

속도선택 포화흡수분광을 이용한 분산형 신호의 관측 및 반도체 레이저의 주파수안정화

박상언 · 조 혁

충남대학교 물리학과

④ 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지

권택용 · 양성훈 · 이호성[†]

한국표준과학연구원 시간주파수 연구실

④ 305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지

(2000년 9월 5일 받음, 2001년 5월 7일 수정본 받음)

세슘 D₁ 전이선에 해당하는 파장 894 nm의 레이저시스템을 제작하여 포화흡수분광 실험을 하였다. 포화흡수증기셀 내에서 조사광을 펌프광에 대해 일정한 각도로 교차시켜서 속도선택적인 포화흡수분광신호를 관찰하였다. 이 신호는 펌프광과 조사광의 교차하는 각도와 위치에 따라 변했다. 이때 두 개의 조사광에 의해 만들어진 속도선택 포화흡수분광신호들의 차이를 측정함으로써 분산모양의 주파수 분별신호를 만들 수 있었다. 이를 이용하여 주파수 변조없이 반도체 레이저의 주파수를 안정화할 수 있었다. 그 결과, 주파수 안정도 $\sigma_y(\tau=1\text{ s}) = 7 \times 10^{-12}$, $\sigma_y(\tau=1\text{ s}) = 2.4\text{ kHz}$ 이었다.

분류코드 : SP.010.

I. 서 론

포화흡수분광(saturated absorption spectroscopy)^[1]은 원자나 분자의 도플러 선폭확대를 제거할 수 있는 고분해 분광법 중의 하나이며, 레이저의 주파수안정화^[2-4]등에 널리 이용되고 있다. 이 방법은 조사하려는 매질에 서로 반대방향으로 진행하는 펌프광과 조사광을 비추어, 펌프광의 주파수가 원자의 에너지 준위에 공진 될 때, 매질 내에서 조사광의 흡수가 달라지는 현상을 이용하는 것이다. 특히 알카리 원자의 경우, 바닥 상태에 두 개의 초미세준위를 가지고 있고 들뜬상태의 수명이 짧으므로 약한 펌프광에 의해서도 쉽게 이 현상을 관찰할 수 있다.^[5]

포화흡수분광으로 포화흡수신호를 관찰할 때 펌프광을 조사광과 정반대방향으로 정렬하는 경우 펌프광이 레이저로 되돌아가고 이로 인해서 주파수요동이 발생한다. 이 현상을 막기 위하여 optical isolator를 사용하거나 레이저광을 어긋나게 정열한다. 그러나 펌프광과 조사광이 어긋나는 경우, 분광신호의 공진주파수가 이동하거나 선폭이 확대되는 것과 같은 원하지 않는 현상이 나타날 수 있다. 이런 포화분광신호를 이용하여 레이저의 주파수를 안정화하는 경우 원자의 공진주파수에 정확하게 안정화할 수 없게된다.

본 연구에서는 세슘 D₁ 전이선에 해당하는 파장 894 nm에서 발진하는 반도체 레이저 시스템을 제작하였고, 이를 이용하여 세슘 D₁ 전이선의 포화흡수분광신호를 관찰하였다.^[6] 그

리고 세슘증기셀 내에서 조사광과 펌프광이 일정한 각도를 가지고 교차할 때, 교차각과 교차위치에 따른 포화흡수분광신호의 변화를 관찰하였으며, 이러한 효과를 이용하여 분산모양의 주파수 분별신호를 만들 수 있었다. 이 방법은 저자들이 조사한 범위내에서는 본 연구가 최초이다. 이 신호를 이용하면 레이저의 주파수를 변조하지 않고 비례, 적분기만을 이용하여 레이저의 주파수를 안정화 할 수 있고, 또 안정화된 레이저 주파수를 수십 MHz 까지 연속적으로 변화시킬 수 있다. 레이저의 주파수를 직접 변조하지 않고 원자나 분자의 공진선에 안정화하는 방법에는 전기광변조기(EOM),^[7] 음향광변조기(AOM),^[8] Zeeman 변조,^[9] Zeeman 이동,^[10,11] 편광분광학^[12,13] 등을 이용하는 방법들이 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 기존의 방법에 비해 간단하면서도 적은 비용으로 레이저의 주파수를 안정화 할 수 있으므로 실험실에서 뿐만 아니라 상용 레이저 안정화 시스템에도 널리 응용할 수 있을 것으로 기대한다.

II. 속도선택 포화흡수분광의 기본원리

이상적인 포화흡수분광은 그림 1(a)에서 보는바와 같이 조사광과 펌프광이 증기셀 내에서 정확히 미주보며 진행하는 것이며, 레이저의 주파수를 원자의 공진주파수 부근에서 주사시키면 그림 2(a)와 같은 분광신호를 관찰할 수 있다. 레이저의 선폭과 세기, 원자의 충돌 등에 의한 선폭확대 효과를 무시한다면 이 분광신호의 꼭지점은 원자의 공진주파수와 일치하며, 반치폭은 원자의 자연선폭과 같다.

[†]E-mail: hslee@kriss.re.kr

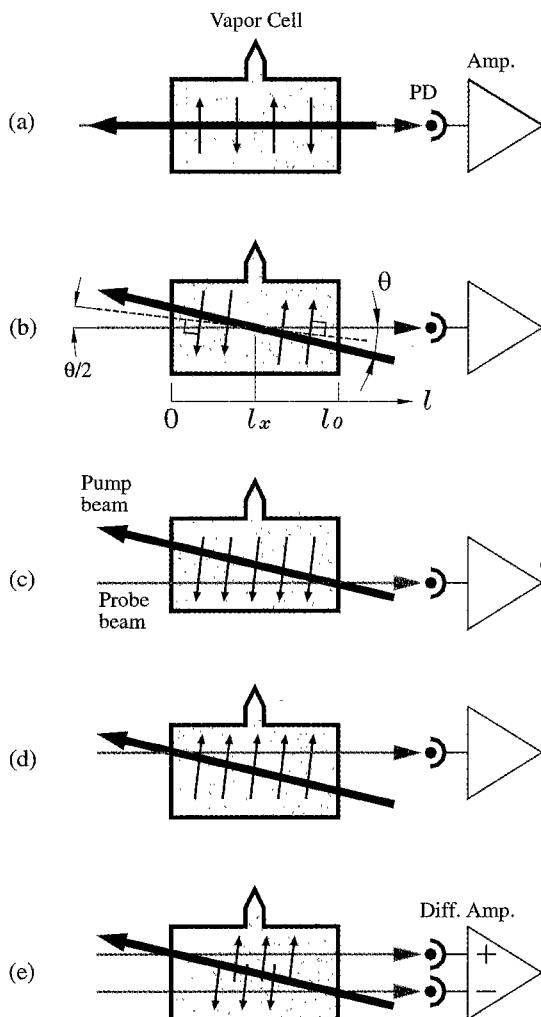


그림 1. 여러 가지 배열의 포화흡수분광 장치. 실선과 굵은선은 각각 조사광과 펌프광을 나타내며, 증기셀의 안쪽에 있는 화살표는 포화분광신호에 기여하는 원자들의 진행방향을 나타냄; (a) 이상적인 레이저 범의 정렬, (b), (c), (d) 펌프 광을 조사광에 대해 일정한 각도로 기울이는 경우, (e) 두 개의 광검출기에서 얻어진 속도선택 포화분광신호를 차동 증폭기를 이용하여 빼는 경우.

그러나, 그림 1(b)와 같이 펌프광을 조사광에 대해 일정한 각도로 기울인 경우, 조사광과 펌프광이 느끼는 도플러 이동이 동일한 경우에만 포화조건이 만족이 된다. 따라서 이 조건을 만족하는 원자는 진행방향의 각도가 $(\pi - \theta)/2$ 또는 $(3\pi - \theta)/2$ 인 원자들이다. 원자들은 맥스웰 속도분포를 이룬다. 그러나 본 논문의 계산에서는 식 (1)과 같이 $1/v$ -속도보정된 맥스웰 속도분포를 가진다고 가정하였다. 그 이유는 한정된 폭을 가진 레이저광을 원자들이 지나가면서 상호작용할 때, 속도가 느린 원자일수록 상호작용 시간이 길어지게 되어 포화 혹은 광펌핑이 될 확률이 더 높아지기 때문이다. 따라서 속도보정된 맥스웰 속도분포는

$$f(v) = |v| \exp\left(-\frac{v^2}{v_m^2}\right), \quad (1)$$

이며, 최확속도(most probable velocity)는 $v_m = (2kT/M)^{1/2}$ 와 같이 표현된다.

우리가 관찰하는 속도선택 포화흡수분광신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(v) = A_- \int_{-\infty}^0 f(v)L(v - v_0 - \Delta v)dv + A_+ \int_0^{+\infty} f(v)L(v - v_0 - \Delta v)dv \quad (2)$$

여기서 $L(v)$ 는 반치폭이 2γ 인 로렌즈 함수인 $L(v) = \gamma^2/(\gamma^2 + v^2)$ 를 나타내며, $\Delta v = (v/\lambda)\sin(\theta/2)$ 는 도플러 이동, v_0 는 원자의 공진주파수이다.

위 식에서 등호 오른쪽의 첫째 항은 적색편이된 분광신호를, 두 번째 항은 청색편이된 분광신호를 나타내며, 그 크기는 각각 계수 A_- 와 A_+ 로 나타낸다. 이 계수의 크기는 조사광과 펌프광의 교차위치 l_x 와 교차각 θ 에 따라 달라지게 된다. 그런데 포화흡수분광신호의 크기는 서로 평행한 펌프광과 조사광사이의 수직거리에 따라 지수함수적으로 감소하는 것을 실험적으로 관찰할 수 있었다. 이것은 펌프광에 의해 다른 바닥상태로 광펌핑된 원자들이 조사광까지 자유공간을 진행하는 동안 원자들간의 충돌에 의해 바닥상태의 재분포가 일어나기 때문으로 생각된다. 그리고 조사광과 펌프광 사이가 멀수록 재분포할 확률이 높아질 것이다. 본 연구에서는 식을 간단히 나타내기 위하여 분광신호의 크기는 원자의 속도와 관계없다고 가정하였다. 따라서 계수 A_- 와 A_+ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_- = \text{constant} \cdot \int_0^{l_x} e^{-\alpha l \tan \theta} dl$$

$$A_+ = \text{constant} \cdot \int_{l_x}^{l_o} e^{-\alpha l \tan \theta} dl \quad (3)$$

여기서 l_0 는 증기셀의 길이이며 α 는 조사광과 펌프광의 거리에 따라 지수함수적으로 감소하는 포화분광신호의 감쇠상수(decay constant)이다.

펌프광과 조사광이 증기셀의 중심에서 교차하는 경우(그림 1(b)), 식 (3)의 계수 A_- 는 A_+ 와 같은 값이 되며, 그림 2(b)의 계산결과와 같이 적색편이와 청색편이된 포화흡수분광신호가 중첩된 형태로 나타나게 된다.

그러나, 조사광과 펌프광이 증기셀의 창에서 교차하는 경우(그림 1(c)와 (d)), 한쪽방향으로 진행하는 원자들만이 분광신호에 기여하기 때문에 식 (3)의 두 개의 계수 중 하나는 0이 되며, 그림 2의 (c) 또는 (d)와 같이 적색편이 혹은 청색편이된 포화흡수분광신호만을 관찰 할 수 있다.

그런데, 그림 1의 (c)와 (d)의 장치를 하나의 장치로 합치면 그림 1(e)와 같이 된다. 두 개의 조사광은 각각 그림 2의 (c) 또는 (d)와 같이 적색편이와 청색편이된 포화분광신호를 가지며 차동증폭기를 이용하여 이 두 신호를 빼면 그림 2(e)와 같은 분산모양의 신호를 얻을 수 있는데, 이 신호는 식 (2)에서 계수 A_+ 가 음의 부호를 가지고, A_+ 와 A_- 의 크기가 같은 경우에 해당한다.

이 분산형 신호의 선폭(신호의 최대값과 최소값에 해당하는 두 주파수의 차이)과 기울기는 식 (1)~(3)에서 나타난 것과

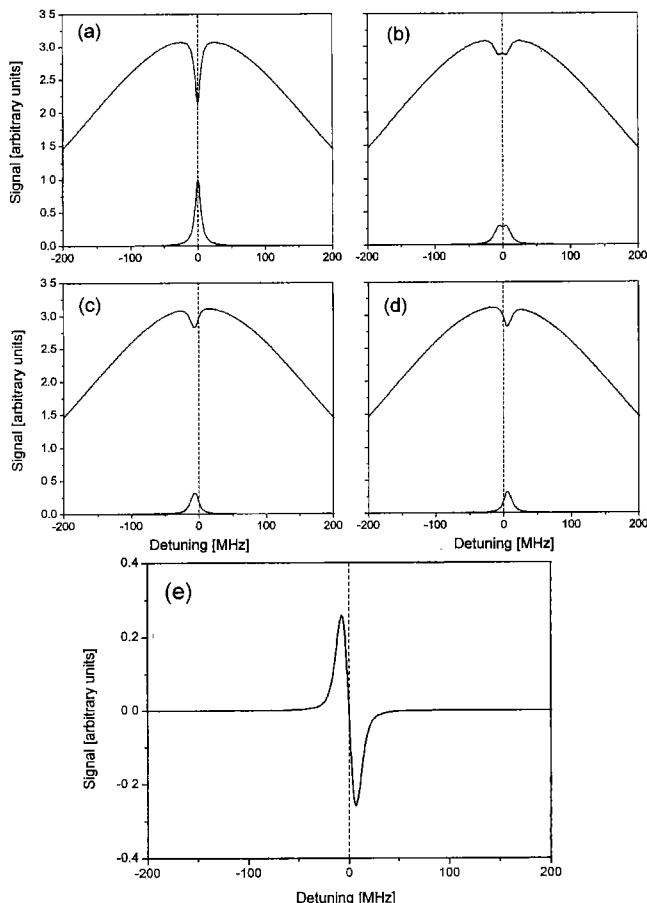


그림 2. 그림 1의 (a)~(e)에 해당하는 계산된 분광신호. 아래쪽은 위쪽의 그림에서 도플러 선폭확대를 제거한 신호를 나타냄.

같이 두 조사광 사이의 거리, 조사광과 펌프광의 교차각에 따라 변한다.

III. 실험장치

그림 3은 속도선택 포화흡수신호와 분산형 신호를 관측하기 위한 실험장치이다. 그림에서 보이는 레이저 시스템은 본 실험실에서 제작한 것으로 독일 Frankfurt사의 파장 894 nm, 출력 30 mW의 반도체레이저에 회절격자와 거울을 이용하여 Littman형의 외부공진기^[14]를 형성시켜 약 30 MHz인 선폭을 3 MHz(CFP 공진기의 분해능) 이하로 축소하였고, 외부공진기의 거리를 변화시킴에 따라 레이저의 주파수를 바꿀 수 있도록 만들었다. 레이저 시스템은 2 인치×2 인치 크기의 광학마운트 모양으로 레이저의 공진기 거리 및 각도는 세 개의 스크류를 이용하여 미세하게 조절하도록 하였고, 그 중 한 개의 스크류를 PZT로 조절하여 레이저 주파수를 조절할 수 있도록 설계하였다. 또한 반도체 레이저를 포함한 레이저 시스템의 모든 광학계가 이 마운트에 장착되어 있으며, 전체가 온도조절 되도록 하였다. 이로 인해 레이저의 온도뿐만 아니라 공진기의 길이도 일정하게 유지시켰다. 반도체 레이저의 표면(front facet)에는 별도로 무반사코팅을 하지는 않았으며, PZT단을 이

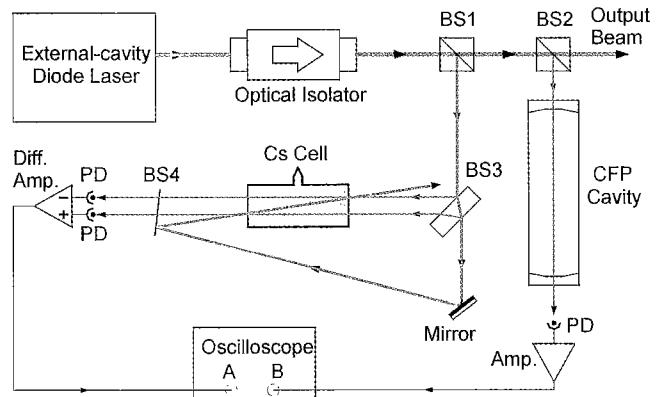


그림 3. 실험장치: BS1, BS2, BS3, BS4, 광분할기; PD, 광검출기; CFP, confocal Fabry-Perot.

용하여 모드의 팀(mode hopping)^[15] 없이 약 4 GHz의 주파수를 연속적으로 가변 할 수 있었다. 만일 무반사(AR)코팅을 한다면 더욱 넓은 주파수 범위를 가변할 수 있을 것으로 예상한다. 본 레이저 시스템의 최종출력은 약 8 mW이다.

그림 3에서 보는바와 같이 광분할기 BS1에 의해 반사된 광은 다시 광분할기 BS3에 의해 3개의 광으로 나누어 진다. BS3에 의해 반사된 두 개의 조사광은 세슘증기셀을 거친 후 각각 광검출기로 입사하게 되며, 투과된 광은 BS4에 의해 반사된 후 조사광과 반대방향으로 세슘증기셀에 입사하여 펌프광으로 사용된다. 광검출기로는 Hamamatsu사의 S2386-18L 실리콘 팬 포토다이오드와 OPamp LF357을 전치증폭기(preamplifier)로 사용하였고, 전치증폭기의 신호 대역폭은 잡음의 gain peaking^[15]을 줄이기 위하여 약 250 kHz로 낮추어 사용하였다. 레이저빔은 폭 6.5 mm, 높이 2 mm의 타원모양을 하고 있으며 지면과 평행한 방향으로 선편광되어 있다. 조사광과 펌프광의 출력은 각각 4 μW, 18 μW이다. 세슘증기셀의 크기는 직경 1인치, 길이 3인치이고 상온에서 사용하였다.

CFP 공진기(자유분광거리(free spectral range)가 150 MHz)는 분광신호의 주파수 간격을 나타내는 기준으로 사용하였다.

IV. 속도선택 포화흡수분광 실험

먼저, 그림 3의 실험장치에서 두 개의 조사광 중 한 개를 막고 포화흡수분광신호를 오실로스코프(Tektronix 2430A)를 이용하여 관찰하였다. 그림 4는 세슘 D₁선에 대한 분광신호로, 도플러 선폭확대된 선형흡수신호내에 좁은 선폭을 가진 포화흡수분광신호가 보인다. 여기서 두 개의 조사광 모두를 사용하면 선형흡수신호가 제거된 포화흡수분광신호만을 볼 수 있다.

그림 1(b)와 같이 조사광과 펌프광이 증기셀의 중앙에서 교차할 때, 교차각에 따른 포화흡수분광신호의 변화를 관측한 것이 그림 5(a)이다. 교차각이 커질수록 분광신호의 선폭이 확대되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 적색편이와 청색편이된 포화흡수분광신호의 주파수 이동이 교차각에 비례하며, 이 두 분광신호가 중첩되어 관찰되기 때문이다.

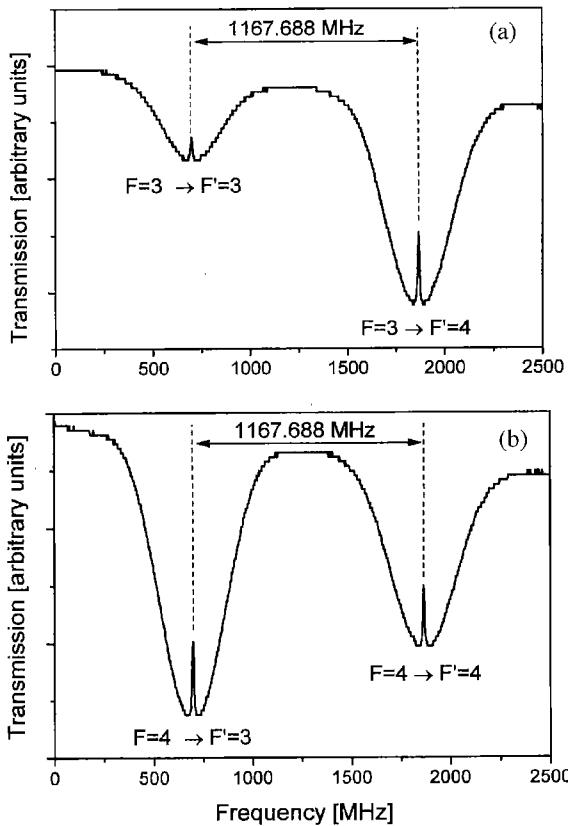


그림 4. 세습 D_1 전이선($6S_{1/2} \rightarrow 6P_{1/2}$)을 관찰한 포화흡수분광신호, (a) 바닥상태 $F=3$ 에서의 전이, (b) 바닥상태의 $F=4$ 에서의 전이.

식 (1)~(3)을 이용하여 계산한 포화흡수분광신호가 그림 5(b)이다. 여기서 분광신호의 반치폭은 9 MHz, 감쇠상수 α 는 $4 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$ 로 놓고 계산하였다. 이 값들은 실험적으로 측정하여 얻은 것인데, 특히 감쇠상수 α 는 교차각이 0도 일 때 조사광으로부터 펌프광을 수직으로 이동시키면서 측정한 포화흡수분광신호의 크기를 지수 감소 함수에 fitting 하여 구하였다.

조사광과 펌프광의 교차각이 3.5도로 고정되고, 교차하는 위치가 바뀔 때 포화흡수신호의 변화를 관찰한 것이 그림 6이다. 그림 6의 (a)와 (e)는 두 레이저광이 증기셀의 창에서 교차하는 경우에 관측한 것으로, 각각 적색편이와 청색편이된 포화흡수신호를 보여주고 있다.

그림 6의 (b)와 (d)에서와 같이 두 레이저광이 증기셀의 1/4과 3/4 되는 지점에서 각각 교차하면, 적색편이와 청색편이된 포화분광신호가 모두 존재하지만 두 신호성분 중 한쪽이 더 크다. 그림 7은 계산으로 얻은 결과로서, (a)~(e)는 각각 그림 6의 (a)~(e)에 해당하는데, 실험결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다.

이상은 포화흡수분광장치에서 조사광과 펌프광을 일정한 각도로 어긋나게 정렬하는 경우 분광신호의선풍화대 및 공진주파수의 이동이 생기는 것을 관찰하였다. 이 현상은 포화흡수분광신호를 이용하여 레이저 주파수를 안정화할 때 레이저의 주파수가 공진주파수에서 벗어날 수 있음을 보여주는 것으로, 레이저빔의 정렬에 주의해야 한다.

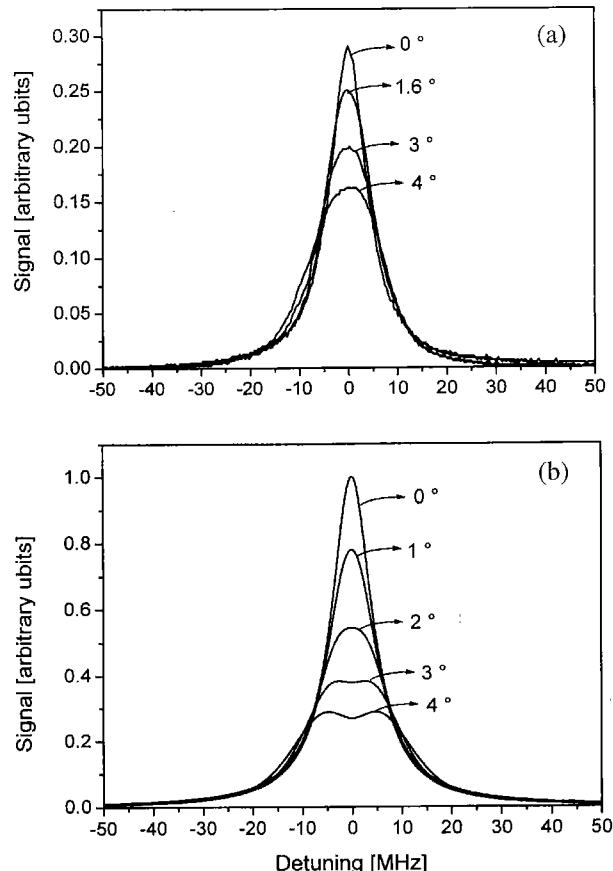


그림 5. 조사광과 펌프광의 교차각에 따라 측정(a) 및 계산(b)된 포화흡수분광신호(단, 두 레이저광의 교차위치는 증기셀의 중심임).

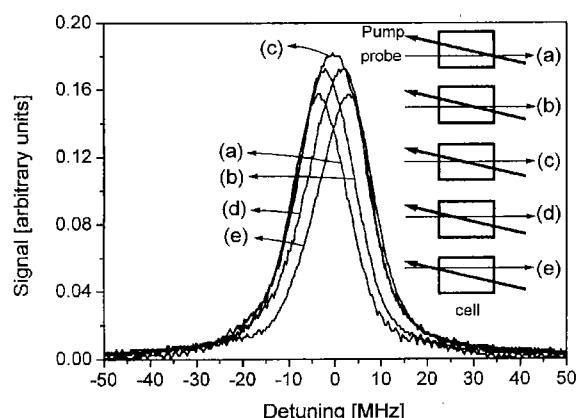


그림 6. 조사광과 펌프광의 교차위치에 따라 측정된 분광신호(단, 교차각은 3.5도임).

V. 분산형 신호의 관찰과 레이저 주파수안정화

그림 3의 실험장치도에서 두 개의 조사광을 광검출기로 받아 차동증폭기를 이용하여 그 차이를 측정하면 분산모양의 신호를 관찰 할 수 있다. 이것은 앞서 설명했듯이 두 조사광이

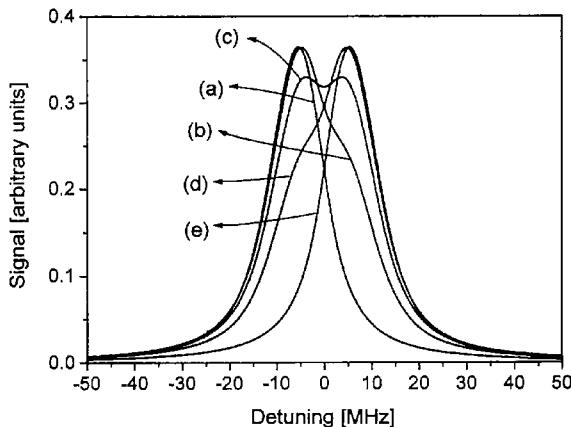


그림 7. 그림 6에 해당하는 계산된 분광신호.

각각 적색편이와 청색편이된 포화분광신호를 가지고 있기 때문이다.

두 조사광과 펌프광 사이의 교차각에 따른 분산형 신호의 변화를 오실로스코프로 관찰한 결과가 그림 8의 (a)이다. 여기서 0도는 펌프광이 두 조사광 사이의 정중앙을 평행하게 지나가는 것을 의미한다. 교차각이 점점 커질수록 신호의 크기가 커지다가 다시 줄어드는 것을 볼 수 있다. 식 (1)~(3)을 이용하여 계산한 결과가 그림 8의 (b)인데, 측정결과와 잘 일치한다. 두 경우 모두 기울기가 가장 급할 때의 교차각은 1.3도였다.

이와 같은 분산형 신호는 레이저의 주파수를 안정화하는 주파수 분별신호로 사용될 수 있으며, 레이저의 주파수를 변조하지 않고도 안정화 할 수 있는 장점이 있다. 그리고 분산형 신호에 DC전압을 더하면 주파수 안정화 지점을 이동시킬 수 있기 때문에 주파수가 안정화된 상태에서 연속적으로 주파수를 변화시킬 수 있다. 또한 기존에 알려진 방법과 같이 주파수 분별신호를 만들기 위해 전기광변조기(electro-optic modulator), 음향광변조기(acousto-optic modulator), 솔레노이드 코일, 선형편광기, 위상 지연기 등과 같은 장치들이 필요하지 않으며, 두 조사광의 차이에 해당하는 신호를 얻기 때문에 레이저의 출력변동에 따른 신호의 변화가 작다는 장점이 있다. 반면, 분산형 신호의 크기가 기존의 포화흡수분광신호에 비해 약 1/2 이하로 작으면, 원하지 않는 외부의 빛이 광검출기에 들어가면 신호의 크기(DC값)가 변하기 때문에 안정화된 레이저의 주파수가 바뀔 수 있다는 단점이 있다.

교차각이 1.3도로 고정되었을 때 얻은 분산형 신호의 0-교차지점(zero-crossing point)에 레이저의 주파수를 안정화하였다. 이때 0-교차점이 원자의 공진주파수와 일치되도록 하기 위해서 분산모양의 신호가 대칭되게 레이저광들을 주의하여 정렬하여야 한다. 적분기를 거친 오차신호는 외부공진기의 PZT로, 비례기의 출력은 반도체 레이저의 전류공급장치로 각각 되며 임(feedback)하였다. 이때 안정화 시스템의 문턱 주파수(cutoff frequency)는 약 200 kHz이다. 그림 9는 자유발진하는 경우와 주파수 안정화된 경우 시간에 따른 주파수 요동을 나타낸 결과인데, Fluke사의 모델 8842A DVM(Digital Volt Meter)을 사용하여 측정하였으며 각 데이터 포인트의 샘플링 시간은 10

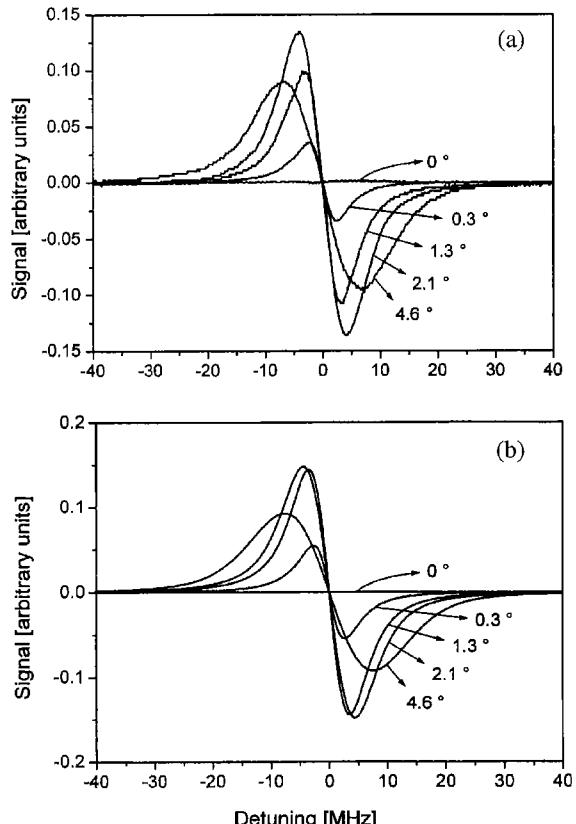


그림 8. 교차각에 따른 측정(a) 및 계산(b)된 분산모양의 신호.

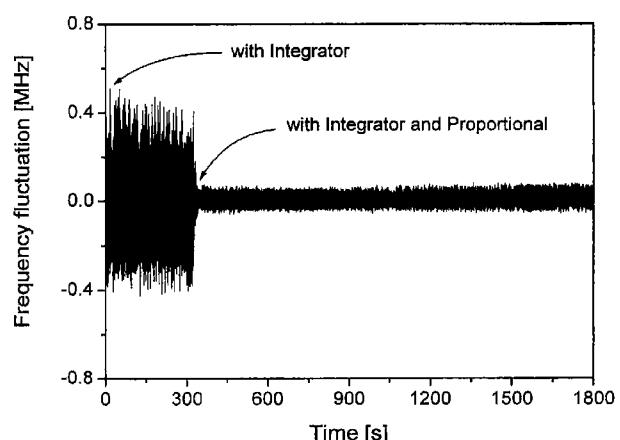


그림 9. 비례증폭기와 적분기를 이용하여 레이저의 주파수를 안정화한 경우 레이저 주파수의 요동. 단, 적분시간은 10 ms.

ms이다. 적분기만 사용했을 때 보다 비례기를 추가했을 때 약 1/10로 주파수 요동이 감소하였다. 비례기와 적분기를 모두 사용하였을 때 주파수 요동의 제곱평균제곱근(rms) 값은 약 22 kHz였다.

그림 10은 레이저의 주파수 안정도를 Allan분산의 제곱근^[16]으로 나타낸 결과로서 데이터의 최소 샘플링 시간이 10 ms이다. fitting 결과 샘플링 시간이 $0.01 \text{ s} \leq \tau \leq 10 \text{ s}$ 인 구간에서 $\sigma_y(\tau) = 7 \times 10^{-12} \tau^{1/2}$ 의 안정도를 얻었다.

레이저가 자유발진하는 경우와 안정화된 경우 오차신호의 스

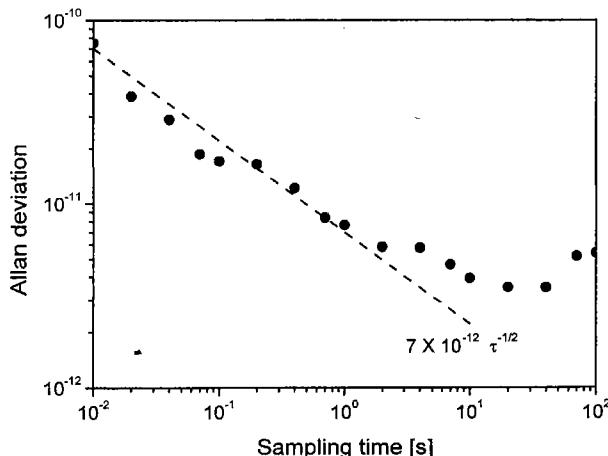


그림 10. 레이저 주파수 안정도를 Allan 분산의 제곱근으로 나타낸 결과.

스펙트럼을 스펙트럼분석기(HP 8563E)를 이용하여 측정하여 주파수 잡음의 스펙트럼 밀도(power spectral density)^[16]로 나타낸 결과가 그림 11이다. 광검출기의 대역폭이 250 kHz이므로 그 이상의 주파수 잡음은 의미가 없기 때문에 200 kHz까지 측정하였다. 그리고 낮은 주파수에서는 스펙트럼 분석기의 신뢰도가 떨어지므로 200 Hz에서부터 측정하였다. 레이저가 자유발진하는 경우의 스펙트럼 밀도가 그림 11의 (a)에 나타나 있으며, 이때 주파수의 흐름을 막기 위해 분산형 신호의 0-교차점에 레이저의 주파수를 가볍게 안정화한 후 측정하였다.

그림 11의 (b)는 레이저의 주파수를 적분기와 비례기를 모두 사용하여 안정화한 경우로서 약 200 kHz 까지 주파수 잡음이 감소한 것을 볼 수가 있다. 그림에서 보이는 많은 피크들은 광검출기와 전치증폭기 및 측정장치가 가지는 60 Hz 전원의 고조파(harmonic)성분에 의해 발생한 잡음들로서 대부분은 레이저의 주파수 잡음과는 무관하다. 이것은 광검출기로 들어가는 모든 빛을 가린 후 스펙트럼 밀도를 측정하였을 때에도 그림 11의 (b)와 같은 피크성 잡음들이 발생되는 것을 확인할 수 있었으며, 피크성 잡음을 무시한 경우 주파수에 무관한 백색잡음(white noise)의 스펙트럼 밀도는 약 2.2×10^3 Hz²/Hz였다. 따라서 본 시스템에서 얻을 수 있는 Allan 분산의 한계를 스펙트럼 밀도를 이용하여 환산하면 $\sigma_y(\tau) = 1 \times 10^{-13} \tau^{1/2}$ 이며,^[19] 선폭의 한계는 약 7 kHz임을 알 수 있다.

그림 11에서 자유발진하는 경우와 안정화된 경우의 주파수 잡음 스펙트럼 밀도 $S_y(f)$ 는 근사적으로 $(3 \times 10^{13} f^2 + 2 \times 10^4)$ Hz²/Hz와 $(5 \times 10^{11} f^2 + 7 \times 10^3)$ Hz²/Hz으로 각각 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 계산한 레이저의 선폭은 자유발진하는 경우는 약 130 kHz, 안정화된 경우는 약 35 kHz였다.^[17-20]

VI. 결 론

포화흡수분광장치에서 조사광을 펌프광에 대해 일정한 각도로 세슘증기셀 내에서 교차시켜 속도선택 포화흡수분광신호를 관찰하였다. 이때 조사광과 펌프광이 교차하는 각도와 위치에 따른 분광신호의 변화를 관찰하였고, 계산결과와 비교하였다.

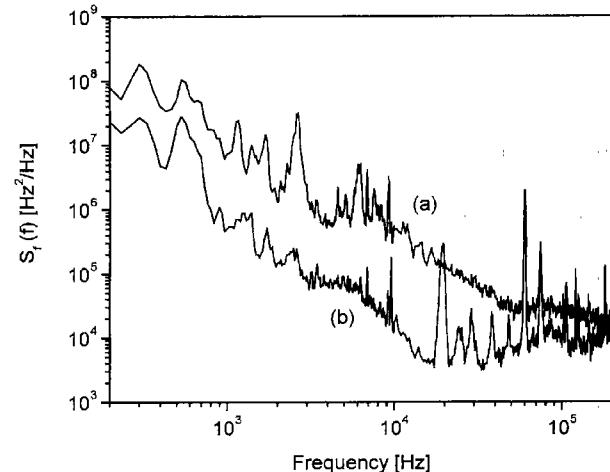


그림 11. 자유발진하는 경우(a)와 안정화된 경우(b) 오차신호를 스펙트럼분석기로 측정한 결과를 주파수 잡음의 스펙트럼 밀도(power spectral density)로 나타낸 그림(50회 비디오 평균한 결과).

또한 두 개의 나란한 조사광에 의해 만들어진 속도선택 포화흡수분광신호의 차이를 측정함으로써 분산모양의 주파수 분별신호를 만들 수 있었다. 이 신호를 이용하여 레이저의 주파수를 안정화하였는데, 그 결과 주파수 안정도 $\sigma_y(\tau = 1 s) = 7 \times 10^{-12}$ 이었고, 오차신호의 스펙트럼 밀도를 이용하여 계산한 레이저의 선폭은 약 35 kHz였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가지정연구실(NRL) 사업에서 일부 연구비 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy* (Springer-Verlag, New York, 1996), Chapter 7.
- [2] T. W. Hänsch, M. D. Levenson, and A. L. Schowlow, “Complete hyperfine structure of a molecular iodine line,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 26, no. 16, pp. 946-949, 1971.
- [3] 박상언, 이호성, 박종대, 조 혁, “공atsu점 Fabry-Perot 공진기의 공진광 되먹임에 의한 반도체 레이저의 선폭축소 및 주파수 안정화,” 새물리, 제34권 4호, pp. 401-408, 1994.
- [4] H. S. Lee, S. H. Yang, Y. B. Kim, S. E. Park, H. Cho, and J. D. Park, “Frequency detuning and stabilization of a diode laser using the Zeeman shift of the saturated absorption signal of rubidium atoms,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 1A, pp. 276-280, 1996.
- [5] 이호성, 박상언, 조 혁, 박종대, 한국광학회지, “루비듐-87 원자 D₂ 전이선에 대한 광펌핑 포화분광,” 제4권 2호, pp. 188-194, 1993.
- [6] S. B. Ross, S. I. Kanorsky, A. Weis, and T. W. Hänsch, “A single mode, cw, diode laser at the cesium D₁ (894.59 nm) transition,” *Opt. Comm.*, vol. 120, no. 15, pp. 155-157, 1995.
- [7] T. Yanagawa, S. Saito, S. Machida, Y. Yamamoto, and Y.

- Noguchi, "Frequency stabilization of an InGaAsP distributed feedback laser to an NH₃ absorption line at 15137 Å with an external frequency modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 47, no. 10, pp. 1036-1038, 1985.
- [8] Y. Sakai, I. Yokohama, G. Kano, and S. Sudo, "Frequency stabilized laser diode locked acetylene gas absorption lines using fiber-pigtail-type acoustic optical modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 96-98, 1992.
- [9] T. Ikegami, S. Ohshima, and M. Ohtsu, "Frequency stabilization of laser diodes to the Cs-D₂ line with the Zeeman modulation method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 28, no. 10, pp. L1839-L1841, 1989.
- [10] K. L. Corwin, Z-T. Lu, C. F. Hand, R. J. Epstein, and C. E. Wieman, "Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 15, pp. 3295-3298, 1998.
- [11] U. Shim, J. A. Kim, and W. Jhe, "Saturated absorption spectroscopy in the presence of a longitudinal magnetic field," *J. Korean. Phys. Soc.*, vol. 35, no. 3, pp. 222-255, 1999.
- [12] M. Ohtsu and T. Tako, "Frequency stabilization of a He-²²Ne laser by intracavity polarization spectroscopy of CH₄. II," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 21, no. 5, pp. 722-724, 1982.
- [13] 문한섭, 김승일, 김현아, 김종복, "87Rb D₂ 전이선에 대한 원평광 분광 연구 및 레이저 주파수 안정화," 한국광학회지 제6권 4호, pp. 317-322, 1995.
- [14] K. C. Harvey and C. J. Myatt, "External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 910-912, 1991.
- [15] Hamamatsu 카탈로그, *Photodiodes*, No. KPD0001E07, 1998.
- [16] J. A. Barnes, A. R. Chi, L. S. Cutler, D. J. Healey, D. B. Leeson, T. E. McGunigal, J. A. Mullen, W. L. Smith, R. L. Sydnor, R. F. C. Vessot, and G. M. R. Winkler, "Characterization of frequency stability," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-20, no. 2, pp. 105-120, 1971.
- [17] M. Ohtsu and S. Kotajima, "Linewidth reduction of a semiconductor laser by electrical feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 12, pp. 1905-1912, 1985.
- [18] C. H. Shin and M. Ohtsu, "Homodyne optical phase locking of resonant cavity coupled semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-29, no. 2, pp. 374-385, 1993.
- [19] M. Ohtsu and S. Kotajima, "Derivation of the spectral width of a 0.8 μm AlGaAs laser considering 1/f noise," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 23, no. 6, pp. 760-764, 1984.
- [20] K. Kikuchi, "Effect of 1/f-type FM noise on semiconductor-laser linewidth residual in high-power limit," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-25, no. 4, pp. 684-688, 1989.

Observation of dispersion-like signal based on velocity-selective saturated absorption spectroscopy and frequency stabilization of diode laser

Sang Eon Park and Hyuck Cho

Department of Physics, Chungnam National University, Daejon 305-764, KOREA

Taeg Yong Kwon, Sung Hoon Yang, and Ho Seong Lee[†]

Time and Frequency Lab., Korea Research Institute of Standards and Science, Daejon 305-340, KOREA

[†]E-mail: hslee@kriss.re.kr

(Received September 5, 2000 ; Revised manuscript received May 7, 2001)

We observed a velocity-selective saturated absorption spectrum when the pump beam intersects the probe beam at a finite angle with a saturated absorption spectroscopic configuration in the cesium vapor cell. And we also observed a dispersion-like signal by measuring the difference between two velocity-selective absorption spectra produced by two parallel probe beams intersected by one pump beam. The dispersion-like signal was changed with the crossing angle and the crossing position of the pump and probe beams and compared with the calculated result. The dispersion-like signal was used as a frequency discriminator, and the laser could be frequency-stabilized without any frequency modulation. As a result, the square root of Allan variance was 7×10^{-12} for the sampling time of 1 s.

Classification code : SP.010.