

## 반도체 다이오드 레이저를 사용한 U, Th 및 Rb의 Optogalvanic Spectroscopy에 관한 연구

李 相 千\*

경남대학교 자연과학대학 화학과  
(1993. 7. 20 접수)

### Optogalvanic Spectroscopy of U, Th and Rb using Diode Lasers

Sang C. Lee\*

Department of Chemistry, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea  
(Received July 20, 1993)

**요 약.** 다이오드 레이저를 optogalvanic spectroscopy에 이용하여 우라늄, 토륨 및 루비듐에 대한 전자전이 및 다이오드 레이저의 분광학적 특성을 살펴보았다. 흡수스펙트럼의 분석은 속빈 음극관내 음극표면에서 팽김에 의해 형성된 고온의 금속원자 기체를 다이오드 레이저를 이용하여 금속원자의 광흡수 현상에 따른 임피던스의 변화를 측정함으로써 수행되었다. 다이오드 레이저를 사용하여 자연산 악티늄족 원소인 토륨과 우라늄의 검출을 수행하였다. 본 실험에 이용된 optogalvanic spectroscopy에서는 Doppler 효과로 인한 띠 나비에 제한이 있어 초미세 갈라짐이나 동위원소 선이동을 관찰하는데 어려움이 있었다. 하지만 루비듐 780.023 nm에서는 Doppler 띠 넓힘이 있음에도 불구하고 동위원소의 선이동과 초미세 갈라짐을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서는 다이오드 레이저가 방사능을 지닌 악티늄족 원소들의 검출과 이들의 동위원소 존재비를 측정할 때 유용하고, 별로 알려지지 않은 란타넘 및 악티늄족의 초미세 갈라짐 상수와 같은 분광학적으로 중요한 파라미터를 구하는데에도 긴요하게 쓰일 수 있음을 고찰하였다.

**ABSTRACT.** First observation of uranium using a diode laser was published recently. The experiment was performed by the optogalvanic spectroscopy using diode lasers. A laser source causes the current change in a hollow cathode discharge lamp when metal atoms in plasma absorb the diode laser light. The optogalvanic signal is collected by detecting the current change. This work is the extended investigation of our previous research, the uranium detection using a diode laser. New electronic transitions of uranium and thorium in 775~850 nm were investigated using diode lasers. In addition, the Rb(I) optogalvanic spectra at 780.02 nm and 794.76 nm were studied. The Rb(I) spectrum at 780.02 nm showed the isotopic features and hyperfine splittings. This work provides a key idea that the diode lasers are useful in the spectrochemical analysis of the radioactive actinides that have a rich spectrum with transitions which can be easily reached with AlGaAs diode lasers. Also, this study shows that the diode lasers can be an important tool to find the spectroscopic parameters of actinides and rare earth elements which have not known.

### 서 론

레이저의 사용이 과학분야에 급속히 증가하는데는 레이저가 다른 광원으로는 얻기 힘든 높은 광에너지, 결맞음, 좋은 시간적, 공간적 분해능들을 가지고 있기

때문이다<sup>1-5</sup>. 특히 1960년대 초에 처음 소개된 다이오드 레이저는 액체질소를 사용해야 하는 불편함과 빔의 power와 optical quality가 다른 레이저에 뒤떨어졌던<sup>6-8</sup> 초기의 문제점이 해결되면서 현재는

대량 생산으로 인한 경제적 이점 등으로 통신망, 가전제품, 세미나용 pointer에 이르기까지 다방면에 응용되고 있다. 근래에 다이오드 레이저는 높은 스펙트럼 분해능과 시간에 따른 안정된 레이저 빔의 세기로 인하여 고분해능 분광법<sup>9</sup>에 이용되었으며 분석용 분광계의 광원으로서 원자흡수 분광법<sup>10</sup>에도 이용되었다. 이러한 다이오드 레이저는 분해능의 제한을 받는 동위원소간의 분리나 질량분석기로 분석이 곤란한 동위원소간의 분석에도 유용하게 이용될 수 있어 이에 대한 연구가 분광분석에 많이 기여할 것이다. 또한 다이오드 레이저는 경제적이고 부피가 작으며 사용이 간편한 휴대용 분광계의 개발에도 많이 기여하리라 사료된다. 이러한 이점에도 불구하고 현재까지 다이오드 레이저를 활용한 분광학적 연구는 그리 많지 않은 실정이다. 이는 다이오드 레이저가 가변과장에 제한성이 있고, mode hopping에 의한 과장의 불연속성으로 분광계용 광원으로서의 근본적 제한을 받고 있기 때문이다. 이러한 제한들은 최근 실험적으로 어느 정도 보완되었으며<sup>11</sup> 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있어 짧은 시일내에 이러한 단점들의 바람직한 해결이 있으리라 본다. 다이오드 레이저의 좁은 띠 나비는 방사능을 지닌 악티늄족 원소들의 검출은 물론이고, 이들의 동위원소까지도 분석이 가능케 할 수 있다. 1992년에 Edelson 등<sup>12</sup>은 최초로 다이오드 레이저를 이용한 우라늄 검출에 대한 연구는 보고함으로써 이전까지 전혀 보고된 바 없는 다이오드 레이저를 이용한 악티늄족 원소들의 분광분석에 대한 가능성을 제시하였다. 그들의 실험은 다이오드 레이저를 방사성 동위원소의 분석에 활용할 수 있음을 실험적으로 성공시킨 중요한 결과로 여겨진다.

본 연구에서는 다이오드 레이저를 이용한 우라늄의 검출에 대한 연구<sup>12</sup>를 더 확장하여 우라늄의 다른 전자전이의 관찰과 토륨의 분석 및 루비듐의 검출을 통해 다이오드 레이저의 분광학적 특성을 살펴보고 이의 활용성 등을 고찰하였다. 특히 방사능을 지닌 악티늄족 원소들의 분광 분석에 다이오드 레이저의 실제적 적용이 가능함을 보여주고, 루비듐의 Optogalvanic spectroscopy를 통해 동위원소의 선이동과 초미세 갈라짐을 관찰하였다.

## 실 험

Optogalvanic Spectroscopy는 간단하고 감도가 높은 분광법으로서 dc 방전으로 형성된 플라스마내에 존재하는 금속 원소들을 흡수공명과장의 레이저 빔을 이용하여 음극과 양극 사이의 임피던스 혹은 전류의 변화를 감지함으로써 금속 원자의 흡수 스펙트럼을 구하게 된다<sup>13-16</sup>. 본 실험에서는 상업용으로 제작된 우라늄, 토륨 및 루비듐의 속빈 음극관(Photron사)과 다이오드 레이저를 사용한 Doppler-limited Optogalvanic Spectroscopy를 이용하여 각 금속원소를 검출하였다. 이들 속빈 음극관의 전원으로는 Bertan Model 205B-01R(0~1 kV, 0~30 mA) 직류 전원을 사용하였다. 다이오드 레이저는 Mitsubishi사와 Hitachi사의 AlGaAs 레이저 다이오드를 사용하였고, 다이오드 레이저의 전원과 온도 조절기는 ILX Lightwave Model 3207B와 5910B를 각각 사용하였다. 이때 다이오드 레이저의 과장은 레이저 다이오드에 보내는 전류의 양과 온도의 변화에 따라 조절되는데 보통 미세한 주사 과장은 전류를 변화시켜 조절하고, 이에 반해 큰 과장은 온도를 변화시켜 조절할 수 있다<sup>6</sup>. 따라서 다이오드 레이저의 전원과 온도 조절 장치는 잡음이 적고 안정도가 높은 것을 선택하는 것이 바람직하다. 예를 들어 본 실험에 사용한 Mitsubishi ML64110N 다이오드 레이저의 경우 루비듐  $12887\text{ cm}^{-1}$  선의 감지를 위해  $18.2^\circ\text{C}$ 의 온도를 유지하며 전류를  $141.4\text{ mA}$ 에서  $144.6\text{ mA}$ 까지 변환시켰고, 우라늄  $12893\text{ cm}^{-1}$  선은  $18.2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 전류를  $153.3\text{ mA}$ 에서  $153.8\text{ mA}$ 까지 변환시키며 스펙트럼을 얻었다. 전반적으로  $1\text{ cm}^{-1}/^\circ\text{C}$ 나  $0.1\text{ cm}^{-1}/\text{mA}$ 의 과장 변화를 볼 수 있었다. 또한 원하는 과장에 가까운 공칭과장을 가진 레이저 다이오드의 선택은 중요한데, 그 이유는 일반 다이오드 레이저의 경우 보통 공칭과장으로부터  $\pm 5\text{ nm}$  정도의 과장 범위에서 과장을 가변시킬 수 있고 공칭과장을 가진 다이오드 레이저의 경우 공칭과장 부근에서 비교적 안정되고 mode hopping에 의한 과장의 불연속성이 적게 나타나기 때문이다. 본 실험에 사용한 AlGaAs 다이오드 레이저는  $20\sim 30\text{ MHz}$ (약  $0.0007\sim 0.001\text{ cm}^{-1}$ )의 띠 나비를 지니고 있고, 일단 초기 30분 정도의 예열 후부터는 장시간 동안 과장



Table 1. Instrumental components and operating conditions for uranium, thorium and rubidium optogalvanic spectroscopy using diode lasers

Instrumental component descriptions	Operating conditions
<b>Laser diodes:</b>	
Mitsubishi ML2701-01 (Power: 10 mW, $\lambda=830\pm 15$ nm)	Operating current: 55 to 90 mA Operating temperature: $-40\sim 70^\circ\text{C}$
Mitsubishi ML64110N (Power: 30 mW, $\lambda=776\pm 5$ nm)	Operating current: 75 to 180 mA Operating temperature: $-40\sim 80^\circ\text{C}$
Mitsubishi ML4012N (Power: 5 mW, $\lambda=794\pm 5$ nm)	Operating current: 45 to 70 mA Operating temperature: $-40\sim 60^\circ\text{C}$
Hitachi HL7801E (Power: 5 mW, $\lambda=778\pm 7$ nm)	Operating current: 50 to 90 mA Operating temperature: $-10\sim 60^\circ\text{C}$
<b>Precision current source:</b>	
ILX Lightwave 3207B (Resolution: 0.1 mA)	Output current range: 0 to 200 mA
<b>Thermoelectric temperature controller:</b>	
ILX lightwave 5910B (Resolution: 0.1 $^\circ\text{C}$ , Stability: 0.005 $^\circ\text{C}$ or better for short term)	Temperature range: $-20\sim 50^\circ\text{C}$
Laser housing: ILX Lightwave LDM-4412	Temperature controlled laser diode mount, controlled by ILX 5810B
<b>Hollow cathode discharge lamp:</b>	
Photron U, Th and Rb Lamps (Starna Cells, Inc.)	Operating current: 10~15 mA Operating voltage: 150~500 V
Power supply for HCD lamp: Bertan Model 205B-01R	Operating voltage range: 150~500 V Operating current range: 10 to 15 mA
<b>Lock-in amplifier: Sensitivity: 0.2 to 1 mV</b>	
EG & G Model 5210 & Stanford Research System SR510	Time constant: 110 to 300 msec.
Chopper: Stanford research system SR540	Frequency range: 1~3.5 kHz

밝히는 바이다.

### 결과 및 토의

**우라늄 스펙트럼.** Optogalvanic spectroscopy에 의한 최초의 우라늄 스펙트럼은 778.413 nm에서 Hitachi HL7801E AlGaAs 레이저 다이오드를 사용하여 이루어졌는데<sup>12</sup> 본 연구에서는 이와 다른 공칭 파장을 가진 다이오드 레이저를 사용하였다. 우라늄의 775.987 nm와 776.184 nm에서의 전자전이와 Mitsubishi사의 ML64110N 레이저 다이오드를 838.186 nm와 844.535 nm에서의 전자전이는 ML2701-01 레이저 다이오드를 사용하였다. 이 전자전이들에 대해서는 한 번의 주사에 한 봉우리를 측정할 수밖에 없었는데 이는 mode hopping없이 넓은 파장

범위를 측정하기가 곤란했고, 원하는 분해능내에서 측정할 경우 측정해야 할 데이터 용량이 커서 빠르고 용량이 큰 컴퓨터의 사용이 불가피하였기 때문이었다. 776.184 nm( $7006 \rightarrow 19885 \text{ cm}^{-1}$ )에서 전자전이를 갖는 우라늄 스펙트럼은 FWHM(The Full Width at Half Maximum)가 460 MHz였고, 이 전자전이에서 속빈 음극관의 전류세기에 따른 신호 세기의 의존도를 관찰한 결과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 전류의 세기에 따라 신호가 선형적으로 의존하는 것으로 나타났다. 또한 이들 레이저를 이용하여  $12705.0203 \text{ cm}^{-1}$ 와  $12704.9425 \text{ cm}^{-1}$ 에서 두 개의 봉우리를 동시에 관찰한 우라늄 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. 이들 봉우리는 Gauss 곡선형태를 이루고 있어 온도에 의한 Doppler 효과에 기인함을 알 수 있었으

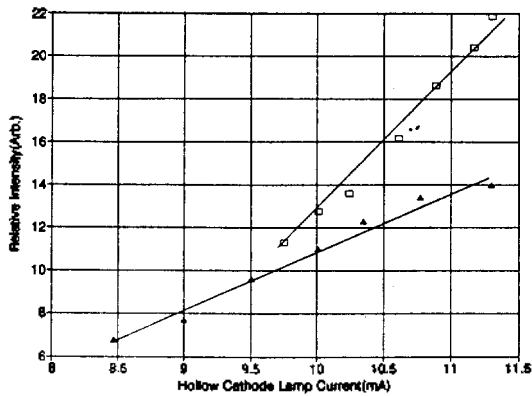


Fig. 2. A plot of hollow cathode discharge lamp current versus uranium and thorium optogalvanic signal intensities. □, Uranium; ▲, Thorium.

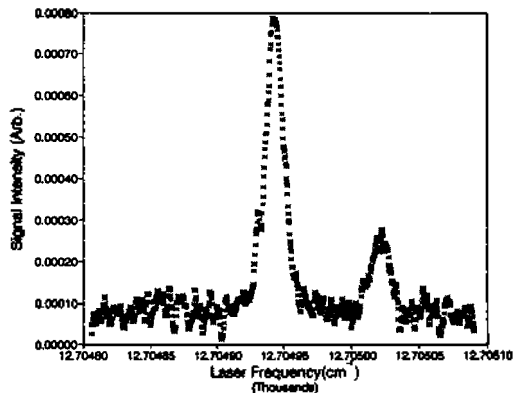


Fig. 3. The uranium optogalvanic spectrum showing two peaks at  $12705.0203\text{ cm}^{-1}$  and  $12704.9425\text{ cm}^{-1}$ .

며<sup>20</sup> 이들 봉우리 나비(FWHM)는  $450\sim 460\text{ MHz}$ 였다. Doppler 띠 넓힘에 의한 이들 봉우리 나비를 이용하여 플라즈마 온도를 계산한 결과  $650\sim 680^\circ\text{C}$  정도임을 알 수 있었다. 우라늄은 자연적으로 세 가지 동위원소인  $^{234}\text{U}(0.006\%)$ 과  $^{235}\text{U}(0.72\%)$  및  $^{238}\text{U}(99.3\%)$ 이 존재한다. 여기서 살펴본 모든 전자전이는 단지  $^{238}\text{U}$ 에 의한 것이었고 동위원소에 의한 선이동은 관찰할 수 없었다. 첫째로는 앞의 실험 방법란에서 언급한 바와 같이 이 실험에 사용한 속빈 음극관이 99.9% 이상의  $^{238}\text{U}$ 으로 만들어졌으며, 둘째로는 우라늄 동위원소인  $^{235}\text{U}$ 에 의한 선이동은 바닥상태가  $620\text{ cm}^{-1}$ 에서 시작하는 전자전이의 경우 본 연구에서 관찰한 우라늄의 봉우리 나비인  $450\text{ MHz}$ 보다

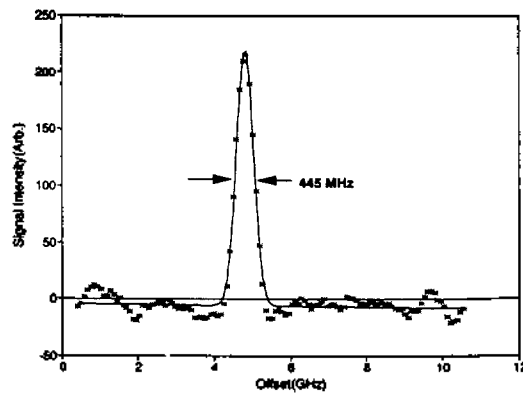


Fig. 4. The thorium optogalvanic spectrum at  $0 \rightarrow 11877\text{ cm}^{-1}$  transition having FWHM (the full width at half maximum) of  $445 \pm 26\text{ MHz}$ . \*, Raw data; —, Gaussian fit.

훨씬 큰 수 GHz의 범위에 있어<sup>21</sup> 만일 동위원소에 의한 선이동이 이루어졌다면 둘 이상의 봉우리를 관측하여야 한다.

본 실험을 통해 나타난 바와 같이 다이오드 레이저를 사용한 전자전이에서의 우라늄 검출은 기발표된  $778.413\text{ nm}$ 에서의 우라늄 검출과 더불어 다이오드 레이저가 방사능을 지닌 악티늄족 원소들의 검출에 이용될 수 있음을 보여준다.

**토륨 스펙트럼.**  $781.77\text{ nm}$ ,  $833.045\text{ nm}$  및  $841.678\text{ nm}$ 에서<sup>19</sup> 토륨에 대한 스펙트럼을 얻었다. 방사성 물질인 토륨은 자연에서  $^{232}\text{Th}$ 만이 존재하므로 동위원소에 의한 선이동은 관찰할 수 없었다. 토륨의  $0 \rightarrow 11877\text{ cm}^{-1}(841.678\text{ nm})$  전자전이에서 얻은 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 실험에서 얻은 data point는 최소제곱법을 이용한 Curve Fitting을 통하여 가우스 곡선으로 나타내었고, 이때 계산에 의해 구한 봉우리의 나비는 Full Width at Half Maximum (FWHM)에서  $445 \pm 26\text{ MHz}$ 였다. 이를 기준으로 볼 때 플라즈마내의 토륨원자의 온도도 우라늄과 비슷한  $700^\circ\text{C}$  정도임을 알 수 있었다. 토륨에 대한 신호를 측정시 잡음의 크기는 우라늄의 경우보다 전반적으로 증가된 것을 볼 수 있었다. 또한 속빈 음극관내의 중성가스인 네온과 토륨의 동시 측정이 가능하였는데 이때 네온의 봉우리 나비는  $1.4 \pm 0.3\text{ GHz}$ 였고 두 봉우리 나비의 비는 3.146이었다. 이 결과를 Doppler 띠 넓힘에 의한 네온과 토륨의 봉

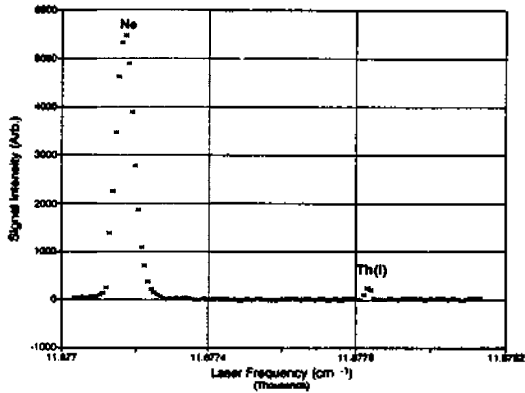


Fig. 5. A optogalvanic spectrum with neon and thorium peaks.

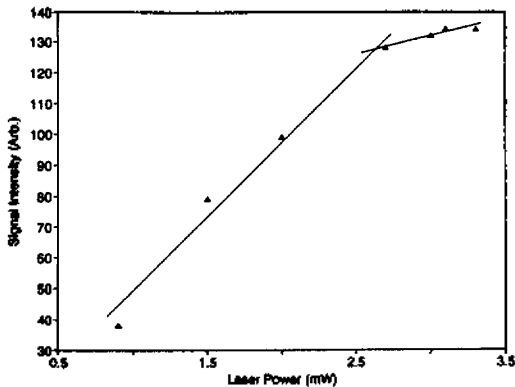


Fig. 6. A plot of laser power versus thorium signal measured at 841.647 nm ( $0 \rightarrow 11877 \text{ cm}^{-1}$ ). The power saturation effect above 2.7 mW was observed.

우리 비인 3.391에 비교할 경우 7%의 오차가 있었다. 이러한 오차는 네온과 토륨의 플라즈마내에서 온도의 차이에 기인하는 것으로 여겨진다. 네온과 토륨에 대한 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 한편 841.678 nm에서 속빈 음극관의 전류세기와 레이저 power에 따른 신호 세기의 상관관계를 살펴본 결과 Fig. 2와 6에서 보는 바와 같이 속빈 음극관의 전류는 우라늄의 경우와 같이 신호의 세기에 선형적 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 레이저 power의 세기에 대해서는 신호가 포화현상을 일으키는 것으로 관찰되었다. 따라서 토륨에 대한 검출결과는 앞절의 동족원소인 우라늄에 대한 검출결과와 더불어 다른 악티늄족 원소들의 검출 가능성을 더욱 높혀 준다.

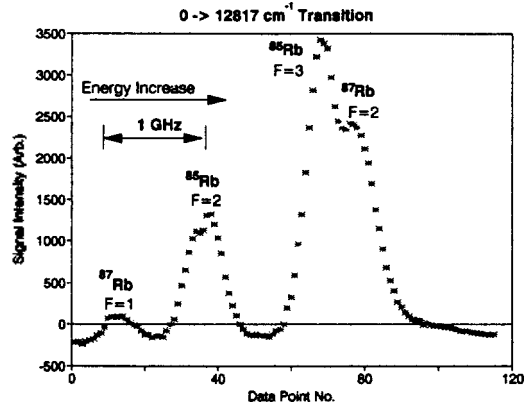


Fig. 7. The rubidium spectrum at 780.023 nm showing the isotopic features and hyperfine splittings.

볼 수 있다. 또한 다이오드 레이저의 방사 파장 범위에서 많은 전자전이를 지닌 방사성 악티늄 원소들의 검출에 중요한 광원으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

**루비듐 스펙트럼.** 다이오드 레이저의 파장 검정은 루비듐의 가장 강한 전자전이인 780.023 nm에서 수행된 바 있는데<sup>22</sup> 본 실험에서는 루비듐의 780.023 nm와 또 다른 강한 전자전이인 794.760 nm에서<sup>19</sup> 스펙트럼을 관찰하여 비교하였다. 또한 이 전자전이들은 약한 레이저 power에서도 쉽게 관찰될 수 있어 우라늄이나 토륨의 optogalvanic spectroscopy 기기에 대한 사전 검정이 필요할 때 이용되었다. 루비듐의 가장 강한 전자전이인 780.023 nm에서 관찰한 스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다. 이 스펙트럼에서 보는 바와 같이 루비듐의 D2선에서 <sup>85</sup>Rb와 <sup>87</sup>Rb 동위원소로 인한 선이동과 바닥상태의 갈라짐에 기인한 초미세 갈라짐이 관찰되었다. 이러한 초미세 갈라짐 현상은 Niemax 등<sup>8</sup>에 의해 관찰된 결과와 일치한다. 한편 794.760 nm에서는 Doppler 효과로 인하여 스펙트럼의 띠 나비가 초미세 갈라짐이나 동위원소로 인한 선이동보다 넓기 때문에 단지 한 봉우리만을 볼 수 있었다. 이러한 초미세 갈라짐이나 동위원소로 인한 선이동은 Doppler-free spectroscopy를 이용할 경우보다 더 자세히 관찰할 수 있으리라 본다.

이상의 결과로부터 다이오드 레이저의 좁은 선 나비를 이용하여 동위원소간의 선 이동과 세기를

측정함으로써 동위원소의 존재비 측정이 가능함을 알았으며 바닥상태의 갈라짐에 기인한 초미세 갈라짐에 대한 분광학적으로 중요한 파라미터도 구할 수 있음을 알았다. 또한 고가의 Ar ion laser pumped ring dye laser로 하던 기존의 실험을 저가의 다이오드 레이저로 대체하여 수행할 수 있음을 알았다.

## 결 론

다이오드 레이저를 사용하여 우라늄, 토륨 및 루비듐에 대한 스펙트럼을 얻어 각 원소들에 대한 전자전이를 살펴보았다. 본 실험 결과로부터 불 방사능을 지닌 악티늄족 원소들의 검출은 물론 이들의 중요한 동위원소의 존재비 측정이 가능함을 알았다. 또한 동위원소로 인한 선 이동이나 초미세 갈라짐을 관찰할 수 있어 분광학적 파라미터를 측정 가능함을 알 수 있었다. 특히 아직 많이 알려지지 않은 란타넘 및 악티늄족 원소들의 분광학적 파라미터를 구할 수 있고 이를 바탕으로 고분해능을 요구하는 분광분석에 크게 기여하리라 사료된다. 다이오드 레이저는 높은 분해능과 분광계의 광원으로 필요로 하는 안정도, 정밀도 및 정확도를 지니고 있음을 관찰하였다. 다이오드 레이저를 사용할 경우의 잇점으로는 동중원소의 분석이 용이하여 경제적 부담이 큰 질량분석기를 대신할 수 있다는 것과 부피가 작고 휴대용 전지의 사용으로 인한 휴대용 분광계의 제작이 가능하여 현장분석용 분광계의 개발이 가능하다는 것이다. 이 외에도 현재 고분해능 분광법에 많이 쓰이는 고가의 레이저를 대체할 수 있어 여러 분광학분야에 다이오드 레이저의 활용이 가속화되리라 사료한다.

본 연구 수행에 도움을 준 Ames Laboratory(USA)의 Dr. Lipert와 Dr. Edelson에게 감사드립니다.

## 인 용 문 헌

1. Hecht, J. *The Laser Guide Book, 2nd edition*; McGraw-Hill, Inc.: New York, 1992.
2. Hecht, J.; Teresi, D. *Laser: Supertool of the 1980s*;

Ticknor & Fields: New York, 1982.

3. Bertolotti, M. *Masers & Lasers. Historical Approach*; Adam Hilger, Ltd.: Bristol, U. K., 1983.
4. Levenson, M. D. *Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy*; Academic Press: New York, 1982.
5. Bloembergen, N. *Nonlinear Optics*; Benjamin, New York, 1965.
6. Camparo, J. C. *Contemp. Phys.* **1985**, *26*, 443.
7. Wieman, C. E.; Hollberg, L. *Rev. Sci. Instrum.* **1991**, *62*, 1.
8. Lawrenz, J.; Niemax, K. *Spectrochim. Acta* **1989**, *44B*, 155.
9. Imasaka, T.; Ishibashi, N. *Anal. Chem.* **1990**, *62*, 363.
10. Hergenröder, R.; Niemax, K. *Spectrochim. Acta* **1988**, *43B(12)*, 1443.
11. Lee, W. D.; Campbell, J. C. *Appl. Phys. Lett.* **1992**, *60(13)*, 1544.
12. Lipert, R. J.; Lee, S. C.; Edelson, M. C. *Appl. Spectrosc.* **1992**, *46*, 1307.
13. Sansonetti, C. J.; Weber, K. H. *J. Opt. Soc. Am. B* **1984**, *1*, 361.
14. Keller, R. A.; Warner, B. E.; Lalewski, E. F.; Dyer, P.; Engleman, Jr., R.; Palmer, B. A.; *J. Phys. III* **1983**, C7-23.
15. Camus, P. *J. Phys. III* **1983**, C7-87.
16. Suzuki, T. *Opt. Comm.* **1981**, *38*, 364.
17. Seltzer, M. D.; Piepmeier, E. H.; Green, R. B. *Appl. Spectrosc.* **1988**, *42*, 1039.
18. Gough, D. S.; Hannaford, P.; Walsh, A. *Spectrochim. Acta* **1973**, *28B*, 197.
19. Meggers, W. F.; Corliss, C. H.; Scribner, B. F. *Tables of Spectral Line Intensities, Part I-Arranged by Elements*; NBS Monograph 145, US Department of Commerce: Washington, D. C., 1975.
20. Ingle, Jr., J. D.; Crouch, S. R. *Spectrochemical Analysis*; Prentice Hall: New Jersey, 1988.
21. Becker, F. S.; Kompa, K. L. *The Practical and Physical Aspect of Uranium Isotope Separation with Lasers; Nuclear Technology* **1982**, *58*, 329.
22. Walters, P. E.; Barber, T. E.; Wensing, M. W.; Winefordner, J. D. *Spectrochim. Acta* **1991**, *46B*, 1015.