

## 광펌핑하여 1.3 μm파장에서 동작하는 수직공진 표면광 레이저

송현우 · 김창규 · 이용희

한국과학기술원 물리학과

(1996년 11월 20일 받음)

광통신의 파장(1.3 μm)에서 동작하는 수직공진 표면광 반도체 레이저를, InGaAsP(λ<sub>g</sub>=1.3 μm) 이득매질의 에피층들 양면에 Si/SiO<sub>2</sub>유전체 반사경을 증착하여 제작하였다. 제작된 수직공진 반도체 레이저를 Nd-YAG레이저의 펄스로 광펌핑하여 1.3 μm 근처 파장에서 레이저 동작을 확인하였다. 그리고, 반사율에 따른 문턱 펌프량의 변화, 편광특성 및 펌프광점의 크기에 따른 문턱 펌핑 밀도의 변화 등의 레이저 동작 특성을 조사하였다.

### I. 서 론

수직 공진형 표면광 레이저는 그 편리성과 경제성 및 확장성 때문에 1991년 이후로 꾸준히 세계의 여러 연구진들의 지대한 관심 속에서 개발되어 오고 있다. 이것은 2차원의 행렬로 기관 위에 제작되어서 기관 상에서 테스트 되기 때문에 편리할 뿐만 아니라 제작 단가가 아주 저렴해 질 수 있다. 또한, 출력광의 모양이 원형이므로 광섬유와의 연결효율이 뛰어나서 광연결에 필요한 광학부품을 최소화할 수 있다. 그리고 2차원 광행렬의 구현이 가능하여 2차원 광소자 집적과 관계된 다양한 응용 가능성이 있다. 특히, 광섬유에서 손실이 가장 낮은 1.55 μm 파장과 분산 최소인 1.3 μm 파장에서 발진하는 반도체 레이저는 광통신용 광원으로 주목받고 있다. 그러나, 이러한 장점들을 모두 누리기 위해서는 넘어야 하는 어려움이 있다. 공진기에서의 효율적인 전류감금이 필요하고 수직 공진형 표면광 레이저의 특성상 이득 매질의 부피가 작기 때문에 손실을 줄이기 위해 고반사율의 반사경이 필요하다.

GaAs 계열의 경우 AlAs와의 굴절률 차이가 비교적 크므로 반도체 성장 방법으로 반사경을 포함한 총 레이저 구조를 제작할 수 있다. 하지만 InP 기관에 격자정합하는 InGaAsP 반도체 성장으로는 장파장 레이저의 구조에서 InGaAsP/InP의 쌍으로 DBR을 제작할 경우, 이 두 물질의 굴절률 차이는 9.5% 미만으로 작아서, 원하는 높은 굴절률을 얻기 위해서는 40쌍 이상의 많은 성장을 해야만 한다. 그래서, 이득 매질의 성장에서만 결정성장 방법을 이용하고 양면에 유전체 반사경을 증착하여 레이저를 만드는 방법은 단번에 레이저 구조를 형성할 수 없어서 제작 과정이 복잡하다는 단점이 있지만, 가능한 좋은 방법 중에 하나이다. 그리고, 장파장 수직공진 표면광 레이저의 개발은 기관에칭과 MgO/Si 유전체 쌍을 증착 반사경으로 한 수직공진형 반도체 레이저 소자와 기관 용융접착 방법으로 제작한 수직공진형 반도체 레이저 소자가 보고되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구에서는 양면에 유전체 반사경을 사용하여 전류 펌핑용 장파장(1.3 μm) 수직공진 표면광 레이저를 제작하기 위한 첫 단계로 광펌핑용 수직공진 표면광 레이저를 만들어 필

스 레이저 동작하는 것을 확인하였다.

### II. 이 론

레이저의 공진기를 이룰 부분에서 이득매질로부터 생길 이득과 공진기 양면의 반사경과 각 층에서의 손실의 합이 같아지는 조건을 만족해야만 레이저 동작을 할 수 있게 된다. 이러한 문턱이득(threshold gain:  $g$ ) 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma \cdot g = \alpha_m + \alpha_{in} \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2d} \ln \left\{ \frac{1}{R_1 R_2} \right\}$$

$R_1, R_2$ : 공진기 양면의 반사율  
 $\alpha_{in}, \alpha_m$ : 내부 손실과 반사경에서의 출력 손실  
 $\Gamma$ : 감금 인자(confinement factor)  
 $d$ : 이득 매질의 두께

그리고, 문턱 펌핑 밀도(threshold pump density:  $P_{th}$ )는 다음 식이 된다.

$$P_{th} = E_{ph} d \cdot n_{th} / \tau_c (n_{th}) \quad (2)$$

$$\tau_c(n) \equiv (A + Bn + Cn^2)^{-1}$$

$E_{ph}$ : 광자 에너지  
 $n$ : 주입 전하 밀도  
 $\tau_c$ : 전하 수명 (carrier lifetime)

InGaAsP 계열의 결정에서의 극대 이득( $g_p$ )은 다음과 같은 선형식으로 근사될 수 있다.

$$g_p \approx a(n - n_o) \quad (3)$$

$n$ : 주입 전하 밀도  
 $a$ : 이득 계수  
 $n_o$ : 투명 전하 밀도(transparency carrier density)

표 1은 앞의 식들에서 나온 상수들을 나열한 것이다. 위의 식들을 이용하여 문턱 펌핑 밀도를 측정함으로써 그

표 1. 이론에 사용된 상수들<sup>[3]</sup>

기 호	의 미	값	단 위
A	표면 재결합 상수	$1 \times 10^8$	$s^{-1}$
B	발광 재결합 상수	$1 \times 10^{-10}$	$cm^3/s$
C	비발광 결함 상수	$3 \times 10^{-29}$	$cm^6/s$

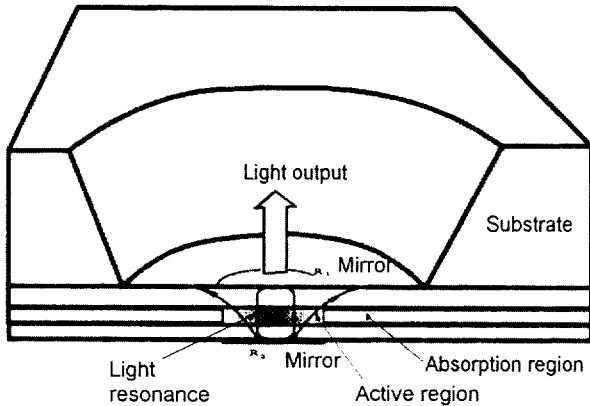


그림 1. 제작된 광펌핑용 수직공진형 반도체 레이저의 단면 그

래의 소자 내부에 생성된 전하 밀도를 알아낼 수 있다. 레이저의 발진 반경이 작을 경우에는 회절에 의한 손실(diffraction loss)이 레이저 발진 특성에 무시할 수 없는 영향을 미치게 된다. 회절 손실은 이득매질에서 출발하여 빛(Laguerre-Gaussian 모드 가정)이 공진기의 길이만큼 진행한 후 반사경에서 반사되고 다시 이득매질로 돌아오는 동안 회절에 의해서 퍼지므로 일부의 빛을 잃어버리는 양을 생각함으로써 고려할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$\alpha_{diff} = \frac{\ln \left[ \sum_i \frac{2 + 3(l_i/ks)^2 + (l_i/ks)^4}{2R} \right]}{\sum_i 2l_i} \quad (4)$$

- $\alpha_{diff}$  : 회절 손실
- $l_i$  : 각 진행층의 두께
- $k$  : 진파 상수(wave number)
- $s$  : 광점의 반경

이 회절손실  $\alpha_{diff}$  값은 공진 하는 빛의 반경이  $s$  인 경우에 회절에 의한 광손실을 식(1)의  $\alpha_m$ 에 단순히 덧셈함으로써 고려해 넣을 수 있다.

그리고, 수직 공진형 레이저에서는 이득 극대의 파장 위치와 공진기의 공진 파장의 위치를 잘 맞추는 일이 중요하다. 수직 공진형 표면광 레이저의 경우는 공진기가 짧아서 모드 간격이 50-100 nm로 비교적 크므로, 공진 파장과 이득최대의 파장 위치가 일치하지 않을 경우 이득을 많이 얻지 못하게 된다. 그러므로 유효공진기의 광학적인 길이는 이득이 최대 되는 파장으로 생각하여 반파장의 정수배가 되는 것이 좋다. 그리고, 공진기의 모드 간격( $\Delta\lambda$ )은 다음과 같이 주어진다.

20 nm	InP	cap
100 nm	InGaAs	p-type $2 \times 10^{19}$ contact
300 nm	InP	p-type $5 \times 10^{17}$ cladding
1500 nm	1.3Q InGaAsP	p-type $3 \times 10^{17}$ active
2000 nm	InP	n-type $2 \times 10^{18}$ cladding
300 nm	1.1Q InGaAsP	n-type $2 \times 10^{18}$ etch-stop
InP substrate		n <sup>+</sup> -type (Sn)

그림 2. 레이저 제작에 사용된 기판 구조

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L n_{eff}} \quad (5)$$

- $\lambda$  : 공진 파장
- $L$  : 공진기의 길이
- $n_{eff}$  : 유효 굴절률

그림 2에서 알 수 있듯이 공진기를 형성할 부분은 cladding 영역과 이득 매질 부분이므로 본 시료의 경우 총 공진기의 길이는 3.8  $\mu m$ 이며, 이 중에서 1.5  $\mu m$ 가 이득 매질이 되는 셈이다. 이렇게 공진기를 형성하게 될 때 공명을 이루는 파장은 1.3  $\mu m$  근처이며 이 위치에서 이득 곡선의 최고와 맞아 떨어진다면, 최적의 공진 조건이 될 것이다. 이 때 계산된 FSR (free spectral range)는 약 53 nm이다. 일반적으로 반도체 층들(spacer)과 유전체 반사경으로 구성된 공진기에서의 FSR 값은 반도체 층들(spacer)만으로 계산된 FSR보다 큰 값이 된다. 그리고, 유효 공진기의 길이는 유전체 쌍의 굴절률 차이가 작아질수록 길어지는 경향을 띤다.

### III. 제 작

수직 공진 표면광 레이저에서 양면 반사경은 전자선(electron beam) 증착기를 이용하여 Si/SiO<sub>2</sub> 쌍을 반복 증착하여 제작되었다. Si/SiO<sub>2</sub> 쌍은 각 박막이 견고하고 굴절률 차이가 크기 때문에 적은 층의 증착으로도 고반사율을 얻을 수 있는 장점이 있다.

증착 되는 유전체의 두께를 증착 중에 알 수 있게 하기 위해서 674 nm 파장의 반도체 레이저를 증착 중인 기판에 40° 각도로 입사시켜서 반사광의 강도 변화를 관찰할 수 있게 하였다. 증착 중 반사광의 강도가 변화하는 것을 보면서 증착을 시작하고 끊어주면 674 nm 파장이 40° 각도로 입사했을 때 반파장을 보게 되도록 각 유전체 층을 증착할 수 있다(참조: 그림 3). 이 경우 반사경의 최대 반사율이 되는 파장은 1.32  $\mu m$ 이다. Si/SiO<sub>2</sub>의 다섯 쌍을 증착한 반사경들에서 반사율 스펙

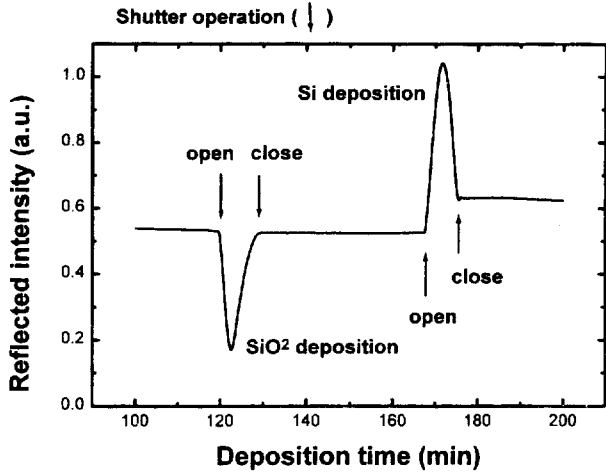


그림 3. 반사경 증착 중에 시편으로부터 반사된 빛의 강도 변화

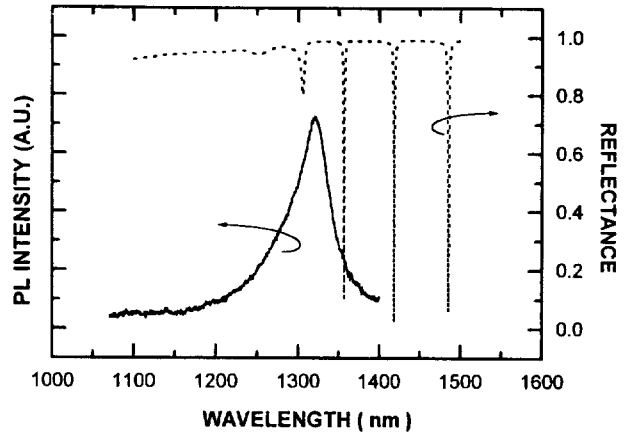


그림 4. 이득매질에서 광 펌핑 하여 얻은 photo-luminescence(왼쪽 축) 공진기 양면에 반사경(95.7%) 증착한 시편의 반사율(오른쪽 축); 공진 모드가 잘 나타나고 있다.

트럼의 계산 값과 측정 값을 서로 비교해 보면 5%보다 작은 오차로 스펙트럼이 일치한다. 박막은 각 층 당 8-13분 정도의 시간에 증착되며, 견고하게 형성되고, 셔터로 끊어줄 때 증착 두께의 오차가 포함될 수 있다.

결정 성장한 기관 위에 공진기를 이루는 부분이 드러나도록 얇은 층을 에칭해 내고 반사경 증착을 한다. 그리고 뒷면 반사경을 증착하기 위하여 공진기를 이룰 얇은 층이 나타나도록 기관 부분을 식각(etching)해 내야 한다. 이 식각의 깊이를 정확하게 하기 위해서, 시편은 InP기관 위의 첫 번째 층이 바로 etch-stop층인 InGaAsP층이 되게 길러졌다. 이것은 선택 에칭의 방법으로 공진기 부분까지 정확히 에칭해 내기 위해서이다.

기관의 두께가 380 μm로 두껍기 때문에 에칭될 부분의 크기를 조절하기 좋게 하기 위해서 기관을 갈아내야 한다. 제작 과정을 순서대로 말하면, 에피 쪽의 공진기 부분에 반사경을 증착한 후에 증착 면을 열에 안정한 UV glue로 두꺼운 유리판에 붙인다. 그리고 정밀한 두께 측정기(dial gauge : 2 μm 측정 눈금)로 측정해 가면서 기관의 두께가 100-150 μm가 될 때까지 가는 사포로 기관을 갈아내고, 3 μm크기의 알갱이가 있는 polishing pad와 0.5 μm polishing pad를 사용하여 거울면으로 연마한다. 그런 다음 기관을 세척하고 200°C에서 구워 습기를 완전히 없애고 photoresist로 페턴을 만든다.

이렇게 준비된 시료는 선택 에칭 용액으로 에칭 한다. 기관 에칭이 끝나면 InGaAsP층의 거울 면이 보이게 된다. 그리고 다시 etch-stop층을 선택에칭해 넣으로써 공진기를 이루는 에피 층을 드러낸다. 그 위에 기관 쪽 반사경을 증착 하여 광펌핑용 레이저 구조를 완성한다.

기관 전면을 모두 식각하는 것보다 페턴을 통해서 일부만 식각하는 편이 기관을 다루기 쉬울 뿐만 아니라 에칭이 되지 않은 부분이 얇게 에칭된 부분을 잡아주기 때문에 깨짐을 방지해 준다.

#### IV. 광펌핑 실험

MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)로 길러진

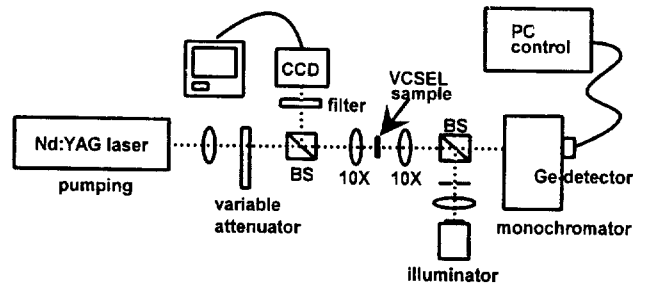


그림 5. 광 펌핑과 반사율 측정을 위한 광학 장치도

레이저 구조에서 1.3 μm파장 근처에서 강한 이득 매질의 photoluminescence를 관찰하였고, 그것의 FWHM은 54.4 nm이다(참조 : 그림 4). 이 레이저 기관으로 광펌핑용 VCSEL을 제작하였는데, 본 연구는 공진기 양면에 각각 Si/SiO<sub>2</sub>유전체 박막을 2쌍과 4쌍으로 증착된 반사경이 있는 것들에 대한 실험이다.

반사율의 측정과 광펌핑 실험을 위한 광학 장치는 그림 5와 같다. 우선, VCSEL시편의 반사율을 측정하기 위하여 monochromator 왼쪽의 광분할기(BS)를 거쳐 VCSEL구조에 백색광으로 렌즈를 통해서 조명(illumination)을 해준다. 이렇게 조명된 빛은 VCSEL구조에서 반사되어 광분할기를 통과하여 monochromator로 들어가서 반사율 스펙트럼 분석을 하게 된다. 각 VCSEL구조의 공진기 모드에 해당되는 파장에서 공명을 일으키는 반사율 스펙트럼을 monochromator와 직렬통신 포트에 연결 되어 있는 PC모니터로 볼 수 있게 된다. 그리고 VCSEL구조에 비춰진 조명의 일부는 투과하여 다시 렌즈를 통해 두 번째 광분할기에서 꺾여서 VCSEL구조의 표면을 CCD카메라로 볼 수 있다. 그리고 광펌핑을 할 때에는 YAG 레이저에서 광을 보내면 렌즈, 광분할기, 렌즈를 거쳐서 VCSEL구조에 집속된다. 조명을 통해서 CCD카메라로 VCSEL구조의 표면을 보고 있으므로 VCSEL의 적절한 위치에 펌핑광이 잘 집속 되었는지를 확인할 수 있게 되는 것이다. 그리고 VCSEL구조의 오른쪽의 렌즈는 VCSEL구조로부터 나오는 출력 광을 모아서 monochromator로 보내주는 역할

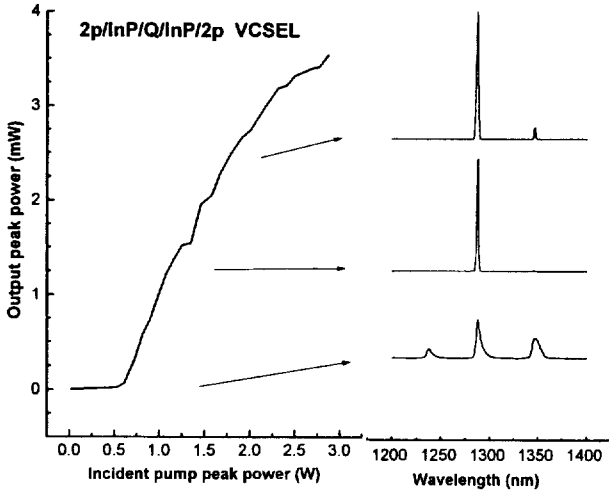


그림 6. 펌핑광 대 출력광 강도 변화와 각 펌핑 강도에서의 출력광 스펙트럼 변화; 공진기 양면에 95.7%반사율의 반사경이 있는 경우.

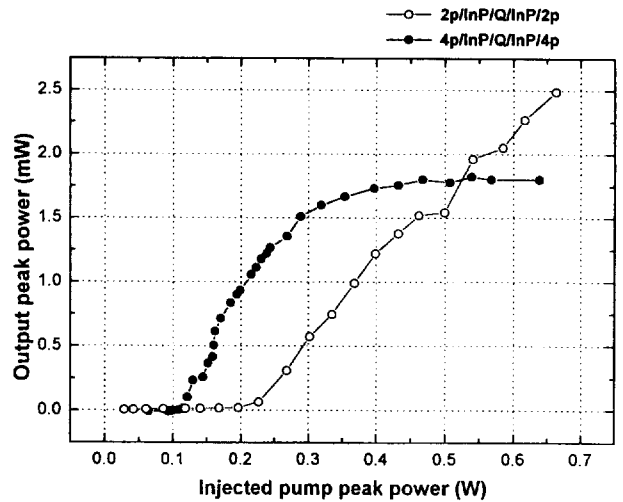


그림 7. 공진기 반사경의 반사율이 다른 두 VCSEL의 펌프 대 출력광 강도 곡선; 검은 점은 99.0%, 흰 점은 95.7%반사율인 소자의 경우.

을 하게 된다.

위의 장치를 이용하여, 제작된 VCSEL에 YAG레이저로 펄스 광펌핑하여 레이저 동작을 확인하였다. YAG레이저는 2 kHz로 동작시켰고 펄스폭(FWHM)이 280 ns이다. 레이저 동작 확인을 위해서 펌프 대 출력광 강도의 곡선과 스펙트럼의 변화를 측정했다. 그림 6은 레이저 공진기의 양면에 두 쌍의 Si/SiO<sub>2</sub>유전체로 반사경을 구성한 시편에 대한 레이저 동작을 보여주고 있다. 좌측에 있는 곡선은 입사 펌핑 광강도 (incident pump peak power)에 대한 출력 광강도(output peak power)의 관계인데, 문턱현상이 잘 나타나고 있다. 우측의 그림은 각 입사 펌핑 광강도에 따른 출력광 스펙트럼의 변화를 보여준다. 문턱이전에서는 각 공진기 모드에서 넓은 선폭(약 4.5 nm)의 자발 방출을 볼 수 있고 레이저 동작을 하는 문턱 이후의 펌핑광강도에 대해서는 공진기 모드 중에서 이득을 가장 많이 얻는 한 개의 모드가 선택되고 1.29 μm파장에서 레이저 동작하여 선폭(약 1.8 nm)은 현저히 좁아지고 있다. 그리고, 펌핑광 강도를 더 높이면 선폭이 넓어지면서(>2 nm) 고차의 중모드에서도 이득을 얻어 다중모드 레이저 동작을 하게 된다. 선폭이 펌핑광강도에 따라서 넓어지는 현상은 펄스 동작시에 나타나는 반도체 레이저의 chirping현상으로 이해하고 있다. 그리고, 펌핑을 강하게 하면 Si/SiO<sub>2</sub>유전체 반사경의 경우 그림 4에서 보듯이 고반사율 밴드가 넓어서 고차의 중모드가 발전할 수 있게 된다.

반사경의 반사율이 증가하면 출력으로 나가는 손실이 적으므로 문턱펌핑이 낮아질 것으로 기대된다. 그림 7에서는 양면 반사경을 Si/SiO<sub>2</sub>유전체 쌍을 2쌍으로 또는 4쌍으로 구성한 경우에 각각 주입 펌핑 광강도에 대한 출력광강도의 변화양상을 보여주고 있다. Si/SiO<sub>2</sub>유전체 4쌍 반사경의 반사율이 크므로 문턱이 낮아짐을 볼 수 있다. Si/SiO<sub>2</sub>유전체 2쌍을 반사경으로 한 레이저 시편은 주입 문턱 펌핑 밀도가 26.7 kW/cm<sup>2</sup>이고 Si/SiO<sub>2</sub>유전체 4쌍을 반사경으로 한 레이저 시편은 주입 문턱 펌핑 밀도가 7.2 kW/cm<sup>2</sup>이다(광 펌핑 광점의 직경 : 약 50

**Polarization characteristics**

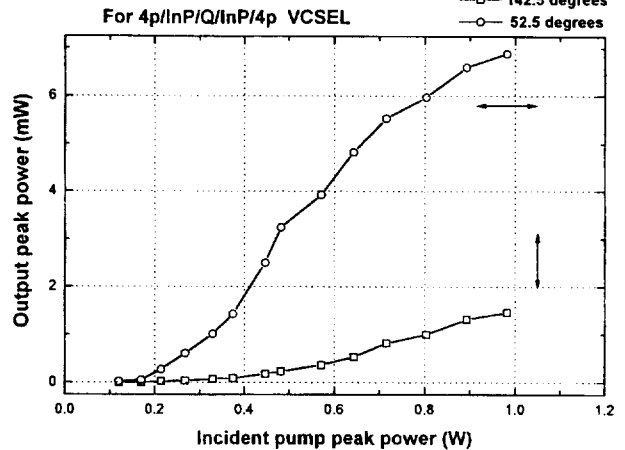


그림 8. 반사경의 반사율이 99.0%인 VCSEL의 출력광 편광 특성; 큰 출력을 나타내는 편광 방향은 [011] 결정 방향임.

μm). 유전체 반사경의 고반사율 영역에서 짧은 파장 쪽의 끝이 펌핑 파장 근처이므로, 두 VCSEL에서 펌핑 파장의 반사율은 큰 차이가 난다. 그래서 두 VCSEL에서 입사된 광의 37% (2쌍)와 57%(4쌍)가 각각 주입된다. 그리고, 출력반사경의 반사율이 낮은 VCSEL이 레이저 동작 시에 훨씬 더 높은 기율기 효율을 보여야 함에도 불구하고 오히려 더 낮은 기율기 효율을 나타내고 있다. 이것은 전하밀도가 커짐에 따라서 급하게 커지게 되는 비발광결합(Auger recombination)의 영향으로 설명할 수 있다. 각 소자의 문턱 펌핑 광강도(pump peak power)에서 광 펌핑에 의해서 생성되는 전하밀도를 계산하여 비발광결합 속도를 알아보면 4배 이상의 차이가 난다. 그래서 생성된 전하가 비발광결합으로 사라져 버리는 속도만큼 기율기 효율을 낮추게 된 것이다.

관찰된 레이저 동작의 중요한 특징 중에 하나는 시편의 회전 방향에 따라서 그 방향이 회전하는 편광특성이다. 그림 8에서는

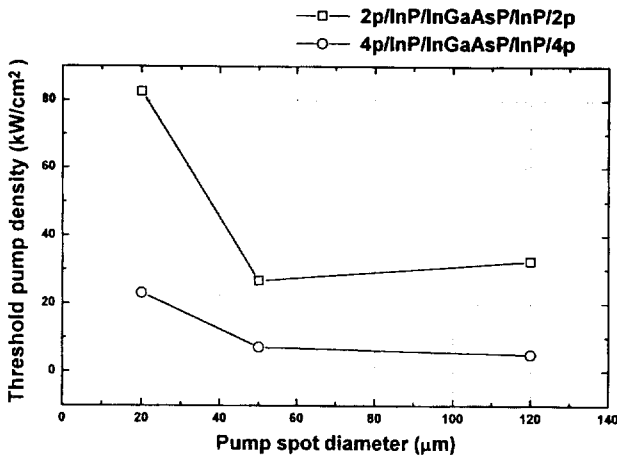


그림 9. 펌핑 광점의 직경에 대한 문턱 펌핑 밀도의 변화 ; 네모는 95.7%, 동그라미는 99.0%인 경우.

공진기 양면에 4쌍의 Si/SiO<sub>2</sub> 유전체를 반사경으로 하는 레이저의 편광특성을 보여주고 있는데 한쪽 편광이 다른 쪽 편광의 21배 정도까지 크게 나타난다. 이러한 편광특성은 결정 방향에 따라 비등방적 기판에칭이 되어 생겨난 변형력(stress)으로 인해서 한 편광이 수직인 다른 편광보다 더 많은 이득(gain)을 볼 수 있기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.<sup>[5]</sup> 하지만 그림 1과 그림 8에서 보듯이 수직공진형 레이저에서는 기본적으로 원형 대칭적인 구조이기 때문에 편광이 안정적이지 못하고 펌핑 강도에 따라서 편광정도가 변화하고 있다. 편광 의존성이 있는 소자를 이용하는 광학 구성에서는 레이저의 편광성이 중요해지기 때문에 수직공진형 레이저의 편광을 안정화하려는 노력도 상당한 주목을 받고 있다.

반사경으로 Si/SiO<sub>2</sub> 유전체 쌍이 2쌍인 것과 4쌍인 레이저의 경우에 대해서 각각 펌핑빔의 크기에 따른 문턱 펌핑 밀도의 변화를 그림 9에 기록하여 보았다. 이것은 펌핑빔의 직경이 작아질 때 문턱 펌핑 밀도가 상당히 증가하는 것을 보여주고 있다. 이러한 경향은 회절 손실, 전하의 확산 및 비발광결합(Auger recombination)의 영향에 의한 손실에 기인하는 것으로 생각된다.

이 실험에서는 정규(Gaussian)분포의 광 강도로 펌핑 되어

생성된 전하가 전하 수명(carrier lifetime)동안 확산한 후 재결합, 발광한다고 생각할 수 있다.(이득매질인 InGaAsP 층에서 전자의 확산길이(diffusion length)는 약 1 μm이다.<sup>[6,7]</sup>) 따라서, 문턱 펌핑 밀도는 펌핑 광점의 크기가 작아질수록 증가한다.

### V. 결 론

광펌핑용 VCSEL구조를 공진기를 이루는 에피 층 양면에 유전체 반사경을 증착 함으로써 제작하였다. YAG레이저로 펄스 광 펌핑 했을 때 양쪽에 유전체 4쌍이 증착된 레이저 구조에 대해서는 1371 nm 파장에서, 그리고 양쪽에 유전체 2쌍이 증착된 레이저 구조에 대해서는 1291 nm 파장에서 레이저 동작을 관찰하였다. 펌핑광 대 출력광 강도 변화와, 스펙트럼의 변화를 관찰함으로써 레이저 동작을 확인했다. 펌핑빔의 직경이 50 μm인 경우에 양면에 Si/SiO<sub>2</sub> 유전체 쌍이 2쌍인 레이저 구조와 4쌍인 레이저 구조의 주입 문턱 펌핑 밀도는 각각 26.7 kW/cm<sup>2</sup>와 7.2 kW/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 그리고 시편의 결정 방향에 따라서 출력 편광방향이 결정됨을 관찰했으며, 펌핑 광점의 크기에 따른 문턱 펌핑 밀도의 변화도 측정하고 논의하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga, *Electron. Lett.*, **29**, 913-914 (1993).
- [2] D. I. Babic, J. J. Dudley, K. Streubel, R. P. Mirin, J. B. Bowers, and E. I. Hu, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1030-1032 (1995).
- [3] G. P. Agrawal, and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers 2/e* (VAN NOSTRAND REINHOLD, New York, 1993), pp. 238.
- [4] K. Moriki, H. Nakahara, T. Hatorri, and K. Iga, *IEICE, J* 70-C, 501-509 (1987).
- [5] A. K. Jansen van Doorn, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1041-1043 (1996).
- [6] T. P. Pearsall, *GaInAsP Alloy Semiconductors*(John Wiley, New York, 1982), pp. 35.
- [7] W. T. Tsang, *J. Appl. Phys.*, **49**, 103 (1978).

## Photo-pumped 1.3 μm vertical-cavity surface-emitting lasers

Hyun Woo Song, Chang Kyu Kim and Yong Hee Lee

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

(Received : November 20, 1996)

Vertical-cavity surface-emitting laser(VCSEL)s operating at 1.3-micron wavelength for optical communication are fabricated by using Si/SiO<sub>2</sub> dielectric quarter-wave pairs on both sides of the InGaAsP( $\lambda_e=1.3 \mu\text{m}$ ) gain material. VCSELs are optically pumped with a Nd-YAG laser in a pulsed mode and lasing around 1.3 microns is observed. Lasing characteristics such as threshold pump intensity as a function of mirror-reflectivity, polarization, and threshold pump density with pump spot size are investigated.