

Hollow cathode discharge tube에서의 광검류 신호 측정

이준화* · 정기주*

충남대학교 물리학과, *공주대학교 사범대학 물리교육과
(논문접수일 : 2002년 2월 16일)

Measurement of Optogalvanic Signal in Hollow Cathode Discharge Tube

Jun-Hoi Lee† and Kee Ju Jeong*

Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764

*Department of Physics Education, Kongju National University, Kongju 314-701

(Received February 16, 2002)

요 약

Hollow cathode discharge(HCD)에서 알곤 기체를 완충 기체로 사용하여 전류 변화에 따른 광검류 신호를 측정하였다. 광검류 신호는 방전의 전기 전도도의 증가 또는 감소에 의해 나타나며 전기 전도도의 변화는 전자 충돌에 의한 이온화율의 변화에 의해 일어난다. 낮은 방전 전류에서 광검류 신호는 가장 낮은 준안정 준위 원자의 밀도 변화와 밀접한 관계가 있다는 결론을 얻었다.

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 change of the lowest metastable atoms density at low current.

1. 서 론

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. 공명 흡수에 의해 전자가 높은 준위로 전이하고, 이때 원자의 상태 밀도 분포가 평형 상태에서 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 효과라 한다.

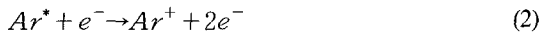
광검류 효과는 레이저 분광학 분야에서 이용되고

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 [4], 방전 플라즈마의 특성 진단 [5,6], 동위 원소 분석 [7], 레이저의 파장 교정 및 안정화 [8-10], Penning 이온화 효과 진단 [11-16]등에 응용된다. 최근에는 hollow cathode를 사용한 고밀도 플라즈마 식각 시스템을 진단하는데 이용되었다 [17].

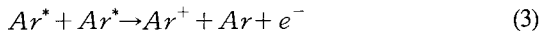
HCD에서 원자 충돌이 일어나면 방전 전류에 영향을 준다. 가장 중요한 이온화 과정은 전자 충돌에 의한 방전 기체의 이온화와 들뜬 원자들끼리의 충

돌에 의한 이온화이다.

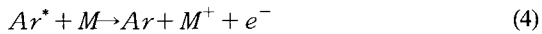
전자충돌에 의한 이온화



들뜬 원자들끼리의 이온화



여기서 *는 준안정 준위를 나타낸다. 또한 불활성 기체 이온들이 음극 물질과 충돌하여 음극 표면으로부터 원자를 방출시킨다. 이 경우 불활성 기체의 준안정 준위 원자와 스퍼터링된 금속 원자 사이의 충돌이 일어나면 준안정 원자로부터 스퍼터링 원자에게 에너지가 전달되어 원자를 들뜨게 하거나 이온화시킨다. 들뜬 기체 원자들이 음극 표면으로부터 탈출한 원자를 이온화시키는 것을 Penning 이온화라 한다.



여기서 M은 음극 표면으로부터 탈출한 원자를 나타낸다. 전자 충돌 이온화에서 바닥 상태의 이온화인 식 (1)과 준안정 준위 이온화인 식 (2)의 주된 차이점은 알곤 기체의 경우에 가장 낮은 준안정 준위의 에너지가 11.55 eV이므로, 이 상태에서의 이온화에 필요한 문턱 에너지는 4.21 eV이고 바닥 상태에서는 15.76 eV라는 것이다. 이 경우 전자의 평균 에너지가 2 eV인 방전에서는 전자의 27%가 준안정 준위로부터의 이온화를 일으키는데 필요한 에너지를 갖고, 평균 전자 에너지가 4 eV이면 57%로 증가한다 [18]. 방전에서 바닥 상태의 원자보다는 준안정 준위 원자가 훨씬 적지만 이와 같이 바닥 상태 원자의 이온화보다는 준안정 준위 원자를 이온화할 수 있는 전자들이 상당히 많이 존재한다. 그러므로 준안정 준위로부터의 전자 충돌 이온화가 바닥 상태로부터의 이온화에 비하여 증가되므로 불활성 기체 방전에서 식 (2)로 나타난 과정이 특히 중요하며 광검류 효과 생성에 큰 영향을 준다.

방전에 의하여 전류가 흐르는 것은 Ohm의 법칙을 따르는 전기 회로와 같으며, 흐르는 전류는 인가 전압과 방전 저항 모두에 영향을 받는다. 방전 저항은 방전 기체의 압력과 이온화율과 같은 변수들에 의해 결정되어 진다. 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.

본 연구에서는 이전에 다른 연구에서 사용된 적이 없는 다이오드 레이저를 사용하여 알곤 기체가 들어있는 HCD의 음 글로우(negative glow) 영역에서 광검류 신호를 관찰하여 그 생성 원인에 대해 알아보고 네온 기체에서의 광검류 신호와 비교 하였다. 알곤과 네온은 같은 불활성 기체이기 때문에 그 물리적 특성이 유사한 점이 같은 형태의 광검류 신호가 관측되리라 생각한다. HCD는 원통형 음극을 사용하며 원통형 음극을 사용하면 음극 내부에 글로우 방전(glow discharge)의 여러 영역 중 음극 암흑부(cathode dark space)와 음 글로우 영역만을 만들 수 있고 [18], 낮은 전압으로 방전을 유지할 수 있다. 또한 충돌에 의한 전자의 많은 생성이 플라즈마 안의 원자를 들뜨게 하고 이온화 시키므로 속이 빈 원통형 음극 방전은 원자 분광학에서 원자 증기 발생원 또는 원자 스펙트럼용 광원으로 널리 쓰이며 고밀도 플라즈마 건식식각 장비 [17]로 사용된다.

지금까지의 광검류 신호에 대한 연구는 연속 발진 색소 레이저를 사용하여 네온 기체의 양광주(positive column) [20-25]에서, HCD tube에서는 연속 발진 색소 레이저 [26-31]와 펄스 색소 레이저 [32-35]를 사용하여 수행되었다. 이는 색소 레이저의 가용 파장이 주로 가시 광선 영역의 파장에 속하며 이에 해당하는 전이선이 네온 기체에 많아 주로 네온 기체에서 광검류 효과가 연구되었다. 그러나 최근에는 가시

및 근적외선 영역의 긴 파장에서 파장을 변화시킬 수 있는 다이오드 레이저가 만들어져 분광학에 많이 이용되고 있다. 알곤 기체의 1s-2p 전이는 적외선 영역에 해당하는 파장들이 많이 있어 알곤 기체의 준안정 준위 801.479 nm(1s₅-2p₈), 811.531 nm(1s₅-2p₉)와 공명준위 800.616 nm(1s₄-2p₆), 810.369 nm(1s₄-2p₇)의 광검류 신호를 측정하였다.

2. 실험방법

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

급한 전류는 10~30 mA이다.

광검류 신호의 측정을 위해 다이오드 레이저 (Environmental Optical Sensors Inc., model CU-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 anarmorphic 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 음극로우 영역을 통과한다. Acousto-optic modulator는

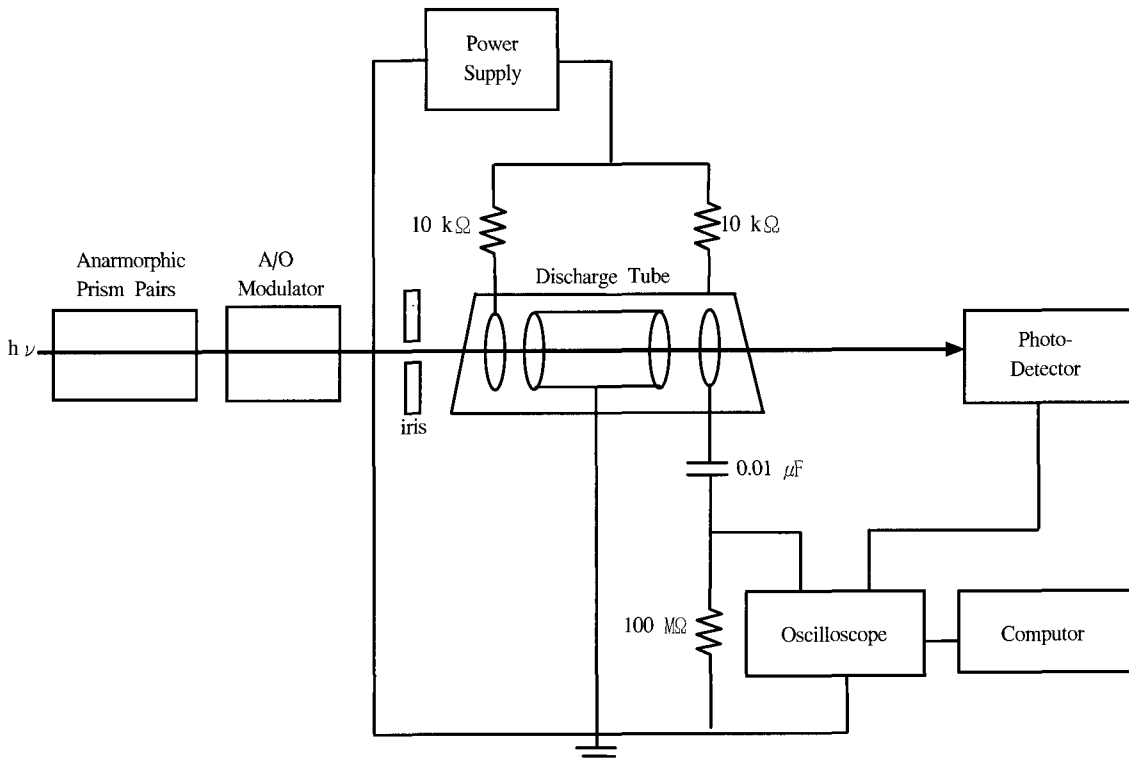


그림 1. Hollow cathode discharge tube에서 광검류 신호를 측정하기 위한 실험 장치.

HCD tube에서 광검류 신호의 동적 반응(dynamics response)을 측정하기 위해 합수 발생기(ED engineering Co. Ltd., model FG-1881)에 연결되어 있고 레이저 빔의 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 μF 의 축전기와 100 M Ω 의 저항을 통과한 후 디지털 오실로스코프(Hewlett Packard, model 54600B)로 측정하였다.

원자의 상태 밀도는 레이저 ON 시간 동안에 변화하고 OFF 시간 동안에 변화가 없다. 즉 레이저빔이 방전관에 입사하는 ON 시간 동안에는 기체 원자와 상호 작용을 일으켜 방전 전류의 변화가 생기고 방전관을 통과하지 않는 OFF 시간 동안에는 평형 상태로 돌아온다. 따라서 변화된 전류는 방전 회로의 축전기를 통과하게 된다.

3. 결과 및 고찰

알곤($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$)의 가장 낮은 들뜬 전자 배치는 그림 2와 같이 4개의 상태가 있는데 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 바닥 상태로 전이가 가능한 공명 준위(resonance level)이다. 그 다음 들뜬 전자 배치는 $1s(2 \leq i \leq 5)$ 준위와 전이가 가능한 $2p(1 \leq j \leq 10)$ 준위이다. 이 두 준위의 전자 밀도 변화가 레이저빔의 흡수에 의해 일어나면 광검류 신호가 나타난다.

광검류 효과는 전기 전도도의 변화로 나타난다. 레이저에 의해 $1s$ 준위의 원자들이 $2p$ 준위로 들뜨게 되고 $2p$ 준위의 원자들이 다시 $1s$ 준위들로 떨어지는데, 준안정 준위($1s_5$, $1s_3$)보다 공명 준위($1s_4$, $1s_2$)로 많이 떨어지면 이 공명 준위를 경유하여 원자들이 다시 바닥 상태로 떨어져 준안정 준위의 밀도를 감소시키므로 방전의 전기 전도도가 감소한다. 그러나 준안정 준위로 더 많이 원자들이 떨어지면 준안정 준위의 밀도가 증가되므로 전기 전도도는 증가한다. 이와 동시에 레이저에 의해 들뜨게된 원자

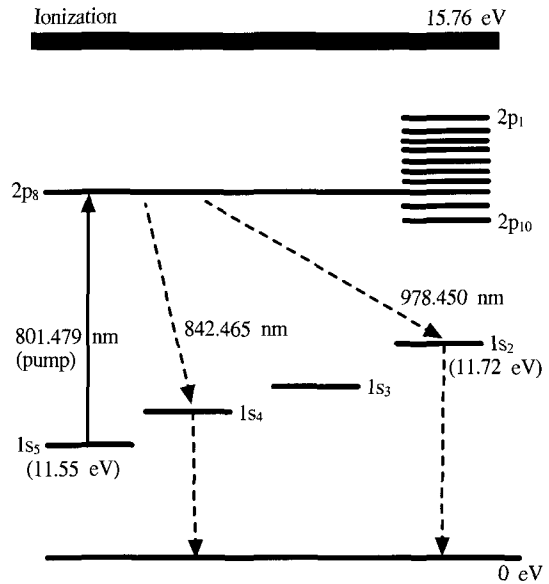


그림 2. $1s-2p$ 전이의 알곤 에너지 준위. 각 전자 상태는 Paschen 표기이다. 여기는 $1s_5-2p_8$ (801.479 nm)을 나타낸 것이다.

들은 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 바닥 상태로 떨어지는 과정에 의한 것이다. 이 두 과정이 서로 경합하여 광검류 신호의 동적 반응 현상을 보여준다. 이 두 과정 사이의 경쟁 효과는 그림 3에서 보인 것과 같다. 그림 3에서 점선은 레이저빔이 방전관에 들어가지 않을 때의 전압의 크기로 0으로 표시하였다. 그림 3(a)와 같이 정상 상태(steady-state)가 양전압을 나타내는 광검류 신호를 양신호(positive signal)라 하고 그림 3(b)와 같이 정상 상태가 음전압을 나타내는 광검류 신호를 음신호(negative signal)라 한다. 그림 3의 광검류 신호는 레이저빔이 입사하면 $1s$ 준위의 원자들이 $2p$ 준위로 전이하여 $2p$ 준위 원자들이 음극에서 방출된 전자와 충돌하므로써 이온이 되어 전기 전도도가 증가하기 때문에 처음에는 빠른 음전압 반응이 일어난다. 그 다음에 바로 긴 시간 상수를 가진

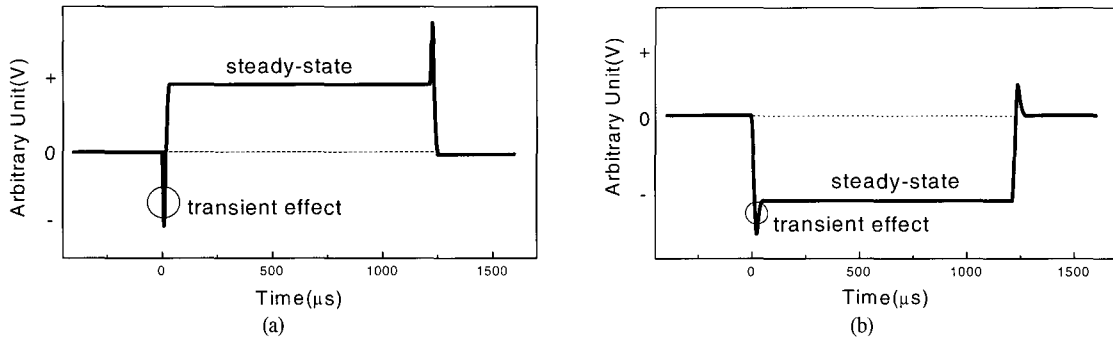


그림 3. 전압의 크기로 나타난 광검류 신호. 실선은 레이저빔이 들어가지 않을 때의 전압 값이고 정상 상태는 레이저빔이 들어갈 때의 값으로 (a) 양신호 (b) 음신호를 나타낸다.

양성분의 정상 상태가 뒤따르는데, 그 이유는 2p 준위의 원자들이 다시 1s 준위로 떨어져 이온화가 줄었기 때문이다. 레이저빔이 차단되면 1s 준위에서 2p 준위로 전이하는 원자들은 없기 때문에 이온화가 갑자기 줄어 음성분은 빠르게 소멸되고 2p 준위에 있는 원자들은 바닥 상태로 떨어지므로 양성분의 느린 소멸로 양의 봉우리(positive peak)가 나타난다. 이와 같이 광검류 신호는 들뜬 준위 원자의 이온화와 들뜬 준위에서 바닥 상태로 떨어지는 원자, 두 과정에 의해 나타난다.

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 4(b), 4(c)와 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 공명 준위로 떨어지고 다시 바닥 상태로 떨어지므로

3.1 준안정 준위(1s₅, 1s₃)의 광검류 신호

알곤 기체의 두 준안정 준위에서 시작하는 801.479 nm (1s₅-2p₈), 811.531 nm(1s₅-2p₉) 전이의 광검류 신호는 각각 그림 4, 5와 같이 나타난다. 그림 4(a)와 5(a)는 방전 전류가 10 mA 일때의 광검류 신호로 양전압 신호가 나타나는데 이는 네온 기체에서 펄스 레이저를 사용하여 낮은 방전 전류에서 측정한 광검류 신호의 부호와 같다 [26,36-38].

그림 4는 1s₅-2p₈(801.479 nm) 전이의 광검류 신호이다. 레이저빔이 방전관에 입사하면 1s₅ 준위의 원자들이 2p₈ 준위로 전이한다. 1s₅-2p₈ 전이에 대한 gf 값에 따르면 2p₈ 준위로 전이한 원자들의 68 %가 1s₄ 준위, 4.7 %가 1s₂ 준위로 떨어진 후, 이어서 바닥 상태로 떨어진다. 그러므로 준안정 준위의 원자가 감소하여 전기 전도도가 감소한다. 이와 같은 결과에 의해 10 mA의 방전 전류에서의 광검류 신호는 그림 4(a)와 같이 양전압 성분이 나타난다. 그러나

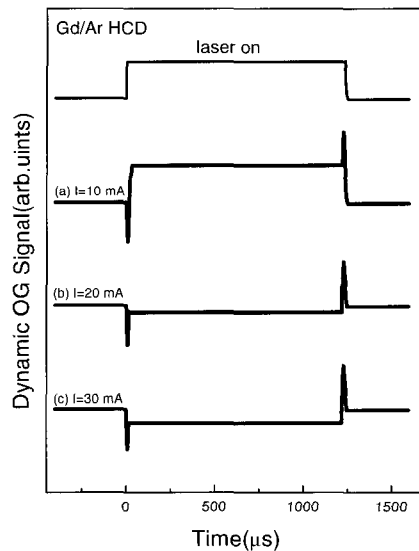


그림 4. Gd/Ar HCD의 801.479 nm(1s₅-2p₈) 전이에서 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 10 mA에서 양신호, 전류가 증가하면 음신호를 나타낸다.

준안정 준위의 원자 밀도는 감소한다. 그 결과 이온화가 줄어 전기 전도도가 감소하는 것이 특징이다. 그러나 준안정 준위에서 2p₉ 준위로 들뜬 원자는 단지 1s₅ 준위로만 떨어지므로 예외이다. 이 경우는 준안정 준위 원자가 감소되지 않으므로 낮은 전류에서 음전압 신호가 나타나야 한다. 그러나 광검류 신호는 그림 5(a)에서와 같이 낮은 전류에서는 양전압이 나타나고 전류가 증가하면 신호가 음전압으로 바뀌는 1s₅-2p₈ 전이와 같은 신호 형태를 보여준다. 그림 5(a)의 광검류 신호는 Fujimoto에 의해 측정된 네온 방전의 준안정 준위에서 출발하는 640.225 nm (1s₅-2p₉) 전이의 광검류 신호와 일치한다 [36].

알곤의 1s₅-2p₉(811.531 nm) 전이는 2p₉ 준위의 원자들이 1s₅ 준위로만 떨어지는데도 낮은 전류에서 양전압 신호가 나타나는 것은 준안정 준위의 원자가 감소한다는 것을 의미하는 것이다. 이것은 2p₉ 준위의 원자들이 낮은 준위로 떨어지기 전에 음극 표면에서 방출된 전자 또는 알곤 기체와 충돌하여 다른 2p(2p₈, 2p₁₀) 준위로 전이하여 들뜬 원자들이 1s₄, 1s₂ 준위로 떨어져 준안정 준위의 밀도를 감소시키기 때문이다 [39]. 그러므로 10 mA의 낮은 방전 전류에서 광검류 신호는 그림 5(a)와 같이 양의 신호가 나타난다. 방전 전류가 증가하면 이온화가

증가하여 그림 5(b), 5(c)와 같은 음전압 신호가 나타난다. 2p 준위의 원자들은 준안정 준위의 원자들보다 높은 에너지를 가지고 있기 때문에 전자 충돌에 의한 이온화가 쉽게 일어난다. 이 과정이 방전에서 이온화를 증가시키는데 기여하고, 이 효과로 인하여 높은 전류에서 준안정 준위의 모든 전이에서 광검류 신호는 음전압으로 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. 준안정 준위의 광검류 신호가 전류가 증가하면서 진폭이 작아지는 것은 네온 기체의 612.306 nm(1s₅-2p₆) 전이의 결과와 같다 [40]. 본 실험에서 광검류 신호의 극성은 15 mA에서 바뀌었다. 또 하나의 다른 준안정 준위 1s₃에서 시작되는 794.818 nm(1s₃-2p₄) 전이의 광검류 신호도 1s₅ 준위와 같은 형태의 신호가 나타난다.

3.2 공명 준위(1s₄와 1s₂)의 광검류 신호

단수명의 1s₄ 준위에서 시작하는 800.616 nm(1s₄-2p₆), 810.369 nm(1s₄-2p₇) 전이의 광검류 신호는 모든 방전 전류에서 그림 3(b)와 같은 음전압 신호 형태로 각각 그림 6, 7과 같이 나타난다. 그림 6(a), 7(a)은 방전 전류가 10 mA일때의 광검류 신호로 음전압 신호가 나타나는데 이는 네온 기체에서 펄스 레이저를 사용하여 낮은 방전 전류에서 측정된 광검류 신호의 부호와 같다 [37,38,41]. 낮은 방전 전류에서 광검류 신호가 준안정 준위에서의 신호와는 달리 음전압 신호가 나타나는 것은 준안정 준위의 밀도가 증가하여 이온화가 증가한다고 설명할 수 있다.

그림 6, 7는 각각 800.616 nm(1s₄-2p₆)와 810.369 nm(1s₄-2p₇)에서의 광검류 신호로 모든 방전 전류에서 음전압 신호가 나타난다. 레이저빔이 방전관에 입사하면 1s₄-2p₆ 전이에서는 2p₆ 준위로 전이한 원자들의 72 %는 1s₅ 준위로, 16 %는 1s₂ 준위로 떨어진다. 그리하여 1s₅ 준위의 원자 밀도가 증가한다. 그리고 1s₄-2p₇ 전이에서도 마찬가지로 2p₇ 준위의 원자들의 15.3 %는 1s₅ 준위로, 7.5 %는 1s₃ 준위로, 3.1 %는 1s₂ 준위로 떨어진다. 그러므로 1s₅ 준위의

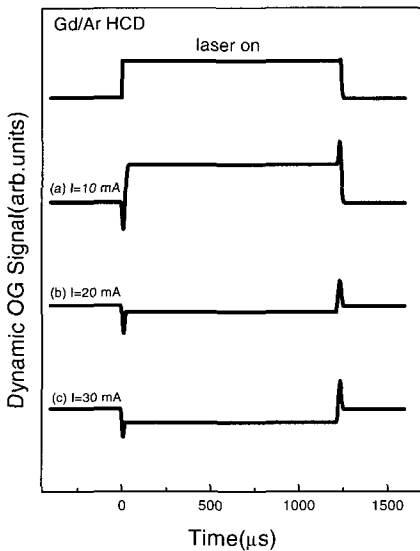


그림 5. Gd/Ar HCD의 811.531 nm(1s₅-2p₉) 전이에서 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 1s₅-2p₈과 같은 형태의 신호를 나타낸다.

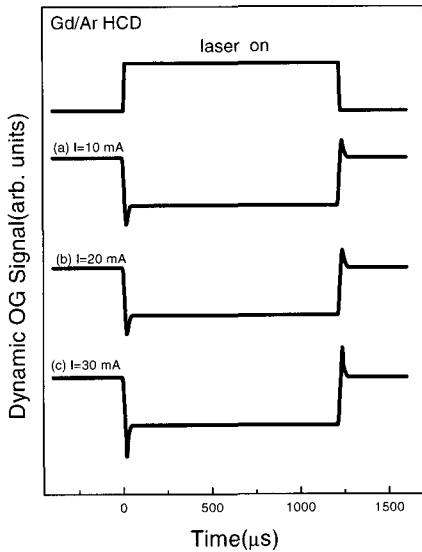


그림 6. Gd/Ar HCD의 800.616 nm($1s_4-2p_6$) 전이에서 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 광검류 신호는 모든 전류에서 음신호를 나타낸다.

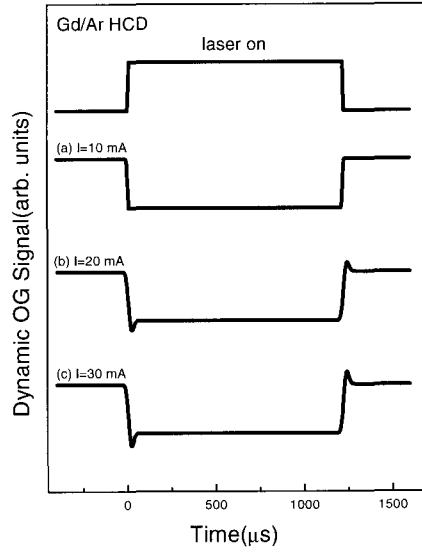


그림 7. Gd/Ar HCD의 810.369 nm($1s_4-2p_7$) 전이에서 방전 전류의 변화에 따른 광검류 신호. 광검류 신호는 모든 전류에서 음신호를 나타낸다.

원자 밀도가 증가한다. 이와 같이 준안정 준위의 원자 밀도가 증가하면 바닥 상태로 붕괴하는 원자 수는 줄어들고 전자 충돌에 의해 2p 준위로 다시 전이하는 원자가 증가하여 낮은 방전 전류에서도 이온화가 증가한다. 그러므로 음전압 신호가 나타난다. 방전 전류가 증가하면 이온화가 증가하므로 역시 음전압 신호가 나타난다.

공명 준위에서 2p 준위로 들뜬 원자들은 낮은 준위로 떨어질 때 대부분은 공명 준위보다는 준안정 준위로 떨어지므로 준안정 준위 원자를 증가 시키는게 특징이다(2p₁, 2p₅는 제외). 이와 같이 공명 준위에서 출발하는 전이는 준안정 준위 원자의 밀도를 증가시켜 모든 방전 전류에서 광검류 신호는 음전압 신호가 나타난다.

4. 결 론

HCD에서 알곤 기체의 1s-2p 전이에서의 광검류 신호는 준안정 준위의 원자 밀도와 밀접한 관계가 있다. 준안정 준위에서 출발한 전이는 준안정 준위의 밀도를 감소시키고 공명 준위에서 출발한 전이는 준안정 준위의 밀도를 증가시킨다. 이로 인하여 낮은 방전 전류에서 준안정 준위의 광검류 신호는

양전압 신호, 공명 준위에서는 음전압 신호로 나타난다. 이와 같이 들뜸의 시작이 준안정 준위 또는 공명 준위인가에 따라 광검류 신호의 부호가 다르다. 그러나 높은 방전 전류에서는 들뜬 준위에서 전자 충돌에 의한 이온화가 증가하기 때문에 준안정 준위와 공명 준위에서 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.

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] F. M. Penning, Physica(The Hague), **8**, 137 (1928).
- [4] R. E. Muenchausen, R. D. May, and G. W. Hills, Optics Comm. **48**, 317 (1984).
- [5] M. B. Schulman and D. R. Woodward, Appl.

- Phys. Lett. **55**, 1618 (1989).
- [6] C. P. Ausschnitt, G. C. Bjorklund, and R. R. Freeman, Appl. Phys. Lett. **33**, 851 (1978).
- [7] P. Pianarosa, Y. Demers, and J. M. Gange, J. Opt. Soc. Am. **B1**, 704 (1984).
- [8] R. B. Green, R. A. Keller, G. G. Luther, P. K. Schenck, and J. C. Travis, IEEE J. Quant. elec. **QE-13**, 63 (1976).
- [9] R. A. Keller, R. Engleman, Jr., and B. A. Palmer, Appl. Opt. **19**, 836 (1980).
- [10] M. Hippler and J. Pfab, Optics Comm. **97**, 347 (1993).
- [11] K. C. Smyth, B. L. Bentz, C. G. Bruhn and W. W. Harrison, J. Am. Chem. Soc. **101**, 797 (1979).
- [12] R. Shuker, A. Ben-Amar, and G. Erez, J. Opt. Soc. Am. **70**, 1392 (1980).
- [13] A. Ben-Amar, R. Shuker, and G. Erez, Appl. Phys. **38**, 763 (1981).
- [14] R. Shuker, A. Ben-Amar and G. Erez, J. Appl. Phys. **54**, 5685 (1983).
- [15] A. Ben-Amar, G. Erez, S. Fastig, and R. Shuker, Appl. Optics, **23**, 4529 (1984).
- [16] B. R. Reddy, P. Venkateswarlu, and M. C. George, Optics Comm. **73**, 117 (1989).
- [17] Joon-Hoi Lee, Wook Jae Lee, Man Sub Choi, Joon Sin Yi, J. Information Display **2**, 1 (2001).
- [18] B. Chapman, *Glow Discharge Process*, New York, (1980).
- [19] S Levesue, J-M Gange and F Babin, J. Phys. **B30**, 1331 (1997).
- [20] D. M. Pepper, IEEE J. Quant. Elec, **QE-14**, 971 (1978).
- [21] J. E. Lawler, Phys. Rev, **A22**, 1025 (1980).
- [22] D. K. Doughty and J. E. Lawler, Phys. Rev, **A28**, 773 (1983).
- [23] D. M. Kane, J. Appl. Phys, **56**, 1267 (1984).
- [24] A. Sasso and M. Ciocca, E. Arimondo, J. Opt. Soc. Am. **B5**, 1484 (1988).
- [25] R. S. Stewart, K. W. McKnight and K. I. Hamad. J. Phys. **D23**, 832 (1990).
- [26] K. C. Smyth and P. K. Schenck, Chem. Phys. Lett. **55**, 466 (1978).
- [27] H. A. Bachor, P. J. Manson and R. J. Sandeman, Optics Comm. **43**, 337 (1982).
- [28] N. Uchitomi, T. Nakajima, S. Maeda and C. Hirose, Optics Comm. **44**, 154 (1983).
- [29] J. M. Labat and S. Bukvic, J. Phys. **D21**, 1396 (1988).
- [30] V. D' Accurso, F. A. Manzano, V. B. Slezak, Appl. Phys. **B63**, 375 (1996).
- [31] R. A. Keller, R. Engleman, Jr., and E. F. Zalewski, J. Opt. Soc. Am. **69**, 738 (1979).
- [32] G. Erez, S. Lavi, and E. Miron, IEEE J. Quant. Elec. **QE-15**, 1328 (1979).
- [33] R. Shuker, A. Ben-Amar and G. Erez, Optics Comm. **42**, 29 (1982).
- [34] Y. Uetani, Optics Comm. **49**, 258 (1984).
- [35] E. Miron, I. Smilanski, J. Liran, S. Lavi, and G. Erez, IEEE J. Quant. Elec. **QE-15**, 194 (1979).
- [36] T. Fujimoto, Y. Uetani, Y. Sato, C. Goto, and K. Fukuda, Optics Comm. **47**, 111 (1983).
- [37] B. R. Reddy and P. Venkateswarlu, Optics Comm. **85**, 491 (1991).
- [38] J. R. Nestor, Appl. Phys. **21**, 4154 (1982).
- [39] R. S. Stewart, K. I. Hamad and K. W. Mcknight, Inst Phys. Confer. Ser.(International Meeting on Optogalvanic Spectroscopy, Glasgow), section 3, 89 (1990).
- [40] A. Rosenfeld, S. Mory and R. Konig, Optics Comm. **30**, 394 (1979).
- [41] A. Ben-Amar, and G. Erez and R. Shuker, J. Appl. Phys. **54**, 3688 (1983).