

## 레이저를 이용한 방전 플라즈마중의 전계측정 기술 동향

최영욱 M. Bowden\* 村岡克紀\*  
한국전기연구소 \*九州大學總合理工學研究所

### Technical tendency of electric field measurements in glow discharge plasmas using laser spectroscopy

Y. W. Choi M. Bowden\* K. Muraoka\*

KERI. \* Interdisciplinary Graduate School of Engineering Science, Kyushu University

**Abstract** - Direct measurements of electric fields in a glow discharge are difficult because the measurement method should be sensitive to the electric field and non-intrusive. Laser spectroscopy is very suitable in that it is non-intrusive and allow in-situ measurements to be made. In this report, the measurement techniques of electric fields in glow discharge using laser spectroscopy were described.

은 전계에 의해 원자, 분자의 에너지 준위가 변화하는 Stark 효과를 이용한 것으로 플라즈마의 임피던스 변화를 측정하는 LOG (Laser optogalvanic)법과 여기된 에너지 상태에서 하준위로 천이 할 때 발생하는 형광을 관찰하는 LIF(Laser induced fluorescence)법이 개발되어 있다. 두 측정법 모두 비접촉인 방법으로 직접측정이 가능하여 probe로 측정할 수 없었던 문제를 해결하였다. 특히 LIF법은 시간, 공간적 분해능( $\sim 10$  ns,  $\sim 100 \mu\text{m}^{-3}$ )이 지극히 우수하여 1 - 10 mm 의 이온쉬스 공간내의 전계 분포를 측정해 내는데 손색이 없는 방법이자 유일한 수단으로 알려져 있다. 레이저를 이용한 전계측정 연구는 비교적 짧은 역사를 가지고 있으며 주로 미국, 프랑스, 일본에서 연구를 진행하여 왔다.

#### 1. 서 론

박막의 제작과 에칭 등의 반도체 프로세스에 이용되는 플라즈마는 저압 글로 방전에서 생성된다. 이 플라즈마 내부의 전극과 용기의 벽면근처에 존재하는 이온쉬스의 전계분포는 전자에너지 분포의 제어와 물리 화학적 반응과정의 모델링에 중요한 매개변수가 된다. 그러므로 이 쉬스 부분의 전계의 해석은 많은 연구자들의 관심사가 되어왔다.

본고에서는 현재까지 개발된 레이저 분광법을 이용한 방전 플라즈마중의 전계측정법과 그 연구동향을 소개하고자 한다.

쉬스에 대한 이론적 고찰은 1920년대 Langmuir에 의해 시작되었고<sup>1)</sup> 플라즈마중의 입자밀도, 전자 온도 등을 측정하기 위한 실험적 연구로서는 일반적으로 Langmuir probe를 사용하여 왔다. 그러나 자세한 전계분포의 파악이 필요한 이온 쉬스 부분에 대해서는 probe측정의 한계가 있어 새로운 측정법의 모색이 필요하게 되었다. 이러한 와중에 1960년에 루비를 이용하여 처음으로 레이저 발진에 성공하여 레이저 광선을 공학연구에 적용할 수 있는 계기가 되었다. 이어서 200 - 900 nm의 파장을 자유 자재로 만들 수 있는 가변파장 색소 레이저의 출현으로 레이저 진단연구의 획기적인 발전을 가져오게 되었다. 현재에는 측정대상에 따라 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, YAG, Excimer, 반도체, 알렉산더 레이저 등도 레이저 진단 연구에 쓰여지고 있다.

#### 2. Stark 효과와 전계

레이저 분광법으로 전계를 구하기 위하여 Stark 효과를 이용한다. Stark 효과는 1913년에 J. Stark가 수소원자에서 처음 발견하였다. Stark 효과라는 것은 전계의 존재로 인하여 원자, 분자의 에너지 준위가 분열하는 것(1차 효과, Stark splitting), 전계의 존재로 인하여 에너지 준위가 변위(shift) 되는 것(2차 효과, Stark shift), 전계가 없는 상태에서는 쌍극자 천이가 금지되어 있는 것이 전계의 존재로 인하여 천이가 허용되는 것(Stark mixing)의 3종류가 있다. Stark 효과를 레이저 측정법으로 검출하기 위해서는 가변파장 레이저(색소 레이저)를 사용하여 전계로 인하여 분열되거나 변위, 혼합된 미세한 에너지 준위에 상응하게 레이저의 파장을 조정하여 여기하므로써 이에 따라 관측되는 LOG

1980년대에 들어서 레이저 분광법이 방전개스중의 전계측정에 응용되기 시작하였다. 이 측정기술

또는 LIF 스펙트럼에 대해서 전계에 대비하는 이론적 계산 내지는 교정을 하면 전계가 얻어진다.

Stark 분열의 대표적인 이론적 계산의 예로서 수소원자에 대하여 1928년 J. S Foster에 의해 발표되었다. 이 계산 결과는 60여년이 지나서야 실제로 실험하여 얻어진 결과와 대비되어 전계를 구하는데 사용되었다. 그림 1은 He 원자의 주양자수 11에 대한 전계계산의 예를 보이고 있다. Rydberg 상태의 He 원자의 계산 결과는 수소원자의 계산결과와 거의 일치하는 것으로 확인되었다. 그림 1에서 각 곡선은 방위 양자수(위로부터  $p, n, m, l, k, i, h, g, f, d, s$ )를 나타내며 전계가 증가할수록 방위 양자수간의 에너지가 거의 직선적으로 분열되는 것을 볼 수 있다. 또한 개개의 에너지준위가 전계에 대하여 변위하는 것도 쉽게 알 수 있다.

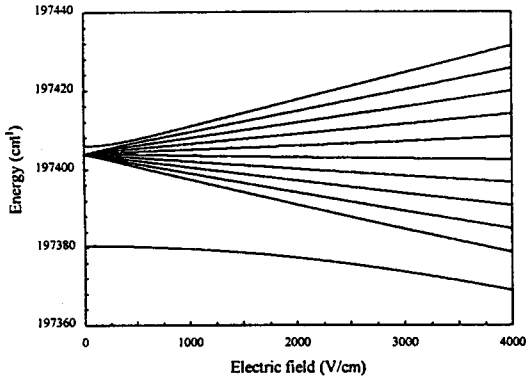


그림 1 He 원자의 Stark 분열계산에 ( $n=11$ , singlet)

### 3. 실험장치

그림 2는 지금까지 대부분의 연구자들이 레이저 분광법 (LOG, LIF) 으로 전계측정에 사용한 실험장치이다. 스테인레스 진공용기와 확산펌프를 사용하여 진공을  $10^{-6}$  Torr 정도로 뽑고 방전가스(He, H, Ar,  $BCl_3$  등)를 유입시키며 일정한 압력으로 유지한다음 전원(고주파, 직류, 마그네트론 등)을 인가하여 플라즈마를 생성시킨다. 그 후 여기용레이저(Excimer,  $N_2$ , Yag)를 사용하여 가변파장 색소레이저의 출력을 플라즈마에 입사시킨다. 레이저 광선은 자기양자수의 변화  $\Delta m_j=0$ 의 천이가 되도록 전극면에 대해서 수직으로 직선 편광을 시켜고 원통렌즈를 통하여 입사시켜  $0.3 \times 10$  mm 정도의 빔이 되도록하여 LIF 측정시 형광검출이 쉽도록 한다. 사용되는 레이저 광선의 스펙트럼 폭은 보통 2-3 pm 이다. LIF 신호는 수직으로 촛점렌즈를 통하여 검출하고 분광기를 거쳐 광전자 증배관에서

전기신호로 변환되고 적산기(Boxcar)를 통해 컴퓨터(Gpib)로 입력된다. LOG 신호는 플라즈마의 임피던스 변화를 RC 필터회로로 검출하여 적산기를 통하여 컴퓨터로 입력된다.

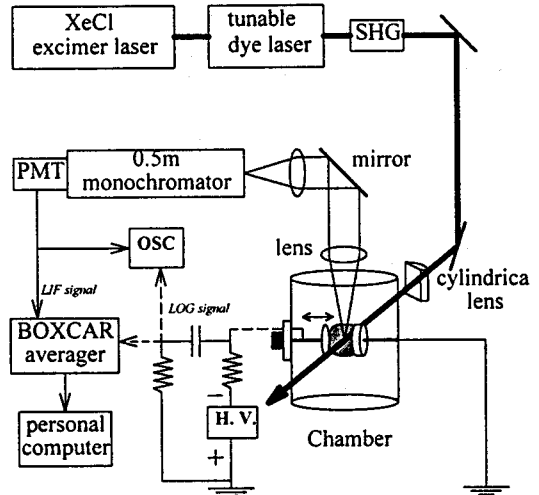


그림 2 레이저 분광법을 이용한 전계측정 실험 장치

### 4. LOG 분광법

Optogalvanic 현상은 F. M Penning에 의해서 1928년에 처음으로 관찰되어 그 후 1984년 J. E. Lawler에 의해 방전가스중의 전계측정에 이용되었다. Optogalvanic 현상은 입사된 광자에너지(레이저 광선)에 의해 여기된 원자가 다시 하준위로 떨어질 때 장수명의( $1 \mu s$  이상) 방사광으로 인한 전자충돌로 인해 전리가 일어나 방전공간의 임피던스가 변화하는 것이다. 이 임피던스의 변화로 인해 전류 및 전압이 변화하는 것을 전계측정에 이용할 수 있고 그 예를 그림 3에 나타내었다. He 직류 플라즈마(압력 7.6 Torr, 전압 220 V)에 대한 LOG 신호로서 전극으로부터 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 mm의 거리에서 측정된 결과이다. 전극에서 멀어질수록 Stark 분열폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 그림 1의 계산과 대응하여 전계계산을 하면 1610, 1380, 1140, 910 V/cm가 된다.(오차 10% 이내)

### 5. 레이저 유기 형광법(LIF)

레이저 유기 형광법은 원자, 분자, 이온등의 에너지 준위차에 공명하는 레이저 광선으로 입자를 여기하여 여기된 입자가 낮은 에너지 준위로 천이할 때 발생하는 형광을 관측하는 것이다. 이 LIF법은 전계측정에도 응용되어  $BCl_3$ , He, H, Ar 가스류의 방전에 대해서 전계측정법이 개발되었다. 그림 4는  $BCl_3$  방전에 대해서 개발된 Stark 혼합법에 의한 전계측정법의 예이다.<sup>2)</sup> 여기서  $e, f$ 의 준위는 A형 2중항분리로 되어있고 서로다른 패리티를 가지고 있

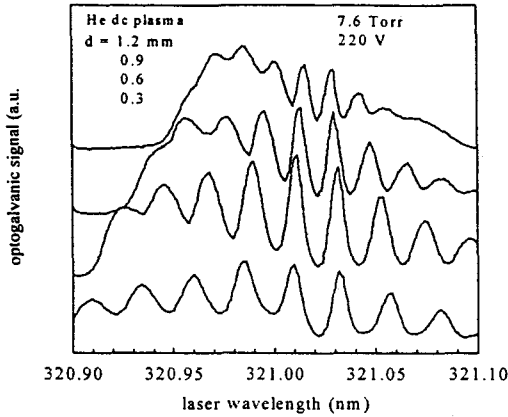


그림 3 He ( $n=11$ , singlet)의 Stark 분열의 관측례

다. 그러나 전계가 걸리면  $ef$  준위간에 양자상태의 혼합이 일어나 통상적으로 관찰할 수 없는 금지된 천이를 경유한 형광이 발생한다. 여기서 허용선(R)과 금지된선(Q)의 형광의 비로 전계를 구할 수 있다.

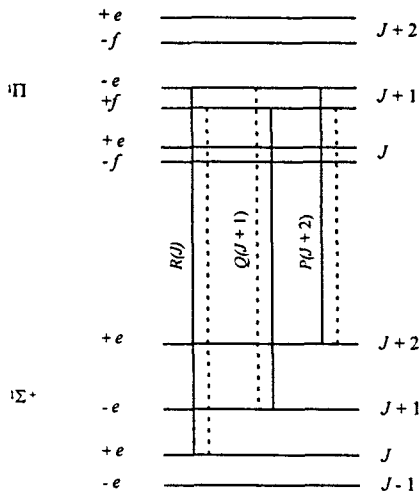


그림 4  $1\Pi - 1\Sigma^*$  천이도

그림 5는 He방전에 대해 Stark 분열과 원자의 충돌을 이용하여 개발된 전계측정 원리이다.<sup>3)</sup> He 원자의 준안정 준위에서 주양자수  $\sim 8$  이상 (Rydberg 원자)으로 여기하면 Rydberg 원자는 전계에 민감하여 Stark 분열을 일으킨다. 이 때의 분열 스펙트럼은 형광의 수명이 길어 직접측정이 불가능하나 원자의 충돌로 인해 발생하는 다수의 선스펙트럼중 Stark 분열을 관찰할 수 있는 스펙트럼 ( $4d^3D \rightarrow 2p^3P$ , 447.1 nm)을 검출하므로써 전계의 측정이 가능해진다. 위의 두 방법은 고주파, 직류 마그네트론 방전의 전계측정 및 현상분석에 응용되었다.<sup>4,5,6)</sup>

최근에는 위의 원리를 이용하여 Ar 원자에 대해서도 전계측정 에너지 준위가 개발되었다.<sup>7)</sup>

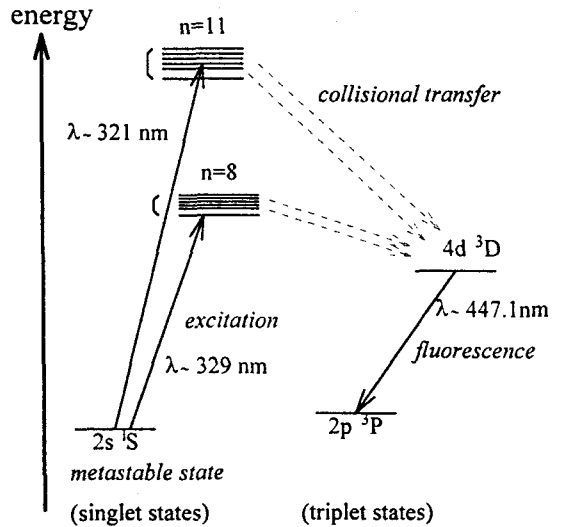


그림 5 He LIF법에 대한 에너지 준위도

## 6. 결 론

이상에서 레이저 분광법을 이용한 쉬스층의 전계 측정법을 간단히 소개하였다. 앞으로도 이 방법을 적용할 수 있는 개스류의 확장과 측정압력의 하한을 개선해 나가면서 프로세스 플라즈마의 전계측정을 위한 표준적 수법으로 확립 될 수 있다고 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] I. Langmuir, "The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths," Phys. Rev. Vol. 33, pp. 954 - 989 (1929).
- [2] C. A. Moore, G. P. Davis and R. A. Gottscho, "Sensitive, Nonintrusive, *In-Situ* Measurement of Temporally and Spatially Resolved Plasma Electric Fields," Phys. Rev. Lett., Vol. 52, No. 7, pp. 538 - 541 (1984).
- [3] K. E. Greenberg and G. A. Hebner, "Electric-field measurements in 13.56 MHz helium discharges," Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 24, pp. 3282 - 3284 (1993).
- [4] M. D. Bowden, Y. W. Choi, K. Muraoka and M. Maeda, "Measurements of sheath electric fields in a high pressure helium radio frequency discharge," Appl. Phys. Lett., Vol. 66, No. 9, pp. 1059 - 1061 (1995).
- [5] Y. W. Choi, M. D. Bowden and K. Muraoka, "Analysis of sheath electric fields in a radio frequency discharge in helium," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, No. 11A, pp. L1459 - L1461 (1996).
- [6] Y. W. Choi, M. D. Bowden and K. Muraoka, "A study of sheath electric fields in planar magnetron discharges using laser induced fluorescence spectroscopy," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, No. 11, pp. 5858-5861 (1996).
- [7] Y. W. Choi, M. D. Bowden and K. Muraoka, "Electric field measurements in an argon glow discharge using laser spectroscopy," Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 10, pp. 1361- 1363 (1996).