

## 초안정 기준공진기를 이용한 다이오드레이저의 주파수 안정화

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

최용석, 박상범, 하상근, 안경원

한국과학기술원 물리학과 거시양자광레이저연구단

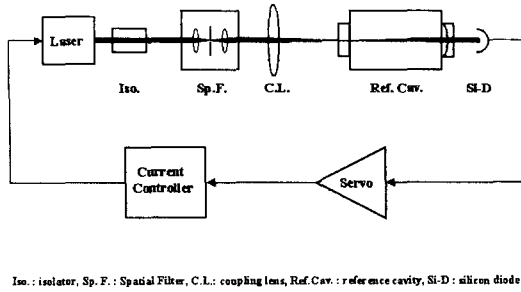
yschoi@cais.kaist.ac.kr

단원자를 이용한 Cavity-QED 실험등을 위해서는 고분해능 분광학이 필요하다. 레이저 주파수 안정화는 고분해능 분광학을 위한 필수적인 선결 과제이다. 본 연구에서는 다이오드 레이저를 대상으로 전류되먹임 방법에 의해 주파수 안정화를 하였다. 오차 신호를 얻기 위해 공진기를 사용하였는데 공진기는 원자 전이선을 이용한 경우보다 더 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 일단 공진기에 안정화된 레이저는 주파수 특성을 그대로 유지한 채 AOM이나 EOM 등을 이용하여 필요한 원자 전이선으로 주파수 이동시켜 고분해능 분광에 활용할 수 있다.

그림1은 주파수 안정화 실험 장치도이다. 광원으로는 New focus사의 780.24nm Vortex 다이오드 레이저를 사용하였다. Vortex 레이저의 출력 주파수 변조 방식에는 PZT를 이용한 주파수 변조와 전류 변조 두 가지가 있다. 전류 변조의 경우, 전류 변화에 따른 미세한 온도 변화에 의해 다이오드의 굴절률이 변하게 되고, 따라서 출력 주파수가 변하게 된다. 최대 변조폭은 대략 100MHz이고 외부 입력 전압에 의한 변조율은 10MHz/V이다. 일반적으로 전류를 변화시키면 레이저의 세기도 변하게 된다. 실험에 사용된 레이저의 경우 그 변화율은 문턱전류 이상에서 0.4W/A이다. 실험에서 되먹임되는 전류의 크기는 대략 10  $\mu$ A 이므로 그에 따른 출력의 변화는 4  $\mu$ W 정도이다. 이 값은 되먹임을 하지 않은 상태에서 나오는 레이저 출력의 1/2500에 지나지 않으므로 기준 신호나 주파수 안정화에 주는 영향을 무시할 수 있다.

광되먹임에 의한 레이저의 모드뒹 현상을 방지하기 위해 Isowave의 tunable isolator(38dB)를 사용하였으며, 레이저 빔을 공진기 모드에 결합시키기 위해 공간필터와 렌즈를 사용하였다. 공간필터는 25  $\mu$ m 핀홀과 배율이 20배이고 초점거리가 +4mm 인 두 개의 대물렌즈를 이용하여 자체 제작하였다. 기준공진기는 780~791nm에서 반사율이 98% 인 두개의 거울을, BK-7으로 가공된 스페이서의 양면에 에폭시 접착제로 고정시켜 제작하였다. 스페이서는 원통형으로 직경이 5cm, 길이가 10 cm이며 양 측면의 평행도는 1' 이내로 연마되어 있다. 기준공진기의 역학적인 안정도는 외부에서 오는 진동과 이에 대한 공명 결합에 의해 결정되므로 외부의 진동을 효과적으로 차단하는 것이 필요하다. 여기에는 능동적차단과 수동적차단 방법들이 있는데 본 실험에서는 스프링상수가 각기 다른 고무와 스티로폼 등을 이용한 수동적차단 방법을 택하였다.

광검출기로는 EG&G사의 FFD-100 실리콘 핀 다이오드를 사용하여 공진기의 종모드 투과파를 측정하였다. 1GHz Lecroy 디지털 오실로스코프에 1 k $\Omega$ 의 입력 임피던스를 주어 공진기의 자유스펙트럼영역과 선폭을 측정하였는데 그 값은 각각 1.484GHz와 10.55 MHz이다. 주파수 잠금 위치는 종모드 투과신호의 측면에서 기울기가 가장 큰 지점을 택하였으며 그 기울기는 1.57MHz/V이다. 그림2는 free run상태



Iso.: isolator, Sp.F.: Spatial Filter, C.L.: coupling lens, Ref.Cav.: reference cavity, Si-D: silicon diode

그림 1. 주파수 안정화 장치도

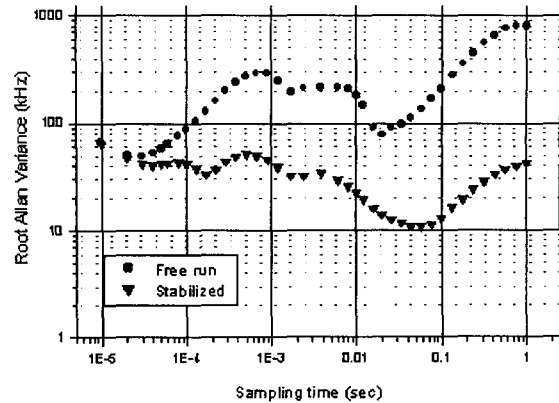


그림 2. Root Allan Variance

와 잠금된 상태에서 오차 신호를 측정 한 뒤, Root Allan variance 값을 계산하여 나타낸 그래프이다. 여기서 적분시간(이하  $\tau$ )에 따른 Root Allan variance 값은  $\tau$  동안 시간 평균된 레이저 주파수 선평으로 해석 된다. Free run 상태에서  $\tau$  가 20ms일 때 선평은 77kHz로 최소가 되며,  $\tau$  가 증가함에 따라 선평이 커지게 된다. 그 주요한 원인은 온도 변화에 의한 주파수 표류이다. 한편  $\tau$  가 0.1-10ms 인 영역에서 선평이 불규칙적으로 변화하며 큰 값을 갖게 되는데, 이는 레이저 공진기와 외부 역학적 진동의 공명 결합에 의해 나타난 효과로 생각된다. 특히 레이저가 설치된 광학테이블 위에 27000rpm(450Hz)으로 회전하는 터보펌프가 설치되어 있는데, 그 진동에 의해  $\tau \sim 2.2$ ms인 영역에서 선평이 확대됨을 알 수 있다. 또한  $\tau \sim 0.85$ ms인 곳에서도 선평이 확대되는데 이것은 터보펌프와 레이저 공진기 그리고 레이저 받침 등의 역학적 진동 모드들이 결합되어 레이저의 선평에 영향을 주기 때문이다.  $\tau$  가 0.1ms 이하로 작아짐에 따라 선평은 다시 감소한다. 한편 주파수 잠금을 하였을 때 선평은  $\tau$  가 50ms인 경우 10kHz로 최소가 된다. Free run 상태와 비슷한 양상으로  $\tau$  가 길어짐에 따라 선평도 커지는데 그 원인은 되먹임회로에서 생기는 Offset drift 때문이다. 50ms 이하의 영역에서도 free run 상태와 마찬가지로 터보펌프의 진동모드와 고차모드 근방에서 선평이 확대되고 있다. 전류되먹임 회로를 구성하는 적분기의 차단주파수는 대략 500Hz이므로 고주파 영역의 선평확대는 주파수 안정화를 위한 전류 되먹임 이득이 충분히 크지 않기 때문인 것으로 생각된다. 장시간에 걸쳐 주파수 표류 속도는 free run 상태에서 300kHz/sec이며 주파수 잠금을 하였을 때에는 5kHz/sec이하로 감소하였다. 주파수 표류가 완전히 제거 되지 못하는 이유는 공진기의 표류 때문으로 생각된다.

고분해능 분광 실험을 위해서는 장기주파수가 안정화되어야 하는데 현재의 공진기는 열팽창률이 8.3ppm/°C인 BK-7으로 제작되어 장기 주파수 표류를 막는데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 5-35°C에서 열팽창률이  $0 \pm 0.03$ ppm/°C로 알려진 ULE로 공진기를 제작하였다. 이 공진기의 자유스펙트럼영역은 750MHz이며 선평은 4.82MHz이다. 부수적인 온도 변화 및 역학적인 진동 효과로부터 기준 공진기를 고립시키기 위해 진공체임버도 제작하였다. 이러한 방법으로 신호/잡음비는 현재의 140에서 최소 2배 이상 향상될 수 있으며 주파수 표류속도도 270배이상 느려질 것으로 예상된다. 본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 얻어진 결과임.