

살다발 가르개 배열에 의한 광자 검출에서의 양자 간섭

Quantum Interference in Photon Detection

with An Array of Beam Splitters

강윤식, 노재우, 김기식*, 박대운

인하대학교, 물리화학부

*kisik@inha.ac.kr

살다발 가르개는 광학 실험에서 가장 흔하게 사용되는 부품이다. 들어오는 빛의 일부는 반사시키고 나머지는 투과시킨다는 매우 단순한 역할에 비해서, 살다발 가르개는 양자 광학 분야에서 지속적으로 흥미로운 양자적 현상을 보여 왔다. 예컨대, 50%-50% 살다발 가르개를 갖는 마하-젠더 간섭계의 한 쪽 입구로 하나의 광자를 보내면, 두 출구 중에서 오직 한 쪽 출구로만 광자가 나오고, 이는 광자가 택하는 두 경로의 간섭으로 이해할 수 있다.

본 논문에서는, 마하-젠더 간섭계의 확장으로 그림 2와 같은 $N \times N$ 살다발 가르개의 배열을 생각하고, 광자 검출 확률에서 나타나는 양자 간섭을 조사하였다. 그림 2에서 보듯이, 살다발 가르개의 배열에는 전체 N 개의 입구와 N 개의 출구가 있다. N 개의 입구 중에서, 그림에 표시한 한 입구로 하나의 광자를 보낼 때, N 개의 출구에 설치한 검출기가 광자를 검출할 확률을 계산하였다.

그림 1과 같은 대칭 살다발 가르개의 투과 상수와 반사 상수를 각각 t 와 r 이라 두면, 두 입력 모드 a_1, a_2 와 출력 모드 b_1, b_2 는 다음의 행렬 관계식을 갖는다.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t \\ t & r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \equiv \mathbf{U} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

에너지 보존에 의해서 두 상수는 $|t|^2 + |r|^2 = 1$, $t^*r + tr^* = 0$ 을 만족시킨다.

이제 그림 2와 같은 살다발 가르개의 배열을 생각하면, $2n$ 개의 입력 모드 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{2n}$ 과 N 개의 출력 모드 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_{2n}$ 는 다음의 행렬 관계식을 갖는다.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{2n-1} \\ b_{2n} \end{pmatrix} = \mathbf{U}_n \mathbf{U}_{n-1} \cdots \mathbf{U}_2 \mathbf{U}_1 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{2n-1} \\ a_{2n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{U}_i ($i=1, 2, \dots, n$)는 $2n \times 2n$ 행렬로서, 가운데 $2i \times 2i$ 블록이 $i \times i$ 단위 행렬에 2×2 행렬 \mathbf{U} 를 직접곱하여 얻고, 다른 대각 행렬요소는 1이며, 나머지 행렬 요소는 모두 0이다.

그림 3은 $|t|^2 = |r|^2 = 1/2$ 을 갖는 400 개의 살다발 가르개 배열에서 모드 a_{n+1} 의 입구로 하나의 광자를 보냈을 때, 각 출구에서 검출되는 광자수 확률을 보여준다. 경로 간섭에 의해서 검출 확률은 일종의 간섭 무늬를 보인다. 마하-젠더 간섭계의 경우와 같이 검출 확률은 대칭적이지 않고, 특히 63 번째 출구에서 갑작스럽게 봉우리가 생긴다. 투과 및 반사 상수를 변화시킴에 따라 봉우리의 위치가 이동하는 것을 확인하였다. 투과 및 반사 상수가 빛의 진동수에 의존한다는 사실을 주지하면, 이 결과는 살다발 가르개를 이용한 진동수 선택에 사용될 수 있을 것이다.

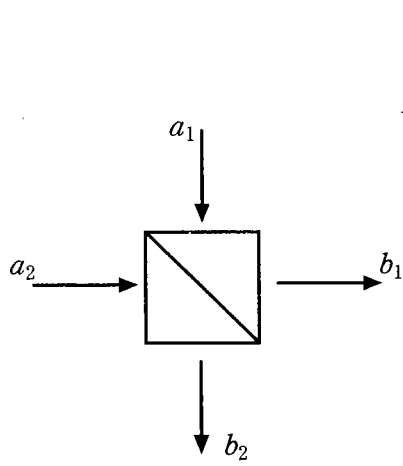


그림 1

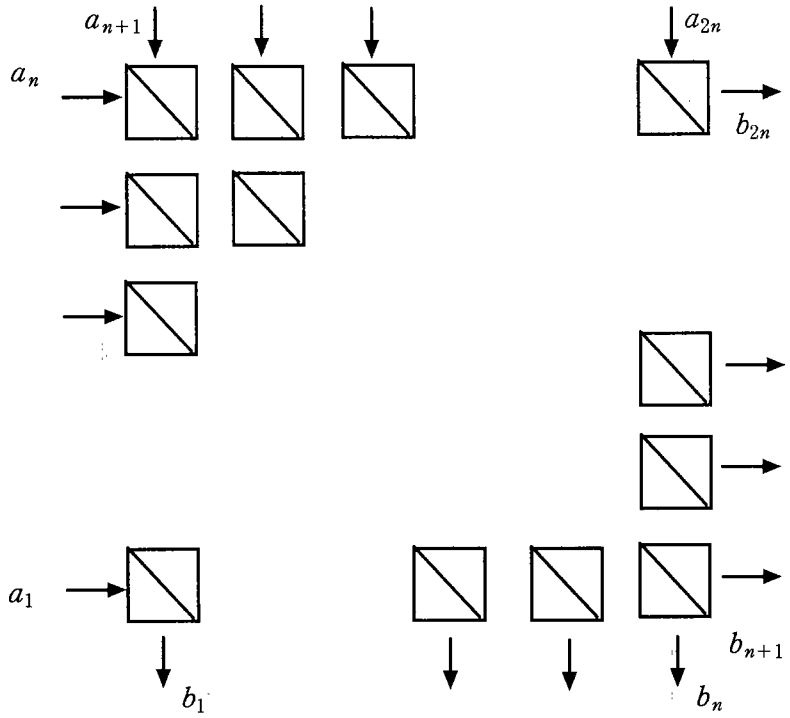


그림 2

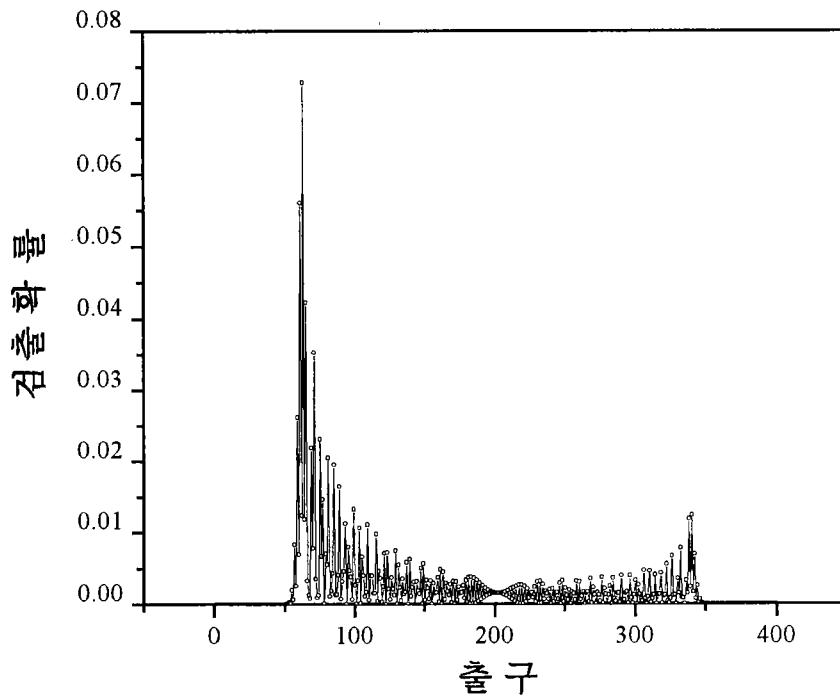


그림 3

