광쌍안정소자와 그 응용

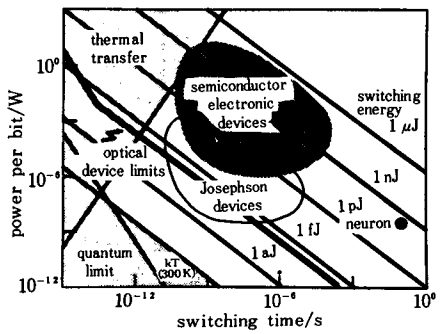
申相永, 李昌熹
(正 會 員)
韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

Ⅰ. 서 론

광쌍안정소자는 하나의 광입력에 대해 두 개의 안정한 광출력을 갖는 광학소자이다. 이는 빛을 직접 처리할 수 있을 뿐 아니라 쉽게 광논리소자를 구현할 수 있어 광신호처리용 기본소자로 각광을 받고 있다. 또한, 스윗칭시간과 bandwidth면에서도 초고속 전자회로나 Josephson 소자보다 우수하고 스위칭 에너지도 전자회로를 이용한 논리소자보다 적다는 것을 표 1로부터 알 수 있다.[1] 광쌍안정소자의 이러한 특성은 잠시동안 주춤했던 광컴퓨터와 광신호처리 장치에 대한 관심을 고조시켰다. 표 1은 여러가지 스윗칭소자에서 가능한 이론적인 스위칭 시간과 스윗칭 전력을 도시한 것이다.

광쌍안정소자의 대표적인 응용분야를 보면, 신호처리용으로 광기억소자, 광트랜지스터, 광논리회로, 광펄스 정형회로 등에 사용되고, 광통신용으로는 초고속 repeater에도 이용될 전망이다. 최근에는 광컴퓨터의 기본소자로서 응용되고 있다.[1,2] 특히 미국의 Bell Lab.에서는 5년 이내에 광컴퓨터를 제작할 계획이다.[3] 광쌍안정소자의 또 다른 응용분야는 측정장비로서의 응용이다. 광쌍안정소자의 매우 빠른 스윗칭특성을 이용하여 지금까지는 불가능하다고 여기던 물리적현상을 측정할 수 있다. 빛을 직접 처리하는 특성은 광쌍안정소자의 실시간 image processing에의 응용을 가능하게 하고 있다. 광쌍안정소자의 응용 추세는 먼저 광통신이나 기존 컴퓨터에서 특수한 기능의 수행에 응용되고 본격적으로 광학만으로 된 장치는 5~10년 후에나 가능할 것이라고 많은 사람들이 예측하고 있다.[4]

표 1. 여러가지 스윗칭 소자에서의 스윗칭시간과 스윗칭 에너지(참고문헌 1).

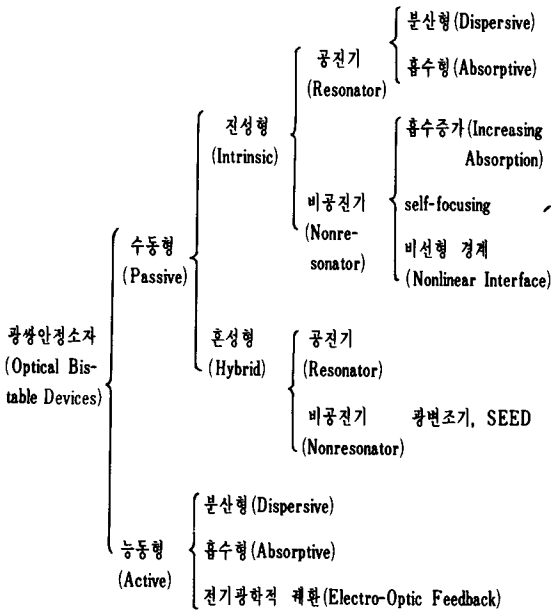


광쌍안정소자는 1975년 Gibbs 등에 의해서 진성형 광쌍안정소자가 처음 실험적으로 구현된 후[5] 활발히 연구되고 있으며 표 2와 같이 분류할 수 있다. 일반적으로 혼성형은 광-전기-광으로의 신호변화를 거쳐야 하므로 광신호만을 사용하는 진성형보다 스윗칭속도가 느리다. 진성형중에서는 공진기 구조를 사용하는 것이 이를 사용하지 않는 것보다 스윗칭에너지가 낮다. 이 중에서도 분산형은 흡수형보다 스위칭 특성이 우수하다.[1] 입력 광신호와 출력 광신호의 비에 따라 능동형과 수동형 광쌍안정소자로 나누어진다.

혼성형 광쌍안정소자는 비선형 특성을 전자회로의 도움을 빌어서 얻으므로 일반적으로 진성형 광쌍안정소자에 비해서 구현하기가 용이하다. 따라서 진성형을 구현하기 이전의 실험 단계에서 쌍안정소자의 특성을 이해하기 위해서 혼성형 광쌍안정소자를 사용하고 있다. 또, 혼성형 광쌍안정소자는 광쌍안정소자의 동특성을 이해하는 실험대상으로도 널리 응용되고 있다.

국내에서도 최근 광쌍안정소자의 연구에 관심[23,24,31,32,45]이 기울여지고 있다. 따라서, 지금까지 연구된

표 2. 광쌍안정소자의 종류



광쌍안정소자의 연구와 그 응용에 관해서 검토해 보는 것은 흥미있는 일일 것이다. 본 기술해설에서는 광쌍안정소자를 진성형, 혼성형, 능동형순으로 분류하여 고찰하고, 또한 이들 소자에서 이용되는 주요 비선형 광학적 현상인 dynamic Burstein-Moss shift와 exciton 효과의 물리적 원리를 정성적으로 설명하였다. 특히 최근에 각광을 받고 있는 MQW (multiple quantum well)에서의 광학적 비선형 현상에 대해서 자세히 기술하였다. 광쌍안정소자에 대한 보다 자세한 해설은 참고문헌 [2]의 참조가 요망된다.

Ⅱ. 광쌍안정소자의 유형과 비선형 광학현상

1. 진성형 광쌍안정소자

진성형 광쌍안정소자는 광-전기-광으로의 신호변환 과정을 거치지 않고 광신호만을 이용하는 것으로서 이를 통상 광쌍안정소자라 칭한다. 진성형은 공진기를 사용하는 것과 그렇지 않는 것으로 나누어진다. 공진기는 전기회로의 공진회로처럼 공진주파수에서 많은 에너지가 축적되므로 상대적으로 낮은 입력 power에서 광쌍안정 특성을 얻을 수가 있다. 따라서 대부분의 연구가 공진기를 사용하는 경우에 대하여 행해졌다. 그러나, 최근에 공진기를 사용하지 않는 진성형 광쌍안정소자와 이에 수반되는 물리적 현상들의 연구도 활발해지고 있다.[6-8] 공진기를 이용한 광쌍안정소자는 공진기내의 매질의 비선형 분산특성을 이용한 분산형과 비선형 흡수포화특성을 이용한 흡수형으로 분류된다. 일반적으로 흡수형은 분산형에 비해서 손실이 크고 많은 스위칭에너지 (스위칭시간과 스위칭 power의 곱)을 필요로 한다. 진성형 광쌍안정소자는 분산형인 경우 스윗칭 'ON' 시간을 picosecond 미만으로 줄일 수 있다. 또, 소자 구현에 필요한 면적이 집속된 빛의 면적과 같으므로 다수의 소자를 한 평판위에 만들 수 있어 광학의 장점인 병렬처리기능을 충분히 활용할 수 있다.[1-5]

진성형 광쌍안정소자의 동작원리를 이해하기 위해서 대표적인 비선형공진기를 이용한 것에 대해서 알아보자. 그림 1(a)는 비선형공진기를 나타낸 것이다. 비선형공진기가 광쌍안정 특성을 갖기 위해서는 분산형인 경우 비선형 매질의 광학적 길이(optical length)가 공진기 안의 빛의 세기에 따라 변해야 하고 아울러 공진기 안의 광의 세기는 공진기의 광학적 길이에 의해서 결정되어야 한다. 즉 Kerr효과 등과 같은 비선형 광학특성을 갖는 매질이 요구된다. 흡수형의 경우는 비선형 매질의 흡수계수가 공진기 내의 빛의 세기에 따라 변해야 하고 또, 공진기 내의 광의 세기는 매질의 흡수계수에 따라 변해야 한다.[9] 이 경우는 흡수포화매질이 요구된다. 그러나 일반적으로 비선형 매질은 두 가지 특성을 다 가진다. 그래서 어떤 비선형 특성이 주가 되어 쌍안정 특성을 보이느냐에 따라 분산형이냐 흡수형이냐가 결정된다.

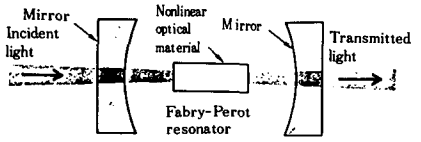
광쌍안정소자에 대한 연구의 주종을 이루는 분산형에 대해서 자세히 검토해 보자. 흡수형에 대해서는 참고문헌 [10]의 참조가 요망된다. 그림 1(a)는 Fabry-Perot 공진기를 구성하고 그 안에 분산형 비선형 매질을 삽입한 비선형 공진기를 나타낸 것이다. 비선형 공진기의 투과계수 τ는 비선형 매질에서의 손실을 무시한 경우에 다음과 같이 주어진다.[11]

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1+F\sin^2(\Phi/2)} \qquad (1)$$

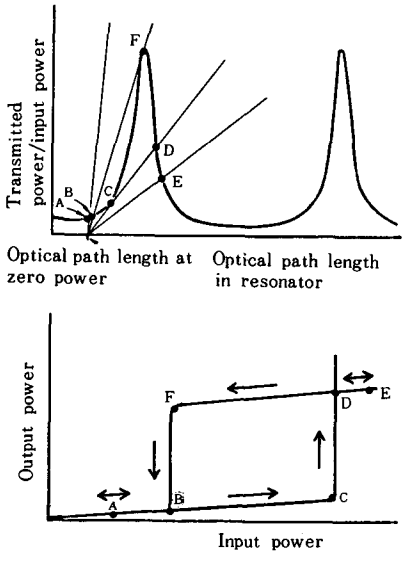
여기서 $F=4R/T^2$이다. R과 T는 각각 거울의 빛의 세기에 대한 반사율과 투과율이며, I_i와 I_t는 각각 입력과 출력 빛의 세기이다. 또, Φ는 공진기 왕복시 변화하는 위상이다. 비선형 매질의 굴절율은

$$n=n_0+n_2I_c \qquad (2)$$

로 주어진다. 여기서 n_0는 빛을 조사하지 않은 경우



(a) 진성형 광쌍안정소자의 구성도 (참고문헌 9)



(b) 도식적인 해 및 입출력 특성(참고문헌 9)

그림 1.

에의 매질의 굴절율이고 n_2는 굴절율의 변화율이며, I_c는 공진기내에서의 빛의 세기이다. 비선형 공진기에서의 위상 Φ는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = 4\pi n_0 L/\lambda + 4\pi n_2 I_c L/\lambda \qquad (3)$$

여기서 λ는 입력 빛의 파장이고 L은 공진기의 길이이다. 식(3)의 첫번째항은 굴절율이 n_0인 선형매질에서의 Φ이고 두번째 항은 비선형 특성에 의해 변하는 Φ이다. 입력 빛의 세기와 출력 빛의 세기와의 또 다른 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{I_c}{I_i}\frac{1-R}{1+R} \qquad (4)$$

그림 1(b)는 식(1)과 (4)의 도식적인 해를 나타낸다. 곡선은 입력광에 대한 출력광의 비(투과율)를 식(1)을 이용하여 그린 것이고, 직선은 식(3)과 (4)를 이용하여 τ를 I_i를 매개변수로 하여 Φ의 함수로 나타낸 것이다. 직선의 기울기는 입력광의 세기에 반비례한다. 직선과 횡축이 만나는 점은 입력 power가 '0'일 때의 공진기의 광학적 길이이다. 공진기는 입력 power가 '0'일 때 낮은 투과율을 갖도록 조정되어 있다. 입력 power가 낮아서 동작점(직선과 곡선이 만나는 점)이 A나 B인 경우는 비선형특성을 무시할 수 있으므로 공진기의 투과율이 낮다. 입력 power가 증가하면 직선의 기울기가 감소(공진기의 광학적길이가 변화)하므로 투과율이 증가하나 동작점 C에 도달하기 전까지는 낮은 투과율을 유지한다. 동작점 C에 도달하면 갑자기 높은 투과율로 천이된다(동작점 D). 물리적으로 보면, 입력 power가 증가하면 공진기 안의 광 세기가 증가하여 광학적 길이가 증가하므로 동작점이 공진점(투과율이 최고인 점)에 가까워진다. 그 결과 공진기 안의 광의 세기는 더 증가하게 된다. 이 증가는 다시 광학적 길이를 더욱 증가시켜서 동작점이 공진점 더 접근하게 된다. 이 과정이 반복되어 갑작스러운 천이가 생긴다(정궤환). 입력 power를 더욱 증가시키면 동작점이 D에서 E로 움직인다. 이때는 입력 power가 증가하면 동작점이 공진점에서 멀어지므로(부궤환) 출력 power는 D점의 경우와 비슷하다(limiter 작용). 입력을 감소시키면 투과율은 동작점이 F에 도달할 때까지 높은 투과율을 유지한다. 동작점이 F에 도달하면 갑자기 동작점이 B로 천이하여 낮은 투과율 상태가 된다. 안정도(stability)를 분석해 보면 동작점이 곡선 CF에 놓이는 상태는 불안정하다는 것을 알 수 있다. 그래서 입출력관계가 그림 1(b)와 같은 광학적 히스테리시스를 보여준다.

이와같은 쌍안정특성을 보이는 데 필요한 광세기의 임계치 I_{thr}은 다음과 같이 주어진다.[12]

$$I_{thr} = \frac{\sqrt{2}}{16\pi\beta}\frac{(1-R_\alpha)^2}{A(1+R_{B\alpha})(1-R_F)}\frac{\{G(F)\}^2}{H(F)} \qquad (5)$$

여기서 $R_\alpha = (1-A)\sqrt{R_F R_B}$, $R_{B\alpha} = (1-A)R_B$, $A = 1-e^{-\alpha L}$이다. R_F와 R_B는 각각 거울의 반사계수, α는 비선형 매질의 흡수계수이다. G(F)와 H(F)는 매질의 손실을 고려한 공진기의 등가적인 finesse인 $F = 4R_\alpha/(1-R_\alpha)^2$에 의해서 결정되는 것으로 다음과 같이 주어진다.

$$G(F) = 3(F+2) - \sqrt{(F+2)^2+8F^2}$$
$$H(F) = \{(F+2)\sqrt{(F+2)^2+8F^2} - (F+2)^2 - 2F^2\}^{\frac{1}{2}} \qquad (6)$$

여기서 매질의 특성을 결정하는 인자 β는 다음과

같이 주어진다.

$$\beta = 3n_2/\lambda\alpha \qquad (7)$$

즉 광세기의 임계치가 β에 반비례하므로 이를 감소시키기 위해서는 n_2가 크고 손실이 적은 매질이 요구된다. 광세기의 임계치 I_{thr}을 최소화 하는 공진기의 조건은 finesse가 큰 공진기인 경우 다음과 같이 주어진다.[12]

$$1-R=\alpha L \qquad (8)$$

즉, 거울의 투과율과 편도동안의 비선형 매질내에서의 흡수가 같아야 쌍안정성을 나타내는 광세기의 임계치가 최소가 된다. 비선형 광학현상이 매우 빠른 시간에 일어나므로 광쌍안정소자의 스위칭 시간은 공진기내에서의 광자의 축적시간에 의해서 좌우된다. 그러므로 초고속 광쌍안정소자를 구현하기 위해서는 식(8)을 L이 수 μm 정도에서 만족시키는 손실을 갖는 매질이 요구된다. 대부분의 반도체 비선형 광학매질이 이 요구를 만족하므로 반도체를 비선형 매질로 하는 광쌍안정소자가 많이 연구되고 있다.

2. 비선형 광학현상

1969년 Seidel 등에 의해서 흡수포화 매질을 이용한 광쌍안정소자가 제안[13]된 후 이를 구현하기 위한 많은 실험적인 노력이 있었다. 그러나, 흡수포화 매질을 포함한 공진기에서 높은 finesse를 얻기가 어려워서 실패하였다.[14] 그러나, 1972년에 Gibbs등이 분산형 비선형 매질을 사용하여 광학적인 hysteresis를 관찰하는데 성공하여 이에 대한 연구가 활기를 띠기 시작하였다. 초기의 광쌍안정소자들은 주로 물리적 현상연구에 사용되었으며 스윗칭 에너지가 크고 저온에서 동작시켜야 하는 등의 문제 때문에 실용화와는 거리가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 강한 비선형특성을 갖는 매질에 대한 연구가 요구되었다. 최근에 반도체에서의 강한 비선형 광학특성을 이용한 광쌍안정소자가 구현되면서 이의 응용이 거의 실용화 할 수 있는 단계에 접어들었다. 반도체가 강한 비선형 광학특성을 갖는 물리적인 원리는 dynamic Burstein-Moss shift와 exciton 효과가 있다.[10,15,16] 이러한 강한 비선형현상을 이용하면 광쌍안정소자의 스윗칭에너지는 전자회로의 스윗칭에너지 정도로 감소된다.

Dynamic Burstein-Moss shift란 빛에 의해서 반도체의 흡수 spectrum이 변화하는 것을 말하며 band filling이라고도 부른다. 빛에 의해서 여기된 전자는 전도대의 낮은 에너지 준위부터 점유하고, 정공은 가전자대(valence band)의 높은 에너지 준위부터 점유한다. 그러나, 한 준위를 점유할 수 있는 전자의 수가 두 개로 제한되므로 여기된 전자정공의 수가 증가하면 반도체가 흡수하지 않는 광자의 에너지가 처음에는 band gap이하이던 것이 차츰 높아지게 된다. 즉 빛에 의해서 흡수가 최대가 되는 spectrum이 높은 주파수쪽으로 이동한다. 그림 2에 이와 같은 spectrum의 천이를 도식적으로 나타내었다. 이러한 현상은 입사하는 빛의 광자에너지가 반도체의 band gap과 유사할 때 가장 크게 나타난다. 흡수 spectrum의 변화는 Kramers-Kronig 관계에 의해서 굴절율의 변화를 가져온다. InAs, InSb, CdHgTe등에서 나타나는 비선형 광학특성이 이에 해당된다.

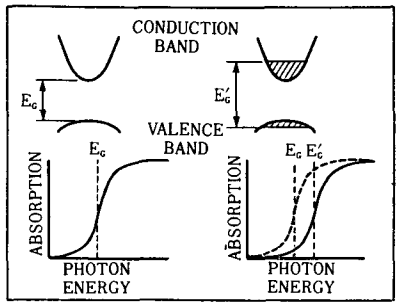


그림 2. Dynamic Burstein-Moss shift에 의한 흡수선의 변화(참고문헌 16)

Exciton이란 빛에 의해서 여기된 전자와 정공의 쌍이 Coulomb력에 의해서 마치 수소 원자처럼 작용하는 것을 말한다. Exciton의 에너지 준위는 전도대 아래에 있으며 전도대는 그것의 여기상태의 에너지 준위처럼 작용한다. 그림 3은 exciton에 의한 흡수선과 exciton이 없는 경우의 흡수선을 나타낸 것이다.[16] Exciton에 의한 흡수가 포화되는 원인은 여러가지가 있다. 상온에서는 형성된 exciton이 매우 빠른 시간안에 (~1 ps.) 이온화 되어 자유반송자가 된다. 이들이 전자와 전공 사이의 Coulomb력을 차단하여 다른 exciton이 형성되는 것을 방해한다.[16] 빛의 세기가 충분히 커서 자유반송자가 많아지면 exciton에 의한 흡수는 완전히 포화된다. 즉 빛에 세기에 따라서

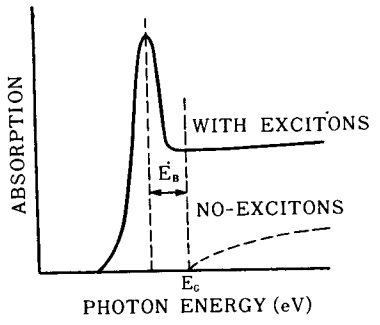
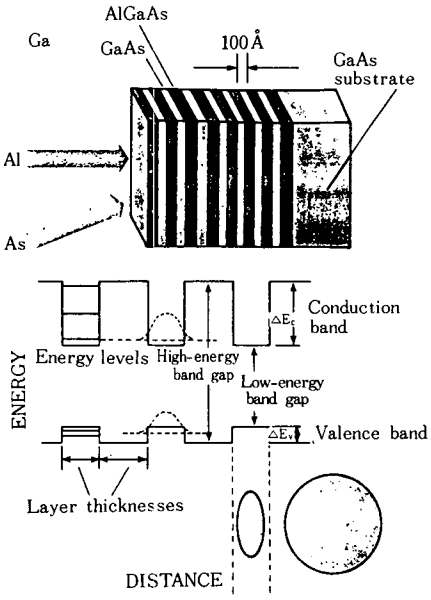


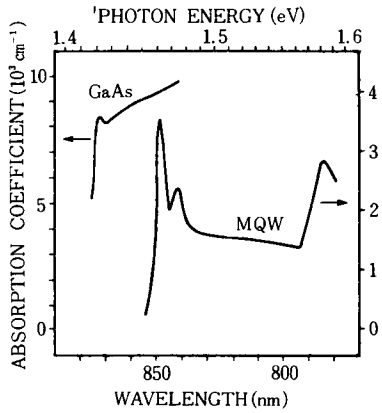
그림 3. Exciton이 있는 경우와 없는 경우의 흡수선 (참고문헌 16)

exciton에 의한 흡수가 변화하게 된다. 이 변화는 앞의 경우와 마찬가지로 Kramers-Kroing 관계에 의해서 굴절율의 변화를 가져온다. Exciton은 저온에서는 대부분의 bulk 반도체에서 관찰된다. 그러나 온도가 증가하여 격자의 열에너지(thermal energy)가 exciton의 binding 에너지에 근접해가면 exciton이 형성되지 못한다. 그러나 MQW에서는 exciton의 binding 에너지가 증가하여 상온에서도 exciton이 존재한다. MQW의 대표적인 예로 GaAs/GaAlAs를 들 수 있다.

MQW란 band-gap이 서로 다른 반도체의 얇은 층(100 Å정도)이 교대로 접합된 구조이다. 이러한 구조에서의 자유 반송자는 band-gap 차이 때문에 band-gap이 낮은 층에 국한된다. 이러한 상태의 자유반송자는 운동량과 에너지 준위가 양자화된다.[16] 그림 4(a)는 MQW의 구조와 양자화된 에너지준위를 나타낸 것이다. 이는 exciton의 여기준위에 해당한다. 그림4(b)는 GaAs와 GaAs/GaAlAs MQW에서의 흡수 spectrum을 나타낸 것이다. 그림에서 MQW의 흡수선이 GaAs의 흡수선보다 강한 exciton 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 MQW의 경우 전위장벽(potential well)에 의해서 반송자의 운동이 좁은 영역 안에서 2차원으로 국한되어 exciton의 binding energy는 증가하는 데 phonon에 의한 line broadenning은 증가하지 않기 때문이다.[17] 그림 4의 빗금 친 원은 bulk GaAs에서의 exciton을 나타낸 것이고 타원은 MQW에서의 exciton을 나타낸 것으로서 MQW에서 exciton이 어떻게 축소되는가를 나타낸 것이다. MQW에서의 exciton에 의한 흡수의 포화는 GaAs에서 보다 10배 정도 낮은 power에서 일어난다.[18] Bulk GaAs에서의 비선형 광학현상이 저온에서는 Exciton에 효과에 의한 것이나, 상온에서는 dynamic Burstein-Moss shift에 의한 것이라는 것이 최근 연구에 의해 확인 되었다.[19] 또, 입력광에 의해 생성된 전자들의 plasma효과가 상온에서의 GaAs의 흡수선폭을 선명하게 한다는 것도 밝혀졌다.[19]



(a) MQW의 구조와 energy band 구조(참고문헌 17)



(b) GaAs와 GaAs/GaAlAs MQW에서의 흡수선(참고문헌 17)

그림 4.

지금까지 설명한 비선형 광학현상은 매우 빠른 시간에 일어난다. 또, 앞에서 설명했듯이 반도체의 경우는 식(8)을 L이 수μm일 때 만족하므로 광쌍안정

소자의 스위칭 'ON' 시간은 picosecond나 그 이하로 감소시킬 수 있으나, 스위칭 'OFF' 시간은 매질의 반송자 수명에 의해서 결정되므로 GaAs인 경우는수 nanosecond 정도이다. 최근에 반송자의 확산과 공진기를 구성하는 표면에서의 표면재결합이 등가적으로 반송자수명을 감소시키는 것을 이용하여 스위칭 'OFF' 시간이 200 picosecond정도인 광쌍안정소자를 구현하였다.[19] 일반적으로 비선형특성이 강해지면 손실이 증가하고 또, 스윗칭 속도가 감소한다. 그래서 초고속 스윗칭을 원하면 비선형 특성이 작은 매질을 사용하면서 빛의 세기를 크게 해야 하고 매우 약한 빛으로 스윗칭을 하고자 할 때는 비선형 특성이 큰 매질을 사용하면 되나 스윗칭 속도가 떨어진다. 표3은 광쌍안정소자를 실험적으로 구현한 여러가지 비선형 매질에 대해서 비선형 특성의 원인과 그것이 나타나는 파장 등을 나타내었다.[20] 표에서 비선형특성이 전자적인 경우는 지금까지 설명한 것의 일종이고 열에 의한 것은 빛을 받은 부분에서 발생하는 열에 의해서 매질의 흡수율이나 굴절율이 변화하기 때문에 생기는 비선형 광학현상을 말한다. 가까운 장래에 보다 많은 비선형 매질에서 연속적인 동작(continuous operation)이 가능한 광트랜지스터 특성이나 광쌍안정 특성이 보여질 것이다.

3. 혼성형 광쌍안정소자

혼성형 광쌍안정소자는 비선형 특성을 광학소자와

표3. 진성형 광쌍안정소자를 실험적으로 구현한 비선형 매질(참고문헌 20)

Material	Operating temperature (K)	Bandgap λ_g (or exciton energy) (μm)	Operating wavelength λ (μm)	Irradiance (W/cm^2)	Recombination time (ns)	Mechanism
InSb	5	5.3	5.4	300	500	electronic refractive
InSb	77-120	5.4	5.5	20	500	electronic refractive
InSb	77	5.4	5.5	60	–	thermal absorptive
InSb	300	7	10.6	200K	47	electronic refractive
GaAs	5-120	0.8	0.82	100K	40	electronic refractive
GaAs	300	0.85	0.857	100K	40	electronic refractive
GaAs/GaAlAs	300	0.806	0.83	100K	40	electronic refractive
GaAs/GaAlAs	300	0.845	0.857	900	–	thermal absorptive
CdS	2	0.481	0.487	300	0.5	electronic refractive
CdS	2	0.481	0.489	600K	0.5	electronic refractive
CdS	2-50	0.481	0.487	1K	–	thermal absorptive
$Cd_{0.23}Hg_{0.77}Te$	77	10	10.6	4K	2500	elecronic refractive
$Cd_{0.23}Hg_{0.77}Te$	300	6.5	10.6	100K	20	elecronic refractive
InAs	77	3	3.1	75	200	electronic refractive
CuCl	17	0.3899	0.3900	10M	0.5	electronic refractive
Te	300	3.5	10.6/5.3	10M	100	electronic refractive
Si	300	1.11	1.06	1K	–	thermal refractive
$GeSe_2$	300	0.5	0.6328	100	–	thermal absorptive
ZnSe	300	0.48	0.5145	250	–	thermal refractive
ZnSe	300	0.48	0.5145	1K	–	thermal absorptive
ZnS	300	0.3	0.5145	10K	–	thermal refractive
Na	400	–	0.5890	0.5	–	electronic refractive
Ruby	77	–	0.6328	2K	–	electronic refractive
Liquid crystal	300	–	0.5145	10	–	thermal refractive
Rb	450	–	0.7779	–	–	electronic refractive electronic absorptive
Glass	300	–	0.6471	1K	–	thermal refractive
MBBA	300	–	0.694	4M	–	electronic refractive
CS_2	300	–	0.694	12M	–	electronic refractive
Nitrobenzene	300	–	0.694	10M	–	electronic refractive
Dye	300	–	0.5	100mW	–	thermal refractive
SF_6	300	–	10	1M	–	vibronic refractive
NH_3	300	–	10	1M	–	vibronic refractive

전자회로를 사용하여 구현하므로 비선형 매질의 특성에 의해서 정해지는 사용 파장에 대한 제한을 받지 않으며, 매우 큰 비선형특성을 얻을 수 있어 낮은 입력 power로 스윗칭이 가능하다. 이러한 큰 비선형 특성은 쌍안정성 이외에도 다안정성(multi-stability)을 실험적으로 구현할 수 있도록 한다.[21] 혼성형의 또 다른 장점은 구조에 따라서는 전기적인 입출력을 동시에 얻을 수 있으므로 광신호와 전기신호의 interface로도 사용할 수 있다는 것이다. 혼성형 광쌍안정소자의 응용분야는 주로 광통신에서의 중계기 및 광검출기, 또는 고속 스윗칭을 요구하지 않는 packet switching 등이 있다. 또, 실험적으로 구현하기가 간편하므로 광쌍안정소자의 천이특성과 동특성(특히 chaos)등을 연구하는 데도 이용되고 있다.[22,23] 그러나, 혼성형 광쌍안정소자는 광-전기-광으로의 신호변환과정을 거치므로 스윗칭 시간이 전기적인 특성(광검출기나 증폭기의 속도)에 의해 제한되어 광학의 장점을 충분히 살리지 못하고 있다.

혼성형 광쌍안정소자는 1977년 P. W. Smith 등이 처음으로 제안하였다.[21] 그림 5는 이들이 제안한 공진기를 이용한 혼성형 광쌍안정소자이다. 비선형 광학매질로 전기광학 매질(전계에 따라 굴절율이 변하는 매질)을 사용하고 있다. 출력은 광검출기에서 전기신호로 변환되어 전기광학 매질에 공급함으로써 비선형특성을 얻고 있다. 공진기와 비선형 매질을 사용하므로 정성적인 동작원리는 진성형과 유사할 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

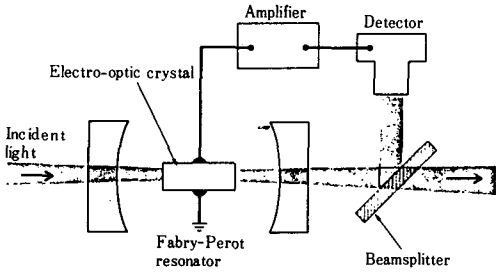


그림 5. 혼성형 광쌍안정소자의 구성(참고문헌 9)

혼성형 광쌍안정소자를 구현하기 위해서는 광신호의 전달특성이 제어 전압에 비선형 함수인 광 스위치만 필요하고 공진기는 필요하지 않다는 것이 증명되었다.[22] 그 후 많은 공진기를 사용하지 않는 혼성형 광

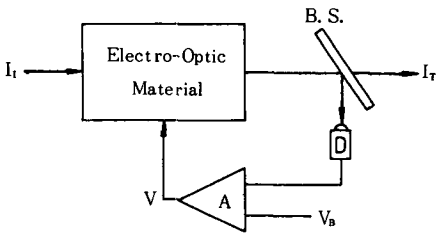


그림 6. 공진기가 없는 혼성형 광쌍안정소자의 구성도

쌍안정소자가 제안되었다.[22-26] 그림 6에 공진기를 사용하지 않는 혼성형 광쌍안정소자의 구성도를 나타내었다. 그림에서 electro-optic material은 광학적인 전달특성이 가해준 전압에 비선형 함수인 광 스위치나 광 변조기이다. 이 소자의 출력 광의 세기는

$$I_t = I_i\, T(V) \qquad (9)$$

로 주어진다. 여기서 $T(V)$는 광 스위치의 비선형 전달특성이다. 광쌍안정특성을 얻기 위해 광출력을 검출하여 전압으로 변환한 다음 이것을 광 변조기로 궤환하면, 광변조기 양단전압은

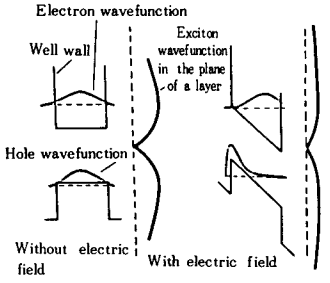
$$V = V_b + \gamma I_t \qquad (10)$$

가 된다. 여기서 V_b는 I_t와 무관한 광 스위치의 바이어스 전압이고 γ는 광세기에서 전압으로의 변환상수이며, 필요한 전기적인 증폭을 포함하고 있다.

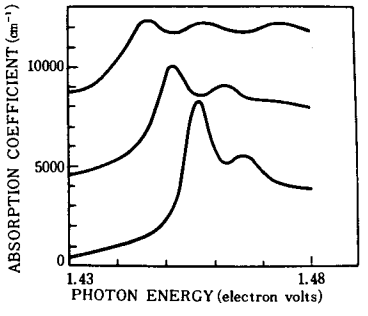
혼성형 광쌍안정소자의 입출력 특성은 진성형의 경우처럼 식 (9)와 (10)에서 $T(V) = (V - V_b)/\gamma I_i$의 관계에 의해서 주어진다. 이식은 전성형의 경우처럼 도식적인 방법으로 풀 수 있다. 도식적인 방법으로 풀기 위해서 먼저 광스위치의 전달특성 $T(V)$를 V에 대해 그리고, 다음에는 우변의 직선을 I_i를 매개변수로 하여 그린다. 해는 그린 곡선과 직선이 만나는 점이다. 이를 진성형의 경우의 식 (1)-(4)와 비교하면 공진기 왕복시의 위상변화 Φ가 광 스위치에 인가되는 전압 V로 바뀌었다는 것을 알 수 있다. 그러므로 입출력 특성은 진성형의 경우와 유사하다. 광 스위치의 비선형 전달특성은 사용하는 광 스위치에 따라 다르다. 대부분의 광변조기는 전달특성이 비선형 공진기처럼 가해진 전압의 주기함수이다. 그러나 광쌍안정소자는 액정 광 변조기처럼 전달특성이 주기함수가 아닌 광 변조기로도 구현할 수 있다.[23,24]

MQW를 이용한 혼성형 광쌍안정소자는 D. A. B. Miller 등이 제안한 SEED (self elector-optic effect device) 가 있다.[18] SEED는 MQW에서의 QCSE (quantum confined stark effect) 를 이용한 것이므로 먼저 QCSE에 대해서 알아보자. MQW의 well에 수직인 방향으로 전계를 가하면 전자와 정공은 이 전계에 의해서 서로 반대 방향으로 이동한다. 그러나, 에너지 장벽이 있기 때문에 반송자들이 여전히 well에 머무른다. 그림 7 (a) 는 전계를 가하지 않은 경우와 가한 경우의 전자와 정공의 파동함수를 나타낸 것이다. Well의 두께가 충분히 좁아서 전계를 가한 경우에도 전자와 정공이 Coulomb 력을 느끼므로 exciton이 존재한다. Bulk GaAs에서는 전계를 가하면 exciton이 이온화 되어 exciton를 관찰할 수 없으나, MQW에서는 전자와 정공이 well를 tunnelling 해야 exciton이 이온화 되므로 GaAs보다 50배 정도 큰 전계를 가할 수 있다. 이 때 흡수최대점은 exciton의 binding energy의 2.5배 정도 낮은 주파수쪽으로 이동한다. 그림 7 (b) 에 전계에 의한 흡수 최대점의 이동을 나타내었다. 이와 같이 전계에 의해서 흡수 최대점 또는 흡수선이 이동하는 효과를 QCSE라 부른다. 이러한 효과는 bulk 반도체에서는 관찰되지 않고 MQW에서만 관찰된다.

이제 QCSE를 이용한 광쌍안정소자인 SEED의 동작원리를 알아보자. 그림 8 (a) 는 SEED를 이용한 광쌍안정소자의 구성도이다.[17,18] 입력 빛이 약할 때는 MQW에 충분한 전압이 가해져서 exciton peak에서 흡수가 약간만 일어나도록 입력 파장을 선택한다. 빛의 세기가 증가하면 MQW에 흐르는 전류가 증가한다. 그래서 전압강하가 생기므로 MQW에 가해지는 전압이 감소한다. 이 감소는 흡수 최대점을 높은 주파수쪽으로 이동시키므로 흡수가 증가한다. 이 과정이 MQW가 낮은 투과율로 천이될 때까지 계속된다. 낮은 투과율로 천이된 다음 입력을 감소시키면 낮은 투과율을 유지하다 높은 투과율로 천이한다. 그림 8 (b) 에 SEED를 이용한 광쌍안정소자의 입출력 특성을 나타내었다. SEED를 이용한 소자는 이외에도 여러가지가 있다.[18]

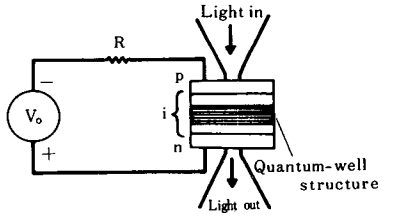


(a) MQW에서의 전계에 의한 파동함수의 변화(참고문헌 17)

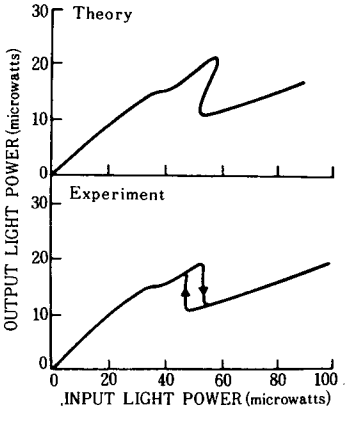


(b) MQW에서의 전계에 의한 흡수선의 변화. 전계의 세기는 위에서부터 1×10^4, 4.7×10^4, 7.3×10^4 V/cm 이다 (참고문헌 17)

그림 7.



(a) SEED의 구성도(참고문헌 17)



(b) SEED의 입출력 특성(참고문헌 17)

그림 8.

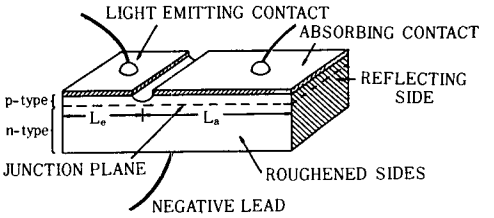
4. 능동형 광쌍안정소자

지금까지 설명한 광쌍안정소자는 수동 소자만을 사용한 것이므로 출력 power가 입력 power보다 낮아서 여러 단을 연결해서 신호처리용으로 사용하는 데는 어려움이 있다. 그래서, 광 power의 손실을 보상해 줄 수 있는 능동소자 즉, 레이저를 사용하는 광쌍안정소자가 특히 유용할 것이다. 다이오드 레이저는 효율이 좋고, 크기가 매우 작고, 스윗칭속도가 빠르므로 능동형 쌍안정소자 구현에 가장 적합한 레이저이다. 다이오드 레이저를 이용한 능동형 광쌍안정소자로는 1964년 Lasher가 제안한 흡수포화 매질을 이용한 쌍안정 다이오드 레이저,[27] 다이오드 레이저와 photodetector를 사용한 전기광학적 방법,[28~32] 온도에 따른 분극의 변화를 이용한 것[33] 또, 반송자 농도나 광의 세기에 의한 굴절율의 변화를 이용하는 분산형 등이 있다.[34~38] 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정 소자는 스윗칭 속도가 빠르고, 집적화가 용이하므로 광신호처리용 기본소자로서 널리 사용될 것이다. 특히, 광통신용으로 중계기, 전단 수신기(front end receiver) 등에 널리 이용될 수 있으며, 초고주파를 광학으로 제어하는 소자로도 널리 응용될 것이다.[30] 반면에, 다이오드 레이저를 이용한 능동형 광쌍안정소자는 다수의 소자를 병렬로 배열해서 병렬 처리장치에 이용하기에는 적합하지 않다. 그러나, 표면발광 다이오드 레이저(surface emitting diode laser)의 성능개선[40] 은 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정소자의 병렬처리장치에의 응용을 가능케 할 것이다. 특히, quantum well 구조를 갖는 발진임계전류가 매우 낮은 (<1mA) 다이오드 레이저의 개발[41] 은 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정소자의 새로운 가능성을 시사한다.

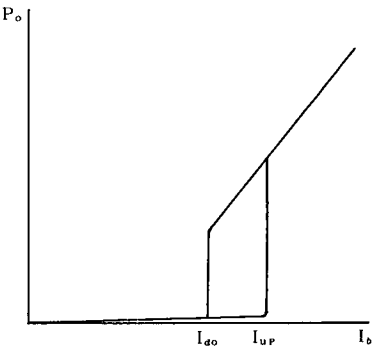
대표적인 다이오드 레이저를 이용한 광쌍안정소자인 쌍안정 다이오드 레이저의 구조는 그림 9(a) 와 같이 되어 있다. 그림에서는 하나의 이득을 갖는 구간(gain section) 과 하나의 손실을 가지고 있는 구간(loss section) 으로된 구조를 나타낸 것이나 다른 여러가지 구조의 변화가 연구 되었다. 주기적으로 이득구간과 손실구간을 갖는 구조[39] 와 두 이득구간 사이에 하나의 손실구간의 있는 구조[42] 등이 있다. 이와 같은 구조의 정성적인 동작원리는 다음과 같다.

바이어스 전류를 '0' 에서부터 증가시키면 레이저는 손실이 매우 커서 처음에는 발진을 하지 못하나, 바이어스 전류가 증가하여 이득이 이득구간의 손실과 손실구간의 손실의 합보다 커지면(양쪽 거울의 손실을 포함) 레이저가 발진을 시작한다. 레이저가 발진을 시작하면 손실구간의 손실이 감소하여 광의 세기가 증가한다. 이 증가는 손실구간의 손실을 더욱 감소시킨다. 이러한 과정을 통하여 레이저는 비발진 상태에서 갑자기 발진상태로 천이한다($I_b=I_{up}$). 바이어스 전류를 더욱 증가시키면 광의 세기는 바이어스 전류에 따라 증가한다. 바이어스 전류를 감소시키면 손실구간의 손실이 매우 낮으므로 레이저 바이어스 전류가 I_{up} 보다 낮아도 발진을 하다가 손실구간을 무시한 경우의 발진임계전류 부근에서 갑자기 발진하지 않는 상태로 천이한다($I_b=I_{do}$). 그림 9(b) 는 이와 같이 동작특성을 나타낸 것이다. 바이어스 전류를 고정하고 광을 입력으로 하여도 유사한 동작곡선을 얻을 수 있다.

이러한 구조에서 쌍안정특성을 얻기 위해서는 이득구간과 손실구간 사이의 전기적인 저항이 커야한다.[43] 쌍안정 다이오드 레이저에 미치는 외부궤환의 영향도 연구되었다. 최근에는 이론적인 연구가 활발히 진행되고 있으며, 불안정에 관한 연구결과도 보고되었다.[44] 응용면에서 이러한 흡수포화 매질을



(a) 다이오드 레이저를 이용한 흡수형 광쌍안정소자(참고문헌 27)



(b) 이의 입출력 특성

그림 9.

사용한 쌍안정 레이저는 부피가 작고 효율이 좋은 장점이 있으나, 스위칭속도는 흡수포화 매질의 반송자 수명에 의해 제한된다.

발진모드 천이에 의해서 쌍안정 특성이 나타나는 분산형과 분극형은 스위칭 속도를 빠르게 할 수 있다. 대표적인 예를 들어보면 두개의 다이오드 레이저를 수 μm 간격으로 나란히 배열한 경우를 보자.[37,38] 그림 10(a)에 이러한 구조의 쌍안정 다이오드 레이저와 그의 특성곡선을 나타내었다. 두 다이오드 레이저의 폭과 이들 사이의 간격은 각각 3μm이다. 두 다이오드 레이저에 발진임계전류보다 큰 전류가 비슷하게 흐르면 중앙의 전자밀도가 양쪽 다이오드 레이저의 전자밀도 보다 낮으므로 굴절율은 중앙이 가장 높게 된다. 그래서 index guiding이 되어 빛의 세기의 분포가 그림 10(b)의 실선과 같이 된다. 반면에 한 쪽 다이오드 레이저에 흐르는 전류에 의해 레이저가 발진하는 상태인 경우는 gain guiding이 일어난다. 이 경우는 빛의 세기가 최대가 되는 점이 전류가 많이 흐르는 레이저 쪽으로 이동된다. 쌍안정 특성은 두 레이저에 흐르는 전류의 비에 따라 guiding 방식이 변화되면서 나타난다. 또, 전류의 비를 고정하고 외부에서 레이저에 빛을 입사시키는 경우에도 마찬가지로 쌍안정 특성을 얻을 수 있다. 현재까지 보고된 스윗칭 시간은 800 ps. 이다. 그러나 이것은 스윗칭 속도를 줄이기 위해 최적화한 것이 아니므로 스윗칭 속도는 더 감소시킬 수 있다.[38]

지금까지 설명한 다이오드 레이저의 구조를 변경하는 쌍안정 소자는 다이오드 레이저의 제작과정에서의 오차 때문에 신뢰성있는 소자를 얻기가 어렵다.

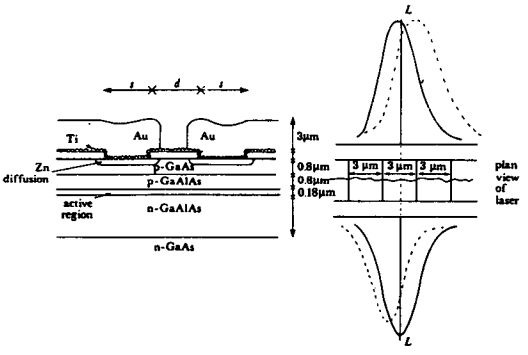


그림10. (a) 두개의 레이저를 나란히 놓은 구조의 광쌍안정소자(참고문헌 38)
(b) 전류비의 변화에 의한 빔의 변화(참고문헌 38)

그래서 기존의 부품들을 이용하여 좀더 구현하기가 용이한 광쌍안정소자로서 광 검출기와 레이저를 이용하는 전기광학적인 방법이 제안되었다. 이 방법에는 Ogawa등이 제안한 photodetector 의 포화와 다이오드 레이저의 발진임계 특성을 이용하는 방법[29] 과 Lau등이 제안한 FET와 다이오드 레이저를 집적화하고 광학적인 궤환을 가하는 방식[30] 등이 보고되었다. 그러나, 이러한 광쌍안정소자는 다이오드 레이저를 발진임계전류보다 낮게 바이어스 해야 하므로 고속소자를 구현하기가 어렵다. 최근에 지금까지 보고된 방식에서 문제점으로 대두되고 있는 스윗칭 속도를 제한하는 요인을 제거할 수 있는 다이오드 레이저, 광 검출기, 트랜지스터로 구성된 쌍안정 다이오드 레이저가 제안되었다.[31,32,45]

Ⅲ. 결 론

진성형 및 혼성형 광쌍안정소자와 다이오드 레이저를 이용한 능동형 광쌍안정소자의 동작원리를 고찰하고, 그 응용에 대해서도 검토하였다. 또, bulk 반도체에서의 비선형 광학현상인 dynamic Burstein-Moss shift와 exciton 효과를 고찰하였으며, MQW에서의 비선형 광학현상인 exciton 효과와 QCSE 효과에 대해서도 자세히 검토하였다. 이제 국내에서도 GaAs를 비롯한 여러가지 복합반도체를 성장하고 이를 이용하여 다이오드 레이저를 제작하는 기술이 무르익어 감에 따라 광쌍안정소자와 이에 수반되는 물리현상 및 응용에도 관심을 가져야 할 것이다.

參 考 文 獻

[1] P.W. Smith, "Application of all-optical switching and logic," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. A313, no. 1525, pp. 349-355, 1983.

[2] H.M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling Light with Light*, Academic Press, Orlando, 1985.

[3] A. Wolfe, "Optical computing is beginning to take on the glow of reality," *Electron. week*, pp. 24-27, 1985.

[4] "Optical Bistability: Where is it Headed," *Laser Focus*, no. 10, pp. 85-108, 1985.

[5] H.M. Gibbs, S.L. McCall, and T.N.C. Venkatesan, "Optical bistable devices: the basic components of all-optical system," *Opt. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 463-468, 1980.

[6] P.W. Smith and J.P. Hermann, "Optical bistability at nonlinear interface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 35, no. 11, pp. 846-848, 1979.

[7] M.L. Berre, E. Ressayre, A. Tallet, K. Tai, and H.M. Gibbs, "Transverse optical bistabilities and instabilities," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. EQ-21, no. 9, pp. 1404-1418, 1985.

[8] F. Henneberger and H. Rossmann, "Resonatorless optical bistability based on increasing nonlinear absorption," *Phys. Status Solidi B*, vol. 115, pp. 685-693, 1984.

[9] P.W. Smith, "Bistable optical devices promise subpicosecond switching," *IEEE Spectrum*, vol. 18, no. 6, pp. 26-33, 1981.

[10] B.S. Ryvkin, "Optical bistability in semiconductors," *Sov. Phys. Semicond.*, vol. 19, no. 1, pp. 1-15, 1985.

[11] E. Abraham and S.D. Smith, "Optical bistability and related devices," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 45, pp. 815-885, 1982.

[12] D.A.B. Miller, "Refractive Fabry-Perot bistability with linear absorption : theory of operation and cavity optimization," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. EQ-17, no. 3, pp. 306-311, 1981.

[13] H. Seidel, U.S. Patent No. 3 610 731, 1969.

[14] J.M. Marburger and F.S. Felber, "Theory of lossless nonlinear Fabry-Perot interferometer," *Phys. Rev.*, vol. 17A, no. 1, pp. 335-342, 1978.

[15] J.I. Pankov, *Optical Process in Semiconductor*, Dover Publication, Inc., New York, 1971.

[16] D.A.B. Miller, "Dynamic nonlinear optics in semiconductors: physics and applications," *Laser Focus*, vol. 19, no. 7, pp. 61-67, 1983.

[17] D.S. Chemla, "Quantum wells for photonics," *Phys. Today*, vol. 38, no. 5, pp. 57-64, 1985.

[18] D.S. Chemla, D.A.B. Miller, and P.W. Smith, "Nonlinear optical properities of GaAs/GaAsAl multiple quantum well material: phenomena and applications," *Opt. Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 556-564, 1985.

[19] Y.H. Lee, *Room-Temperature Optical Nonlinearities in GaAs and Fast Optical Logic Gates*, University of Arizona 박사논문, 1986.

[20] S.D. Smith, J. Janossy, H.A. MacKenxie, J.G.H. Mathew, J.J.E. Reid, M.R. Taghizadeh, F.A.P. Tooley, and A.C. Walker, "Nonlinear optical circuit elements as logic gates for optical computers: the first digital optical circuits," *Opt. Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 569-578, 1985.

[21] P.W. Smith, "Hybrid bistable optical devices," *Opt. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 456-462, 1980.

[22] E. Garmire, S.D. Allen, and J. Marburger, "Bistable optical devices for integrated optics and fiber optics applications," *Opt. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 194-197, 1979.

[23] Jae-Won Song, Sang-Yung Shin, and Young-Se Kwon, "Optical bistability, regenerative oscillation, and monostable pulse operation in a liquid crystal bistable optical devices," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 1521-1524, 1984.

[24] Jae-Won Song, Hai-Young Lee, Sang-Yung Shin, and Young-Se Kwon, "Periodic window, period doubling, and chaos in a liquid crystal bistable optical devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 1, pp. 14-16, 1983.

[25] U.H. Gerlach, U.K. Sengupta, and S.A. Collins, Jr., "Single spatial light modulator bistable optical matrix device using optical feedback," *Opt. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 452-455, 1980.

[26] U.K. Sengupta, U.H. Gerlach, and S.A. Collins, Jr., "Bistable optical spatial device using direct optical feedback," *Opt. Lett.*, vol. 3, pp. 199-201, 1978.

[27] G.J. Lasher, "Analysis of a proposed bistable injection laser," *Solid-state Electron.*, vol. 7, no. 10, pp. 707-716, 1964.

[28] 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-L648, 1981.

[29] Y. Ogawa, H. Hiromasa, and H. Inaba, "Optical bistable device using light emitting diode," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 1878-1880, 1982.

[30] K. Lau and A. Yariv, "Bistable optical electrical/microwave switching using optically coupled monolithically integrated

GaAlAs translaser," *App. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 7, pp. 719-721, 1984.

[31] 이창희, 윤태훈, 신상영, "다이오드 레이저를 이용한 새로운 광쌍안정소자," 대한전자공학회 1985년 하계종합학술대회, 1985. 6. 28.

[32] 김석윤, "다이오드 레이저와 Avalanche Photodiode를 이용한 광쌍안정소자," 한국과학기술원 석사논문, 1987.

[33] Y.C. Chen and J.M. Liu, "Polarization bistability in semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, no. 1, pp. 16-18, 1985.

[34] P. Glas, A. Klehr, and R. Muller, "Transient and stationary properities in bistable operation of GaAs laser coupled to external resonator," *Opt. Comm.*, vol. 44, no. 4, pp. 196-200, 1983.

[35] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on the semiconductor injection laser properities," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, no. 3, pp. 347-355, 1980.

[36] N.A. Olssen, W.T. Tsang, and R.A. Logan, "Spectral bistability in coupled cavity semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, no. 4, pp. 375-377, 1984.

[37] K.A. Shore, "Semiconductor laser bistable operation with an adjustable trigger," *Opt. and Quantum Electron.*, vol. 14, pp. 321-326, 1982.

[38] J.E. Carroll and I.H. White, "Optical bistability in semiconductor laser," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 313, no. 1525, pp. 333-340, 1984.

[39] H. Kawaguchi and G. Iwane, "Bistable operation in semiconductor lasers with inhomogeneous excitation," *Electron. Lett.*, vol. 17, pp. 167-168, 1981.

[40] K. Iga and S. Uchiyama, "GaInAsP/InP surface-emitting laser diode," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 403-422, 1986.

[41] K.Y. Lau, "Ultarlow-threshold guantum-well lasers studided for supercomputers," *Laser Focus/Electro-Optics*, vol. 23, no. 9, pp. 58-64, 1987.

[42] Y. Odagiri and K. Komatsu, "Bistable laser diode memory for optical time-devision switching applications," Conf. Lasers and Electro-Optics Technical Digest, Anaheim, Califonia, June 19-22, 1984.

[43] 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.

[44] H. Kawaguchi, "Optical bistability and chaos in a semiconductor laser with saturable absorber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 12, pp. 1264-1266, 1984.

[45] 이창희, 김석윤, 신상영, "전기광학적 정궤환을 이용한 광쌍안정소자," 대한전자공학회논문지, vol. 25, no. 1, pp. 94-100, 1988.

♣ 用 語 解 說 ♣

Satellite communication system (위성 통신방식)

지구를 돌고 있는 인공 위성을 매체로 하는 통신 방식으로 1 중계로 장거리 전송이 가능하므로 다른 통신 수단에 비하여 안정된 고품질의 통신이 가능하고, 지상 각 지점으로부터의 다원 접속(多元接續)이 가능한 특징이 있다. 그러므로 이 통신 방식은 우선 국제통신계(國際通信系)에서 채택되어 현재 국제 상업 위성통신 기구(INTELSAT, International Telecommunication Satellite Consortium)에서는 는 태평양, 대서양, 인도양상의 3 개소에 정지 위성을 쏘아 올려 국제통신을 하고 있다. 또 국내 통신계로서도 미국, 케나다, 소련 등에서 실용화되어 있다. 우리 나라에서도 위성 통신계획을 검토하고 있다.