

반도체 레이저와 파장변조 분광학을 이용한 미량원소 측정

Measurement of Trace Elements Using Diode Lasers and Wavelength Modulation Spectroscopy

정의창, 송규석, 김택수, 고광훈, 김철중
 한국원자력연구소, 양자광학팀
 ecjung@kaeri.re.kr

미량원소의 정량 측정을 위한 계측장치는 산업계 전반에 걸쳐 그 수요가 증가되고 있다. 예를 들면, 최근 들어 세계적인 관심사의 하나인 환경오염 문제 해결을 위해서는 대기에 존재하는 미량기체를 검출하는 것이 필수적이다. 가스의 반응공정을 주로 이용하는 반도체 산업에서도 극미량(수 ppb)으로 존재하는 유해 가스를 실시간으로 측정하는 것은 제품의 완성도를 위해 매우 중요하다. 원자력 산업에서는 원자력 연료의 효율을 증가시키기 위해 반응로에서 연소된 연료에 잔존하는 미량의 란탄족(lanthanide)과 악티늄족(actinide) 원소를 측정하고, 원소의 동위원소 성분비를 분석하는 작업을 하고 있다.

반도체 레이저는 가스 분자의 검출에 특히 많이 사용되고 있다. 가스 분자의 진동 또는 회전에너지 준위(vibrational or rotational energy levels) 사이의 전이(transition)에 적합한 근적외선(near-IR)과 중적외선(mid-IR) 파장을 가지고 있기 때문이다. 또한 반도체 레이저를 동작시킬 때 전력소모가 적고, 설치 공간이 작다는 점은 미량원소의 측정 분야에서 매우 큰 장점으로 부각된다. 실험실에 설치되어 있는 기존의 계측장치를 사용할 때 시료의 채취를 비롯한 분석전 처리가 번거로운 것에 비해 반도체 레이저는 차량탑재 등이 가능하므로 실험실이 아닌 현장 적용에 유리하기 때문이다.

미량원소 측정을 위한 흡수분광학(absorption spectroscopy)은 진동수 변조(frequency-modulation) 방법이 개발되면서 급격히 발전하였다. 이 방법은 파장을 변조시킨 레이저빔의 흡수스펙트럼을 변조진동수 또는 조화진동수에서 측정하는 방법이다. 높은 변조진동수를 사용하여 레이저 광원의 잡음을 제거함으로써 측정감도를 높일 수가 있다. 통상적으로 kHz 영역의 변조진동수를 사용할 때 10^{-4} - 10^{-5} 의 흡수도(absorbance)를 측정할 수 있으며, 파장 변조(wavelength-modulation) 방법이라고 칭한다. MHz 이상의 변조진동수를 사용하면 10^{-7} - 10^{-8} 의 흡수도 측정이 가능하다.

이 연구에서는 중심 파장이 각각 805 nm와 850 nm인 반도체 레이저를 사용하여 미량의 우라늄(U) 원자와 물(H₂O) 분자를 측정한 결과를 보고한다. 지금까지 발표된 대부분의 미량측정 결과가 Fabry-Perot 구조의 레이저를 사용한 것에 비해 이 연구에서는 외부 공진기 구조의 레이저를 사용하였다. 외부 공진기 구조의 반도체 레이저는 Fabry-Perot 구조의 레이저에 비해 모드 텀(mode-hops) 없이 파장의 변화가 용이하고, 발진파장 영역이 깨어지지 않고 연속적이라는 장점을 가지고 있다. 외부 공진기(Littman/Metcalf 구조)의 전반사 거울에 부착된 PZT에 가해지는 전압을 변조하여 공진기의 길이를 변화시키면 파장 변조가 가능하다. 그림 1은 U 원자의 860.795 nm 전이에 대한 실험결과이다. U 원자는 hollow-cathode 방전관에서 발생되었고, 0.01 mW의 레이저 출력이 사용되었다. 800 Hz의 변조진동수를 사용하고, 1600 Hz 성분의 흡수신호를 얻은 결과로서 측정이 가능한 흡수도는 8×10^{-5} 이며, $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 의 원자밀도에 해당된다. 그림 2에 H₂O 분자의 800.249 nm 전이에 대한 흡수스펙트럼을 보였다. 10 Torr의 압력에서 실험이 수행되었고, 수 ppm의 측정감도를 보이고 있다.

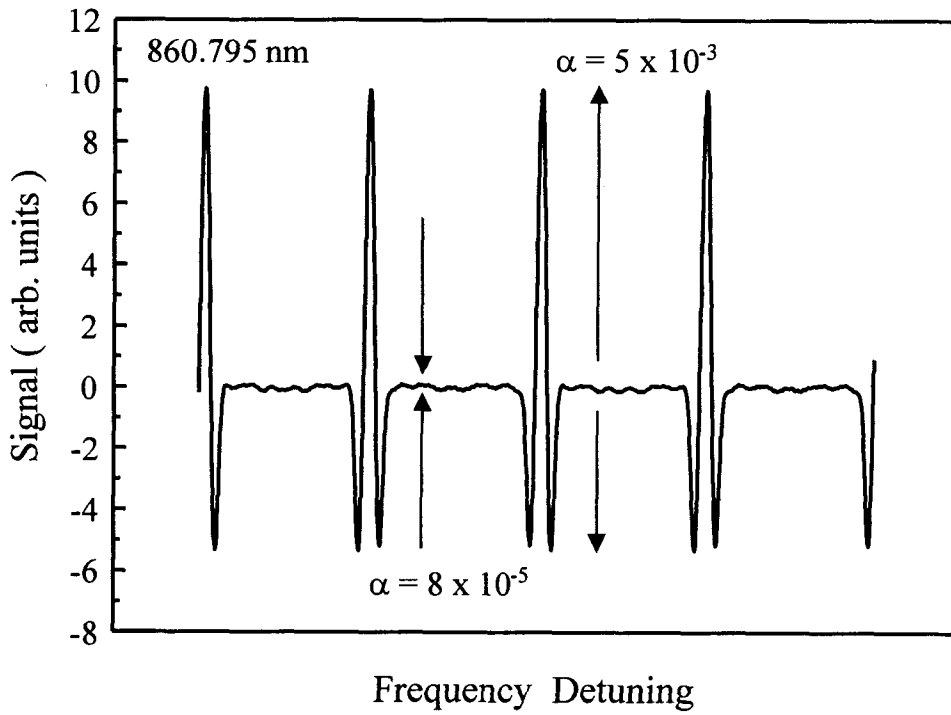


그림 1. U 원자의 흡수스펙트럼. 측정 한계(detection limit)는 8×10^{-5} 흡수도에 해당된다.

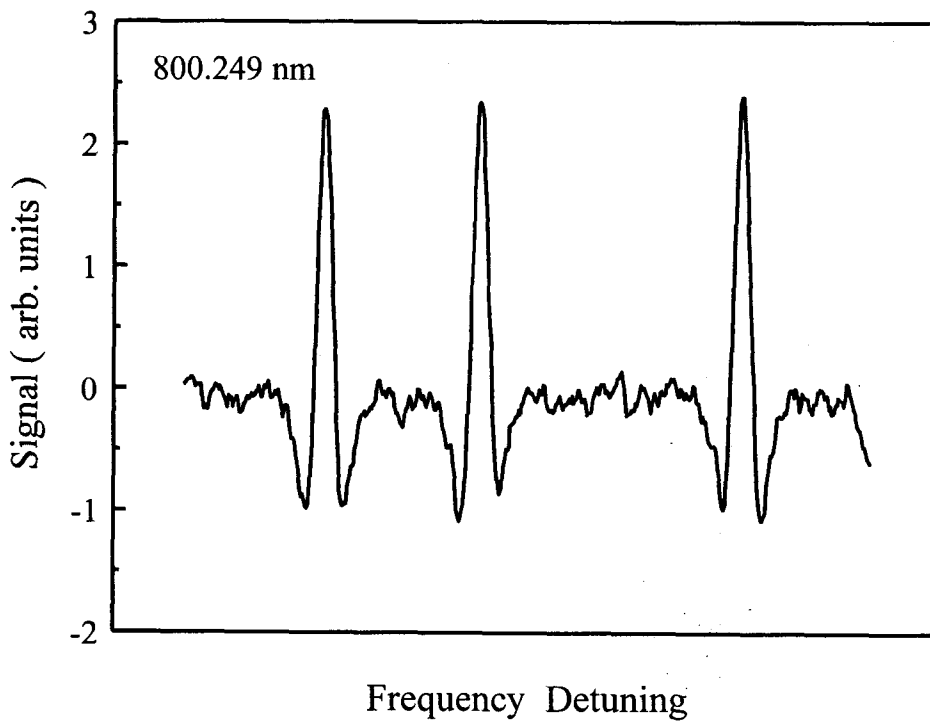


그림 2. 10 Torr 압력에서 측정된 H₂O 분자의 흡수스펙트럼.