이터븀 원자증기에서 속도군선택 광펌핑 분광과 이중공명 광펌핑 분광을 이용한 주파수 안정화

Frequency stabilization by using velocity selective optical pumping spectroscopy and double resonance optical pumping spectroscopy in Yb atomic vapor

이림, 박현민, 고광훈, 정도영
한국원자력연구원 양자광학부
lim2phy@kaeri.re.kr

이터븀은 ^{168}Yb, ^{170}Yb, ^{171}Yb, ^{172}Yb, ^{173}Yb, ^{174}Yb and ^{176}Yb 의 7개의 안정동위원소를 가지고 있으며, 자연 존재비는 각각 0.13, 3.05, 14.3 21.9 16.1 31.8 12.7 % 이다. 이 중에서 ^{168}Yb 는 비파괴검사용 저에너지 감마선 선원인 ^{169}Yb 의 원료물질로 활용될 수 있으며 ^{176}Yb 는 특정암세포 검출 및 방사면역치료법(RIT ; Radioimmunotherapy) 등의 의학적 활용도가 높은 ^{177}Lu 생산의 원료가 된다. 그러나 실질적인 활용을 위해서는 ^{168}Yb, ^{176}Yb 의 농축비가 각각 20 % 및 95% 이상으로 농축되어야한다. 이를 위하여 레이저를 이용하여 원자를 이온화시킴으로써 동위원소를 분리하는데, ^{168}Yb의 경우 그 존재비가 너무 작을 뿐만 아니라 그 에너지 준위가 ^{171}Yb ^{173}Yb 원자의 초미세구조 준위와 도플러 선폭 내에서 겹쳐있기 때문에 효과적으로 선택적 광펌핑이 가능할 수 있는 에너지 준위를 잘 선택하여야한다. 일반적으로 사용되는 구도는 556.648 nm - 581.067 nm - 582.79 nm 파장을 갖는 3개의 고출력 레이저를 연속적으로 조사하여 3단계로 이온화시키는 방법이다. 이 방법을 이용한 선택적 이온화는 첫 번째 단계에서의 선택적 광펌핑의 성공에 따라 그 효율이 제한된다. 따라서 다이오드 레이저 수준의 좁은 선폭을 가지는 광원의 상용이 요구되지만, 일반적으로 다이오드 레이저는 그 출력이 약하기 때문에 큰 이온화율을 얻기 어려워 효과적인 동위원소분리가 쉽지 않다.

본 연구그룹에서는 보다 효과적인 선택적 광펌핑을 위하여, 1단계에서 바닥준위의 원자를 연속적인 두 번의 광펌핑을 통하여 준안정 상태로 광펌핑하는 구도를 고안하였다. 즉, 중심파장인 555.648 nm 와 1539 nm 인 cw-반도체레이저를 사용하여 바닥준위($6s^2\ ^1S_0$)의 원자를 $6s6p\ ^3P_1$ 준위를 거쳐 $6s5d\ ^3D_1$ 준위로 광펌핑시킨다. 여기된 원자들은 자발방출에 의해 준안정상태인 $6s6p\ ^3P_0$ 준위로 이동하게 되는데, 이 과정에서 높은 선택률과 다음단계의 광펌핑 및 이온화를 위한 충분한 원자 수를 확보할 수 있다. 그러나 이 과정을 성공적으로 수행하기 위해서는 낮은 출력을 가지는 반도체 레이저의 출력을 증폭하고 장시간 안정적인 주파수 안정화가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 그림1과 같은 실험장치를 구성하여 각각 1111 nm, 1539 nm 파장을 갖는 반도체 레이저의 출력을 광섬유증폭장치(DOFA ; Diode-Oscillator Fiber Amplifier)로 증폭하였고, PPLN을 이용하여 1111nm의 2차조화파를 발생시킴으로써 $^1S_0$ — $^3P_1$ 전이선의 포화흡수분광을 수행하였다. 포화흡수분광선을 이용하여서는 전류변조(current modulation)와 PZT 진동(PZT modulation)방법을 각각 적용하여 주파주를 변조함으로써 미분신호를 얻고, 이를 전류되먹임하는 방법으로 주파수 안정화를 수행하였다. 두 방법을 통하여 각각 4 MHz 이내로 주파수를 안정화할 수 있었으며, 알란분산(Allan deviation)을 계산하여 1.2 ~ 2.7 × 10^{-3} 수준의 장기 안정성(long term stability)를 가짐을 알 수 있었다. P_1 — $^3D_1$ 전이선에서는 1539 nm 파장을 갖는 출력 증대된 레이저를 주파수 변조된 555.648 nm 레이저와 반대방향으로 진행시킴으로써 속도군선택 광펌핑 분광과 이중공명 광펌핑 분광을 각각 수행하였으며, 각각의

신호를 이용하여 주파수 안정화를 수행하였다. 이를 통하여 속도군선택 광펌핑 분광과 이중공명 광펌핑 분광 신호의 크기 및 특성을 분석하였고 보다 효과적인 선택적 광펌핑을 위한 조건을 탐색하였다.

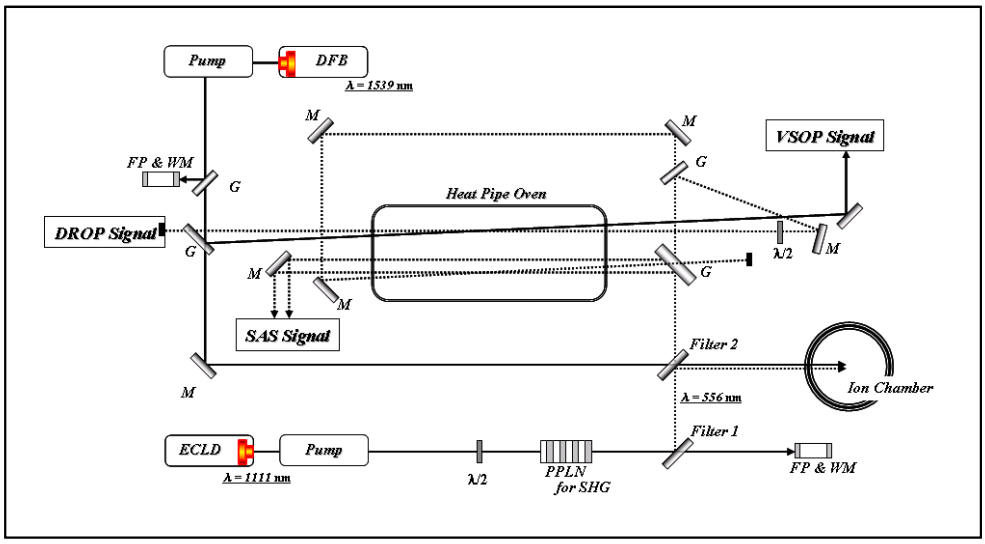

그림 1. Yb 원자의 포화흡수분광(SAS), 속도군선택 광펌핑분광(VSOP)과 이중공명 광펌핑분광(DROP) 신호를 관찰하기 위한 실험장치.

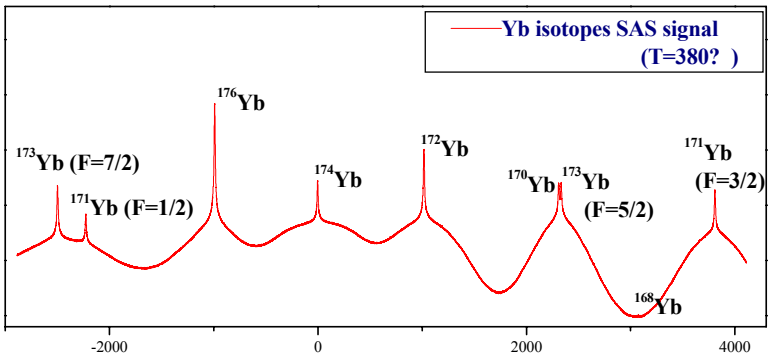

그림 2. $^1S_0$ - $^3P_1$ 전이선의 포화흡수분광(SAS)

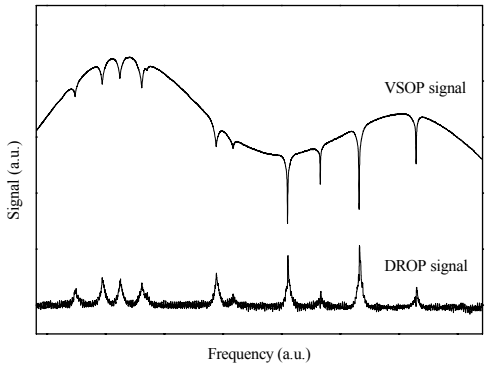

그림 3. P_1-$^3D_1$ 전이선에서 광펌핑신호

참고문헌

1. M. pinard, C. G. Aminoff and F. Laloe, "Velocity-selective optical pumping and Doppler-free spectroscopy", Phys. Rev. A 19, 2366 (1979).
2. H. S. Moon, W. K. Lee, L. Lee and J. B. Kim, "Double resonance optical pumping spectrum and its application for frequency stabilization of Laser Diode", Appl. Phys. Lett. 85, 3965 (2004).
3. H. M. Park, B. S. Kim, K. H. Ko, Y. H. Cha, J. M. Han, G. Lim, T. S. Kim, D. Y. Jeong, and C. J. Kim, LAP2008 International Conference on Laser Probing, (2008).
4. M Sankari and M V Suryanarayana, "Studies on the isotope selective photoionization of the low-abundant 168Yb isotope", J. Phys. B 31, 261 (1998).