

초안정 기준공진기를 이용한 다이오드 레이저의 주파수 안정화

최용석 · 안경원¹

한국과학기술원 물리학과 및 거시양자광레이저연구단
(305-701) 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2000년 5월 9일 받음, 2000년 9월 25일 수정본 받음)

본 연구에서는 초저팽창물질(Ultra-low expansion material, ULE)로 제작된 초안정 기준공진기와 다이오드의 전류 변조 특성을 이용하여 상용 다이오드 레이저의 주파수를 안정화시켰다. 레이저의 주파수 선포는 공주(free run) 상태에서 적분시간 1 s 동안 1 MHz 정도이며, 대략 20분 동안 측정된 주파수 표류 속도는 300 kHz/s 정도였다. ULE로 제작된 초안정 기준공진기 투과 신호의 측면(기울기 500 kHz/V)에 주파수를 안정화시켰을 때 선포의 rms 값은 10 s 이상의 적분시간에서 50 kHz 정도였다. 일란 분산(Allan variance)의 제공된 값은 10 ms 이상의 샘플링 시간에 대해 2 kHz 이내가 되었다.

OCIS code : 140.5960.

I. 서 론

레이저를 이용한 고분해능 분광학 연구에서 주파수 분해능은 사용된 레이저의 주파수 안정도 및 선포에 의해 결정된다. 레이저 선포 축소의 이론적인 한계는 Schawlow-Townes 공식^[1]으로 주어진다. 레이저 다이오드의 경우 낮은 Q 값으로 인해 발진 선포는 보통 수백 kHz 이상 넓은 것으로 알려져 있다.^[2] 고 반사율의 거울과 격자 등을 이용하여 외부 공진기 다이오드 레이저 시스템을 구성하면 레이저 발진이 일어나는 모드의 Q 값을 높일 수 있으며, 이론적인 Schawlow-Townes 선포도 1 Hz 이하로 낮아질 수 있게 된다. 그럼에도 불구하고 다른 레이저 시스템과 마찬가지로 실제의 다이오드 레이저는 온도 변화, 역학적 진동, 전기적 잡음 등으로 인해 출력 선포가 확대되고, 발진되는 중심 주파수도 천천히 표류하게 된다. 레이저의 주파수 안정화란 이러한 요인들을 제거 또는 보상하여 결과적으로 발진 주파수의 표류를 막고 발진 선포도 축소시키는 것을 말한다.

주파수 안정화된 레이저가 필요한 예로 Cavity QED 효과를 이용한 단원자 레이저를 들 수 있다. 이러한 실험에 사용된 공진기의 선포 및 원자의 선포는 100 kHz 정도로 좁은데 이들이 서로 공진하도록 주파수를 맞추려면 이들 선포보다 더 좁은 선포를 갖는 잠금 레이저가 필요하다.^[3] 또 단원자 레이저의 출력광의 선포를 헤테로다인 분광법을 이용하여 측정하려는 연구도 최근 진행중인데 이를 위해서는 10 kHz 정도의 좁은 선포를 갖는 조사광이 필요하다.

레이저 주파수 안정화에 필요한 일반적인 구성 요소들은 기준 장치, 트랜스듀서(transducer), 서보 회로(servo circuit)이다. 기준장치는 주파수 잡음에 의한 오차 신호를 측정하는데 쓰이고, 트랜스듀서는 주파수 잡음을 제거하여 레이저의 출력주파수를 안정화시키는 역할을 한다. 그리고 서보 회로는 오차 신

호로부터 트랜스듀서를 구동시키는데 필요한 제어 신호를 만들어내는 부분이다.^[4] 안정화된 레이저의 최종 선포 $\delta\nu$ 는 기준 장치에서 얻어지는 기준 신호의 선포(I)를 신호 대 잡음 비(S/N)으로 나눈 값으로 주어진다.^[5] 이 관계식은 쇼트잡음(shot noise)에 의해 한계가 주어지는 경우에도 성립하는 식으로 주파수 안정화의 근본적인 한계를 표시한다. 이 식으로부터 기준 선포가 좁을수록, 그리고 기준 신호의 신호대 잡음비가 높을수록 더 좁은 선포의 주파수 안정화가 가능함을 알 수 있다.

다이오드 레이저의 주파수 안정화에는 원자의 전이선을 이용한 방법,^[6] 광검류 효과(optogalvanic effect)를 이용한 방법,^[7] 안정한 기준공진기를 이용한 방법,^[8-9] 회절격자나 공초점 Fabry-Perot 공진기 등을 이용한 광피떡임 방법^[10-11] 등이 사용되고 있다. 원자의 전이선을 이용한 예로 포화흡수분광이나 편광분광 신호에 레이저 주파수를 잠금시키는 방법은 냉각 및 포획 실험에서 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 절대적인 주파수 기준(absolute frequency standard)에 레이저의 주파수를 잠금시킬 수 있다는 장점에도 불구하고 선포를 줄이는데에는 한계가 있다. 레이저 세기가 원자의 포화 강도보다 클 때 일어나는 신호 세기의 포화와 선포 확대, 원자들의 충돌에 의한 선포 확대, 그리고 잔여 도플러 선포 확대 등은 선포 축소를 위해 필요한 좁은 기준 선포와, 높은 신호 대 잡음 비를 어렵게 한다. 레이저에 의해 이온화 된 원자들이 전극에 부딪힐 때 발생하는 전류(optogalvanic current)^[7]도 일반적인 분광 신호와 마찬가지로 주파수 잠금에 이용될 수 있다. 특히 CO₂ 레이저와 같이 레이저 공진기 내부의 이득 매질이 방전관 구조로 된 경우 유용하다. 그러나 기준신호의 크기가 수 mV~수십 mV에 불과하고 선포도 도플러 효과에 의해 확대되므로 앞의 경우와 마찬가지로 선포 축소에는 효과적이지 못하다. 광피떡임 방법^[10-11]도 널리 사용되고 있으나 이는 진동이나 소음 등에 민감하다는 단점을 가지고 있다.

Fabry-Perot 공진기를 이용하면 매우 좁은 주파수 선포를 이룰 수 있다. 원자의 전이선이 쉽게 포화되어 신호 대 잡음 비

¹E-mail: kwan@sorak.kaist.ac.kr

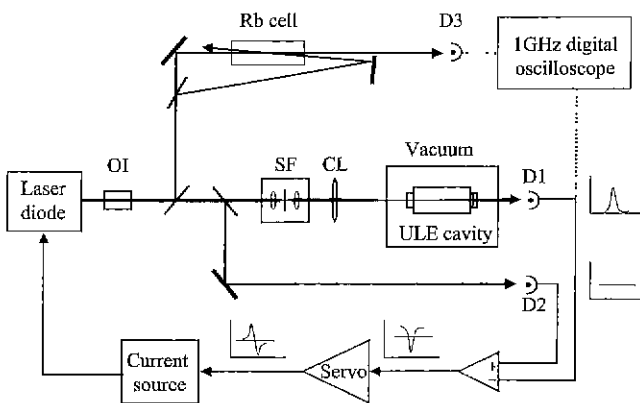
가 그리 크지 않은 반면, 공진기의 투과 신호는 비선형 현상이 일어나지 않는 한도내에서 크게 만들 수 있기 때문에 높은 신호 대 잡음 비를 가질 수 있다. 또한 역학적 진동이나 열적 변형 등의 효과도 충분히 작게 할 수 있다. 특히 본 연구에서는 Corning사에서 공급하는 초저팽창물질(Ultra-low expansion material, ULE)로 기준공진기를 자체 제작하였다. 이 물질은 상온에서 열팽창률이(0.00±0.03) ppm/°C 이하이기 때문에 기준 공진기를 사용하는 방법에서 가장 문제가 되었던 점, 즉 온도 변화에 따라 공진기 길이가 서서히 변하면서 레이저 주파수도 같이 변하는 문제를 해결할 수 있다.

본 연구에서는 레이저 다이오드의 전류 변조 특성을 이용하여 ULE 기준공진기의 투과 신호로부터 얻어진 오차 신호를 전기적으로 다이오드에 되먹임시키는 방법^[12-13]으로 레이저의 주파수를 안정화하였다. 전류 되먹임을 위한 서보 회로는 실험실의 주파수 잡음 성분들을 분석하여 직접 제작하였다. 주파수 잡음 위치는 기울기가 가장 큰 공진기 투과 신호의 측면을 선택하였다. 안정화된 레이저의 선폭은 기준공진기 투과 신호의 측면 기울기와 주파수가 변동에 의한 기준 공진기 투과 신호의 변화를 측정하여 계산하였다.

II. 실험 장치

실험 장치는 그림 1과 같이 ULE 기준공진기를 이용한 주파수 안정화 장치와 포화흡수분광 장치로 구성되어 있다. 포화흡수분광 장치는 루비듐 원자의 초미세 전이선을 기준으로 기준공진기의 선폭과 자유스펙트럼 영역(FSR), 그리고 공진 모드의 표류 속도 등을 조사하기 위한 것이다. 또한 레이저 주파수의 표류 속도나 선폭을 결정하는 데에도 포화분광 신호가 주파수 기준으로 사용되었다. 측정 방법에 대한 자세한 설명은 'III. 실험 결과' 부분에서 논하도록 하겠다. 실험 데이터의 측정과 기록을 위해 대역폭이 DC~1 GHz인 Lecroy사의 9370C 디지털 오실로스코프를 사용하였다.

주파수 안정화에 사용된 레이저는 New focus 사의 파장이 780 nm인 Vortex 레이저이다. 레이저의 구조는 다이오드와



OI : optical isolator. SF : spatial filter, CL : coupling lens. D1..3 : Si detectors
 그림 1. ULE 기준공진기를 이용한 다이오드 레이저의 주파수 안정화 장치도.

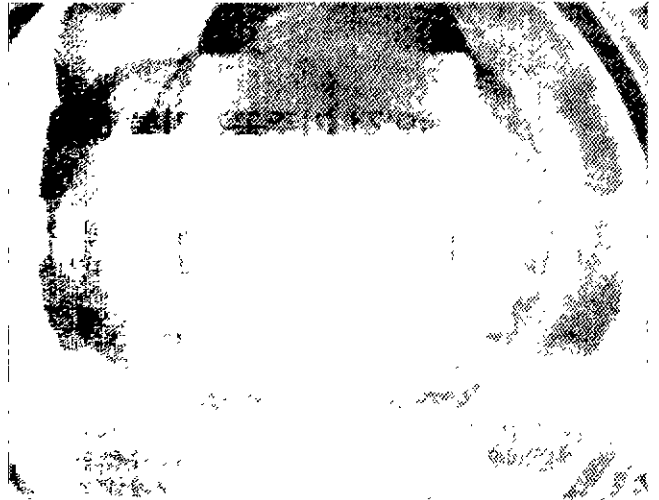
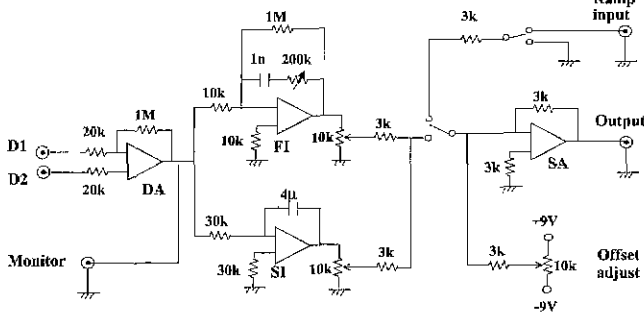


그림 2. 진공 상자 내부에 설치된 ULE 기준공진기의 사진.

Littman-Metcalf 방식의 외부 공진기로 구성되어 있다. 출력 주파수 변조 방법으로는 외부 공진기를 이루는 반사경과 회절 격자에 부착된 PZT에 걸리는 전압을 변조시키는 방법과 레이저 다이오드에 공급되는 전류를 변조하는 방법 두 가지가 있다. 전류 변조 방식은 전류 변화에 따른 미세한 온도변화로 인해 다이오드의 굴절률이 변하는 현상을 이용한 것으로 변조율은 대략 50 MHz/mA(또는 10 MHz/V)이다. 전류 변조의 대역폭은 DC~1 MHz이고 입력 임피던스는 5 kΩ이다. 광되먹임에 의한 레이저의 모드홉(mode hopping)을 방지하기 위해 Isowave사의 광차단기(optical isolator)를 사용하였다. 광차단기는 700 nm~900 nm의 파장 영역에서 되먹임되는 광의 세기를 최소 38 dB까지 줄일 수 있다. 초점거리가 30 cm인 볼록렌즈를 이용하여 레이저 빔을 기준공진기에 결합시켰다. 렌즈 앞에 공간필터(spatial filter)를 놓아 공진기 내에서 횡모드들이 형성되는 것을 방지하였다. 공간필터는 25 μm 핀홀과 배율이 20배이고 초점거리가 4 mm인 두 개의 대물렌즈를 이용하여 자체 제작하였다.

그림 2는 진공 상자 내부에 장착된 ULE 기준공진기의 사진이다. 기준공진기는 자체 제작되었으며, 스페이서(spacer)로 사용된 물질은 ULE이다. ULE의 열팽창률은 5°C~35°C에서 (0.00±0.03) ppm/°C 이하이며 현재 알려진 물질중에서 열팽창률이 가장 낮은 물질이다. 스페이서의 구조는 원통형으로 직경은 5 cm이고 길이는 20 cm이다. ULE는 불투명하므로 레이저 빔이 통과하게 될 중심축에 직경 1 cm의 구멍을 내었다. 측면에는 진공 펌핑을 위해 직경 1 cm의 구멍을 뚫었다. 공진기를 이루는 거울 중 하나는 평면 거울이고(곡률반경 무한대) 다른 하나는 곡률 반경이 50 cm인 오목 거울이다. 이들은 스페이서의 양면에 에폭시 토어실(epoxy torr seal)로 접착시켰다. 제작된 공진기의 자유스펙트럼 영역은 750 MHz이고 휘네스는 780 nm의 빛에 대해 156이다. 따라서 공진선폭(FWHM)은 4.8 MHz이다. 평면 거울의 안쪽면에서 모드폭(mode waist)은 248 mm이며 공진기 안에 형성될 수 있는 횡모드 간격은 195 MHz 이다. 온도와 공기 압력 변화에 의한 공진



D1, D2 : Si detectors, DA : differential amp, SA : summing amp, FI : fast integrator, SI : slow integrator
 그림 3. 전류 락킹을 위한 서보 회로도.

모드 이동을 방지하기 위해 기준공진기를 진공 상자 내부에 설치하였다. 진공도는 대략 1×10^{-6} torr로 유지시켰다. 진공 상자의 진동에 의한 공진기의 흔들림을 방지하기 위해 스프링 상수가 다른 여러 물질들-방진고무와 아세탈 판 및 두랄루민 V-블록 등을 이용하여 공진기의 받침을 만들었다. 받침을 통한 온도 전달을 막기 위해 공진기를 바이톤 O-링(viton O-ring)으로 감싼 뒤 V-블록 위에 안치시켰다. 광검출기(D1, D2, D3)로는 EG&G 사의 FFD-100 실리콘 핀 다이오드를 사용하였다. 광검출기의 효율은 상온에서 90 V의 바이어스 전압을 걸어주었을 때 780 nm의 빛에 대해 0.55 A/W이다.

전류 락킹을 위한 서보 회로는 그림 3에서 알 수 있듯이 크게 세 부분으로 나뉘어진다. 첫번째는 기준신호와 공진기 투과 신호를 받아들여 그 차를 내보내는 입력단의 차동증폭기이다. 광검출기 D1로는 공진기의 투과광을 측정하고, D2로는 공진기를 거치지 않은 레이저빔을 측정하게 된다. D1로 측정되는 공진기의 투과 신호의 크기는 레이저 주파수 변화에 민감하게 변하지만 'D2로 측정되는 신호'(이하 기준신호)의 크기는 거의 변화가 없다. 레이저 주파수 잠금 위치는 이들 두 신호의 차가 0이 되는 지점이며, 특히 기준신호의 크기가 공진기 TEM₀₀ 모드 투과 신호 크기의 1/2이 되도록 ND 필터(neutral density filter)를 이용하여 D2로 입사되는 빛의 양을 조절하였다. 즉, 레이저의 주파수 잠금 위치는 TEM₀₀ 공명 주파수로부터 공명모드 반치폭(FWHM)의 1/2만큼 떨어진 지점이 된다. 두번째 부분은 두 개의 적분기로 이루어진 루프 필터이다. 문턱주파수가 1.3 Hz인 적분기(slow integrator)는 레이저의 주파수 표류를 막기 위한 것이고, 문턱주파수가 16 kHz인 적분기(fast integrator)는 주파수 잠금 위치를 중심으로 빠르게 요동하는 주파수 변화를 방지하기 위한 것이다. 마지막 부분은 루프 필터에서 나온 제어 신호에 일정한 오프셋을 첨가할 수 있도록 한 가산증폭기(summing amplifier)이다. 레이저 주파수 잠금 전에 기준공진기의 TEM₀₀ 공명 주파수 주변에서 레이저 주파수를 주사(scan) 하며 주파수 잠금 위치를 설정하게 되는데, 이를 위한 외부의 전류 변조 신호가 가산증폭기를 통해 레이저에 공급된다. 그러나, 주파수 잠금시 이러한 외부 신호는 차단되고, 오직 루프 필터를 통과한 신호만 다이오드에 락킹된다. 서보 회로에서 증폭기로 사용된 소자는 OP-27이다. 다이오드 레이저의 경우 공급되는 전류량에 따라

출력광의 세기와 주파수가 변하게 된다. 특히 락킹되는 전류에 의한 출력광의 세기 변화는 D1과 D2로 측정되는 각 신호의 크기 변화를 일으키므로 주파수 잠금 위치를 일정하게 유지하는데 문제가 될 수 있다. 또한 락킹 전류에 의한 주파수 변조폭은 레이저의 주파수의 변동폭(또는 선평)을 결정하므로 락킹 전류의 크기를 미세하게 조절해야 한다. 이에 대한 자세한 논의는 실험 결과 부분에서 언급하기로 한다.

III. 실험 결과

3.1. 기준공진기의 특성

그림 4는 기준공진기의 투과 신호와 루비듐-87 원자의 초미세 전이선을 동시에 측정한 결과이다. 넓은 영역의 주파수 변조를 위해 전류 변조를 하지 않고 PZT에 인가되는 전압을 변조하여 레이저의 출력 주파수를 변조시켰다. 이 때 사용된 외부 신호(external ramp signal)의 크기는 50 mVpp이고 주파수는 200 Hz였다. 공진기 투과 신호와 원자 분광 신호를 측정하는데 사용된 광검출기의 임피던스는 1 kΩ로 하였으며, 대역폭이 DC~1 GHz인 디지털 오실로스코프로 측정 신호를 기록하였다. 루비듐-87 원자의 분광신호에서 P_i (단, i = 1, 2, 3)는 주공진선을 의미하고 C_j (단, i, j = 1, 2, 3)는 교차공진선을 의미한다. 예로 P1은 바닥상태인 F=2와 들뜬 상태인 F=1 사이의 공진선을 의미하고 C₂₃은 레이저의 주파수가 P₂와 P₃ 공진주파수의 중간값이 될 때 생기는 교차공진선을 의미한다. P₁과 C₁₂, P₂ 공진선들은 신호 대 잡음 비가 낮아 선형 흡수선과 거의 구별할 수 없다. 조사광과 여기광의 세기는 대략 100 μW 정도이고 빔의 크기는 직경이 1 mm 정도였다. 전이선들 사이의 간격을 기준으로 측정된 원자의 전이선폭을 계산해 보았을 때 그 크기는 대략 30 MHz로 자연선폭(natural linewidth)인 6 MHz보다 5배 가량 넓었다. 레이저의 세기를 낮추면 자연 선폭에 가까운 전이선을 측정할 수 있으나 그 경우 분광 신호는 작아지고, 신호 대 잡음 비도 낮아졌다. 그러나 공진기 투과 신호의 경우 본 실험에서 사용된 레이저 빔의 세기에 해당되는 영역(10 mW 이내)에서는 측정된 선폭의 변

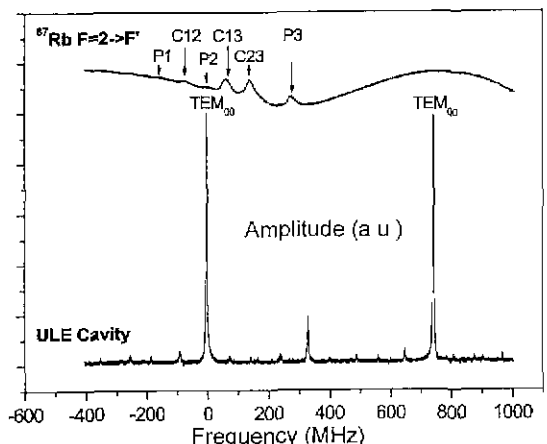


그림 4. ULE 기준공진기의 투과 신호와 루비듐-87 원자의 초미세 전이선.

화가 거의 없었고 그 값은 (5 ± 1) MHz였다. 공진기 투과 신호 위치는 원자 분광 신호의 위치를 기준으로 1시간 사이에 대략 1 MHz 정도 변화했다. 이로부터 공진 모드의 표류 속도를 계산하면 대략 300 Hz/s가 되는데 이는 측정 오차 (~ 1 MHz) 이내이므로 실제의 표류 속도는 이것보다 더 작을 수 있다. 공진 모드 표류의 원인은 공진기가 설치된 진공 상자 내부의 진공도 변화와 공진기 제작시 사용된 접착제의 열팽창 때문으로 생각된다. 현재 여러 대의 진공 상자가 하나의 진공 펌프에 연결되어 사용되고 있는데, 기준공진기가 설치된 진공 상자의 진공도를 정확히 측정하고 조절하기 위해 별도의 진공 시스템을 구성하고 있다.

기준공진기의 공진선폭을 정확히 측정하기 위해 전류 변조 (~ 1.5 mA, 10 Hz)로 좁은 영역(~ 150 MHz)의 주파수 영역을 주사(scan) 하며 공진기의 투과 신호와 원자의 초미세 전이선을 동시에 측정하였다. 특히 기준공진기의 진공 상자에서 분산 펌프(diffusion pump)로 이어지는 관에 부착된 밸브를 닫은 채로 2~3시간 정도 유지시키면 진공 상자 내부의 진공도가 서서히 올라가게 되는데, 이 때 내부의 굴절률이 커지므로 공진 모드의 튜닝이 가능하게 된다. 이러한 방법으로 기준공진기가 설치된 진공 상자 내부의 진공도를 조절하여 TEM₀₀ 모드를 C₁₃와 C₂₃ 사이 또는 C₂₃와 P₃ 사이로 튜닝(tuning) 한 뒤 전류 변조를 하였고, 원자 전이선의 간격과 전류 변조폭을 비교해 본 결과 전류 변조율이 (50 ± 1) MHz/mA임을 알 수 있었다. 이 때 진공도의 변화는 대략 1×10^{-5} torr \sim 1×10^{-6} torr였다. 전류 변조 영역에서 주파수 변조가 선형적이라고 가정하고 기준 공진기의 TEM₀₀ 모드 선폭을 계산한 결과 그 값은 (4.8 ± 0.1) MHz로 이론적인 값과 거의 같았다. 주파수 잠금 위치에서의 측기율은 500 kHz/V였다.

3.2. 전류 되먹임에 의한 주파수 잠금 및 선폭 축소

그림 5(a)는 공주 상태와 측면 주파수 잠금 상태에서 디지털 오실로스코프로 10초동안 레이저의 주파수 변동을 나타낸 그래프이다. 실제 실험에서 측정되는 양은 기준공진기의 투과 신호 변화(전압)이므로 이 값에 측기율(500 kHz/V)를 곱하여 주파수 변동폭을 계산해내었다. 실험데이터들은 1회 측정(single shot measurement) 한 결과들이며, 각 데이터의 기록 시간 간격은 0.2 ms이다. 0.5 Hz~2 Hz 주기로 위 아래로 심하게 흔들리는 그래프가 공주 상태의 측정값인데 주파수 변동폭은 rms 값으로 1.5 MHz이다. 레이저에 공급되는 오프셋 전류를 조정하여 출력 주파수를 기준공진기의 공진 모드 근방에 위치시킨 뒤, 공주 상태에서 주파수 표류에 의해 TEM₀₀ 모드를 주사하는 시간(~ 30 s)을 측정한 결과 표류 속도가 대략 300 kHz/s임을 알 수 있었다. 같은 방법으로 공주 상태에서 레이저의 주파수가 루비덤-87 원자의 초미세 전이선 $F=2$ ($F'=1$ 에서 $F=2$ ($F'=3$ 까지 420 MHz 영역을 표류하는데 걸리는 시간(~ 20 min)을 측정하였을 때, 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 중앙에 직선으로 표시된 그래프는 TEM₀₀ 모드 투과신호의 중간 높이에 측면 잠금 된 상태의 측정 결과인데 10 초 동안 주파수 변동의 rms 값은 46 kHz가 되었다. 이러한 선폭은 주파수 잠금된 상태로 수 시간 동안 일정하게 유지되

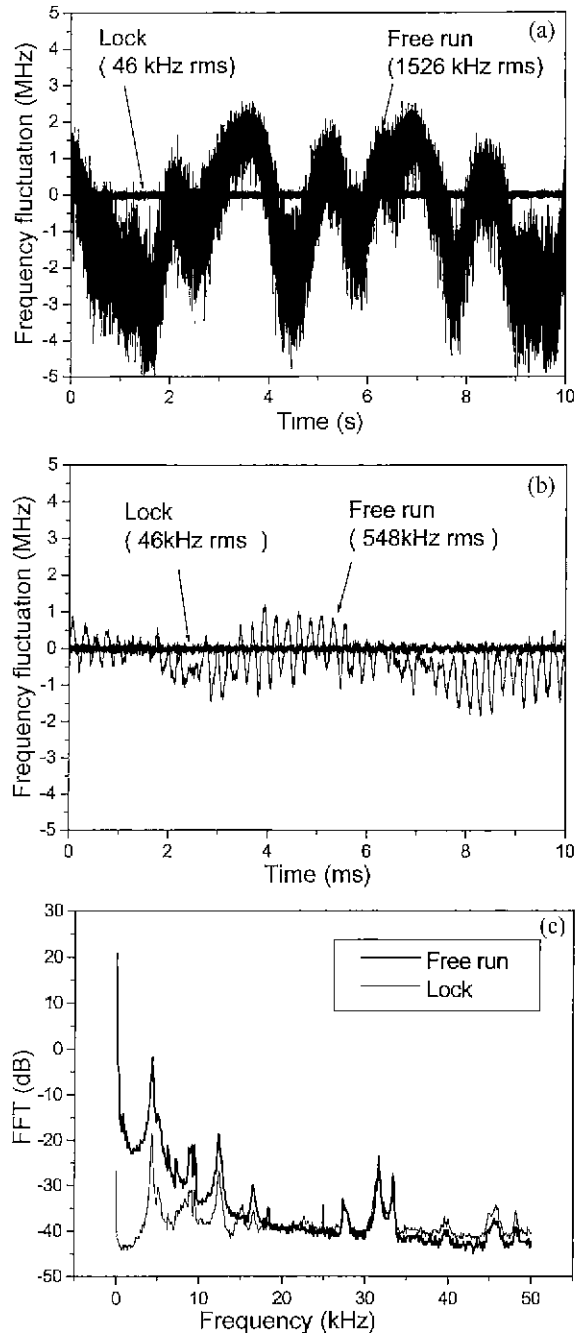


그림 5. 공주 상태와 측면주파수 잠금 상태에서 시간에 따른 주파수 변동 (a) $t=10$ s. (b) $t=10$ ms. (c) 그래프 (b)의 FFT 스펙트럼.

었다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 공진기 자체의 표류에 의한 주파수 이동이 있을 수 있다.

그림 5(b)는 10 ms 동안 레이저의 주파수 변동을 측정한 그래프이다. 데이터의 기록 시간 간격은 0.2 μ s이고 1회 측정한 결과이다. 공주 상태의 그래프를 보면 레이저 주파수 변동의 주도적인 원인은 주기가 4 ms (또는 250 Hz) 또는 0.25 ms (또는 4 kHz) 등에 해당하는 잡음임을 알 수 있다. 주파수 잠금된 상태의 주파수 변동폭은 46 kHz로 변함이 없었다.

그림 5(c)는 그림 5(b)에 대한 FFT 스펙트럼으로 100회 평균된 그래프이다. 굵은 실선으로 그린 공주 상태의 FFT 스펙트럼을 살펴보면 그림 5의 (a)와 (b)에서 볼 수 있는 주파수 변동의 원인에 해당하는 잡음 성분을 확인할 수 있다. 가장 큰 잡음 성분은 1 kHz 이하의 저주파 잡음과 4 kHz 대 잡음이다. -30 dB 이상에서의 9 kHz, 12.4 kHz, 16.5 kHz, 31.7 kHz, 33.4 kHz 위치의 잡음들이 있으며 -40 dB 이상에서 18.4 kHz, 25 kHz, 27 kHz, 40 kHz, 45.5 kHz, 48 kHz의 잡음들을 확인할 수 있다. 다른 원인도 있겠지만 4 kHz 이상의 고주파 잡음들은 주로 250 Hz와 4 kHz 잡음의 고차조화모드(high harmonic mode)들로 생각된다. 가는 실선으로 보이는 그래프가 주파수 잠금 상태의 FFT 스펙트럼이다. 1 kHz 이하의 잡음은 -25 dB 이하로 가장 크게 감소하였으며 1 kHz~20 kHz 영역에서도 주파수 잡음이 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 20 kHz 이상의 영역에서는 공주 상태보다 잡음의 크기가 약간 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 고주파의 오차 신호가 되먹임 회로를 통과할 때 위상 지연(phase delay) 효과로 인해 양으로 되먹임(positive feedback) 되어 주파수 변동을 증가시키기 때문이다. 이와 같은 결과는 앞서 설명한 되먹임 회로의 설계 특성과도 잘 일치한다.

본 실험에 사용된 레이저의 경우 공주 상태에서 다이오드에 공급되는 전류는 80 mA이고 출력광의 세기는 10 mW이다. 실험적으로 주파수 잠금 직후 되먹임되는 전류의 변조폭은 ±10 μA 이내이므로 되먹임 전류에 의한 출력광의 세기 변화는 1/8000 정도로 작다. 되먹임 전류에 의한 주파수 변조폭은 주파수 변조율 50MHz/mA를 고려할 때 이론적으로(500 kHz 이내)가 된다. 주파수 잠금 직후 공진기 투과 신호의 크기 변화(전압)를 측정하고 여기에 측기율기(500 kHz/V)를 곱하여 주파수 변동폭(또는 레이저 선폭)으로 환산하였을 때 레이저 선폭은 대략 수백 kHz가 되었다. 그러나 이 상태에서 투과 필터의 이득과 감쇠를 조절하여 최적화시키면 측정된 공진기 투과신호의 변화는 100 mV 이내로 작아졌으며 그로부터 레이저 선폭이 50 kHz 대로 안정화되었음을 확인할 수 있었다. 이 때 되먹임 전류의 크기는 수 μA 이내로 예상된다 한편, 주파수 잠금 전에 주파수 잠금 위치를 미세 조정하기 위해 서보 회로에서 대략 100 μA 이내의 일정한 오프셋(offset) 전류를 레이저로 공급하게 되는데 이 전류는 주파수 잠금 후에도 계속 일정하게 공급된다. 특히 전류의 공급원으로 병렬로 연결된 상용건전지(9 V)를 사용하여 오프셋 전류의 변화를 방지하였다.

3.3. 알란 분산(Allan variance)

시간 영역에서 레이저 주파수의 장기 안정도를 나타내는 척도로 알란 분산(Allan variance)^[4]이 사용된다. 발견되는 레이저의 명목주파수(nominal frequency)가 ν_0 이고 실제 발견 주파수가 $\nu(t)$ 일 때 알란 분산은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{\nu}_{k+1} - \bar{\nu}_k)^2 \rangle \quad (1)$$

여기서 $y(t) = [\nu(t) - \nu_0] / \nu_0$ 이고, y_k 는 $t_k \leq t \leq t_k + \tau$ 에서 $y(t)$ 의

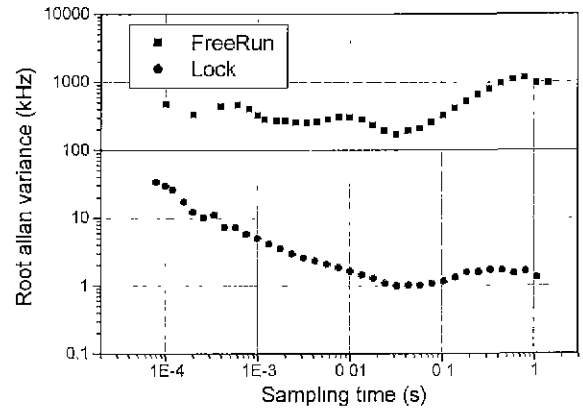


그림 6. 알란 분산의 제곱근. 가로축은 샘플링 시간 τ . 세로축은 $\nu_0 \sigma_y(\tau)$.

평균으로 다음과 같다.

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt \quad (2)$$

$\sigma_y(\tau)$ 는 샘플링 시간 τ 의 함수인데, 물리적으로 τ 와 $\sigma_y(\tau)$ 는 각각 레이저 선폭 확대의 요인이 되는 주파수 잡음의 주기와 이로 인해 확대된 레이저 선폭으로 해석될 수 있다. 그림 6은 공주 상태와 주파수 잠금 상태의 레이저의 출력 주파수 변동을 측정하고, 각각의 $\sigma_y(\tau)$ 를 계산하여 나타낸 그래프이다. 공주 상태에서 레이저의 주파수 안정도는 τ 가 32 ms 일 때 172 kHz로 최소이다. 샘플링 시간이 짧아질수록 고주파 잡음 성분들로 인해 선폭이 확대됨을 알 수 있다. 그 성분들은 샘플링 시간 0.1 ms(10 kHz), 0.6 ms(1.7 kHz), 2 ms(500 Hz), 7.6 ms(130 Hz)에 해당하는 잡음들이 있다. 샘플링 시간이 1 ms~10 ms인 영역에서는 곡선이 거의 평평하다가 0.6 ms에서 200 kHz 정도로 크다. 시간이 32 ms 보다 길어지면서 그래프는 단조 증가하는데 이것은 저주파 잡음 및 온도 변화 등에 의한 레이저 주파수 표류 효과에 기인한다.

아래쪽에 있는 곡선은 주파수 잠금 상태의 값을 나타낸다. 32 ms 이하의 영역에서 곡선은 τ 가 증가함에 따라 단조 감소하며, 그 이상의 영역에서는 $\sigma_y(\tau)$ 가 1 kHz~2 kHz 사이에서 증가와 감소를 한다. 샘플링 시간이 0.1 ms 근방일 때 알란 분산의 제곱근 값은 대략 30 kHz 정도인데, 이 값은 그림 5 (a), (b)에서 rms 값으로 얻어진 46 kHz의 주파수 변동폭과 비슷한 크기이다. 샘플링 시간이 0.34 ms(2.9 kHz) 일 때 작은 극대점이 보이는데 그 위치가 공주 상태에서 극대값이 생기는 위치와 거의 일치한다. 흥미로운 사실은 $\sigma_y(\tau)$ 의 극대값이 생기는 위치가 앞서 그림 5(c)의 FFT 스펙트럼에서 극대값이 생기는 위치(4 kHz)와 비슷하다는 점이다. 이는 3~4 kHz대의 주파수 잡음이 선폭 축소의 가장 큰 장애 요인으로 작용한다는 것을 의미한다. 한편 Vortex 레이저 헤드의 역학적 공명 진동 주파수는 대략 수 kHz인 것으로 예상되는데, 이를 확인하기 위해 간단히 신호발생기(function generator)에 스피커(wooper)를 연결하여 음파로 다이오드 레이저의 역학적 진동을 유발시키며 FFT 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 주파수 잠

금된 상태에서 신호발생기의 주파수를 수십~수 kHz로 바꾸어 가며 주파수 잠금된 상태를 모니터링하였을 때, 신호 발생기의 주파수가 kHz 일때 주파수 잠금이 가장 쉽게 풀리고 FFT 스펙트럼의 크기도 공주 상태 이상으로 커지는 것을 확인할 수 있었다. 즉 실험실 내에 있는 미세한 수 kHz 대의 역학적 진동 잠음이 레이저 헤드의 역학적 공명 진동과 결합하여 역학적 불안정성을 가져오고 결과적으로 출력 주파수 선폭 확대를 일으키는 것으로 생각된다. 이러한 선폭 확대의 요인은 AOM 등을 트랜스듀서로 활용하여 주파수 필터링을 하면 쉽게 제거될 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결론 및 전망

본 연구에서는 ULE로 제작된 초안정 기준공진기를 이용하여 주파수 변동폭이 적분시간 1s에서 1 MHz 정도인 상용 다이오드 레이저의 선폭을 46 kHz 수준으로 안정화시켰다. 알란 분산의 제곱근 값은 10 ms 이상의 적분시간에 대해 2 kHz 이하이다.

현재 레이저의 선폭을 1 kHz 이내로 안정화시키기 위한 연구가 진행중이다. 이를 위해서는 현재의 100 정도인 신호 대 잡음 비를 높이고, 16 kHz 이상으로 서보 회로의 대역폭을 넓혀야한다. 또한 기준공진기 자체의 안정도를 향상시켜 공진 모드의 표류(≤ 300 Hz/s)를 방지하는 것도 필요하다. 한편 고분해능 분광실험에서는 공진기 모드에 안정화된 레이저를 필요한 주파수로 이동시켜야 하는데 여기에는 AOM을 이용할 계획이다. 특히 AOM을 부가적인 트랜스듀서로 활용하여 레이저 자체의 역학적 공명 진동 효과에 의한 잡음 및 되먹임 회로의 문턱주파수 보다 높은 고주파수 잡음들도 제거하여 선폭 축소를 할 수 있을 것이다. 이와 같이 주파수 안정화된 레이저는 단원자를 이용한 Cavity-QED 실험에서 고분해능 분광학

과 단원자 레이저의 선폭을 측정하기 위한 광원으로 활용될 것이다.

감사의 글

실험에 조언을 아끼지 않은 박상범, 하상근에게 감사드린다. 본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 얻어진 결과임.

참고문헌

- [1] A. L. Schawlow and C. H. Townes, *Phys. Rev.* **112**, 1940. (1958).
- [2] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications* (Oxford, New York, 1997), pp. 399.
- [3] K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari, and M. S. Feld, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3375 (1994).
- [4] M. Zhu and J. L. Hall, *J. Opt. Soc. Am. B* **10**, 802 (1993).
- [5] Ch. Salomon *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **5**, 1576 (1988).
- [6] Y. Shevy and H. Deng, *Opt. Lett.* **23**, 472 (1998).
- [7] S. G. Menocal *et al.*, *IEEE Photonics Technology Letters*, **1**, 285 (1989).
- [8] V. Vassiliev *et al.*, *Opt. Lett.* **23**, 1229 (1998).
- [9] C. Shiin and M. Ohtsu, *Opt. Lett.* **15**, 1455 (1990).
- [10] B. Dahmani, L. Hollberg, and R. Drullinger, *Opt. Lett.* **11**, 876 (1987).
- [11] 박상연, 이호성, 박종대, 조혁, *새물리*, **34**, 401 (1994).
- [12] M. Ohtsu and S. Kotajima, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **QE-21**, 1905 (1985).
- [13] C. E. Wieman and L. Hollberg, *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 1 (1991).
- [14] F. L. Walls and D. W. Allan, *Proceedings of The IEEE* **74**, 162 (1986).

Frequency stabilization of diode lasers using a ultra-stable reference cavity

Yongseok Choi and Kyungwon An¹

Center for Macroscopic Quantum-Field Lasers and Department of Physics in Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejeon 305-701, KOREA

¹*E-mail: kvan@sorak.kaist.ac.kr*

(Received May 9, 2000, Revised manuscript received September 25, 2000)

We have stabilized the laser frequency of a commercial diode laser using a ULE (Ultra-low expansion material) reference cavity and the current modulation characteristics of the diode itself. The linewidth of the free running laser was about a 1 MHz (rms) for a sampling time of 1 s and the drift rate was 300 kHz/s. When the laser is locked to one side of the transmission signal from the ULE reference cavity, the linewidth was reduced to 46 kHz (rms) for a sampling time longer than 10 ms. The root Allan variance was less than 2 kHz for a sampling time longer than 10 ms.

OCIS code : 140.5960.