

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

레이저 광반응 생성물을 이용한 색소레이저의 회귀 제어 시스템 개발

Development of Dye Laser Feedback Control System by Using Laser Induced Mass Signals

김덕현, 송규석, 차형기
한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
대전광역시 유성구 덕진동 150

신은철, 연구황
충북대학교 물리학과
충북 청주시 개신동 산 38

요 약

레이저의 파장에 따라 민감하게 반응하는 동위원소의 이온화는 파장을 어떻게 제어하는가가 매우 중요하다. 본 연구에서는 두 파장으로 Sm을 이온화시킬 경우 온도나, 기타 주위 여건에 의하여 발생하는 파장이동을 감지하고 제어하는 문제에 대하여 연구하였다. 서로 다른 동위 원소를 선택적으로 이온화시키기 위하여 두 대의 상용 색소 레이저를 사용하였는데, 색소 레이저 자체의 선폭 이하로 파장을 제어할 수 있었다. Sm을 대상으로 원소로 실험을 수행하였으며, 질량 신호를 모니터링하기 위하여 RIMS 타입의 질량분석기를 사용하였다. 제어하고자하는 색소레이저의 파장 분해능보다 충분히 작은 분해능으로 제어하기 위하여 회귀(Feedback)시 움직이는 최대파장이동을 레이저 파장 분해능 이하가 되도록 하였다. 실험결과 초기에 레이저의 파장이 최적화 되어 있지 않을 경우, 스스로 최적의 파장 조건으로 이동하는 것을 확인 할 수 있었고, 실험실 온도나 펄핑 레이저의 상태변화에도 최적의 파장에서 수 시간 최적의 파장 값을 유지하고 있음을 검증할 수 있었다.

Abstract

Laser wavelength is very important in laser induced isotope ionization. In this study,

we have studied the detection of wave length change and controlling of laser wavelength when the experimental condition have changed, for example temperature. We have used two commercial dye lasers to ionize different isotope separately and have found that we can control laser wavelength less than several GHz. Samarium was used as a test element, and home made RIMS system was used to detect ionized mass signals. Maximum feedback wavelength is 10 times less than dye laser bandwidth. Experimental results shows that when initial wave length is not optimized, feedback system can find optimal wavelength and keep this wavelength more than several hours.

1. 서 론

레이저를 이용하여 동위원소비를 측정하거나 분리하는 기술은 동위원소가 가지는 분광학적 특성을 이용하는 것으로 레이저의 파장 제어가 매우 중요하다. 즉 레이저의 파장을 특정 동위원소에 공명 이온화하도록 조절하는 것이 무엇보다 중요한데, 이때 제어하여야 할 레이저의 파장은 작게는 수 백 MHz에서 크게는 수 GHz 정도에 이른다.^{1,2)} 파장 가변 레이저는 넓은 영역의 파장 범위를 이동할 수 있어서 다양한 종류의 동위 원소를 분리하거나 분석하는데 사용되지만 반대로, 펄핑 레이저의 펄핑 형태 혹은 방향의 변화나 파장을 변화시키는 회절판과 같은 파장을 제어하는 광학계의 변화에 의하여 쉽게 파장의 변화가 생긴다. 이러한 이유 때문에 레이저를 비롯한 광학계는 온도제어가 가능하도록 설계하고 특수한 실험실에 설치되게 된다. 비록 이러한 설비를 갖추고 있다고 하더라도 레이저를 정렬하는 초기상태와 시간이 경과한 상태에서는 색소의 온도 특성이 바뀌고, 또한 펄핑 레이저의 특성도 수 시간의 시간 경과에 의하여 특성이 바뀐다. 특히 연속적으로 동위원소를 생산하거나 장시간 레이저를 동작해야하는 경우 실내온도 뿐만 아니라 외부의 온도 변화에 의해서도 광학적인 정렬 상태가 바뀌게 되므로 온도 변화에 의한 효과를 반드시 고려하여야 한다.

본 연구는 수분에서 수 시간의 시간적 간격을 두고 변화하는 외부 환경 때문에 레이저의 파장이 바뀌는 경우 이를 감지하고 제어하기 위하여 연구되었다. 일반적으로 레이저 광반응에 의하여 생산되는 동위원소의 양은 레이저의 파장뿐만 아니라, 레이저의 출력 그리고 레이저를 광반응 시키는 챔버의 구조와 원자 상태로 기화시키는 원자화장치 (Atomizer) 등 여러 가지 변수에 기인한다. 그러나 생산되는 원소의 동위원소비는 일반적으로 레이저의 파장에만 의존하므로 레이저의 파장을 모니터링하는 것은 무엇보다 중요하다. 레이저의 파장을 측정하는 방법은 레이저 파장측정기와 같은 장치를 직접 사용하여 도 되나, 이장치 또한 일정 두께의 에탈론에서 발생하는 간섭무늬의 간격을 이용하는 것으로 에탈론의 두께 또한 온도나 기타 요인에 의하여 변화할 수 있기 때문에 미세한 파

장 변화를 간섭무늬의 변화만으로 파장을 추정하는 것은 곤란하다. 또한 검정 파장으로 사용되는 헬륨네온 레이저의 경우 그 선폭에 한계가 있고, 헬륨네온 레이저의 파장과 크게 다른 파장의 경우는 오차의 가능성은 더욱 커진다.

이온화 시키고자하는 동위원소의 분리를 극대화 시키고자하는 경우, 생산되는 동위원소의 질량 성분비를 직접 모니터링하는 것은 최종 생산물을 직접 측정하는 것이기 때문에 이를 최적화시키는 것은 레이저의 파장과 같은 다른 물리량을 간접적으로 측정하여 시스템을 제어하는 것보다 훨씬 신뢰가 있는 방법이라 할 수 있다. 본 구에서는 레이저 광반응 생성물을 직접 모니터링하면서 레이저의 파장을 제어함으로써 그 신뢰도를 높이고자하였다.

2. 실험 장치 및 실험 결과

두 개 이상의 파장(X_1, X_2)에 의하여, 복잡한 이온화 과정을 거치면서 생성되는 동위원소($F(X_1, X_2)$)를 효율적으로 생산한다는 것은, 수학적으로 F 값을 극대화시키는 것으로 생각할 수 있다. 즉 함수 F 는 일반적으로 변수 X_1, X_2 에 따라 비선형적으로 변화하는 함수이므로 이 것은 비선형 함수 F 의 최대 값을 구하는 문제이다. 비선형 함수의 최적화의 문제로 귀착되는 이러한 분야는 수치해석 분야에서 많이 응용되어 왔다. 여러 가지 방법 중 본 연구에서는 단순(simplex)알고리즘을³⁾ 이용하여 비선형 함수 즉 광반응 생성물을 최대화시키는 방법을 택하였다.

전체적인 실험장치의 구성은 그림 1 과 같으며 크게 두 대의 레이저와 이 레이저를 펌핑하는 Nd:YAG 레이저 그리고 광이온화된 질량 신호를 모니터링하기 위하여 자체제작한 TOF 형 질량분석기와 컴퓨터로 구성된다. 질량분석기는 다시 원자화 장치, 원자화된 원소를 이온화시키는 공간, 이온을 집속하고 MCP(MicroChannel Plate)로 안내하는 전극과 MCP 등으로 구성되며, 그 밖에 질량분석기를 진공상태로 유지하는데 필요한 여러 가지 진공 펌프로 구성된다. 최종적으로는 MCP에서 얻어지는 전기적 신호는 다시 고속 ADC를 이용하여 처리가 용이한 디지털신호로 바꾸어 컴퓨터에 내장된다. 컴퓨터에 내장된 신호는 측정하고자하는 동위 원소의 질량은 MCP 질량신호를 적절한 구간 적분하면 된다. 그러나 MCP에서 출력되는 전기적 신호는 많은 잡신호를 포함하고 있기 때문에 바로 적분하지 않고 적절한 수만큼 평균하고 이를 적분하였다.

그림 2 는 MCP에서 얻어지 신호를 컴퓨터에서 처리하는 과정과 색소레이저를 제어하는 과정을 나타낸 그림이다. 그림 3 은 Sm 원소에서 얻어지는 전형적인 질량신호를 나타내는 것으로, 원하는 동위원소의 질량을 택하는 메뉴, 이를 연산하는 메뉴, 그리고 연산된 결과를 다시 실시간으로 컴퓨터의 화면상에 나타내는 부분으로 나눌 수 있다. 원하는 동위원소의 질량을 얻은 후 레이저의 파장을 제어하는 과정은 그림 2에서 알 수 있듯이 전기적 잡음을 제거하는 과정 즉 신호를 평균하는 과정, 원하는 동위원소를 선택하는 과정, 원하는 수만큼 동위원소의 질량을 얻는 과정, 생성물의 최적의 유무를 판단하는

과정(단순알고리즘과정), 그리고 레이저의 파장을 이동하는 과정으로 나눈다. 대기 온도와 같이 조건이 불안정한 상태에서 레이저의 파장을 유지한다는 것은 역으로 레이저 파장을 원하는 파장 범위에서 끊임 없이 이동한다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 최대 이동하는 색소레이저의 파장을 원하는 파장 분해능을 넘지 않도록 제한하는 반면 끊임 없이 추적(tracking) 할 수 있도록 구성하였다. 즉 이 과정은 단순화 알고리즘의 본래 의미이기도하다.

그림 4는 Sm을 선택적으로 이온화시키기 위하여 색소 레이저의 파장을 주사(Scanning) 시키면서 얻은 Sm의 질량 신호를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Sm의 광반응 생성물을 나타내는 함수 F는 국지최대값(Local Maximum)을 가지고 있지 않으며 특히 최적 파장 근처에서 두 파장에 대하여 간단한 함수 모양을 지님을 알 수 있다. 이는 파장을 추적하는 과정에서 국지최대값에 최적화 될 가능성이 없다 것을 의미하는 것으로 단순화 알고리즘으로 제어가 가능하다는 것을 보여준다.

그림 5는 임의의 파장에서 최적값을 추적할 수 있도록 실험 장치를 구성한 후 개발된 프로그램을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에는 레이저의 파장이 최적화 되지 않아서 광반응 생성물의 양이 큰 값을 지니고 있지 않으나 추적을 시작한 후 약 120 분 정도가 경과하면 최적화 파장 위치로 스스로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 최적 상태를 이동한 후에는 이 파장에서 벗어나지 않고 계속 유지하고 있음을 알 수 있다.

3. 결론

온도나 펄핑 레이저광의 상태 변화에 의하여 미세하게 변화하는 색소레이저의 파장 변화를 감지하고 이 값이 최적의 값을 유지 할 수 있도록 하였다. 임의의 원하는 동위원소에 맞는 파장을 스스로 추적하기 위하여 임의의 동위 원소를 선택할 수 있도록 하였으며, 이로부터 광반응 생성물의 질량을 측정하고 색소레이저의 파장을 제어하도록 하였다. Sm을 대상원소로 실험을 한 결과 동위원소를 생산하는데 필요한 파장을 안정적으로 유지할 수 있음을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 앞으로 다 파장을 레이저도 동시에 제어할 수 있음을 입증할 수 있었으며, 개발된 시스템은 여러 가지 원소의 동위 원소에도 쉽게 적용이 가능하리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 대한민국 과학기술부 주관으로 시행한 원자력 중장기 사업(레이저광반응 생성물의 실시간 분석기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kyuseok Song, Hyunki Cha and Hongmin Lee, " Determination of Erbium by two-color three photon resonance ionization mass Spectrometry", Microchemical J. , **57**, 265(1997)
2. Kyuseok Song, Hyunki Cha, Hongmin Lee, Igor Kolpakov, " Determination of samarium by the use of 2-color 3-photon resonance ionization mass spectrometry", J. Anal. At. Spectrom., **13**, 1207(1998)
3. S. N. Deming, " Simplex Optimization of variables in analytical chemistry", Anal. Chem., **45**, 2781(1973)

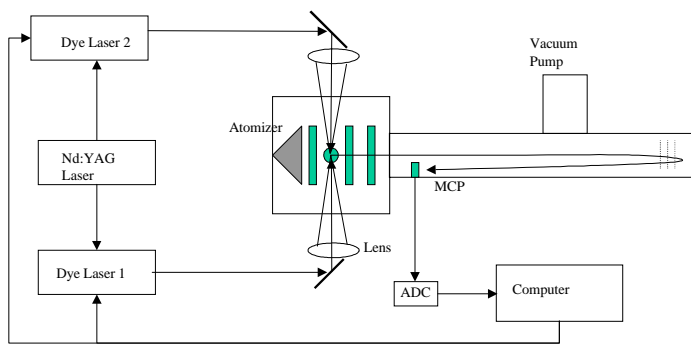


그림 1. 광반응 생성물의 회기제기 시스템의 구성도

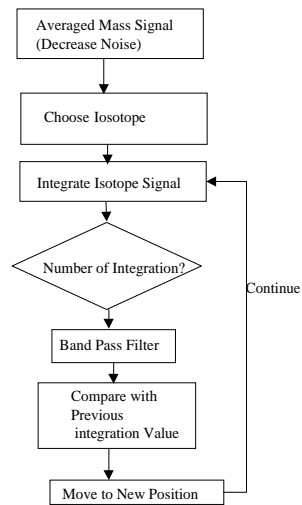


그림 2. 동위원소 질량 신호 처리과정

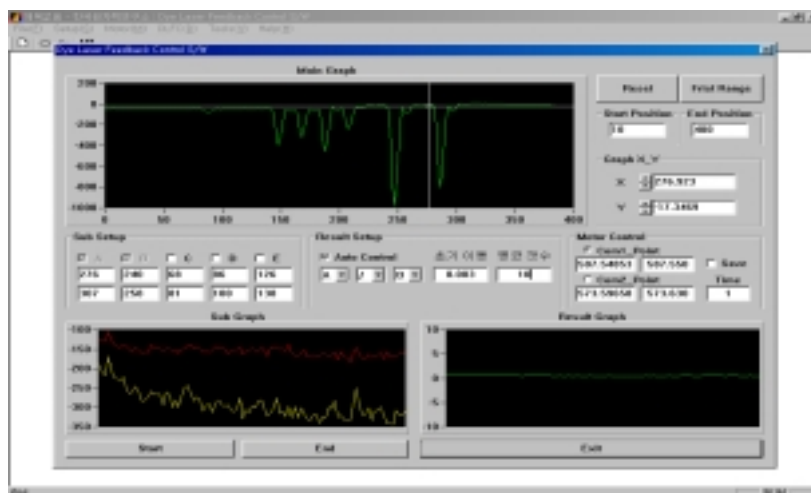


그림 3. Sm 질량신호의 전형적인 모양 및 이를 처리하는 메뉴

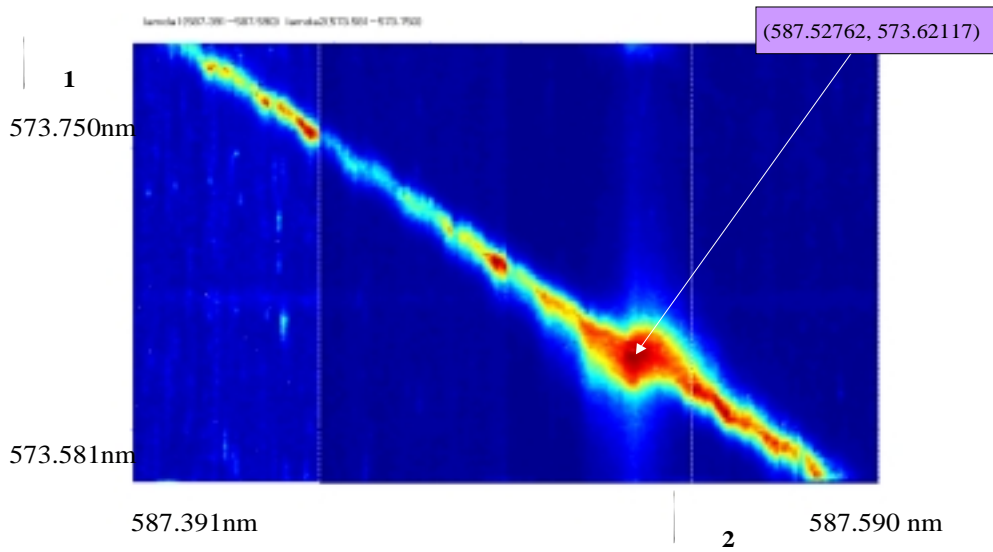


그림 4. 파장에 따른 이온 신호의 크기 변화

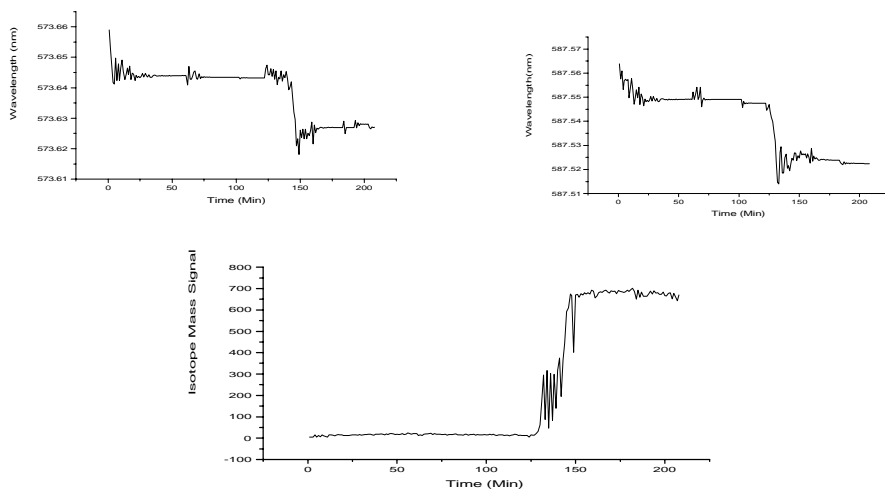


그림 5. 추적 시간에 따른 두 파장의 변화와 동위원소의 질량변화