

속이 빈 원통형음극 방전의 전압-전류 곡선에서 음 저항 영역 관찰

Observation of Negative Resistance Region in Voltage-current Curve of Hollow Cathode Discharge

이준회^{1,a}, 이성직²
(Jun-Hoi Lee^{1,a} and Sung Jik Lee²)

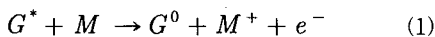
Abstract

We measured the optogalvanic signal and discharge voltage-current(V-I) curve under the two different discharge conditions with different buffer gases, Ar, and Ne. When the Gd was used as a cathode material at low discharge current less than 10 mA, a significant change was observed in the current-voltage curve. Time resolved optogalvanic signal measurement were measured by the diode laser of which wavelengths correspond to metastable transition line of these gases (Ar, Ne). From these measurements, we found that the characteristics of the V-I curve strongly depend on the Penning ionization process.

Key Words : Hollow cathode, Optogalvanic effect, Penning ionization

1. 서 론

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 금속 원자를 들뜨게 하거나 이온화시킨다. 불활성 기체의 들뜬 원자들이 음극 표면으로부터 탈출한 원자를 이온화시키는 것을 Penning 이온화라고 한다.



식 (1)은 Penning 이온화 과정으로 M은 음극 표면으로부터 탈출한 원자, G는 방전 기체이고 *는

준안정 준위를 나타낸다. 이 과정 또한 방전 전류 특성에 영향을 미친다.

Ne 기체가 들어있는 속이 빈 원통형 음극 방전 (hollow cathode discharge: HCD)에서 세기 변조된 연속 발진 레이저[1-3]와 펄스 레이저[4-6]을 사용하여 관측된 전형적인 광검류 신호의 응답은 30 μs안에 일어난다. 펄스 레이저를 사용한 588.190 nm (1s₅ - 2p₂)전이에서 전류 변화에 따른 Ca/Ne [7]과 Na/Ne HCD[6]의 광검류 신호가 측정되었는데, Na/Ne HCD에서와 같이 광검류 신호의 반응이 모든 전류에서 30 μs안에 일어나는 경우에는 Ne 기체와 스퍼터링된 Na 원자 사이의 충돌에 의한 이온화가 일어나지 않는다. 그러나 Ca/Ne HCD에서는 신호의 반응 시간이 100 μs 보다 긴 특별한 모양의 광검류 신호가 나타나는데 이는 Ne의 가장 낮은 준안정 준위 원자가 중성 Ca 원자를 이온화시키는 Penning 이온화 효과와 관련이 있다[7-9]. 그리고 Reddy[10]에 의하면 펄스 레이저를 사용한 Hg/Ne, U/Ne 그리고 B/Ne HCD에서는 전형적인 음전압 신호의 광검류 신호를 관측하였으나 Fe/Ne

1.대전대학교 신소재공학과
(대전시 동구 용운동 96-3)

2.충남대학교 물리학과

a. Corresponding Author : ljh0817@cnu.ac.kr

접수일자 : 2005. 6. 9

1차 심사 : 2005. 7. 14

심사완료 : 2005. 7. 25

HCD에서는 특별한 모양의 신호가 관측되었다. 이 또한 Penning 이온화 효과에 의한 것으로 해석되고 있다.

Ca/Ne HCD에서는 광검류 신호의 크기 변화를 측정할 피이크 모양 (peak-like) 신호와 음저항 영역이 존재하는 V-I 곡선을 볼 수 있다[7]. 또한 As/Ne, Cd/Ar HCD에서 연속 발진 레이저를 사용하여 음저항 영역에서 피이크 모양 광검류 신호가 관측되었다[7]. 이러한 원인도 Ne과 Ar의 가장 낮은 준안정 준위와 As와 Cd의 바닥 상태 원자 사이의 에너지 교환 과정으로 생각되었다.

Smyth[2]는 Ca/Ne HCD에서 전류 변화에 따른 광검류 신호 크기와 Ca 이온의 변화를 측정하였다. 광검류 신호는 낮은 전류에서 양의 값이 나타나고 방전 전류가 증가할수록 크기는 작아진다. 그러나 Ca 이온 증가는 전류가 증가할수록 감소하고 어떤 방전 전류에 이르면 Ca 이온의 변화가 없다는 것을 관측하였다. 이와 같이 음극 금속의 이온이 방전 전류가 낮을수록 증가한다는 것은 낮은 방전 전류에서 스퍼터링된 바닥 상태의 음극 금속 원자를 이온화시키는 Penning 이온화가 우세하다는 것이다.

본 연구에서는 Ar과 Ne 기체의 가장 낮은 준안정 준위의 공명 주파수에 해당하는 다이오드 레이저를 입사시켜 Gd 금속을 음극으로 사용하여 피이크 모양 광검류 신호와 V-I 곡선을 측정하였다. V-I 곡선의 음저항 영역에서 피이크 모양 광검류 신호도 관측하였다. V-I 곡선에서 음저항 영역이 나타나는 것은 Ar의 준안정 준위 원자와 스퍼터링된 원자 사이에 충돌이 일어나 스퍼터링된 원자를 이온화시키는 Penning 이온화 효과로 설명할 수 있다.

2. 실험 방법

실험 장치는 그림 1과 같고 실험에서 사용한 HCD (Cathodeon Ltd., model 3QQAY/Gd, 3QQNY/Gd)에는 각각 Ar과 Ne 기체로 채워져 있으며 기체 압력은 5~8 mbar이다. HCD의 전원으로는 0~1 kV, 0~40 mA의 범위의 직류 전원 장치 (Bertan Associates, Inc., model Series 105)를 사용하였으며, 10 kΩ의 안정 저항이 HCD 안에 있는 두 개의 전극에 각각 직렬로 연결되어 있다. 속이 빈 원통형 음극 금속으로는 Gd를 사용하였고 내경은 2 mm이고 길이는 20 mm이다. 공급한 전류는 0.5 ~ 15 mA이다.

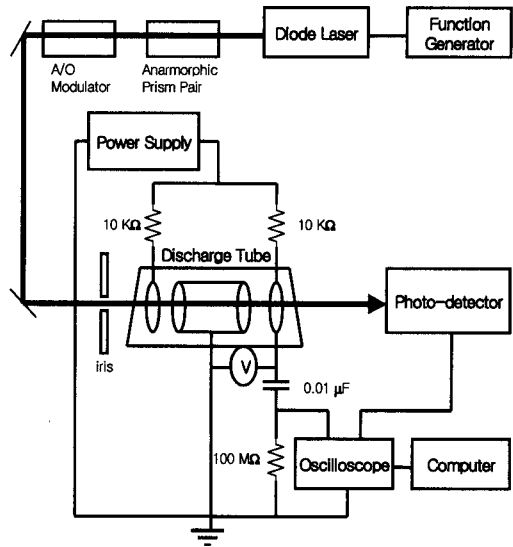


그림 1. Hollow cathode discharge tube에서 광검류 신호를 측정하기 위한 실험 장치.

Fig. 1. The experimental setup of measurement for the optogalvanic signals in the hollow cathode discharge tube.

본 연구에서 중심 파장이 810 nm과 635 nm인 다이오드 레이저 (Environmental Optical Sensors Inc., model ECU-2001-A)를 사용하여 Ar의 가장 낮은 준안정 준위인 801.479 nm ($1s_5 - 2p_8$)와 Ne의 가장 낮은 준안정 준위인 633.443 nm ($1s_5 - 2p_8$) 전이에서의 광검류 신호의 크기와 V-I 곡선을 측정하였다. HCD의 방전 전압을 측정하기 위해 양극과 음극 사이에 전압계를 연결하였다.

HCD는 원통형 음극을 사용하여 음극 내부에 글로우 방전의 여러 영역 중 음극 암흑부와 음극 글로우 영역만을 만들 수 있고, 낮은 전압으로 방전을 유지할 수 있다. 또한 충돌에 의한 전자의 많은 생성이 플라즈마 안의 원자를 들뜨게 하고 이온화시키므로 HCD는 원자 분광학에서 원자 증기 발생원 또는 원자 스펙트럼용 광원으로 널리 쓰이고 있다.

3. 결과 및 고찰

Ar 기체가 들어있는 HCD에서 피이크 모양 광검류 신호와 V-I 곡선을 측정할 결과가 그림 2이

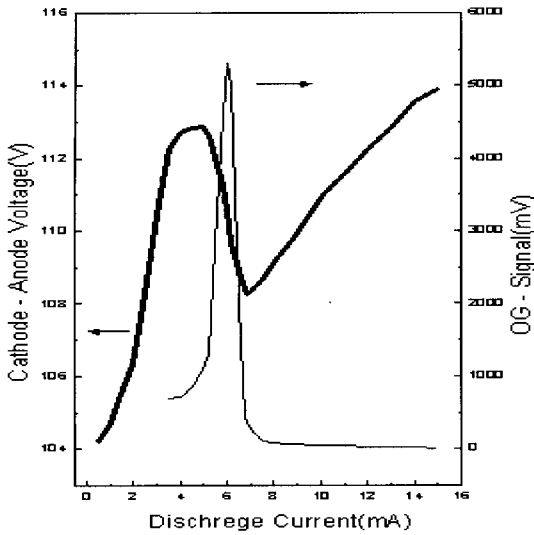


그림 2. Gd/Ar HCD에서 전류 대 전압 곡선과 피이크 모양 광검류 신호.

Fig. 2. The V-I curve and peak-like opto-galvanic signals for Gd/Ar HCD.

다. Ar 기체에서 Gd를 음극으로 사용했을 때 801.479 nm ($1s_5 - 2p_8$)에서의 피이크 모양 광검류 신호와 V-I 곡선은 그림 2이다. 그림 2에서 보듯이 Gd/Ar HCD의 V-I 곡선에서는 "bump"가 나타나고, 이는 피이크 모양 광검류 신호와 상호 관련이 있다. 그림 3은 Gd/Ar HCD에서의 V-I 곡선과 이 곡선의 미분이다. 그림 3에서 보듯이 동적 저항 $\rho(-dV/dI)$ 가 전류 I의 여러 영역에서 양 또는 음의 값을 갖는다. ρ 가 음의 값을 갖는 전류 I의 영역을 음저항 영역이라 한다.

그림 3에서 빗금친 부분이 음저항 영역이고 V-I 곡선에서 보면 전압 강하가 일어나는 부분이다. 방전관의 음극과 양극 사이에 전압이 걸리면 음극 표면에서 튀겨나온 전자와 Ar 원자가 충돌하여 Ar 이온이 생성된다. 전압이 더 증가하면 Ar 이온의 충돌 에너지가 높아지므로 음극 표면에서 전자뿐만 아니라 중성 금속 원자가 튀어나오는 스퍼터링 현상이 일어난다. 바닥 상태의 중성 금속 원자와 Ar의 가장 낮은 준안정 준위 원자와 충돌하여 바닥 상태의 금속 원자가 금속 이온이 된다. 이러한 이온화의 결과로 금속 이온이 증가하므로 전기 전도도가 증가하고, 방전 저항은 감소한다. 정전류 방식에서 방전 저항의 감소는 방전 전압의 감소로

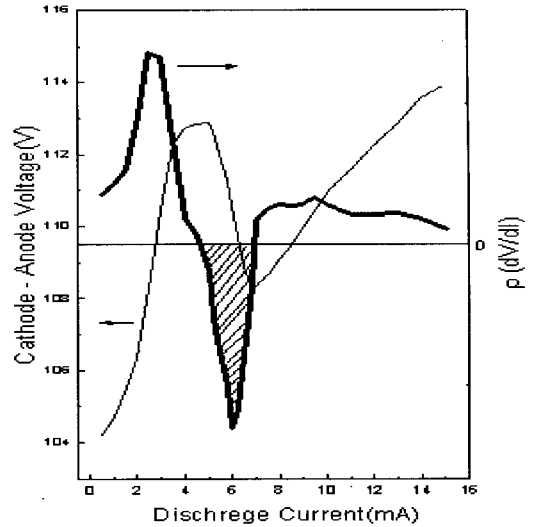


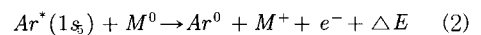
그림 3. Gd/Ar HCD에서 V-I 곡선과 이 곡선의 미분.

Fig. 3. The V-I curve and its derivative for Gd/Ar HCD.

의미하므로 전압 강하가 생긴다. 즉 전압 강하는 그림 2의 V-I 곡선에서 "bump"이다. 이와 같이 음저항 영역에서는 음극 물질에서 스퍼터링된 원자들을 이온화시키는 Penning 효과가 우세하다.

그림 2에서 보이는 결과와 같은 유사한 결과가 펄스 레이저[7]와 연속 발진 레이저[18]를 사용한 광검류 실험에서 관측되었다. 이와 같은 현상의 원인은 준안정 준위의 Ne 원자와 Ca[7]과 As[11]의 스퍼터링된 원자 사이의 Penning 이온화 작용에 의하여 전기 전도도가 증가되었다는 것으로 설명되었다.

본 연구에서 피이크 모양 광검류 신호와 음저항 영역에서의 Penning 이온화 효과를 분명히 하기 위해 Ar의 가장 낮은 준안정 에너지 준위와 음극 금속 원소의 에너지 준위를 그림 4와 같이 분석하였다. 식 (1)의 Penning 이온화를 다시 쓰면 식 (2)와 같다.



여기서 $Ar^*(1s_5)$ 는 가장 낮은 준안정 준위의 Ar 기체 원자, M^0 는 바닥 상태에 있는 중성 금속 원자, M^+ 는 금속 이온이고 ΔE 는 에너지 불일

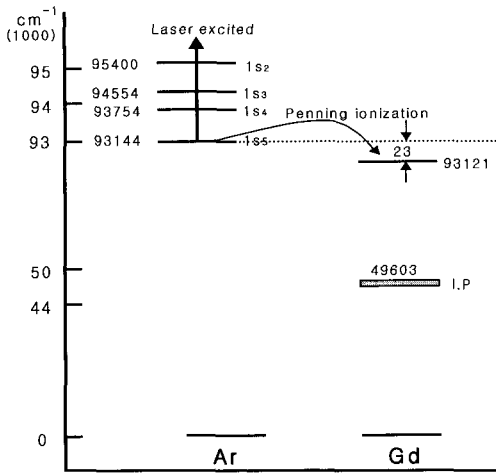


그림 4. Penning 이온화와 관련이 있는 Ar과 Gd의 에너지 준위.
 Fig. 4. Energy level diagram of Ar-Gd system relevant to the Penning ionization.

치로 Ar 기체의 준안정 준위 $1s_5$ 와 금속 이온의 들뜬 준위와의 에너지 차이이다. 기체의 준안정 준위는 공명 준위와는 달리 msec 이상의 긴 수명을 갖기 때문에 이러한 준안정 준위의 원자들이 다른 중성 금속 원자와 충돌할 확률이 높아서 금속 원자를 이온화시킬 수 있다. 그 결과 방전 전압은 낮아진다.

그림 4은 Ar 기체와 Gd 금속의 에너지 준위이다. Ar의 가장 낮은 준안정 준위에 가장 가까운 Gd 이온 (Gd^+)의 들뜬 준위는 43518 cm^{-1} [12]에 있다. 이 들뜬 준위는 그림 4에서 보듯이 중성 Gd의 바닥 상태에서부터 93121 cm^{-1} 이므로 Ar의 가장 낮은 준안정 준위 93144 cm^{-1} [13]와 23 cm^{-1} 의 작은 에너지 불일치를 갖는다. 그러므로 식 (2)에 의해 $1s_5$ 의 준안정 준위 Ar 원자가 음극에서 방출된 바닥 상태의 Gd 원자와 충돌하면 Ar 원자는 바닥 상태로 떨어지고 바닥 상태에 있는 Gd 원자는 93144 cm^{-1} 의 에너지를 얻어 이온이 되는 에너지 교환 과정이 쉽게 일어난다. 즉 Penning 이온화에 의해 전기 전도도가 증가하므로 그림 2에서와 같이 V-I 곡선에 "bump"가 나타나며 이 구간에서 피크 모양 광검류 신호가 나타난다.

Ne 기체가 들어있는 HCD에서 피크 모양 광검류 신호와 V-I 곡선을 측정 한 결과가 그림 5이

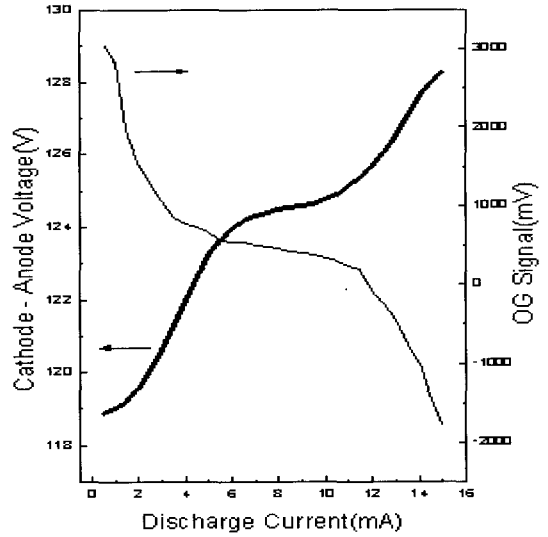


그림 5. Gd/Ne HCD에서 V-I 곡선과 피크 모양 광검류 신호.
 Fig. 5. The V-I curve and peak-like optogalvanic signals for Gd/Ne HCD.

다. Ne 기체에서 Gd을 음극으로 사용했을 때 $633.443\text{ nm}(1s_5 - 2p_8)$ 에서의 피크 모양 광검류 신호와 V-I 곡선은 그림 5이다. 그림 5의 Gd/Ne HCD 경우에는 전류가 증가하여도 V-I 곡선에 "bump"가 나타나지 않고 전압도 단조롭게 증가한다. 그림 6은 Gd/Ar HCD에서의 V-I 곡선과 이 곡선의 미분이다. 그림 6에서 보듯이 동적 저항 ρ 는 전류 I의 여러 영역에서 양의 값을 갖는다. 그러므로 음저항 영역이 나타나지 않고 V-I 곡선에서 보면 전압강하가 일어나는 부분이 없다.

그림 5에서 보이는 결과와 같은 유사한 결과가 다이오드 레이저를 사용한 La/Ar HCD 실험에서 관측되었다[14]. Ar의 가장 낮은 준안정 준위에 가장 가까운 La 이온 들뜬 준위는 49733 cm^{-1} [12]에 있다. 이 들뜬 준위는 중성 La의 바닥 상태에서부터 94714 cm^{-1} 이므로 Ar의 가장 낮은 준안정 준위와의 에너지 불일치는 1570 cm^{-1} 이다. 이 큰 에너지 불일치 때문에 Ar의 가장 낮은 준안정 준위와 La 중성 원자 사이에 에너지를 교환할 수 있는 충돌이 일어날 확률이 작아 V-I 곡선에 "bump"도 나타나지 않고 피크 모양 광검류 응답도 없다. 이는 Ar 기체와 스퍼터링된 원자 사이에 반응이 없다는 것이다. 즉 Penning 이온화 효과는 일어나지 않는다.

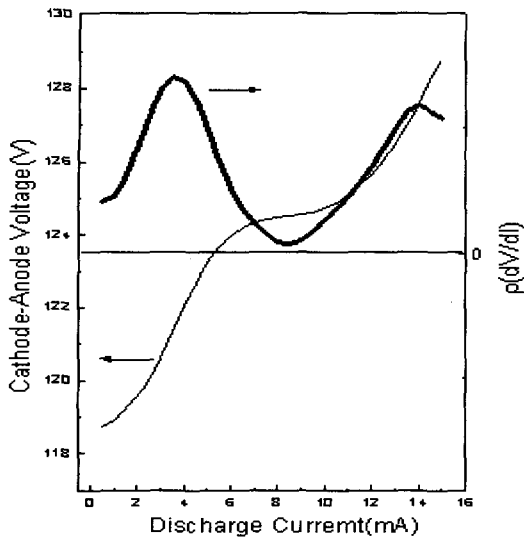


그림 6. Gd/Ne HCD에서 V-I 곡선과 이 곡선의 미분.

Fig. 6. The V-I curve and its derivative for Gd/Ne HCD.

완충 기체가 Ne인 경우에 Gd 급속을 음극으로 사용하면 V-I 곡선에 음저항 영역이 나타나지 않는다. 그림 7에서 보듯이 Gd 이온의 들뜬 준위는 이온화 준위로부터 49498 cm^{-1} [12] 이상은 알려져 있지 않다. 그러므로 Ne의 $1s_5$ 준위에 가장 가까이 알려진 Gd 이온의 들뜬 준위는 중성 Gd의 바닥 상태에서부터 99101 cm^{-1} 이고 Gd^{++} 의 준위는 바닥 상태에서부터 147103 cm^{-1} 이므로 Ne의 준안정 준위 $1s_5$ 와는 13059 cm^{-1} 의 큰 에너지 불일치를 보이고 있다. 이와 같은 에너지 차이는 Ar 방전에서 음저항 영역이 나타나지 않은 La에서의 에너지 불일치 보다 8배 정도 크다. 그러므로 이와 같은 큰 불일치에서는 음저항 영역이 나타나지 않는다. 또한 Penning 이온화 효과가 나타나지 않는 것으로 보아 Ne 기체의 준안정 준위 근처에 Gd 이온의 에너지 준위가 없는 것으로 생각된다.

4. 결론

Ar과 Ne 기체를 방전 기체로 사용한 속이 빈 원통형 음극 방전에서 V-I 곡선을 측정하였다. Ar이 들어있는 방전에서만 음저항 영역이 관측하였다. 또한 이 영역에서 피크 모양 광검류 신호도

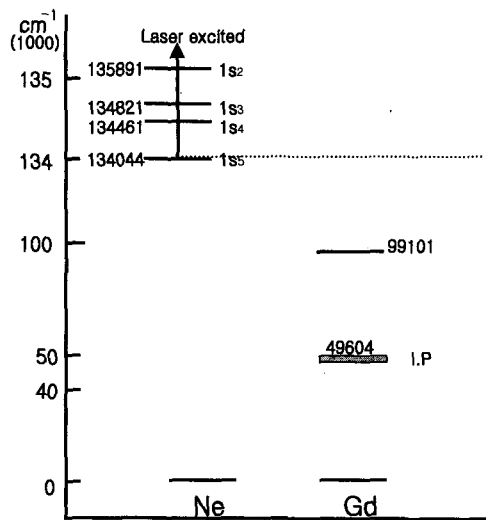


그림 7. Penning 이온화와 관련된 Ne과 Gd의 에너지 준위.

Fig. 7. Energy level diagram of Ne-Gd system relevant to the Penning ionization.

측정되었다. Penning 이온화 과정이 V-I 곡선에서 전압 강하가 일어나는 음저항 영역을 만드는 원인 중의 한가지로 작용한다. Penning 이온화 효과를 관찰하기 위해서는 음극 급속의 이온화 에너지가 불활성 기체의 가장 낮은 준안정 준위보다 작아야 할 뿐만 아니라, 준안정 준위 근처에 에너지를 교환할 수 있는 음극 급속의 이온 에너지 준위가 있어야 한다.

참고 문헌

- [1] K. C. Smyth and P. K. Schenck, "Optogalvanic spectroscopy of a neon discharge: Mechanism studies", Chem. Phys. Lett., Vol. 55, No. 3, p. 466, 1978.
- [2] J. M. Labat and S. Bukvic, "The influence of some impurities on the optogalvanic signal", J. Phys., Vol. D21, p. 1396, 1988.
- [3] V. D' Accurso, F. A. Manzano, and V. B. Slezak, "Chopped cw laser-induced optogalvanic effect in a neon hollow cathode discharge", Appl. Phys., Vol. B63, p. 375, 1996.

- [4] G. Erez, S. Lavi, and E. Miron, "A simplified theory of the optogalvanic effect", *IEEE J. Quant. Elec.*, Vol. QE-15, No. 12, p. 1328, 1979.
- [5] E. Miron, I. Smilanski, J. Liram, S. Lavi, and G. Erez, "Dynamic optogalvanic effect in rare gases and uranium", *IEEE J. Quant. Elec.*, Vol. QE-15, No. 3, p. 194, 1979.
- [6] A. Ben-Amar, G. Erez, and R. Shuker, "Pulsed resonant optogalvanic effect in neon discharge", *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, No. 7, p. 3688, 1983.
- [7] R. Shuker, A. Ben-Amar, and G. Erez, "Optogalvanic spectroscopy of quasi-resonance penning ionization", *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, No. 10, p. 5685, 1983.
- [8] A. Ben-Amar, G. Erez, S. Fasting, and R. Shuker, "Observation of penning ionization in Sr/Ne discharge by the optogalvanic effect", *Appl. Optics*, Vol. 23, No. 24, p. 4529, 1984.
- [9] B. R. Reddy, P. Venkateswarlu, and M. L. George, "Penning type of ionization energy transfer collisions in a Hg-Ar discharge detected by the optogalvanic effect", *Optics Comm.*, Vol. 73, No. 2, p. 117, 1989.
- [10] B. R. Reddy and P. Venkateswarlu, "Optogalvanic effect in neon hollow cathode discharge", *Optics Comm.*, Vol. 85, No. 5, 6, p. 491, 1991.
- [11] D. Zhechev and G. Todurove, "On the peak-like light induced galvanic responses in a hollow cathode discharge", *Optics Comm.*, Vol. 136, p. 227, 1997.
- [12] W. C. Martin, R. Zalubas, and Lucy Hagan, "Atomic energy levels", NSRDS-NBS 60, U. S. Department Commerce, 1978.
- [13] C. E. Moore. "Atomic Energy Levels", NSRDS-NBS 35, Vol. I, U. S. Department Commerce, 1971.
- [14] E. C. Jung, S. P. Rho, J. M. Lee, J.-H. Lee, and H. Cho, "Effects of penning ionization on the optogalvanic signal of argon/rare-earth metal hollow-cathode discharge", *Optics comm.*, Vol. 149, p. 238, 1998.