

# 반도체 레이저에서의 광쌍안정성

## Optical Bistabilities in Semiconductor Lasers

이 창 희

한국전자통신연구소, 기초기술연구부

반도체 레이저에서의 여러가지 다른 원인에 기인하는 광쌍안정성과 이의 응용을 검토하였다. 이득 영역과 흡수포화 매체를 가지고 있는 반도체 레이저, 광전쇄환이 가해진 반도체 레이저, cleaved-coupled-cavity 반도체 레이저, distributed feedback 반도체 레이저, twin stripe 반도체 레이저, 외부공진기 반도체 레이저에서의 광쌍안정성을 고찰하였다. 또, 반도체 레이저 광증폭기에서의 광쌍안정성에 대해서도 검토하였다.

### 1. 서론

반도체 레이저는 효율이 좋고, 크기가 매우 작고, 스위칭속도를 빨리할 수 있으므로 이득을 갖는 광쌍안정소자의 구현에 적합한 소자이다. 반도체 레이저를 이용한 광쌍안정소자는 1964년 Lasher가 제안한 흡수포화매질을 이용한 광쌍안정 반도체 레이저<sup>1</sup>, 반도체 레이저와 광검출기를 이용한 광전쇄환에 의한 광쌍안정소자<sup>2</sup>, 온도에 따른 분극의 변화를 이용한 광쌍안정소자<sup>3</sup>, 또, 반송자 농도나 광의 세기에 의한 굴절율의 변화를 이용한 광쌍안정소자<sup>4-6</sup> 등이 있다.

광쌍안정 특성을 보이는 반도체 레이저는 전기적인 입력에 대한 광출력도 쌍안정특성도 함께보이므로 광전변환이 필요한 곳에 응용이 주목된다. 쌍안정 반도체 레이저의 응용에서 문제시 되는 것은 반도체 레이저의 높은 발진임계 전류이다. 이는 반도체 레이저의 손실을 보상하고 발진시키기 위해서 필요한 최소전류이므로 쌍안정 특성을 보이기 위해서 공급해 주어야 하는 전류이기도 하다. 통상적인 GaAs 반도체 레이저의 경우 발진임계전류는 10 mA 이상이므로 레이저로 발진시키기 위해서 필요한 전기적인 power는 20 mW 이상이다. 이러한 높은 power 소모는 쌍안정 반도체 레이저를 범용의 스위칭 및 기억소자로 사용하는데 장애가 되고 있다. 특히 2 차원적인 array를 구성하려고 할 때는 더욱 어려움이 많다. 그래서 하나의 해결책으로 반도체 레이저 대신 발광다이오드(LED)을 이용한 쌍안정소자도 고려가 되고 있다<sup>2</sup>.

LED를 이용하느냐 반도체 레이저를 이용하느냐는 소자의 동작속도와 power 소모중에서 무엇이 중요한 인자인가에 의해서 결정된다.

최근에 개발된 양자우물 반도체 레이저는 발진임계 전류가 1 mA나 그 이하로 감소되었다<sup>7</sup>. 또, 양자우물 레이저를 최적화 하거나 보다 저차원의 반도체(양자선, 양자상자)를 활성영역으로 이용하며는 이는 더욱 감소될 것이다. 이러한 반도체 레이저의 성능개선은 지금까지 반도체 레이저 광쌍안정소자의 단점인 높은 power 소모를 완화시킬 수 있으므로 이들에 대한 새로운 관심을 불러 일으키고 있다. 특히, 아주 낮은 발진 임계전류를 갖는 표면방출 반도체 레이저의 개발은 쌍안정 반도체 레이저의 2차원적 array를 구현할 수 있도록 하므로 광신호처리용으로 보다 넓은 영역에 이용할 수 있도록 해줄 것이다<sup>8</sup>. 반도체 레이저 광쌍안정소자의 또 다른 가능성은 쉽게 다른 광자소자 및 전자소자와 집적화가 가능하다는 것이다.

반도체 레이저를 이용한 광쌍안정소자의 대표적인 응용분야는 광통신용으로 증계기, 전단수신기, 초고주파의 광학적 제어등이다. 특히 광스위칭시스템에서의 광 메모리로의 응용이 기대된다<sup>9</sup>. 표면발광 반도체 레이저를 이용한 광쌍안정소자의 2 차원 array는 패턴인식, 디지털 광컴퓨팅 등에 이용될 수 있을 것이다<sup>10</sup>.

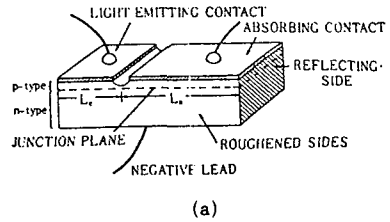
## 2. 흡수포화체를 이용한 쌍안정소자

대표적인 반도체 레이저를 이용한 광쌍안정소자인 쌍안정 반도체 레이저의 구조는 그림 1(a)와 같다. 그림에서 보인바와 같이 반도체 레이저 공진기안에 이득구간과 손실구간이 분리되어있다. 물론 이득구간과 손실구간의 수를 조정하여 다른 구조의 쌍안정 반도체 레이저들이 연구되고 있다. 대표적으로 주기적으로 이득구간과 손실구간을 갖는 구조<sup>11</sup>, 중앙에 하나의 이득구간과 양끝에 두 개의 손실구간을 갖는 구조가<sup>12</sup> 연구되었다. 이러한 구조를 갖는 광쌍안정 반도체 레이저의 동작원리는 다음과 같다.

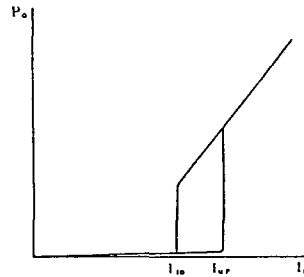
이득구간의 바이어스전류를 '0'에서부터 증가시키면 레이저는 손실이 매우커서 처음에는 발진을 하지 못하나, 바이어스 전류가 증가하여 이득이 이득구간의 손실과 손실구간의 손실의 합보다 커지면(양쪽거울의 손실포함) 레이저가 발진을 시작한다. 레이저가 발진을 시작하면 손실구간의 손실이 감소하여 광의 세기가 증가한다. 이 증가는 손실구간의 손실을 더욱 감소시킨다. 이러한 과정을 통하여 레이저는 비발진 상태에서 갑자기 발진상태로 천이한다( $I_b = I_{up}$ ). 바이어스전류를 감소시키면 손실구간의 손실이 낮으므로 레이저는 바이어스 전류가  $I_{up}$ 보다 낮아도 발진을 하다가 손실구간의 손실을 무시한 바이어스전류 부분에서 갑자기 비발진상태로 천이한다( $I_b = I_{do}$ ). 그림 1(b)는 이와 같은 쌍안정 다이오드 레이저의 L-I 특성곡선을 나타낸 것이다. 바이어스 전류를 쌍안정특성을 보이는 영역안의 한 값으로 고정하고 광을 입력으로하면 광입력 대 광출력도 쌍안정 특성을 보인다.

이러한 쌍안정 반도체가 쌍안정특성을 보이기 위해서는 흡수포화체의 이득 cross section과 반송자 수명의 곱이 활성영역의 그것보다 커야 한다<sup>13</sup>. 또, 전기적으로 이득구간과 손실구간이 충분히 절연되어야 한다<sup>14</sup>. 쌍안정 다이오드 레이저에 미치는 외부 광학적 궤환의 영향도 연구되었다<sup>12</sup>. 최근에는 이론적인 연구가 진행되고 있으며, 쌍안정 다이오드 레이저에서의 불안정성에 대한 연구결과도 보고되었다<sup>15</sup>.

이러한 쌍안정 반도체 레이저의 스위칭 속도는('ON' - 'OFF'로의 천이) 활성영역의 반송자 수명에 의해서 결정된다. 스위칭 속도를 빠르게 하기 위하여 흡수포화체의 반송자 수명을 줄이는 방법, 전기적인 postswitching 펄스를 인가하는 방법등이 제안되었다<sup>16</sup>. Postswitching 펄스를 이용하여 스위칭 에너지 0.7 fJ에 스위칭 시간 60 ps인 광쌍안정 반도체 레이저가 구현되었다<sup>16</sup>. 이는 충분히 적인 스위칭 에너지이나 이 때의 바이어스 전류에 의한 power소모는 매우



(a)



(b)

그림 1. (a) 다이오드 레이저를 이용한 흡수형 광쌍안정소자의 구조 「참고문헌 1」. (b) 이의 L - I 특성 곡선.

크다. Power 소모는 레이저의 발진임계전류를 낮추어서( 양자우물레이저를 이용 ) 감소시킬 수 있다.

지금까지 설명한 흡수형 광쌍안정 반도체 레이저는 쌍안정특성을 보이는 반도체 레이저 중에서 비교적 간단한 구조이어서 가장 많이 연구되었고 그 응용사례도 많다. 여러 연구소에서 광스위칭 시스템에서의 광메모리, 광학적 논리소자등에의 응용가능성을 보였다<sup>9</sup>. 최근에 양자우물반도체를 활성영역으로하는 쌍안정 반도체레이저로 1.5Gbit/s의 신호를 시간영역에서 demultiplexing한 결과가 보고되었다<sup>17</sup>.

## 3. 모드스위칭을 이용한 쌍안정소자

발진모드 천이에 의해서 쌍안정특성이 나타나는 분산형 광쌍안정 다이오드 레이저는 흡수형에 비해서 원리적으로 스위칭속도를 빠르게 할 수 있다. 즉, 흡수형은 레이저가 비발진 상태에서 발진상태로 천이하고, 스위칭 'OFF' 시간이 흡수포화체의 흡수 recover 시간에 의해서 결정되나, 발진모드의 천이를 이용하는 쌍안정소자는 발진 상태에서 모드가 스위칭 되므로 고속 스위칭이 가능하다. 분산형 쌍안정 반도체 레이저에는 중모드의 천이를 이용하는 것<sup>4-6</sup>과 횡모드의 천이를 이용하는 것<sup>18</sup>이 있다.

횡모드의 천이를 이용하는 광쌍안정 소자로서 두개의 반도체 레이저를 수  $\mu\text{m}$  간격으로 나란히 배열한 경우를

보자<sup>18</sup>. 그림 2(a)는 이러한 구조의 다이오드 레이저와 그의 특성을 나타낸 것이다. 두 반도체 레이저의 폭과 이들 사이의 간격은 각각 3 μm이다. 두 반도체 레이저에 발진 임계 전류보다 큰 전류가 비슷하게 흐르면 중앙의 전자밀도가 양쪽 다이오드 레이저의 전자밀도보다 낮으므로 굴절율은 중앙이 가장 높게 되어 index guiding이되어 빛의 세기의 분포가 그림 2(b)의 실선처럼된다. 반면에 한 쪽 레이저에 흐르는 전류에 의해 레이저가 발진하는 상태인 경우는 gain guiding에 의해서 발진이 된다. 이 경우는 빛의 세기가 최대가 되는 점이 전류가 많이 흐르는 쪽에 위치한다. 쌍안정 특성은 두 레이저에 흐르는 전류의 비에 따라 guiding방식이 변화되면서 나타난다. 또, 전류의 비를 고정하고 외부에서 빛을 한쪽 stripe에 입사시키는 경우에도 마찬가지로 쌍안정특성을 얻을 수 있다. 현재까지 보고된 스위칭 시간은 800 ps이다. 그러나 이것은 스위칭 속도를 줄이기 위해 쌍안정 레이저를 최적화한 것이 아니므로 스위칭 속도는 더 감소시킬 수 있을 것이다.

중모드의 천이를 이용한 광쌍안정 반도체 레이저는 cleaved-coupled-cavity 반도체 레이저<sup>5</sup>와, distributed feedback (DFB)반도체 레이저<sup>4</sup>, 외부공진기 반도체 레이저<sup>6</sup>가 있다. 이러한 쌍안정 레이저는 광출력뿐 아니라 발진 파장도 쌍안정 특성을 보이는 것이 특징이다. 먼저 쌍안정 distributed feedback 반도체 레이저의 동작특성을 살펴보자.

통상적인 DFB 반도체 레이저는 회절격자의 Bragg 파장을 중심으로 회절격자의 대역폭 정도의 간격으로 발진에 필요한 이득이 같은 두 개의 발진 모드를 갖는다. 즉 회절격자의 stop band 양쪽끝 부근에 2 개의 발진 모드가 존재한다<sup>4</sup>. 그래서 이들 모드간의 결합에 의해서, 단일모드, 쌍안

정특성, 그리고 두모드가 다 발진하는 경우가 생길 수 있다. 두 모드 레이저에서의 이러한 현상은 많이 연구되었다<sup>19</sup>. 레이저의 공진기를 앞에서의 쌍안정 반도체 레이저처럼 두 구간으로 나누고 서로 다른 바이어스 전류를 흘려서 이 degeneracy를 제거할 수 있다( 두모드의 발진에 필요한 이득이 달라진다. ). 즉 한쪽구간의 바이어스 전류를 변화하면 굴절율이 변화하여 degeneracy가 없어지고 바이어스 전류가 증가하느냐 감소하느냐에 따라 발진모드가 달라진다. 이 때 두 모드간의 결합이 쌍안정특성을 보이는 영역에 있으면 발진모드의 천이는 쌍안정특성을 동반한다. 이러한 쌍안정특성을 이용하여 flip-flop을 구현한 결과가 보고되었다<sup>4</sup>. 또, 단일모드 발진영역에서 모드 스위칭 특성을 이용하여 'OR', 'AND', 'NOT'등의 논리기능을 수행할 수 있다는 것이 보여졌다<sup>4</sup>. 이때의 스위칭 시간은 400 ps 이었다.

Cleaved-coupled-cavity ( C<sup>3</sup> ) 반도체 레이저는 간단하게 말하면 두개의 반도체 레이저를 수 μm간격으로 일렬로 놓은 레이저이다<sup>5</sup>. 그림 3(a)에 C<sup>3</sup> 반도체 레이저를 이용한 쌍안정성 실험장치의 구성을 나타내었다. 레이저의 발진주파수는 3개의 공진기에 의해서 결정되는 supermode에 의해서 결정되므로 대신호 변조시에도 단일 모드로 발진한다. 또, 한쪽 레이저의 바이어스 전류를 고정하고 다른쪽 레이저의 바이어스 전류를 변화시킴으로서 활성영역의 굴절율을 변화시켜 레이저의 발진 주파수를 tuning할 수 있다. Tuning의 범위가 어느 한계를 넘으면 레이저의 발진 파장이 다른 supermode로 천이하게 된다. 이 천이는 바이어스전류가 고정된 레이저의 바이어스 전류에따라 쌍안정특성을 동반하기도 한다<sup>5</sup>. 그림 3(b)는 C<sup>3</sup> 반도체 레이저의 쌍안정특성을 나타낸 것이다. 쌍안정특성의 폭은 고정된 바이어스 전류로서 어느정도 조정이 가능하다. Cleaved-coupled-cavity 레이저의 쌍안정특성을 이용하여 여러가지 논리기능을 수행할 수 있다는 것이 보고되었고 또, 주파수 다중화 광 스위칭에의 응용 가능성도 보고되었다<sup>20</sup>.

단일 모드 반도체 레이저에서 발진할 수 모드는 TE 모드와 TM 모드로 구별된다. 상온에서는 facet의 반사율이 이 때문에 항상 TE 모드로 발진을 한다. 그러나 온도를 190 K 정도로 낮추면 반도체 레이저에 strain이 생겨서 TM모드의 이득이 증가하여 발진모드가 TE에서 TM모드로 천이한다<sup>3</sup>.

만약 레이저의 동작온도를 발진모드가 천이하는 온도보다 약간 낮은 값에 고정하고 레이저의 바이어스전류를 변화 시키면 바이어스 전류가 낮을 때는 TM모드가 발진한다. 바이어스 전류를 증가시키면 바이어스 전류에 의해 발생하는 열 때문에 레이저의 동작온도가 상승하여 발진모드가 TE모드로 발진

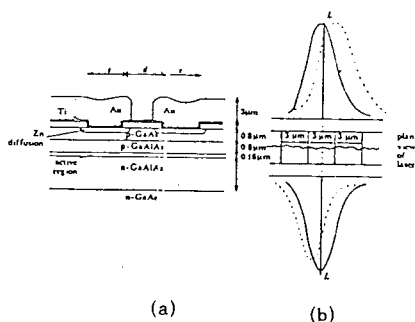


그림 2. (a) 두개의 레이저를 나란히 놓은 구조의 광쌍안정 소자의 구조와 (b) 이의 빔 profile의 변화<sup>18</sup>참고문헌 18.

모드가 천이한다. 이러한 천이과정이 쌍안정 특성을 나타낸다. 이러한 광쌍안정 특성을 이용하여 'AND', 'OR', "NOT", optical flip-flop를 구현하였다[3]. 광학적인 논리능을 수행하기 위해서는 광입력을 전류로 변환하는 광검출기나, 광전 스위치가 필요하다[3]. 측정된 스위칭 시간은 1 ns 이하이다.

외부공진기 반도체 레이저에서의 광쌍안정 특성은 반도체 레이저 공진기모드와 외부공진기 모드간의 상쇄간섭과 보강간섭에 의한 모드간에 경쟁에 의해서 나타난다[6]. 정상상태에서의 외부공진기 반도체 레이저는 반도체 레이저 공진기 모드와 외부공진기 모드의 주파수가 일치하는 점에서 발진을 한다. 이 상태에서 바이어스전류를 변화하거나 빛을 입력시키면 반도체 레이저 활성영역의 굴절율이 변화하여 반도체 레이저 공진기의 공진주파수가 변화된다. 이는 반도체

레이저 모드 공진주파수의 외부공진기 공진주파수로부터의 detuning을 의미한다. 즉 두 모드가 상쇄간섭을 한다. 그러므로 발진 모드가 서로 보강간섭이 되는 외부공진기 모드와 반도체 레이저 공진기 모드쌍으로 천이하면서, 광쌍안정성, 광 instability 등의 현상이 나타난다[6]. 이러한 현상은 광학적인 응용보다도 기초적인 반도체 레이저의 특성과 레이저 instability를 연구하는데 이용되었다[21].

#### 4. 광증폭기에서의 쌍안정특성

반도체 레이저의 또 다른 응용은 광증폭기로서의 응용이다. 즉 레이저를 발진임계전류 이하로 바이어스하여 신호광을 입력시키면 20 dB 이상의 이득을 얻을 수 있다. 또, 레이저 공진기의 거울(facet)에 무반사 코팅한 반도체 레이저 광증폭기는 그 대역폭이 수 THz이상이고 이득도 30 dB 정도이다[22].

반도체 레이저 광증폭기에서도 광쌍안정 특성이 보여졌다. 공진기형 반도체 레이저 광증폭기에서의 광쌍안정성의 원리는 비선형공진기( Nonlinear etalon )에서의 광쌍안정성과 유사하다[23]. 즉, 증폭기 활성영역의 굴절율이 빛의 세기에따라 변하여( 빛이 입사하면 이것이 증폭되면서 반송자의 양이 감소하여 굴절율이 증가한다. ) 생기는 위상변화에 의해서 광쌍안정성이 나타난다. 그림 4(a)는 광증폭기에서의 광쌍안정특성을 고찰하기 위한 실험장치의 구성도이고, 그림 4(b)는 측정한 광입력대 광출력 특성이다. 비선형 공진기와는 달리 광증폭기이므로 쌍안정 소자의 출력이 입력보다 커서 여러단을 연결할 수 있는 장점이 있다. 반도체 레이저 광증폭기를 이용한 광쌍안정소자의 스위칭에 필요한 빛의 에너지는 fJ이하라는 실험적인 보고가 있다. 그러나 이를 위해서는 레이저의 발진임계전류 정도의 바이어스전류를 흘려야 한다[24].

#### 5. 광전궤환을 이용한 쌍안정소자

지금까지는 반도체 레이저의 구조를 변경하는 쌍안정소자는 쌍안정 특성을 제어하는 parameter의 변화가 용이하지 않고, 제작과정에서 생기는 오차 때문에 신뢰성있는 소자를 얻기가 어렵다. 그래서 기존의 다이오드 레이저를 이용하여 좀 더 구현하기 편리한 광쌍안정소자로서 광 검출기와 레이저를 이용하는 광전궤환적 방법에의해 쌍안정 특성을 구현하는 방법이 연구되었다. 이방법은 Ogawa등이 제안한 광검출기의 포화화 다이오드 레이저의 발진임계 특성을 이용하는 방법[2]과 Lau등이 제안한 FET와 반도체 레이저를 집적화하

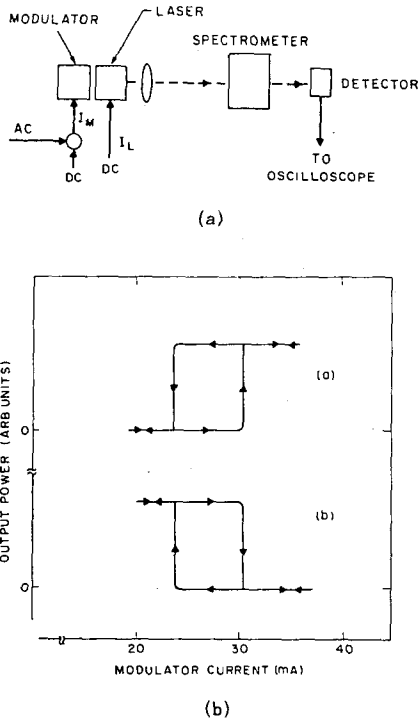


그림 3. (a) C<sup>3</sup> 레이저를 이용한 쌍안정특성 실험장치의 구성도와 (b)의 L - I 특성곡선[참고문헌 5]. 그림 (b)의 a 곡선은 발진파장이 1.5122 μm이고, b 곡선은 발진 파장이 1.5102 μm이다. 두 곡선이 서로 inversion 특성을 보임을 알 수 있다.

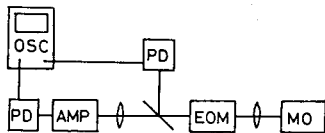
고 광학적 궤환을 가하는 방식[25] 등이 보고되었다. 그러나, 이러한 광쌍안정소자는 반도체 레이저를 발진 임계전류보다 낮게 바이어스하여야 하므로 고속 스위칭 소자로는 문제가 있다. 그래서 스위칭 속도를 빠르게 하기위해서 트랜지스터의 cutoff 특성을 이용하는 광전궤환방식의 광쌍안 반도체 레이저와 광 다안정 반도체 레이저가 보고되었다[26, 27].

그림 5(a)는 광전궤환을 이용한 광쌍안정소자의 구성도를 나타낸 것이다. 이 소자는 반도체 레이저, 광검출기, 그리고 트랜지스터로 구성되어있다. 레이저의 출력이 광검출기와 트랜지스터를 통해 레이저로 정궤환되고, 트랜지스터의 차단특성과 포화특성이 결합되어 광쌍안정특성을 보인다. 그림 5(b)는 구현한 광쌍안정소자의 입출력 특성을 나타낸 것이다. 광검출기와 반도체 레이저와의 출력결합의 정도, 또는 트랜지스터의 이득을 조정하여 광쌍안정특성, 광증폭기특성, 광 thyristor 특성등을 구현하였다[26]. 이소자는 '앞에서의 다른 광쌍안정소자와 비교하여 입력 빛이 coherent할 필요가 없고 또, 매우 넓은 파장영역에서 동작한다는 장점을 가지고 있다. 광전궤환을 이용한 광쌍안정 소자는 표면방출 반도체 레이저를 이용하여 2차원 array화하여 optical neural

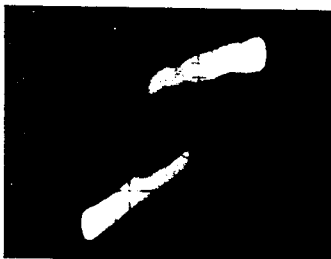
network에의 응용이 많이 검토되고 있다[10]. 특히, 표면방출 반도체 레이저는 이득구간의 길이가 매우 짧아 높은 이득을 얻기가 어려우므로 레이저의 구조를 변경하여 쌍안정특성을 얻는 C<sup>3</sup> 레이저, DFB 레이저, 흡수포화체를 갖는 레이저등을 구현하기가 용이하지 않다. 그러므로 쌍안정특성을 얻기 위해서는 레이저의 구조를 그대로 유지하는 광전궤환을 이용하는 것이 바람직하다.

### 6. 비선형공진에 의한 쌍안정특성

지금까지 설명한 반도체 레이저에서의 광쌍안정성은 모두 정적인 입출력 특성에서의 쌍안정성이었다. 반도체 레이저는 type II 레이저( 반송자 수명이 분극의 완화시간이나 광자 수명보다 매우 긴 레이저 )로서 그 동특성이 비율방정식( rate equations )으로 기술된다. 비율방정식은 레이저에서의 전자와 광자의 상호작용을 기술하는 비선형 방정식으로서 소신호 특성은 공진특성을 갖는 2차 저역필터의 특성을 보인다[28]. 공진주파수는 수 GHz 정도로 이는 반도체 레이저의 변조 대역폭을 결정한다. 반도체 레이저를 공진주파수 부근으로 대신호변조하면 비선형성에 의해서 공진주파수가 낮은 주파수 쪽으로 이동하면서 비선형공진이 일어나서 변조 진폭과 출력광펄스의 진폭사이에 쌍안정성이 나타난다[28]. 또, 공진주파수의 2 배 부근에서 대신호 변조하면 광펄스의 주기가 변조주기와 같은 상태와 이의 2 배인 상태가 쌍안정 특성을 보인다[28].



(a)



(b)

그림 4. (a) 광증폭기를 이용한 광쌍안정특성을 측정하기 위한 실험장치의 구성도, (b) 측정된 광쌍안정 특성이 때 증폭기는 발진임계전류로 바이어스 하였다[참고문헌 24]. 여기서 AMP는 광증폭기이고, OSC는 오실로스코프, PD는 광검출기, MO는 master oscillator, EOM은 electro-optic modulator 이다.

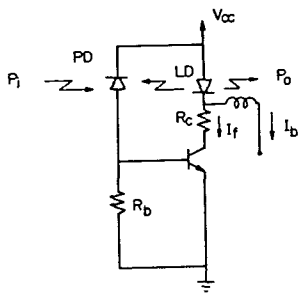
### 7. 결론

지금까지 광쌍안정성 반도체 레이저의 동작원리와 그 응용에 관해서 고찰하였다. 저차원 반도체의 개발과 함께 향상되어가는 반도체 레이저의 성능개선은 이러한 쌍안정 반도체 레이저의 광신호처리 장치에의 응용을 앞당길 것으로 기대된다. 또, 새로운 원리에 의해 작동되는 보다 스위칭에 능지가 낮고 고속동작이 가능한 광쌍안정 반도체 레이저의 개발도 예측할 수 있다. 하나의 예를 양자우물 반도체 레이저와 공명관용 다이오드를 직렬로 집적화하여 쌍안정특성을 구현한 결과가 보고되었다[29].

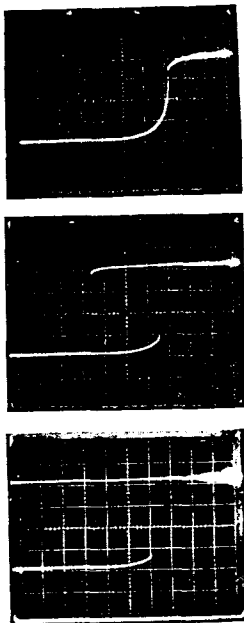
### 참고문헌

- G. J. Lasher, *Solid-State Electronics*, 7, pp. 707-716, 1964.
- K. Okumura, Y. Ogawa, H. Ito, and H. Inaba, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-21, pp. 377-382, 1985.
- J.-M. Liu and Y.-C. Chen, *IEEE J. Quantum Electron.*,

QE-21, pp. 298-306, 1985.  
 4. K.-Y. Liou, C.A. Burrus, U. Koren, T.L. Koch, *Appl. Phys. Lett.*, 51, pp. 1777-1779, 1987. M. Kuznetsov, *Digest of 12th Inter. Semiconductor Laser Conf.*, Set. 9-14, Davos, Switzerland, 1990.  
 5. N.A. Olsson, W.T. Tsang, R.A. Logan, I.P. Kaminow, and J.-S. Ko, *Appl. Phys. Lett.*, 44, pp. 375-377, 1984. P. Pheilan, L. Reekie, D.J. Bradley, and W.A. Stallard, *Opt. and Quantum Electronics*, 18, pp. 35-41, 1986.



(a)



(b)

그림 5. (a) 광전궤환을 이용함 광쌍안정 반도체 레이저의 회로 구성도와 (b) 이의 입출력 곡선. (b)는 차례로 광증폭특성, 광쌍안정특성, 광 thyristor 특성을 나타낸다.

6. R. Lang and K. Kobayashi, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16, pp. 347-355, 1980.  
 7. E. Kapon, S. Simhony, J.P. Harbison, L.T. Florez, and P. Worland, *Appl. Phys. Lett.*, 56, pp. 1825-1827, 1990.  
 8. Y.J. Yang, T.G. Dziura, S.C. Wang, W. Hsin, S. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, 56, pp. 1839-1840, 1990.  
 9. S. Suzuki, T. Terakado, K. Komatsu, K. Nagashima, A. Suzuki, and M. Kondo, *IEEE J. Lightwave Tech.*, 4, pp. 894-899, 1986.  
 10. J.L. Jewell, Y.H. Lee, A. Scherer, S.L. McCall, N.A. Olsson, J.P. Harbison, L.T. Florez, *Opt. Engineer.*, 29, pp. 210-214, 1990.  
 11. K. Kawaguchi and G. Imane, *Electronic Lett.*, 17, pp. 167-168, 1981.  
 12. Y. Odagiri and K. Komatsu, *Tech. Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics*, Anaheim, CA, June 19-22, 1984.  
 13. M. Kuznetsov, *Opt. Lett.*, 10, pp. 399-401, 1985.  
 14. C. Harder, K.Y. Lau, and A. Yariv, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18, pp. 1351-1361, 1982.  
 15. H. Kawaguchi, *Appl. Phys. Lett.*, 45, pp. 1264-1266, 1984.  
 16. P. Blixt and U. Ohlander, *Electron. Lett.*,  
 17. A.F.J. Levi, R.N. Nottenburg, R.A. Nordin, T. Tanbun-Ek, and R.A. Logan, *Appl. Phys. Lett.*, 56, pp. 1095-1097, 1990.  
 18. K.A. Shore, *Opt. Quantum Electron.*, 14, pp. 321-326, 1982.  
 19. M. Sargent III, M.O. Scully, and W.E. Lamb, Jr, *Laser Physics*, Addison-Wesley, London, 1974.  
 20. N.A. Olsson and W.T. Tsang, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-20, pp. 378-380, 1984.  
 21. P. Glas, A. Klehr, and R. Muller, *Opt. Comm.*, 44, pp. 196-200, 1983.  
 22. M.J. O'mahony, *IEEE J. Lightwave Tech.*, 6, pp. 531-544, 1988.  
 23. P.W. Smith, *IEEE Spectrum*, 115, pp. 26-33, 1981.  
 24. W.F. Sharfin and M. Dagenais, *Appl. Phys. Lett.*, 48, pp. 321-324, 1986. T. Nakai, N. Ogasawara, and R. Ito, *Japanese J. Appl. Phys.*, 22, pp. L310-L312, 1983.  
 25. K.Y. Lau and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 45, pp. 719-721, 1984.  
 26. 이 창희, 김 석운, 신 상영, 이 수영, *대한전자공학회 논문집*, 25, pp. 94-100, 1988.  
 27. C.-H. Lee, K.-H. Cho, S.-Y. Shin, and S.-Y. Lee, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-24, pp. 2063-2069, 1988.  
 28. T.-H. Yoon, C.-H. Lee, S.-Y. Shin, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-25, pp. 1993-2000, 1989.  
 29. I. Grave, S.C. Kan, G. Griffel, S.W. Wu, A. Sa'ar, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 58, pp. 110-112, 1991.