

# Hollow cathode discharge에서 자발적 진동의 광검류 신호 측정

이준화†

테크노전자연구소, 사람과 사람들  
(논문접수일 : 2002년 10월 11일)

## Observation of spontaneous oscillation of optogalvanic signal in a hollow cathode discharge

Jun-Hoi Lee†

Laboratory of Techno Electronics Industries Co., LTD,  
People and People CO., LTD, Deajeon 300-716  
(Received October 11, 2002)

### 요 약

아르곤 방전 기체의 음 글로우 영역에서 자발적 진동의 광검류 신호를 관찰하였다. 자발적 진동의 광검류 신호는 3 mA 보다 낮은 방전 전류에서 나타난다. 준안정 준위의 원자 밀도 변화와 1s-2p 전이의 방출 세기를 동시에 측정한 결과, 자발적 진동 신호를 발생시키는 메커니즘 중의 한 가지는 느린 전자의 충돌에 의한 준안정 준위 원자의 단계적 이온화이다.

**주제어** : 단계적 이온화, 자발적 진동, 음 글로우

### Abstract

The spontaneous oscillations in the optogalvanic signals are observed in negative glow region of Ar hollow cathode discharge. The spontaneous oscillations in the optogalvanic signals are observed at low discharge currents less than about 3 mA. Based on the simultaneous measurements of both the density variation of metastable atoms and emission intensities of the 1s-2p transitions, one of the possible mechanisms for the spontaneous oscillation is considered to be related to the stepwise ionization of the metastable atoms due to collisions with slow electrons in the discharge.

**Key Words** : Stepwise ionization, Spontaneous oscillation, Negative glow

## 1. 서 론

방전관 내의 바닥상태 원자는 전자와의 충돌에 의해 들뜬 상태에 많이 분포하게 된다. 들뜬 상태에서 자발적 방출이 일어나서 바닥상태로 떨어지면서 빛을 발산한다. 이 상태에서, 원자의 전이 에너지에

해당하는 파장을 가진 레이저빔을 입사시키면 공명 흡수에 의해 전자가 높은 준위로 전이하고, 이때 원자의 상태 밀도 분포가 평형 상태로부터 일시적으로 벗어나 이로 인한 방전 특성 (전압, 전류)의 변화가 생긴다 [1,2]. 이 변화가 방전의 전기 전도도의 증가 또는 감소로 나타날 때 이 변화를 광검류 효과

(optogalvanic effect)라 한다. 방전에서 바닥 상태의 원자보다는 준안정 준위 원자가 훨씬 적지만 바닥 상태 원자의 이온화보다는 준안정 준위 원자를 이온화할 수 있는 전자들이 상당히 많이 존재한다 [3]. 그러므로 준안정 준위로부터의 전자 충돌 이온화가 바닥 상태로부터의 이온화에 비하여 증가되므로 불활성 기체 방전에서 준안정 준위는 중요하며 광검류 효과 생성에 큰 영향을 준다. 방전 기체의 이온화율이 증가하면 방전 저항은 감소하므로 이 작용이 정전압 (constant voltage) 방식에서 일어난다면 방전 전류는 증가한다. 만약 정전류 (constant current) 조건에서 일어난다면 방전 기체의 이온화율 증가와 함께 방전 전압은 감소할 것이다. 반면에 방전 기체의 이온화율이 감소하면 방전 저항은 증가하므로 방전 전류는 감소 (정전압에서)하고 방전 전압은 증가 (정전류에서)한다. 즉, 방전의 이온화율 변화가 방전 저항 변화를 일으키고 방전 회로의 전기적 특성을 변화시켜 광검류 효과가 나타나게 된다.

$1s_5-2p_6$  전이의 공명 주파수에 해당하는 펄스 레이저를 사용하여 네온 기체가 들어 있는 속이 빈 원통형 음극 방전 (hollow cathode discharge : HCD)의 광검류 신호에서 자발적 진동과 감쇠 진동(damped oscillation)이 관측되었다 [4-8]. Ca/Ne HCD의  $1s_5-2p_6$  (614.306 nm) 전이에서 유사한 자발적 진동 (spontaneous oscillation)과 감쇠 진동은 전적으로 음저항 (negative resistance) 특성과 같은 전기적 특성에 의해 나타난다고 설명되고 [5], 알곤 방전 기체의 글로우 방전관에서 감쇠 진동과 자발적 진동이라 불리는 자체 진동 (self-oscillation)이 관측되었다 [6]. 진동 형태의 광검류 신호는 음저항 영역에서 100  $\mu$ s 보다 긴 응답 시간을 갖고 있어 진동 효과는 전형적인 광검류 신호와 Penning 이온화 효과에 의한 광검류 신호를 같이 해석해야 한다고 생각하였다. 전극이 없는 고주파 방전 (radio-frequency discharge)에서도 진동 형태의 광검류 신호가 관측되었는데 진동의 원인은 느린 전자와 충돌한 준안정 준위 원자의 단계적 이온화 (step ionization) 과정으로 설명되었다 [8].

본 연구에서도 알곤의 801.479 nm ( $1s_5-2p_6$ ) 전이에서 자발적 진동 형태의 광검류 신호가 관측되었

는데 이는 Penning 이온화 효과와 관련이 있는 광검류 신호와는 아주 다른 형태의 진동이다. 진동의 특성을 알아보기 위해 플라즈마의 방출 신호 (emission signal)와 흡수 신호 (absorption signal)를 관측하였다. 방출 신호와 준안정 준위 원자의 밀도 변화에서 진동하는 신호가 관측되었는데 이는 느린 전자와 충돌한 준안정 준위 원자의 단계적 이온화가 진동의 가능한 원인중의 하나라는 것을 의미한다.

## 2. 실험 방법

실험에서 사용한 속이 빈 공간 음극 방전관 (Cathodeon Ltd., model 3QQAY/Gd)에는 알곤 기체로 채워져 있으며 기체 압력은 5~8 mbar이다. HCD tube의 전원으로서는 0~1 kV, 0~40 mA의 범위의 직류 전원 장치 (Bertan Associates, Inc., model Series 105)를 사용하였으며, 10 k $\Omega$ 의 안정 저항이 HCD tube 안에 있는 두 개의 전극에 각각 직렬로 연결되어 있다. Hollow cathode 금속으로는 가돌리늄 (Gadolinium: Gd)을 사용하였고 내경은 2 mm이고 길이는 20 mm이다. HCD는 원통형 음극을 사용하며 원통형 음극을 사용하면 음극 내부에 글로우 방전 (glow discharge)의 여러 영역 중 음극 암흑부 (cathode dark space)와 음글로우 (negative glow) 영역만을 만들 수 있고, 낮은 전압으로 방전을 유지할 수 있다. 또한 충돌에 의한 전자의 많은 생성이 플라즈마 안의 원자를 들뜨게 하고 이온화 시키므로 HCD는 원자 분광학에서 원자 증기 발생원 또는 원자 스펙트럼용 광원으로 널리 쓰이고 있다.

본 실험에서는 중심 파장이 810 nm인 다이오드 레이저 (Environmental Optical Sensors Inc., model CU-2001-A)를 사용하였고, 레이저빔의 출력을 측정하기 위해 powermeter (Newport Corporation, model 1815-C)가 연결된 photodetector (Newport, model 818-SL)를 사용하였다. 방출 신호 (emission signal)는 두 개의 양볼록 렌즈 ( $f=25$  mm, 지름 25 mm)를 사용하여 photodiode로 측정하였다.

광검류 신호는 방전관 안의 알곤 기체가 레이저빔을 흡수할 때 방전관의 두 전극 사이의 전압 변화에 의해 발생된 신호를 디지털 오실로스코프 (Hewlett Packard, model 54600B)로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

광검류 신호는 전기 전도도의 변화로 인한 전압 변화의 형태로 측정된다. 방전 전류가 3 mA보다 작을 때 광검류 신호에서 자발적 진동이 관측된다. 자발적 진동의 메커니즘을 이해하기 위하여 방출 신호와 흡수 신호를 측정하는 실험을 하였다. 전형적인 자발적 진동 신호는 그림 1(b)와 같다. 이와 유사한 진동이 전극이 없는 마이크로 고주파 방전에서 관측되었다 [8].

그림 1(a)와 (b)는 방전관에 레이저빔을 입사시키지 않은 상태에서 동시에 관측한 방출 신호와 자발적 진동이다. 방출 신호는 주로 들뜬 준위에서  $1s_5$  준위들로의 자발적 방출 때문에 나타나므로 들뜬 준위의 밀도 변화를 나타낸다. 그림 1(a)의 방출 신호는 그림 1(b)의 전압 신호가 최대치에서 감소하기 시작할 때부터는 더 빨리 증가한다. 방출 신호가 증

가하는 것은  $2p$  준위의 원자수가 증가 하였다는 것이다. 정전류 조건에서 전압 신호가 감소한다는 것은 전기 전도도의 증가를 의미하는 것으로 이온화가 증가하였다는 것이다 [9]. 그러므로 이온화에 에너지를 잃은 느린 전자가 증가한다. 그림 1(a)와 (b)는 느린 전자수가 증가할 때  $2p$  준위의 원자수도 증가한다는 것을 나타낸다. 이 현상은 느린 전자가 준안정 준위의 원자를  $2p$  준위로 들뜨게 하는 증거이다.

그림 1(c)는 801.479 nm ( $1s_5-2p_8$ )에서 투과된 레이저빔의 세기로 이 신호가 증가한다는 것은 준안정 준위 원자의 감소를 나타낸다. 그림 1(c)와 (d)는 레이저빔을 입사시켰을 때의 신호로 투과된 레이저빔의 세기 신호는 1(d)의 전압 신호가 최대치에서 감소할 때 증가하기 시작한다. 전압 신호가 감소한다는 것은 준안정 원자들이 이온화 되어 방전의 전기 전도도가 증가한 것이므로 전압 신호의 감소는 준안정 원자의 감소를 의미한다. 또한 투과된 레이저빔의 세기가 증가한다는 것은 준안정 준위에서 이 빔을 흡수하는 원자가 감소한다는 것이므로 투과된 레이저빔의 세기가 증가한다는 것은 준안정 준위 원자수가 감소했다는 것이다. 즉, 준안정 준위에서의 흡수 신호는 감소한다. 그림 1(c)와 (d)는 느린 전자수가 증가할 때 준안정 준위 원자수도 감소한다는 것을 나타낸다. 이 현상은 느린 전자가 준안정 준위 원자를 이온화 시키는 증거이다.

그림 1은 느린 전자수가 증가할 때 준안정 준위의 원자수는 감소하고  $2p$  준위로부터의 방출 세기 증가하는 것을 의미한다. 전압 신호의 감소, 즉 전기 전도도의 증가는 작은 에너지를 갖는 느린 전자와 충돌에 의한 준안정 원자의 단계적 이온화가 원인이라고 할 수 있다.

전기 전도도가 최대가 되면 충돌에 의해 느린 전자들이 에너지의 대부분을 잃어버려 들뜨고 단계적 이온화 과정은 일어나지 않아 방전 저항이 증가하므로 전압 신호는 다시 증가하고 이 과정이 주기적으로 반복된다. 그러므로 단계적 이온화를 포함한 이 과정들의 반복이 광검류 신호에서 관측된 진동의 원인이라고 할 수 있다.

레이저빔의 입사에 의해 준안정 준위 원자가 감소한다면 낮은 방전 전류에서 방전 전압의 진동이

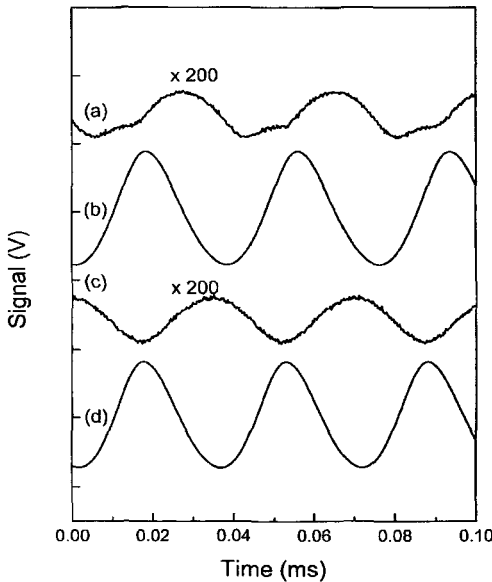


그림 1. 방전 전류 2 mA에서 측정한 방출 신호 (emission signal), 흡수 신호 (absorption signal)와 전압 신호의 자발적 진동 (spontaneous oscillation)이다. (a) 알곤의  $2p-1s$  전이에서 측정한 방출 신호. (b) 레이저빔의 입사하지 않았을 때의 전압 진동 신호. (c)  $1s_5$  준안정 원자의 밀도 변화에 해당하는 레이저빔의 투과세기(transmitted intensity). (d) 레이저빔의 파워가 0.05 mA 일때의 전압 진동 신호.

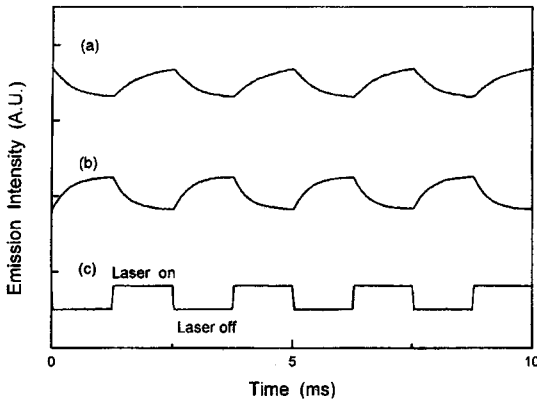


그림 2. (a) 763.511 nm ( $2p_6-1s_5$ ), (b) 800.616 nm ( $2p_6-1s_4$ )에서 방출세기의 변화이다. 두 변화는 레이저빔에 의한 준안정 원자의 감소를 나타낸 것이다.

일어난다. 준안정 준위 원자의 변화를  $2p$  준위로부터의 방출 세기의 변화를 측정하였다. 그림 2(a)와 (b)는 763.511 nm ( $2p_6-1s_5$ )와 800.616 nm ( $2p_6-1s_4$ )의 방출 세기의 변화를 나타낸다. 그림 2(a)는  $2p_6-1s_5$  전이에서의 방출 세기의 변화로 레이저빔이 입사하면 방출 세기는 증가한다. 레이저빔이 입사시킬 때 방출 세기가 증가한다는 것은 준안정 준위의 원자 수가 감소하여 자기 흡수 (self-absorption)가 감소하기 때문이다. 그림 2(b)는 레이저빔이 입사될 때  $2p_6-1s_4$  전이에서는 방출 세기가 감소한다는 것을 보이고 있다. 이것은  $2p_6$  준위의 원자 밀도가 감소한다는 것이므로, 준안정 준위 원자의 감소를 의미한다. 방출 세기의 변화가 낮은 방전 전류에서 준안정 준위 원자를 감소시키는데 기여를 한다는 증거이다.

#### 4. 결 론

속이 빈 원통형 음극 방전의 아주 낮은 방전 전류에서 자발적 진동이 관측되었다. 방전 전압, 플라즈마 방출 세기, 준안정 준위 밀도 변화에서 관측된 진동 형태의 신호는 준안정 준위 원자의 다단계 이온화 때문이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. Barbieri, N. Beverini, and A. Sasso, *Rev. Mod. Phys.* **62**, 603 (1990).
- [2] W. Demtroder, *Laser Spectroscopy, (Basic Concepts and Instrumentation, Springer, Berlin, 1995), Chap. 6.*
- [3] K. Tochigi, S. Maeda, and C. Hirose, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 711 (1986).
- [4] S. P. Lee, E. W. Rother and G. P. Reck, *J. Appl. Phys.* **61**, 109 (1987).
- [5] B. Chapman, *Glow Discharge Process*, New York, 1980.
- [6] L. F. M. Braun and J. A. Lisboa, *Optics Comm.* **108**, 302 (1994).
- [7] D. Zhechev and S. Atanassva, *Optics Comm.* **156**, 400 (1998).
- [8] N. M. Kwon, S. H. Yoog, and Y. H. Yun, and W. H. Jhe, *Phys. Rev. A* **54**, 1459 (1996).
- [9] Jun-Hoi Lee and Kee Ju Jeong, *J. Korea Vacuum Soc.* **11**, 119 (2002).