

표면광 마이크로 레이저를 이용한 능동형 광 논리 소자의 동작 특성

유지영 · 신재현 · 이용희
한국과학기술원 물리학과

송 종 인

Bellcore, Red Bank, NJ 07701, U.S.A.

(1993년 7월 22일 받음)

표면광 마이크로 레이저, heterojunction phototransistor 그리고 저항을 단일 결정으로 성장시켜 집적시킨 NOR와 INVERTER 능동형 광 논리 소자에 대한 동작 특성을 조사하였다. 능동형 광 논리 소자를 구성하는 개개 소자 중에서, 780 nm에서 발진하는 특정한 AlGaAs 초격자 마이크로 레이저의 미분 양자 효율은 15%로 나타났고, heterojunction phototransistor의 전류 이득은 에미터-컬렉터 전압이 4 V이고, 입력 광의 세기가 50 μ W일 때 57으로 측정되었다. 직렬 저항이 370 ohm인 광 논리 소자의 출력은 입력광 세기가 47 μ W일 때 57 μ W에서 0 μ W으로 감소하였다.

I. 서 론

표면광 마이크로 레이저^[1](vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)는 최근에 광 스위치, 광 메모리, 광 연산 소자로서 응용으로 많은 관심의 대상이 되는 소자이다. 이러한 광 컴퓨팅 소자로서 표면광 마이크로 레이저의 장점은 웨이퍼 평면에 수직인 광 출력, 낮은 beam divergence, 작은 소자의 면적, 광의 병렬적 접근이 용이한 것으로, 이러한 특성은 병렬 또는 2차원의 광 소자로 제작이 가능하다. 광 연산 소자에 대한 연구는 대부분 SEED와 같은 모듈레이터를 이용하는 방식의 수동형 광 연산 소자^[2]에 관한 것이었다. 그러나 낮은 임계 전력으로 작동되는 표면광 마이크로 레이저(vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)^[3]가 개발되면서 heterojunction phototransistors (HPT's)나 photothyristors와 같은 광전소자나 FET's(field effect transistors)와 같은 전기 소자와 표면광 마이크로 레이저를 결합^[4]시킨 2차원의 능동형 광 논리 소자의 실현을 가능하게 하였다. 이러한 형태의 능동형 광 논리 소자를 단일 결정(monolithic)으로 성장시키는 방법을 이용한 논리 소자의 개발은 여러 그룹^[5-9]에 의하여 기본적인 광 논리 함수, latching과 bistability 등이 실현되었다. 능동형 광 연산

소자의 장점은 광원을 가지고 있으며, cascading이 가능하다는 것이다. 이러한 장점은 광 시스템을 간단화, 고집적화 그리고 견고한 제작을 가능하게 한다. photothyristor를 이용한 소자들은 photothyristor의 internal feedback에 의해 낮은 스위칭 에너지(400 fJ)가 보고^[10]되었다. 이러한 소자들은 능동형 광 메모리 소자로의 응용이 기대된다. 그러나 HPT를 이용한 능동형 광 논리 소자는 photothyristor를 이용한 논리 소자와 달리 논리 상태를 새롭게 하기 위한 바이어스 전압의 조절이 필요하지 않다. 광 논리 소자로서 HPT를 이용한 빠른 NOR 논리 소자는, NOR 논리 그 자체가 논리 연산 전체를 표현할 수 있으므로, 가장 응용성이 높다 하겠다. 표면광 마이크로 레이저와 HPT를 전선으로 연결한(wire-bonded) NOR 논리 소자^[11]는 이미 발표되어 있다.

본 논문에서는 표면광 마이크로 레이저(VCSEL)와 HPT는 병렬로, 저항은 직렬로 연결되는 구조를 단일 결정으로 성장시켜 집적시킨 표면광 레이저 논리 소자(surface-emitting laser logic, SELL)^[12]에 대한 동작 특성에 대한 연구 결과를 보고하겠다.

II. 본 론

1. 논리 소자의 구조 및 제작

SELL 소자는 MBE(molecular beam epitaxy) 방법에 의하여 그림 1에서 보는 것과 같이 도핑 되지 않은 GaAs 기판위에 초격자(superlattice) 표면광 레이저를 제작하고, 그 위에 HPT 구조를 성장시켰다. 표면광 레이저의 바닥 거울은 Si가 도핑(n-type)된 $\lambda/4$ 두께의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ / $Al_{0.65}Ga_{0.35}As$ / $AlAs$ 28.5 주기로 되어 있으며, 윗 거울은 Be이 도핑(p-type)된 $\lambda/4$ 두께의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ / $Al_{0.65}Ga_{0.35}As$ / $AlAs$ 22 주기로 제작되어 Fabry-Perot 공진기를 이룬다. 여기서 λ 는 공진기의 공진 파장을 나타낸다. 능동 매질은 14 주기의 $GaAs(33.9\text{\AA})$ / $AlAs(8.5\text{\AA})$ 초격자로서 이를 산술 평균하면 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 에 해당되며, 780 nm에서 발진하도록 설계되었다. 표면광 레이저 위에는 밑에서부터 2000 \AA 두께의 도핑 되지 않은 $AlAs$ 전류 blocking (직렬의 부하 저항으로도 이용) layer, 3000 \AA 두께의 $GaAs(Si, 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ subcollector, 100 \AA 두께의 $Al-GaAs(Si, 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ etch stop, 5000 \AA 두께의 $GaAs(Si, 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$ collector, 1500 \AA 두께의 $GaAs(Be, 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$, 100 \AA 두께의 도핑되지 않은 $GaAs$, 2500 \AA 두께의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As(Si, 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ emitter, 500 \AA 두께의 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As(Si, 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$, 그리고 500 \AA 두께의 $GaAs(Si, 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ contact layer로 구성되는 HPT 부분이 동시에 단일 결정으로 제작되었다.

SELL 배열(arrays)은 아홉개 공정으로 제작되었으며,

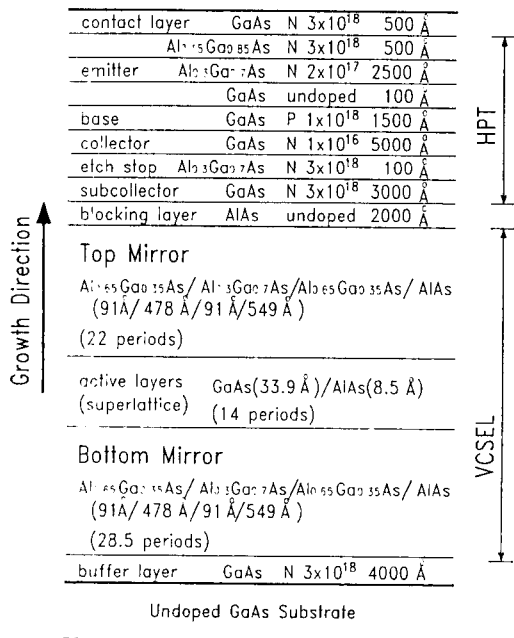
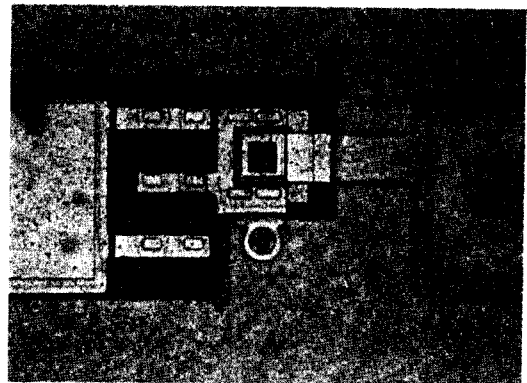
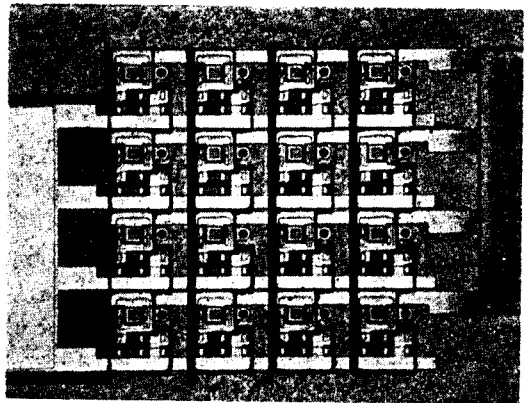


그림 1. Design of the monolithic SELL device.

자세한 제작 공정은 이미 발표^[12] 되었다. 제작된 소자들은 단일 소자와 2차원 배열 소자들이다. 단일 소자들은 HPT와 표면광 마이크로 레이저 각각의 특성을 알아보기 위하여 같은 웨이퍼에 따로 제작되었으며, 부하 저항을 달리하여 7가지의 단일 SELL 소자가 제작되었다. 그림 2의 (a)는 부하 저항이 150 Ω 인 단일 SELL 소자의 현미경($\times 300$) 사진이다. 좌우로 큰 사각형이 전극이고, 그사이에 정사각형($20 \times 20 \mu m^2$)의 HPT의 수광부가 보이고, 아래로 표면광 마이크로 레이저가 보인다. HPT와 마이크로 레이저 좌측에 6개의 구멍(via hole)으로 연결된 부분이 부하 저항이고, 이 부분의 전선 연결을 달리하여 여러 가지 부하 저항 값을 주어 부하 저항에 대한 SELL 소자의 동작 특성을 알 수 있게 제작하였다. 2차원 배열 소자들로는 2×2 , 4×4 , 8×8 배열이 제작되었으며, 그림 2의 (b)는 4×4 배열의 현미경($\times 100$) 사진이다.



(a)



(b)

그림 2. Photographs of (a) single SELL device and (b) a 4×4 array.

2. 광 논리 소자의 동작

제작된 SELL 소자는 NOR나 INVERTER 논리 소자이다. 그림 3은 SELL 소자와 그 등가 회로를 나타낸 그림이다. SELL 소자는 AlGaAs 초격자(superlattice)를 능동 매질로 하는 표면광 레이저가 HPT와 병렬로 연결되어 있고, 저항이 직렬로 연결되어 있다. SELL 소자는 입력 광이 없을 때 ON 상태를 유지하도록 외부에서 일정한 전압을 걸어 준다. On 상태의 SELL 소자는 높은 출력의 lasing 모드에 있게 되고, 이때 출력 P_{out} 은 다음 식으로 표현된다.

$$P_{out} = \eta_d [(I_o - I_{th}) - \Delta I'] \frac{1.24}{\lambda_{out}} \quad (1)$$

여기서 η_d 는 마이크로 레이저의 미분 양자 효율(differential quantum efficiency)을 나타내고, λ_{out} 는 출력 파장이고, I_o 와 I_{th} 은 SELL 소자에 입력광이 없을 때 마이크로 레이저를 통해 흐르는 전류와 임계전류를 각각 나타낸다. $\Delta I'$ 는 입력광이 있을 때 레이저에 흐르는 전류의 변화량으로 레이저 자체 저항에 관계한다. 레이저 출력 P_{out} 은 어떤 임계값 이상의 입력광이 들어 왔을 때 OFF 상태가 된다. 입력광이 HPT의 수광부에 조사되면 광전류는 큰 이득률 G 로 증폭이 된다. 이때 광 이득률 G 는 전류 이득(current gain)과 양자 효율(quantum efficiency)의 곱으로 표현된다. 양자 효율이 1이라 한다면, 이득률 G 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$G = \frac{1.24}{\lambda_{in}} \frac{\Delta I}{P_{in}} \quad (2)$$

여기서 P_{in} 은 흡수된 입력광의 크기이고, λ_{in} 은 입력 파장이고, ΔI 는 증폭된 전류를 나타낸다. 이때 증폭된 전류 ΔI 에서 레이저에 흐르는 전류의 변화량 $\Delta I'$ 를 제외한 만큼의 전압이 직렬 저항 R_l 에 더 걸려야 하므로 병렬로 연결된 레이저와 HPT에는 전압 강하 ΔV 가 생긴다.

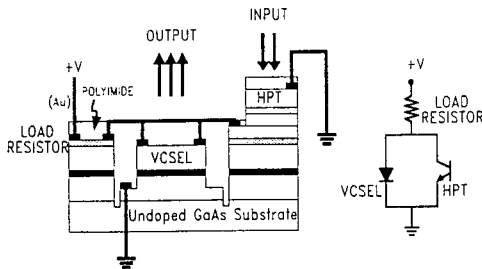


그림 3. A fully integrated SELL device and its equivalent circuit.

$$\Delta V = (\Delta I - \Delta I') R_l \quad (3)$$

HPT는 입력광의 세기가 일정할 경우 에미터-컬렉터 사이의 전압 변화에 대하여 광전류의 이득률은 크게 변하지 않는다. 그러나 마이크로 레이저에서의 전압 강하는 식 (1)에서 레이저에 흐르는 전류 ($I_o - \Delta I'$)를 임계전류 I_{th} 이하로 제한하게 되어 SELL 소자는 OFF 상태가 된다. 이러한 SELL의 OFF 상태에서 마이크로 레이저는 spontaneous emission을 하는 다이오우드 상태이다. 이런 두 lasing 모드와 non-lasing 모드 사이의 큰 출력광 세기의 비는 곧바로 두 논리 상태 사이의 높은 contrast ratio를 주게 된다. 이렇게 하여 SELL 소자는 광 INVERTER 논리를 수행하게 되는 것이다. 또한 여러 입력광을 한 개나 여러 개의 HPT의 수광부에 조사를 하게 되면 광 NOR 논리 소자로 작동하게 되는 것이다. SELL소자의 광 이득 P_{out}/P_{in} 은 마이크로 레이저의 저항과 미분 양자 효율, HPT의 광전류 이득률, 부하 저항에 의하여 결정 된다. 마이크로 레이저가 운용되는 전압 변화에서 레이저의 저항 R' 이 일정하다고 가정했을 때, SELL 소자의 광 이득은 식 (1)~식 (3)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \eta_d G \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{out}} \left(\frac{R_l}{R_l + R'} \right) \quad (4)$$

SELL 소자의 광 이득은 위의 식 (4)에서 알 수 있듯이 레이저의 미분 양자 효율(differential quantum efficiency) η_d 과 HPT의 광전류 이득 G 의 곱에 비례하고, 부하 저항에 관계한다. 부하 저항을 레이저의 저항 R' 와 같게 하였을 때, SELL 소자의 이득은 $\eta_d G$ 의 절반에 해당하는 값을 갖게 된다.

III. 실험 및 결과

1. 실험 방법

그림 4는 SELL 소자의 광 논리 동작 특성을 측정하기 위한 실험 장치도 이다. SELL 소자는 두개의 탐침(probe)으로 전력이 공급되며, 전압원으로는 pulse generator를, 전류계로는 오실로스코프를 이용하였다. 오실로스코프의 50 ohms 단자에 걸리는 전압을 측정함으로써 전류 측정을 하였는데, 이 50 ohms은 실험 결과 분석할 때 부하 저항과 함께 고려하였다. SELL 소자의 출력은 대물렌즈($\times 10$)를 이용하여 광 검출기와 CCD 카메라에 집속 시켰으며, 동작시키려는 소자를 확인하기 위하여 그 중간에 현미경 조명등을 설치하여 이용하였다. SELL 소자를 동작시키기 위하여 입력 광원으로는 이미 발표

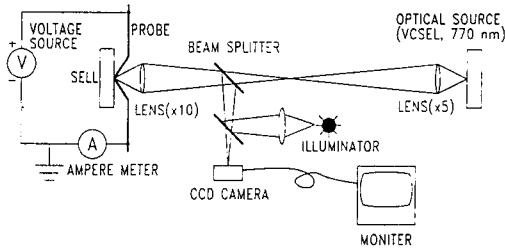


그림 4. Experimental setup.

되었던 770 nm에서 발진하는 표면광 마이크로 레이저^[13]를 이용하였다. 입력 광원은 대물렌즈(X5)를 이용하여 SELL 소자의 HPT 수광부에 집속 하였다. 이때 입력 광이 출력 대물렌즈의 구경을 벗어나지 않고 모두 SELL 소자에 집속 되도록 입력 광원을 충분히 멀게 위치시켜 입력 광의 집속 크기를 충분히 작게 하였다.

2. 광 논리 소자의 동작 특성

SELL 소자를 구성하는 표면광 마이크로 레이저와 HPT 각각의 동작 특성을 측정함으로써 SELL 소자의 동작을 이해할 수 있다. 그림 5의 (a)는 동일한 웨이퍼에 따로 제작된 특정한 마이크로 레이저의 전류에 대한 전압과 출력을 측정한 그래프이다. 측정된 마이크로 레이저의 임계 전류와 전압은 각각 1.7 mA와 4.5 V이었고, 임계영역에서 출력이 $60 \mu\text{W}$ 이하에서 미분 양자 효율은 약 8%로 작게 나타났다. 레이저의 최대 출력은 약 0.1 mW로 780 nm 근처에서 발진하였으나, 발진 특성에는 레이저에 따라 많은 차이를 보였다. 출력 광의 세기는 예측했던 값보다 작게 나타났는데, 이는 부분적으로 mesa 지름($18 \mu\text{m}$)에 비해 출력 경의 크기($8 \mu\text{m}$)가 작기 때문으로 생각된다. 레이저 내의 전류 흐름을 조절하는 방법으로 deep etching 대신 proton implantation 방법을 사용하면 낮은 출력 문제 해결할 수 있고, 여러 레이저에서 나타나는 발진 특성의 차이를 줄일 수 있을 것이다. 그림 5의 (b)는 HPT의 전류 증폭을 입력 광의 세기에 대하여 측정한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 전류 증폭은 입력 광의 세기에 따라 크게 증가하고, 1 V 이상의 에미터-컬렉터 전압의 변화에 대하여는 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 입력광이 $50 \mu\text{W}$ 이고, 에미터-컬렉터 전압이 4 V일 때 증폭된 전류는 0.8 mA이다. 이때 HPT의 흡수율은 계산상 45%이고, 이득률을 식 (2)를 이용하여 계산하면 57로 작은 이득을 보였다. base 층의 두께를 좀더 얇게 제작함으로써 작은 이득률 문제는 해결될 수 있을 것이다. 그림 5의 두 소자로 SELL 소자를

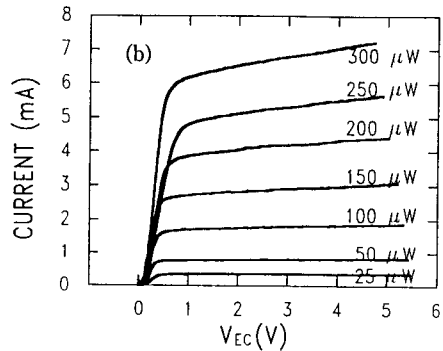
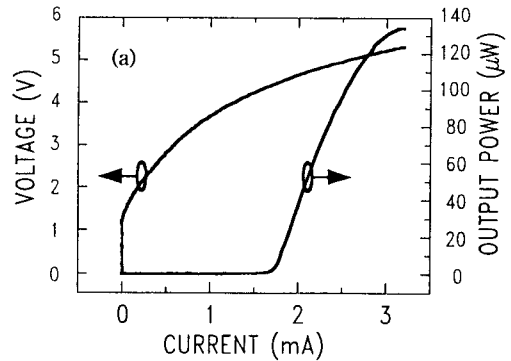


그림 5. Characteristics of SELL's individual devices. (a) I-V, I-L curves of a typical surface-emitting laser. (b) Current gain of HPT for various incident light levels. Absorbed optical power is 45% of the incident optical power.

제작하였을 경우 출력이 $60 \mu\text{W}$ 이고, 입력이 $50 \mu\text{W}$ 인 경우 SELL 소자가 동작하기 위해서는 부하 저항이 1082Ω 이어야 함은 식 (4)로부터 알 수 있다. 이때 레이저의 저항은, 그림 (5)의 (a)의 I-V 곡선을 미분함으로써 알 수 있는데, 레이저 동작 영역에서 760Ω 정도로 나타났다.

3. SELL의 동작 특성

SELL 소자의 동작은 기본적으로 SELL을 구성하는 레이저나 HPT의 효율에 의하여 결정되며, 이들 값이 결정되었을 때에는 부하 저항에 의하여 SELL 소자의 이득이 결정된다. 그림 6의 (a)는 부하 저항이 0인 SELL 소자에 외부의 저항을 50Ω , 150Ω , 370Ω 으로 변화시키며 직렬로 연결하여 그 동작 특성을 조사한 결과이다. 이때 SELL 소자의 출력 세기를 $60 \mu\text{W}$ 이하로 고정시켰다. 저항이 증가함에 따라 감소하는 임계 입력광 세

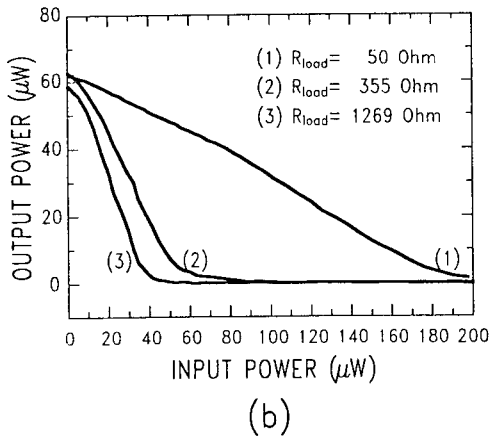
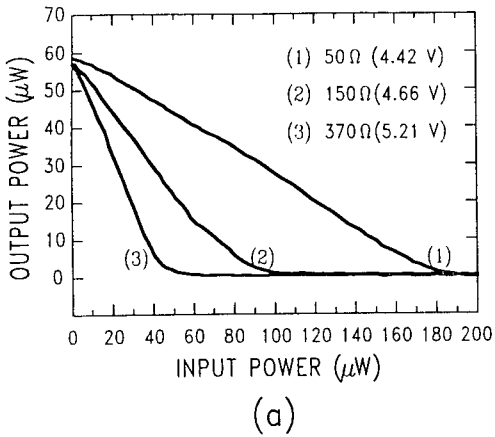


그림 6. Typical input light power versus output light power of (a) the zero-internal series resistance SELL device connected to various external series resistors and (b) SELL devices with different internal series resistances.

기의 크기가 작게 나타남을 알 수 있다. HPT의 효율이 그림 5의 (b)와 같이 57이라고 할 때, 그림 6의 (a)에서 외부 저항이 370 Ω인 경우의 그래프로부터 레이저의 효율과 저항과의 관계를 알 수 있다. 이때 레이저의 출력은 57 μW이고, 입력광의 크기는 47 μW이다. 레이저의 저항이 700 Ω일 경우 레이저의 효율은 15%이고, 이 값은 먼저 측정한 마이크로 레이저의 효율 8%보다 약 2배 큰 값이다. 이때 부하 저항은 약 3배 정도 감소하였다. 이처럼 레이저 효율의 증가는 부하 저항의 값을 크게 감소시킬 수 있기 때문에 부하 저항에 의한 열손실을 크게 줄일 수 있게 된다. 이제 적당한 부하 저항을 식 (4)를 이용하여 결정하여 보자. 레이저의 미분 양자 효

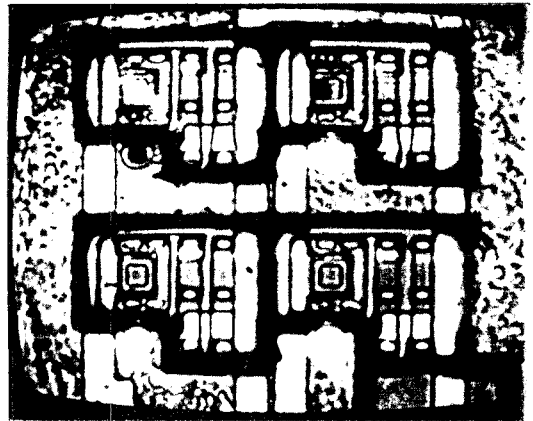
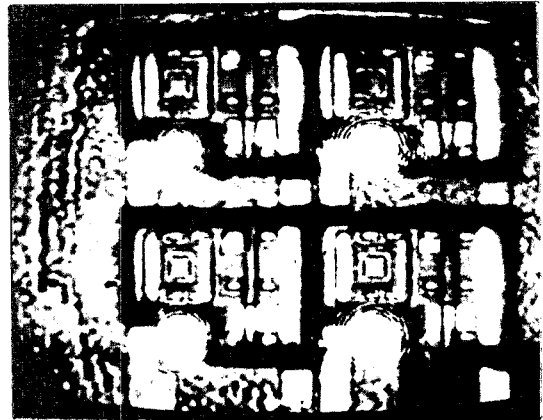


그림 7. Operations of a 2×2 SELL array. (a) Uniform operation. (b) Inverter operation.

율과 저항이 각각 50%와 600 Ω이고, HPT의 이득이 100인 경우 SELL 소자의 이득을 20으로 하고자 하면 부하 저항을 400 Ω으로 결정하면 된다. 그림 6의 (b)는 부하 저항이 다르게 제작된 단일 SELL 소자의 입력광에 대한 출력광의 관계를 나타내는 그래프이다. 여기서 SELL 소자의 동작 특성은 레이저의 효율에 의하여 많이 달라지게 된다. 부하 저항이 355 Ω인 경우 그래프 (a)의 저항이 370 Ω인 경우와 유사한 임계 입력 광의 세기가 측정되었지만, 저항이 1269 Ω인 경우 임계 입력광의 세기가 40 μW정도(계산상으로는 약 25 μW이어야 함)로 측정되었다. 저항이 355 Ω인 경우와 비교하여 볼 때, 부하 저항의 변화에 비하여 입력광의 변화에는 큰 차이가 없게 나타났다. 따라서 그림 6으로부터 제작된 SELL 소자의 경우 부하 저항의 값이 350 Ω 정도가 가장 적

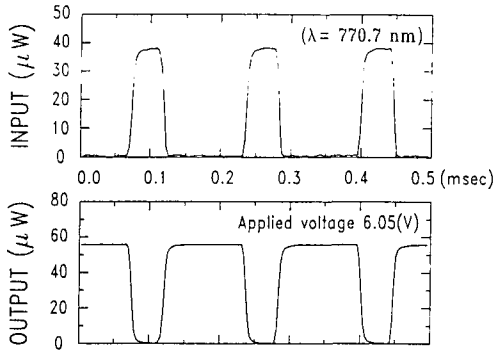


그림 8. Simple INVERTER/NOR logic operation of a SELL device. It has 600 ohms of integrated resistance.

당한 값임을 알 수 있다. 350 Ω은 SELL 소자가 동작할 때의 레이저 저항의 반에 해당하는 정도의 값이다. 그림 6의 결과를 이용하여 SELL 소자의 광이득을 측정하면 1.2로 식 (4)와 잘 맞는다. 제작된 2차원 능동형 광 논리 소자들 중에서 2×2 SELL 배열은 그림 7 (a)에서와 같이 균일하게 동작하였으며, SELL 소자 각각의 직렬 저항 값은 650 Ω이었다. 그림 7의 (b)는 770 nm에서 발진하는 표면광 레이저로부터 50 μW의 입력을 비쳤을 때, 2×2 SELL 소자들 중 하나가 OFF 상태에 있는 사진이다. 2×2 배열의 좌측 상단의 레이저 소자가 꺼진 상태를 보이고 있고, 20×20 μm²의 HPT 수광부에 입력광이 보인다. 이렇게 하여 광 논리 동작을 2차원 배열 내의 원하는 임의의 소자가 수행할 수 있게 된다. 그림 8은 광이득이 1.5되는 SELL 소자의 INVERTER 동작을 광검출기의 동작 속도 한계에서 측정한 그래프이다.

NOR 논리 소자의 광이득은 2보다 작게 나타났는데, 실제 논리 소자로서 응용하기 위해서는 10 이상의 광이득이 필요하다. SELL 소자의 광이득을 현재보다 향상시키기 위해서는 근본적으로 마이크로 레이저와 HPT의 효율을 증가시켜야 한다. SELL 소자의 이득을 10보다 크게 유지하려면 최소한 레이저의 미분 양자 효율 η_d은 30% 이상, HPT의 이득 G는 100 이상으로 향상시켜야 한다.

IV. 결 론

웨이퍼에 표면광 마이크로 레이저, HPT 그리고 저항을 단일 결정으로 집적시킨 능동형 NOR 논리 소자에 대한 특성을 조사하였고, 이득 향상 방향을 제시하였다.

단일 NOR 논리 소자의 이득은 2보다 작게 나타났다. NOR 논리 소자의 광이득은 레이저의 출력 양자 효율과 HPT의 광전 이득의 곱에 비례하고, 레이저 저항에 대한 부하 저항의 비에 관계한다. 따라서 NOR 논리 소자의 이득을 높이기 위해서는 기본적으로 HPT의 이득을 증가시켜야 하고, 마이크로 레이저의 미분 양자 효율을 증가시켜야 한다. 이번에 제작하여 그 특성을 조사한 2차원 NOR 논리 소자는 앞으로 광 스위칭이나 광 컴퓨팅에의 응용에 필요한 기본 소자이다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Jewell, J. P. Harbison, A. Scherer, Y. H. Lee and L. T. Florez, *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1332 (1991).
- [2] T. K. Woodward, L. M. F. Chirovsky, A. L. Lentine, L. A. D'Asaro, E. J. Laskowski, M. Focht, G. Guth, S. S. Pei, F. Ren, G. J. Przybylek, M. T. Asom, R. F. Kopf, J. M. Kuo, and M. D. Feuer, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 614 (1992).
- [3] J. L. Jewell, A. Scherer, S. M. McCall, Y. H. Lee, S. J. Walker, J. P. Harbison, and L. T. Florez, *Electron. Lett.* **25**, 1123 (1989).
- [4] 이용희, "표면광 마이크로 레이저 및 능동형 광학 연산 소자의 특성," *한국 광학 회지* **2**, 233 (1991).
- [5] W. K. Chan, J. P. Harbison, A. C. von Lehman, L. T. Florez, C. K. Nguyen, and S. A. Schwarz, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1250 (1991).
- [6] G. R. Olbright, R. P. Bryan, K. Lear, T. M. Brennan, G. Poirior, Y. H. Lee, and J. L. Jewell, *Electron. Lett.*, **27**, 216 (1991).
- [7] P. Zhou, J. Cheng, C. F. Schaus, S. Z. Sun, C. Hains, K. Zheng, E. Armour, W. Hsin, D. R. Myers, and G. A. Vawter, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 1009 (1991).
- [8] P. Zhou, J. Cheng, C. F. Schaus, S. Z. Sun, C. Hains, E. Armour, D. R. Myers, and G. A. Vawter, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 157 (1992).
- [9] Y. J. Yang, T. G. Dziura, T. Bardin, S. C. Wang, and R. Fernandez, Andrew S.H. Liao, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 600 (1993).
- [10] Kunihiko Hara, Keisuke Kojima, Kazumasa Mitsunaga, and Kazuo Kyuma, *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1335 (1991).
- [11] Y. H. Lee, J. I. Song, M. S. Kim, C. S. Shim, B. Tell, and R. E. Leibeguth, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 479 (1991).

- [12] J. I. Song, Y. H. Lee, J. Y. Yoo, J. H. Shin, A. Scherer, and R. E. Leibenguth, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, to be published.
- [13] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth, and V. D. Matterna, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 108 (1991).

Active Optical Logic Devices Using Surface-emitting Microlasers

Ji-Young Yoo, Jae-Heon Shin, and Yong-Hee Lee

*Department of Physics Korea Advanced Institute of Science and Technology
Taejon 305-701, Korea*

Jong-In Song

Bellcore, Red Bank, NJ 07701, U.S.A.

(Received: July 22, 1993)

Monolithic NOR and INVERTER active optical logic devices integrated with surface-emitting microlasers, heterojunction phototransistors(HPT) in parallel and resistors in series are characterized. The differential quantum efficiency of the typical AlGaAs superlattice microlaser integrated in the active optical logic devices is 15%. Current gain of the HPT is 57, when emitter-collector voltage and input optical power are 4 V and 50 μ W, respectively. 57 μ W of output power from the active optical logic device decreases to zero when 47 μ W of input optical power is incident on the HPT part of the active logic device.