

# 광자의 편면편광에 대한 실험적 고찰

이원진 · 성덕용 · 이명호 · 박혜정 · 박경석

대구산업전문대학 부설 안경광학연구소

두 편광자와 세 편광자를 사용하여 마루스 법칙을 실험적으로 확인한 결과, 두 편광자인 경우에는  $\phi = \cos^2\theta$ 의 식을 잘 만족하였고, 세 편광자인 경우에는  $\Phi = \frac{1}{4} \sin^2 2\theta$ 의 식을 만족함을 알 수가 있었다.

## Experimental Consideration for Plane Polarization of Photon

Won Jin Lee, Duck Yong Sung, Myung Ho Lee, Hei Jung Park  
and Kyung Suk Park

Laboratory of Ophthalmic Optics, Taegu Polytechnic College

We studied the Malus's law for two and three polarizers experimentally. It was satisfied for two polarizers such as  $\phi = \cos^2\theta$ , for three polarizers such as  $\Phi = \frac{1}{4} \sin^2 2\theta$ .

### I. 서 론

빛은 시료 표면에서 반사하면 그 편광상태가 달라진다. 반사광의 편광상태가 물질의 광학적 성질과 층의 두께 등에 의하여 달라진다는 사실은 약 10여년 전에 Drude에 의해 발견되어 전기화학분야를 시점으로 다양한 분야에 응용되고 있다.

본 연구에서는 광자(photon)의 편면편광에서 두 편광자의 편광면 사이각( $\theta$ )의 변화에 따르는 편광된 광자의 flux( $\theta$ )에 관한 것과 세 편광자의 편광면 사이각 변화에 대한  $\theta$ 의 관계인 마루스의 법칙을 photon noise 실험장치를 사용하여 검증하고자 한다.

### II. 이 론

일반적인 광자의 파동 함수는 다음과 같이 표현된다.<sup>[1]</sup>

$$\Psi = \begin{pmatrix} \alpha(\cos\theta \cos\phi + i\sin\theta \sin\phi) + \beta\cos\delta \\ \alpha(\sin\theta \cos\phi + i\cos\theta \sin\phi) + \beta\sin\delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 주축과 x축 사이의 각을 나타내고,  $\alpha$ 는 편광된 광의 probability amplitude를 나타낸다. 또한  $\beta$ 는 비편광된 광의 probability amplitude를 나타내고,  $\delta$ 는 random angle이다. 이 때의 파동함수를 규격화하면  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 이 된다. 그리고 photon wave의 편광상태와 편광자(polarizer)를 matrix로 표현하면 다음과 같

다.<sup>[1,2]</sup>

(가) photon wave의 편광상태

$$\Psi = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\phi + i\sin\theta \sin\phi \\ \sin\theta \cos\phi + i\cos\theta \sin\phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

(나)  $\theta$ 방향의 편광자

$$P_\theta = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta \cos\theta \\ \sin\theta \cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

(2)와 (3)식으로부터 두 편광자를 투과한 photon flux는

$$\theta = \cos^2\theta \quad (4)$$

이다. 또한 세 편광자에서도 처음 편광자의 편광면과 세 번째 편광자의 편광면과의 사이각이  $90^\circ$ 이고, 두 번째 편광자의 편광면을 변화시키면 편광된 photon flux는

$$\Phi = \frac{1}{4} \sin^2 2\theta \quad (5)$$

가 된다. 이 두 현상을 프랑스의 Malus<sup>[3]</sup>가 고전적으로 설명하였으며, 이를 Malus의 법칙이라 한다.

### III. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 장치의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같으며 광을 검출하기 위하여 사용한 PM tube는 Hamamatsu사의 931A이며, 이 tube는 400 nm에서 최대의 peak 감도를 가지고 있으며 photocathode는 Cs-Sb의 물질이 입혀져 있다. PM tube의 파장 특성은 Fig. 2와 같다. 광원은 일반 수은등을 사용하였고, 측정된 수은등의 파장별 상대강도는 Fig. 3과 같다. PM tube의 감도와 수은등의 상대강도를 보정하기 위하여 파장 435.8 nm의 dark blue filter를 사용하였다.

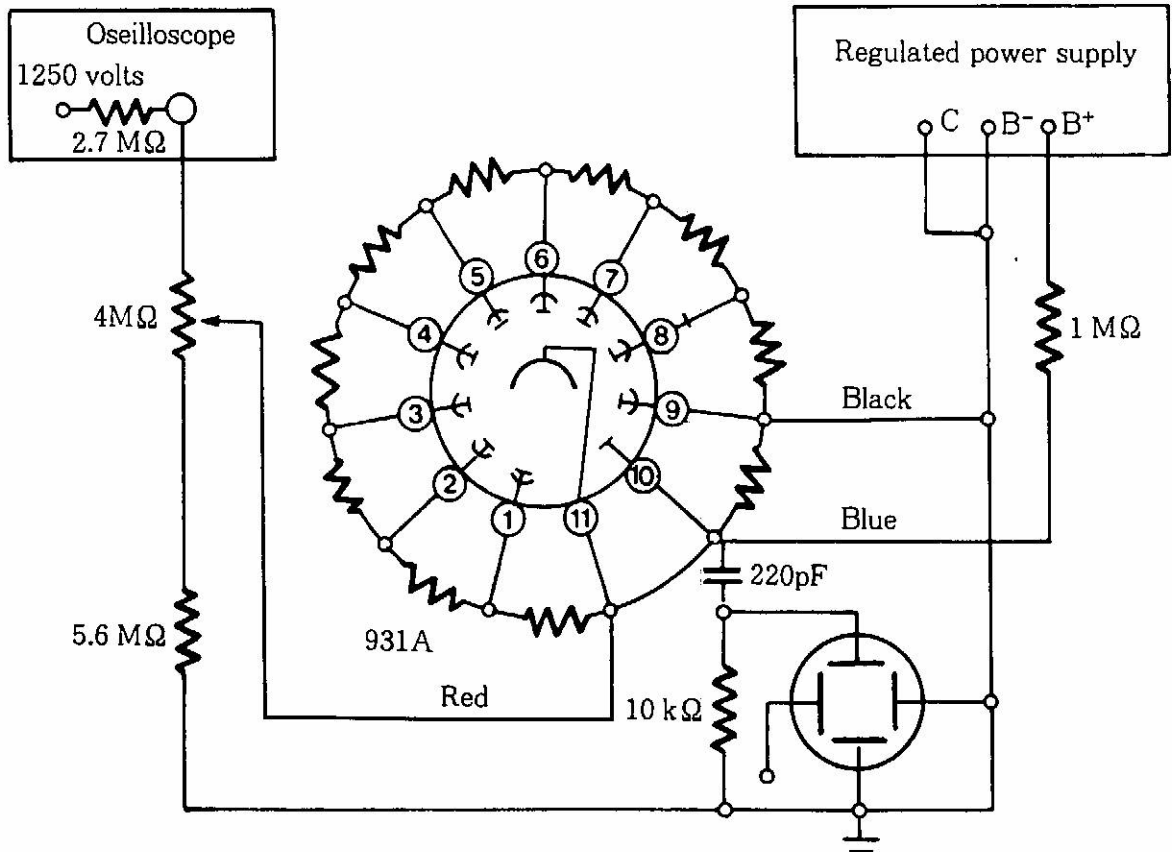


Fig. 1. 개략적인 실험장치 구성도

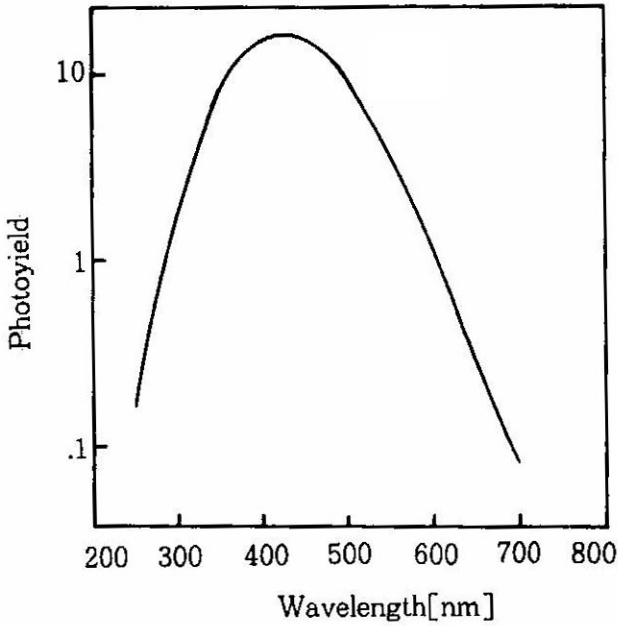


Fig. 2. PM tube(931A)의 분광 감도 특성

실험에 사용한 편광자는 H-type의 polaroid 이고, 이 편광자는 polyvinyl alcohol막에 옥소 (iodine)를 흡수시켜서 만든 것이다. 이 때 사용한 옥소는 중합체 형태(한쪽 방향의 편광에 대한 흡수율이 수직 방향 흡수율의 100배)로 옥소간의 간격은  $3.10\text{\AA}$ 으로 규칙적이다.

오실로스코프에서 peak to peak 간격을 40 칸으로 고정하였고, 가변저항은  $5M\Omega$ 을 사용하였으며, DC power는 350V를 사용하였다. 광원과 PM tube와의 거리는 13.5 cm로 고정시키고 편광자의 각( $\theta$ )을 변화시키면서 오실로스코프에서 전압의 변화( $\Delta V$ )를 측정하였다.<sup>[1]</sup> 이 때 전체 실험은 주변광에 의한 오차를 줄이기 위하여 암실에서 수행하였다.

#### IV. 실험결과 및 분석

두 편광자를 사용하는 경우 편광면 사이의 각을 변화시키기에 따른 편광된 광자의 flux는 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 두 편광면 사이의 각이  $\pi/2$ 와  $3\pi/2$ 에서 편광된 광자의 flux는 관측되지 않았으며,  $0, \pi, 2\pi$ 의 각에서는 flux가 최대인 결과를 얻을 수 있었다.

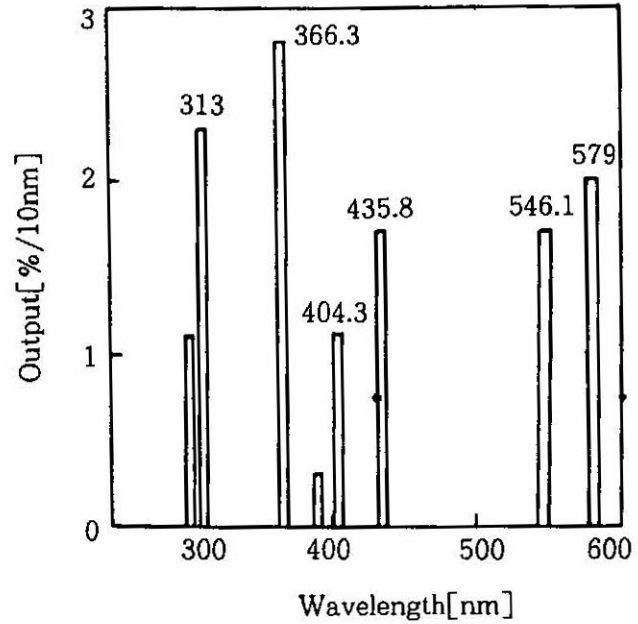


Fig. 3. 수은등의 파장별 상대강도 분포

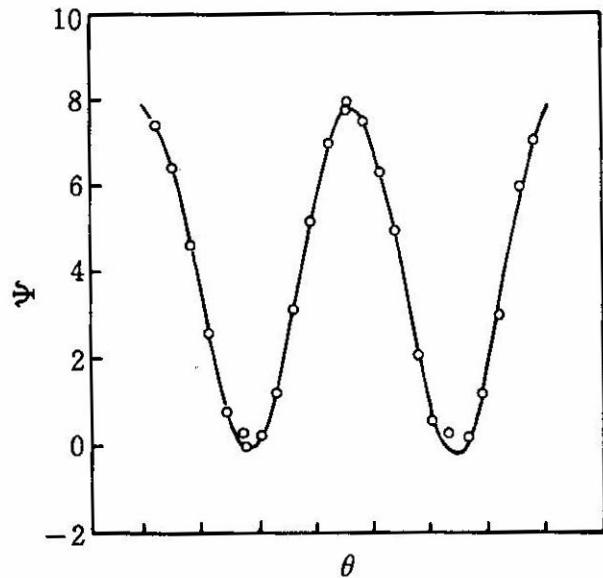


Fig. 4. 두 편광면의 각도 변화에 따른 광자의 flux.

이와 같은 결과를 기초로 하여 두 편광자에서 마류스의 법칙인 (4)식의 만족 여부를 확인하기 위하여 Fig. 5에서  $\cos^2\theta$ 의 변화에 따른 광자의 flux를 나타내었다. 측정결과 허용된 오차 범위내에서 둘 사이에는 만족할만한 선형성을 확인할 수가 있었으며, 그래프의 기울기로

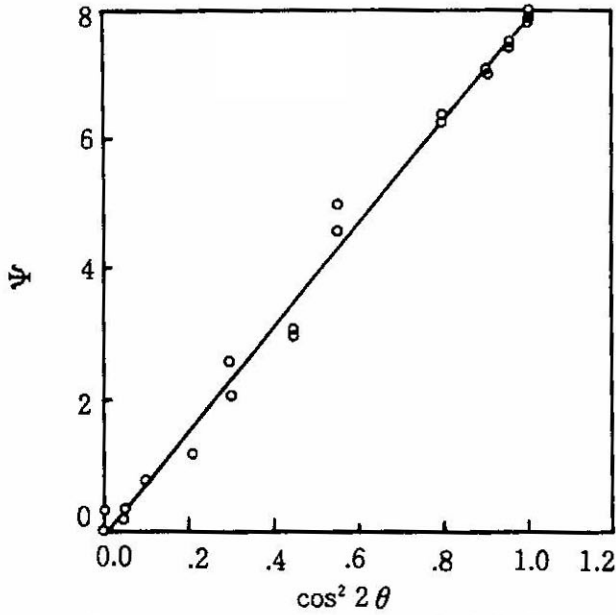


Fig. 5.  $\cos^2 2\theta$ 의 변화량에 따른 광자의 flux.

부터 비례상수는 8 정도임을 알 수가 있다. 초기 광자의 세기를 나타내는 기울기에는 다음 식에서와 같은 항들과 관계가 있다.

$$I(0) = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 광속도를 나타내고,  $\epsilon_0$ 는 진공중에서의 유전율을 나타내며,  $E_0$ 는 광자의 전기장 성분을 나타낸다. 이 때의 기울기 값은 편광자의 상태, 편광자의 편광정도 등에 의존하는 상수이며, 이를 이용하여 초기 광자의 세기를 구할 수가 있다.

첫 번째 편광자와  $90^\circ$ 만큼 편위된 세 번째 편광자를 위치시켰을 때, 두 번째 편광자의 편광면을 변화시키면서 측정한 광자의 flux를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때 flux는 Fig. 4의 결과와 유사한 모양을 가지나, 단지 flux의 크기는  $1/4$  정도로 줄어들었다. 첫 번째와 두 번째 편광자 사이의 각의 변화에 따라서  $0, \pi/2, \pi$ 에서는 광자가 검출되지 않았으며,  $\pi/4, 3\pi/4$ 에서는 최대의 광자 flux를 얻을 수 있었다.

두 광자에서와 동일한 방법으로 마류스 법칙의 만족 여부를 확인하기 위하여  $\sin^2 2\theta$ 의 변

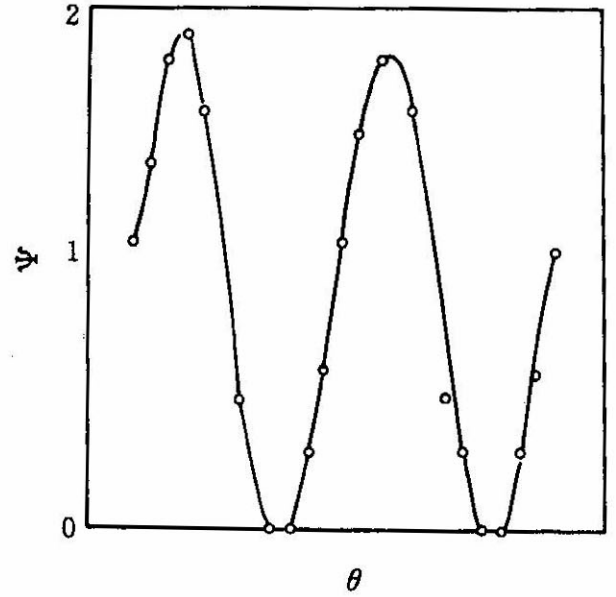


Fig. 6. 세 개의 편광자에서 두 번째 편광자의 각도 변화에 따른 광자의 flux.

화에 따른 flux의 양을 조사한 결과가 Fig. 7에 제시되어 있다. 광자의 세기는 두 편광자의 경우에 비하여  $1/4$  정도이나,  $\sin^2 2\theta$ 의 변화에 따라서 광자의 flux는 선형성을 만족하였다. 또한 이 때의 기울기는 2 정도로서 (5)식의 결과를 잘 만족함을 확인할 수가 있었다.

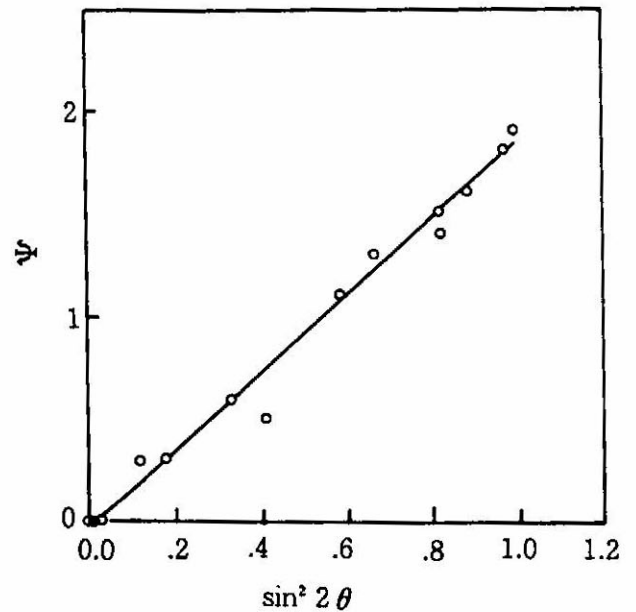


Fig. 7.  $\sin^2 2\theta$ 의 변화량에 따른 광자의 flux.

이상에서 두 편광자와 세 편광자를 사용하여 마루스 법칙을 실험적으로 확인을 하였으며, 허용된 오차 범위 내에서 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

## V. 결 론

광자의 평면편광에서 두 편광자를 투과한 photon flux는 두 편광자의 편광면의 사이각( $\theta$ )에 대하여 (4)식과 같이 변화하고 세 편광자를 투과한 photon flux는 처음 편광자의 편광면과 세 번째 편광자의 편광면이  $90^\circ$ 일 때는 두 번째 편광자의 편광면과 첫 번째 편광자의 편광면의 사이각( $\theta$ )에 대하여 식(5)와 같이 변화

한다. 그리고 이것은 편광된 flux만을 계산하는데 있어서 고전적 현상과 양자적 현상 사이에 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Berkeley Physics, Laboratory Physics Part C. (McGraw-Hill), p37.
- [2] Baym Gordon, Lectures on quantum mechanics, p5.
- [3] Francis A. Jenkins, Optics, p514.
- [4] Eyvind H. Wichmann, Quantum Physics.
- [5] Berkeley Physics, Laboratory Physics Part B(McGraw-Hill), p99.