

A Study of the Phase Relations Between the Reflected and Transmitted Light Waves at a Beam Splitter and Their Application to Interferometers

Byungwoo Son, Hee Joo Choi, Ju Eun Park, and Myoungsik Cha[†]

Department of Physics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received February 3, 2015; Revised manuscript March 25, 2015; Accepted March 26, 2015)

In an amplitude-splitting interferometer, a beam splitter divides an input beam into two parts, which are superposed after propagating along separate paths, producing an interference effect. We have investigated the phase relation between the reflected and transmitted light waves at BS's made of lossless dielectric stacks. If we define the phases with proper reference planes, a definite phase relation exists, irrespective of the detailed structure of the layers in the BS. Although this results from the generalized Stokes relations, we have verified it numerically for two representative BS's with symmetric and asymmetric layer structures respectively. When we applied the phase relation to interferometers, we could determine the superposition state of the output beam (either constructive or destructive interference) for a general BS, and could verify that the light's energy was conserved.

Keywords: Reflection, Interference, Beam splitters

OCIS codes: (120.5700) Reflection; (260.3160) Interference; (230.1360) Beam splitters

빔가르개에서 반사광과 투과광 사이의 위상 관계 고찰 및 간섭계 적용

손병우 · 최희주 · 박주은 · 차명식[†]

부산대학교 물리학과

Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

(2015년 2월 3일 받음, 2015년 3월 25일 수정본 받음, 2015년 3월 26일 게재 확정)

진폭 분할식 간섭계에서는 입력 빔을 빔가르개(BS)로 분리하고 서로 다른 경로를 거쳐 전파하게 한 다음 두 빔을 중첩시켜 간섭 효과를 일으킨다. 본 논문에서는 손실이 없는 유전체 층들로 이루어진 BS에서 반사와 투과로 분리된 두 광파 사이의 위상 관계에 대해 연구하였다. 적절한 기준면에 대해 위상을 정의하면 BS의 층 구조에 관계 없이 투과광과 반사광 사이에는 일정한 위상차가 있다는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 일반적인 Stokes 관계식으로 명백히 주어지나, 본 논문에서는 대표적인 대칭적/비대칭적 구조를 가진 두 BS 층에 대해 수치적으로 이를 증명해 보았다. 이 위상 관계로 인해 간섭계에서는 출력광의 중첩 상태(보강 혹은 상쇄 간섭)가 결정되고, 빛 에너지는 보존된다는 당연한 결과를 얻을 수 있었다.

Keywords: 반사, 간섭, 빔가르개

OCIS codes: (120.5700) Reflection; (260.3160) Interference; (230.1360) Beam splitters

I. 서 론

진폭 분할식 간섭계에서는 흔히 BS (beam splitter; BS)를 사용하여 입력광을 분리한 다음 서로 다른 경로를 전파시킨 후 이들을 다른 (혹은 같은) BS를 통해 중첩시키고, 그 결과 간섭 효과를 관측할 수 있다. Figure 1에는 대표적인 세 가지 간섭계(Michelson, Mach-Zehnder, Sagnac 간섭계)의 기본적인 구조를 도식적으로 나타내었다[1]. Michelson과 Sagnac

간섭계에서는 하나의 BS가 입력광을 분할하고, 동시에 되돌아오는 출력광을 결합하는 역할도 한다. 그러나 Mach-Zehnder 간섭계에서는 독립적인 BS를 사용하여 출력광을 결합한다.

대개 BS는 입력광을 반사와 투과에 의해 적절한 비율로 분할하기 위해 유전체 평판이나 유전체, 혹은 금속의 균일한 박막 형태, 혹은 이들이 층층이 쌓인 다층 구조로 만들어진다 (Fig. 2)^[2]. BS는 입력광을 분할하기도 하지만 되돌아오는 두 빔을 결합시켜 Fig. 2(b)와 같이 두 개의 출력광을 생성한

[†]E-mail: mcha@pusan.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

다. 이 때 중첩되는 두 광파의 위상차에 따라 두 출력광의 간섭 상태(보강 혹은 상쇄간섭)가 결정된다. 에너지 보존법칙을 바탕으로 직관적으로 생각하면 한 쪽 출력단에서 보강간섭이 일어나 최대 세기가 되면 다른 쪽에서는 상쇄간섭으로 최소 세기(두 빔의 세기가 같을 때는 출력이 없음)의 빛이 나올 것으로 예상된다. 이로부터 BS가 빛을 분할하거나 결합시킬 때 반사광과 투과광의 위상 사이에 특별한 관계가 필연적으로 있어야 한다는 사실을 통찰할 수 있다.

그러나 교육적인 목적으로 이러한 간섭계에서 단순히 한 쪽 경계면에서만 반사하는 유전체 BS를 가정하고 이와 같은 두 출력빔의 관계를 설명하는 경우가 많다. 즉, 굴절률이 작은 매질(예를 들어 진공 혹은 공기)에서 굴절률이 상대적으로 큰 유전체 경계면으로 빛이 입사할 때, 반사광은 π 만큼의 위상 변화를 겪고, 투과광의 위상 변화는 없다는 것과, 반대 방향으로 빛이 입사할 때는 반사광과 투과광 모두 위상 변화를 겪지 않는다는 것을 가정하면, 두 출력광 사이의 에너지 보존을 증명할 수 있다. 특히 Michelson 간섭계에서 분할된 두 빔의 광경로가 정확히 같을 경우 원칙적으로 Fig. 1(a)의 관측용 출력단에서는 상쇄간섭이, 광원쪽 출력단으로는 보강간섭이 예상된다. (이와 같은 현상이 일어나더라도 광경로가 정확히 같다는 사실을 검증하기는 쉽지 않다.)

그러나 Sagnac 간섭계에서는 분할된 두 빛이 반대 방향이지만 공통 경로를 전파한 다음 결합되므로 광경로는 정확히 같다 (Fig. 1(c)). 따라서 위와 같이 단순히 하나의 반사면을 가진 유전체 BS를 가정하면 항상 관측용 출력단에서는 상쇄간섭이 되고, 광원쪽 출력단으로 보강간섭이 일어남을 예측할 수 있다. 만약 입력광이 정확히 1:1로 분할되었다면 관측용 출력단에서는 아무런 빛이 나오지 않을 것이다³⁾. 물론 간섭계가 회전한다면 각속도에 비례하여 출력이 증가할 것이다.

그러나 위와 같은 간단한 설명은 두 가지 측면에서 오류를 가진다. 첫째, BS에 입사하는 빛의 편광과 입사각에 따라 반사광이 항상 π 위상변이를 겪지는 않는다. TM-편광에 대해서는 입사각이 편광각보다 커지면 반사계수의 부호가 바뀌어, 위상변이는 0이 된다^{1), 2)}. 둘째, 실제 대다수 BS는 Fig. 2와 같이 평행하게 쌓은 다수의 유전체 층들로 이루어지므로 위와 같이 반사광이 단순히 π 위상변이를 겪지 않는다는 사실이다. 이와 같이 경계면이 여러 개인 경우에는 반사광과 투과광에 대한 위상의 정의도 기준면을 어디로 잡느냐에 따

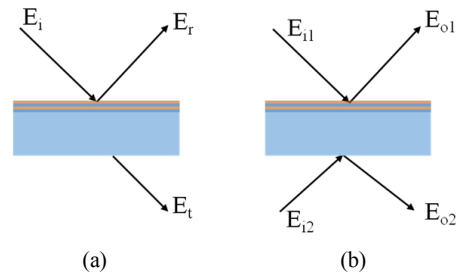


FIG. 2. Beam splitter made of multiple stacks of dielectrics, and its function of (a) beam splitting, and (b) beam combining.

라 달라지므로 중요한 것은 이들 사이의 상대적인 위상 관계이다.

반사광과 투과광 사이의 상대적인 위상차는 흔히 $\pi/2$ 로 알려져 있는데, 이는 대칭적인 유전체 층 구조를 가진 BS에 대해서만 사실이며, 두 광파에 에너지 보존법칙을 적용하여 유도된다^{4), 5)}. 그러나 일반적으로 비대칭적인 구조를 가진 BS (혹은 BS 양쪽 면을 서로 다른 매질이 둘러싸고 있는 경우)에 대해서는 에너지 보존법칙으로 이러한 위상 관계를 알아낼 수 없고, 전자기장의 시간 가역성을 사용하여야 한다^{6), 7)}.

본 연구에서는 투명한 유전체 층으로 만들어진 일반적인 층 구조를 가진 BS에서 일어나는 빛의 반사와 투과 현상에 대해 고찰하고, 이들의 크기 및 위상 관계가 간섭계의 두 출력의 상태에 미치는 영향을 계산해 보았다. 또한 전형적인 대칭/비대칭적 층 구조를 가진 BS에 대해 전달행렬(transfer matrix) 방법을 사용하여 반사계수와 투과계수를 계산하고, 이들 사이에 특정한 위상 관계가 항상 성립함을 검증하였다.

II. 일반적인 Stokes 관계식

단일 경계면에서 반사계수와 투과계수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다는 것이 기하광학적인 빛살의 가역성 원리로부터 쉽게 증명된다²⁾.

$$r^2 + tt' = 1 \tag{1a}$$

$$r' = -r \tag{1b}$$

여기서 r 과 t 는 매질 1에서 매질 2로 빛이 입사할 때의 반사계수와 투과계수이며, r' 과 t' 은 그 역방향으로 빛이 진행할 때의 반사와 투과계수이다. 일반적으로 Fresnel 계수들은 크기가 1보다 작거나 같은 복소수이나, 위와 같이 단일 유전체 경계면의 경우 이들 양이나 음의 실수로 설정할 수 있다.

그러나 다층 구조인 일반적인 BS에서 반사계수와 투과계수 사이의 관계는 빛살이 아니라 Maxwell 방정식의 시간 가역성에 근거하여 구할 수 있다^{3), 7)}. 이 과정을 간단히 요약하면 다음과 같다. 먼저 Fig. 3(a)에는 정방향으로 입사한 단색 전자기 평면파가 반사와 투과로 분할된 두 전자기파의 전기장을 표시하였고, Fig. 3(b)와 (c)는 시간을 거슬러 역방향으

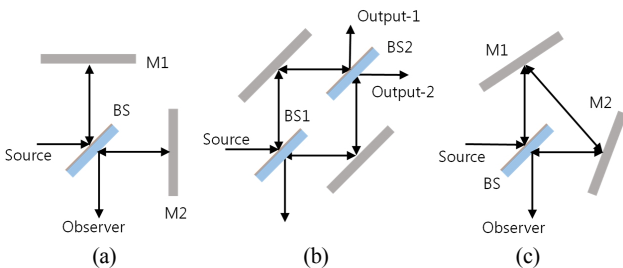


FIG. 1. Schematic diagrams of representative interferometers. (a) Michelson, (b) Mach-Zehnder, (c) Sagnac.

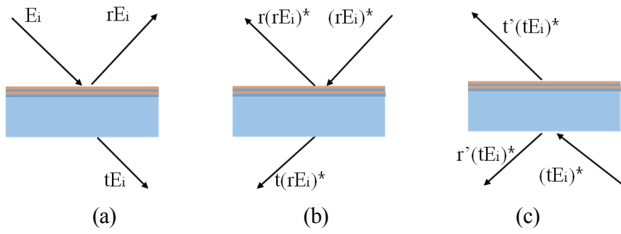


FIG. 3. Schematic diagrams describing reciprocity in a general beam splitter by conjugated fields.

로 진행하는 전자기파의 반사와 투과를 도식적으로 묘사하고 있다. 복소장으로 이 전자기파를 표현하는 경우 시간의 준부 $e^{-i\omega t}$ 를 제외하고 난 전기장 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 은 역진할 경우 그 복소공액인 $\mathbf{E}^*(\mathbf{r})$ 로 나타낼 수 있다. 반사파와 투과파가 각각 역진하는 Fig. 3(b)와 (c)를 중첩하면 (a)의 입력 전기장이 역진하는 결과와 같아야 하므로 다음과 같이 반사계수와 투과계수 사이에 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다^{3, 6, 7)}.

$$rr^* + t't^* = 1 \quad (2a)$$

$$r't^* + tr^* = 0 \quad (2b)$$

이것은 단순한 Stokes 관계식(식 (1))의 두께가 유한한 BS에 대한 일반화이다. (반사, 투과계수들이 모두 실수이면 식 (2)는 식 (1)로 환원된다.)

이 일반적인 Stokes 관계식의 의미를 파악하기 위해 복소 반사계수와 투과계수를 아래와 같이 크기와 위상으로 나누어 표시하자.

$$r = r_0 e^{i\phi_r} \quad (3a)$$

$$t = t_0 e^{i\phi_t} \quad (3b)$$

여기서 r_0 와 t_0 은 각각 반사계수와 투과계수의 크기이며, 1보다 작은 양의 실수이다. 프라임이 붙은 역방향 계수들(r' 과 t')에 대해서도 마찬가지로 정의한다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하고 정리하면, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\phi_t = \phi_r \quad (4a)$$

$$r_0^2 + t_0 t_0' = 1 \quad (4b)$$

$$r'_0 = r_0 \quad (4c)$$

$$\phi_r + \phi_r' = 2\phi_t \pm \pi \quad (4d)$$

이 결과식들의 의미는 다음과 같다.

- (a) 투과계수의 위상은 BS에 역방향으로 입사된 빛의 투과계수의 위상과 같다.

- (b) 이 식은 빔의 에너지 보존을 나타낸다. 즉, (반사율) + (투과율) = 1
- (c) 반사계수는 BS에 역방향으로 입사된 빛의 반사계수와 크기가 같다.
- (d) 두 역방향 반사계수의 위상들 사이에 관계가 있으나, 단일 경계면의 경우처럼 그 차가 항상 π 는 아니다.

또한, BS를 둘러싸고 있는 양쪽 매질이 동일하면 $t' = t$ 임을 보일 수 있다³⁾.

III. 간섭계 적용

3.1. Michelson 간섭계

먼저 BS의 구체적인 구조를 가정하지 않고, 일반적인 Stokes 관계식(식 (2))과 그 결과들(식 (4))을 Michelson 간섭계에 적용하여 출력광들의 세기를 계산해 보자. Figure 1(a)에서 관측용 출력단과 광원쪽 출력단으로 나오는 전기장은 각각 두 거울에서 반사되어 되돌아와서 BS에서 반사와 투과에 의해 결합되는 전기장들의 중첩으로 표시할 수 있다.

$$E_1 = rt + tr' e^{i\Psi} \quad (\text{관측용 출력단}) \quad (5a)$$

$$E_2 = r^2 + tt' e^{i\Psi} \quad (\text{광원쪽 출력단}) \quad (5b)$$

각 식에서 첫 항은 거울 M1로 갔다가 되돌아온 빛이 투과/반사된 전기장 진폭이고, 둘째 항은 거울 M2까지 갔다 온 빛이 투과/반사된 진폭이다. 여기서 입사광의 전기장을 1로 두었으며 Ψ 는 BS에서 두 거울 사이의 왕복 경로 (BS-M1-BS, BS-M2-BS) 차이 때문에 발생하는 위상차를 의미한다. 위상의 기준면은 E_1 의 경우 BS의 아랫쪽 표면이며, E_2 의 경우 BS의 윗면이다. 각 출력광의 세기는 식 (5)의 전기장의 절대치 제곱에 비례하며, 두 식에서 공통된 상수 인자를 생략하면 계산 결과는 다음과 같다.

$$I_1 = 4RT \cos^2\left(\frac{\phi_r - \phi_r' - \Psi}{2}\right) \quad (6a)$$

$$I_2 = 1 - 4RT \cos^2\left(\frac{\phi_r - \phi_r' - \Psi}{2}\right) \quad (6b)$$

여기서 $R = r_0^2$ 과 $T = t_0^2$ 은 각각 BS의 반사율과 투과율이다. 위 결과는 명백히 두 출력 빔에 대해 에너지 보존법칙이 성립함을 보여준다. BS의 반사율이 50%이면 ($R=1/2$) Michelson 간섭계 두 팔 사이에 적절한 경로차를 주어 두 출력단 중 하나로 빛이 모두 나갈 수 있게 만들 수 있다. 그러나 관측용 출력단의 세기(I_1)는 BS의 반사율에 관계 없이 0이 될 수 있음을 알 수 있으며, 간섭무늬는 원칙적으로 항상 최선의 대조도를 유지한다. 또한, 비대칭적인 층 구조를 가진 BS를 사용하면 기하학적인 경로차가 0이 되더라도 $\phi_r \neq \phi_r'$ 이므로

대칭 구조의 BS나 단일 반사면을 가진 유전체 BS를 사용하는 경우처럼 I_1 이 0이 되지 않는다. (물론 경로차가 정확히 0인 것을 다른 실험으로 검증하기는 쉽지 않을 것이다.)

3.2. Sagnac 간섭계

위와 같은 논의를 Sagnac 간섭계에 대해 해보자. Figure 1(c)에서 관측용 출력단과 광원쪽 출력단으로 나오는 전기장은 BS에서 분할된 두 빔이 각각 시계방향과 반시계방향으로 돌아와서 같은 BS에서 반사와 투과에 의해 결합되는 전기장들의 중첩으로 표시할 수 있다.

$$E_1 = rr' + t^2 \quad (\text{관측용 출력단}) \quad (7a)$$

$$E_2 = rt' + tr \quad (\text{광원쪽 출력단}) \quad (7b)$$

각 식에서 첫 항은 시계방향으로 돈 빛이 반사/투과된 전기장의 진폭이고, 둘째 항은 반시계방향으로 돈 빛이 투과/반사된 전기장의 진폭이다. 이 경우는 Michelson 간섭계와는 달리 두 빔이 방향만 다를 뿐 공통 경로를 지나므로 경로차로 인한 위상차는 없다. 각 출력광의 세기는 식 (7)의 전기장을 절대치 제곱하여 다음과 같이 구해진다.

$$I_1 = (T - R)^2 = (1 - 2R)^2 \quad (8a)$$

$$I_2 = 4RT = 4R(1 - R) \quad (8b)$$

유전체 BS에서는 에너지 손실이 없으므로 $T = 1 - R$ 임을 이용하였다.

위 결과 또한 명백히 두 출력 빔에 대해 에너지 보존법칙이 성립함을 보여준다. BS의 반사율이 50%이면 ($R=1/2$) 광원쪽 출력단으로 빛이 모두 나가고, 관측용 출력단에는 아무런 출력이 나오지 않는다 ($I_1 = 0$). 이는 단일 반사면을 가진 유전체 BS를 사용한 경우와 같은 결과이며, BS 구조의 대칭성에도 무관하다. 그러나 반사율이 50%보다 조금이라도 작거나 크면 관측용 출력단에서 나오는 빛은 상쇄간섭을 하지만 완벽히 소멸되지는 않는다. 반사율이 매우 작거나 1에 가까우면 반대로 관측용 출력단에서 보강간섭이 예상된다.

IV. 빔가르개에서 일반적인 Stokes 관계식 검증

4.1. 전달행렬

단일 유전체 평판으로 이루어진 BS와 같이 두 경계면을 가진 계에 대해서는 단일 경계면의 경우와 마찬가지로 전자기장의 경계조건을 만족시켜 반사율과 투과율을 해석적으로 구할 수 있다^[8]. 그러나 경계면의 수가 많아질수록 반사율과 투과율의 해석적인 표현은 급격히 복잡해지므로 체계적인 계산이나 해석이 어렵다. 따라서 여기서는 전달행렬(transfer matrix) 방법을 사용하여 구체적인 구조를 가진 BS의 투과계수와 반사계수를 수치적으로 계산하였다. 여기서 사용한 행

렬법은 Heavens의 논문에 정리된 방식이며^[9], 흔히 광학 교과서에 소개된 방법^[1-3]과는 다른 형태를 가짐을 유의하자. 이 행렬법의 특징은 각 매질 층의 정(투과)방향과 역(반사)방향의 전기장과 자기장들에 대해 경계조건을 적용시켜 평행 다층구조 계의 전달행렬을 구하고, 이것으로부터 반사계수와 투과계수를 구하는 것이다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다. (여기서는 입사광이 TE-편광인 경우에 대해서만 논하였다.) $N-1$ 개의 평행 경계면으로 이루어진 전체 계의 행렬은

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{0 \rightarrow 1} \cdot \mathbf{M}_{1 \rightarrow 2} \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_{N-1 \rightarrow N} \quad (9)$$

와 같이 2×2 행렬로 표시되며, 투과 및 반사 전기장으로 이루어진 벡터 $\begin{bmatrix} E_t \\ E_r \end{bmatrix}$ 을 그 이전 층의 벡터와 연결시켜주는 전달행렬들을 순서대로 곱하여 구해진다. m 번째 층에서 $(m+1)$ 번째 층으로 가는 행렬은

$$\mathbf{M}_{m \rightarrow m+1} = \frac{1}{t_{m \rightarrow m+1}} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_m} & r_{m \rightarrow m+1} e^{-i\phi_m} \\ r_{m \rightarrow m+1} e^{i\phi_m} & e^{i\phi_m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

와 같이 표시된다. 여기서 $r_{m \rightarrow m+1}$ 과 $t_{m \rightarrow m+1}$ 은 각각 m 번째 층에서 $(m+1)$ 번째 층으로 빛이 진행할 때 그 경계면에서의 Fresnel 반사계수와 투과계수이며,

$$\phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_m \cos \theta_m \quad (11)$$

은 m 번째 층을 빛이 전파하면서 겪는 수직 방향의 위상변이이다. n_m 은 m 번째 층 유전체 매질의 굴절률, λ 는 진공 중에서 빛의 파장이다. BS에 입사하기 직전의 전기장은 마지막 경계면을 나온 직후의 전기장과

$$\begin{bmatrix} E_{0,t} \\ E_{0,r} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_{N,t} \\ E_{N,r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

와 같이 전체 계의 전달행렬로 관계되므로, 투과계수와 반사계수는 아래와 같다. 여기서, 명백히 빛이 나가는 매질에서 반사율은 없으므로 ($E_{N,r} = 0$), 투과계수와 반사계수는 각각 아래와 같이 주어진다.

$$t = \frac{E_{N,t}}{E_{0,t}} = \frac{1}{M_{11}} \quad (13a)$$

$$r = \frac{E_{0,r}}{E_{0,t}} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (13b)$$

결국 반사 및 투과계수를 구하는 문제는 전체 계의 전달행렬의 두 성분 M_{11} 과 M_{21} 을 구하는 문제로 귀착된다. 여기서

유의할 점은 BS 입사 전 ($m=0$) 전기장들의 위상은 첫 번째 경계면을 기준으로, BS를 나온 후 ($m=N$) 전기장의 위상은 빛이 나오는 마지막 경계면을 기준으로 정의된다는 것이다. 이것은 앞서 III 장에서 다루었던 간섭계에서와 일치하는 위상 정의이다. (참고문헌 [8]에서는 경계조건을 풀 때 투과광과 반사광의 위상이 모두 첫 번째 경계면을 기준으로 정의되었으므로 간섭계에 적용할 때 매질 두께에 따른 투과율의 위상변이를 더해 주어야 한다^[4].)

이제 다음 두 종류의 BS에 대해 이 방법을 적용하여 반사계수와 투과계수를 수치적으로 구하고, 이들 사이에 일반적인 Stokes 관계식(식 (2), (4))을 검증해 보자.

4.2. 단일 유전체 평판 BS

먼저 단일 유전체 평판으로 이루어진 BS에 대해 전달행렬 방법으로 반사율과 투과율을 계산해보고, 그 결과가 일반적인 Stokes 관계식을 만족하는지 검증해 보자. 실험에 흔히 사용되는 마이크로미터 단위 두께의 pellicle BS나, 한 쌍의 프리즘을 좁은 간격을 두고 붙인 정육면체(cube) BS가 이 경우에 해당된다. Figure 4는 빛이 진공에서 두께 1.70λ , 굴절률 1.5인 pellicle BS에 입사하고 다시 진공으로 나가는 경우 반사와 투과계수를 입사각의 함수로 계산한 결과이다. 이 경우는 구조가 대칭적이므로 정방향과 역방향의 구분이 없다. 즉, $r' = r$, 그리고 $t' = t$. 수치 계산 결과 Fig. 4(a)와 같이 에너지 보존 ($R + T = 1$)을 확인할 수 있는데, 이는 일반적인 Stokes 관계식 중 식 (2a)를 검증한 것이다.

Figure 4(b)에는 투과계수와 반사계수의 위상을 보였다. 두 위상각은 입사각에 따라 변하지만 항상 $\pm\pi/2$ 의 일정한 차이를 가진다. (그러나 이 $\pi/2$ 위상차는 다음 절에서 보인 것처럼 이것은 대칭적인 층 구조에 대해서만 유효하며, 식 (2d)에서 $\phi_r = \phi_t$ 인 특수한 경우이다.) Figure 4(b)의 특정 입사각에서 투과계수의 위상(파선)이 불연속적으로 뛰는 것은 본

수치해석 프로그램에서 위상각을 0에서 2π 사이의 값으로 표시하기 위해 음의 각에 2π (360°)를 더한 것에 지나지 않으며, 실제로는 연속적인 변화를 의미한다. 그러나 반사계수의 불연속적인 위상 뒹은 물리적인 의미를 가진다. Figure 4(a)와 (b)를 비교해 보면 반사율이 0인 입사각을 지날 때마다 위상이 π 만큼 뒹을 관찰할 수 있다. 이 불연속적인 π 위상변이는 복소평면에서 반사계수 r 이 원점을 통과할 때 필연적으로 동반된다^[5].

여기서 보이지는 않았지만 진공 혹은 공기층 간격에서 전 반사가 일어나는 cube BS에 대해서도 위와 같은 사실을 확인할 수 있었다. 특히, 굴절률이 1.5인 유리 사이에 두께 0.26λ 인 공기층을 두면 전반사가 적당히 무너지면서 (frustrated total internal reflection) 1:1의 출력비에 가깝게 빔을 분할하는 BS를 구현할 수 있었다.

4.3. 유전체 다층 박막으로 이루어진 빔가르개

고반사 유전체 코팅은 굴절률이 크고(H) 작은(L) 유전체 박막을 교대로 1/4 파장 두께로 쌓아 만들 수 있다^[2]. 여기서는 굴절률이 서로 다른 2층 구조(HL)로 이루어진 비대칭적인 BS를 고려하였다. 굴절률은 $n_H = 2.4$, $n_L = 1.38$ 로 두었고, 두께는 45도 입사를 고려하여 각각 0.10λ 와 0.14λ 로 두었다. 이러한 BS는 유리 기판 위에 TiO_2 와 MgO 를 교대로 진공 증착하여 제작할 수 있다. 실제 BS는 파장에 비해 매우 두꺼운 ($\sim 5000\lambda$) 기판 위에 이러한 다층구조를 만들고, 반대쪽 면에는 무반사 코팅을 하여 한쪽 면에서만 빛을 반사하도록 한다. 그러나 레이저와 같이 지름이 작은 입사 빔을 사용하고 큰 입사각을 유지할 경우 뒷면의 반사는 공간적으로 분리되어 무시할 수 있으므로 이와 같이 간단한 2층 구조로도 실제 비대칭적인 BS의 핵심을 설명할 수 있다.

이 BS에 대해 전달행렬을 계산한 결과를 Fig. 5에 보였다. 식 (4)에서 예측한 대로 정방향과 역방향 반사율 및 투과율

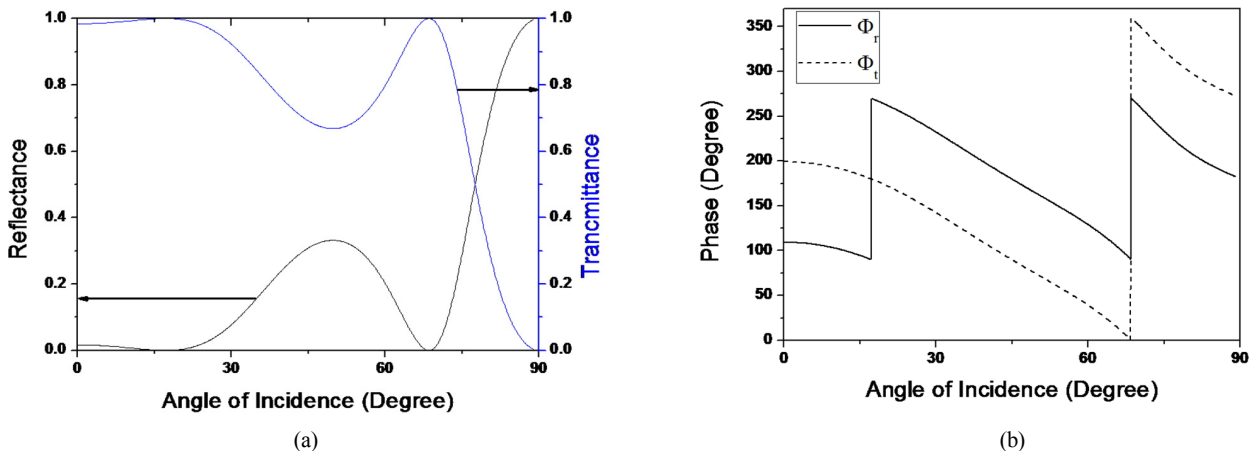


FIG. 4. Results obtained by transfer matrix calculation for a beam splitter made of single dielectric slab (thickness 1.70λ , $n = 1.5$). (a) Transmittance and reflectance, and (b) phases for the reflection and transmission coefficients as a function of angle of incidence.

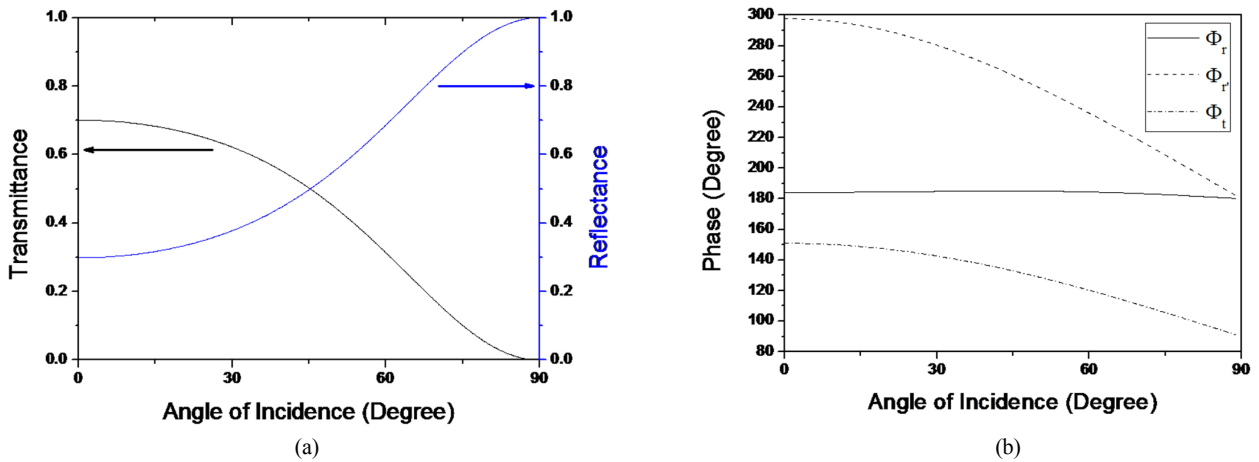


FIG. 5. Results obtained by transfer matrix calculation for a beam splitter made of two dielectric layers (first layer: thickness 0.10λ , $n = 2.4$, second layer: thickness 0.14λ , $n = 1.38$). (a) Transmittance and reflectance, and (b) phases for the reflection and transmission coefficients as a function of angle of incidence. Reversing the direction changed the phase of the reflection coefficient (ϕ_r') only.

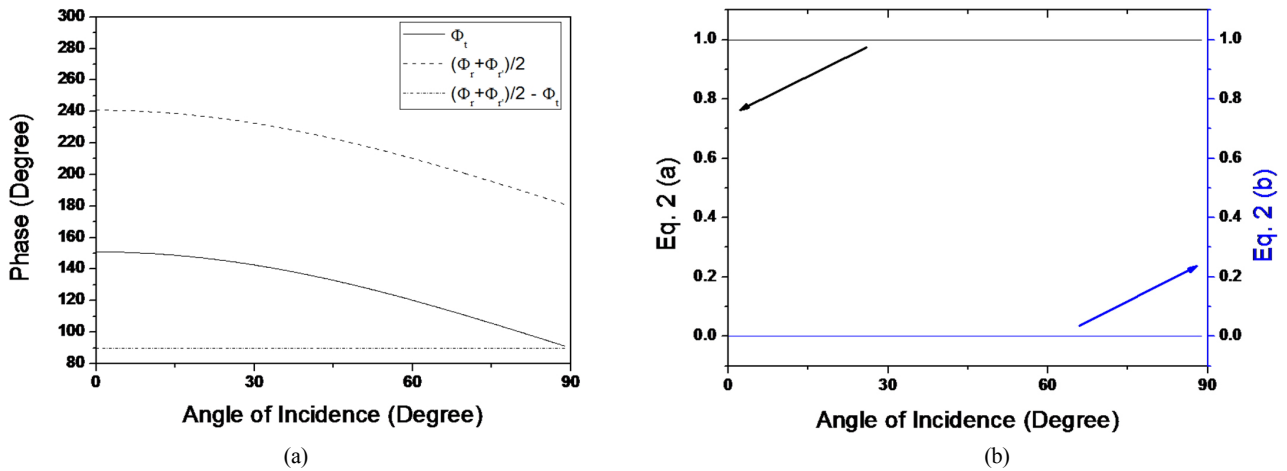


FIG. 6. (a) Plots showing the average of the phases of the reflection coefficients in forward and reverse directions (dash), and its constant difference of 90° (dash-dot) from the transmission coefficient. (b) Plots verifying the Stokes relations in Eqs. 2(a) and (b).

은 서로 같았으므로 역방향은 따로 보이지 않았다. Figure 5(a)에서 에너지 보존법칙(식 4(b))이 성립됨을 확인할 수 있다. Figure 5(b)는 반사계수와 투과계수의 위상을 정방향 및 역방향에 대해 계산한 결과를 보인 것이다. 예측했던 대로 투과계수는 크기와 위상이 서로 같았지만 ($t' = t$), 반사계수의 위상은 정방향과 역방향이 서로 달랐으며, 반사계수와 투과계수 사이의 위상차는 $(\phi_r - \phi_t, \phi_r' - \phi_t$ 어느 것이나) 앞서 예를 든 대칭적인 BS와 같이 $\pi/2$ 가 명백히 아니다.

Figure 6(a)에는 위의 계산 결과로부터 정방향과 역방향 반사계수의 위상 평균값과 투과계수의 위상 및 그 차이를 나타내었다. 이 차이 값은 항상 $\pi/2$ 위상차를 가지는데 이것은 식 (4d)를 검증한 것이다. Figure 6(b)에는 위의 전달행렬 계

산 결과로부터 식 (2)의 좌변을 계산하여 입사각의 함수로 나타낸 것이다. 두 식은 각각 1과 0의 일정한 값으로 계산되어 원래의 일반적인 Stokes 관계식을 검증하고 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 빔가르개(BS)에서 반사광과 투과광 사이의 일반적인 관계인 Stokes 관계식을 근거로 두 광파 사이의 위상 관계를 고찰해 보았다. 이러한 위상 관계는 간섭계에서 출력광들의 간섭 상태를 결정하는 데 바탕이 되며, 그 결과 이들 사이에 에너지 보존이 성립된다는 것을 Michelson과 Sagnac 간섭계를 예를 들어 보았다. BS의 빔 분할 비율이 1:1에 가

까우면 Sagnac 간섭계에서는 BS의 구체적인 구조에 무관하게 관측용 출력단에 항상 상쇄간섭이 나타나는 반면, Michelson 간섭계에서는 (두 팔의 기하학적인 경로가 정확히 같은 경우) 관측용 출력단에서의 세기는 BS의 상세 구조에 의존한다. 또한 단일 유전체 평판 BS와 2층의 유전체 BS 두 가지의 구체적인 구조에 대해 일반적인 Stokes 관계식이 성립함을 전달행렬 방법을 써서 수치적으로 검증해 보았다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. E. Hecht, *Optics*, 4th ed. (Addison Wesley, San Francisco, USA, 2002).
2. F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction*

- to Optics*, 3rd ed. (Addison Wesley, San Francisco, USA, 2007).
3. A. Lipson, S. G. Lipson, and H. Lipson, *Optical Physics*, 4th ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011).
4. H. M. Lai, A. F. Leung, and P. Y. Wong, "p/2 phase difference between the transmitted and the reflected optical fields of a symmetric dielectric plate," *Am. J. Phys.* **53**, 1103 (1985).
5. J. Lekner, "The phase relation between reflected and transmitted waves, and some consequences," *Am. J. Phys.* **58**, 317 (1990).
6. M. W. Hamilton, "Phase shifts in multilayer dielectric beam splitters," *Am. J. Phys.* **68**, 186-191 (2000).
7. M. Mansuripur, *Classical Optics and Applications*, 2nd ed. (Pearson, New York, USA, 1996).
8. M. S. Kwon, "Measurement of refractive index of flat optical material by critical angle method," M. S. Thesis, Pusan National University (2008).
9. O. S. Heavens, "Optical properties of thin films," *Reports on Progress in Physics*, **23**, 1-65 (1960).