

## 속도군 선택 광펌핑 분광학\*

박성종 · 조 혁\*

충남대학교 물리학과

\*한국과학기술원 분자과학연구소

이 호 성

한국표준과학연구원 전자기연구부

(1997년 2월 3일 받음)

기체상태의 루비듐 원자가 실온에서 Maxwell 속도 분포를 이루고 있을 때 광펌핑 현상과 특정 속도 원자의 선택에 의해 도플러 효과를 제거시키는 속도군 선택 광펌핑(VSOP) 분광학을 실시하였다. 본 실험에서는 주파수가 고정된 locked laser와 주파수 튜닝이 가능한 sweep laser를 동시에 사용하되, 두 빔을 같은 방향으로 진행시키고, 시료 속에서 서로 겹치게 함으로써 주공진 신호만을 발생시킬 수 있었다. 이 방법으로 지금까지 알려진 VSOP 분광학보다 원자들의 속도 선택 범위가 더 넓어졌다.

### I. 서 론

흡수분광학에서 기체 상태로 있는 원자들의 열운동은 공진 흡수선을 중심으로 도플러 선평확대를 일으키는데, 이것은 확대된 흡수선폭 속에 있는 원자의 에너지 구조를 밝혀내는 것을 어렵게 만든다. 도플러 선평확대를 제거시키는 고분해 분광법은 1971년부터 Hänsch 등<sup>[1,2]</sup>에 의해 연구되기 시작하였다. 고분해 분광법으로는 포화흡수 분광학(saturated absorption spectroscopy)<sup>[1,3]</sup>, 편광 분광학(polarization spectroscopy)<sup>[4,5]</sup>, 원자빔을 이용한 분광학<sup>[6,7]</sup> 등이 있다. 포화 흡수 분광학 및 편광 분광학은 서로 반대 방향으로 진행하는 두 레이저 빔(펌프광 및 조사광)을 사용하여 도플러 효과를 제거하는 방법으로서, 둘 다 특정 속도를 가진 원자를 선택한다는 점에서는 동일하다.

그런데, 1족의 알칼리 원자들(수소, 리튬, 나트륨, 칼륨, 루비듐, 세슘 등)은 바닥상태에 두 개의 초미세 에너지 준위가 있고 그 주파수 차이는 수 GHz로 실온에서의 도플러 선평확대보다 넓다. 한편, 열평형상태에서 두 초미세 준위에 분포한 원자의 개수( $N_i$ )는 Maxwell-Boltzman 분포를 이룬다. 즉,  $N_2/N_1 = \exp\{-(E_2 - E_1)/kT\}$ 이다. 그런데, 수 GHz의 주파수에 해당하는 에너지( $E_2 - E_1$ )는 실온이 갖는 에너지( $kT$ )에 비해 훨씬 작기 때문에 ( $E_2 - E_1 \ll kT$ ), 두 준위에 있는 원자개수는 거의 비슷하다. 바닥상태의 한 에너지 준위에서 들뜬상태의 임의의 준위에 공진하는 빛을 이 원자들에 비추면 원자들은 들뜬상태를 매개로 하여 바닥상태의 다른 준위로 전이를 일으켜, 바닥상태의 두 준위에 있는 원자의 개수가 달라진다. 이것을 광펌핑(optical pumping)이라고 하는데, 1950년에 Kastler<sup>[8]</sup>가 발명하여 분광학의 여러분야에서 사용되고 있다.

알칼리 원자와 같은 3준위 원자에서의 포화흡수 분광학<sup>[9,11]</sup>은 광펌핑 현상으로 인해 원자들이 들뜬상태로 뿐만 아니라 바닥상태의 다른 준위로도 전이되기 때문에 2준위 원자에서의 포화분광학에 비해 아주 약한 세기의 레이저로도 분광실험이 가능하다. 이 분광학을 특별히 광펌핑 포화흡수 분광학(saturated absorption spectroscopy with optical pumping)이라고 부르기도 한다.<sup>[10,11]</sup>

특정 속도의 원자들을 선택하고, 광펌핑 현상을 이용하여 도플러 효과를 제거시키는 분광법을 속도군 선택 광펌핑(Velocity Selective Optical Pumping, VSOP) 분광학이라 한다. 지금까지의 VSOP 분광학은 한 대의 레이저에서 분할된 두 레이저 빔을 서로 반대방향으로 진행시키는 방법을 사용하였다.<sup>[11-13]</sup>

본 논문에서는 지금까지 알려진 VSOP 분광법과는 달리, 같은 방향으로 진행하는 두 레이저 빔을 사용하는 VSOP 분광학을 시도하였으며, 그 결과로서 도플러 효과가 제거된 고분해 분광신호를 얻었다. 다시 말하면, 주파수가 고정된 locked laser와 주파수를 가변시킬 수 있는 sweep laser를 사용하여 루비듐-87 원자에 대한 VSOP 분광학을 실시하였고, 이 때 얻은 고분해 분광신호에 대해 해석하였다.

### II. 속도군 선택 광펌핑 분광학의 원리

일반적으로 알려져 있는 VSOP 분광학의 대표적인 예는 광펌핑 포화 흡수 분광학인데, 이것은 서로 반대 방향으로 진행하고 같은 주파수로 sweep되는 펄스광과 검출광을 사용한다. 이 분광학에서는 주공진선 뿐만 아니라 주공진선 사이에서 교차 공진선이 동시에 나타난다.

주공진 신호가 나타나는 원리는 다음과 같다. 즉, 서로 반대 방향으로 진행하는 펄스광과 검출광에 대해 동시에 공진을 일으키기 위해서는 두 레이저에 대한 도플러 이동이 같은 원

\*본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구과제(과제번호 96-0600-425)에 의해 수행된 것으로 관계자들에게 감사드립니다.

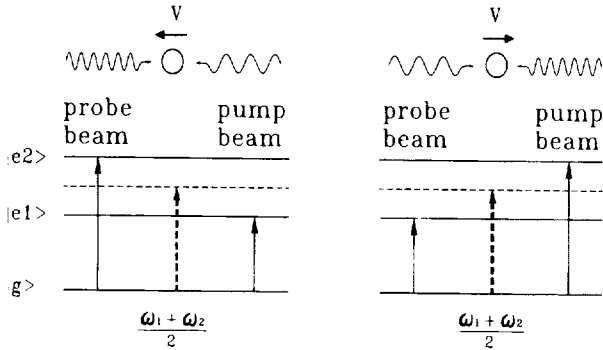


그림 1. 포화흡수 분광학에서 교차공진신호가 나타나는 원리 : 속력  $V (=c \cdot (\omega_2 - \omega_1) / (\omega_1 + \omega_2))$ 로 움직이는 원자는 그 진행방향에 따라  $(\omega_1 + \omega_2) / 2$ 의 주파수를 다르게 느끼고, 이에 따라 펌프광과 조사광에 의해 서로 다른 들뜬상태로 전이된다. 단,  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 는 각각  $|g\rangle \rightarrow |e1\rangle$ ,  $|g\rangle \rightarrow |e2\rangle$ 의 전이 주파수임.

자, 즉, 두 빔의 진행방향에 대해서 정지된 원자들만이 주공진 신호에 기여한다. 펌프광과 검출광의 공진주파수에서 펌프광에 의해 바닥상태에 있는 원자의 수는 포화 또는 광펌핑에 의해 줄어 들게 되고, 이에 따라 검출광의 흡수는 줄어들어 주공진 신호는 투과가 커지는 형태로 나타난다.

이에 비해, 교차 공진 신호가 나타나는 원리는 다음과 같다. 그림 1에서 처럼 바닥상태( $|g\rangle$ )로부터 두 여기상태( $|e1\rangle$ ,  $|e2\rangle$ )로의 전이에 해당하는 공진 주파수를 각각  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 라 할 때, 교차공진신호는 주공진 주파수의 중심인  $(\omega_1 + \omega_2) / 2$ 의 위치에서 나타난다. 이 신호는 같은 속력이지만 서로 반대방향으로 진행하는 두 종류의 원자들에 의해 만들어진 것이다. 다시 말하면, 원자들이 움직이는 방향에 따라  $(\omega_1 + \omega_2) / 2$ 의 주파수를  $(\omega_2 - \omega_1) / 2$ 만큼 더 높게 느끼거나 더 낮게 느끼게 되어 바닥상태로부터 각각  $|e2\rangle$ ,  $|e1\rangle$ 로 여기되거나  $|e1\rangle$ ,  $|e2\rangle$ 로 여기된다.

따라서, 원자들은 주공진신호에서처럼 펌프광에 의해  $|g\rangle$  준위의 원자개수가 줄어들어서 검출광의 투과가 커지는 형태로 교차공진신호가 발생한다. 그런데,  $(\omega_2 - \omega_1) / 2$ 만큼의 도플러 이동을 일으키는 원자의 속력은  $V = c \cdot (\omega_2 - \omega_1) / (\omega_1 + \omega_2)$ 이고, 여기서  $c$ 는 광속력이다.

본 실험에서는 같은 방향으로 진행하는 두 레이저빔을 사용하였는데, 이 경우에는 다음과 같은 원리에 의해서 도플러 선평확대가 제거된다.

예를 들어 설명하면, 그림 2와 같은 에너지 구조를 가진 원자에서 locked laser와 sweep laser의 주파수를 각각  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 로 고정시키면 레이저빔 진행방향에 대해 정지해 있는 원자(B)는 두 레이저에 의해 각각  $|1'\rangle$ ,  $|2'\rangle$ 로 여기 된다. 그런데, 빔 방향으로 움직이는 원자들 중  $\Delta\omega_0 (= \omega_1 - \omega_0)$ 의 주파수 이동이 발생하는 속력  $V_C$ (단,  $V_C = c \cdot \Delta\omega_0$ )의 원자(C)는 locked laser의 주파수  $\omega_1$ 을  $\Delta\omega_0$ 만큼 낮게 인식하기 때문에  $|0'\rangle$ 으로 여기 된다. 그러므로, 원자(C)가 sweep laser에 의해 정지된 원자(B)에서와 같이  $|2'\rangle$ 로 여기되기 위해서는 sweep laser의 주파수는  $\omega_2$ 보다  $\Delta\omega_0$ 만큼 더 높아야 한다. 한편, 빔과 반대 방향으로 움직이는 원자들 중  $\Delta\omega_1 (= \omega_2 - \omega_1)$ 만큼의 주파수 이동이 발생하는 속력  $V_A$ (단,  $V_A = c \cdot \Delta\omega_1$ )의 원자(A)는 locked laser

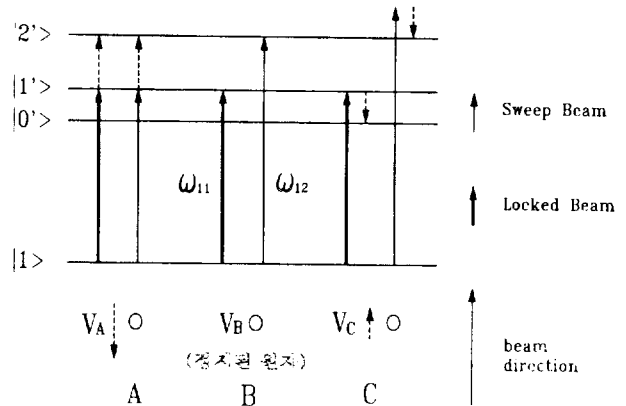


그림 2. 원자의 속도에 따라 나란히 진행되는 두 레이저 빔에 의해 전이되는 들뜬상태의 준위는 다르다(본문 참조).

주파수  $\omega_1$ 을  $\Delta\omega_1$ 만큼 높게 인식하여  $|2'\rangle$ 으로 여기된다. 그러므로, 원자(A)가 sweep laser에 의해 정지된 원자(B)에서와 같이  $|2'\rangle$ 로 여기되기 위해서는 sweep laser의 주파수는  $\omega_2$ 보다  $\Delta\omega_1$ 만큼 더 낮아야 한다.

이상에서 본 바와 같이 들뜬 상태 속의 세 에너지 준위들이 모두 도플러 선평 확대 속에 포함되어 있을 때, 레이저 주파수 튜닝에 의해 각각의 에너지 준위에 일치하는 속도를 갖는 원자들을 선택적으로 여기시킬 수 있다. 그러나, 이 분광학에서는 원자의 공진신호가 발생하는 위치(주파수)는 원자들의 도플러 이동과 locked laser의 고정 주파수 위치에 따라 달라진다.

### III. 실험

본 실험에서는 그림 3과 같이 두 대의 레이저를 사용하였

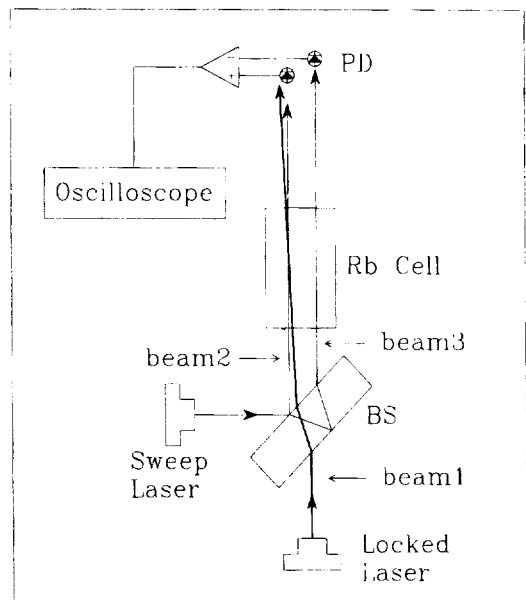


그림 3. 독립적인 두 대의 레이저를 이용한 VSOP 분광 실험 장치도. 단, beam3은 sweep laser에서 분할된 것으로 도플러 배경신호를 제거하기 위한 것임.

다. 한 대의 레이저는 locked laser로서 루비돔 87-원자의 바닥상태 ( $5^2S_{1/2}$ )의  $F=2$ 에서 들뜬상태 ( $5^3P_{3/2}$ )의  $F'=3$ 이나  $F'=2$ 의 전이에 주파수를 고정시켰고, 다른 한 대의 레이저는 sweep laser로서  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$  또는  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 로 sweep하였다. 두 레이저 중, 주파수 가변 여부에 상관없이 광검출기에 입사하는 빔을 검출광이라 하고, 나머지를 펌프광이라고 부르기로 한다. 검출광으로 locked laser를 사용한 경우와 sweep laser를 사용한 경우에 대해 분광신호를 관찰하였다. 원자 증기셀을 통과하기전에 두 빔의 세기는 동일하게  $4 \mu W/mm^2$  이고 모두 선형 편광이었다. 그림 3에서 beam3은 항상 광검출기에 입사되며 도플러 배경신호를 제거하기 위해서 사용되었다.

#### IV. 결과 및 토론

##### 4.1. 다른 준위에서의 광편평

locked laser와 sweep laser가 공진하는 바닥상태의 에너지 준위가 서로 다른 경우로서, locked laser는  $F=2 \rightarrow F'=2$ 의 전이에 고정시키고, sweep laser는  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 로 sweep하였다. 검출광으로서 locked laser를 사용할 때와 sweep laser를 사용할 때에 따라 흡수스펙트럼은 다르게 나타났는데, 그림

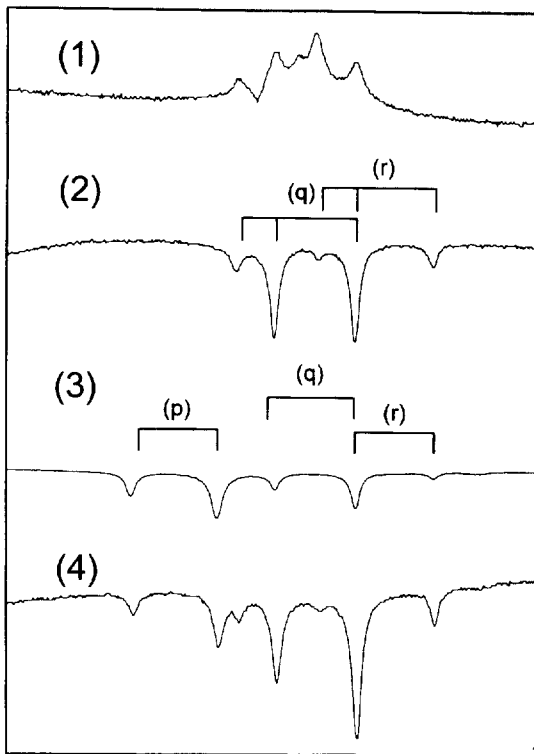


그림 4. sweep laser의 주파수 튜닝에 따른 분광 스펙트럼의 변화 : (1) 비교하기 위한 포화흡수 분광스펙트럼, (2)-(4) 그림 5의 루비돔원자 에너지 준위에서, locked laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=2$ 로 고정되고 sweep laser의 주파수가  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 로 튜닝될 때 관측한 VSOP 분광 스펙트럼. 단, (2)는 sweep laser를 검출광으로 관측했을 때, (3)은 locked laser를 검출광으로 관측했을 때, (4)는 locked laser와 sweep laser가 루비돔 셀에서 완전히 겹쳐졌을 때 관측한 스펙트럼임.

4에 관측 결과가 나와 있다.

먼저, sweep laser를 검출광으로 사용하여 얻은 결과인 그림 4의 (2)에 대해 살펴보자. locked laser (펌프광)에 의해 바닥상태의  $F=2$ 에서  $F=1$ 로 전이될 수 있는 (즉, 광편평이 가능한) 원자는 두 가지의 속도를 가진다. 첫번째는 그림 5의 에너지 준위 개략도에서 정지된 원자(q)들로서,  $F=2 \rightarrow F'=2$ 로 여기된 원자들은 자발방출에 의해  $F=1$ 로도 떨어진다. 따라서, sweep laser의 주파수가  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 에 공진될 때 검출광은  $F=1$  준위에 늘어난 원자들에 흡수되어 그림 4 (2)의 (q)와 같이 세 개의 흡수신호로 나타난다.

두 번째는 그림 5에서 레이저의 진행방향과 같은 방향으로 움직이는 원자(r)들로서, 이 원자의 속도에 의한 도플러 이동이  $\Delta\omega_{21} (= \omega_{22} - \omega_{21} = 157.1 \text{ MHz})$  이면 이 원자들은 펌프광에 의해  $F=2 \rightarrow F'=1$ 로 여기된 후 자발방출에 의해  $F=1$ 로도 떨어진다. 이 원자들이 sweep laser에 의해  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 의 전이에 공진되기 위해서는 정지된 원자의 경우에 비해  $\Delta\omega_{21}$  만큼 주파수가 높아야 한다. 따라서 그림 4 (2)의 (r)과 같이 sweep laser의 주파수가 높은 곳에서 흡수신호가 나타난다. 그런데, 펌프광에 의해  $F=2 \rightarrow F'=3$ 으로 여기되는 경우에는  $F'=3$ 에서  $F=1$ 로의 전이가 선택법칙에 의해 허용되지 않기 때문에  $F=1$ 로의 광편평은 생기지 않는다. 그러므로  $F=1$  준위의 원자수에는 변화가 없다.

이상과 같이 두 속도군의 원자에 의해 각각 세 개씩의 신호가 나타나게 되며, 하나의 신호위치가 중첩 되므로 총 다섯 개의 흡수신호가 관측된다. 중첩된 신호는 정지된 원자의 전이 q와 움직이는 원자의 전이 r가 합해진 것으로 신호의 크기가 다른 신호에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

locked laser를 검출광으로 사용했을 때 얻은 결과는 그림 4의 (3)과 같다. 그림 5에서 펌프광 (sweep laser)의 주파수가  $F=1 \rightarrow F'=1$  또는  $F=1 \rightarrow F'=2$ 에 공진될 때 원자들은 바닥상

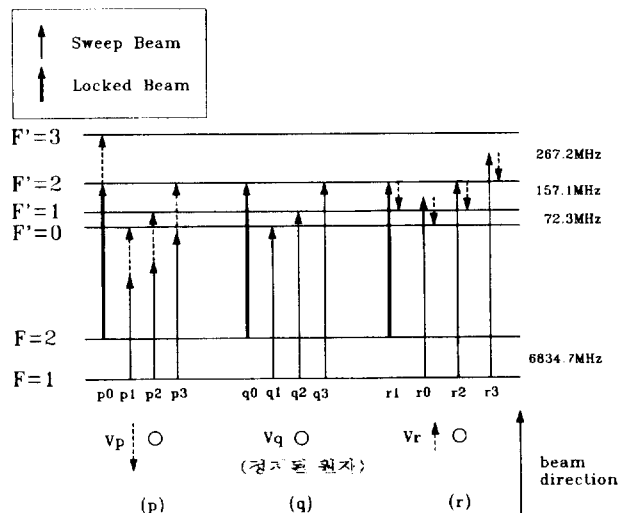


그림 5. 루비돔-87 원자에서 locked laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=2$  전이에 고정되고 sweep laser의 주파수가  $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 로 튜닝될 때, 원자의 속도에 따라 도플러 이동이 달라져 다른 준위로 전이된다(본문 참조).

태의  $F=2$ 로 광펌핑되고 이에 따라 검출광의 흡수는 증가하게 된다. 광펌핑이 가능한 전이로는 정지된 원자( $q$ )의 경우는  $q_2, q_3$ 이고 같은 방향으로 움직이는 원자( $r$ )의 경우는  $r_2, r_3$ 이다. 움직이는 원자( $r$ )의 경우는 펌프광의 주파수가 정지된 원자( $q$ )의 경우보다  $\Delta\omega_1$  만큼 높을 때 흡수신호가 나타난다. 마찬가지로, 빔방향과 반대방향으로 움직이는 원자( $p$ )의 경우는 정지된 원자( $q$ )의 경우보다  $\Delta\omega_2$  ( $=267.2$  MHz)만큼 낮을 때 흡수신호가 나타난다.

펌프광과 검출광이 완전히 겹쳐졌을 때 얻은 결과는 그림 4의 (4)와 같은데, 이것은 그림 4의 (2)와 (3)을 합친 것과 같은 모양이다. 그림 4의 (1)은 한 대의 레이저에서 분할된 두 빔을 서로 반대방향으로 진행시켜서 얻은 포화흡수분광 스펙트럼으로, 본 실험에서 얻은 VSOP 분광 신호와 비교하기 위해서 보였다.

4.2. 같은 준위에서의 광펌핑

그림 6에서와 같이 locked laser의 주파수는  $F=2 \rightarrow F'=3$ 의 전이에 고정시키고, sweep laser의 주파수는  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 으로 sweep 하는 경우로, 공진전이 발생 하는 바닥상태의 준위가 같은 경우이다. locked laser를 검출광으로 사용한 경우, sweep laser (펌프광)에 의해  $F=2$ 에 있는 원자의 수는 감소하므로 검출광의 흡수는 줄어들어 투과가 커지는 형태로 공진신호가 나타난다. 그런데, 펌프광이  $F=2 \rightarrow F'=1$  또는  $F'=2$ 에 공진되었을 때는 광펌핑에 의해  $F=2$ 의 원자수가 줄어들지만,  $F=2 \rightarrow F'=3$ 에 공진되었을 때는 전기쌍극자 전이의 선택법칙에 의해  $F'=3 \rightarrow F=1$  로의 전이는 발생되지 않는다. 검출광의 주파수가 들뜬상태의 제일 높은 에너지 준위 ( $F'=3$ )에 고정되어 있기 때문에 공진신호가 발생할 수 있는 도플러 이동은 공진주파수가 낮아지는 방향이다. 다시 말하면, 그림 6의 (b)와 (c)에서처럼 도플러 이동에 의해 들뜬 상태의 다른

에너지 준위에 공진될 수 있는 원자들은 모두 레이저빔의 진행방향과 같은 방향으로 움직이는 원자들이다. (b)의 원자들이 느끼는 주파수는 (a)의 경우보다 267.2 MHz 만큼 낮기 때문에 sweep laser 주파수는 그 만큼 더 높은 주파수일 때  $F'=1, 2, 3$ 에 공진되고, 그 결과,  $F=2$ 의 원자 개수가 줄어들어 검출광(locked laser)의 투과가 커진다. 마찬가지로 (c)는 도플러 이동이 424.3 MHz 인 경우이다.

그림 7의 (2)는 이런 방법으로 관측된 VSOP 스펙트럼이다. 세 개의 피크중 왼쪽의 두 개는 정지한 원자(a)가 각각  $F=2 \rightarrow F'=1$  및  $F'=2$  로 전이하면서 발생한 것이다. 그러나 맨 오른쪽 피크가 만들어지는데는 다음 두 가지 효과를 고려할 수 있다. 먼저,  $F'=3 \rightarrow F=1$ 의 전이가 전기 쌍극자 전이로는 불가능하지만 전기 다중극자 전이에 의해서는 가능하다. 그러나 그 확률은 전기 쌍극자 전이에 비해 무시할 수 있기 때문에 이 신호를 만드는데는 큰 영향을 미치지 못한다. 이 사실은 그림 4의 (3)에서도 확인할 수 있다. 두 번째로는, 움직이는 원자(b)와 (c)가  $F=2 \rightarrow F'=3$ 의 펌프광에 의해 각각  $F=2 \rightarrow F'=2$  및  $F'=1$ 로 전이하면서 발생한 것이다. 앞의 두 피크의 크기와 비교할 때, 레이저빔의 진행방향에 대해 정지된 원자의 개수가 움직이는 원자의 개수에 비해 훨씬 많다는 것을 알 수 있다.

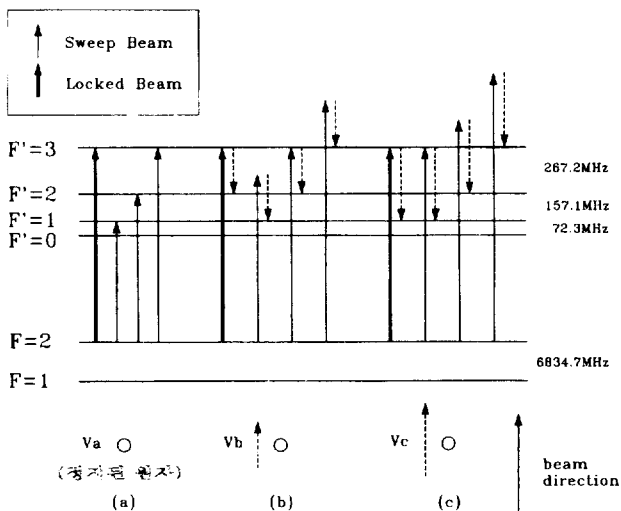


그림 6. 그림 5와는 달리 레이저의 주파수가 바닥상태의 같은 준위에서 공진될 때; locked laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=3$  전이에 고정되고 sweep laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 으로 튜닝될 때, 원자의 속도에 따라 도플러 이동이 달라져 다른 준위로 전이된다(본문 참조).

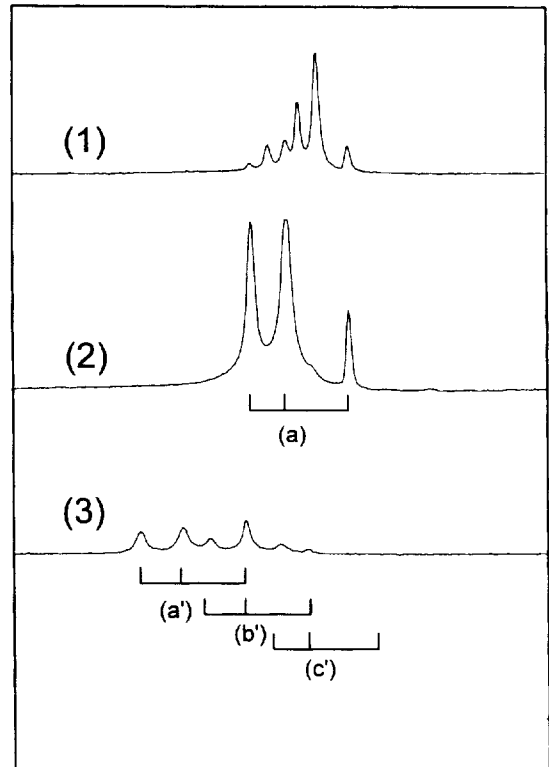


그림 7. sweep laser의 주파수 튜닝에 따른 분광 스펙트럼의 변화 : (1) 비교하기 위한 포화흡수 분광스펙트럼, (2) 그림 6에서와 같은 조건에서 locked laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=3$  전이에 고정되고 sweep laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 으로 튜닝될 때 관측한 VSOP 분광 스펙트럼, (3) locked laser의 주파수를  $F=2 \rightarrow F'=3$  전이보다 낮은 쪽으로 이동시켜서 가능한 많은 분광신호가 발생되도록 한 경우.

locked laser의 고정 주파수를  $F=2 \rightarrow F'=3$ 의 전이가 아닌 다른 위치로 이동시키면 도플러 선평확대가 생기는 주파수의 위치가 달라지고, 이에 따라 발생하는 공진신호의 개수가 달라진다. locked laser 주파수를 더 낮은 쪽으로 이동시키면 선택가능한 속력의 범위가 넓어져 그림 7의 (3)과 같이 나타난다. 즉, 정지된 원자 (a')와 움직이는 원자들 (b', c')에 의해서 전부 9개의 신호가 발생할 수 있는데, (c') 원자에 의한 맨 오른쪽 신호는 이 속력에 해당하는 원자의 개수가 적어서 거의 나타나지 않았다. 다시 말하면, 실온 (300 K)에서 루비듦-87 원자의 도플러 선평확대의 반치폭은 약 510 MHz이다. 그런데, 그림 7(3)에서 (a') 및 (b')의 신호가 나타나고 있는 영역의 범위는 692 MHz인데, (c') 신호의 위치는 선평확대 범위를 많이 벗어나 있기 때문에 거의 나타나지 않는다.

**4.3. 검출광에 따른 흡수 스펙트럼의 변화**

포화흡수분광학에서 주공진 흡수신호는 사용된 두 레이저 빔의 진행방향에 대해 정지한 원자들에 의해 만들어지기 때문에 주공진 신호가 발생하는 레이저의 주파수는 일정하다. 주공진신호들 사이에서 발생하는 교차공진신호는 두 주공진 주파수 차이의 1/2 만큼의 도플러 이동에 해당하는 속력을 가지는 원자들에 의해서 만들어지고, 원하지 않아도 항상 나타난다. 따라서, 만약 주공진 신호와 교차공진 신호가 가까이 있

고, 레이저 선평폭이 이 두 신호사이의 주파수 차이보다 넓은 경우에는 원자의 에너지 구조를 정확히 알기 어렵다.

VSOP 분광학에서는 주공진 흡수선만을 발생시킬 수 있으나 locked laser의 주파수 위치와 검출광으로 locked laser와 sweep laser 중 어떤 것을 사용하였느냐에 따라 공진흡수선의 위치가 달라진다. 본 실험에서는 4.2절에서와 같이 같은 준위에서의 광펌핑이 발생하도록 하되 검출광에 따라 흡수 스펙트럼이 달라지는 것을 비교 관측하였다.

그림 8의 (1)은 루비듦-87 원자의  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 의 전이에서 발생하는 포화흡수 스펙트럼으로, L1, L2, L3은 주공진 흡수선을 나타내고, C1, C2, C3은 교차공진 흡수선을 나타낸다. 일반적으로 교차공진 흡수선은 그림 1에서 설명한 것처럼 서로 반대방향으로 진행되는 두 무리의 원자들에 의해서 발생되기 때문에 기여하는 원자수가 많아서 주공진 신호에 비해서 신호가 크다.

그림 8의 (2)와 (3)은 locked laser의 주파수는 순환전이선인  $F=2 \rightarrow F'=3$ 의 전이에 고정되어 있고, sweep laser의 주파수가  $F=2$ 에서  $F'=1, 2, 3$ 으로 sweep 될 때, sweep laser를 검출한 것(2)과 locked laser를 검출한 것(3)이다. 두 VSOP 스펙트럼 모두 주공진 흡수선만 나타난다. 특히, locked laser를 검출하는 경우가 포화흡수 분광 스펙트럼(1)과 같은 방향에서 공진 흡수선이 나타나기 때문에 원자의 에너지 구조를 밝히는데 더 유용하다. 그러나 이 경우에도 locked laser의 고정 주파수가 변하면 주공진 신호의 위치도 따라서 변한다.

**V. 결 론**

지금까지 알려진 속도군 선평 광펌핑 (VSOP) 분광학에서는 한 대의 레이저에서 분할된 두 레이저빔을 서로 반대 방향으로 시료에 입사시켜서 펌프광에 의해서 발생하는 검출광 출력에서의 변화를 측정하는 것이었다. 그러나 본 논문에서는 두 대의 독립적인 레이저빔 (한 대는 locked laser, 다른 한 대는 sweep laser)을 같은 방향으로 시료에 입사시켜서, 도플러 선평확대 내에서 원자의 속도를 선평함으로써, 포화흡수 분광학과는 달리 교차공진선 없이 주공진선만을 관측할 수 있었다.

두 레이저의 공진 주파수가 바닥상태의 같은 에너지 준위에 맞추어졌을 때와 다른 준위에 맞추어졌을 때에 따라서 공진신호의 부호가 달라지고, 신호가 발생하는 위치도 달라진다는 것을 설명하였다. 그리고, 두 대의 레이저가 바닥상태의 같은 준위에서 공진되고 locked laser는 순환전이 (cycling transition)선에 고정되어 있을 때, locked laser를 검출하는 경우가 원자의 에너지 구조를 밝히는데 가장 유용하다는 것을 알았다.

**참고문헌**

[1] T.W. Hänsch, M.D. Levenson and A.L. Schawlow, Phys. Rev. Lett. **26**, 946 (1971).  
 [2] M.S. Sorem, M.D. Levenson and A.L. Schawlow, Phys.

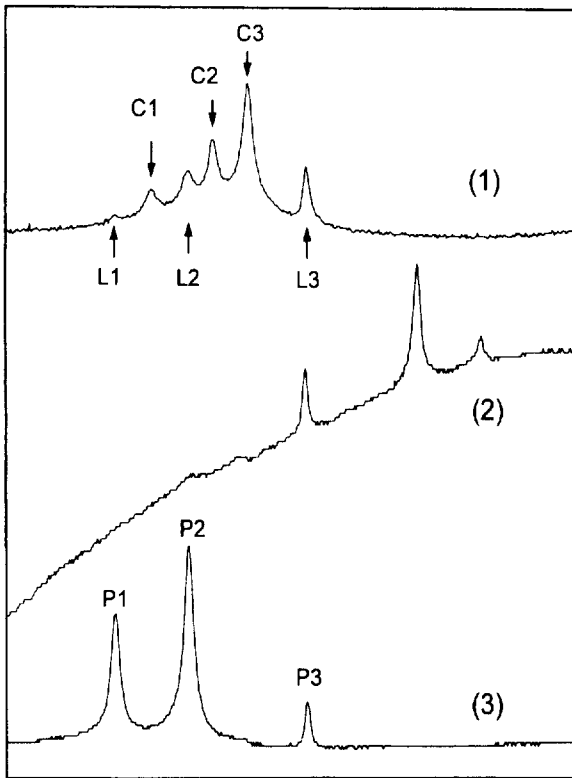


그림 8. 포화흡수 분광스펙트럼(1)과 본 실험에서 관측한 VSOP 스펙트럼의 비교 : 단, (2)와 (3)은 locked laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=3$  전이에 고정되고 sweep laser의 주파수가  $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 으로 sweep 될 때, sweep laser를 검출하여 얻은 스펙트럼(2)과 locked laser를 검출하여 얻은 스펙트럼(3)임.

- Lett. **37A**, 33 (1971).
- [3] M.D. Levenson and A.L. Schalow, *Phys. Rev. A*, **6**, 10 (1972).
- [4] V. Stert and R. Fischer, *Appl. Phys.* **17**, 151(1978).
- [5] 문한섭, 김승일, 김현아, 김중복, 이호성, *한국광학회지* **6**, 317(1995).
- [6] 이호성, 오차환, 양성훈, 김영범, 박윤찬, 송양섭, 정낙삼, *한국광학회지* **4**, 173(1993).
- [7] J.P. Gordon, H.J. Zeiger and C.H. Townes, *Phys. Rev.* **95**, 282 (1954).
- [8] Alan Corney, *Atomic and Laser Spectroscopy* (Clarendon Press, Oxford, 1977), Chap.17.
- [9] O. Schmidt, K.-M. Knaak, R. Wynands and D. Meschede, *Appl. Phys.* **B 59**, 167 (1994).
- [10] 이호성, 박상언, 조혁, 박종대, *한국광학회지* **4**, 188 (1993).
- [11] S. Nakayama, *J. Phys. Soc.Jpn.* **53**, 3351 (1984).
- [12] M. Pinard, C.G. Aminoff and F. Lalo, *Phys. Rev. A* **19**, 2366 (1979).
- [13] C.G. Aminoff, J. Javanainen and M. Kaivola, *Phys. Rev. A* **28**, 722 (1983).
- [8] Alan Corney, *Atomic and Laser Spectroscopy* (Clarendon

### Velocity selective optical pumping spectroscopy

Sung Jong Park and Hyuck Cho\*

*Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*  
*\*Center for Molecular Science, Korea Advanced Institute of Science and Technology,*  
*Taejon 305-701, Korea*

Ho Seong Lee

*Division of Electromagnetic Metrology,*  
*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-701, Korea*

(Received : February 3, 1997)

We performed the velocity selective optical pumping (VSOP) spectroscopy using the rubidium atomic vapor in the room temperature. This spectroscopic technique removes the Doppler broadening by both optical pumping effect and the selection of atoms with a particular velocity. In this experiment, we used two independent lasers; one was a locked laser whose frequency was fixed and the other was a sweep laser whose frequency was tunable. The two beams were passing through the sample in the same direction unlike the conventional VSOP spectroscopy using two counter-propagating beams. We could make the velocity selective range of atoms much wider with this method than the old one.