

Hollow Cathode Discharge Tube에서의 광검류 신호 측정

Measurement of Optogalvanic Signal in Hollow Cathode Discharge Tube

이준희, 윤만영*, 김승강

(Jun-Hoi Lee, Man Young Yoon, Song Kang Kim)

Abstract

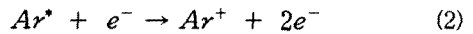
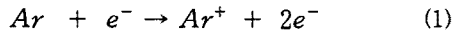
The optogalvanic signals were measured using hollow cathode discharge tube with argon as buffer gas at change of discharge currents. A change of ionization rate due to electron collision causes an increase or decrease of the electric conductivity. This change in electric conductivity generates the optogalvanic signal. We conclude that optogalvanic signal has close relation with the lowest metastable atoms density at low current.

Key Words : hollow cathode, optogalvanic signal, negative glow

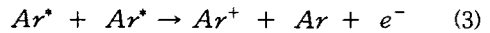
1. 서론

광검류 효과(optogalvanic effect)는 원자 준위들의 상태 밀도 분포의 변화에 따른 방전 전류 변화에 근거를 두고 있다. 상태 밀도 분포의 변화는 원자 전이 에너지에 해당하는 파장을 가진 연속 발진 레이저에 의해 일어난다. 광검류 효과는 레이저 분광학 분야에서 이용되고 있는 우수하고 간단한 기술이다. 광검류 효과는 네온 방전의 임피던스 변화에 주목한 Penning[3]에 의해 처음으로 측정되었고 실제적인 응용이 이루어진 것은 파장 변화가 가능한 색소 레이저의 도입 이후이다. 광검류 효과는 원자 및 분자 분광학[1], 방전 플라즈마의 특성 진단[2], 동위 원소 분석[3], 레이저의 파장 교정 및 안정화[4], Penning 이온화 효과 진단[5] 등에 응용된다.

HCD에서 원자 충돌이 일어나면 방전 전류에 영향을 준다. 가장 중요한 이온화 과정은 전자 충돌에 의한 방전 기체의 이온화와 들뜬 원자들끼리의 충돌에 의한 이온화이다. 전자충돌에 의한 이온화



들뜬 원자들끼리의 이온화



여기서 *는 준안정 준위를 나타낸다. 방전에서 바닥상태의 원자보다는 준안정 준위 원자가 훨씬 적지만 바닥상태 원자의 이온화보다는 준안정 준위 원자를 이온화할 수 있는 전자들이 상당히 많이 존재하므로 준안정 준위로부터의 전자 충돌 이온화가 바닥상태로부터의 이온화에 비하여 증가하여 불활성 기체 방전에서 식(2)로 나타난 과정이 특히 중요하며 광검류 효과 생성에 큰 영향을 준다.

본 연구에서는 알곤 기체가 들어있는 HCD에서 연속 발진 다이오드 레이저를 사용하여 발생시킨 광검류 신호를 관찰하여 그 생성 원인에 대해 알아보려고 한다. 알곤 기체의 준안정준위 801.479 nm(1s5-2p8), 811.531 nm(1s5-2p9)와 공명준위 800.616 nm(1s4-2p7), 810.369 nm(1s4-2p7)의 광검류 신호를 측정하였다.

2. 실험 방법

실험 장치는 그림 1과 같고 HCD tube (Cathodeon Ltd., model 3QQAY/Gd)는 알곤 기체로 채워져 있으며 기체 압력은 5 ~ 8 mbar이다.

* 중부대학교 정보통신대학 정보공학부
(충남 금산군 추부면 마전리 산2-25)
Fax: 041-751-2188
E-mail: myyoon@joongbu.ac.kr

HCD tube의 전원으로는 0 ~ 1 kV, 0 ~ 40 mA의 범위의 직류 전원 장치 (Bertan Associates, Inc., model Series 105)를 사용하였으며, 10 kΩ의 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. 방전관에 공급한 전류는 10 ~ 30 mA이다.

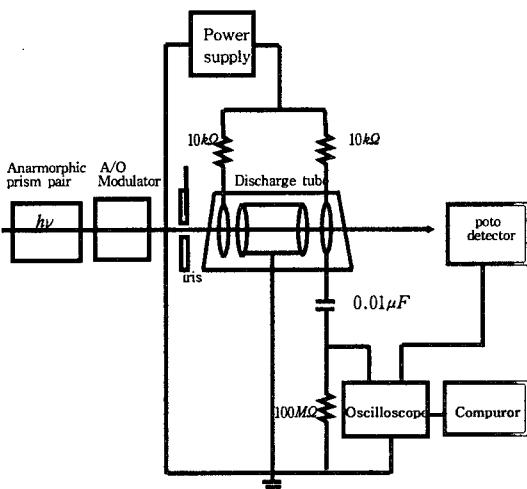


그림 1. Hollow cathode discharge tube에서 광검류 신호를 측정하기 위한 실험 장치

광검류 신호의 측정을 위해 다이오드 레이저 (Environmental Optical Sensors Inc., model ECU-2001-A)를 사용하였다. 다이오드 레이저빔은 630 ~ 850 nm 정도의 에너지를 가지고 있으므로 알곤 기체의 원자를 1s 준위에서 2p 준위로 들뜨게 하는데 적당하다. 본 실험에서는 중심 파장이 810 nm인 다이오드 레이저를 사용하였고, 방전관에 들어가는 레이저빔의 직경은 0.5 mm, 출력은 방전관의 바로 정면에서 1.0 mW이다. 방전이 일어나지 않았을 경우, 레이저빔 출력의 90% 이상이 방전관을 통과하였다. 레이저빔의 출력을 측정하기 위해 powermeter (Newport Corporation, model 1815-C)가 연결된 photodetector (Newport, model 818-SL)를 사용하였다.

레이저에서 나온 타원형의 빔은 anamorphic prism pairs를 통과하여 원형의 빔이 되어 acousto-optic modulator (NEOS Inc., model N21080-1SAS)를 통과한 후 직경 0.5 mm인 iris를

지나 hollow cathode 중심인 음 글로우 영역을 통과한다. Acousto-optic modulator는 HCD tube에서 광검류 신호의 동적 반응(dynamics response)을 측정하기 위해 함수 발생기 (ED engineering Co. Ltd., model FG-1881)에 연결되어 있고 레이저빔의 세기를 변조 (ON-OFF)하는데 사용하였다.

광검류 신호의 측정은 연속적인 레이저빔을 세기 변조(intensity modulation)하여 HCD에 입사시키고, 방전관 안의 알곤 기체가 레이저빔을 흡수할 때 방전관의 두 전극 사이의 전압 변화에 의해 발생된 신호를 전극에 직렬로 연결된 0.01 μF의 축전기와 100 MΩ의 저항을 통과한 후 디지털 오실로스코프 (Hewlett Packard, model 54600B)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

알곤 ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$)의 가장 낮은 들뜬 전자 배치는 L-S결합 표기로 3P_2 , 3P_1 , 3P_0 , 1P_1 이고 Paschen 표기로는 각각 $1s_5$, $1s_4$, $1s_3$, $1s_2$ 와 같이 표시된다. 1s 상태 중 $1s_5$ 와 $1s_3$ 은 준안정 준위 (metastable level)이고 나머지 두 상태 $1s_4$ 와 $1s_2$ 는 바닥상태로 전이가 가능한 공명준위(resonance level)이다. 그 다음 들뜬 전자 배치는 $1s_i (2 \leq i \leq 5)$ 준위와 전이가 가능한 $2p_j (1 \leq j \leq 10)$ 준위이다. 이 두 준위의 전자 밀도 변화가 레이저빔의 흡수에 의해 일어나면 광검류 신호가 나타난다.

레이저에 의해 1s 준위의 원자들이 2p 준위로 들뜨게되고 2p 준위의 원자들이 다시 1s 준위들로 떨어지는데, 준안정 준위($1s_5$, $1s_3$)보다 공명준위($1s_4$, $1s_2$)로 많이 떨어지면 이 공명준위를 경유하여 원자들이 다시 바닥상태로 떨어져 준안정 준위의 밀도를 감소시키므로 방전의 전기 전도도가 감소한다. 그러나 준안정 준위로 더 많이 원자들이 떨어지다면 준안정 준위의 밀도가 증가되므로 전기 전도도는 증가한다. 이와 동시에 레이저에 의해 들뜨게된 원자들은 음극에서 방출된 전자와 충돌하여 이온화를 일으킨다. 그 결과 전기 전도도는 증가한다.

정전류 방식에서 광검류 신호는 전기 전도도의 변화로 인한 전압 변화의 형태로 측정되며, 여러 크기의 음전압(negative voltage) 또는 양전압(positive voltage) 부호로 나타난다. 음전압 신호는 들뜬 원자들의 이온화에 의한 것이며, 양전압 신호는 들뜬 준위의 원자들이 바닥상태로 떨어지는 과

정에 의한 것이다. 이 두 과정이 서로 결합하여 광검류 신호의 동적 반응 현상을 보여준다.

3.1 준안정 준위($1s_5$, $1s_3$)의 광검류 신호

알곤 기체의 두 준안정 준위에서 시작하는 801.479 nm($1s_5-2p_8$), 811.531 nm($1s_5-2p_9$) 전이의 광검류 신호는 각각 그림 2(a), 2(b)와 같이 나타난다. 그림 2에서 방전 전류가 10 mA일때 광검류 신호는 양전압 신호가 나타나는데 이는 네온 기체에서 펄스 레이저를 사용하여 낮은 방전 전류에서 측정된 광검류 신호의 부호와 같다[10].

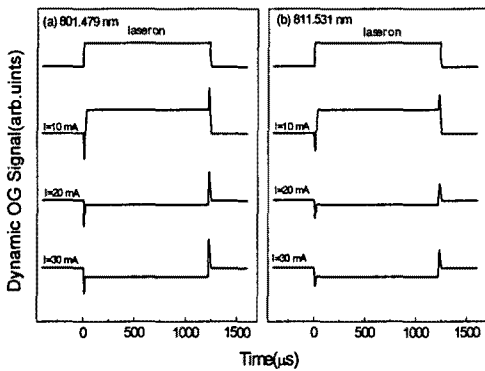


그림 2. Gd/Ar HCD의 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 2(a) 801.479 nm($1s_5-2p_8$), 2(b) 811.531 nm($1s_5-2p_9$)

그림 2(a)는 $1s_5-2p_8$ (801.479 nm) 전이의 광검류 신호이다. 레이저빔이 방전관에 입사하면 $1s_5$ 준위의 원자들이 $2p_8$ 준위로 전이한다. $2p_8$ 준위로 전이한 원자들의 68 %가 $1s_4$ 준위, 4.7 %가 $1s_2$ 준위로 어진 후, 이어서 바닥상태로 떨어진다. 그러므로 준안정 준위의 원자가 감소하여 전기 전도도가 감소한다. 이와 같은 결과에 의해 10 mA의 방전 전류에서의 광검류 신호는 양전압 성분이 나타난다. 그러나 방전 전류가 20 mA 이상으로 높아지면 음극과 양극 사이의 전위차가 증가되어 음극에서 방출된 전자가 갖는 에너지가 충분히 커서 이온화가 증가한다. 그 결과 전기 전도도가 증가하여 광검류 신호는 그림 2와 같이 음전압 신호가 나타난다. 이와 같이 광검류 신호가 음전압 신호로 나타난다는 것은 2p 준위에 있는 원자들의 이온화가 증가한다는 것이다

준안정 준위에서 2p 준위로 들뜬 원자들은 낮은 준위로 떨어질 때 대부분은 준안정 준위보다는 공

명준위로 떨어지고 다시 바닥상태로 떨어지므로 준안정 준위의 원자 밀도는 감소한다. 그 결과 이온화가 줄어 전기 전도도가 감소하는 것이 특징이다.

그러나 알곤의 $1s_5-2p_9$ (811.531 nm) 전이는 $2p_9$ 준위의 원자들이 $1s_5$ 준위로만 떨어지는데도 낮은 전류에서 양전압 신호가 나타나는 것은 준안정 준위의 원자가 감소한다는 것을 의미하는 것이다. 이것은 $2p_9$ 준위의 원자들이 낮은 준위로 떨어지기 전에 음극 표면에서 방출된 전자 또는 알곤 기체와 충돌하여 다른 $2p(2p_8, 2p_{10})$ 준위로 전이하여 들뜬 원자들이 $1s_4, 1s_2$ 준위로 떨어져 준안정 준위의 밀도를 감소시키기 때문이다[11]. 그러므로 10 mA의 낮은 방전 전류에서 광검류 신호는 그림 2(b)와 같이 양의 신호가 나타난다. 방전 전류가 증가하면 이온화가 증가하여 음전압 신호가 나타난다. 이와 같이 준안정 준위에서 출발하는 전이는 준안정 준위 원자를 감소시켜 낮은 방전 전류에서 광검류 신호는 양전압 신호로 나타나고 전류가 증가하면 이온화의 증가로 신호의 진폭이 작아져 높은 전류에서는 음전압 신호로 나타난다.

3.2 공명 준위($1s_4$ 와 $1s_2$)의 광검류 신호

단수명의 $1s_4$ 준위에서 시작하는 800.616 nm($1s_4-2p_6$), 810.369 nm($1s_4-2p_7$) 전이의 광검류 신호는 모든 방전 전류에서 음전압 신호 형태로 각각 그림 3(a), 3(b)와 같이 나타난다.

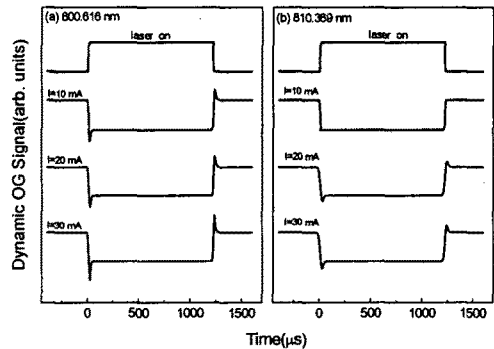


그림 3. Gd/Ar HCD의 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 2(a) 800.616 nm($1s_4-2p_6$), 3(b) 810.369 nm($1s_4-2p_7$). 광검류 신호는 모든 전류에서 음신호를 나타낸다.

그림 3에서 방전 전류가 10 mA일때 광검류 신호로 음전압 신호가 나타나는데 이는 네온 기체에서 펄스 레이저를 사용하여 측정된 광검류 신호의 부호와 같다[10]. 낮은 방전 전류에서 광검류 신호가 준안정 준위에서의 신호와는 달리 음전압 신호가 나타나는 것은 준안정 준위의 밀도가 증가하여 이온화가 증가한다고 설명할 수 있다.

그림 3(a), 3(b)는 각각 800.616 nm($1s_4-2p_6$)와 810.369 nm($1s_4-2p_7$)에서의 광검류 신호로 모든 방전 전류에서 음전압 신호가 나타난다. 레이저빔이 방전관에 입사하면 $1s_4-2p_6$ 전에서는 $2p_6$ 준위로 전이한 원자들의 72 %는 $1s_5$ 준위로, 16 %는 $1s_2$ 준위로 떨어진다. 그리하여 $1s_5$ 준위의 원자 밀도가 증가한다. 그리고 $1s_4-2p_7$ 전이에서도 마찬가지로 $2p_7$ 준위의 원자들의 15.3 %는 $1s_5$ 준위로, 7.5 %는 $1s_3$ 준위로, 3.1 %는 $1s_2$ 준위로 떨어진다. 그러므로 $1s_5$ 준위의 원자 밀도가 증가한다. 이와 같이 준안정 준위의 원자 밀도가 증가하면 바닥상태로 붕괴하는 원자 수는 줄어들고 $2p$ 준위로 다시 전이하는 원자가 증가하여 낮은 방전 전류에서도 이온화가 증가한다. 그러므로 음전압 신호가 나타난다. 방전 전류가 증가하면 이온화가 증가하므로 역시 음전압 신호가 나타난다.

공명준위에서 $2p$ 준위로 들뜬 원자들은 낮은 준위로 떨어질 때 대부분은 공명준위보다는 준안정 준위로 떨어지므로 준안정 준위 원자를 증가시키는게 특징이다($2p_1$, $2p_5$ 는 제외). 이와 같이 공명준위에서 출발하는 전이는 준안정 준위 원자의 밀도를 증가시켜 모든 방전 전류에서 광검류 신호는 음전압 신호가 나타난다.

4. 결론

HCD에서 알곤 기체의 $1s-2p$ 전이에서의 광검류 신호는 준안정 준위의 원자 밀도와 밀접한 관계가 있다. 준안정 준위에서 출발한 전이는 준안정 준위의 밀도를 감소시키고 공명준위에서 출발한 전이는 준안정 준위의 밀도를 증가시킨다. 이로 인하여 낮은 방전 전류에서 준안정 준위의 광검류 신호는 양전압 신호, 공명준위에서는 음전압 신호로 나타난다. 이와 같이 들뜸의 시작이 준안정 준위 또는 공명준위인가에 따라 광검류 신호의 부호가 다르다. 그러나 높은 방전 전류에서는 들뜬 준위에서 전자 충돌에 의한 이온화가 증가하기 때문에 준안정 준위와 공명준위에서 광검류 신호는 모두 음전압 신호가 나타난다.

이와 같이 낮은 방전 전류에서는 준안정 준위의 밀도 변화가 방전을 유지하고 높은 방전 전류에서는 전자 충돌 이온화가 우세하므로 광검류 신호는 준안정 준위의 원자 밀도와 들뜬 준위에서의 전자 충돌 이온화 효과를 같이 생각하여야 한다.

참고 문헌

- [1] R. E. Muenchausen, R. D. May, and G. W. Mills, "Optogalvanic studies with a Co_2 laser", *Optics Comm.* **48**, 317(1984)
- [2] M. B. Schulman and D. R. Woodward, "Plasma enhanced photoemission as a discharge lamp", *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1618(1989)
- [3] P. Pianarosa, Y. Demers, and J. M. Gange, J, "Isotopic analysis by optogalvanic spectroscopy", *Opt. Soc. Am.* **B1**, 704(1984)
- [4] M. Hippler and J. Pfab, "Optogalvanic spectroscopy of argon and wavelength calibration in the near-ultraviolet", *Optics Comm*, **97**, 347(1993)
- [5] A. Ben-Amar, R. Shuker, and G. Erez, "Penning ionization spectroscopy using the optogalvanic effect", *Appl. Phys.* **38**, 763(1981)
- [6] B. Chapman, *Glow Discharge Process*, New York, 1980
- [7] D. K. Doughty and J. E. Lawler, "Model of optogalvanic effects in the neon positive column", *Phys. Rev.* **A28**, 773(1983)
- [8] H. A. Bachor, P. J. Manson and R. J. Sandeman, "Optogalvanic detection as a quantitative method in spectroscopy", *Optics Comm.* **43**, 337(1982)
- [9] G. Erez, S. Lavi, and E. Miron, "A simplified theory of the optogalvanic effect", *IEEE J. Quant. Elec.* **QE-15**, 1328(1979)
- [10] T. Fujimoto, Y. Uetani, C. Goto, and K. Fukuda, "Optics Comm", **47**, 111(1983)
- [11] R. S. Stewart, K. I. Hamad and K. W. Mcknight, *Inst Phys. Confer. Ser. (International Meeting on Optogalvanic Spectroscopy, Glasgow)*, section 3, 89(1990)