

전기광학적 정제환을 이용한 광쌍안정소자

(Optical Bistable Device Using Positive Electro-Optic Feedback)

李昌熹*, 金錫胤*, 申相永*, 李壽永*

(Chang Hee Lee, Seog Yoon Kim, Sang Yung Shin and Soo Young Lee)

要 約

다이오드 레이저, 트랜지스터, 광검출기를 사용하여 종래의 능동형 광쌍안정 소자에서 야기됐던 스위칭속도를 제한하는 요인을 해결할 수 있는 능동형 광쌍안정소자를 제안하였다. 또, 이를 실험제작하여 스위칭 시간이 5 nanosecond인 광쌍안정소자를 구현하였다. 이는 같은 동작원리를 갖는 보고된 쌍안정소자들 중에서 가장 빠른 스위칭 시간이다. 또한, 제안한 소자를 광 디스크 헤드에 사용할 수 있음을 이론 및 실험적으로 보였다.

Abstract

To improve the switching time of active optical bistable devices, we propose an active optical bistable device that consists of a diode laser, a transistor, and a photodetector. By implementing the proposed device we realize the optical bistable device with a 5 nanosecond switching time. This is the fastest switching time among the hybrid type optical bistable devices. It is also experimentally demonstrated that the proposed device may be used in an optical disc pick up.

I. 서 론

진성형 및 혼성형 광쌍안정소자는 광신호처리장치와 광통신에 응용할 수 있기 때문에 많은 사람들에 의해서 연구되고 있다.^[1,2] 광통신의 광원인 다이오드 레이저를 이용한 능동형 광쌍안정소자는 스위칭 에너지가 낮고, 스위칭 속도가 빠르고, 다른 전자회로 소자나 광학소자와 집적화가 용이하므로 매우 넓은 분야에 응용이 가능하다. 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정소자도 혼성형과 진성형으로 구별된다. 자세한 것은 전자공학회지에 게재 예정인 기술해설^[3]이나 기타서적^[2]의

참조가 요망된다. 진성형은 다이오드 레이저의 구조를 변경하여 구현한다. 즉, 레이저를 두 구간으로 나누어 한 구간을 흡수포화 매질로 이용하거나,^[4] 두 개의 다이오드 레이저를 나란히 근접시킨 구조(twin strip diode laser),^[5] 외부공진기 다이오드 레이저^[6] 등이 있다. 이러한 광쌍안정소자와는 별도로 구현하기가 용이하고 전기적인 출력도 얻을 수 있는 다이오드 레이저를 이용한 혼성형 광쌍안정소자에 대한 연구도 진행되고 있다.^[7-10] 혼성형 광쌍안정소자는 입력 광신호의 분극과 파장에 영향을 받지 않는다. 또, 다이오드 레이저의 구조를 변경하지 않고 잘 제작된 소자들을 이용하므로 좋은 특성의 쌍안정소자를 구현할 수 있고, 쉽게 집적화할 수 있는 장점을 지닌 반면에 구조가 진성형에 비해서 복잡하다.

혼성형 광쌍안정소자는 다이오드 레이저와 APD(avalanche photodiode)를 전기광학적 제환으로 결합시키는

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 (Dept. of Elec. Eng., KAIST)

接受日字: 1987年 8月 1日

(※ 본 논문의 일부는 과학재단의 지원(1986~1987)을 받아서 수행한 것임.)

방식을 Ogawa 등이 처음 제안하였다.^[7] Lau 등은 다이오드 레이저와 MESFET을 집적화하여 스위칭시간이 7ns인 쌍안정소자를 구현하고 여러가지 응용가능성도 보였다.^[8] 최근에 이러한 소자에서 바이어스 전류가 발진임계전류보다 낮아야 하고, 능동소자의 포화 때문에 야기되는 속도제한 요인을 해결할 수 있는 혼성형 광쌍안정소자가 제안되었다.^[9,10] 본 논문에서는 제안한 다이오드 레이저, 광검출기, 트랜지스터로 구성된 광쌍안정소자를 구현하였다. 구현한 소자의 스위칭시간은 5ns로서 같은 동작원리를 갖는 광쌍안정소자에서 얻은 가장 빠른 스위칭 시간이다. 제안한 소자를 이용한 광디스크 헤드의 구현에 관해서도 고찰하였다. 제안한 소자를 이용하면 광 디스크 헤드의 신호대 잡음비를 높일 수 있고 또 소형화도 가능하다.

II. 모델 및 동작원리

1. 광출력대 광입력 특성

본 논문에서 구현한 광쌍안정소자는 다이오드 레이저, 광검출기, 트랜지스터로 구성되어 있다. 그림 1에 쌍안정소자의 회로를 나타내었다. Photodetector는 입력광을 받아 들이고, 레이저의 출력도 이것을 통하여 정제환된다. 이 정제환과 트랜지스터의 차단과 포화에 의한 비선형특성이 결합되어 쌍안정특성이 나타난다. 다이오드 레이저의 특성이 이상적이라고 가정하면 레이저의 출력 P_o 는

$$P_o = k(I_f + I_b - I_{th}) \quad (I_f + I_b > I_{th})$$

$$= 0 \quad (I_f + I_b < I_{th}) \quad (1)$$

이다. 여기서 I_f 는 제환전류, I_{th} 는 레이저의 발진임계전류, k 는 다이오드 레이저의 전류에서 광으로의 변환비이다. 제환전류는 증폭기의 전달함수가 부분적선형 (piecewise linear) 이면 다음과 같이 주어진다.

$$I_f = 0 \quad (c_1 P_o + c_2 P_i < I_c)$$

$$= I_b \quad (c_1 P_o + c_2 P_i > I_c + I_b/A)$$

$$= A(c_2 P_i + c_1 P_o - I_c) \quad \text{otherwise} \quad (2)$$

여기서 P_i 는 입력 광 power이고, I_c 는 증폭기(여기서는 트랜지스터)의 차단 입력전류이며, I_b 는 증폭기의 포화전류이다. 그리고, 상수 c_1 과 c_2 는 각각 다이오드 레이저의 출력과 입력 광신호의 결합효율을 포함한 광검출기의 광에서 전류로의 변환비이다. 즉 $c_1 P_o + c_2 P_i$ 는 증폭기의 입력전류이다. A 는 증폭기의 이득이다. 그림 1의 경우 증폭기(트랜지스터)의 차단전류, 이득, 그리고 포화전류는 다음과 같이 주어진다.

$$I_c = V_T/R_b \quad (3)$$

$$A = h_{fe}/[1 + k_b T/(q R_b I_{b0})] \quad (4)$$

$$I_b = (V_{cc} - V_{be} - V_{ce(sat)})/R_c \quad (5)$$

여기서 V_T 와 $V_{ce(sat)}$ 는 각각 트랜지스터의 cut-in 전압과

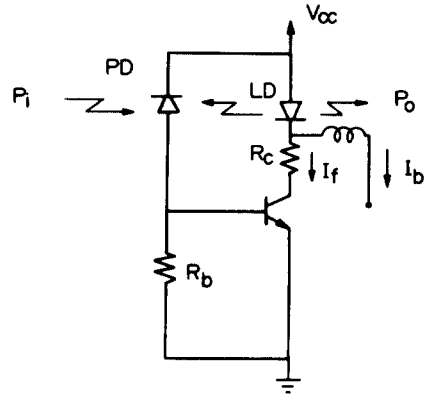


그림 1. 전기광학적 제환을 이용한 광쌍안정소자
Fig. 1. Optical bistable device with electro-optic feedback.

콜렉터와 에미터간의 포화 전압이다. 또, V_{cc} 와 V_{be} 는 각각 공급전압과 다이오드 양단전압이다. k_b 는 Boltzman 상수이고, T 는 절대온도이며, q 는 전자의 전하량이다. I_{b0} 는 트랜지스터의 베이스전류이다. h_{fe} 는 트랜지스터의 직류 증폭율이다. R_b 와 R_c 는 각각 베이스와 콜렉터 저항이다. 이 식에서 차단전류와 포화전류를 각각 독립적으로 R_b 와 R_c 로서 조정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이 특성은 나중에 쌍안정특성의 천이점을 조정하는 데에 이용된다. 광쌍안정소자의 입출력특성은 식 (1)과 (2)로부터 구해진다.

식(1)과 (2)의 도식적인 해를 그림 2(a)에 나타 내었다. 이 도식적인 해를 구하기 위해서 식(1)을 이용해서 제환전류대 광출력을 발진임계전류로 바이어스된 다이오드 레이저라고 가정하고 그렸고, 다시 식(2)을 사용해서 제환전류대 광출력을 광입력을 매개변수로 하여 그렸다. 식(1), (2)의 해는 두 곡선이 서로 만나는 점이다. 그림 2(a)에서 직선은 발진임계전류로 바이어스된 다이오드 레이저의 제환전류를 광출력에 대해 나타내고, 부분적 선형곡선은 제환회로(광검출기와 트랜지스터)의 그것을 나타낸다. 광입력이 없으면 광출력도 '0'이다. 광입력이 증가하면 부분적 선형곡선이 우측으로 이동된다. 그래서 한 값의 광입력에 대해서 세 값의 광출력이 정해진다. 광입력을 더 증가하면 다시 한 값의 광입력이 한 값의 광출력을 결정한다. 그림 2(b)의 곡선B에 그림 2(a)에 해당하는 광쌍안정소자의 입출력특성을 보였다. 그림에서 부의 기울기를 갖는 곡선은 불안정한 해이므로 입출력특성은 쌍안정특성을 보인다. 광쌍안정특성을 갖기 위해서는 제환회로의 페레루프이득 $c_1 k A$ 가 다음 조건을 만족해야 한다.

$$1 < c_1 k A < (I_b + A I_c)/(I_b + I_b - I_{th}) \quad (6)$$

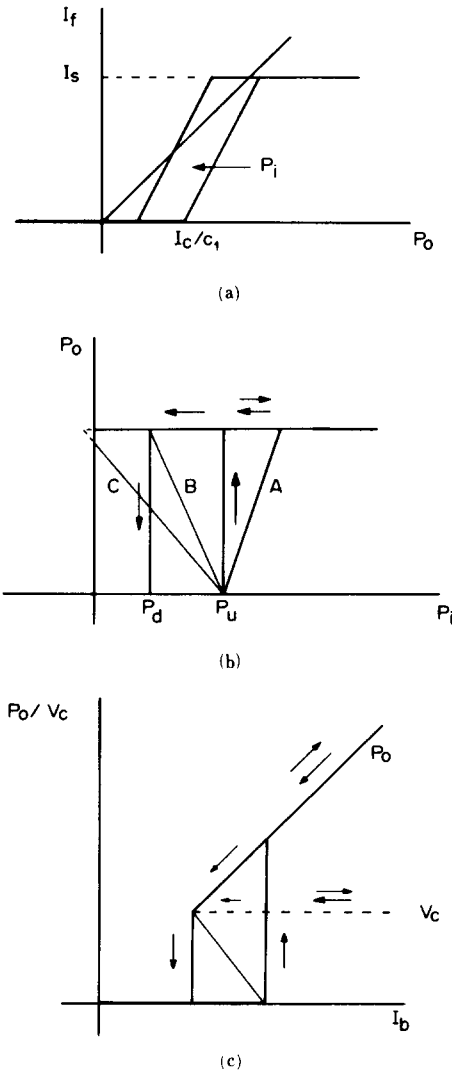


그림 2. (a) 광쌍안정소자의 도식적인 해
 (b) 광출력 대 광입력 특성
 (c) 광출력 대 주입 전류특성.

Fig. 2. (a) Graphical solutions of optical bistable device.
 (b) optical output vs. optical input characteristics.
 (c) optical output vs. injection current characteristics.

물리적으로 최소치는 재환되는 광신호가 재생증폭 (regenerative amplification) 되기 위한 조건이다. 다시 말해서, 페루프 이득이 1 보다 커야한다. 만약 페루프이득이 1 보다 적으면 제안한 소자는 그림 2(b)의 곡선 A 처럼 잘 알려진 광증폭기 특성을 보인다. 식(6)의 최대치는 'on' 에서 'off' 로의 천이가 광입력이 있을

때 존재하기 위한 조건이다. 만약 페루프이득이 최대치보다 크면 소자의 특성은 그림 2(b)의 곡선 C 처럼 'off' 에서 'on' 으로의 천이만 존재한다.

증폭기의 차단특성이나 다이오드 레이저의 발진임계 특성에도 쌍안정특성을 구현하기 위해서 조건이 부여된다. 이는 쌍안정소자의 'off' 에서 'on' 으로의 천이가 있기 위한 조건이다. 'off' 에서 'on' 으로 천이하는 점에서의 광입력 power는 다음과 같이 주어진다.

$$c_1 P_i = I_c + (I_{th} - I_b) \quad \text{for } I_b < I_{th}$$

$$I_c - c_1 (I_b - I_{th}) \quad \text{for } I_b > I_{th} \quad (7)$$

만약 다이오드 레이저를 발진임계전류 이상으로 바이어스하려면 증폭기가 차단특성을 가져야 한다. 그렇지 않는 경우는 다이오드 레이저를 발진임계전류 밑으로 바이어스해야 한다. 지금까지 구현된 광쌍안정소자는 모두 증폭기가 차단특성을 갖지 않아서 다이오드 레이저의 바이어스 전류가 발진임계전류보다 낮아야 했다.^{17,18} 그러나, 본 논문에서 제안한 광쌍안정소자는 증폭기의 차단특성을 이용하므로 다이오드 레이저의 바이어스전류를 발진임계전류보다 크게 할 수 있어서 고속 스위칭이 가능하다. 또한, 'on' 에서 'off' 로, 'off' 에서 'on' 으로 천이되는 점을 각각 R_c 와 R_b 를 사용하여 서로 조정할 수 있다.

2. 광출력대 바이어스전류특성

입력이 광신호가 아니고 레이저에 공급되는 주입전류인 경우에도 쌍안정특성을 얻을 수 있다. 광출력대 바이어스전류의 특성은 앞에서 사용한 도식적인 방법을 이용하면 쉽게 얻어진다. 앞절에서는 바이어스전류를 발진임계전류로 고정하고 입력 광신호를 매개변수로 했다. 바이어스전류에 대한 광출력 특성을 고찰하기 위해서는 입력 광신호를 제거하고 바이어스전류를 매개변수로 하면 된다. 바이어스전류가 발진임계전류보다 낮으면 그림 2(a)에서 직선이 위로 이동된다. 그리고 바이어스전류가 발진임계전류보다 높으면 직선이 밑으로 이동된다. 직선과 입력 광신호가 없을 때의 부분적 선형곡선이 만나는 점이 해이므로 바이어스전류에 대한 광출력특성은 그림 2(c)와 같이 되는 것을 알 수 있다. 여기서도 부의 기울기를 갖는 곡선은 불안정한 해이므로 쌍안정특성을 보인다. 만약 광출력 대신 트랜지스터 콜렉터 양단전압의 역을 출력으로 택하면, 쌍안정특성이 그림 2(c)의 점선처럼 완벽한 clamping 을 보인다. 쌍안정특성을 갖기 위한 조건은 증폭기의 포화전류가 다이오드 레이저의 발진임계전류보다 적은 경우는 페루프이득이 1 보다 크기만 하면된다. 그리고 증폭기의 차단특성이나 다이오드 레이저의 발진임계특성에 부과된 조건이 완화된다.

만약 바이어스 전류가 변하지 않고 레이저의 발전임계전류가 변해도 동일한 특성을 얻을 수 있다. 예를 들어서 외부공진기 다이오드 레이저의 외부반사거울의 반사율이 변하는 경우도 쌍안정특성이 얻어진다. 또, 한쪽 facet이 무반사 코팅된 다이오드 레이저를 이용한 외부공진기 다이오드 레이저의 외부반사거울의 반사율이 변하는 경우도 마찬가지로 쌍안정특성을 얻을 수 있다. 이러한 특성은 제한한 광쌍안정소자를 광디스크 헤드에 사용을 가능하게 한다. 이에 관해서는 본 논문 후반에 자세히 기술할 것이다.

III. 실험

1. 발광다이오드와 광검출기로 구현한 광쌍안정소자 고속 광쌍안정소자를 구현하기 위한 기초실험으로써 먼저 발광다이오드, 트랜지스터, 광검출기를 사용하여 광쌍안정소자를 구현하였다.⁹ 여기서 구현하고자 하는 쌍안정소자는 스위칭속도의 개선에 중점을 두는 것보다는 쌍안정소자의 특성을 이해하는데 목적이 있다. 그림 3은 구현한 광쌍안정소자의 구성도이다. 쌍안정 특성을 얻기 위해서는 페루프 이득이 1보다 커야한다. 트랜지스터를 한 개만 사용하고 광학적 정렬을 잘하면 페루프 이득을 1보다 크게 할 수 있으나 여기서는 이득을 크게하여 광학적 정렬의 어려움없이 쌍안정 특성을 얻기 위해서 두 개의 트랜지스터를 사용하였다. 그림 4(a)와 (b)는 구현한 쌍안정소자를 이용한 기억소자 펄스정형소자로의 동작을 실험한 결과이다. 광기억소자로의 동작을 보이기 위해 입력신호로는 bipolar 광펄스를 사용하였다. Bipolar 광 펄스의 평균광세기는

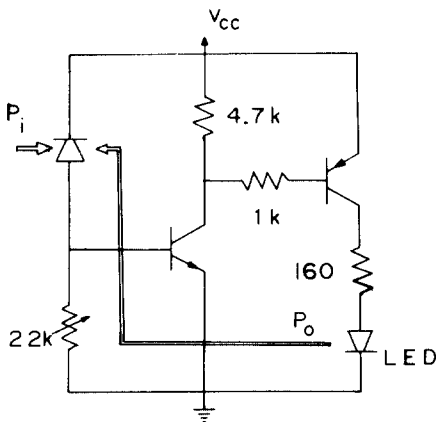


그림 3. 발광다이오드와 광검출기로 구현한 광쌍안정소자

Fig. 3. Circuit diagram of the bistable device using light emitting diode and photodetector.

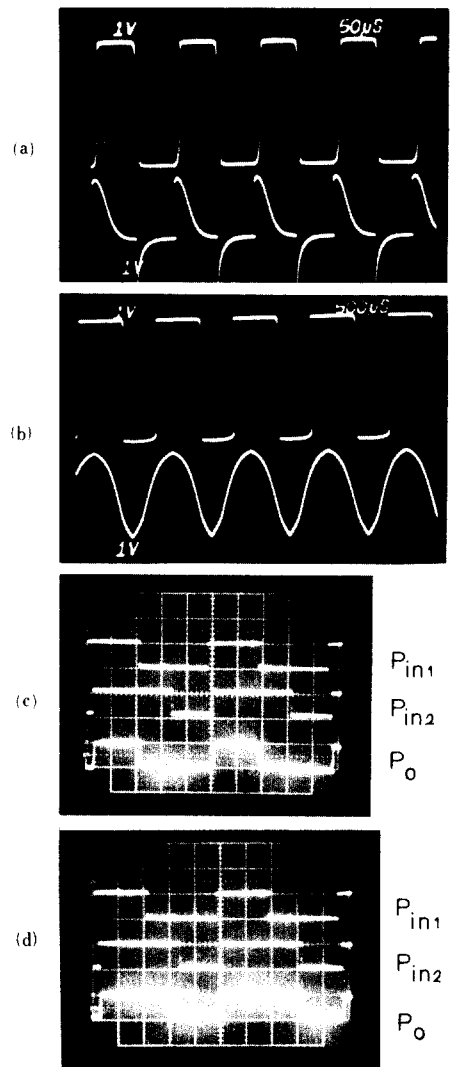


그림 4. (a) 광기억소자로의 동작
(b) 광펄스 정형회로로의 동작
(c) 구현한 논리회로 AND의 특성
(d) 구현한 논리회로 OR의 특성

Fig. 4. (a) Optical memory function, (b) pulse reshaping characteristics, (c) logic function AND characteristics, (d) logic function OR characteristics.

쌍안정소자의 동작점을 결정하는 것으로 쌍안정특성을 갖는 영역안에 존재해야 한다. 또, 정부 펄스의 크기는 이 점에서 스위칭되는 점까지의 광세기의 차보다 커야한다. 그림에서 구현한 소자가 쌍안정특성을 보이는 것을 알 수 있다. 쌍안정 소자의 스위칭시간은 10 microsecond이다.

발광다이오드와 광검출기의 결합효율을 변화시켜 페

루프 이득이 1 정도 되도록 조정하여 광트랜지스터를 구현한다. 이 특성은 광논리회로를 구현하기 위해서 필요하다. 논리회로로 동작하려면은 논리값을 결정시키는 임계치만 필요하지 쌍안정특성까지는 필요로 하지는 않는다. 그림 4(c)와 (d)는 구현한 논리회로 AND, OR의 특성을 보였다.

2. 다이오드 레이저로 구현한 광쌍안정소자

고속 광쌍안정소자를 구현하기 위하여 다이오드 레이저, APD, 고속 트랜지스터로 그림 5에 도시한 회로로 광쌍안정소자를 구성하였다.¹⁰⁾ 회로에서 이득을 얻기 위한 트랜지스터는 2SC2367을 사용하였고 광검출기는 50Ω 이하인 경우 상승시간이 0.5 nanosecond 이하인 RCA C30902-E silicon APD를 사용하였다. APD는 자체에서 이득을 얻을 수 있어서 광학적 정렬의 어려움을 덜어준다. 레이저는 Hitachi HLP1400을 사용하였다. 구현한 회로는 ECL 회로로 모델과 동작원리를 분석한 회로의 변형이다. 그러나 모델과 동작원리는 앞에서 설명한 회로와 동일하다. ECL은 트랜지스터가 포화되지 않고 활성영역에서 동작하므로 트랜지스터 포화에 의한 스위칭속도의 지연이 없을 뿐 아니라, 트랜지스터가 스위칭할 때 전원에 spake가 생기지 않아 안정된 전원을 공급받을 수 있다. 이외에도, 트랜지스터 collector 양단에 레이저 다이오드를 연결함으로써 신호의 역을 동시에 얻을 수 있다. 또, 제환을 서로 대각으로 하여 광 flip-flop¹¹⁾ 등 다른 여러가지 소자를 구현하기에 적합하다.

구현한 회로가 쌍안정특성을 갖기 위해서는 페루프 이득이 1보다 커야 하므로 레이저와 APD의 광결합 효율이 커야 한다. APD의 바이어스 전압은 광입력 신호 $c_1 P_i$ 와 정제환 광출력 $c_1 P_o$ 가 APD에 입사될 때 break down 되지 않고 동시에 페루프 이득이 1보다 크도록 설정해야 한다. 또, 식(7)에서 알 수 있

듯이 광검출기의 출력을 입력으로 받는 트랜지스터의 베이스 저항이 'off'에서 'on'으로 천이되는 power를 결정한다. 따라서, 베이스 저항을 크게 하면 낮은 입력 power에서 'off'에서 'on'으로 천이가 일어난다. 그러나, 베이스 저항이 증가하면, 광검출기의 스위칭속도가 감소하므로 절충이 요구된다. 실험에서 사용한 소자값은 회로도 그림 5에 나타내었다. 다이오드레이저의 발진 임계전류는 58mA이고, 실험에서는 고속 스위칭을 위해 바이어스 전류를 발진임계 전류 보다 높은 60mA에 바이어스 하였다. 구현한 소자의 임출력 특성을 그림 6(a)에 나타내었다. 그림에서 구현한 소자가 쌍안정특성을 보여주는 것을 알 수 있다. 임출력특성을 oscilloscope 상에 친절히 보여주 기 위해서 입력은 200Hz 정현파로 변조된 신호를 사용하였고 출력은 T_1 의 컬렉터에서 일었다. 그림 6(b)는 15MHz 정현파로 변조된 신호를 입력에 대한 광쌍안정소자의 출력을 나타낸 것이다. 입력 정현파가 구형파로 변환되는 것은 펄스정형회로의 동작을 보여 주고 있다. 기억소자로의 동작을 보여주기 위해서 1 MHz bipolar 펄스를 입력으로 해서 얻은 출력파형을 그림 6(c)에 보였다. 그림에서 bipolar 광펄스 입력에 대해서 출력이 구형파로 나오는 것은 구현한 소자가 쌍안정특성을 갖고 있다는 명확한 증거이다. 구현한 쌍안정소자의 스위칭 시간은 5nanosecond이다. 이는 지금까지 보고된 광검출기와 다이오드 레이저를 이용한 능동형 광쌍안정소자에서 얻은 스위칭 시간보다 빠르다. 스위칭시간은 광검출기의 부하저항인 베이스 저항을 줄이거나 보다 고속으로 동작하는 소자들을 사용하면 nanosecond이하로 감소시킬 수 있을 것이다.

3. 외부 광학적제환의 영향: 광 디스크 헤드로의 응용

제한한 광쌍안정소자에 미치는 외부광학적제환의 영향을 고찰하고 광 디스크 헤드로서 응용 가능한가를 검토하기 위해서 그림 7과 같이 외부공진기 쌍안정 다이오드 레이저를 구현하였다. 그림에서 쌍안정 다이오드 레이저는 그림 1을 나타낸 것이고, 광 chopper는 광기록 매체의 반사율의 변화를 모사하기 위한 것이다. 광 디스크 헤드로의 응용 가능성을 고찰하기 위해서 다이오드 레이저를 외부 광학적제환이 없을 때 'off'이고 있을 때 'on'인 상태에 바이어스하고 광 chopper로 외부제환을 변조하면서 증폭기의 출력전압을 측정하였다. 이때 쌍안정 다이오드 레이저는 외부제환이 없을 때 페루프이득을 1보다 적게하여 differential gain 특성을 갖도록 조정한다. 측정된 결과를 그림 8에 보였다. 출력 레벨이 $5V_{pp}$ 로서 Harder등이 제안한 광쌍안

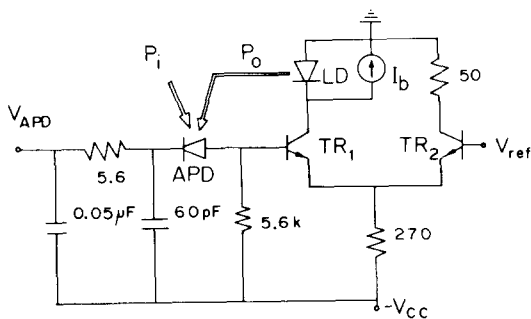
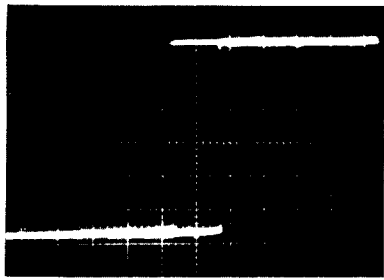
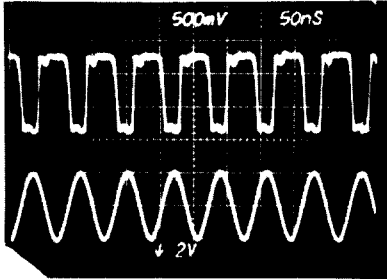


그림 5. 구현한 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정 소자의 회로도

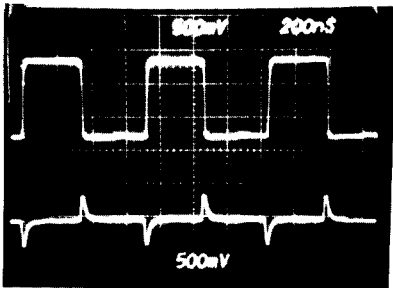
Fig. 5. Circuit diagram of the bistable device using diode laser.



(a)



(b)



(c)

그림 6. (a) 구현한 광쌍안정소자의 임출력 특성
(b) 펄스정형회로로의 동작
(c) 광 기억소자로의 동작

Fig. 6. (a) Input/output characteristic of the bistable device.

(b) pulse reshaping characteristics.
(c) optical memory characteristics.

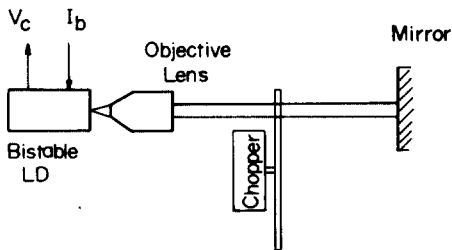


그림 7. 외부공진기 쌍안정 다이오드 레이저의 구성도
Fig. 7. Block diagram of the external cavity bistable diode laser.

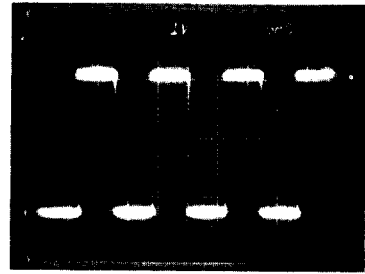


그림 8. 외부케환을 변조시의 쌍안정다이오드 레이저의 출력

Fig. 8. Output of the bistable diode laser with modulated external feedback.

정소자를 이용한 광디스크 헤드에서 얻은 $400\text{mV}_{\text{ip}}^2$ 보다 훨씬 높다. 이는 제한한 소자를 광디스크 헤드로 사용하면은 신호대 잡음비를 높일 수 있을 뿐 아니라 다른 증폭회로도 필요로 하지 않는다는 것을 시사한다. 또, Harder 등이 제한한 소자는 아직까지는 상용화할 만큼 신뢰성있는 소자를 만들기 어려우나 본 논문에서 제한한 소자는 잘 제작된 소자를 사용하므로 신뢰성있는 소자를 구현할 수 있다. 특히 대부분의 상용화된 다이오드 레이저는 광검출기가 같이 집적되어 있어서 소자를 구현하기가 쉽고 광학적 정렬도 필요로 하지 않는다. 만약 다이오드 레이저 facet를 부분사 코팅하면 외부 광학적케환이 증가될 뿐아니라, 소자가 케환된 광신호의 위상변화에도 무관한 광디스크 헤드를 구현할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

다이오드 레이저, 광검출기, 트랜지스터를 사용하여 종래의 능동형 광쌍안정소자에서 야기됐던 스위칭 속도를 제한하는 요인을 해결할 수 있는 능동형 광쌍안정소자를 제안하였다. 이를 ECL 구조로 구현하여 스위칭 시간 5 nanosecond인 광쌍안정소자를 얻었다. 이는 보고된 광검출기와 다이오드 레이저를 사용하는 광쌍안정소자에서 얻은 스위칭 시간보다 빠르다. 또, bipolar 펄스를 사용하여 기억소자로의 기능도 확인하였다. 실험제작한 광쌍안정소자의 응용으로 광디스크 헤드에 응용 가능성을 실험하였다. 제한한 광쌍안정소자를 이용하는 광 디스크 헤드는 종래의 헤드에 비해서 신호대 잡음비를 높일 수 있을 뿐만 아니라 소형화도 가능하다. 또한, 별도의 증폭회로를 필요로 하지 않는 장점도 가지고 있다. 광쌍안정소자의 응용은 광통신용 중계기와 수신기, 광신호와 전기신호의 interface을 들 수 있다. 또, incoherent 광신호를 coherent 광신호로 변환하는 데도 이용할 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] P.W. Smith, "Application of all-optical switching and logics," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* vol. A313, no. 1525, pp. 349-355, 1984.
- [2] H.M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling Light with Light*, Academic Press, Orlando, 1985.
- [3] 신상영, 이창희, "광쌍안정소자의 원리와 그 응용," 대한전자공학회지에 게재예정
- [4] C. Harder, K. Lau, and A. Yariv, "Bistability and pulsations in semiconductor lasers with inhomogeneous current injection," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 9, pp. 1351-1361, 1982.
- [5] K.A. Shore, "Semiconductor laser bistable operation with an adjustable trigger," *Opt. and Quantum Electron.*, vol. 14, pp. 321-326, 1982.
- [6] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on the semiconductor injection laser properties," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, no. 3, pp. 347-355, 1980.
- [7] Y. Ogawa, H. Hiromasa, and H. Inaba, "New bistable optical device using semiconductor laser diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 9, pp. L646-L 648, 1981.
- [8] K. Lau, and A. Yariv, "Bistable optical electrical/microwave switching using optically coupled monolithically integrated GaAlAs transducer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 7, pp. 719-721, 1984.
- [9] 이창희, 윤태훈, 신상영, "다이오드 레이저를 이용한 새로운 광쌍안정소자" 대한전자공학회 1985년 하계종합학술대회, 1985. 6. 28.
- [10] 김석윤, 다이오드 레이저와 Avalanche Photodiode를 이용한 광쌍안정소자, 한국과학기술원 석사논문, 1987.
- [11] C.H. Lee, T.H. Yoon, and S.Y. Shin "Optical flip-flop using light-emitting diodes and photodetectors," *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 2244-2245, 1986.