마하젠더 간섭계의 분해능 비교

Comparison of Phase Sensitivity in a Mach-Zehnder interferometer with |1, 1⟩ state input.

신하림, 김헌오, 김태수
울산대학교 물리학과
tskim@mail.ulsan.ac.kr

간섭계를 통과한 빛의 세기 변화를 통하여 측정할 수 있는 최소 위상차 $\Delta\theta$ 를 그 간섭계의 불확정도 또는 위상차의 정밀도라 한다. 이것이 그 간섭계의 분해능에 해당한다. 간섭 측정시간 동안의 총 광자수가 N이라 할 때 위상차의 측정 한계는 광자의 불확정도 ΔN 과 $\Delta\theta$ 의 곱에 대한 하이젠베르크의 불확정성원리에 의해 $\Delta N \Delta\theta \geq 1$ 로 주어진다. 만약 간섭계에 사용되는 빛이 결맞음 광(coherent light)인 레이저라면 ΔN은 $\sqrt{N}$으로 주어지기 때문에 측정가능한 한계$1/\sqrt{N}$는rad 이고, 흔히 이를 고전적인 한계라고 부른다. 이번 계산에서 Coherent - state가 아닌 Fock - state의 광을 이용하여 양쪽 출구와 한쪽 출구에서의 위상의 불확정도를 이론적으로 계산하여 비교 하였다.

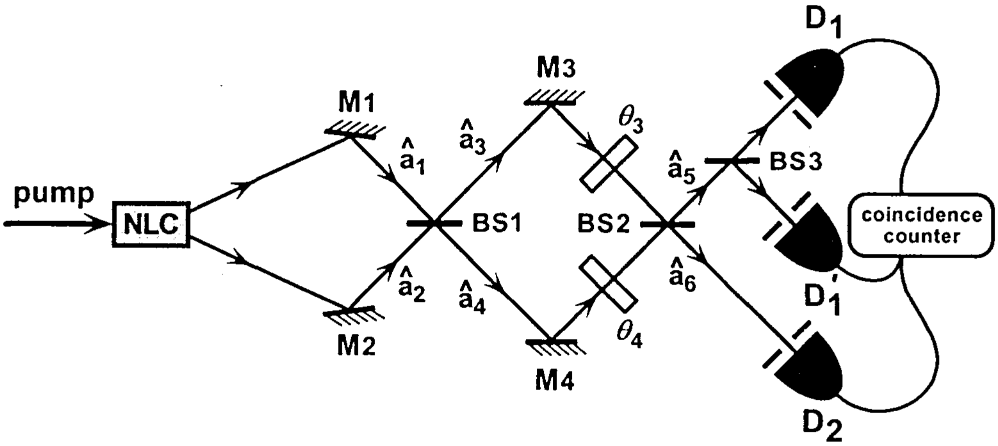


그림 1. Mach-Zehnder Interferometer.

비선형 결정의 매개하향 변환과정은(parametric down conversion) signal 모드와 idler 모드에 각각 한개의 광자가 존재하는 |1, 1⟩ 상태 즉, 광자쌍 상태의 빛을 만든다. 이러한 빛을 Mach-Zehnder 간섭계에 입사시켰을 때 간섭계의 위상차에 관한 정밀 측정의 한계가 단일광자의 입력에 비해 2배로 증가하는 것이 최근 연구 결과에서 보고되었다.

본 연구에서는 이러한 입력조건에서 한쪽 출구에서의 동시계수 측정과 양쪽 출구에서의 동시계수를 측정할 때 측정 방법에 따라서 분해능의 차이를 계산하여 비교 하였다. Schwiger의 간섭계에 대한 기술 방법에 따라서 각 운동량 벡터 연산자 $\hat{J}_x$, $\hat{J}_y$, $\hat{J}_z$를 정의하고 동시계수 연산자를 표시하면,

양쪽 출구 : $\widehat{N_{C1}} = :\widehat{n_5}\,\widehat{n_6}: \; = \frac{1}{4}\hat{N}^2 + (\hat{J}_x\hat{J}_z + \hat{J}_z\hat{J}_x)\sin\theta\cos\theta - \hat{J}_x^{\,2}\sin^2\theta - \hat{J}_z^{\,2}\cos^2\theta$

한쪽 출구 : $\widehat{N_{C2}} = :\widehat{n_5}\,\widehat{n_5}:$

$$= \left(\frac{1}{4}\hat{N}^2 - \frac{1}{2}\hat{N}\right) - \left(\hat{N}\hat{J}_x - \hat{J}_x\right)\sin\theta + \left(\hat{N}\hat{J}_z - \hat{J}_z\right)\cos\theta - \left(\hat{J}_x\hat{J}_z + \hat{J}_z\hat{J}_x\right)\sin\theta\cos\theta$$

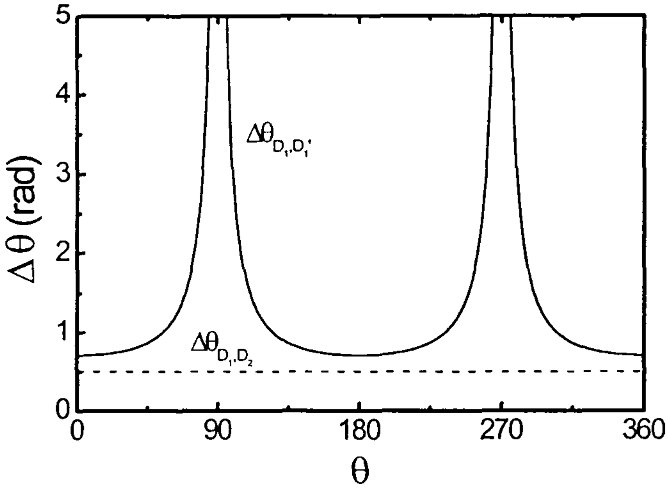
$$+\ \hat{J}_x{}^2\sin^2\theta + \hat{J}_z{}^2\cos^2\theta$$

가 된다. 여기서 $\hat{N}$은 입사하는 전체 광자수 연산자이다. 각각에 대하여 variance $(\Delta N_{c1})^2$과 $(\Delta N_{c2})^2$를 구하여 입사 광자수가 각각 1인 $|1,1\rangle$의 상태에 대하여 위상의 불확정도를 계산해보면,

$$(\Delta\theta_{c1})^2\,|1,1\rangle = \frac{1}{4}$$

$$(\Delta\theta_{c2})^2\,|1,1\rangle = \frac{1}{4}\left(1 + \frac{1}{\cos^2\theta}\right)$$

이 된다. 이것을 그래프로 그려보면 오른쪽과 같다. 따라서 양쪽출구에서의 위상분해능 $(\Delta\theta_{c1})$은 0.5 rad 이 최소가 되고, 한쪽 출구에서의 위상분해능 $(\Delta\theta_{c2})$는 위상각에 의존하며 최소값은 0.707rad이다.



본 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-070-C00029).

참고문헌

1. Taesoo Kim, Oliver Pfister, Jaewoo Noh, Murray Holland, and John L. Hall, Phys. Rev. A57, 4004 (1998).
2. Taesoo Kim, Jongtae Shin, Yang Ha, Heonoh Kim, Goodong Park, Tae-gon NOh, and Chung Ki Hong, Opt. Commum. 156,37 (1998).
3. Keiichi Edamastsu, Ryosuke Shimizu, and Tadashi Itoh Phys. Rev A89, 213601. (2002)