

^{87}Rb D₂ 전이선에 대한 원편광 분광 연구 및 레이저 주파수 안정화*

문한섭 · 김승일 · 김현아 · 김중복

한국교원대학교 물리교육과

이 호 성

한국표준과학연구원 전자기 연구부

(1995년 7월 7일 받음)

선풍족 축소된 반도체 레이저를 이용하여 루비듐 원자의 D₂ 전이선에 대해 도플러 효과가 제거된 편광 분광을 실시하고 광편광 편광 분광 이론과 비교하였다. 펄프광이 충분히 약했을 때 실험에서 얻어진 분산모양의 스펙트럼은 단일 주기 광편광 이론과 잘 일치하였다. 또한 편광 분광 신호를 직접 오차신호로 사용하여 공진기 길이를 보정한 결과, 주파수 변조를 하지 않고서도 레이저 주파수를 원자의 초미세 전이선에 안정화시킬 수 있었다.

I. 서 론

다이오드 레이저를 이용한 고분해능 분광 연구가^[1-5] 많이 행해지고 있는데 그 중의 하나가 편광 분광 연구^[6-7]이다. Wieman과 Hänsch^[8]에 의해 연구된 편광 분광학은 조사하려는 매질에서 서로 반대 방향으로 원편광된 펄프광과 선편광된 조사광을 보내어 조사광의 편광 방향에 거의 수직하게 설치된 검광기를 통하여 나오는 광의 세기를 측정함으로써 이루어진다. 펄프광의 주파수가 원자의 에너지 준위에 공진될 때 펄프광에 의해 유도된 매질의 비등방성은 조사광에 복굴절이나 이색성을 일으켜 원자 증기셀을 통과한 후에 편광의 변화로 나타난다. 이는 두개의 광을 반대방향으로 보냈기 때문에 도플러 선풍족 속에 포함되어 있는 초미세 구조들간에 전이선을 관측해 낼 수 있는 고분해능 분광법이다.

펄프광이 원자에 비등방성을 만들려면 매우 강한 세기를 가져야 할 것으로 생각되나 바닥 상태에 2개 이상의 에너지 준위를 갖는 원자에 대해서는 약한 펄프광으로도 충분히 측정 가능한 비등방성을 일으킬 수 있다. 이는 펄프광이 원자들을 바닥상태의 다른 에너지 준위로 이동시켜 바닥 준위들의 밀도 변화를 일으키기 때문인데

이러한 현상을 광편광이라 한다. 펄프광이 공진 에너지 준위의 하준위에 있던 원자들을 여기시키면 여기된 원자는 다른 전이 확률을 가지고 바닥 준위들로 자발 방출을 하게 된다. 따라서 바닥 상태에 있는 에너지 준위들은 약한 펄프광에 의해서도 큰 밀도차이를 일으키게 된다. 이는 바닥 상태에 2개 이상의 에너지 준위가 존재하거나 여러개의 에너지 준위들이 축퇴되어 있는 원자에 대해서만 가능하다. 그래서 원자핵 스핀이 0이 아니고 최외각 전자가 한개인 알칼리 금속 원소가(Li, Na, K, Rb, Cs) 광편광 편광 분광의 매질로 많이 사용되고 있다.

Nakayama^[9,10]는 알칼리 금속 원소의 D 전이선에 대해 4준위 모델을 설정하고 초미세 준위에 축퇴되어 있는 Zeeman 부준위 사이에서의 흡수-자발 방출의 한 주기를 고려하여 공진 신호의 크기와 부호를 계산하였다. 이때 펄프광과 조사광의 편광에 따라 공진 신호의 크기와 부호가 달라지는 것을 설명하기 위해 4준위 사이에서 발생가능한 4가지 공진 구조(I, N, V, Λ 형)를 고려하여 계산하였다. 국내에서 수행된 광편광 편광 연구로는 색소 레이저를 이용한 나트륨 원자에 대한 분광 연구가 있다^[11].

알칼리 금속 원소들의 D 전이선들에는 흡수와 자발 방출이 두에너지 준위에서만 일어나는 전이선이 있는데 이를 cycling transition(CT)선이라 한다. 이 전이선은

*위 연구는 한국 표준 과학 연구원과 한국 과학 재단 (과제 번호: 951-0205-012-1)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

선택률에 의해 다른 준위로 자발 방출이 일어나지 않고 여기된 준위로만 다시 자발 방출이 일어난다. CT선에 주파수가 안정화된 레이저는 원자 시계나 레이저 클링과 같은 분야에서 매우 중요하다^[12]. 이를 위해서는 먼저 도플러 효과가 제거된 분광 기술이 필요하고 이 전이선에서 신호대 잡음비가 가능한 큰 신호를 얻을 수 있어야 한다. 지금까지는 원편광을 이용한 포화 분광법^[13]을 적용하여 비교적 큰 신호를 얻을 수 있었다. 하지만 포화 분광법은 CT선을 중심으로 대칭인 Lorentzian 모양의 스펙트럼을 주기 때문에 주파수 안정화를 위해서는 주파수 변조를 통한 미분 신호를 얻어야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 Rb 원자에 대한 광펌핑 편광 분광 실험을 수행하였으며 실험 결과를 Nakayama 가 제시한 이론과 비교하였다. 또한 주파수 변조 없이 원편광 편광 분광을 통하여 얻은 신호를 레이저 공진기 길이 보상을 위하여 직접 되먹임 시킴으로써 CT선에 주파수 안정화를 시킬 수 있었다.

II. 이 론

Nakayama^[9-10]는 4 준위계 원자에서 초미세 준위에 축퇴되어 있는 Zeeman 부준위 사이의 흡수-자발 방출의 한 주기만을 고려하여 공진 신호의 크기와 부호를 계산하였다. 이 이론에는 펌프광의 강도가 충분히 작아서 펌프광에 의해 여기되었던 원자들은 유도 방출없이 자발 방출만 한다는 가정과 조사광의 강도가 펌프광 보다 작아서 조사광에 의한 바닥 상태의 원자 밀도 분포 변화는 없다는 가정이 내포되어 있다.

펌프광에 의해 유도된 매질의 비등방성에 대한 조사광의 감수율 X_{ij} 는 다음 식으로 표현된다.

$$X_{ij} \propto \sum I_j \exp[-(\Delta\omega_{ij}/2ku)^2] / [\omega - \omega_{ij} - i\gamma] \quad (1)$$

단, X 의 첨자 i 는 펌프광의 편광을, 첨자 j 는 조사광의 편광을 나타낸다. ω_1 와 ω_2 는 각각 펌프광과 조사광의 각주파수를 나타내고, $\Delta\omega_{ij} = \omega_1 - \omega_2$, $\omega_{ij} = (\omega_1 + \omega_2)/2$ 이다. 지수항은 Doppler factor를 나타내는 것으로 k 는 파수(wave number)를 u 는 최확속도를 나타낸다. 식 (1)에서 상대크기 I_{ij} 는 다음 식으로 주어진다.

$$I_{ij} = |\mu_i|^2 \cdot |\mu_j|^2 \cdot [-\delta_{i,sp} + |\mu_{sp}|^2/\Gamma] \quad (2)$$

여기에서 $|\mu_i|^2$ 와 $|\mu_j|^2$ 는 각각 펌프광에 대한 전이확률을 나타내고, $|\mu_{sp}|^2$ 는 펌프광에 의해 여기되었던 상준위로부터의 자발 방출 전이확률을 나타낸다. Γ 는 각 Zeeman

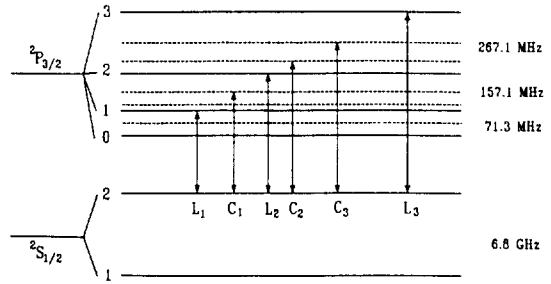


그림 1. 루비듐-87 원자 D₂ 전이선에 해당하는 에너지 준위 및 전이선의 명칭(L은 주공진선을, C는 교차 공진선을 나타냄).

부준위 사이의 총 전이확률을 나타내고, $|\mu_{sp}|^2/\Gamma$ 는 상준위에서 하준위로의 자발방출에 대한 branching ratio를 나타낸다. $\delta_{i,sp}$ 는 자발방출이 펌프광의 하준위로 일어나면 1이 되고, 펌프광의 하준위가 아닌 다른 준위로 일어나면 0이 된다.

원편광을 펌프광으로, 선편광을 조사광으로 사용하는 원편광 편광 분광학에선 펌프광이 원자들의 하준위 밀도를 Zeeman 부준위의 한쪽 방향으로 광펌핑시키기 때문에 조사광의 좌·우원편광 성분에 대한 감수율이 달라지게 된다. 그림1과 같은 Rb-87 원자의 D₂ 전이선에서 펌프광과 조사광이 각각 (σ_+ , σ_+)일 때와 (σ_+ , σ_-)일 때, 감수율의 상대크기 I_{ij} 를 구하면 표 1과 같다. σ_+ 와 σ_- 는 각각 좌원편광과 우원편광을 나타내고 표에서 윗첨자와 아래첨자는 각각 펌프광과 조사광의 편광 상태를 나타낸다. 원편광 편광 분광학에서 검광기의 각도가 작을 때는 두 감수율의 차에 비례하는 신호를 나타내기 때문에 반대부호를 가진 CT(L₃)의 신호가 가장 크다. 따라서 이 신호는 레이저 주파수 안정화를 위한 기준 신호로 사용하기에 적합하다.

조사광의 좌·우원편광 성분에 대한 감수율의 차이는 복굴절과 이색성으로 나타난다. 복굴절에 의해 조사광의 편광축이 기울어지게 되고, 이색성에 의해 선편광이 타원편광으로 바뀌게 된다. 즉, 선편광이던 조사광이 cell을 통과하게 되면 복굴절과 이색성에 의해 기울어진 타원편광이 된다^[14].

그림 2에서 조사광의 편광기에 대하여 수직으로부터 만큼 돌린 검광기를 통과한 조사광의 intensity는 다음 식으로 표현된다.

$$I = I_0 \{ [1 + i(d-d^*) - ff^*] \sin\theta + ff^* \cos^2\theta + (f+f^*) [1 + i(d-d^*)] \sin\theta \cos\theta \} \quad (3)$$

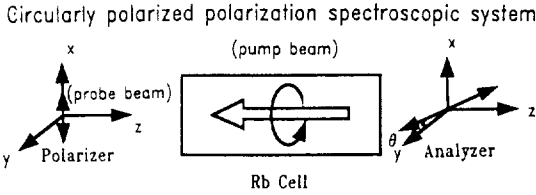


그림 2. 원편광 편광 분광의 편광 상태(θ : Polarizer와 검광기 사이의 각도).

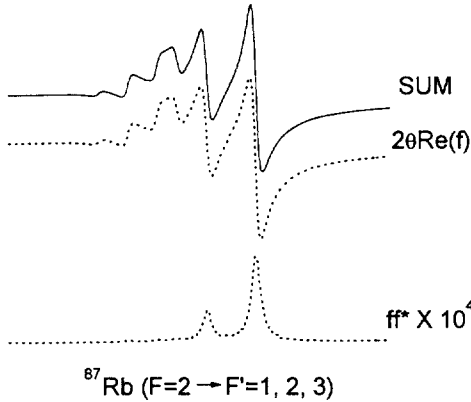


그림 3. $\theta=17$ mrad일 때 스펙트럼에서의 $2\text{Re}(f)$ 와 f^* 의 기여에 대한 이론적 크기 분석.

여기서

$$f = kl(X_{+} - X_{-})/4$$

$$d = kl[1 + (X_{+} + X_{-})/4] \quad (4)$$

이다. l 은 Rb cell의 길이이고, k 는 파수이며, I_b 는 조사광의 intensity이다. f^* 는 f 의 공액 복소수이고, X_{+} 와 X_{-} 는 각각 조사광의 좌·우원편광 성분에 대한 감수율이다. f 의 허수부는 이색성, 실수부는 복굴절을 알 수 있다. f 는 조사광의 두원편광 성분에 대한 차로써 주어지고 d 는 그 합으로써 주어지기 때문에 식 (1)로부터 실수부와 허수부로 나누어지는 감수율은 식 (3)에서 검광기의 각도 즉 θ 에 따라서 다양한 모양의 스펙트럼을 예상할 수 있다. 검광기의 각도를 달리하면서 조사광의 intensity를 구해보면 $\theta=0$ 인 경우에

$$I = I_b f f^* \quad (5)$$

로 Lorentzian 모양의 신호가 된다. θ 가 매우 작아서 $\sin^2 \theta$ 항과 $i(f+f^*)(d-d^*)$ 항을 무시할 수 있는 경우에

$$I = I_b(\theta^2 + 2\theta \text{Re}(f) + f f^*) \quad (6)$$

로 된다. 두 원편광 성분에 대한 굴절률차 즉 복굴절에

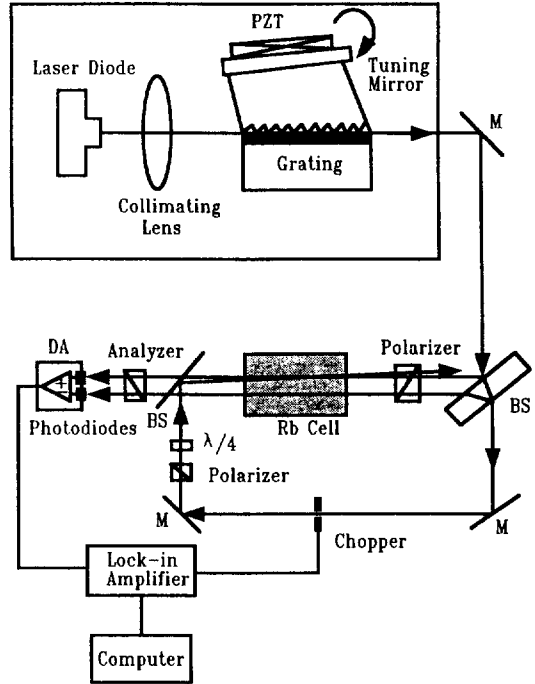


그림 4. 편광 편광 분광 실험 장치도.

의하여 분산 모양을 주는 두번째항과 Lorentzian 모양을 주는 세번째항의 합에 의하여 신호가 나타나게 되는데 그림 3과 같이 세번째항은 두번째항에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 이 스펙트럼은 분산 모양일 것이고 공진 주파수에서 신호가 0인 즉 zero-crossing하는 스펙트럼이기 때문에 주파수를 안정화 시키는데 유용하다. 물론 이 스펙트럼은 주파수 변조 기술을 적용하지 않고 얻어지게 된다.

한편, $\theta=\pi/2$ 인 경우에는

$$I = I_b(1 - 2 \text{Im}(d) - f f^*) \quad (7)$$

로 d 가 식 (4)에서 조사광의 두 원편광 성분에 대한 감수율의 합에 의하여 주어지고 허수부 즉, 흡수계수가 기여하기 때문에 포화 흡수 분광에서 원편광을 펄프광으로 조사광을 선편광으로 한 결과와 동일한 Lorentzian 모양의 신호가 나타난다.

III. 실험 장치

그림 4는 실험 장치에 대한 개략도이다. 상온에서 파장이 790 nm이고 출력이 30 mW인 상용의 다이오드 레이저 전면에 무반사 증착을 시킨후 Littman형 공진기를

형성하여 선폭이 축소된 레이저를 만들었다^[15]. 직경이 약 3mm인 레이저광은 광 분할기에 의해 펄프광과 조사광으로 나누어지고 그들의 강도는 neutral density (ND) 필터로써 조절하였다. 편광판을 이용해 조사광을 선편광으로 만들고 편광판과 $\lambda/4$ 판을 이용해 펄프광을 원편광으로 만든 다음 Rb cell 내에서 서로 반대 방향으로 진행하면서 교차하도록 하였다. 교차각은 작을수록 도플러 효과를 줄일 수 있는데 본 연구에서는 약 2도로 하였다. Rb cell을 통과한 조사광은 검광기를 통과한 후 photodiode에 의해 측정된다. 주파수 변화는 파장 조절용 거울에 부착된 PZT에 삼각파 전압을 가하므로써 이루어졌고 측정된 조사광은 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

선형 흡수에 의해 나타나는 배경 (background) 신호를 제거하기 위하여 포화 분광법에 적용된 방법^[13]을 본 연구에서는 처음으로 편광 분광법에 적용하였다. 두개의 조사광을 보냄으로써 하나는 펄프광과 교차하도록 하고 다른 하나는 펄프광과 상호작용 없이 Rb cell을 통과시킨 후에 두개의 광다이오드로 측정하고 차등 증폭기(differential amplifier)로 두신호의 차를 구하였다. 펄프광과 교차하지 않은 조사광은 선형 흡수에 의한 배경 신호만을 가지고 있기 때문에 3차 비선형 계수와 선형 부분을 가진 다른 조사광에 포함된 선형 흡수 신호를 제거할 수 있다. 또한 잡음 제거를 위해 chopper와 lock-in amp를 사용하였고 Rb cell이 설치된 공간에서 지자장의 효과를 차폐하기 위해 μ -metal판을 이용하였다.

IV. 실험 내용 및 결과

펄프광의 강도는 일정하게 하고 검광기의 각도를 바꾸어주면서 조사광의 신호를 관측하는 실험 결과는 그림 5와 같다. 이때 조사광과 펄프광의 강도는 각각 $20 \mu W$, $0.25 mW$ 였다. 검광기의 각도가 1도 (약 17 mrad)일 때는 식 (5)에서 같이 f^* 의 성분이 무시된 복굴절에 의한 분산 모양이 나타났고, 검광기의 각도가 90도 (약 1.57 rad)일

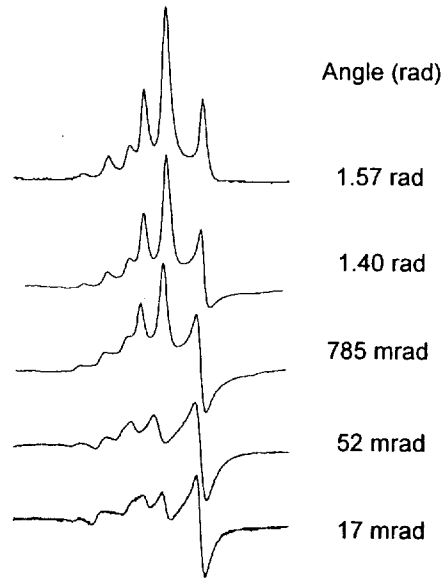


그림 5. 검광기의 각도에 따른 편광 분광 신호
조사광의 출력: $20 \mu W$, 펄프광의 출력: $0.25 mW$.

때는 식 (7)에서 주어진 것과 같이 포화 흡수 분광 신호와 동일한 Lorentzian curve가 나타났다.

그림 6은 검광기의 각도가 90도 일때와 1도일 때 이론과 실험 결과를 비교해 놓은 것이다. 두 이론 곡선은 공진 신호의 선폭 γ 를 펄프광의 power에 의한 선폭 확장을 감안하여 Rb원자의 자연 선폭인 5 MHz 보다 큰 10 MHz를 넣어 계산하였으며 신호의 크기는 표 1에서 주어진 값들을 이용하였다. 주파수축에서 Peak들의 위치는 이미 알려진 값을 이용하였고 교차 공진선의 위치는 상호작용하는 두개의 전이선의 중간값을 취하였다. 그림 (a)는 예상한 바와 같이 Lorentzian curve를 보여주고 있는데 이는 식 (7)로부터 조사광의 두 원편광 성분에 대한 감수율의 허수항의 합 즉, 흡수계수에 의하여 결정된 것이다. 스펙트럼에서 CT선인 L_3 의 신호는 이론과 달리 (+) 신호로 나타났다. L_3 신호는 I형 공진 구조이기

표 1. 펄프광과 조사광의 편광 조합에 따른 루비듐-87 원자 D_2 전이선의 상대 크기 (I_{ij})와 Doppler factor; 단, Doppler factor는 온도가 20도 일때를 기준으로 함 *Cycling Transition

	L_1	C_1	L_2	C_2	C_3	L_3^*	detection method
I_3^+	-2444	-11430	-24250	-6300	-21980	43904	S.S
I_3^+	31	-930	-13625	-21000	-67480	-34496	S.S
$I_4^+ + I_3^+$	-2413	-12360	-37875	-27300	-89460	9480	P.S: $\theta = \pi/2$ (S.S)
$I_4^+ + I_3^+$	-2475	-10500	-10625	14700	45500	78400	P.S: $\theta \ll 1$
Doppler factor	1	0.9351	1	0.6131	0.8237	1	

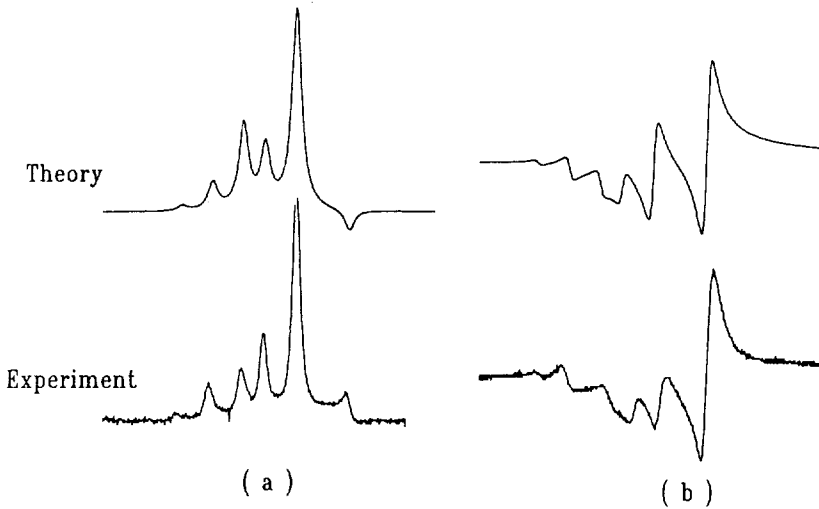


그림 6. (a) $\theta=1.57$ rad와 (b) $\theta=17$ mrad일 때 편광 분광 신호의 이론과 실험의 비교.

때문에 다른 주공진선과 같이 (+) 신호가 예상되지만 흡수-자발 방출의 한주기만을 고려한 광펌핑에서 N형 공진 신호가 많기 때문에 이론적으로 (-) 신호가 나온다. 그러나 펌프광의 세기가 클 때는 흡수-자발 방출의 여러 주기를 고려해야 하는데, 이때는 N형 공진 신호가 줄어들고 상대적으로 I형 공진 신호가 많아지기 때문에 (-) 신호가 아니라 (+) 신호를 보이게 된다. 따라서 이 불일치는 펌프광의 power가 충분히 약하지 못했음을 나타낸다. 또한 μ -metal을 사용하여 가능한 지자장 효과를 줄이려 했지만 잔여 지자장의 효과도 있을 것으로 예상된다.

그림 6(b)의 분산 모양 곡선에서는 C₂, C₃, L₃ 신호가 반전 되어 있다. 여기서 반전이라 하는 것은 공진 주파수 근처에서 주파수가 커 감에 따라 굴절률이 커지는 현상으로 복굴절의 주파수 의존도가 비정상이라는 것을 말한다. 반전된 스펙트럼은 Na^[16]에서 이미 관측된 바 있으며 반전된 신호는 광펌핑의 효과에 의해 자연스럽게 나타나는 것으로 펌프광이 원자들의 하준위 밀도를 자신과 같은 편광 상태를 가진 조사광의 성분쪽으로 광펌핑시키기 때문이다. 그러나 Na의 원편광 편광 분광에서와는 달리 반전된 신호의 크기가 매우 컸기 때문에 이론값과 비교해보기 전까지는 이것들이 반전된 신호라는 것을 확인하기가 어렵다.

검광기의 각도를 일정하게 하고 펌프광의 강도를 바꾸어주면서 관측한 조사광의 신호는 그림 7과 같다. 이때 검광기의 각도는 17 mrad이고 조사광의 강도는 20 μW 였다. 펌프광의 강도가 강할 때는 흡수-자발 방출의 한

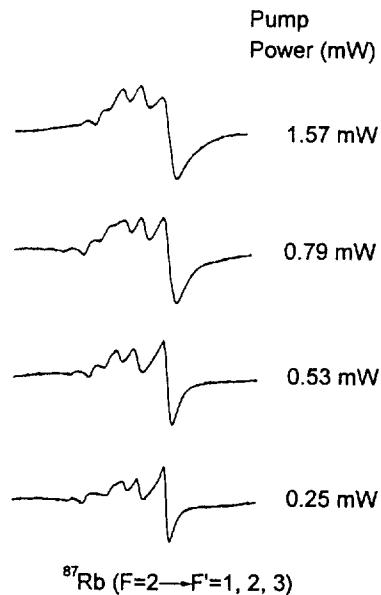


그림 7. 펌프광의 power에 따른 편광 분광 신호 조사광의 출력: 20 μW , 검광기의 각도 17 mrad

주기만이 일어나는 것이 아니기 때문에 각 전이선들의 상대적인 크기도 Nakayama 이론과 일치하지 않고 power broadening에 의해 공진 신호의 선폭도 더욱 크게 확장됨을 알 수 있다.

검광기의 각도가 1도 일때 나타나는 분산 모양 곡선에서 CT 선에서 상대적인 크기가 전이선에 비해 훨씬 크고 펌프광의 강도를 줄이면 공진 주파수에서 zero-cro-

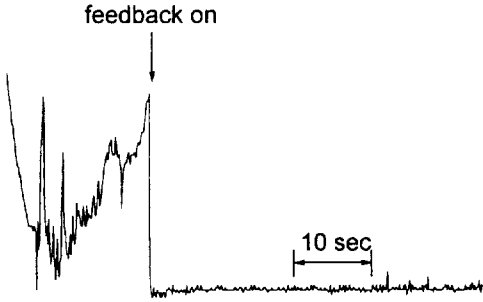


그림 8. 편광 분광 신호를 이용한 주파수 안정화.

ssing인 대칭적인 모양을 얻을 수 있기 때문에 이를 레이저 주파수 잠금에 이용하였다. 전류나 온도의 미소한 변화에 의해 생길수 있는 주파수 이동을 편광 분광 신호로 측정하여 공진기 길이 보상을 위한 PZT에 되먹임 시킴으로써 그림8과 같이 1 MHz 이내의 주파수 안정도를 얻을 수 있었다. 이 방법은 포화 분광법에서 이용하는 주파수 변조 기술을 사용하지 않았기 때문에 변조에 따른 실제 레이저 선폭 확대 요인이 없어진다. 따라서, 앞으로 장시간 안정화가 이루어지고 최적화가 되면 광 펄핑 원자 시계나 레이저 쿨링 등에 사용될 안정화된 레이저 개발에 많이 응용될 것으로 기대된다.

V. 결 론

선폭이 축소된 다이오드 레이저를 이용하여 Rb 원자의 원편광 분광 신호를 관찰하였다. 펄프광의 강도와 검광기의 각도에 따른 편광 분광 신호의 변화는 Nakayama 이론과 잘 일치하였다. 또한 검광기의 각도가 1도이고 펄프광의 강도가 약할 때 나타나는 대칭적 분산 모양의 신호에 레이저 주파수를 잠금 시킴으로써 주파수 변조없이 주파수 안정화가 가능한것을 보임으로써 원자

시계나 레이저 쿨링과 같은 고도의 안정화를 요구하는 분야에 응용이 가능함을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] N. Papageorgiou, A. Weis, V. A. Sautenkou, D. Bloch, M. Ducloy, *Appl. Phys.* **B59**, 123 (1994).
- [2] D. A. B. Miller, D. S. Chemla and P. W. Smith, *Opt. Lett.* **8**, 477 (1983).
- [3] R. J. Mclean, P. Hannaford and P. L. Larkins, *Opt. Comm.* **102**, 43 (1993).
- [4] R. E. Ryan, L. A. Westling and H. J. Metcalf, *J. Opt. Soc. Am.* **10**, 1643 (1993).
- [5] O. Schmidt, K. M. Knaak, R. Wynands and D. Meschede, *Appl. Phys.* **B59**, 167 (1994).
- [6] M. Murtz, M. Schaefer, T. George, J. S. Wells and W. Urban, *Appl. Phys.* **B60**, 31 (1995).
- [7] S. Nakayama, *Opt Comm.* **50**, 19(1984).
- [8] C. Wieman and T. W. Hansch, *Phys. Rev. Lett.* **36**, 1170 (1976).
- [9] S. Nakayama, *J. Phys. Soc. Jpn.* **50**, 609 (1981).
- [10] S. Nakayama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**, 1 (1985).
- [11] 김중복, 한국과학기술원 박사 학위 청구 논문 (1988).
- [12] H. S. Moon, J. B. Kim, J. D. Park, P. K. Kwon, H. Cho and H. S. Lee, Submitted to *Appl. Opt.* (1995).
- [13] 이호성, 박상언, 조 혁, 박종대, *한국광학회지*, **4**, 188 (1993).
- [14] 김중복, 이종민, 공홍진, *응용물리*, **1**, 197 (1988).
- [15] 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김영범, *새물리*, **35**, 191 (1995).
- [16] S.Nakayama, *J. Phys. Soc. Jpn.* **50**, 606 (1981).

Circular Polarization Spectroscopy in ^{87}Rb D_2 line and Laser Frequency Stabilization

Hyun Ah Kim, Seung Il Kim, Han Seb Moon, Jung Bog Kim

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Cheongwon 363-791, Korea

Ho Seong Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received: July 7, 1995)

Doppler-free circular polarization spectroscopy in ^{87}Rb D_2 line has been carried out by using a diode laser whose linewidth was narrowed by an external cavity, and experimental results were compared with an optical pumping polarization spectroscopy theory. A dispersive spectrum obtained in a weak pump beam was completely fitted to a single cycle optical pumping theory. The laser frequency was locked to a Rb atomic hyperfine transition line without any frequency modulation by using the dispersive curve as an error signal.