

레이저 흡수법을 이용한 제논 플라즈마 분석

양종경, 허인성\*, 이종찬\*, 최용성, 박대희  
원광대학교, 금호전기\*

Analysis of Xe Plasma by LAS

Jong-Kyung Yang, In-Sung Her\*, Jong-Chan Lee\*, Yong-Sung Choi, and Dae-Hee Park  
Wonkwang University, Kumho Electric Inc.\*

**Abstract** - We can classify two cases in a way to observe an atom of gas state or a molecule using the laser. First case is way to use dispersion phenomenon like Rayleigh scattering, Thomson scattering, Mie scattering, Raman Scattering. And Second case is a way to use change phenomenon like a LAS (Laser Absorption Spectroscopy), LIF (Laser Induced Fluorescent). In this paper, we have measured the meta-stable density and the distribution by using a LAS method in Xe discharge lamp. The laser absorption spectroscopy (LAS) is useful to investigate the behavior of such species. The xenon atoms in the  $1S_4$  and  $1S_5$  generate excited  $Xe^*(147nm)$  and  $Xe_2^*(173nm)$  dimers in Xe plasma. It is found that the intensity of VUV 147nm emission is proportional to that of the IR 828nm emission, and the VUV 173nm emission is roughly proportional to that of the IR 823nm emission. The laser is used CW laser that consist of AlGaAs semiconductor and energy level is used 823.16nm wavelength. We measured signal of monochromator from the lamp center while will change a discharge electric current by 6mA in 3mA and calculated meta-stable state density of a xenon atom through a measured value.

1. 서 론

형광램프는 높은 효율과 연색성 때문에 백열전구 및 다른 조명 보다 많이 쓰여지고 있다. 형광램프는 수은(Hg) 여기에 의해 254 nm의 VUV(vacuum ultra violet)를 방출시키고 이 VUV를 통해 형광체를 여기시켜 가시광선을 방출하는 원리를 갖고 있다. 이러한 형광램프의 방광 메커니즘에서 가장 큰 문제 중 하나로 환경문제의 원인이 될 수 있는 수은을 들 수 있다. 따라서 수은을 사용하지 않는 광원시스템에 대한 요구가 증대되고 있으며 이를 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

VUV의 대체인 수은을 대체할 물질로 제논(Xe), 중수소( $D_2$ ), 일산화탄소(CO), 이산화탄소( $CO_2$ ) 등이 있다. 이 가운데 제논은 수은과는 달리 친 환경적이고, 주위 온도에 의한 광 방출 특성에 영향을 주지 않으며 UV부터 가시광선 까지 넓은 광 특성을 가지고 있다. 하지만 제논의 VUV 방사의 효율과 강도가 수은보다 낮기 때문에 제논의 형광 램프의 방사 메커니즘을 연구가 요구되어진다[1].

제논에서의 VUV는 공명선 147nm과 분자선 173nm이 방출한다. 그중 173nm는 147nm보다 강도가 강하기 때문에 형광체의 가시광선 변환 효율인 양자 효율이 더 높다. 분자선인 173nm는 823.16nm와 상관관계에 있다. 즉 적외선 823.16nm의 강도는 VUV 173nm의 강도에

비례한다. 또한 제논 원자 중 준안정 상태는 긴 수명을 가졌기 때문에 중요한 역할을 한다.

본 논문에서는 20Torr의 제논 가스를 넣은 방전관 내부 중심에서의 외벽까지 제논 원자의 준안정 상태의 공간적 밀도 분포와 방전 전후 시간에 따른 준안정 상태의 밀도 변화를 IR-LAS (IR-laser absorption spectroscopy) 사용하여 입사 전과 입사 후의 레이저 흡수율을 측정하여 준안정상태의 밀도를 측정 및 계산을 하였다. 이러한 실험적 결과는 고성능 및 고효율 무수 은 램프 광원인 제논 형광램프의 개발에 필수 요소이다.

2. 실험 방법

그림 1은 IR 레이저 흡수 분광법에 의해 제논 원자의 준안정 밀도를 측정하기 위한 계략도이다. 램프는 파이렉스 유리관으로 만들었으며, 직경 30 mm $\Phi$ , 내경 26mm $\Phi$ , 니켈로 제작한 두개의 전극이 램프 내부에 60mm 간격으로 있다. 가스는 제논 20mTorr를 주입하여 봉입하였다. IR 레이저 흡수 분광장비의 레이저는 IR 레이저 광원으로 사용되어 지고 있는 가변 다이오드 레이저 (Sacher Lasertechnik, TEC500)를 사용하였다. 압전소자가 포함된 격자와 동조 거울로 이루어져 있으며, 파장은 810 nm부터 840 nm까지 압전 소자에 전압을 조절하여 파장을 선택할 수 있다. 레이저 컨트롤러의 온도는 냉각기에 의해 조절된다. 램프에 투과하는 레이저는  $1s_5$ 와  $2p_6$  사이의 에너지인 823.16 nm로 설정하였다.

He-Ne 레이저와 개구는 IR 레이저의 정렬을 위해 사용하였고, 램프가 켜진 후 ND(Neutral Density) 필터를 사용해 IR 레이저의 강도를 조절하였다. 램프를 통과한 IR의 강도는 분광기(Jasco, CT-10)로 측정하여 광전자 증폭관(Hamanatsu, R955)으로 증폭하고 오실로스코프(Tektronix P5210)로 측정하였다. 측정위치는 램프 중심에서 외벽까지 1mm 간격으로 9회 8mm까지 측정하였다. 그리고 측정된 값을 통해 제논 원자의 준안정 상태의 밀도는 계산하였다.

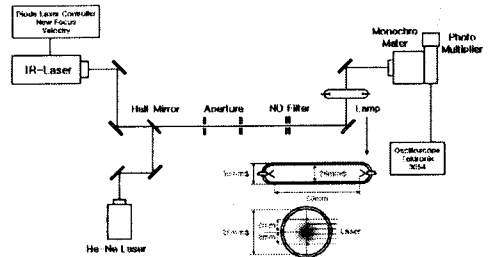


그림 1. IR 레이저 흡수 분광법 실험장치  
Fig. 1 Experimental equipment of IR LAS

그림 2에서 제논 램프 구동회로의 등가회로를 나타내었다. 콘덴서는 전압원(Matsusada Precision Inc., HAR-3R400)에 의해 충전되고, 콘덴서의 전압은 MOSFET의 주기적 스위칭에 의해 결정된다. 주파수와 펄스폭은 MOS-FET로 조절했다. 제논 램프는 펄스에 의해 방전이 되며, 10 kHz의 주파수, 10  $\mu$ s의 펄스폭, 1.1Kv의 피크 전압과 6 mA의 피크 전류를 램프에 인가하였다.

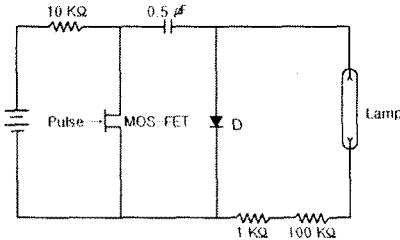


그림 2. Xe Lamp 구동회로의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of Xe Lamp driving circuit

이 실험에 사용한 IR 레이저 흡수 분광은 단순한 두 개의 에너지 준위  $E_1$ 과  $E_2$ 에 존재하는 원자의 밀도를 각각  $N_1$ 과  $N_2$ 라고 가정했을 때 ( $E_1 < E_2$ ,  $N_1 < N_2$ ),  $h\nu = E_1 - E_2$ 의 에너지를 가지고 빛을 입사시키면 빛의 에너지를 흡수한 하준위 원자들은  $E_2$ 로 천이 한다. 두개의 특정 에너지 준위 차에 해당하는 파장의 레이저를 입사하여 원자에 의한 흡수율을 측정한다. 이러한 원자의 하준위 밀도를 측정하는 것이 레이저 흡수법의 기본 원리이다. 이러한 레이저 흡수 분광법은 반도체 레이저 빛을 이용한 측정으로 준위의 선택성이 좋기 때문에 높은 정밀도를 가지고 있으며, 측정 대상의 변형 없으며, 쉽게 공간적 밀도 분포도 측정이 가능하다 장점을 가지고 있다[2].

그림 3에서 제논 원자와 분자에서의 에너지 레벨에 따른 공명선 147nm과 분자선 173nm의 상관관계가 있는 적외선 828nm와 823.16nm의 천이 라인을 나타낸 그래프이다. 형광램프에서는 형광체의 가시광선 변환 효율인 양자 효율의 개선을 위해서 제논의 공명선 147nm과 더불어  $Xe_2^+$ 로부터 나오는 분자선 173nm 부근의 연속 스펙트럼을 적극적으로 이용해야 한다. 공명선인 147nm는 적외선인 828.01nm와 분자선인 173nm는 823.16nm와 상관관계에 있다. 즉 적외선 823.16nm의 강도는 VUV 173nm의 강도에 비례하며, 적외선 828.01nm의 강도는 VUV 147nm의 강도에 비례한다[3].

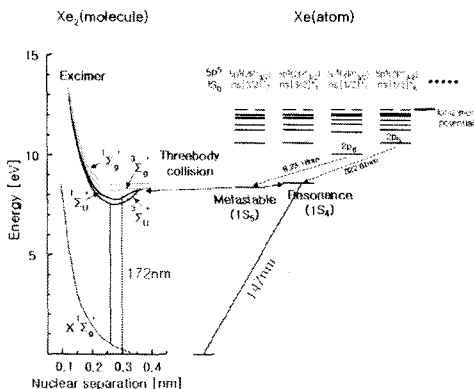


그림 3. 제논 가스의 에너지 레벨  
Fig. 3 The energy level of Xe gas

따라서 820nm에서 830nm으로 파장을 가변할 수 있는 반도체 레이저를 이용하였다. 램프 내에서 방전 시 발생하는  $1s_5$  준안정상태의 밀도를 알아보기 위해 램프에 투과하는 레이저는  $1s_5$ 와  $2p_6$  사이의 에너지인 823.16 nm로 설정하여 입사 시켜 주었고,  $1s_5$  준안정 원자는 레이저로부터의 광자를 흡수하여,  $2p_6$  레벨로 여기 되었다. 측정 대상의 준안정 상태의 밀도를 식 (1), (2)으로 구할 수 있다.

식 (1)에서 흡수 상수인  $k$ 는 레이저 주파수  $\nu$ 와 시간  $t$ 의 함수이다. 또 기체 분자의 경우 열운동과 기체 분자들과의 충돌에 의해 흡수 프로필이 퍼지고 중심파장이 쉬프트 되기 때문에  $\nu = \nu_0$ 일 때 준안정상태의 밀도를 기준으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 레벨  $1s_5$ 과  $2p_6$ 의 두 레벨의 차의 파장인  $\lambda_{21}$ (=823.16nm), 통계적 무게  $g_1, g_2$ (=5), 공명상태에 있는 원자의 수명시간의 역수 값  $A_{21} = 2.3 \times 10^7 S^{-1}$ 을 다음 식에 대입하면 실용적 단위로 변환된다. 이 때 레이저 주파수 변화에 따른 흡수 프로필의 FWHM (Full width at Half Maximum)은 4.01GHz의 값을 얻었다.

$$N_1(t_0) = \frac{g_1}{g_2} \frac{1}{A_{21}} \frac{8\pi}{\lambda_0^2} \int_0^\infty k(\nu, t_0) d\nu \quad (1)$$

$$\int_0^\infty k(\nu, t) d\nu = ck(\nu_0, t) \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 램프전류 3mA에서의 전류, 전압을 측정한 그래프로 10  $\mu$ s의 펄스폭, 1.1Kv의 피크 전압을 확인할 수 있었다.

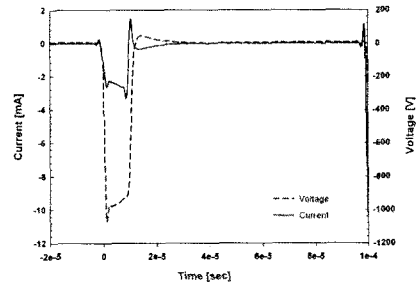
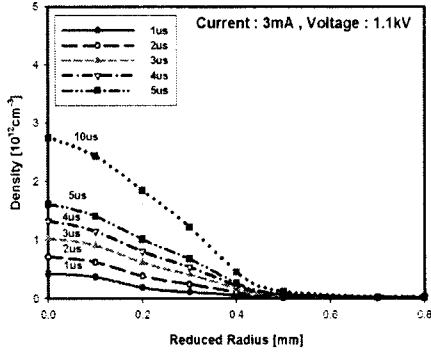


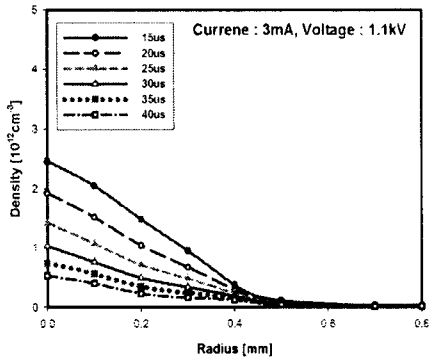
그림 4. 3mA일 경우 방전램프의 전압, 전류

Fig. 4 The current and voltage of Discharge Lamp in 3mA

레이저 흡수법을 통해 시간에 따른 준안정 상태의 밀도 특성은 그림 5와 같이 확인할 수 있었다. 밀도 계산 결과 램프 중심에서 가장 높은  $2.8 \times 10^{12} cm^{-3}$ 의 밀도를 보였고, 중심으로부터 3mm 이후부터 급격하게 밀도가 감소하였다. Turn-on 후 10 $\mu$ s까지 계속 밀도는 증가한다. Turn-on 과정에서의 준안정 상태의 밀도 증가는 직접적인 여기에 의해서 진행되어 진다. Turn-off 상태인 10 $\mu$ s 이후부터 계속적으로 밀도가 감소하였다. 이는 방전이 시작됨에 따라 이온화가 증가로 플라즈마 전자 밀도가 증가하였으며 그로 인해 173nm의 자외선 방출에 직접적인 영향을 주는 828.01nm의 meta-stable 상태의 전자가 증가하였다.



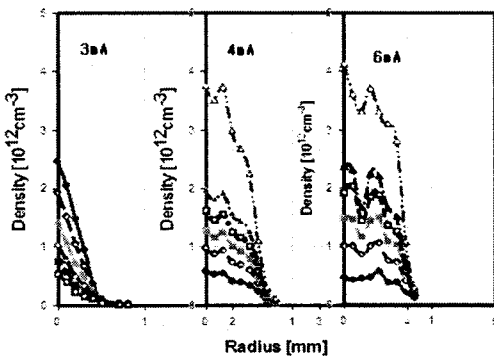
(a) Xe 준안정 상태 밀도 (1 $\mu$ s~10 $\mu$ s)



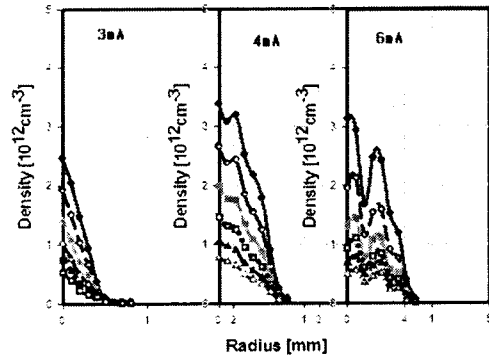
(b) Xe 준안정 상태 밀도 (15 $\mu$ s~40 $\mu$ s)

그림 5. 시간 변화에 따른 Xe 준안정 상태의 밀도 특성  
Fig. 5 The density properties of Xe metastable state according to change in time

그림 6의 4mA에서도 3mA와 같은 현상이 나타났으며 3mA보다 전체적 밀도가  $3.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 로 증가하였으며, 램프 외벽으로 3mm까지 준안정 상태의 밀도가 증가하다 점차 감소하였다. 전체적인 밀도는 6mA에서  $4.4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 로 피크값을 보이며 전체적인 밀도가 증가하였다. 6mA에서는 10 $\mu$ s이후인 Turn-off 상태 이후에도 밀도가 증가하였다. Turn-off 상태 이후의 밀도의 증가는 전자와 이온 사이의 재결합 때문으로 여겨진다.



(a) 방전 전류에 따른 준안정 상태 밀도(1 $\mu$ s~10 $\mu$ s)



(b) 방전 전류에 따른 준안정 상태 밀도(15 $\mu$ s~40 $\mu$ s)

그림 6. 방전 전류 변화에 따른 준안정 상태의 밀도 특성  
Fig. 6 The density properties of metastable state according to change in discharge current

#### 4. 결 론

본 논문에서는 20Torr의 제논 가스를 넣은 방전관 내부 중심에서의 외벽까지 제논 원자의 준안정 상태의 공간적 밀도 분포와 방전 전, 후 시간에 따른 준안정 상태의 밀도 변화를 IR-laser absorption spectroscopy (IR-LAS) 사용하여 입사 전과 입사 후의 레이저 흡수율을 측정하여 준안정상태의 밀도를 측정 및 계산을 하였다. 방전 전류를 증가함에 따라 Xe 준안정 상태인 823.16nm의 흡수가 증가함으로써 173nm의 자외선 증가 특성을 확인할 수 있었다. 또한 방전관 외벽으로 감에 따라 재결합 특성이 증가하여 플라스마 밀도는 감소하는 특성을 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력 연구센터 육성, 지원사업(1-2004-0-074-0-00)에 의하여 작성되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Noda, S, Kinoshita, K, Nakagawa, H, Okigawa, M, Tatsu mi, T, Inoue, M, Sekine, M "Measurement and Comparison of EEDF Profiles for Various Types of Plasmas Using OES", IEEJ, Vol.20, pp235-240, 2002
- [2] Park i Duck, "Measurement of Xenon excited (Xe\*) density in AC-PDPs Plasma by laser absorption spectroscopy", p33, 2003
- [3] Hideki Motomura, Ryota Wada, Masafumi Jinno, Ka Hong Loo and Masaharu Aono, "Temporal Behavior of Radial Distribution of Xenon Metastable Atoms in Xenon Low Pressure Lamps", 10th International Symposium on Science and Technology of Light Sources, July 18th-22nd, p194, 2004