의해 전기장이 발생한다. 이 전기장에 의해 자유 전자가 가속되고 플라즈마가 발생하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 장수명과 고효율의 특징을 갖는 무전극 램프가 개발되었다. 무전극 램

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부
(전북 익산시 신용동 344-2)
2. 원광대학교 전자재료공학과
a. Corresponding Author : biochips@wonkwang.ac.kr
접수일자 : 2003년 12월 10일
1차 심사 : 2004년 1월 7일
심사완료 : 2004년 3월 8일

프는 램프의 수명에 영향을 주는 필라멘트나 전극이 없으므로 장수명을 실현하고 있다[5]. 무전극 램프에서 봉입된 가스의 종류 및 압력에 따라 전기적 특성이나 광학적 특성에 많은 차이가 나타나게 된다. 그러나, 무전극 램프에서 이러한 특성에 대한 연구는 적고 RF 출력에 따라 적합한 가스의 압력 선정이 확립되어 있지 못하다. 유도 결합형 플라즈마는 낮은 기체 압력에서도 높은 밀도의 플라즈마를 얻을 수 있다[6-8].

무전극 형광램프의 방전 메커니즘은 마이크로파를 이용한 마이크로파 방전과 고주파 전원을 이용한 RF 방전이 있다. RF방전은 용량결합형 E-방전과 유도결합형 H-방전의 2가지 종류가 있다. E-방전은 RF전원을 방전관의 외벽 평행판 대전극에 RF전원을 인가하여 전극사이에 형성된 전장에 의해서 평행판 사이에 위치한 방전관에 방전을 유지하는 방전으로써 글로우 방전에 가까운 특성을 갖는다. H-방전은 방전관에 설치된 코일에 RF전원을 인가하여 축방향의 교번자계에 의해 유도된 환형의 유도 전계에 의해서 방전을 유지한다. H-방전은 고밀도의 아크에 가까운 성질을 보이므로 E-방전에 비해 효율이 높아 광원으로서 이용하기에 알맞은 특성을 보인다[9].

H-방전에서는 외부로부터 인가되는 RF전력에 의해 방전이 일어나면 유도결합 플라즈마는 일단 E-방전의 특징을 가지는 낮은 플라즈마 밀도 상태에 이르는 E-모드를 갖는다. RF 전력의 크기를 증가시키면 특정한 RF 전력에서 방전 체적 내부의 플라즈마 밀도가 갑자기 커지는 정상 상태에 이르게 되어 H-방전인 H-모드로 방전이 발생한다[10].

따라서, 본 논문에서는 전구형 무전극 형광 램프의 설계에 있어서 발광 효율을 높이기 위한 조건을 찾기 위하여, Langmuir probe를 이용하여, 가장 많이 사용되고 있는 아르곤 가스의 압력, bias 전압과 RF 출력 변화에 따른 유도 결합형 플라즈마의 전기적 특성을 single probe법[6]으로 측정하여 조사하였다. 그리고, 광학적 특성의 중요한 요소가 되는 전자 온도와 전자 밀도도 함께 측정하였다. 마찬가지로, 전구형 무전극 형광 램프의 설계에 있어서 발광 효율을 높이기 위한 조건을 찾기 위하여, 유도결합형 방전인 H-방전 중 Ar 가스가 E-모드에서 H-모드로 모드전환할 때의 광학적 특성에 대하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 플라즈마 발생 및 실험장치 개략도를 나타내었다. 실험은 로타리 펌프를 가동시켜 방전관 내부의 공기를 외부로 배출하면서, 가이슬러관을 통하여 방전관 내부에 존재하는 공기와 다른 불순물 가스를 태워서 없앤 후에 내부 진공도를 $1X10^{-4}$ Torr 이하로 유지하여 실험하였다.

실험에 사용되는 탐침봉의 재질은 녹는점이 높은 몰리브덴, 텅스텐, 백금 등이 사용되는데[3], 본 논문에서는 텅스텐을 사용하였고 glass로 절연하였으며, 크기는 직경 1.2 mm에 길이 6 mm의 단일 탐침봉(휘도 측정기와 동일 위치)을 사용하였다. 주파수 출력을 얻기 위하여 동관으로 제작된 안테나를 사용하였다. 출력 주파수는 무전극 형광 램프에 많이 사용되고 있는 13.56 MHz이고 주파수 발진기의 최대 출력은 300 W이다. Probe에 인가하는 전압은 공급 전류가 최대 2A인 DC power supply를 사용하여 -100 V부터 +100 V까지 10 V 간격으로 증가시키며 DMM/193A를 이용하여 전류를 측정하였다. 사용된 아르곤 가스의 순도는 99.999 %이고, MFC 밸브를 통하여 방전관 안에 유입시켜서 압력을 1~50 mTorr까지 변화하면서 측정하였다.

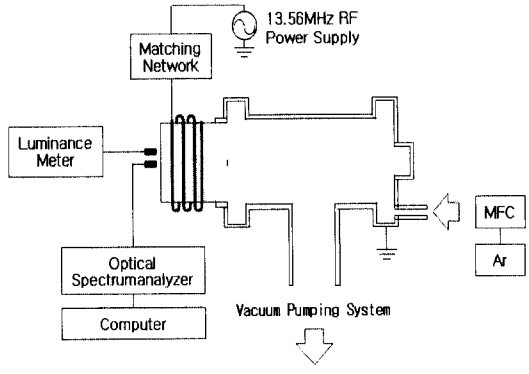


그림 1. 실험 장치 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipments.

아르곤을 방전관 내부에 공급하는 동시에 방전관의 가스를 외부로 방출시켜 압력을 일정하게 유지하게 하였다. 가스의 압력이 일정하게 유지되면 공급되는 가스와 방출하는 가스를 동시에 차단하고, matching network를 통하여 reverse power가 1 W 이하가 되도록 하여 RF power를 공급하였

다. 그리고 power supply를 통하여 probe에 직류 전원을 공급하여 방전관 내부에 있는 probe의 전류와 전압을 측정하고, 계속적으로 probe 공급 전압을 증가시키며 전류를 측정하였다. 다음으로는 가스의 압력을 변경시키며 같은 방법으로 전압과 전류를 측정하였다.

또한, 유도결합형 플라즈마에서 방출되는 광학적 특성을 측정하기 위하여 방전관 중심축상 안테나 끝쪽 50mm에 광섬유를 통하여 OPTICAL SPECTRUMANALYZER(Professional Scientific Instruments co., DARSA-2000)에 의해 분광된 데이터를 컴퓨터로 받아들여 스펙트럼을 분석하였고, 방전관에서 1m 거리에서 휘도계(LS-100)를 통하여 휘도를 측정하였다. scan 속도는 2.0 nm이고, slit은 1.0 mm이며, A/D #1은 5.0V, PMT High Volt는 500으로 설정하였다. 또한, 주변에 다른 피크치들이 없어 측정하기 용이한 750 nm와 760 nm의 두 Ar- I 라인을 선택하여 측정하였다[11].

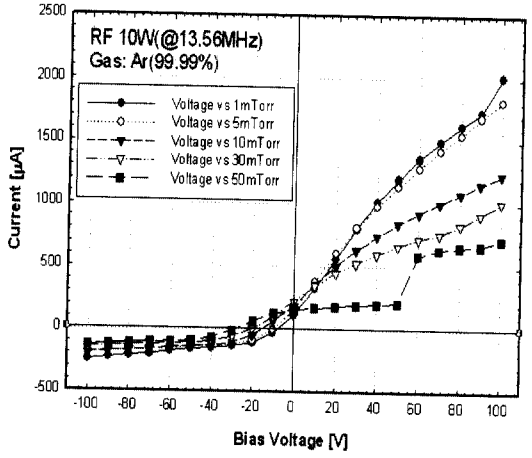
3. 결과 및 검토

3.1 가스 압력 변화에 따른 전기적 특성

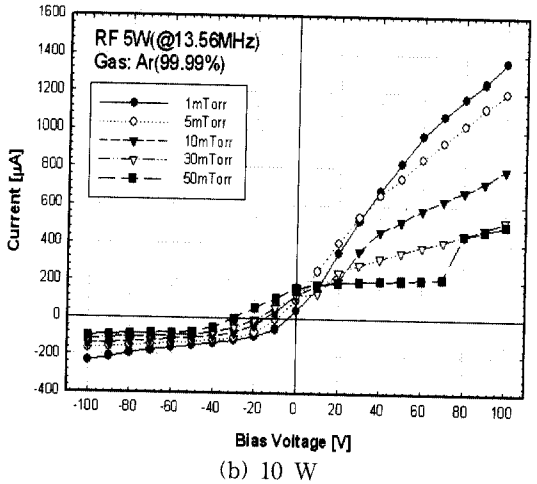
그림 2 (a) 및 (b)는 5 W, 10 W의 RF출력과 1~50 mTorr의 아르곤 가스 압력 변화에 따른 전기적 특성을 나타내고 있다. 그림 2 (a) 및 (b)에서 아르곤 가스 압력이 증가함에 따라 전류는 감소하는 경향이 나타났다. 이는 방전관 내부의 농도 증가로 인해 입자들이 포화되지 못하고 전류가 떨어진 것으로 생각된다. 이와 같이 아르곤 가스의 압력이 전류와 반비례한다. 이 결과는 무전극 형광램프 작동시 아르곤 가스의 압력이 낮을 것이 필요함을 시사한다[10]. 따라서, 적절한 가스의 압력에 의해서 램프의 발광에 필요한 플라즈마가 발생하므로 광학적인 특성과 고려하여 적절한 압력을 찾는 것이 중요하다고 사료된다.

3.2 RF 출력 변화에 따른 전기적 특성

RF 출력을 5 W부터 50 W까지 변화시켰을 때 아르곤 가스의 전기적 특성은 그림 3과 같다. 5 W와 10 W의 경우와 같이 RF 출력이 낮으면 플라즈마의 발생이 약하고, 정확한 방전이 일어나지 않아서 전류가 낮게 나타났다. 한편, 30 W와 50 W로 RF 출력이 커짐에 따라 플라즈마가 잘 발생하고, 전류의 증가가 현저하게 나타났다. 그림 3에서와 같이 RF 출력이 커지면 전류가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이것은 어느 정도 이상의 적절한 RF 출력이 있어야 램프 발광에 유효한 방전이 일어나는 것으로 생각된다.



(a) 5 W



(b) 10 W

그림 2. 아르곤 가스 압력별 전기적 특성.

Fig. 2. The current as a function of bias voltage with a variation of Ar gas pressure.

3.3 전자 밀도 측정

전자 온도와 전자 밀도는 앞에서 측정한 전류와 전압을 바탕으로 다음의 식 (1)과 (2)에 의하여 구할 수 있다[12].

$$\ln I = e(V - Vp)/kT_e \quad (1)$$

$$n_e = \frac{4Ie}{eAp}\sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT_e}} \quad (2)$$

여기서 e, k, Te는 각각 전자 전하, 볼츠만 상수, 전자 온도이고, n_e, Ie, Ap, m_e는 전자 밀도, 포화 전류, probe의 표면적, 전자의 질량이다. 식 (1)에서 sheath potential인 V-Vp를 구하고 측정한 전류와 각각의 상수를 대입하여 기울기에 해당하는 전자 온도를 구한다. 그리고, 포화 전류를 구해 식 (2)에 대입하여 전자 밀도를 구할 수 있다.

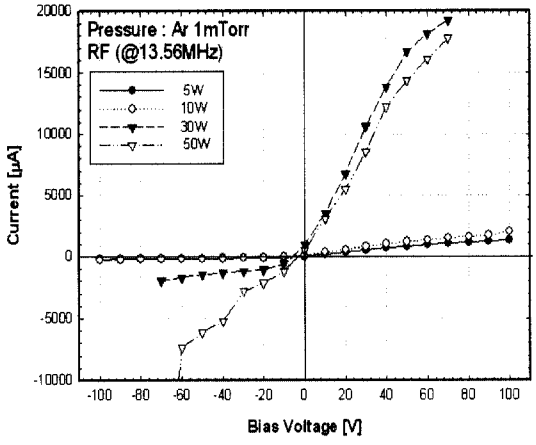


그림 3. RF 출력별 전기적 특성 (1 mTorr).
Fig. 3. The current as a function of bias voltage with a variation of RF power(1 mTorr).

그림 4에 1 mTorr와 5 mTorr 압력에서 RF 출력별 전자 밀도를 나타내었다. 압력에 상관없이 RF 출력 증가에 따라서 전자 밀도도 함께 증가하였으며, 특히 RF 출력이 10 W에서 30 W로 변화할 때 전자 밀도가 현저하게 증가하였다. 이 결과는 그림 2와 3의 결과와 일치하며, 무전극 형광램프 작동시 아르곤 가스의 압력이 낮을 것이 필요함을 시사한다. 또한, 적정 RF 출력 이상일 때에 발광에 필요한 전자 밀도가 생성됨을 알 수 있었다.

3.4 가스 압력에 따른 광학적 특성

유도결합 플라마의 방전에서 방전 모드의 전환 현상을 알기 위해 광방출법을 이용하여 모드전환점을 측정하였다. 그림 5는 20 mTorr의 Ar 가스 압력에서 RF 전력을 10~300 W로 변화시켰을 때, 가시광선 스펙트럼의 변화율을 측정한 결과이다. 스펙트럼은 380 nm~680 nm에서 큰 변화가 없었으나 680 nm 이상에서는 전력의 증가에 따라 4배 정도의 발광세기의 변화가 측정되었다. 특히, 750 nm와 760 nm에서는 스펙트럼의 세기가 상대적으로 크며 주변에 다른 피크들이 없으므로, 이 두개의 라인을 선택하여 모드 전환점을 측정하였다.

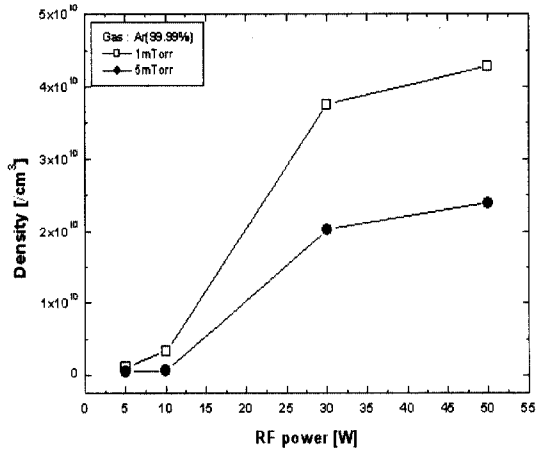


그림 4. RF 출력별 전자 밀도.
Fig. 4. The electron density as a function of RF power.

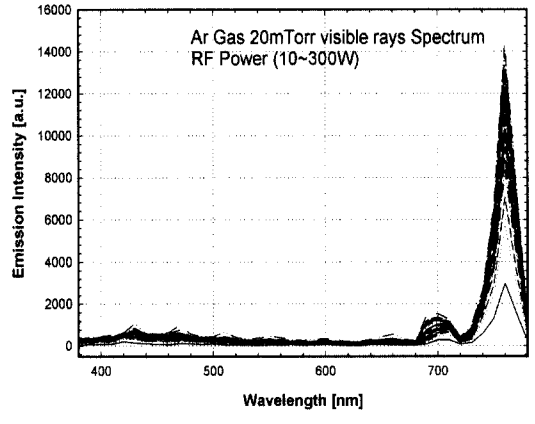
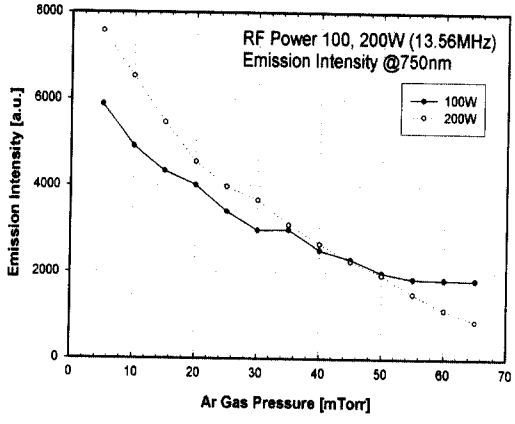


그림 5. Ar gas의 분광 spectrum.
Fig. 5. Spectrum of Ar gas.

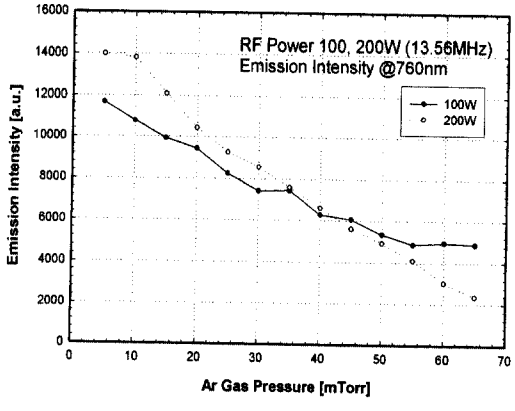
방전 모드의 전환 현상을 알아보기 전에, 일정한 RF 전력에서 Ar 가스 압력 변화에 따른 스펙트럼의 특성에 대하여 살펴보았다. 그림 6 (a)는 안테나에 100와 200 W의 RF 전력을 인가하였을 때, 5~60 mTorr의 Ar 가스 압력을 변화시켰을 때, Ar-I 라인인 750 nm의 emission intensity를

측정한 결과이다. 40 mTorr 이하의 Ar 가스 압력에서는 200 W의 RF 전력이 더 높은 emission intensity를 나타내며, 45 mTorr에서 교차하였다. 그리고, 45 mTorr 이상에서 200 W 보다 100 W의 RF 전력에서 높은 emission intensity가 측정되었다. 한편, 아르곤 가스의 압력이 증가할 수록 emission intensity는 감소한다. 즉, 아르곤 가스압력이 낮을 수록 방전이 발생하기 쉽다는 것을 의미하며, 그림 2의 결과와 일치한다[10].

그림 6 (b)는 760 nm에서의 emission intensity를 측정한 결과를 나타낸다. 760 nm로 하였을 때, emission intensity는 750 nm와 같이 Ar 가스의 압력이 증가할수록 emission intensity는 감소되는 결과를 나타내었다.



(a) 750 nm

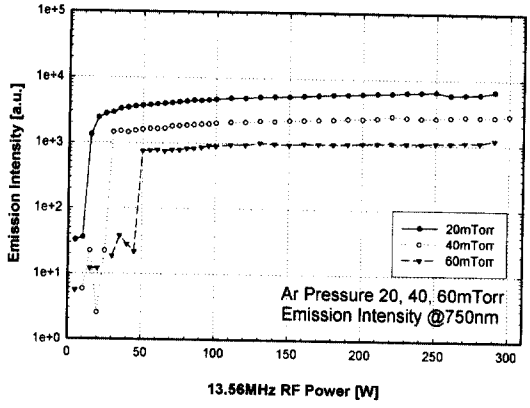


(b) 760 nm

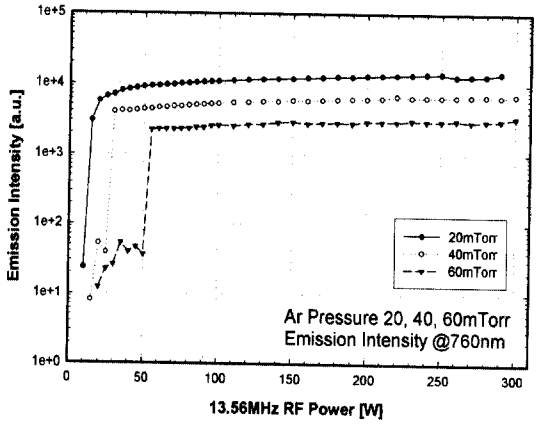
그림 6. Ar gas의 emission intensity.
Fig. 6. Emisson intensity of Ar gas.

3.5 RF power에 따른 광학적 특성

유도결합 플라즈마의 방전 모드가 E-모드에서 H-모드로 전환되는 현상을 알아보기 위하여 일정량의 Ar 가스 압력에서 Ar-I 라인 (750과 760 nm)의 스펙트럼 세기의 변화를 광방출 분광법과 휘도계로 측정하였다. 챔버의 바깥, 원통형 RF 안테나의 중심축 바깥쪽 50 mm 지점에서 측정하였으며, 그 때의 세기는 방전관 중심축상의 원자들이 방출하는 빛을 적분한 값이다. 휘도는 방전관으로부터 1 m 거리에서 휘도계를 사용하여 측정하였다.



(a) 750 nm



(b) 760 nm

그림 7. Ar Gas 압력과 RF 전력 변화에 따른 emission intensity.
Fig. 7. Emission intensity as a function of RF power variation for each gas pressure.

그림 7 (a)는 20, 40, 60 mTorr의 Ar 가스압력과 13.56 MHz의 RF 전력을 10~300 W로 점차적으로 증가시켜 인가하였을 때, 750 nm에서의 광세기를 나타낸다. 일정량의 Ar 가스 압력에서 RF 전력을 점차적으로 증가시키면 광세기가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 방전이 E-모드에서 H-모드로 전환되었음을 보여준다. 모드전환이 이루어진 후 RF 파워를 증가시키면 큰 변화없이 완만하게 emission intensity값이 증가한다. 모드 전환이 일어난 RF 전력의 크기는 Ar 가스의 압력이 20, 40, 60 mTorr일 때, 각각 15, 25, 40 W로 Ar 가스의 압력이 낮을 수록 모드 전환 RF 전력도 낮게 관측되었다. 이 결과도 그림 2와 그림 6의 결과와 일치한다. Ar- I 라인의 세기는 전자밀도에 1차적으로 비례하므로, 빛의 세기의 급격한 증가는 플라즈마 밀도의 급격한 증가를 의미한다.

그림 7 (b)에서는 그림 7 (a)와 같이 유사하게 760 nm에서 E-모드에서 H-모드로의 변환점이 관측되었다. 모드 전환이 일어난 RF 전력의 크기도 15, 25, 40 W로 750 nm와 같이 Ar 가스의 압력이 낮을 수록 모드 전환 RF 전력도 낮게 관측되었다.

그림 8은 RF 전력 변화에 따른 휘도의 변화를 측정한 것으로서, Ar- I 의 변화와 같이 E-모드에서 H-모드로 전환되는 모드 변환점에서 휘도가 증가하였다. 20 mTorr에서는 Ar- I 과 같이 급격하게 휘도가 증가하였으나 40과 60 mTorr에서는 급격하지는 않지만 많은 변화율이 측정되었다.

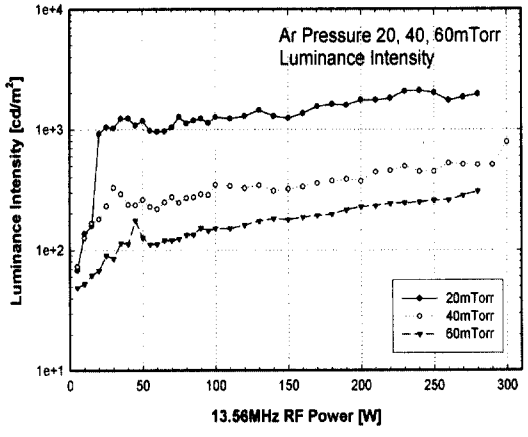


그림 8. Ar gas 압력과 RF 전력에 따른 Ar- I 라인인 750 nm의 휘도.

Fig. 8. Luminance (Ar- I 750 nm) as a fucntion of Ar pressure and RF power.

4. 결 론

Langmuir probe를 이용하여 유도 결합형 플라즈마의 전기적 특성과 유도결합형 방전인 H-방전 중 Ar가스의 E-모드에서 H-모드로의 모드 전환에 대하여 조사하였다. Ar 가스 압력과 RF 전력 변화에 따른 유도결합형 플라즈마의 광방출 분광과 휘도를 측정하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아르곤 가스의 압력이 증가하면 방전관 내부의 농도 변화에 따라 probe의 전류는 감소하는 경향이 있었다. 그러므로, 최대 발광을 위해서는 광학적 특성 측정과 함께 적절한 가스의 압력을 선정하는 것이 중요하다.
2) RF 출력을 변화시키면 저출력에서는 전압변동에 따른 전류의 증가가 적었으나, 출력이 커지면서 전압의 증가에 따라 전류도 크게 증가하는 경향이 나타났다. 이는 일정 이상의 RF 출력에서 플라즈마의 생성이 용이하고, 발광에 필요한 적절한 방전이 일어나게 되므로 적정한 RF 출력이 있어야만 유효한 방전을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
3) 전자 밀도 측정에 있어서도 RF 출력 증가에 따라서 전자 밀도도 동시에 증가하였고, 가스의 압력 증가에 따라 전자 밀도는 조금 감소하였다. 이 또한 적정한 RF 출력에 의해서 발광에 필요한 전자의 밀도 생성이 됨을 알 수 있었다.
4) 플라즈마가 생성된 후 RF 전력을 증가시키면 Ar- I 라인의 세기는 Ar 가스 압력에 따라 각기 다른 RF 전력에서 빛이 갑자기 증가하는 E-모드에서 H-모드로의 모드 전환을 관측할 수 있었으며, 휘도 측정에서도 모드전환점에서 휘도가 증가하였다.
5) 스펙트럼, 휘도 측정에서 모드 전환점이 일치하였다. 또한, Ar 가스 압력이 증가할수록 모드 전환 RF 전력이 증가하는 것을 관찰하였다.

감사의 글

이 본 논문은 에너지 관리 공단에서 시행한 "직관 및 환형 무전극 형광램프의 구조 설계기술" 사업의 지원을 받아 이루어진 논문입니다. 이번 연구를 지원해 주신 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

[1] 林泉, "プラズマ 工學", 朝倉書店, 1987.

[2] 堤井信力, "プラズマ 基礎工學", 內田老鶴圃, 1986.

[3] 박철웅, "플라즈마 온도 측정에 관한 연구", 석사학위 논문, 서울대학교, 1987.

[4] 엄무수, "음극 재질에 따른 직류 플라즈마 시스템의 글로우 방전 특성 및 진단에 관한 연구", 박사학위 논문, 울산대학교, 1996.

[5] 추장희, 구성근, 박기준, 이영우, "무전극 황방전등에서 고압 이원자 황의 자체역전 효과", 대한전기학회지, 49C권, 11호, p. 609, 2000.

[6] 김영철, 이정우, 조영석, "Argon 유도결합 플라즈마의 광학적, 전기적 특성에 대한 연구", New Physics, Vol. 39, No. 3, p. 157, 1999.

[7] 林泉, "プラズマ工學", 朝倉書店, p. 19, 1987.

[8] F. Whitney, "Measurements of inductively coupled RF fluorescent lamp lumen properties", Conference Record of the 1994 IEEE, Vol. 3, p. 1998, 1994.

[9] J. Amorim, H. S. Maciel, and J. P. Sudano, "High-density plasma mode of an inductively coupled radio frequency discharge", J. Vac. Sci. Tech., B9, p. 362, 1991.

[10] I. Weaver, G. W. Martin, W. G. Graham, T. Morrow and C. L. S. Lewis, "The Langmuir probe as diagnostic of the electron component within low temperature laser ablated plasma plums", Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 3, p. 1801, 1999.

[11] 신중홍, 고태언, 김두환, 박정후, "플라즈마 파라메타 측정용 고속 Langmuir 프로브 구동회로 실현 및 적용", 전기전자재료학회논문지, 9권, p. 506, 1996.

[12] 이수부, 박현건, 이석현 "유도결합형 플라즈마 원을 이용한 고선택비 산화막 식각에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, p. 261, 1998.