

비정질 As_2S_3 를 중간층으로 하는 Fabry-Perot 에탈론에서의 광쌍안정에 관한 연구*

김강호 · 김석원 · 한성홍
울산대학교 물리학과, 울산 680-749

(1997년 7월 29일 받음)

광학 다층박막 증착법으로 비정질 As_2S_3 를 중간층으로 하고 앞뒷면 거울의 반사율을 다르게 한 비대칭 Fabry-Perot 에탈론을 구성하고 광의 편광에 따른 광쌍안정 현상을 관찰하였다. 사용된 중간층의 광학적 두께는 광원인 Ar^+ ($\lambda=514.5$ nm) 레이저 광에 대하여 2 λ 가 되도록 하였다. Ar^+ 레이저의 출력이 80~100 mW 일 때 광쌍안정 현상이 관측되었고, 입사되는 광의 각 편광상태에 따라 반사와 투과하는 광의 경향이 서로 다를 수 있었으며, 이는 광의 편광에 따른 비대칭 Fabry-Perot 에탈론내에서의 위상차가 입사광의 세기에 따라 다르기 때문인 것으로 해석되어 질 수 있다.

I. 서 론

광쌍안정 현상은 1969년 처음 이론적으로 제시된 이후^[1], 지난 30년 가까이 비선형 광학의 이론과 실험의 양 분야에서 많은 관심의 대상이 되어 왔다.^[2-5] 초기에는 주로 광쌍안정을 나타내는 물질과 그 구조에 관하여 연구가 이루어져 기체^[6], 반도체^[7], 액정^[8]등의 물질에서 이러한 현상이 나타남이 알려졌으며, 최근에는 기존의 통신방법으로는 많은 양의 정보를 처리하고 분석하는데 어려움이 발생함에 따라 전자 시스템의 성능 향상과 더불어 새로운 개념의 정보처리 시스템 개발의 핵심 기술로서의 광쌍안정에 관한 연구가 이루어지고 있다. 특히, 완전 광 시스템(all optical system)의 구현을 위한 광 교환 광 논리 소자의 개발이 필요한데, 광쌍안정 현상은 광 논리 소자^[9]의 구현에 응용될 수 있다. 또한 이러한 광쌍안정 현상은 광 스위치 소자^[10], 광 트랜지스터^[11] 등의 구현에도 응용이 가능하므로 더욱더 관심의 대상이 되고 있다. 1976년 처음으로 구현이 되었던 Fabry-Perot 에탈론에서의 광쌍안정현상^[12]은 광 병렬 처리^[13], 유형 인식^[14], 신호 발송^[15]등의 분야에 사용 가능성이 있어서 특히 많은 연구가 이루어져 왔다.

광의 편광상태에 의존해서 나타나는 편광형 광쌍안정 현상은 레이저 다이오드와 같은 능동형소자^[16]에서 뿐만 아니라 수동형소자^[17]에서도 나타나는데, 이러한 현상은 소자 내에서의 각 편광상태에서의 전파상수가 다르기 때문에 나타나는 것으로 해석되어 질 수 있으며, 양자 우물 구조에서도 이러한 현상은 나타난다.^[18] 광쌍안정현상은 또한 비선형 물질로서의 반도체를 중간층으로 한 Fabry-Perot 에탈론에서 구현되어 질 수 있는데^[19], 반사형일 경우 비선형 물질의 편광에 따른 반사시의 위상 변화의 차이에 의해 반사광에서 광쌍안정 현상이

나타나게 되는 것이다. 이때 반사면에 흡수층을 두어 입사광이 반사시에 편광상태에 따라 위상차가 서로 다르게 나타나도록 하는데^[20], 본 논문에서 중간층으로 사용된 비정질 As_2S_3 는 에너지 흡수영역이 광원으로 사용된 Ar^+ ($\lambda=514.5$ nm) 레이저 광의 에너지 영역이어서 따로 흡수층을 넣을 필요가 없으며 또한 Ar^+ 레이저 광에 대한 비선형성이 커서 쉽게 그 현상을 관찰할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 광학 다층박막 증착법으로 비대칭 Fabry-Perot 에탈론을 구성하여 편광에 따른 투과광과 반사광에서 나타나는 광쌍안정 현상을 관찰하였다.

II. 이 론

굴절률이 n 인 비선형 물질을 중간층으로 하고 앞면 반사거울과 뒷면 반사거울의 반사율이 다르고 두께가 d 인 Fabry-Perot 에탈론을 생각해 보자.

초기 입사광에 대하여 이 에탈론의 위상두께는

$$\phi(I) = \delta_0 + 2\pi d n_2 I / \lambda \quad (1)$$

의 형태로 주어지게 된다. 여기서 I 는 에탈론내에서의 평균 입사광의 세기이고, n_2 는 입사광의 세기에 의존하는 비선형 굴절률을 나타낸다.

에탈론의 내부에 높은 흡수 물질이 있고 광이 수직으로 입사하지 않을 경우 Fresnel 방정식을 풀면, 편광에 따라 다음 식과 같이 위상 변화가 다르게 나타날 것이다.^[21]

$$\begin{aligned} \delta_s &= \delta_0 + \delta(I) \\ \delta_p &= \delta_0 + \delta(I) + \Delta\phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\delta(I)$ 는 식 (1) 우변의 둘째 항을 나타내고, $\Delta\phi$ 는 각 편광성분 간의 위상차를 나타낸다.

비선형 물질의 내부 흡수계수를 α 앞면 거울과 뒷면 거울

*본 연구는 1996년 기초과학연구원 연구기자재 및 시설공동 이용 사업과 1997 학년도 울산대학교 학술연구구조성비에 의하여 연구되었음.

의 반사율을 각각 R_p, R_b 라 하면 각 편광성분에 대한 공진기 내부에서의 세기는 입사되는 광의 세기로 표현 될 수 있다. 입사되는 광의 세기를 I_{0s}, I_{0p} 라고 하면 공진기 내부에서의 광의 세기는

$$I_s = \frac{I_{0s} (1 - e^{-\alpha d})(1 - R_{fs})(1 + R_{bs} e^{-\alpha d})}{\alpha d (1 - R_{\alpha s}) \{1 + F_s \sin^2[\delta_0 + \delta(I)]\}} \quad (3)$$

$$I_p = \frac{I_{0p} (1 - e^{-\alpha d})(1 - R_{fp})(1 + R_{bp} e^{-\alpha d})}{\alpha d (1 - R_{\alpha p}) \{1 + F_p \sin^2[\delta_0 + \delta(I) + \Delta\phi]\}} \quad (4)$$

로 주어진다.^[22] 여기서, $I = I_s + I_p, R_\alpha = (R_p R_b)^{1/2} e^{-\alpha d}, F = 4R_\alpha / (1 - R_\alpha)^2$ 이다.

위의 식으로부터 각 편광성분의 투과된 광과 반사된 광의 세기를, 입사되는 광의 세기와 공진기 내부에서의 광의 세기로 표현할 수 있는데, 반사되는 광에 대하여 계산을 해보면,

$$I_{Rs} = I_{0s} \frac{\alpha d (1 - R_{bs} e^{-2\alpha d}) I_s}{(1 + R_{bs} e^{-\alpha d})(1 - e^{-\alpha d})} \quad (5)$$

$$I_{Rp} = I_{0p} \frac{\alpha d (1 - R_{bp} e^{-2\alpha d}) I_p}{(1 + R_{bp} e^{-\alpha d})(1 - e^{-\alpha d})} \quad (6)$$

로 나타난다.

방정식 (5)와 (6)은 대수적인 해를 갖지 않지만, 내부에서의 빛의 세기 I 를 반복 대입하는 방법을 이용함으로써 반사된 광에 대한 표현인 그림 1을 얻을 수 있다. 그림 1에서 이러한 입사광의 세기에 따른 반사광의 세기의 변화는 식 (3)과 식 (4)

에서의 위상변화에 의한 결과로 주어지게 된다. 입사광의 세기 변화에 따른 그림 1에서는 계산 예를 나타내고 있다. 그림 1은 각 편광에 의존하는 반사광의 세기를 위상차 $\Delta\phi$ 가 $\pi/2$ 일 경우에 대하여 계산한 결과이다. s-편광 계산 결과인 (a)의 경우 반사되는 광은 입사광의 세기가 A 점까지 증가할 때까지 경로 (i)을 따라 증가하다가 A 점에서 A' 점으로 급격한 증가를 한다. 그 후 입사광의 세기에 따라 경로 (ii)를 따른다. 다시 입사광의 세기가 감소함에 따라 A'점에서 A점으로 감소하는 것이 아니라 경로 (iii)를 따른 후, B점에서 B'점으로 감소하게 된다. 즉, 입사광의 경로에 따라 반사되는 광의 강도가 달라지게 되며, p-편광에 대한 그림인 (b)의 경우에서도 이와 같이 입사광의 세기에 따른 반사광의 경로의 차이가 남을 알 수 있다. 이것을 도식화하면, (i) → C → C' → (ii) → (iii) → D → D' → (iv)으로 나타낼 수 있다.

III. 시료 제작 및 실험

3.1. 시료 제작

실험에 사용된 시료는 열 증착법과 전자선 증착법을 교대로 사용하여 제작되었다. 소자를 비대칭으로 제작할 경우 입사되는 광의 섭동에 대하여 소자가 민감하게 반응하지 않는 장점이 있어^[23] 앞면과 뒷면의 반사거울을 각각 4층과 6층으로 하여 비대칭이 되도록 하였다. 실험에 사용된 소자의 구조는 Substrate/3(HL)/ As_2S_3 /2(LH)로 이루어져 있으며, 여기서 H는 고 굴절률 물질을, L은 저 굴절률 물질을 나타낸다. 고 굴절률 물질로는 ZnS ($n=2.35$)를 저 굴절률 물질로는 MgF_2 ($n=1.38$)를 사용하여 각각 Ar^+ 레이저 파장에 대해서 광학적 두께가 $\lambda/4$ 가 되도록 하였다. 중간층으로 사용된 As_2S_3 는 Ar^+ 레이저 파장에 대해서 광학적 두께가 2λ 가 되도록 하였으며, 제작되어진 소자는 그림 2와 같다.

3.2. 실험

실험 장치는 그림 3과 같이 구성되었다.

실험에 사용되어진 Ar^+ 레이저는 s-편광된 상태로 되어 있으며, p-편광 실험때는 $\lambda/2$ 파장판을 사용하여 s-편광된 입사광을 p-편광된 상태로 회전시켰다. 입사되는 광의 변조를 위해 chopper를 사용하였으며 chopping frequency는 약 1000

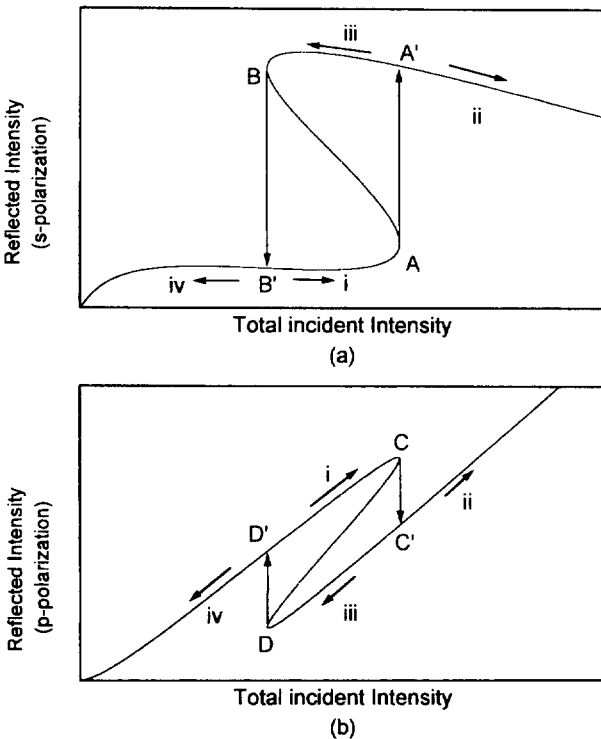


그림 1. Theoretical bistable reflection characteristics for each orthogonal linear polarization for $\Delta\phi = \pi/2$. (a) s-polarization light and (b) p-polarization light.

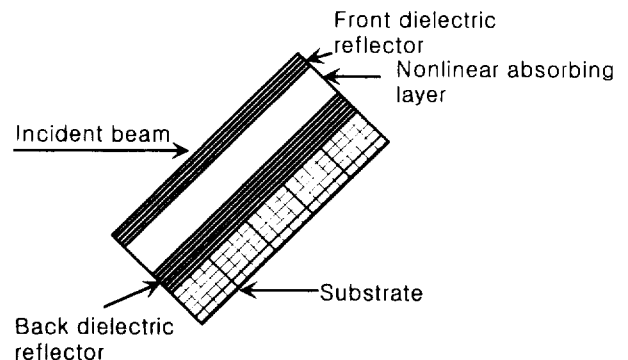


그림 2. Schematic of nonlinear Fabry-Perot etalon.

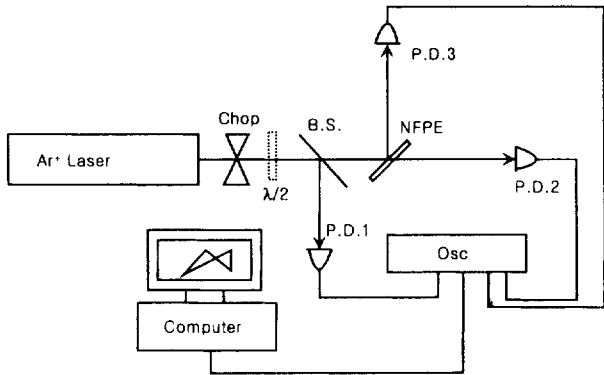


그림 3. Schematic of experimental setup. Chop : light chopper, PD : photodiode, B.S. : beam splitter, NFPE : nonlinear Fabry-Perot etalon. Osc : oscilloscope, $\lambda/2$: half-wave plate.

Hz로 고정하였다. 실험에 사용되어진 시료는 입사되는 광축에 대하여 45° 기울여서 설치하였다. 입사되는 광의 세기에 따른 투과광과 반사광 세기의 변화는 실리콘 광 검출기를 사용하여 측정하였다. 광 검출기에서 측정되어진 입사광과 반사광, 입사광과 투과광의 세기는 oscilloscope로 전송되어 입사광과 반사광, 입사광과 투과광의 x-y 그래프로 표현되었다.

IV. 결 과

각 편광에 대한 입사광에 대한 반사광의 변화는 그림 4와 그림 5에 나타나 있으며, 이때 입사광의 세기는 0에서 100

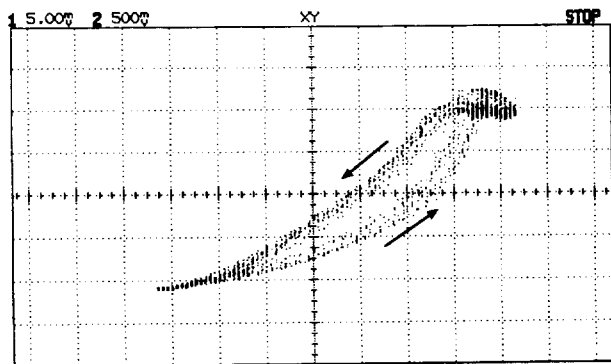


그림 4. Optica bistability loop for reflected s-polarized light.

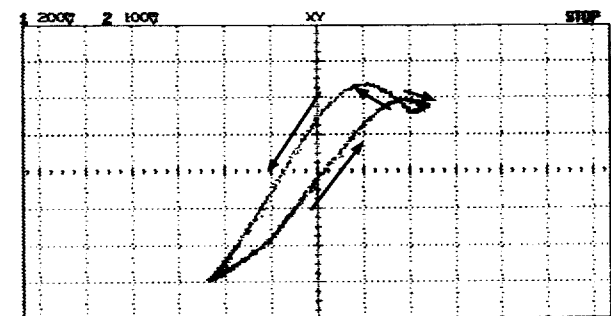


그림 5. Optica bistability loop for reflected p-polarized light.

mW 까지 chopper를 사용하여 변화 시켰다.

그림 4는 s-편광된 광의 입사광의 변화에 대한 반사광의 변화를 표시한 것으로, 반사광은 입사광이 증가함에 따라 급격히 증가하다가 일정한 값을 유지하며, 입사광의 감소에도 어느정도 이 값을 유지하다가 입사광의 세기가 일정값 이하로 떨어지면 감소하는 경향을 나타낸다. 그림 5는 p-편광된 광에 대한 실험 결과로서, 입사광의 변화에 대한 반사광의 변화의 양상이 그림 4의 결과와는 반대되는 결과를 보여주고 있다. 즉, 그림5의 p-편광된 광은 입사광의 증가에 따라 급격한 감소를 하며, 입사광이 감소함에 따라 다시 증가하는 양상을 보여주고 있다. 이러한 양상은 앞의 이론에서 예측되어진 결과인 그림 1과 대체적으로 잘 일치하고 있다. s-편광과 p-편광된 광의 반사에 대한 이러한 형태의 변화는 앞에서 계산되어진 것처럼 반사하는 광의 위상이 편광상태에 따라 달라지기 때문이라고 할 수 있다.

각 편광성분의 입사광에 대한 투과광의 변화는 그림 6과 그림 7에 나타나 있으며, 입사광의 세기는 앞에서와 마찬가지로 0에서 100 mW 까지 chopper를 사용하여 변화 시켰다.

그림 4, 5와 비교해 볼 때 투과광은 반사광과는 반대의 경향을 보임을 알 수 있다. s-편광의 경우인 그림 4와 6을 비교해 보면, 그림 4의 반사광은 입사광에 대해 증가하다가 일정한 값을 가지는 경향을 보여주고 있는 반면 그림 6의 투과광은 입사광의 증가에 대해 증가한 후 급격한 감소를 나타내고 있다. 이러한 경향은 p-편광의 반사와 투과에서도 나타난다. 그림 5를 보면 입사광의 세기에 따라 증가하다가 약간 감소하는 경향을 나타내는 반면 그림 7은 입사광의 세기에 따라 증

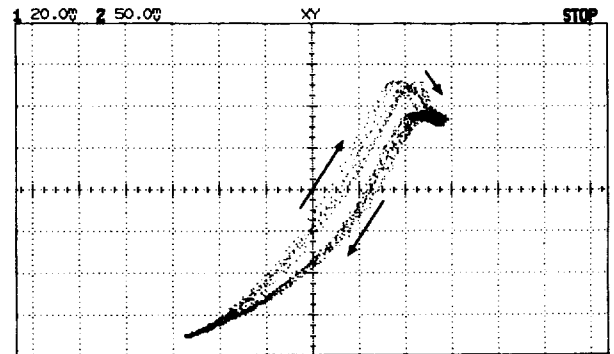


그림 6. Optica bistability loop for transmitted s-polarized light.

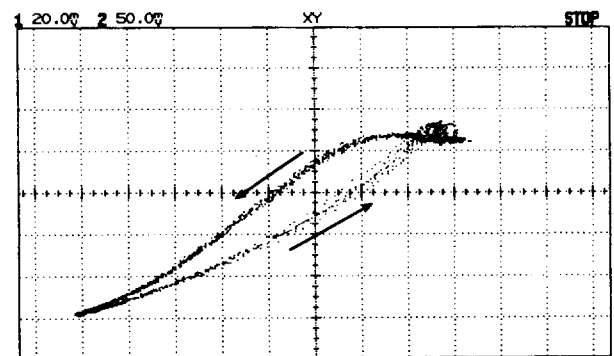


그림 7. Optica bistability loop for transmitted p-polarized light.

가하다가 일정한 값을 가지는 영역이 있음을 알 수 있다.

광쌍안정이 일어나지 않는 영역에서는 입사광의 증가와 감소의 변화에 관계없이 같은 광경로를 가짐을 이론을 통해서 알 수 있으나, 실험을 통해 얻은 결과에서는 이러한 경향이 잘 나타나지 않는데, 레이저광에 의한 비정질 As_2S_3 의 열적 성질에 의한 것으로 해석되어 질 수 있다. 이것은 입사광의 세기가 증가할 때 비정질 As_2S_3 에 의해 흡수되었던 열적 에너지가 모두 감소하지 못하고 비정질 As_2S_3 의 내부에 남아있기 때문인 것으로 생각되어 진다. 즉, 입사광의 세기에 따른 열적 천이율의 변화가 입사광의 증가와 감소에 따라 정확하게 같은 값을 가지지 않기 때문으로 분석되어 질 수 있다.^[23] 만약 이러한 열적인 현상을 보상해 준다면 입사광의 증가와 감소에 따른 광의 경로는 일치할 것이다.

V. 결 론

비정질 As_2S_3 를 중간층으로 하는 비대칭 Fabry-Perot 에탈론을 구성하고 편광 상태에 따른 광쌍안정 현상을 관찰하였다. 광쌍안정 현상은 비정질 As_2S_3 를 단일층으로 구성하여 나타난 광쌍안정에서^[23]의 세기보다 낮은 100 mW정도에서 관찰되었다. 실험에서 사용된 시료는 앞뒷면의 반사거울을 중간층에다가 집적시킴으로써 외부적으로 공진기를 구성하지 않았다. 구조는 4층의 앞면 반사거울, 중간층, 그리고 6층의 뒷면 반사거울로 되어 있으며, 각각의 거울을 이루는 물질들은 그 광학적 두께가 광원으로 쓰인 Ar^+ 레이저 광원의 파장에 대하여 $\lambda/4$ 가 되도록 구성하고 중간층은 2λ 가 되도록 구성하였다. 각 편광에 대하여 투과되는 광과 반사되는 광의 입사되는 광에 대한 변화 경로는 서로 다르며, 이는 편광에 의한 위상차로 해석되어 질 수 있다.

광쌍안정을 나타내지 않는 영역에서의 경로의 불일치는 중간층으로 이용된 비정질 As_2S_3 의 레이저 광에 의한 열적인 변화가 입사광이 증가할 때와 감소할 때 다르게 나타남으로 인해 생긴 것으로 해석할 수 있는데, 이런 현상을 보상해 줄 수 있는 다른 실험적인 방법을 사용한다면 이론과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] A. Szoke, V. Daneu, J. Goldhar and N. A. Kurnit, Appl.

Phys. Lett. **15**, 376 (1969).
 [2] C. M. Bowden, U. Cifton and R. R. Robl, eds., Optical bistability (Plenum, New York, 1981).
 [3] E. Abraham and S. D. Smith, Rep. Progr. Phys. **45**, 815 (1982).
 [4] H. M. Gibbs, Optical bistability : controlling light with light (Academic press, New York, 1985).
 [5] H. M. Gibbs, P. Mandel, N. Peyghambarian and S. D. Smith, eds., Optical bistability (Springer, Berlin, 1986).
 [6] D. Grischkowsky, J. Opt. Soc. Am. **68**, 641 (1978).
 [7] D. A. Miller, M. H. Mozolowski, A. Miller and S. D. Smith, Opt. Comm. **21**, 133 (1978).
 [8] T. Bischoberger and Y. R. Shen, Appl. Phys. Lett. **32**, 156 (1978).
 [9] R. Cush and C. J. G. Kirkby, Opt. Comm. **60**, 399 (1986).
 [10] A. C. Walker, Appl. Opt. **25**, 1578 (1986).
 [11] N. Peyghambarian and H. M. Gibbs, Opt. Eng. **24**, 68 (1985).
 [12] H. M. Gibbs, S. L. McCall and T. N. C. Venkatesan, Phys. Rev. Lett. **36**, 1135 (1976).
 [13] S. D. Smith, A. C. Walker, F. A. P. Tooty and B. S. Wherrett, Nature **325**, 27 (1987).
 [14] M. T. Tosa, L. Wang, R. Jin, R. W. Sprague, G. Gigioli, H. M. Kulcke, Y. D. Li, H. M. Chow, H. M. Gibbs and N. Peyghambarian, Opt. Eng. **26**, 41 (1984).
 [15] G. S. Buller, C. R. Paton, S. D. Smith and A. C. Walker, Appl. Phys. Lett. **53**, 2465 (1988).
 [16] Y. C. Chen and J. M. Liu, Appl. Phys. Lett. **46**, 16 (1985).
 [17] A. Korpel and A. W. Iohmann, Appl. Opt. **25**, 1528 (1986).
 [18] A. Liu and O. Keller, Optics Comm. **120**, 171 (1995).
 [19] C. D. Poole and E. Garmire, Appl. Phys. Lett. **44**, 574 (1984).
 [20] G. S. Buller, R. J. Campbell and A. C. Walker, Opt. Comm. **75**, 93 (1990).
 [21] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics (John Wiley & Sons, New York, 1991).
 [22] D. A. B. Miller, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-17**, 306 (1981).
 [23] C. H. kwak, W. Y. Hwang, J. -S. Jeong, H. H. Shu and E. -H. Lee, Appl. Opt. **33**, 3189 (1994).
 [24] 안용득, 김석원, 한성홍, 한국 광학회지, **7**, 129 (1996).

Optical bistability in the Fabry-Perot etalon which contains As_2S_3 space layer

K. H. Kim, S. W. Kim and S. H. Hahn

Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received : July 29, 1997)

We fabricated the asymmetric Fabry-Perot etalon which contains amorphous As_2S_3 as a spacer layer by using the method of optical multilayer coating and observed the optical bistability with the polarization. Optical thickness of the spacer layer is 2λ at Ar^+ ($\lambda=514.5$ nm) laser wavelength. Optical bistability was observed at the intensities between 80~100 mW and the experiment shows us that the trends of bistable loop of the reflected and the transmitted lights are quite different depending on the state of polarization. This phenomena can be explained as the phase differences of each polarizations are different in the nonlinear Fabry-Perot etalon.