

완전히 불투명 하지 않은 물체에 대한 광학적 무작용 검출 시스템의 성질

장 주 석

부경대학교 정보통신공학과

(1997년 8월 29일 받음)

편광에 기초한 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 무작용 검출 시스템에 대해 기술한다. 특히 불투명하지 않은 물체에 대해서 이 시스템의 성질을 조사하였고, 투명도가 있는 물체라도 무작용 검출이 가능함을 보였다. 무작용 검출의 의미로 볼 때, 검출효율이 70%에 해당되는 시스템을 구성하였으며, 우리 시스템의 유용성을 보여주기 위한 기초적인 실험을 수행하였다.

I. 서 론

최근에 빛 (즉 광자)가 불투명한 물체에 직접 부딪히지 않도록 하면서 그 물체의 존재유무를 검출할 수 있는 무작용 검출 시스템이 연구되고 있다.^[1-4] Elitzur와 Vaidman은 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여, 원리적으로 물체의 존재 여부를 광자의 직접적 작용없이 알아낼 수 있음을 제안하였고^[1], van Voorthuysen은 이 구조를 실험적으로 입증하였다.^[2] 그러나 이 방식의 검출효율은 50% 이하이다. Kwiat등은 편광을 이용하여 검출효율이 원리적으로 100%가 될 수 있는 시스템을 제안하고 Michelson 간섭계를 이용하여 검출효율이 약 50%인 시스템을 구현하였다.^[3,4] 이들 논문들은 광자가 파동성과 입자성을 동시에 갖는다는 양자역학적 원리가 실험적으로 옳다는 것을 보여주었다. 그러나 검출하고자 하는 물체가 완전히 불투명한 경우에 대해서만 논의되었다. 일반적으로 투명도가 있는 물체일 경우에는 무작용 검출이 가능한지 확실치 않았다.^[5]

본 논문에서는, Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광학적 무작용 검출 시스템을 한 예로 선택하여 완전히 불투명하지 않은 물체의 경우에 대한 이 시스템의 출력을 자세히 조사하였다. 이 시스템은 물체의 실상을 출력하도록 설계되어 있어서, 광학적 정보의 저장이나 처리에 효과적으로 응용될 수 있는 구조를 갖고 있다.^[6] 특히, 완전히 투명한 물체라도 그의 위상지연이 간섭계의 다른 경로에 비해 2π 의 정수배가 아니면, 원리적으로 무작용 검출(즉, 광자가 투명한 물체를 통과하지 않으면서 그 존재를 알 수 있는 것)이 가능함을 처음으로 보였다. 불투명한 물체를 검출한다고 할 때, 검출효율이 70%에 해당하는 시스템이 구성되었으며, 우리의 시스템이 유용함을 보여주는 기초적인 실험이 수행되었다.

II. 시스템 구성 및 동작 원리

2.1. 시스템 구성

우리의 시스템을 그림 1에 나타내었다. 빔의 진행방향을 z

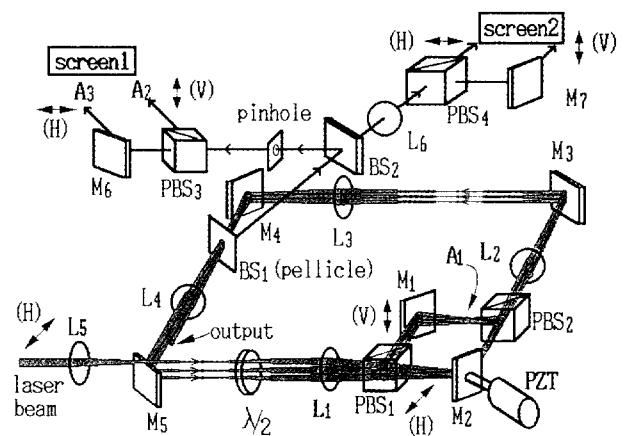


그림 1. 물체의 실상을 출력할 수 있는 편광에 기초한 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 무작용 검출 시스템.

축, 시스템의 위쪽방향을 y 축이라고 하고 수평방향을 x 축이라고 정의하자. 입사되는 레이저 빔의 편광은 수평편광(P 편광)이다. 반파장 지연판($\lambda/2$ plate)의 slow 축이 x 축에 대해 $\Psi/2$ 만큼 회전되어 있어서, 입사빔의 편광을 Ψ 만큼 회전시킨다. 두 개의 편광 빔 분할기 PBS1과 PBS2 및 두 개의 거울 M1과 M2가 편광에 기초한 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고 있다. PBS1은 입력빔의 편광을 수평성분(P 편광성분 혹은 x 축 성분)과 수직 편광 성분(S 편광성분 혹은 y 축 성분)으로 분할하며 PBS2에서는 둘이 다시 합쳐져 본래의 입력 편광의 방향이 재생되도록 한다. 이를 위해, 거울 M2는 압전소자 위에 설치되어 있고, 두 편광 빔 성분의 위상경로차가 π 가 되도록 제어한다(수평편광 성분의 빔이 M2에서 한번 반사한다는 것과 $+x$ 축 방향에 유의하라). 출력 빔은 적절히 기울어진 세 개의 거울 M3, M4 및 M5를 써서 다시 반파장 지연판의 다른 한 지점으로 되돌아 온다. 이 때 궤환빔은 입력빔과는 평행하다. 이 빔은 홀수번 거울(M3-M5)에 반사되므로 x 축으로부터 $-\Psi$ 만큼 회전된다. 반파장 지연판의 slow 축은 이 궤환빔의 편광 방향에 대해 $3\Psi/2$ 만큼 회전되어 있으므로, 이 지연판은 궤환빔을 slow 축에 대해 3Ψ 만큼 회전시킨다. 이는 결과적으로

케환빔의 편광이 x 축으로부터 2ψ 만큼 회전된 모양이다. 이와 같이하여 간섭계를 N 번 통과한 빔이 출력되고 이것의 편광은 $N\psi$ 가 된다. 여기서 $\psi = \pi/2N$ 로 두어 처음 수평으로 편광된 입력 빔이 간섭계를 N 번 순환한 다음에 수직편광 빔으로 바뀌도록 한다. 사실, 약간씩 기울어진 M3, M4 및 M5를 통해서도 편광의 각도가 작으나마 약간 회전하는데 반파장 지연판에서 이를 보상하도록 한다.

네 개의 렌즈 L1-L4의 초점거리는 f 로 동일하고, 한번의 순환경로 길이는 $8f$ 이다. 이들 렌즈는 모두 등간격으로 $2f$ 만큼씩 떨어져 있어서 N 번 순환하는 빔들의 Fourier 면과 image 면을 반복해서 만들어 낸다. 여기서 Fourier면은 여러개의 빔경로가 중첩되는 지점을, image면은 이들이 분리되어 집속되는 지점을 뜻한다. 하나의 Fourier면 A1은 렌즈 L6에 의해 출력평면 A3에도 나타나도록 하였다. 또 하나의 편광 빔 분할기 PBS3을 사용하면 출력평면 A2에도 Fourier 면이 나타난다. 기존의 무작용 검출 시스템에서는 렌즈를 사용하지 않았지만, 검출하고자 하는 물체의 크기가 일반적으로 작다는 것과 빔의 회절을 감안하면 이들 렌즈의 사용은 실질적으로 중요하다.

2.2. 동작 원리

이 시스템의 동작 및 출력 특성을 Jones 행렬과 벡터⁽⁶⁾로 쉽게 조사할 수 있다. 편의상 이 시스템의 빔 손실, 예를 들어 렌즈의 표면 반사율, 거울의 흡수율 등을 무시할 수 있다고 가정한다. 사실 이 손실을 무시할 수 없지만, 다음의 Jones 대수에서 알 수 있듯이, 수평 편광 성분에 대한 수직 편광 성분 상대적 손실만이 시스템 동작에 영향을 미친다. 광자를 하나씩 입사시키는 무작용 검출 실험을 한다고 하면, 시스템 손실에 의한 광자의 흡수가 발생할 경우 실험을 반복하면 그만이다.^[1]

x 축에 대해 $\pi/4N$ 만큼 회전되어 있는 반파장 지연판의 Jones 행렬은

$$M_{1/2} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{2N} & \sin \frac{\pi}{2N} \\ \sin \frac{\pi}{2N} & -\cos \frac{\pi}{2N} \end{pmatrix} \quad (1)$$

이 된다.^[7] A1 면에 빛의 세기 투과도가 T 이고 위상지연이 ϕ 인 평탄한 물체가 존재할 때, 간섭계의 Jones 행렬은

$$M_{int} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{T} e^{j\phi} \end{pmatrix} \quad (2)$$

이 된다. 여기서 j 는 $\sqrt{-1}$ 이다. 그리고 케한 경로의 Jones 행렬은

$$M_{feedback} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

이 된다. 따라서 이 시스템의 한번 순환에 대한 Jones 행렬 $M = M_{feedback} M_{int} M_{1/2}$ 은

$$M = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{2N} & \sin \frac{\pi}{2N} \\ -\sqrt{T} e^{j\phi} \sin \frac{\pi}{2N} & \sqrt{T} e^{j\phi} \cos \frac{\pi}{2N} \end{pmatrix} \quad (4)$$

이다. 수평편광인 입력빔의 Jones 벡터는 $v_0 = [1 \ 0]^T$ 이고, 이 빔이 이 시스템을 $k(\leq N)$ 번 순환한 뒤의 빔 편광상태는 $v_k = M^k v_0$ 이 된다. 여기서 윗첨자 T 는 벡터의 전치를 뜻하고 M^k 는 M 을 k 번 반복하여 곱함을 뜻한다. 특히 k 번 순환된 빔이 다시 반파장 지연판을 통과 했을 때의(즉, 간섭계에 입력되기 직전의) 편광상태를 $u_k = M_{1/2} v_k$ 로 나타내기로 한다.

입력면 A1에 물체가 없다면, 즉 $T=1, \phi=0$ 이면, 출력은 $v_N = [0 \ 1]^T$ 이 되어 수직 편광이 된다. 반면에 A1에 $T=0$ 인 불투명한 물체가 놓여 있다고 하면, $v_N = [\cos^N(\pi/2N) \ 0]^T$ 가 된다. 즉 여전히 수평편광이 된다. 입력 빔 세기를 1이라 할 때, 이 출력 수평 편광 빔세기 $I_H = |v_N|^2 = \cos^{2N}(\pi/2N)$ 이고, 이 값은 N 이 충분히 크면 1에 수렴한다. 그러므로 A2 및 A3 면에서 출력빔의 편광상태를 조사해 봄으로써 물체의 존재를 판단할 수 있다. 이 경우 실제로 불투명한 물체에 찍어지는(흡수되는) 수직편광 빔세기 I_V 는 매 순환마다 물체에 노출되는 수직성분 빔세기의 합이므로, $I_V = \sum_{k=1}^{N-1} |u_k|^2 = 1 - \cos^{2N}(\pi/2N) = 1 - I_H$ 가 되고 이는 N 이 커지면 0에 수렴한다. 단, u_k 는 u_k 의 y 축(수직편광) 성분이다. 입사되는 빔의 실제 세기를 매우 줄여서 수평으로 편광된 광자가 1개씩 입사된다고 해보자. 만약 A1면에 아무런 물체가 없으면, 간섭계에서 수직편광과 수평편광의 두 경로가 동시에 존재하므로, 출력에서는 항상 수직 편광의 광자를 검출하게 된다. 반면에 A1면에 물체가 있어서 그 경로를 막으면, 출력되는 광자는 물체에 실제로 거의 부딪힐 확률없이, 항상 수평 편광 상태로 빠져나오게 된다. 이것이 무작용 검출의 기본 원리이다.

무작용 검출시스템의 검출효율은 $\eta = P_{success} / (P_{success} + P_{fail})$ 로 정의된다.^[1] 단, $P_{success}$ 와 P_{fail} 은 검출성공 확률과 검출실패 확률을 각각 뜻한다. 이 시스템의 경우, $P_{success}$ 는 N 번 광자가 간섭계를 통과할 때마다 항상 수평 편광 경로만을 택할 확률이고, P_{fail} 은 광자가 N 번 순환 도중 한번이라도 수직 편광 경로를 택할 확률이다. 불투명한 물체에 대해서는 $P_{success} = I_H$ 및 $P_{fail} = I_V$ 가 되므로, $\eta = I_H / (I_H + I_V) = \cos^{2N}(\pi/2N) = P_{success}$ 이다.

2.3. 완전히 불투명하지 않은 물체에 대한 동작 특성

만약 물체가 완전히 불투명하지 않을 때에도 무작용 검출이 가능할 것인가? 특별히, $T=1$ 이고 $\phi = \pi$ 인 완전히 투명한 물체의 경우를 예로 들어 보자. 이 경우, 수직편광 경로에 추가의 위상지연 π 때문에 첫 번째 케환되는 빔의 편광은 x 축에서 $+\psi$ 만큼 회전된다. 이는 위상지연판의 slow 축에 대해 $+\psi/2$ 만큼 회전된 것이어서, 두 번째 케환에서는 이 slow 축에 대해 $-\psi/2$ 만큼 편광이 회전하게 된다. 이는 결과적으로 본래의 입력편광인 수평 편광으로 회복된 것이고, 빔이 시스템을 순환함에 따라 이 과정이 반복된다. 이 경우 식 (4)의 M 이 식 (1)과 같고, 이를 이용하여 $v_k = M^k v_0$ 를 계산해 보면 이를 쉽게 알 수 있다. 즉 k 가 짝수 이면 $v_k = [1 \ 0]^T$ 가 되고 홀수이면 $v_k = [\cos(\pi/2N) \ \sin(\pi/2N)]^T$ 가 된다. 즉 최종 출력의 편광은 수평

편광이거나(N 이 짝수), 혹은 거의 수평편광이므로(N 이 홀수), 불투명 물체와 마찬가지로 확실히 [N 이 홀수이면 $\cos^2(\pi/2N)$ 만큼 확실하게] 그 존재를 검출할 수 있다.

이 경우 광자가 N 번 순환하면서 항상 수평편광 경로를 택할 확률, 즉

$$P_{\text{success}} = \prod_{k=1}^{N-1} \frac{|u_{kx}|^2}{|u_{kx}|^2 + |u_{ky}|^2} \quad (5)$$

은 N 이 짝수 [혹은 홀수]라고 가정할 때, $\cos^N(\pi/2N)$ [혹은 $\cos^{N+1}(\pi/2N)$]이고 이는 N 이 커지면 1에 수렴한다. 물체가 완전히 불투명하지 않기 때문에, 광자가 수직편광 경로에 있는 물체를 통과한 다음에 궤환되어 다시 수평편광 경로를 지날 수 있다. 따라서 P_{fail} 은 N 번 순환하는 모든 가능한 경우의 수에 있어서 한번이상 수직편광 경로를 통과할 확률의 총합이다.

간단히 N 이 짝수일 때, $P_{\text{fail}} = \sum_{i=1}^{N/2} \binom{N/2}{i} \sin^{2i}(\pi/2N) \times \cos^{N-2i}(\pi/2N)$ 이고, 이는 당연히 $1 - \cos^N(\pi/2N) = 1 - P_{\text{success}}$ 와 같으며, N 이 커지면 0에 수렴한다. 따라서 $\eta = \cos^N(\pi/2N)$ 으로 불투명한 물체의 것보다 오히려 높다. 결국, 여기서 무작용 검출이 가능하다는 뜻은 광자가 투명한 물체를 통과하되 흡수되지 않기 때문이 아니라, 광자가 투명한 물체가 있는 경로로 가지 않는다는 것이다.

입의의 빔투과도와 위상 지연을 갖는 물체일 경우, 출력빔은 일반적으로 수평 및 수직 성분의 편광을 모두 가질 수 있으며, 또한 선형편광이 아닐 수 있다. 식 (4)의 M 을 이용하여, 앞과 마찬가지로 $v_k = M^k v_0$ 를 계산해 봄으로써 이 시스템의 특성을 조사할 수 있다. 특히 $|1 - \sqrt{T} e^{j\phi}| \gg 1/N$ 이면, 다음과 같은 근사치로 그 특성을 예측할 수 있다.

$$v_k = \begin{pmatrix} \cos^k \frac{\pi}{2N} + \epsilon_1 \\ -\sqrt{T} e^{j\phi} \left(\frac{1 - T^{k/2} e^{jk\phi}}{1 - \sqrt{T} e^{j\phi}} \right) \cos^{k-1} \frac{\pi}{2N} \sin \frac{\pi}{2N} + \epsilon_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 ϵ_1 및 ϵ_2 는 각각 다음과 같다.

$$\epsilon_1 = -\sqrt{T} e^{j\phi} \left(\frac{k-1}{1-\sqrt{T} e^{j\phi}} - \frac{1-T^{(k-1)/2} e^{j(k-1)\phi}}{(1-\sqrt{T} e^{j\phi})^2} \right) \times \cos^{k-2} \frac{\pi}{2N} \sin^2 \frac{\pi}{2N} + O\left(\frac{k}{N^3}\right) \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = T e^{2j\phi} \left(\frac{(k-2)(1+T^{(k-1)/2} e^{j(k-1)\phi})}{(1-\sqrt{T} e^{j\phi})^2} - 2\sqrt{T} e^{j\phi} \frac{1-T^{(k-2)/2} e^{j(k-2)\phi}}{(1-\sqrt{T} e^{j\phi})^3} \right) \times \cos^{k-3} \frac{\pi}{2N} \sin^3 \frac{\pi}{2N} + O\left(\frac{k}{N^4}\right) \quad (8)$$

$T \approx 0$ 인 불투명한 물체가 A1에 놓인 경우가 아니라 할지라도, N 이 충분히 크고 $\phi \approx 2n\pi$ 에 가깝지 않으면 식 (7)과 (8)은 무시될 수 있고, 따라서 무작용 검출 시스템으로 동작함을 예측할 수 있다. 즉, 식 (7)과 (8)을 무시할 수 있다는 가정하에서 $u_k = M_{1/2} v_k$ 를 구하고, 식 (5)로부터

$$P_{\text{success}} \approx \frac{\cos^{2N} \frac{\pi}{2N} \left(1 - 2 \operatorname{Re}(\alpha) N \tan^2 \frac{\pi}{2N} \right)}{1 + |\alpha|^2 \left(N - 2 + \frac{1-T^N}{1-T} \right) \tan^2 \frac{\pi}{2N}} \quad (9)$$

가 된다. 단 $\alpha = \sqrt{T} e^{j\phi} / (1 - \sqrt{T} e^{j\phi})$ 이다. 식 (9)에서 $(1 - T^N) / (1 - T)$ 은 T 가 1일 때 최대값 N 이고, $\tan^2(\pi/2N)$ 은 N 이 커지면 $(\pi/2N)^2$ 에 수렴하므로, $\eta = P_{\text{success}}$ 는 N 이 커지면 1에 수렴하고, 불투명 물체일 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

식 (4)를 이용하여 여러 가지 파라미터에 대해 출력빔의 편광상태 $v_N = M^N v_0$ 를 수치적으로 계산하고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)와 (b)는 물체의 빔세기 투과도 T 및 그의 위상지연 ϕ 에 따른 출력빔의 수평 및 수직 편광성분의

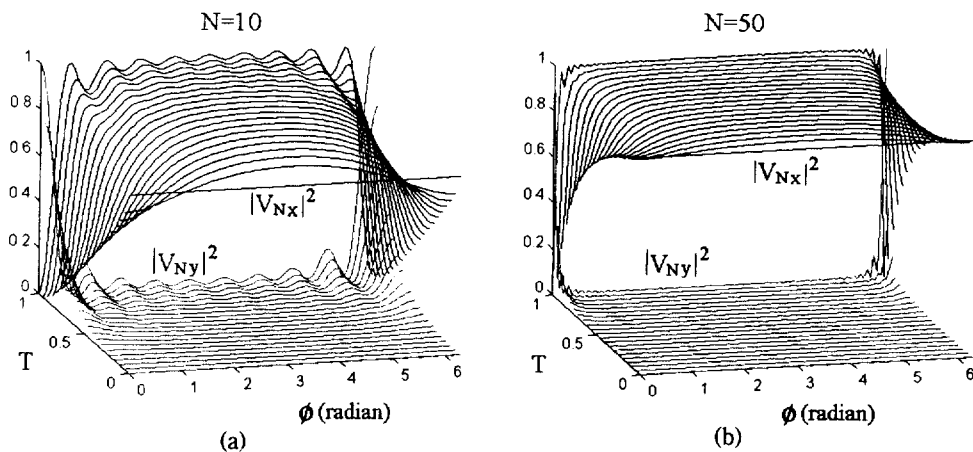


그림 2. N 번 순환한 빔의 최종 편광 상태. 검은선은 수평편광 성분의 빔세기 혹은 수평편광 성분의 광자가 검출될 확률 $|v_{Nx}|^2$ 이고, 회색선은 수직편광의 것 $|v_{Ny}|^2$ 이다.

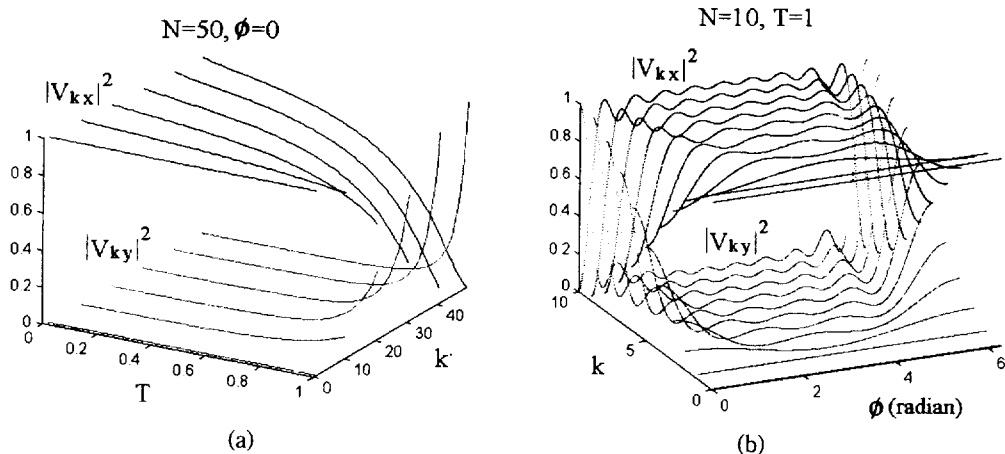


그림 3. 빔이 매번 시스템을 순환함에 따른 (즉, k 값에 따른) 각 편광 성분의 빔세기(각 편광의 광자를 발견할 확률). 검은색은 $|v_{kx}|^2$ 이고 회색선은 $|v_{ky}|^2$ 이다.

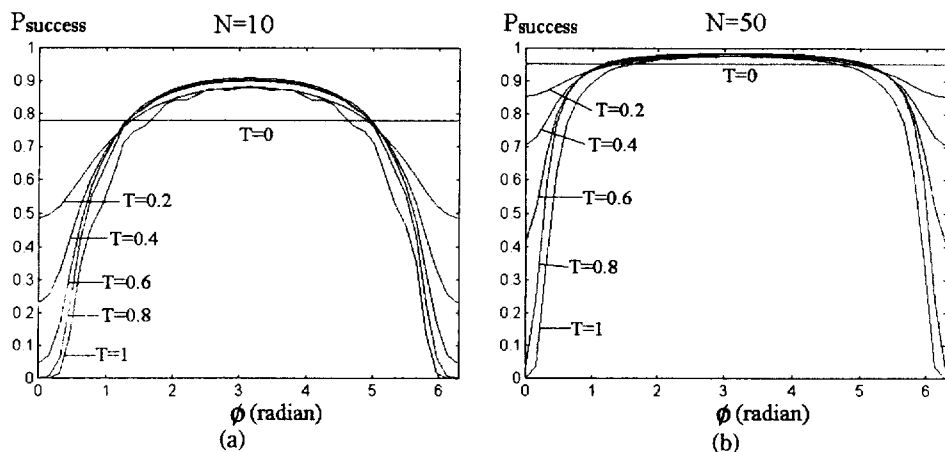


그림 4. 광자가 시스템을 N 번 순환하는 동안 간섭계의 수평편광 경로만을 택할 확률, 즉 $P_{\text{success}} = \eta$.

빔세기를 나타낸 것이다. 물체가 없으면, 즉 $(T, \phi) = (1, 0)$ 혹은 $(1, 2\pi)$ 인 지점에서는 출력은 수직편광 성분뿐이다. 불투명한 물체가 있으면, 즉 $T=0$ 인 곳에서는 출력은 수평편광 성분뿐이다. 그러나 완전히 불투명하지 않은 물체가 A1에 위치하면 출력은 넓은 T 와 ϕ 값 범위에서 거의 수평편광이 됨을 보여주고 있다. 그리고 이들 출력 특성은 ϕ 에 대해 주기적이며 주기는 2π 이다. N 이 증가하면 최종출력이 수평편광이 되는 T 와 ϕ 의 범위가 더욱 넓어지고, 이 범위내에서 $|v_{kx}|^2$ 이 1에 더욱 접근함을 볼 수 있다. 그림 3은 처음 수평편광의 입력빔 ($k=0$)이 시스템을 순환함에 따라 그 편광 상태가 물체의 T 및 ϕ 에 따라 바뀌어가는 상황을 순환 횟수 k 에 대해 3차원적으로 그린 것이다. N 이 크면 ϕ 가 0 혹은 $2n\pi$ 에 가깝거나, 혹은 T 가 상당히 투명하여도, 입력 편광상태가 별로 변하지 않고 빔이 순환하는 동안 그 편광이 거의 수평으로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 그림 4는 식 (5)의 P_{success} 를 계산한 결과이다(식 (9)를 계산하여 그려보면 그림 4와 흡사함). 투명도가 있는 경우에도 넓은 파라미터의 범위에서 무작용 검출이 가능함을 보여준다.

은 참고문헌^[3,4]의 Michelson 간섭계 구조에도 마찬가지로 적용되므로, 동일한 결론을 얻게 된다.

III. 실험

실험에서는 그림 1에 있어서 N 이 7인 경우를 구현하였다. 이는 광자를 하나씩 입사시켜 불투명한 물체에 대한 무작용 검출을 할 경우 η 가 약 0.7인 경우이다. 광자를 1개씩 입사시키는 대신에, 많은 수의 광자를 입사시켜 각각의 편광에 대한 빔세기를 조사함으로써, 우리의 생각이 옳음을 보였다.

광원은 파장 633 nm이고 출력이 5 mW인 He-Ne 레이저였고 렌즈 L1-L6의 f 는 모두 12 cm이었다. 반사율이 약 8%인 pellicle 빔분할기를 간섭계 다음에 위치시키고 시스템의 동작 특성을 모니터하였다. 그림 5는 screen1에 나타나는 N 번 순환한 빔의 수직 및 수평편광 성분의 빔세기 출력이고, 그림 6은 screen2에 나타나는 순환하고 있는 7개 빔의 수직 및 수평편광 성분의 빔 패턴 사진이다. 그림 6에서의 각 빔패턴들은 아래쪽부터 위로 $k=1, 2 \dots 7$ 에 해당한다. 그림 5(a)는, A1에 아무런 물체도 없을 때, 출력은 거의 수직성분 편광임을 보여주

우리의 해석은 그림 1의 구조에 대해 행해졌지만, 이 해석

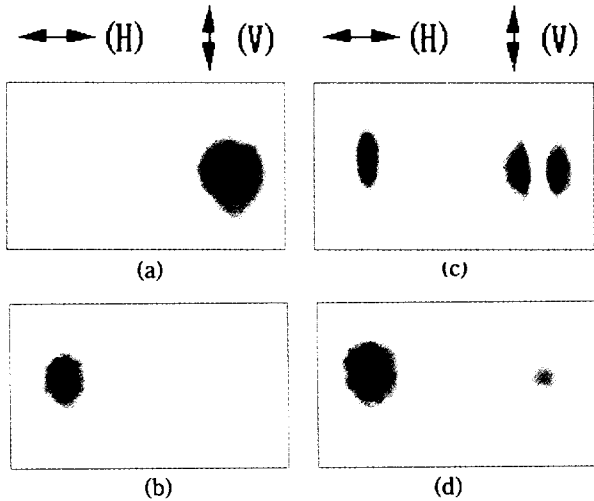


그림 5. 구현 실험에서 얻은 최종 출력의 각 편광 성분의 빔세기 사진(screen1). $N=7$ 인.
 (a) A1에 아무것도 없을 때 (b) 불투명 물체가 놓였을 때 (c) 세로로 길게 생긴 불투명 물체가 A1 면의 가운데 부분만을 막았을 때 (d) 완전히 투명한 물체이지만 위상지연이 π 일 때.

고 있다. 실제로 구현된 간섭계는 이상적이지 않기 때문에 수평성분의 빔은 배경잡음으로 존재한다. 측정된 수평성분에 대한 수직성분의 빔세기 비는 약 30이었다. 그림 6(a)는 A1에 물체가 없을 때, 입력($k=0$) 수평성분의 빔이 k 값에 따라 수직편광으로 바뀌는 모습을 보여주고 있다. 수직 성분의 빔이 점차 강해지는 것이 확실하지 않아 보이는 것은 시스템의 손실 때문에 전체적으로 빔세기가 감소하는 효과가 더해져 있기 때문이다. 그림 5(b) 및 6(b)는 A1에 불투명한 물체가 놓였을 때의 경우이다. 출력은 거의 수평편광이 되고 수직 편광에 대한 수평편광의 빔세기 비는 약 17이었다. 그림 5(c)는 A1면에 세로

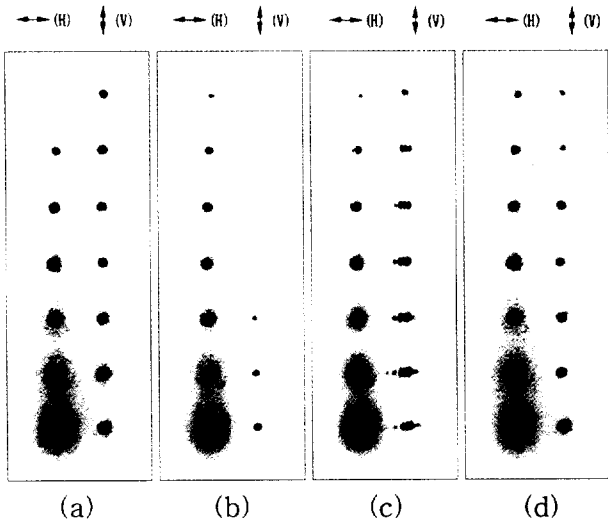


그림 6. 그림 5의 각 경우에 있어서, 7개의 빔이 분리되어 보이는 이미지 면 근처에서의 각 편광 성분의 빔세기 분포 사진 (screen2).

로 길쭉한 불투명 물체를 두어 A1면의 일부 빔경로를 차단했을 경우이다. 수직 성분과 수평성분의 빔이 서로 상보관계에 있음을 보여 주고 있으며 물체의 모양이 출력면에 나타남을 알 수 있다. 그림 6(c)는 그림 5(c)의 경우에 대한 전체 순환 빔을 나타내고 있는데, 수직 성분 빔에는 물체의 Fourier 변환 패턴^[6] (즉, Fraunhofer 회절 패턴)이 나타나 있음을 볼 수 있다. 그림 5(d)와 6(d)는 물체가 완전히 투명하고 위상변화가 약 π 인 경우이다. 이는 실제 물체를 둔 것이 아니고, 압전 소자를 제어하여 경로차를 변화시킴으로써 이와 같은 조건을 얻었다. 그림에서 6(d)에서 수직성분의 빔세기가 항상 약한 것을 알 수 있고, 출력 빔이 대체로 수평편광임을 볼 수 있다. 이는 위상 변화만 있는 물체라도 무작용 검출이 가능함을 의미한다.

IV. 토의 및 결론

사용하는 광학소자들의 유한 크기와 빔 spot 크기 때문에 $N=7$ 인 경우까지 구현할 수 있었다. 적절한 크기의 광학소자를 사용하면 한단계 높은 order의 N 을 쉽게 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 우리의 시스템 구조에서도 참고문헌^[2,4]와 같이 입력 빔의 세기를 매우 낮추어 1개 광자에 대한 실험을 수행할 수 있을 것이다.

광굴절 결정을 이용한 홀로그래피 메모리에서는 기록된 홀로그램 메모리를 읽을 경우 그 저장 메모리가 조금씩 지워지는 단점이 있다. 이를 방지하기 위해 열적 fixing을 하는 경우가 있는데^[7], 이는 대단히 불편하고 번거로운 과정이다. 광굴절 결정에 홀로그램을 기록하면 위상격자가 형성되므로, 홀로그램이 기록된 영역의 굴절율이 평균적으로 증가하고 빔을 회절시킨다. 즉 홀로그램이 있는 요소에서는 없는 부분에 비해 빔손실이 크고 또 추가의 위상변화가 발생한다. 만약 A1면에서의 물체와 입력 빔과의 상호작용이 작다는 것을 이용하면, 열적 fixing없이 여러번 읽어내더라도 좀체로 지워지지 않는 2진 홀로그램 메모리를 만들 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 논문에서는 완전히 불투명하지 않은 물체에 대해서도 원리적으로 무작용 검출이 가능함을 설명하였고, 이를 입증하기 위한 기초적인 실험이 수행되었다.

감사의 글

수치계산을 도와준 본 연구실의 신동학에게 감사한다. 본 연구는 한국과학재단 연구지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- [1] A. C. Elitzur and L. Vaidman, Found. Phys. **23**, 987 (1993).
- [2] E. H. D. M. van Voorthuysen, Am. J. Phys. **64**, 1504 (1996).
- [3] P. G. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger and M. A. Kasevich, Phys. Rev. Lett. **74**, 4763 (1995).
- [4] P. G. Kwiat, H. Weinfurter and A. Zeilinger, Sci. Am. **275**, Nov., 52 (1996).
- [5] J.-S. Jang, Conference on Laser and Electro-Optics, Pa-

- cific Rim'97 Chiba, Japan, July 14-19, 1997, Paper No. P92.
- [6] R. C. Jones, J. Opt. Soc. Am. **31**, 488 (1941).
- [7] A. Yariv, Optical Electronics (Saunders College Publishing, Fort Worth, 1991).
- [8] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill, New York, 1968).
- [9] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, A. J. Daiber, R. Snyder and L. Hesselink, Opt. Lett. **21**, 1615 (1996).

Properties of an optical interaction-free measurement system for nonopaque objects

Ju-Seog Jang

*Department of Telematics Engineering, Pukyong National University
Pusan 608-737, Korea*

(Received August 29, 1997)

An interaction-free measurement system with the polarization-based Mach-Zehnder interferometer structure is described. Properties of the system are investigated especially for nonopaque objects. Here it is shown that the interaction-free measurement of such objects is possible. Our system, whose detection efficiency corresponds to 70% in the sense of interaction-free measurement, was implemented and preliminary experiments were performed to show its feasibility.