

Michelson 간섭계의 위상감도 The Phase Sensitivity of a Michelson Interferometer

하 양, 김현오, 신종태, 박구동, 김일원, 김태수
울산대학교 물리학과
tskim@uou.ulsan.ac.kr

Michelson 간섭계에 결맞음광을 입사시킬 때와 비고전광인 수 상태광을 입사시켰을 때의 위상감도에 대하여 이론적으로 계산하여 비교하였다. 수 상태광이 입사하는 경우라도 고전광인 결맞음광에서의 한계를 능가할 수 없음을 보였으며, 두 경우 모두 위상차의 불확정도 $\Delta\theta$ 는 $1/\sqrt{N}$ (N은 광자수)에 비례하였다. 또한 사용하는 광검출기의 양자효율에 따라 $\Delta\theta$ 가 어떤 영향을 받는지 분석하였다.

Michelson 간섭계는 빛살가르개(T/R=50/50)가 축에 45°로 위치하고 두 거울들은 90°로 세워져 양자효율 η 인 검출기에 균일하게 비춘다. 빛살가르개와 거울은 흡수가 없으며, 간섭계내에서 광자의 손실이 없는 이상적인 간섭계를 가정하자. 간섭계에 입사하는 광은 단일 진동수모드이며, 그때의 연산자를 \hat{a} 라 두자. 여기서 \hat{a} 는 입사광에 대응하는 소멸연산자이다. 빛살가르개를 통과한 후 두 경로의 모드를 각각 \hat{a}_2, \hat{a}_3 라 하면 검출기에 입사하기전 모드 \hat{a}_4 는

$$\begin{aligned} \hat{a}_4 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_3 e^{i\theta_3} + \frac{i}{\sqrt{2}} \hat{a}_2 e^{i\theta_2} \\ &= \frac{i}{\sqrt{2}} (\hat{a} e^{i\theta_3} + \hat{a} e^{i\theta_2}) \end{aligned}$$

가 된다. 만약 두 경로상의 위상차를 $\theta \equiv \theta_2 - \theta_3$ 라 할 때,

$$\begin{aligned} \hat{a}_4^\dagger \hat{a}_4 &= \left[-\frac{i}{2} (\hat{a}^\dagger e^{-i\theta_3} + \hat{a}^\dagger e^{-i\theta_2}) \right] \left[\frac{i}{2} (\hat{a} e^{i\theta_3} + \hat{a} e^{i\theta_2}) \right] \\ &= \frac{1}{2} \hat{a}^\dagger \hat{a} (1 + \cos \theta) \end{aligned}$$

가 됨을 알 수 있다.

광검출기 D의 양자효율을 η 라 할 때 이에 대한 연산자 $\hat{a}_4' = \sqrt{\eta} \hat{a}_4 + \sqrt{1-\eta} \hat{v}_4$ 로 표현되며(\hat{v} 는

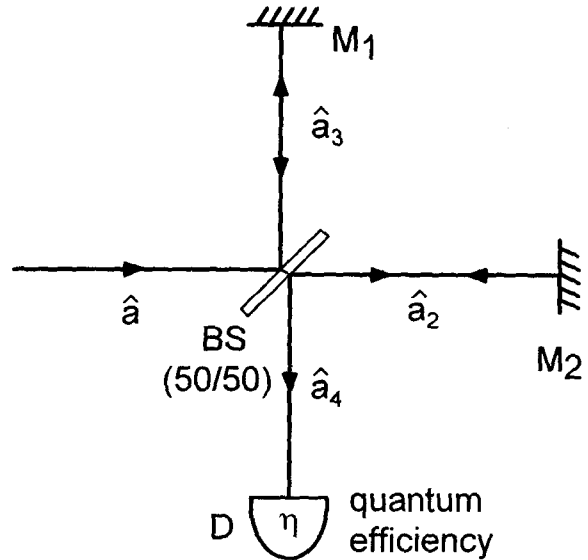


그림 1. Michelson 간섭계

진공상태에 대한 연산자), 입사광이 비고전적인 광인 수 상태광 $|n\rangle$ 이라면 위상의 불확정도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 (\Delta\theta)^2 &= \frac{\langle(\Delta n^2)\rangle}{\left[\frac{\partial\langle\hat{n}\rangle}{\partial\theta}\right]^2} \\
 &= \frac{1}{n} \left[1 + \frac{2(1-\eta)}{\eta} \frac{1}{1+\cos\theta} \right]
 \end{aligned}$$

입사광이 결맞음 광 $|a\rangle$ 와 같은 고전적인 광이라면 위상의 불확정도는

$$(\Delta\theta)^2 = \frac{2}{|a|^2} \frac{1}{1-\cos\theta} \left[1 + \frac{1-\eta}{\eta} \right]$$

와 같이 된다.

그림 2는 결맞음광($|a|^2=100$)일 때 그리고 그림 3은 입사광의 광자가 수 상태광($n=100$)일 때 양자효율이 $\eta = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1$ 로 변함에 따라 $\Delta\theta$ 의 변화를 각각 보여주고 있다. 이것은 입사광의 상태에 관계없이 $\Delta\theta \sim 1/\sqrt{N}$ 임을 알 수 있다. 여기서 N 은 입사광의 전체 광자수이다. 즉, Michelson 간섭계에서는 검출기의 양자효율에 관계없이 고전적 한계를 벗어날 수 없음을 알 수 있다.

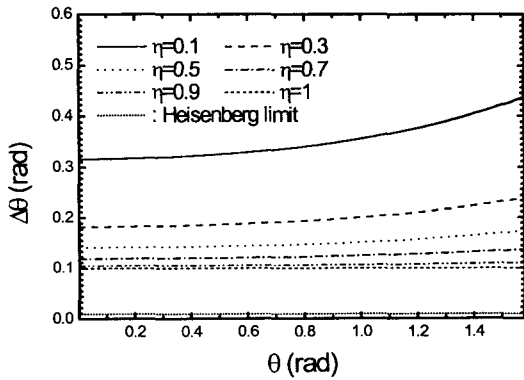


그림 2. Michelson 간섭계에 결맞음상태광이 입사할때 양자효율의 변화에 따른 위상의 불확정도

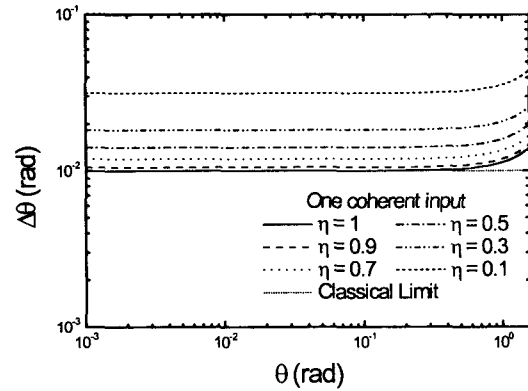


그림 3. Michelson 간섭계에 수 상태광이 입사할때 양자효율의 변화에 따른 위상의 불확정도