

광 결정 구조 변수에 따른 고출력 단일모드 수직공진 표면발광 레이저의 발진 특성

이진웅 · 현경숙[†]

세종대학교 전자정보통신공학부 광전자공학과
☎ 143-747 서울 광진구

신현의 · 김희대

옵티시스(주) 신소자 개발팀
☎ 500 - 779 광주광역시 북구

(2009년 9월 16일 받음, 2009년 10월 27일 수정본 받음, 2009년 10월 27일 게재 확정)

광 결정을 이용하여 고출력 단일모드 특성을 가지는 수직공진 표면발광 레이저를 제작하고 발진 특성을 관찰하였다. 일반적으로 광 밴드갭 형성을 위해 수십개의 광 결정 홀을 식각하나, 이번 연구에서는 6개의 홀만으로 단일모드를 구현하였고, 폴리이미드로 홀을 메우게 되어 신뢰성이 유리한 장점이 있다. 산화 구경과 광 결정 홀의 크기를 변화시키며 실험을 진행하여 단일모드 특성의 변화를 분석하였다. 다양한 광 결정 구조를 가진 수직공진 표면발광 레이저에서 고출력 단일모드 발진이 가능함을 확인하였다.

High Power and Single Mode Lasing Characteristics in Vertical Cavity Surface Emitting Laser by Varying Photonic Bandgap Structures

Jin-woong Lee and Kyung-Sook Hyun[†]

Department of Optical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

[†]E-mail: kshyun@sejong.ac.kr

Hyun-Ee Shin and Hee-Dae Kim

Opticis Co., Ltd., 971-41 Wolchool-dong, Buk-gu, Gwangju 500-779, Korea

(Received September 16, 2009; Revised manuscript October 27, 2009; Accepted October 27, 2009)

The high power and single mode vertical cavity surface emitting laser(VCSEL)s with photonic crystal structures have been proposed and fabricated by reducing substantially the hole numbers used in the photonic crystal structures. It is found that only six holes enable VCSELs to operate a single mode and the reliability can be enhanced by filling the holes with polyimide. The single mode lasing characteristics were analyzed by varying the oxide aperture and the hole diameter in photonic crystal structures. As a result, the single mode lasing can be stably obtained in the photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers.

Keywords: Vertical cavity surface emitting laser, Photonic crystal, Single mode lasing, Semiconductor laser

OCIS codes: (140.7260) Vertical cavity surface emitting lasers; (230.5298) Photonic crystals; (140.3570) Lasers, single-mode; (140.5960) Semiconductor lasers

I. 서 론

수직공진 표면발광 레이저^[1]는 여러 연구진들의 관심 속에서 개발되어 온 이중접합 화합물반도체 소자로서 활성영역의 양면에는 굴절률 차가 큰 두 박막을 $\lambda/4$ 두께로 반복 증

착한 브래그 반사경이 있다. 전류가 주입되면 활성영역에서 방출되는 빛이 양면의 반사경 사이에서 공진을 하고 이득을 얻어 기판 표면에 수직한 방향으로 레이저 동작을 하는 것이다. 수직공진 표면발광 레이저는 저렴한 비용으로 생산과 시험이 가능하고, 또한 낮은 잡음으로 고속에서 변조되고 많은 양의 빛을 발함으로써 광 검출기의 요구조건을 크게 완화할

[†]E-mail: kshyun@sejong.ac.kr

수 있다. 모드 특성과 스펙트럼 특성의 조절이 가능하고, 원형 대칭적인 출력모드를 제공함으로써 효율적으로 광섬유에 연결하여 모드 잡음 없이 안정적인 고속변조가 가능하다. 또한 정렬이 간편하며, 기판 상태에서 탐침을 이용하여 소자의 특성을 측정할 수 있다. 또한 이득영역의 체적이 작기 때문에 레이저 동작의 문턱전류가 낮고, 동작전류도 낮아서 고밀도 집적에 유리하다.

이와 같은 장점 이외에도 고속 병렬 광 연결, 행렬형 광 센서 등 2차원 행렬 응용이 가능하다. 이러한 응용의 경우와 고속 동작을 필요로 하는 경우에는 다중모드가 아닌 단일모드 구동이 요구된다. 다중모드에서는 고차모드로 발전하면서 파형의 왜곡이 크게 나타나 전송 에러가 높아지기 때문이다.

단일모드의 장점은 모드간 잡음을 줄일 수 있고, 레이저 스펙트럼 폭을 줄일 수 있다는 것이다. 공간 홀 버닝과 열렌즈 효과로 인해 단일모드로 동작하기가 쉽지 않은데, 단일모드 수직공진 표면발광 레이저를 제작하기 위한 방법으로는 산화구경을 줄이거나 외부 공진기를 이용하는 방법^[2], 표면 릴리프 식각을 이용하여 고차 모드의 손실을 증가시키는 방법^[3], 기본 모드의 이득을 증가시키는 방법^[4], 광 공진기를 연장시키는 방법^[5], 양성자 주입과 습식 산화를 동시에 사용하는 방법^[6], far field pattern을 조절하는 방법^[7] 등이 있으나, 기존 공정에 대해 미세하고 정교한 공정을 추가한 경우로 기존의 범용기술을 사용하지 않는 경우이거나, 사용하더라도 상당한 정밀도를 요구하는 작업등의 단점이 있다.

반면에 광 결정을 이용한 수직공진 표면발광 레이저는 기존의 기술을 이용하여 홀을 식각함으로써 손쉽게 단일모드로 구동하는 수직공진 표면발광 레이저를 구현할 수 있기 때문에 광 결정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[8,9,10]

일반적인 산화 수직공진 표면발광 레이저에서는 산화구경의 크기를 3 μm 이하로 작게 할 경우 단일모드를 구현할 수 있지만, 일단 산화구경을 작게 조절하는 것이 어렵고, 저항이 증가한다. 또한 변조 대역폭에 한계가 있으며, 속도가 감소하고 소자수명에도 영향을 미치게 되어 통신용 광소자로서는 부적합하다. 산화구경의 직경이 커지면 출력 파워는 높아지고 confinement factor가 증가하여 더 효과적으로 confine 되지만, 잡음이 증가하고 스펙트럼이 넓어지며 far field angle이 넓어지게 된다.

지금까지 연구되어온 광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 경우에는 큰 산화구경으로 인해 출력 파워가 낮고, threshold 전류가 높았으나^[11,12], 본 연구에서는 7 μm ~ 12 μm 의 적절한 크기의 산화구경으로 인해 높은 출력 파워를 달성하였다. 또한 수직공진 표면발광 레이저에서 단일모드의 구현을 위해 p영역 브래그 반사경에 ICP-RIE(inductive coupled plasma - reactive ion etching)를 이용하여 손쉽게 광 결정 구조를 형성하였다. 보통 광 밴드갭 형성을 위해 수십개의 광 결정 홀을 형성하나^[13] 이번 연구에서는 6개의 홀만으로 단일모드를 구현하였다. 그림 1에 위에서 본 개략도를 나타내었다. 광 결정 홀은 육각형 구조로 배치되었고, 홀의 중심과 소자 중심의 거리는 5 μm 이고, 거리와 위치를 고정을 하였으며, 실험

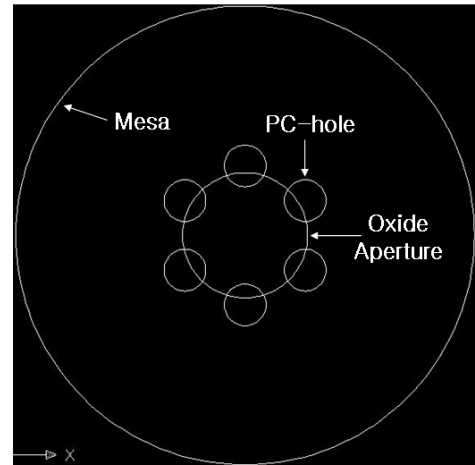


FIG. 1. Schematic diagram of photonic crystal hole and oxide aperture.

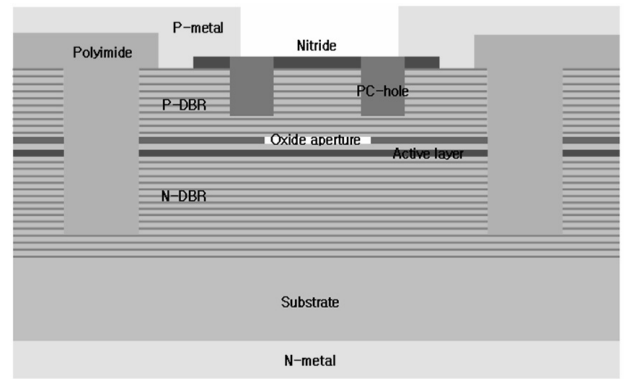


FIG. 2. Schematic diagram of photonic crystal vertical cavity surface emitting laser.

변수로 홀과 산화구경의 크기만 변화를 주어 실험을 진행하였다. 홀과 산화구경은 그림 1과 같이 중첩이 되게 된다. 습식 산화 후 홀을 식각하여 공정을 진행하기 때문에 노광작업에서 정렬이 용이하고 폴리이미드로 홀을 메우게 되어 소자의 신뢰성이 유리한 장점이 있다.

그림 2에 광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 개략도를 나타내었다. 본 논문에서 광 결정 구조라 함은 산화구경을 중심으로 한 정육각 구조의 모서리에 작은 원형 홀 패턴을 p 영역 브래그 반사경에 식각한 것을 뜻한다. 광 결정 홀을 이용하여 단일모드로 동작하는 수직공진 표면발광 레이저를 제작하였고, 홀의 직경과 산화구경의 직경의 변화에 따른 소자의 특성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1. 수직 공진 표면 발광 레이저에 사용된 광 결정 (Photonic crystal) 구조

물질의 광학적인 성질을 이용할 수 있는 구조를 갖고 있거

나 구조를 갖도록 만들어낸 물질들을 광 결정이라고 부른다. 빛의 반 파장 정도의 주기성을 가지고 공간적으로 반복되는 2가지 이상의 유전체로 구성된 격자 구조를 말한다. 빛의 파장 크기 수준의 주기로 굴절률이 반복되는 결정구조를 만들면, 특정 파장의 빛을 완전히 배제 또는 반사시킬 수 있는 것이다. 정보 전달의 궁극적인 수단으로 빛이 생각되고 있으며, 더불어서 빛의 흐름을 조절할 수 있는 광 결정구조를 갖는 물질들의 중요성도 함께 부각되고 있다.

광 결정의 주기 구조는 1,2,3 차원 구조로 나눌 수 있다. 1차원 광 결정 구조의 경우 서로 다른 물질들을 층층이 쌓기만 하면 된다. 2차원 광 결정의 경우 z축으로는 변화가 없으며 x-y 평면상으로 주기적으로 서로 다른 물질들이 배열되어 있는 것이다. 2차원 광 결정구조의 경우 물질 내에 다른 물질들을 봉의 형태로 삽입하는 구조인데 이때 삽입하는 물질로 air를 쓸 수도 있다. 즉, 물질 내에 단순히 홈을 뚫는 것만으로도 2차원 광 결정 구조를 만들 수 있다. 우리가 만든 수직공진 표면발광 레이저는 위쪽 반사경에 광 결정 홀을 식각하고 폴리이미드로 채우는 2차원 광 결정구조이다. 3차원 광 결정 구조의 경우 모든 방향으로의 완벽한 광 밴드갭을 형성한다는 장점이 있지만 제작이 어렵다.

광 결정을 이용한 수직공진 표면발광 레이저는 단일모드 광 결정 광섬유의 개념을 도입한 것이다. 큰 범주에서는 유효굴절률 효과를 이용한 광 인도의 경우에 속한다고 할 수 있다. 기존 수직공진 표면발광 레이저의 경우에는 산화구경의 안과 밖을 광 도파로의 코어와 클래딩으로 구분해서 생각할 수 있다. 본 구조에서는 레이저의 위쪽 반사경에 광 결정을 도입하여 작은 홈을 뚫음으로써 유효굴절률에 변화를 줄 수 있다. 빛은 홈에 의해 상대적으로 유효굴절률이 낮은 클래딩영역에 의해 전반사가 되어 코어부분을 진행하게 된다. 이 방식은 무엇보다 식각에 의해 형성된 홈을 이용하므로 물질에 상관없이 적용 가능하며, 특히 단일모드를 얻기 위해 유용하게 쓰일 수 있다.

중앙의 결점부분은 주변부보다 유효굴절률이 크므로 광인도 구조가 형성되고 굴절률 차이를 적절히 조절하면 단일모드만을 형성하는 공진기가 이루어진다. 주변부의 유효굴절률은 홈의 크기와 깊이, 그리고 주기들에 특성에 의해 결정되는데 이는 공진기 내의 전기장 분포가 홈 사이에 주로 분포하게 되어 유효굴절률 차가 작은 광인도 구조가 형성되게 된다. 홀로 진행하는 빛은 손실이고, 단일모드 구동은 광인도 구조의 유효 굴절률 인도와 홀의 발진 역제의 조합으로 가능하다. 반사율이 낮아진 홀과 고차모드간의 중첩이 단일 기본 모드보다 심하므로 광 손실이 크게 되기 때문에 주변부의 고차모드는 홈에 의해 억제된다. 결점이 있는 중심 부분과 이를 둘러싼 주변부의 굴절률을 유효굴절률 모델을 이용하여 도출할 수 있다. 산화 수직 공진 표면 발광 레이저에서 인도되는 모드 수는 다음의 식 (1)에 나타난 V 값에 의해서 결정된다.

$$V^2 \equiv (h_{core}^2 - h_{clad}^2)d^2 \approx \langle \epsilon \rangle (k_{clad,z}^2 - k_{core,z}^2)d^2 \quad (1)$$

이때 $k_{clad,z}$ 와 $k_{core,z}$ 는 각각 산화 구경의 주변부와 중심부분의 공진 모드의 웨이브 벡터이며 h_{core} 와 h_{clad} 는 횡방향의 웨이브 벡터이다. d 는 산화 구경의 지름이다. $\langle \epsilon \rangle$ 는 소자내의 정상파를 고려하여 평균한 유전율이다. 주변부의 공진 파장은 광 결정 홀 사이에 형성된 미세 공진기들에 의해 공진 파장이 단파장으로 이동하게 된다. 유효굴절률모델에 의하면 이러한 공진 파장의 차이는 다음 식 (2)와 같이 유효굴절률의 차이로 변환할 수 있다.

$$\frac{n_{eff,core-dad} - n_{eff,core}}{n_{eff,core}} \approx \frac{\Delta \lambda_{core-dad}}{\lambda_{core}} \quad (2)$$

즉 광 결정의 결점이 있는 중심부와 주변부의 공진 파장을 측정하면 유효 굴절률 차이를 알 수 있으며 결국 광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 광인도 구조를 알 수 있게 된다. 식 (3)의 V값이 2.405보다 작은 경우 광섬유는 단일모드로 동작하게 된다. 이 이론을 광 결정을 이용한 광도파로에 도입하면,

$$V_{eff} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{eff}^2} \quad (3)$$

광 결정 홀의 중심과 중심 사이의 간격을 Λ 로 정의하면 Λ 를 core의 반경으로 생각할 수 있다. n_{co} 는 홀이 없는 중심부분의 굴절률을 나타내고 n_{eff} 는 규칙적인 홀이 있는 클래딩부분의 유효 굴절률을 나타낸다. 이 V_{eff} 값을 2.405 이하로 만들면 단일모드로 동작하게 된다. 이러한 사실을 소자의 위쪽 반사경에 광 결정 홀을 식각하여 구현하게 되면 단일모드로 동작하는 소자를 제작할 수 있다.

2.2. 소자 제작 및 실험 구성

단일모드 특성에 영향을 미치는 변수는 산화구경 직경, 광 결정 구조를 위한 원형 패턴 홀의 직경 및 깊이가 있다. 이 중 산화구경 직경과 광 결정 홀의 직경을 변수로 하여 소자를 제작하였다. 깊이는 이전에 제작한 소자에서 2 μm 에서 가장 우수한 성능을 나타냈으므로 이번 연구에서는 2 μm 로 고정한 후 나머지 변수를 변화시켜 소자를 제작하였다. 광 결정 수직공진 표면발광 레이저는 산화막 수직공진 표면발광 레이저와 동일한 과정으로 공정을 진행한다. 다른 점은 광 결정 홀의 식각이 추가 된다는 점이다. 식각은 습식산화가 끝난 후 align key와 trench를 참고로 홀을 식각한다. 이 경우는 이전의 소자 제작 완료 후에 식각한 경우와 달리 소자 위에 다른 첨가 구조가 없기 때문에 노광작업에 더 유리하다. 또한 식각 후 기본 공정 순서를 따라가게 되면 자연스럽게 폴리이미드와 질화막이 메우고 보호되어 소자의 신뢰성이 유리하다. 그림 3에 제작 완료후의 소자 표면 촬영 사진을 나타내었다.

소자의 특성을 확인하기 위하여 단일모드 구간 및 스펙트럼 특성을 확인하였고, 일반 소자와 스펙트럼을 비교하였다.



FIG. 3. Microphotography of the PC-VCSEL.

또한 온도 특성 및 전압과 저항, 출력을 확인하였고, far field pattern과 near field pattern, 공정오차에 따른 특성을 확인하였다.

2.3. 실험결과 및 분석

홀의 직경과 산화구경의 변화에 따른 스펙트럼을 측정하여 표 1에 단일 모드 동작 구간을 정리하였다. 홀의 직경은 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4 μm 이고, 산화구경은 7, 8, 9, 10, 11, 12 μm 이다. 홀과 산화구경이 커질수록 단일모드 구간이 증가한다. 홀의 직경을 a , 홀과 홀 중심의 간격을 Δ 라고 할 때, aspect ratio는 a/Δ 이다. aspect ratio가 커지게 되면 활성층 영역에서 기본모드와 고차모드의 이득의 차이가 커져 confinement factor가 증가되고, light confinement가 강화된다. 작은 구경에서는 모드와 홀의 중첩되는 부분이 작기 때문에 기본모드의 손실이 증가하여 단일모드 발진이 어렵다. 동일 산화구경에서 홀의 직경이 커짐에 따라 단일모드 발진이 유리해짐을 알 수 있다. 홀의 직경이 3.2 μm 에서 산화구경이 11, 12 μm 인 경우와, 3.4 μm 의 10, 11, 12 μm 에서 6 mA이상의 넓은 범위에서 단일모드로 동작하게 된다.

그림 4의 (a), (b)에 나와 있듯이, 홀이 2.6 μm 에서는 2 mA에서만 단일모드이며, 3.4 μm 에서는 전체 전류 영역에서 단일모드를 유지한다. 전류를 증가하게 되면 모드는 장파장으로 이동을 하고, 광 출력이 증가한다. 2.6 μm 에서 산화구경에 관계없이 모두 다중모드이다. 3.4 μm 에서는 산화구경이 7 ~ 9 μm 인 경우에 다중모드이지만 10 ~ 12 μm 인 경우에는 단일모드이다. 종합적으로 2 ~ 8 mA의 구동전류에서 단일모드로 동작하기 위해서는 산화구경이 10 μm 이상이고 광 결정 홀은 3.2 μm 이상이어야 한다.

일반 수직공진 표면발광 레이저와 광 결정 수직공진 표면발광 레이저를 전류변화에 따른 스펙트럼을 측정하였고, 결과는 그림 5의 (a), (b)에 나타내었다. 그림 에서 알 수 있듯

Table 1. Characteristics of PC-VCSELs

PC-hole (μm)	Oxide aperture (μm)	Single mode lasing start (mA) (A)	Single mode lasing end (mA) (B)	Single mode lasing range (mA) (A-B)
2.6	7	0.4	1.3	0.9
	8	0.5	1.4	0.9
	9	0.7	1.2	0.5
	10	0.8	3.0	2.2
	11	1.0	4.6	3.6
	12	1.3	4.8	3.5
2.8	7	0.4	1.5	1.1
	8	0.7	1.5	0.8
	9	1.0	3.1	2.1
	10	1.0	3.4	2.4
	11	1.0	3.9	2.9
	12	1.2	4.8	3.6
3.0	7	0.5	1.5	1.0
	8	0.7	2.1	1.4
	9	0.9	4.1	3.2
	10	1.0	5.2	4.2
	11	1.1	5.6	4.5
	12	1.1	5.4	4.3
3.2	7	0.6	2.4	1.8
	8	0.7	2.6	1.9
	9	0.9	3.7	2.8
	10	1.1	5.3	4.2
	11	1.2	7.2	6.0
	12	1.0	9.8	8.8
3.4	7	0.5	2.7	2.2
	8	0.6	3.2	2.6
	9	0.7	5.4	4.7
	10	0.9	8.5	7.6
	11	1.0	>14	13
	12	1.1	>14	13

이 이번에 제작한 홀의 직경이 3.4 μm 이고, 산화구경이 11, 12 μm 의 광 결정 소자는 전체 구동전류 내에서 모두 단일모드를 유지하였다.

단일모드 구간이 6 mA이상이 되는 소자의 온도변화에 따른 스펙트럼 특성을 측정하였다. 그림 6은 -5, 10, 25, 40, 55, 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 3.4 μm 의 11 μm 인 소자의 온도별 스펙트럼을 나타내었다. 일반적인 소자는 10 $^{\circ}\text{C}$ 상승할 때 파장이 장파장 쪽으로 0.6 nm이동한다. 본 연구에서는 15 $^{\circ}\text{C}$ 씩 변화를 시켰기 때문에 이론값으로는 장파장 쪽으로 0.9 nm씩 이동하여야 한다. 소자별로 온도별 평균적으로 0.82 nm에서 0.89 nm의 폭으로 변화를 하였다. 결론적으로 단일모드 광 결정 수직공진 표면발광 레이저는 일반 소자와 동일한 양상의 온도에 따른 스펙트럼 특성을 가지고 있다.

그림 7은 광 결정 소자의 6 mA의 전류 주입시의 동작 전압의 그래프이다. 결과를 보면 광 결정 홀은 소자의 동작전압에 특이한 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 산화구경이 커짐에 따라 전압이 감소하는데 단일모드구간이 넓은 소자의 전압을 보면 실제 회로 구동의 전압인 2 V이하의 전압을

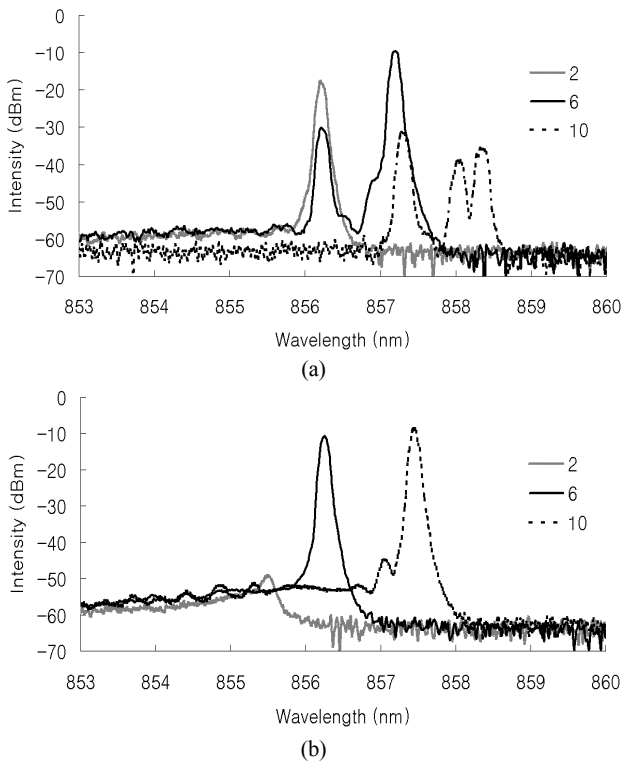


FIG. 4. (a) Lasing spectra of 2.6 μm PC-hole according to injection current. (b) Lasing spectra of 3.4 μm PC-hole according to injection current.

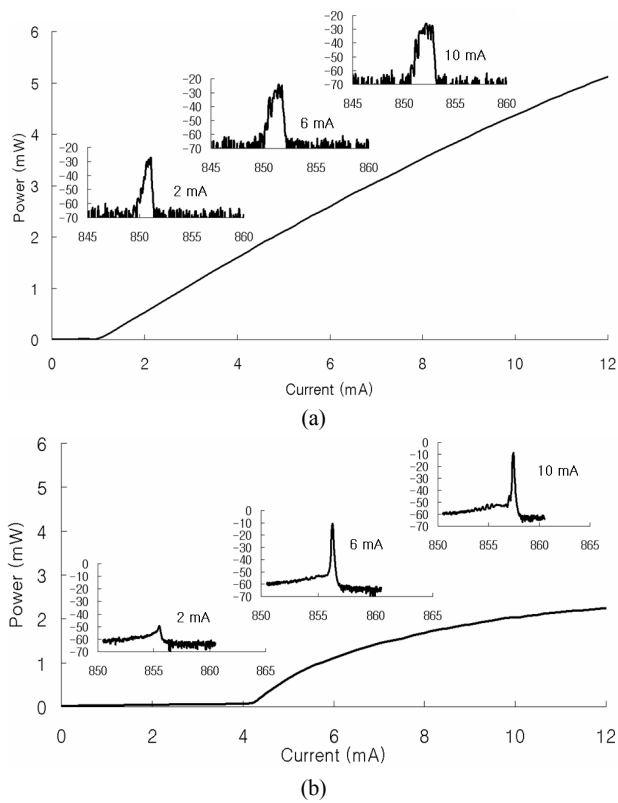


FIG. 5. (a) Optical output power and spectra vs. current(oxide VCSEL). (b) Optical output power and spectra vs. current(PC-VCSEL).

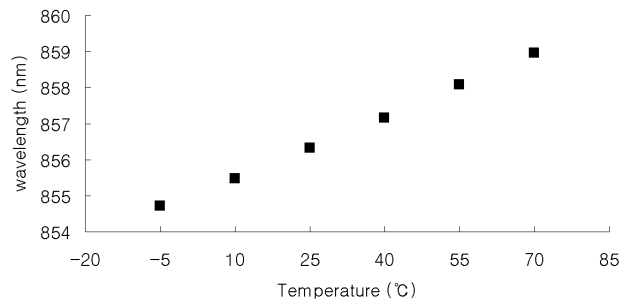


FIG. 6. Temperature dependent output wavelength of 3.4 μm PC-hole with 11 μm oxide aperture PC-VCSEL.

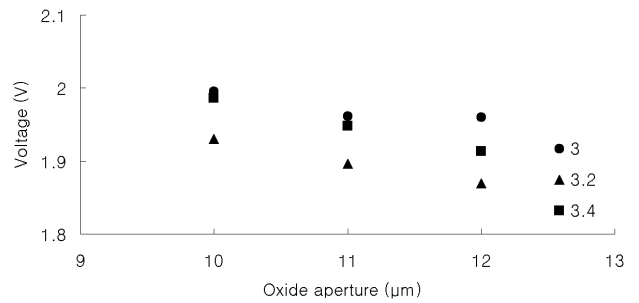


FIG. 7. Operating voltage comparison of PC-VCSELs at 6 mA.

가지고 있어 실제 회로에서 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 기존의 방법인 소자의 산화구경만을 줄여서 단일모드를 구현하게 된다면 높은 저항값 때문에 사용할 수 없지만 본 구조를 채택한 소자는 산화구경을 7 ~ 12 μm 로 높게 유지하고 광 결정 홀로 조절하였기 때문에 낮은 저항값을 가진다. 보통의 단일모드 소자의 경우 60 ~ 100 Ω 의 저항값을 가지는데, 이번에 제작한 소자의 경우 48 ~ 99 Ω 의 저항값을 가진다. 특히 단일모드 구간이 넓은 홀의 직경이 3.2 μm 이상이고, 산화구경이 10 μm 이상인 소자의 경우에는 48 ~ 66 Ω 으로 낮은 저항값을 나타내었다. 산화구경이 커짐에 따라 전압은 낮아지고 따라서 단일모드 구현과 동시에 낮은 저항값을 갖는 소자를 제작할 수 있다. 낮은 저항으로 인해 열에 의한 파손을 지연시키고, 이로 인해 높은 광 출력 단일모드 소자를 달성할 수가 있다.

광 결정 홀과 산화구경이 커지면서 단일모드구간이 길어지게 되고 단일모드가 끝나는 지점의 전류가 높아짐에 따라 최대 출력도 증가한다. 산화구경이 10 μm 이상이고, 홀이 3.0 μm 이상인 경우가 단일모드 구간이 넓은데 이때의 최대 출력을 보면 1.5 ~ 2.4 mW의 출력을 가진다. 최대 출력의 그래프는 그림 8에 나타나 있다.

그림 9는 일반소자와 광 결정 소자의 비교 그래프이다. 광 결정 홀에서의 발진 출력의 회절과 광 산란 손실에 의해 L - I 곡선이 왜곡되고 문턱전류가 증가하며 기율기 효율이 감소하게 된다. 이는 이득 지역에 비해 중간 결점 영역의 면적이 작기 때문에 캐리어가 낭비가 되고 이로 인해 같은 양의 전류 주입에서 광 출력이 감소하게 되는 것이다. 광 결정 구조를 도입하면 문턱 전류가 증가하고 기율기 효율이 낮아지는

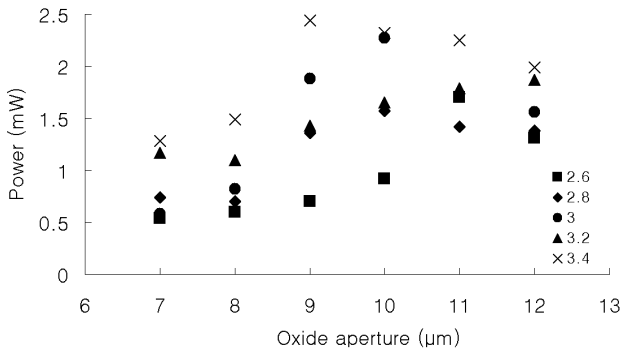


FIG. 8. Peak power comparison according to PC-hole size.

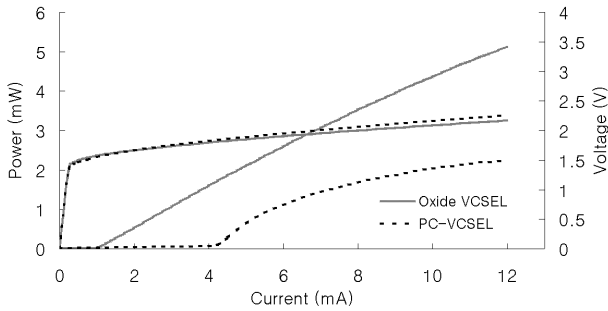


FIG. 9. Voltage and output power vs. current of PC-VCSEL and oxide VCSEL.

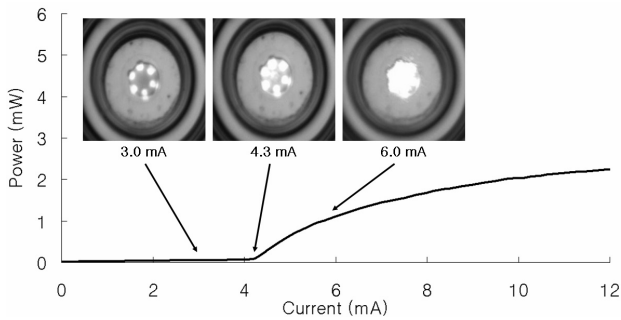
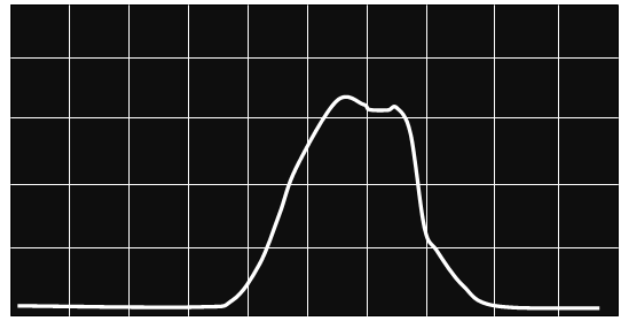


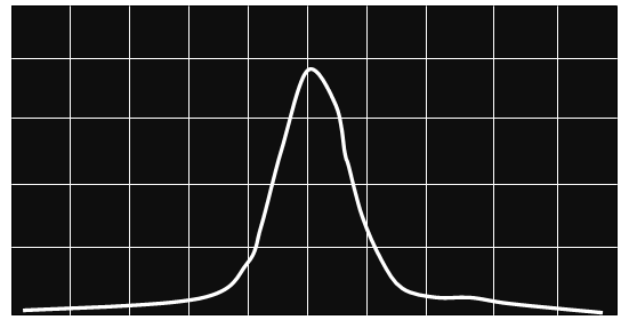
FIG. 10. Near field patterns for 3.4 μm - 11 μm PC-VCSEL.

단점이 있지만 통신용 소자로 사용 가능한 저항이 낮으면서도 단일모드로서는 고효율의 소자를 구현할 수 있다.

광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 전류변화에 따른 near field pattern 및 방사각과 far field pattern의 형태를 알아보았다. 6 mA에서 단일모드인 3.4 μm ~ 11 μm소자의 전류별 near field는 그림 10에 나타내었다. 다중모드는 가운데에서 강한 빛이 발생하기 전에 홀이 먼저 밝게 빛나지 않으며 금속의 구경이 작기 때문에 대부분의 홀이 금속에 가려져 있다. 반면 단일모드의 경우 광 결정 홀이 먼저 밝게 빛나며 산화 구경이 전체적으로 빛난 후에 가운데에서 한 개의 모드가 발진된다. 빛은 가운데 단일 결점 뿐 아니라 6개의 광 결정 홀에서도 나오는데 이는 광 결정 사이로 흐르는 전류는 누설이며 비 발광성 재결합과 자발방출 때문이다. 시각으로 인해 반사경의 주기가 감소하고 반사율이 낮아져 광 결정부



(a)



(b)

FIG. 11. (a) Far field patterns for 2.6 μm PC-hole with 11 μm oxide aperture PC-VCSEL. (b) Far field patterns for 3.4 μm PC-hole with 11 μm oxide aperture PC-VCSEL.

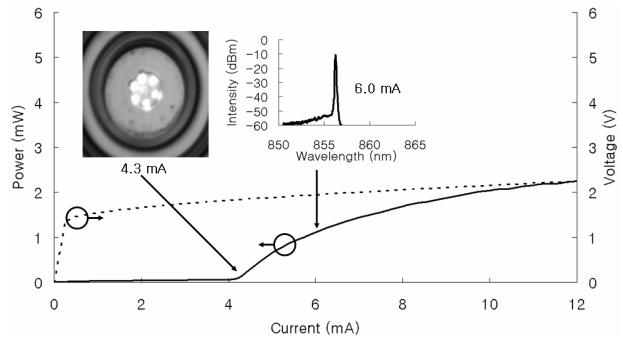


FIG. 12. Optimized L-I-V characteristics, spectrum and near field pattern of 3.4 μm PC-hole with 11 μm oxide aperture PC-VCSEL.

분은 발진 조건에 이르지 못하여 자발 방출을 일으킨다.

광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 단일모드와 다중모드 발진의 far field pattern은 그림 11(a), (b)에 나타나 있다. 패턴의 형태만으로도 다중모드와 단일모드의 구분이 가능하다. 앞의 표 1에 언급된 여러 가지 변수를 가진 소자의 측정 결과에 의하면 실험산화구경이 커짐에 따라 빛의 회절이 감소하게 되어 방사각이 감소하고, 또한 홀의 직경이 커짐에 따라 코어역할을 하는 부분의 면적이 작아져 방사각이 감소함을 확인할 수 있었다. 다중모드의 경우 22°이상의 방사각을 가지고 있지만, 단일모드에서는 대체로 10° ~ 14°의 방사각을 가지고 있다. 방사각을 확인해보면 단일모드구간에서 방사각이 감소하는 것을 알 수 있다. 일반 소자는 전류가 증가

함에 따라 방사각도 증가하지만, 광 결정 소자는 단일모드 발진 후에 단일모드 구간에서는 방사각의 변화가 거의 없다.

제작한 3.2 μm - 11, 12 μm 와 3.4 μm - 10, 11, 12 μm 의 소자에서 넓은 전류구간에서 단일모드 발진이 관찰되었으며, 특히 그림 12의 3.4 μm - 11 μm 의 소자가 중심파장 856 nm 근처에서 13 mA이상의 단일모드구간, 2.25 mW의 최대 출력, 59 Ω 의 저항, 14.22°의 방사각, 14,732 A/cm²의 전류밀도값을 가지며 32 %의 기울기 효율로 가장 우수한 특성을 보임을 알 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 근거리 광 통신 등에 적용 가능한 수직공진 표면발광 레이저의 단일모드 구현을 위해 광 결정을 이용한 소자를 제작하였다. 기존의 광 결정 수직공진 표면발광 레이저의 광 결정 홀의 직경과 산화구경 및 공정 오차 등의 구조 변수를 개선하여 고출력 단일모드 발진을 가능하게 하였다.

다양한 변수의 소자의 발진특성을 확인하기 위하여 광 결정 홀의 폭을 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4 μm 로 변화시켰고, 산화구경의 직경을 7, 8, 9, 10, 11, 12 μm 로 제작하여 측정하였다. 홀과 산화구경이 커질 경우 서로의 상호작용에 의해 단일모드 발진이 용이해짐을 알 수 있었고, 산화구경이 커짐에 따라 최대 출력은 다소 낮아지지만, 저항이 낮아지고, 신뢰성 측정에서도 다른 소자에 비해 우수한 성능을 보였다. 소자 제작 완료 후 광 결정 홀을 식각하면 수분이나 공기 중에 노출이 되어 신뢰성이 취약한 단점이 있지만, 이 역시 습식 산화 공정 후에 식각 공정을 넣음으로써 폴리이미드로 보호를 하여 신뢰성을 개선하였다. 위와 같은 여러 가지 실험 결과를 통하여, 광 결정 홀을 이용한 단일모드 소자는 광 통신 소자로 사용하기 충분한 단일모드 구간과 좁은 방사각, 온도 특성, 고출력, 낮은 저항 등 발광소자의 조건을 만족시킴을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 세종대학교 교내 연구비 지원에 의한 논문임.

References

1. K. Iga, F. Koyama, and S. Kinoshita, "Surface emitting semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 1845-1855 (1988).
2. G. E. Giudice, D. V. Kuksenkov, L. G. de Peralta, and H. Temkin, "Single-mode operation from an external cavity controlled vertical-cavity surface-emitting laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 1545-1547 (1999).
3. H. Martinsson, J. A. Vukusic, M. Grabherr, R. Michalzik, R. Jager, K. J. Ebeling, and A. Larsson, "Transverse mode selection in large-area oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers using a shallow surface relief," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 1536-1538 (1999).
4. K. D. Choquette, K. M. Geib, R. D. Briggs, A. A. Allerman, and J. J. Hindi, "Single transverse mode selectively oxidized vertical cavity lasers," *Proc. SPIE* **3946**, 230-233 (2000).
5. H. J. Unold, S. W. Z. Mahmoud, R. Jager, M. Kicherer, M. C. Riedl, and K. J. Ebeling, "Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 939-941 (2000).
6. E. W. Young, K. D. Choquette, S. L. Chuang, K. M. Geib, A. J. Fischer, and A. A. Allerman, "Single-transverse-mode vertical - cavity lasers under continuous and pulsed operation," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 927-929 (2001).
7. S. Shinada and F. Koyama, "Single high-order transverse mode surface-emitting laser with controlled far-field pattern," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14**, 1641-1643 (2002).
8. J. H. Baek, I. K. Hwang, K. H. Lee, and Y. H. Lee, "Transverse mode control by etching depth tuning in 1120-nm GaInAs/GaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers," *Opt. Exp.* **12**, 859-867 (2004).
9. H. P. D. Yang, I. C. Hsu, F. I. Lai, G. Lin, R. S. Hsiao, N. A. Maleev, S. A. Blokhin, H. C. Kuo, S. C. Wang, and J. Y. Chi, "Single-mode InGaAs submonolayer quantum dot photonic crystal VCSELs," *Semicond. Sci. Technol.* **21**, 1176-1180 (2006).
10. T. Czynszanowski, M. Dems, H. Thienpont, and K. Panajotov, "Modal gain and confinement factors in top-and bottom-emitting photonic-crystal VCSEL," *J. Phys. D : Appl. Phys.* **41**, 085102 (2008).
11. N. Yokouchi, A. J. Danner, and K. D. Choquette, "Etching depth dependence of the effective refractive index in two-dimensional photonic-crystal-patterned vertical-cavity surface-emitting laser structures," *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1344-1346 (2003).
12. D. Berkedal, N. Gregersen, S. Bischoff, M. Madsen, F. Romsted, and J. Oestergaard, "Large-area single-mode photonic bandgap VCSELs," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference* (Georgia World Congress Center Atlanta, GA, USA, Mar. 2003), pp. 83.
13. D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park, C. K. Kim, and Y. H. Lee, "Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3901-3903 (2002).