

이차 상관관계 함수 측정법을 이용한 선폭측정 Novel method for a linewidth measurement using a second order correlation function

최원식, 이문주, 홍현규, 서원택, 백홍우, 심성보, 이재형, 안경원
서울대학교 물리학과
dnjstlr@photon.snu.ac.kr

이차 상관관계 함수는 빛의 세기-세기 상관관계로서 광원의 광자 통계 관측이나 광자 생성의 동적 과정을 관측하는데 이용된다. 이것은 Hanbury Brown과 Twiss에 의해서 처음 소개되었고, 짝별의 사이각을 관측하는데 이용되었다.⁽¹⁾ 이 후에 열 복사 광원의 결맞음 시간 관측⁽²⁾ 등에 응용되었고, 최근에는 광원이 비고전적 광자통계인 photon antibunching⁽³⁾과 sub-Poisson 광자 통계⁽⁴⁾를 보이는 지를 입증하는데 이용되었다.

광원의 선폭에는 전자기장의 세기 및 위상 잡음이 주로 기여하게 되는데, 전기장-전기장 상관관계인 일차 상관관계함수의 측정을 통해서 측정할 수 있다. 그러나 이 방법은 광원의 선폭이 좁을 경우, 분해능을 높이기 위해 움직여야 할 광로차가 길어져서, 좁은 선폭의 광원을 측정하기에는 용이하지 않다. 그 대안으로, 측정하고자 하는 광원의 선폭보다 선폭이 매우 좁은 기준 레이저와의 맥놀이를 측정하고, 그것을 푸리에 변환하여 얻는 방법이 이용될 수 있다. 이 방법은 광원의 세기가 충분히 커서 그 전자기장의 세기를 측정 가능할 정도가 되어야 하며, 그 세기가 약한 경우 기준 레이저의 세기를 크게 하는 방법이 있기는 하지만, 신호에 대한 바탕의 비가 나빠져 신호를 분리해 내는 것이 어렵다.

본 연구에서는, 마이크로 레이저⁽⁵⁾와 같이 그 세기가 매우 약해서 광자가 초당 10^7 개 정도 방출되고, 그 선폭이 수십 kHz 정도로 예상되는 광원의 선폭을 측정하기 위한 방법으로, 광자 수 측정법을 이용한 맥놀이 신호의 이차 상관관계함수 측정을 제안한다. 이 방법은 맥놀이 신호의 광자의 도착시간을 측정하고, 그들 사이의 상관관계를 얻은 후, 그것의 푸리에 변환을 통하여 선폭을 측정하는 것이다. 이것은 광원의 세기가 매우 약할 경우에도 이용될 수 있으며, 그 분해능도 단지 기준 레이저의 선폭에 의해 제한될 뿐이다.

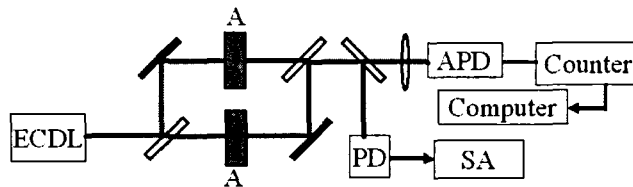


그림1. 실험 장치. ECDL: 외부공진기 다이오드 레이저, A: 광음향 변조기(AOM), APD: avalanche photo diode(SPC-AQR-13; PerkinElmer), Counter: counter/timing board(NI-6602; National Instruments), PD: photodiode(FFD-100; EG&G), SA: RF spectrum analyzer(E4403B; Agilent).

이 방법을 증명하기 위하여 광음향 변조기를 구동하는 선폭이 매우 좁은 라디오 주파수 파(RF-field)의 선폭을 자체 헤테로다인 방법을 이용하여 측정하였다. 그림1은 실험 장치도인데, 선폭이 약 1MHz로 알려져 있는 외부공진기 다이오드 레이저를 둘로 나누어서, 각각을 광음향 변조기로 주파수를 이동시켜

둘의 주파수 차이가 약 250kHz 정도로 만든 후, 다시 하나로 합쳐서 맥놀이 신호를 만들었다. 신호의 일부는 그 세기를 매우 줄여서 APD를 이용하여 광자 수셈을 한 후 counter로 각각의 광자가 도착한 시간을 측정해서 컴퓨터에 기록하였다. 이 때 측정된 평균 광자의 수는 초당 백만 개 정도였다. 다른 한쪽에서는 그 세기가 수 mW 정도인 맥놀이 신호를 PD를 이용해 측정된 후, 이를 spectrum analyzer에 넣어서 그 스펙트럼을 측정하였다.

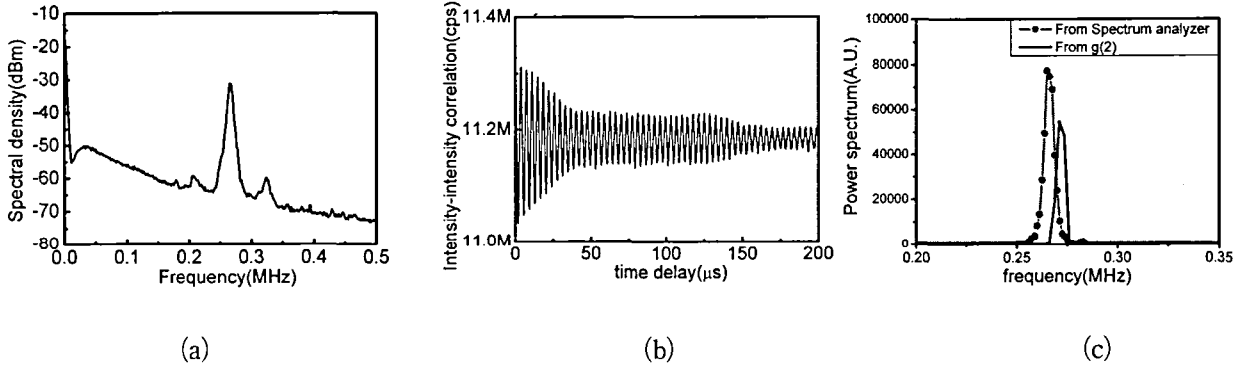


그림2. 측정된 스펙트럼. (a) Spectrum analyzer로 측정한 결과 (b) 맥놀이의 이차상관관계함수 (c) Spectrum analyzer의 결과와 이차 상관관계함수를 푸리에 변환한 결과와의 비교.

그림2의 (a)는 Spectrum analyzer로 관측한 결과로서 중심 주파수가 약 250kHz이고, 선폭이 약 5kHz였다. 그림2의 (b)는 광자 수셈을 통하여 맥놀이 신호의 이차 상관관계함수를 구한 것으로, 그 크기는 틀맞춤 되어있지 않은 데이터이다. 약 250kHz에 해당하는 작은 진동과 수백 μ s에 해당하는 진폭감소가 보이고, 이를 푸리에 변환한 결과가 그림2의 (c)에 실선으로 나타나 있다. Spectrum analyzer로 측정한 결과와 같이 나타내 보면, 두 방법 모두 그 선폭이 약 5kHz 정도로 매우 비슷하게 측정하는 것을 확인할 수 있었고, 이는 두 방법이 거의 동일한 결과를 준다는 것을 의미한다. 중심 주파수가 다른 것은 광음향 변조기를 구동하는 드라이버의 중심주파수가 시간에 따라 약간씩 움직였기 때문이었다. 레이저의 선폭에 해당하는 1MHz보다 훨씬 좁은 선폭이 측정된 이유는 나누어진 두 빔의 경로차이가 레이저의 결맞음 길이보다 훨씬 짧아서 레이저의 위상 노이즈가 완전히 상쇄되었기 때문이었고, 측정된 선폭은 광음향 변조기를 구동하는 드라이버의 선폭이었다.

본 연구에서는 레이저의 선폭을 측정하는 방법으로 맥놀이 신호의 이차 상관관계 함수 측정법을 개발하였다. 이는 광자 수셈을 해야 할 정도로 세기가 약한 광원의 선폭을 분해능이 수 kHz 이하로 측정할 수 있다. 기존의 spectrum analyzer를 이용하는 방법과 비교하였고, 두 방법이 같은 결과를 주는 것을 확인하였다. 이 방법은 마이크로 레이저의 선폭을 측정하는 실험에 이용될 것이다.

참고문헌

1. E. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, Nature 177, 27 (1957)
2. B. L. Morgan, L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 16, 1012 (1966)
3. H. J. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)
4. R. Short and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 51, 384 (1983)
5. K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari, and M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. 73, 3375(1994)

