

논문 2005-42SD-12-4

다중모드 VCSEL의 모드 특성과 동특성 사이의 관계

(Relationship between Transverse-Mode Behavior and Dynamic Characteristics in Multi-Mode VCSELs)

김 봉 석*, 김 상 배**

(Bong-Seok Kim and Sang-Bae Kim)

요 약

모드별 광출력-전류-전압 특성, RIN (relative intensity noise) 스펙트럼, 계단 전류입력에 대한 과도응답의 측정을 통하여 다중 횡모드 VCSEL의 모드 거동과 동특성 사이의 관계에 대하여 살펴보았다. RIN 스펙트럼의 공진 주파수는 모드별 광출력 특성 곡선으로 잘 설명할 수 있었다. 그리고, 활성영역이 넓은 VCSEL은 각각의 횡모드가 문턱전류가 서로 다른 독립적인 레이저로 동작하여 turn-on 지연시간이 달라 다단계 turn-on 특성을 보인다. 고차 모드가 발진하면서 이렇게 펄스의 파형이 찌그러지고 상승시간이 급격히 증가하기 때문에 단일 모드로 동작하도록 전류입력을 조절하지 않으면 고속 광통신용 광원으로서는 적합하지 않게 된다.

Abstract

We have studied the relationship between static mode behavior and dynamic characteristics of multiple transverse-mode VCSELs by measuring the modal L-I and I-V characteristics. Dependence of the resonance frequencies of RIN (relative intensity noise) spectra on the injection current can be understood by modal L-I characteristics and mode-coupling effects. Each transverse mode behaves as an independent diode laser with the different threshold current in large active-area VCSELs, and the multiple-step turn-on is observed when step-current input is applied. This multiple-step turn-on is a result of different turn-on delay times of the transverse modes. Since the multiple-step turn-on increases the rise-time significantly, the wide active-area VCSELs are not suitable for high-speed optical transmitters unless the input current is adjusted for single transverse-mode operation.

Keywords : 광통신, 반도체 레이저, 수직 공진기 레이저

I. 서 론

수직 공진기 레이저(VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser)는 대량 생산의 용이성, 저가격, 높은 온도 안정성 등과 같은 LED의 장점, 그리고 높은 변조속도, 좁은 스펙트럼, 좁은 방사각, 높은 변환 효율, 낮은 동작전류 등과 같은 레이저의 장점을 겸비하여 이상적인 근거리 통신용 광원으로 여겨지고 있다. 이에 따라, 기가 비트 이더넷, 10 기가 비트 이더넷,

VSR (Very Short Reach), 광 배선 등에 다중모드 광섬유와 함께 널리 사용되고 있다. 이렇게 다중모드와 함께 사용되는 VCSEL은 다중모드 광섬유의 모드잡음(modal noise)과 선로에서의 모드 차별적 손실(mode-selective loss)에 의한 penalty를 최소화하기 위하여 다중 모드 VCSEL을 사용한다.^[1] 광원의 모드 수를 늘려 coherency를 줄이는 것이 유리하기 때문이다. VCSEL은 공진기 길이가 짧아 축 방향으로 하나의 모드만이 발진할 수 있기 때문에 다중 모드 VCSEL을 만드는 길은 활성층 넓이를 키워 횡방향으로 여러 모드가 발진하게 하는 것뿐이다. 이 다중 모드 VCSEL에는 문턱전류가 서로 다른 여러 횡모드(transverse mode)들이 발진하기 때문에, 이 모드 거동이 정특성은 물론 동

* 정희원, (주)에스와이하이테크 R&D center (R&D center, SYhitech co.)

** 정희원, 아주대학교 전자공학부 (Department of Electrical Eng., Ajou University)
접수일자: 2005년7월13일, 수정완료일: 2005년11월25일

특성에도 큰 영향을 미칠 것임을 쉽게 짐작할 수 있다. 그리고 이 모드에 따른 특성의 변화는 광통신용 광원으로서의 변조특성에도 큰 영향을 미치게 된다. 이에 따라 모드 거동에 따른 변조특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 공진기 길이가 길고 도파로의 횡방향 넓이가 좁은 edge-emitting 레이저는 축 방향으로는 다중모드로, 횡방향으로는 단일모드로 동작하는 것이 보통이다. 이 다중 모드 edge-emitting 레이저에서는 나타나지 않는 여러 특이한 현상들이 다중 모드 VCSEL에서 나타나는데, 대표적인 몇 가지를 들면 모드별로 다르게 나타나는 turn-on delay,^[2-4] 소신호 변조특성에서의 여러 공진 피크,^[5-7] RIN (relative intensity noise) 스펙트럼에서의 여러 피크^[8,9] 등이다. 이러한 변화들은 각각의 횡모드가 차지하는 공간에 얼마나 많은 전류가 흘러 들어가는지, 각각의 횡모드들의 문턱이득과 손실이 얼마인지, 각각의 횡모드들이 공간적으로 얼마나 중첩되어 있는지, 광자밀도가 공간적으로 불균일하여 유도방출이 강하게 일어나는 곳에서 캐리어가 줄어들고 광이득이 줄어드는 현상인 spatial hole burning이^[2] 일어나는 정도 등에 따라 다른 양상으로 나타난다. 캐리어의 확산 계수가 작고 활성영역이 넓어 모드의 광자분포가 덜 중첩되어 있을 때에는 각 모드들이 별개의 레이저처럼 발진한다. 그 반대의 경우에는 하나의 레이저처럼 동작한다.^[2] 하나의 레이저처럼 동작하는 다중 모드 VCSEL을 빠른 속도로 변조시킬 때에는 각각의 모드들이 순차적으로 발진하거나, 다른 모드의 발진이 먼저 발진한 모드의 광출력을 줄이기 때문에, 변조결과 나타난 광 펄스의 파형은 비교적 온전하게 입력 전류 펄스의 모양을 따른다.^[3] 그러나, 각각의 모드들이 독립적인 개별 레이저로 동작하는 경우에는 입력 전류 펄스의 모양과 출력 광 펄스의 모양은 전혀 다른 모습이 될 수도 있다.

이 연구의 목적은 이렇게 활성영역이 넓어 각각의 횡모드들이 독립적인 레이저로 동작하는 VCSEL에서 모드 특성, RIN 특성, 변조 특성 사이의 상관관계를 명확히 하는 데에 있다. 실험을 통하여 고차 모드가 발진하면서 바이어스 전류의 증가에 따른 공진 주파수의 증가율이 급격히 감소하고, 레이저가 다단계로 발진하여 상승시간이 급격히 증가하는 현상이 나타남을 처음으로 발견하였다. 이 연구결과는 활성영역이 넓어 각각의 횡모드들이 독립적인 레이저로 동작하는 VCSEL을 광통신용 광원으로 사용할 때에 나타나는 문제점들을 해결하는 실마리를 제공한다.

먼저 II 장에서는 L-I-V 및 스펙트럼 특성을 이용한

모드 거동의 분석, 모드 거동과 RIN 스펙트럼 상의 공진 주파수 사이의 관계, 계단과 입력에 대한 응답 등 모드 거동과 동특성 사이의 관계에 대하여 살펴본다. 그리고 이 결과를 토대로 III 장에서 결론을 맺는다.

II. 다중 모드 특성과 동특성 사이의 상관관계

1. 모드 특성

실험에 사용한 레이저는 코어 지름이 62.5 μm , 바깥 지름이 125 μm 인 다중 모드 광섬유가 부착된 p형 금속 aperture 지름이 16 μm 인 임플란트 VCSEL이다. 전류를 집속시키기 위하여 금속 aperture와 중심이 같은 지름 22 μm 의 원형 창 바깥은 임플랜트하여 반절연층으로 만들었으며, 광섬유의 끝은 반사의 영향을 줄이기 위하여 7도 정도 경사지게 하였다. 패키지는 보통의 TO 형태를 사용하였다.

이 레이저는 활성영역이 넓기 때문에 여러 횡모드들이 발진하여 다중 모드로 동작하며, 각각의 모드들은 발진문턱전류와 slope efficiency가 다르다. 물론 유효 굴절률도 다르기 때문에 발진 파장에도 작은 차이가 나타나 발진 스펙트럼을 통하여 횡모드들을 구분할 수 있다. 특히, 이 모드 거동을 L-I-V 특성에서도 관찰할 수 있는데, 모드에 따라 문턱전류와 slope efficiency, 그리고 문턱 캐리어 농도와 접합전압이 다를 것을 이용한다. 그림 1에 VCSEL의 L-I-V 특성과 동저항 dV_F/dI_F , slope efficiency dL/dI (그림에서는 dP_{fiber}/dI_F)를 나타내었다. dL/dI 에 여러 개의 극소점이 나타나는데, 이 점들이 순차적으로 고차 횡모드들이 발진하는 전류

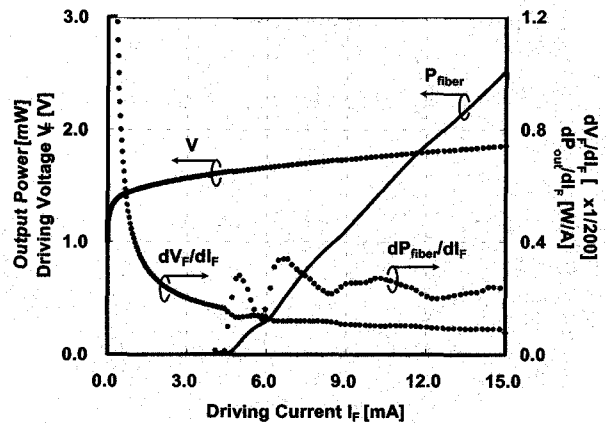


그림 1. 임플란트 VCSEL의 L-I-V 특성과 미분 특성
Fig. 1. L-I-V and their derivative characteristics of the implanted VCSEL.

를 나타낸다. 각각의 횡모드들이 문턱전류와 slope efficiency가 다르기 때문에 각각의 모드들이 발전하면서 서로 다른 dL/dI 값을 갖게 되어 $dP_{fiber}/dI_F - I_F$ 특성에 변화가 나타나는 것이다. 특히, 단일모드로 동작하는 저전류 영역(6mA 이하)에서 dP_{fiber}/dI_F 값이 전류의 증가에 따라 빠르게 감소하는 것이 눈에 띄는데, 이는 spatial hole burning 때문이다. 기본 모드는 중앙 부분에 광자가 몰려있고 전류를 공급하는 전극은 활성영역의 가장자리에 있기 때문에, 활성영역이 넓을수록 중앙부분에는 캐리어의 공급이 원활하게 이루어지지 않는다. 그러므로 기본 모드의 세기가 커져 출력이 증가할수록 활성영역의 중앙부의 캐리어 농도가 낮아지면서 기본 모드의 출력 증가율이 둔화된다. 이렇게 캐리어 농도가 중앙부에서 낮아지고 가장자리에서 증가하면서 가장자리 부분에서 광자밀도가 높은 고차 모드의 발전이 일어나게 된다. 일단 고차모드가 발전하면, 발전한 고차 모드의 광이득이 그 모드의 광손실과 같아지도록 캐리어 농도 분포가 거의 고정되는 현상이 나타난다. 이렇게 캐리어 농도 분포가 고정되면 곧바로 집합전압이 고정되는 현상이 나타난다. 이에 따라 동저항이 급격히 줄어드는 현상이 나타나게 된다.^[10] 그림 1에서 기본 모드가 발전하는 문턱전류와 고차 모드들이 발전하는 dP_{fiber}/dI_F 값의 극소점에서 dV_F/dI_F 값의 급격한 감소가 나타나는 것은 바로 이러한 이유에서이다. 이렇게, 순수하게 전기적인 특성인 동저항의 변화로

부터 모드 변화를 알 수 있다.

그림 2의 구동전류에 따른 발전 스펙트럼의 변화는 이 모드 변화를 보다 더 명확히 보여준다. 5 mA에서는 단일 모드로 동작하다가, 전류가 증가하면서 모드의 수가 점점 많아져 7 mA에서 2 개, 9 mA에서 3 개, 10 mA에서 4 개의 모드가 발전함을 볼 수 있다. 고차 모드일수록 발전 파장이 짧아지는데 이는 고차 모드의 유효 굴절률이 작아 공진기의 유효 길이가 짧아지기 때문이다. 그리고 전류가 커질수록 발전파장이 긴 쪽으로 이동하는 것은 레이저 공진기의 온도가 높아지면서 반도체 층의 굴절률이 커져 공진기의 유효 길이가 길어지기 때문이다. 이러한 모드 변화는 그림 1의 결과와 잘 일치한다. 여기에서 주의할 것은, VCSEL 모듈의 다중 모드 광섬유와 광 스펙트럼 분석기의 단일 모드 광섬유 사이에 모드 차별적인 접속 손실이 있기 때문에, 그림 2의 파장별 광출력이 모드별 광출력과는 차이가 있다는 사실이다.

한편, 보통의 Fabry-Perot 공진기 형태의 edge-emitting 레이저와는 달리 그림 2에 보인 각 모드들의 광출력은 시간에 따라 변하지 않고 거의 일정하게 유지됨을 관찰하였다. 이는 각 모드들의 경쟁에 따라 나타나는 mode partition noise가^[11] 아주 낮은 수준임을 의미한다. 즉, 공간적으로 떨어져 있는 각각의 모드가 상호작용 없이 자기 위치에서 개별적인 레이저로 동작하고 있음을 나타내는 것이다. 다시 말하면, 각각의 모드들이 공간적으로 거의 겹치지 않으며, 주입된 캐리어들이 옆방향으로 이동하여 다른 모드의 영역으로 들어가는 데에 걸리는 시간보다 유도방출에 의하여 재결합하는 데에 걸리는 시간이 짧아 주입된 전류가 각각의 모드에 할당되는 현상이 나타나는 것이다.^[2]

그림 1의 L-I-V 특성과 모드 거동 사이의 관계를 보다 분명히 하기 위하여 그림 3에 모드별 L-I 특성을 보였다. 그림 3에서 5.8 mA, 7.8 mA, 9.8 mA에서 각각 고차 모드가 발전함을 볼 수 있는데, 이는 그림 1의 결과와 완전히 일치한다. 한편, 고차 모드가 발전하고 난 다음에도 더 낮은 전류에서 발전을 시작하였던 저차 모드들의 광출력이 포화되어 더 이상 늘어나지는 않지만 완전히 사라지는 않는 모습을 그림 3에서 확인할 수 있다. 만일 레이저의 두 횡모드가 똑같은 캐리어 창고에서 유도방출에 필요한 캐리어들을 공급받고 있다면 이러한 현상은 일어나지 않는다. 유도방출은 positive feedback 과정이기 때문에 유도방출이 강하게 일어난 모드에 세어지면 그 모드의 유도방출이 강해져 더

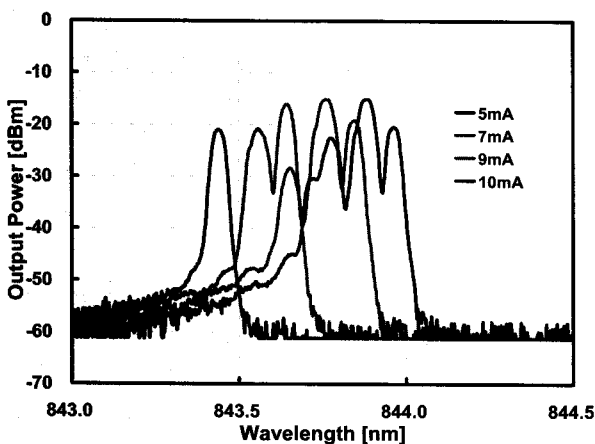


그림 2. 구동전류에 따른 VCSEL의 출력 스펙트럼의 변화. VCSEL 모듈의 다중 모드 광섬유와 광 스펙트럼 분석기의 단일 모드 광섬유 사이의 모드 차별적인 접속 손실 때문에 그림의 파장별 광출력이 모드별 광출력과는 차이가 있다.

Fig. 2. Lasing spectra at four driving currents of 5, 7, 9, and 10 mA.

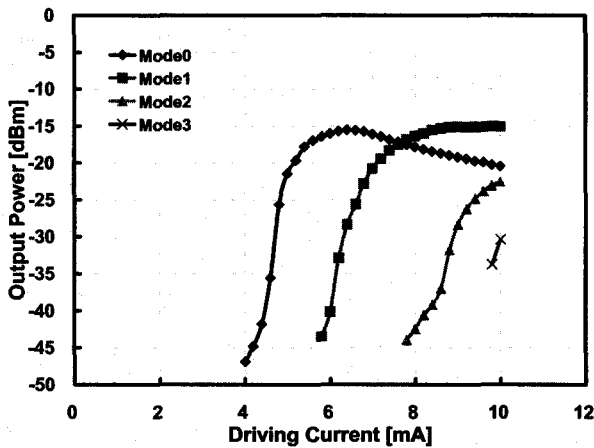
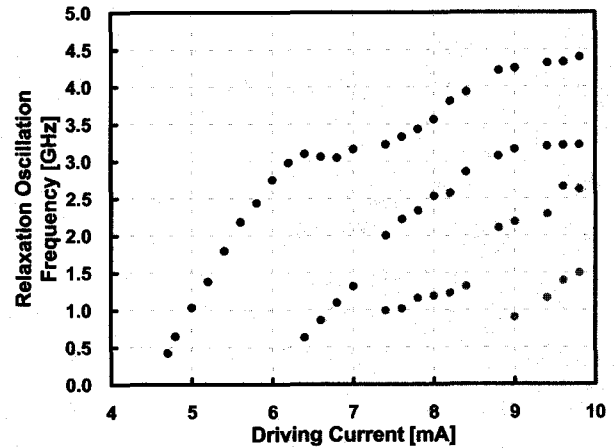


그림 3. 모드별 L-I 특성
Fig. 3. Modal L-I characteristics.

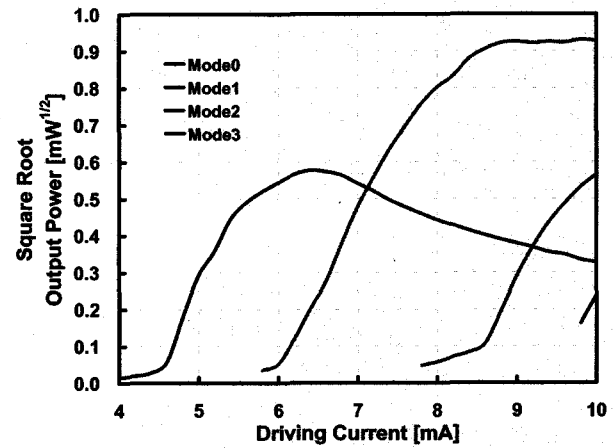
세어지게 되어 캐리어들을 다 가져가려고 하기 때문이다. 이에 따라, 전류가 증가하면서 모드 스위칭이 일어난다. 전류가 증가하면서 spatial hole burning이 일어나면 저차 모드의 출력이 포화되고 고차 모드가 발진하기 시작한 다음에 곧바로 저차 모드의 출력이 거의 0으로 줄고 고차모드만 살아남는 모드 스위칭이 나타나는 것이다.^[4] 그러나 그림 3에서는 이러한 모드 스위칭 현상은 나타나지 않는다. 각각의 모드가 상호작용이 거의 없이 개별적인 레이저로 동작하고 있음을 나타내는 것이다.

2. RIN 스펙트럼 상의 공진 주파수와 모드 특성

레이저에 일정한 직류 전류를 공급할 때 나타나는 주파수에 따른 레이저 출력의 상대적 잡음 분포를 RIN 스펙트럼이라고 한다.^[12] 이 스펙트럼은 직류 전류를 공급한 상태에서 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정되므로 기생 정전용량이나 유도용량의 영향이 들어있지 않다. 이렇게 RIN 스펙트럼으로부터 다이오드 레이저 고유의 특성, 특히 공진 주파수를 알아낼 수 있다. 공진 주파수에서 RIN 스펙트럼이 최대값을 나타내기 때문이다. 특히, 서로 독립적으로 발진하는 여러 횡모드들이 존재하는 VCSEL에서는 각 모드의 공진 주파수를 알아낼 수 있다. 각 모드의 공진 주파수가 RIN 스펙트럼의 극대점들로 나타나기 때문이다.^[8] RIN 스펙트럼의 극대점들이 모두 레이저 발진 모드들의 공진 주파수에 해당하는 것은 아니다.^[8,9] 그렇지만, 이 연구에 사용되는 각각의 횡모드가 독립적인 레이저로 동작하는 VCSEL에서는 RIN 스펙트럼의 극대값들이 횡모드들의 공진 주파수와 대응된다. 특히 다이오드 레이저의 공진 주파수



(a)



(b)

그림 4. (a) RIN 스펙트럼에서 구한 공진 주파수와 (b) 모드별 광출력의 제곱근의 주입 전류에 따른 변화

Fig. 4. (a) Resonance frequency obtained from RIN spectra and (b) the square root of the modal power are plotted against the injection current.

는 출력의 제곱근에 비례하는 특성이 있는데다가 다이오드 레이저의 변조 대역폭을 결정하는 주요 변수이므로, 모드 거동과 변조특성을 관계짓는 좋은 특성변수이다. 그림 4 (a)에 RIN 스펙트럼에서 나타나는 공진 주파수를 VCSEL에 주입되는 직류전류에 따라 나타내었다. 먼저 눈에 띄는 것은 단일 모드로 동작하는 영역에서는 공진 주파수가 전류 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 모습과 이 증가세가 둘째 모드가 발진하는 6.3 mA 부근에서 급격히 줄어드는 모습이다. 공진 주파수가 계속 증가하지 못하고 포화되는 것은 spatial hole burning에 의하여 기본 모드의 광자밀도가 포화되면서 나타나는 현상이다. 광자의 수가 포화됨에 따라 유도방

출 속도도 함께 포화되어 공진 주파수를 결정하는 유효 캐리어 수명이 포화되면서 나타난다. 그리고, 이 spatial hole burning에 의하여 고차 모드가 발진할 수 있는 조건이 만들어지면서 둘째 모드가 발진하게 되는 것이다.

전류의 증가와 함께 기본 모드의 광출력이 포화되는 것과는 달리, 6 mA에서 발진하는 둘째 모드는 광출력과 공진 주파수가 함께 증가하는 양상이 그림 3 (a)에 보인다.

주입전류 7 mA 이상에서는 더욱 복잡한 양상이 나타나는데, 이 양상을 보다 잘 이해하기 위하여 그림 4 (b)에 모드별 광출력의 제공근을 주입전류에 따라 그려 보았다. 전반적으로 공진 주파수와 모드별 광출력의 제공근은 비슷한 양상을 보이며 증가하여 첫째와 둘째 모드는 물론 셋째, 넷째 모드가 발진할 때에도 이에 해당하는 공진 주파수가 함께 증가하는 모습을 보인다. 그러나 모드별 광출력이 교차하는 부분에서는 특이한 현상이 나타난다. 이 특이현상을 가장 잘 볼 수 있는 곳이 첫째 모드와 둘째 모드의 광출력이 교차하는 7 mA 부근이다. 그림 4(b)에서 보듯이 첫째 모드의 광출력은 포화상태를 지나 천천히 감소하고 있고 둘째 모드의 광출력은 계속 증가하고 있고 있어 광출력의 제공근에 해당하는 두 곡선은 서로 교차한다. 그러나, 첫째 모드에 해당하는 공진 주파수는 포화의 기미를 보이다가 다시 증가하기 때문에 공진 주파수의 변화를 나타내는 두 곡선은 서로 교차하지 않는다. 더 재미있는 사실은 7 mA 이상에서는 첫째 공진 주파수가 둘째 모드의 광출력의 제공근을 따라 증가한다는 사실이다. 이렇게 단순히 광자밀도에 따른 유도방출 속도로부터 결정되는 공진 주파수가 서로 교차하게 될 때에는 공진 주파수가 교차하지 않고 갈라지는 현상이 나타난다. 즉 광출력이 교차하는 7 mA를 기준으로 볼 때, 이 보다 낮은 전류에서는 첫째 모드가 광출력과 공진 주파수 모두 높지만, 7 mA보다 높은 전류에서는 첫째 모드의 공진 주파수 곡선이 둘째 모드의 광출력 제공근 곡선을 따라가고, 둘째 모드의 공진 주파수 곡선이 첫째 모드의 광출력 제공근 곡선을 따라간다. 이와 같은 현상은 모드 결합(mode coupling)의 결과로서 광자 분포가 약하게 겹치는 두 모드 사이에 일어남이 이론적으로 밝혀진 바 있다.^[6] 비슷한 현상이 첫째 모드와 셋째 모드의 광출력 제공근 곡선이 교차하는 9 mA 부근에서도 일어날 것이다.

이렇게 그림 4 (a)의 RIN 스펙트럼에서 구한 모드별 공진 주파수의 전류에 따른 변화를 전류에 따른 모드

거동을 통하여 이해할 수 있다. 공진 주파수가 변조 특성을 나타내는 주요 변수임을 생각하면, 변조특성 또한 모드 거동과 밀접하게 관련될 것임을 예견할 수 있다. 다음 절에서 모드 거동과 변조 특성, 공진 주파수 사이의 관계, 특히 둘째 모드가 발진하는 양상에 대하여 기술하기로 한다.

3. VCSEL의 계단응답과 모드 특성

다이오드 레이저에 계단과 전류 입력(step current input)을 가하면 turn-on delay와 relaxation oscillation이 일어난다. turn-on delay는 레이저 활성층의 캐리어 농도가 문턱이득에 해당하는 캐리어 농도에 이르는 데에 걸리는 시간으로 계단과 전류 입력이 클수록, 바이어스 전류가 높을수록 짧아진다. 물론, 바이어스 전류가 문턱전류보다 높으면 이 turn-on delay는 나타나지 않는다. 그리고, relaxation oscillation은 정상상태에 이르는 과도상태 응답으로서 oscillation 주파수는 공진 주파수와 같다. 다중 횡모드 VCSEL에서는 그림 3에서 보았듯이 문턱 전류가 서로 다른 여러 모드들이 발진한다. 그러므로, 계단응답도 복잡한 양상을 보일 것임을 예상할 수 있다. 실제로 모드에 따라 turn-on delay가 달라지는 현상이 관찰되었고, 활성영역의 면적이 좁아 모드의 광자 분포가 많이 겹치는 경우에는 모드 스위칭이, 활성영역의 면적이 넓어 모드의 광자 분포가 덜 겹치는 경우에는 시간차이를 가지고 발진한 여러 횡모드들이 공존하는 현상이 관찰되었다.^[3,4]

그림 5는 바이어스 전류는 문턱전류보다 약간 높은 값인 1.04 I_{th}로 고정시키고 계단과 입력 전류의 진폭을 순차적으로 증가시켜가면서 측정한 다중 모드 VCSEL의 계단 응답을 보여준다. 계단과 입력 전류의 진폭이 작을 때에는 전형적인 relaxation oscillation이 나타나는 다이오드 레이저의 모습이다. 계단과 전류 입력의 진폭을 키우면 공진 주파수가 높아지면서 공진 주기와 상승시간이 동시에 줄어들어, 10%-90% 상승시간이 차례대로 276, 250, 219, 184 ps로 나타난다. 계단과 입력 전류의 진폭이 높아져 정상상태 광출력이 0.4 mW가 되면, 즉 둘째 모드가 발진하게 되면, 상승시간이 오히려 증가한다. 그리고 계단과 입력 전류의 진폭을 더 증가시키면 둘째 모드가 turn-on 되는 모습이 분명하게 나타난다. 이렇게 두 단계로 레이저가 켜지면서 상승시간이 급격하게 증가하여 1429 ps까지 증가한다. 이 둘째 모드는 첫째 모드보다 늦게 켜지며, 켜지는 데에 걸리는 시간과 relaxation oscillation 주기는 계단과 입력 전류

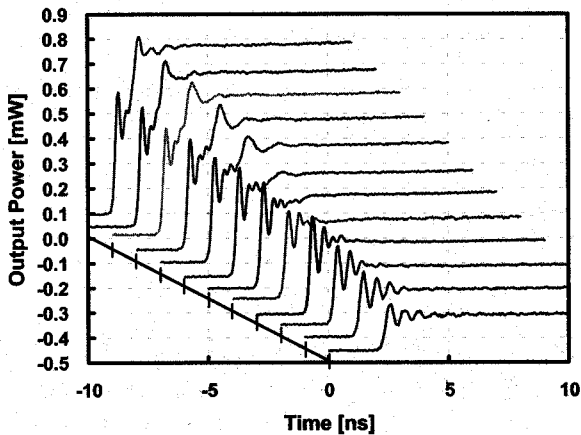


그림 5. 바이어스 전류를 문턱전류보다 약간 높은 값 1.04 Ith로 일정하게 두고 계단파 입력 전류를 순차적으로 증가시켜가면서 측정한 다중 모드 VCSEL의 계단 응답

Fig. 5. Step response of the multi-mode VCSEL for several step current inputs with a fixed bias current and varying amplitudes.

의 진폭이 커질수록 짧아진다. 바이어스 전류가 둘째 모드의 문턱전류보다 낮았기 때문에 계단파 입력 전류의 진폭이 클수록 turn-on delay가 짧아지는 현상이 나타난 것이다. 그리고 입력 전류의 진폭이 증가하면서 둘째 모드의 광출력이 증가함에 따라 relaxation oscillation 주기가 짧아지는 것이다. 이렇게 turn-on delay와 relaxation oscillation 주기가 짧아지면서 10%-90% 상승시간이 1429 ps에서 1207, 1145, 1066, 967 ps로 계속 줄어든다. 둘째 모드가 발진하면서 첫째 모드의 광출력과 공진 주파수는 거의 변하지 않고 일정하게 유지된다. 이는 그림 3에서 첫째 모드의 광출력이 7 mA까지 거의 일정하게 유지되는 모습에서도 확인할 수 있다. 이렇게 두 모드는 서로 독립적인 레이저로 동작한다. 그리고 고차 모드의 turn-on delay는 그 모드가 차지하는 공간에 홀러 들어가는 전류의 크기와 그 모드의 문턱전류에 따라 결정된다.

그림 5의 계단응답에 나타난 relaxation oscillation 주파수가 그림 4(a)의 공진 주파수와 어떻게 관련되는지를 알아보는 것도 흥미 있는 일이다. 비교 결과, RIN 스펙트럼에서 구한 공진 주파수가 계단응답에서 구한 공진 주파수(relaxation oscillation frequency)보다 14% 정도 높다. spatial hole burning을 고려하지 않은 이론적 계산에 따르면 두 공진 주파수는 같아야 함에 비추어, 두 주파수의 차이의 주요 원인은 spatial hole burning으로 보인다. 계단응답과 같은 과도상태에서는

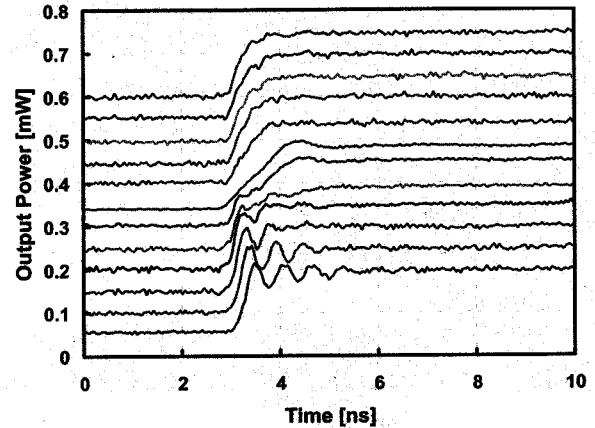


그림 6. 계단파 전류 입력의 진폭을 일정할 때 바이어스 전류 변화에 따른 계단응답

Fig. 6. Step response depending on the bias current when the step current amplitude is kept constant.

캐리어 농도 분포의 hole-burning 현상이 정상상태에서 보다 더 심하게 나타난다. 특히 두 모드가 서로 독립적으로 동작한다는 것은 모드 분포가 거의 겹쳐져 있지 않으며, 캐리어의 확산계수도 작아 한 모드의 레이저 동작이 다른 모드의 레이저 동작을 결정하는 캐리어 분포에 영향을 주지 않음을 의미한다. 그러므로 spatial hole burning이 심하게 나타남을 의미한다. 이렇게 spatial hole burning이 나타나면 과도상태에서의 유효 이득이 줄어드는 현상이 나타날 수 있다. 과도상태인 계단응답에서의 공진 주파수가 정상상태, 즉 직류전류 동작에서 측정한 RIN 스펙트럼에서의 공진 주파수보다 작게 나타나는 것은 이 spatial hole burning 때문인 것으로 보인다.

그림 6은 계단파 전류의 진폭은 0.1 mA로 일정하게 둔 상태에서 바이어스 전류를 바꾸어가면서 측정한 계단응답이다. 바이어스 전류가 낮아 첫 모드만 발진할 때에는 relaxation oscillation 과정을 거쳐 정상상태로 가는 전형적인 모습을 보여주며, 바이어스 전류가 증가하면서 공진 주기도 짧아지고 10%-90% 상승시간도 짧아진다. 그러나 둘째 모드가 발진하면서 상승시간이 길어지고 시간 지연을 가지고 발진하는 모습도 보인다. 그러나 둘째 모드의 relaxation oscillation은 그림 5에서처럼 확연하게 나타나지 않는데, 이는 계단파 전류입력의 진폭이 작기 때문이다. 둘째 모드의 발진으로 상승시간이 급격히 늘어나 298 ps에서 726, 1888 ps까지 증가한다. 이 상승시간은 바이어스 전류가 커지면서 줄어

드는데, 이는 turn-on 지연시간이 줄어들면서 나타나는 현상이다. 둘째 모드의 relaxation oscillation이 확연하게 나타나지 않는 등 그림 5에서 본 2단계 turn-on이 덜 분명하지만, 바이어스 전류를 변화시켜가며 측정된 계단응답에서도 둘째 모드의 지체된 발진에 따른 상승시간의 증가는 그림 5와 같은 양상으로 나타난다.

III. 결 론

다중 횡모드 VCSEL의 모드 거동과 동특성 사이의 관계에 대하여 살펴보았다. 먼저 RIN 스펙트럼의 공진 주파수는 모드별 광출력 특성 곡선과 모드 결합으로 잘 설명할 수 있음을 보였다. 그리고, 이 모드 거동 가운데에서 새로운 횡모드의 발진은 전류-전압 또는 광출력-전류 특성의 미분특성으로부터 쉽게 확인할 수 있다. 변조특성은 활성층 영역의 넓이, 확산계수, 전극 구조, 모드별 문턱전류, 모드별 중첩의 정도 등에 따라 각각의 횡모드는 독립적인 레이저처럼 동작하기도 하고 하나의 레이저처럼 동작하기도 하는 것으로 이해된다. 이 연구에 사용된 활성영역이 넓은 VCSEL은 각각의 횡모드가 문턱전류가 서로 다른 독립적인 레이저로 동작하여 turn-on 지연시간이 다르기 때문에 다단계 turn-on 특성을 보인다. 이에 따라 둘째 모드가 발진하면서 펄스의 파형이 찌그러지고 상승시간이 급격히 증가하여 고속 광통신용 광원으로서 적합하지 않게 된다. 그러므로, 이 다중 횡모드 VCSEL을 고속 광통신용 광원으로 사용하려면 입력전류를 조절하여 단일 모드 영역에서 동작시키거나, 모드별 turn-on 지연시간에 차이가 적도록 소자구조를 설계하거나, 활성영역의 넓이를 줄이거나 활성층에서의 확산계수를 크게 하여 모드 사이의 상호작용을 강하게 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Kuchta and C. J. Mahon, "Mode selective loss penalties in VCSEL optical fiber transmission links," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, no. 2, pp.288-290, Feb. 1994.
- [2] A. Valle, J. Sarma, and K. A. Shore, "Spatial hole-burning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 31, no. 8, pp.1423-1431, Aug. 1995.
- [3] O. Buccafusca, J. L. A. Chilla, J. J. Rocca, S. Feld, and C. Wlmsen, "Transverse mode dynamics in vertical cavity surface emitting lasers excited by fast electrical pulses," *Applied Physics Letters*, vol. 68, no. 5, pp.590-592, Jan. 1996.
- [4] O. Buccafusca, J. L. A. Chilla, J. J. Rocca, P. Brusenbach, and J. Martin-Regalado, "Transient response of vertical-cavity surface-emitting lasers of different active-region diameters," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 35, no. 4, pp.608-615, April 1999.
- [5] Y. Satuby and M. Orenstein, "Small-signal modulation of multitransverse modes vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 6, pp.757-759, June 1998.
- [6] Y. Satuby and M. Orenstein, "Mode-coupling effects on the small-signal modulation of multitransverse-mode vertical-cavity semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 35, no. 6, pp.944-954, June 1999.
- [7] M. S. Torre and H. F. Ranea-Sandoval, "Modulation response of multiple transverse modes in vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 36, no. 1, pp.112-117, Jan. 2000.
- [8] A. Valle and L. Pesquera, "Relative intensity noise of multitransverse-mode vertical cavity surface-emitting lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 4, pp.272-274, April 2001.
- [9] L.-G. Zei, S. Ebers, J.-R. Kropp, and K. Petermann, "Noise performance of multimode VCSELs," *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 19, no. 6, pp.884-892, June 2001.
- [10] 김상배, "레이저 다이오드의 비이상적인 전류-전압 미분특성에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제 28 권 A편, 제 10호, 830-839쪽, 1991년 10월
- [11] J. Y. Law and G. P. Agrawal, "Mode-partition noise in vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 4, pp.437-439, April 1997.
- [12] K. Petermann, *Laser Diode Modulation and Noise*, Kluwer Academic, Ch. 7, 1988.

저자 소개



김 봉 석(정회원)
 2002년 아주대학교 전자공학부
 공학사
 2004년 아주대학교 전자공학부
 공학석사
 2004년 ~ 현재 (주)에스와이하이
 테크 연구원

<주관심분야 : 광통신, 반도체 레이저, 반도체 발
 광/수광 소자>



김 상 배(정회원)
 1981년 아주대학교 전자공학과
 공학사
 1983년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학석사
 1987년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학박사

1987년 ~ 1990년 한국전자통신연구원 선임연구원
 1990년 ~ 현재 아주대학교 전자공학부 교수
 <주관심분야: 반도체 레이저, 반도체 발광/수광
 소자>