

양자선 레이저의 공진기 길이 변화에 따른 시간적 및 공간적 특성

최영철, 김태근
광운대학교

Cavity-Length-Dependent Spectral and Temporal Characteristics of the Quantum Wire Laser

Young-Chul Choi, Tae-Geun Kim
Gwangwoon Univ.

Abstract

In this paper, the cavity-length-dependent spectral and temporal characteristics of a V-groove AlGaAs-GaAs quantum wire (QWR) laser at each subband were investigated. At short cavity lasers less than 300 μm , a discrete wavelength switching from the $n=1$ to the $n=2$ subband occurred due to the increased threshold gain, resulting from the increased cavity loss. Using the characteristic of the wavelength shift from $n=1$ to the $n=2$ subband with shortening the cavity length, ultrafast lasing behaviors under gain switching at the $n=1$ and the $n=2$ subband transition were demonstrated and compared.

Key Words : gain switching, V-groove quantum wire laser, subband energy transition, ultrafast lasing

1. 서 론

초단 광펄스 생성(ultrashort optical pulse generation) 기술은 초고속 광통신 시스템뿐만 아니라 초고속 측정 장치, 광 스위칭 시스템, 광 샘플링 시스템 등에 폭넓게 응용될 수 있기 때문에 짧은 광자 수명(short photon lifetime)과 높은 미분이득(high differential gain)을 갖는 레이저를 사용하여 꾸준히 연구되어 왔다[1]. 초단 광펄스를 생성하기 위한 기술로는 이득 스위칭(gain-switching), Q-스위칭(Q-switching), 모드-록킹(mode-locking) 등 여러 가지 방법이 있으나, 이 중에서 이득 스위칭이 가장 간단한 방법으로 알려져 있고, 특히 미분이득은 이득 스위칭 방법에서 광 펄스폭(optical pulse width)을 결정하는 중요한 파라미터이다.

양자우물(quantum well: QW) 레이저는 높은 미분이득(differential gain)과 큰 광자 밀도(photon density)를 갖기 때문에 초고속 광통신 및 광측정 분야에서 요구되는 초단 광펄스 생성에 폭넓게 응용되어 왔다. 한편, 최근 주목받고 있는 반도체 양자선(quantum wire: QWR), 양자점(quantum dot: QD) 구조는 양자우물 구조와 비교하여 더욱 높은

미분 이득을 갖기 때문에 광자 밀도만 충분하다면 이들 재료를 이용하여 크기, 가격, 집적화 가능성, 속도 등에서 우수한 더욱 짧은 초단 광펄스 생성이 가능할 것으로 예상된다[2]. 그러나 이러한 이론적인 예상에도 불구하고 좋은 특성을 갖는 양자선, 양자점 레이저를 제작하는데 어려움으로 인하여 동적(dynamic) 특성에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 V-자형 알루미늄갈륨비소-갈륨비소(AlGaAs-GaAs) 양자선 레이저의 공진기(cavity) 길이 변화에 따른 서브밴드간의 불연속적인 파장 변화를 유도하였고, 이득 스위칭 방법을 이용하여 각각의 에너지 준위에서의 스펙트럼 특성과 시간에 따른 동적 특성을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 V-자형 AlGaAs-GaAs 양자선 레이저는 유량 변조법(flow-rate modulation epitaxy : FME)에 의해서 제작하였다. 그림 1은 이득 스위칭을 위하여 사용된 양자선 레이저의 개략적인 모습과 측정 셋업(setup)을 보여준다. 각각의

초승달 모양의 양자선은 약 8 nm 두께와 80 nm 폭을 가지고 있는 것으로 측정되었다[3]. 소자는 물질 특성의 균일성(uniformity)을 보장하기 위하여 같은 웨이퍼로부터 제작되었으며, 단지 0.2 nm로부터 1 mm까지 공진기 길이의 변화만을 주었다.

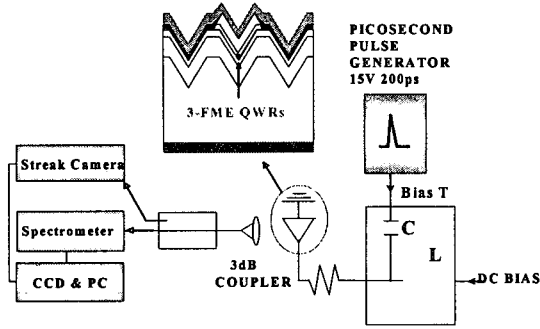


그림 1. 이득 스위칭을 위해 사용된 V-자형 양자선 레이저의 측정 셋업.

Fig. 1. Measurement setup of V-groove QWR laser used for gain switching.

이득 스위칭 하에서 동적 특성 측정을 위하여 레이저는 50 Ω microstrip 선의 끝에 장치(mount)하고 피코초의 상승 시간 = 43 ps, 하강 시간 = 122 ps, 최대 전압 크기 15 V를 갖는 전기적인 펄스 생성기에 의해 펌핑(pumping)되었다. 초단 광펄스 생성을 위한 최적의 상태를 찾기 위하여 350에서 700 ps의 폭과 10에서 15 V의 높이를 갖는 전기적인 펄스는 캐패시턴스(capacitance)와 인덕턴스(inductance)로 구성된 간단한 바이어스(bias)-T 주입 회로를 통하여 직류 바이어스(0~3 V)와 중첩되어 소자에 인가되었다. 이득 스위칭 방식을 이용하여 생성된 초단 광펄스는 주로 구동 전압에 따라 변화하였다. 방출 파장은 초단 시간 중에 생기는 발광 현상을 검출하는 1 kHz의 스캔 주파수, 840 nm에서 5 mA/W의 방사 민감도(radiant sensitivity) 및 타이밍 지터(timing jitter)가 5 ps 이하를 갖는 Hamamatsu C1587 스트릭 카메라와 회절격자(grating) 분석기에 의해 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 펄스 모드에서 생성된 방출 파장의 공진기 길이의 감소에 따른 서브밴드 천이 발진 스펙트럼 이동 모습을 보여준다. 800 μm 의 긴 공진기 길

이를 갖는 레이저의 경우, n=1 서브밴드의 양자화된 첫 번째 전자와 heavy-hole(1e-1hh) 준위 사이의 천이는 837.7 nm에서 방출 파장이 발생하였다. 그러나 220 μm 의 짧은 공진기 길이를 갖는 레이저의 경우, n=2 서브밴드의 양자화된 두 번째 전자와 heavy-hole(2e-2hh) 준위 사이의 천이는 방출 파장이 826.5 nm로 급격하게 변화하였다. n=1로부터 n=2 서브밴드로의 천이 변화를 해석하기 위하여 유효 질량 근사(effective mass approximation)를 이용한 유한 요소법을 사용하여 2차원 슈뢰딩거 파동 방정식을 풀어봄으로써 제작된 레이저 구조에서의 서브밴드 에너지 준위를 계산하였다.

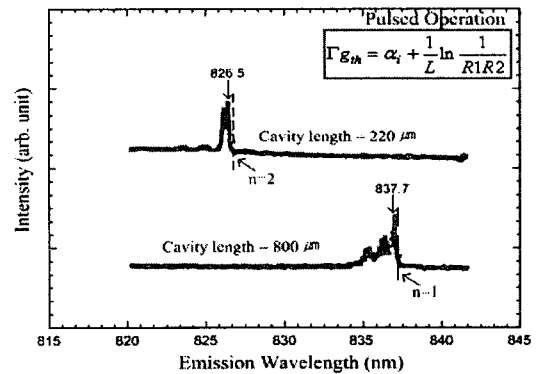


그림 2. 공진기 길이 변화에 따른 서브밴드 천이 발진 스펙트럼 특성.

Fig. 2. Subband transition emission spectra achieved in pulsed mode at different cavity lengths.

측정된 에너지는 각각의 n=1과 n=2 서브밴드 천이로부터 계산된 수치와 적절히 부합할 뿐만 아니라 8 nm 두께의 양자선 구조에서 계산된 n=1과 n=2 준위 사이에 간격 11 nm(~ 19.6 meV)는 PLE(photoluminescence excitation) 스펙트럼의 측정 결과와 정확히 일치하였다.

이러한 결과 발생의 이유는 그림 2에 표기된 문턱 이득 방정식을 통하여 설명된다. 이 방정식은 공진기 길이가 감소함에 따라 공진기 손실이 증가하기 때문에, 문턱 상태에 도달하기 위하여 더 큰 문턱 이득이 필요함을 보여준다. 문턱 이득이 n=1 서브밴드에서 얻을 수 있는 최대 이득을 초과하였을 경우에 자극 방출에 기여하고, 레이징(lasing)은 양자우물 레이저에서와 마찬가지로 n=2 서브밴드 에너지

천이에서 발생한다. 지금까지 연구된 양자우물 레이저에서는 $n=2$ 서브밴드로부터의 레이징이 상태 밀도의 증가와 광이득 포화의 감소 때문에 광펄스 생성과 초고속 변조에 있어서 이점을 갖는다[4]. 이론적으로 양자선 레이저의 경우도 이와 유사한 경향을 보이지만, V-자형 양자선 레이저는 $n=1$ 서브밴드에서 가장 적은 전위 변동(potential fluctuation)을 갖기 때문에 스펙트럼의 이동이 양자 우물 레이저와는 다르게 문턱 전류의 큰 손실이 없이 변조될 수 있고, $n=1$ 서브밴드에서의 레이징이 $n=2$ 서브밴드에서의 레이징보다 더 유리한 준 1차원적 양자 구속 특성이 발견된다. 이것을 뒷받침하기 위하여 서브밴드 천이에서 생성된 피코초(picosecond) 펄스 특성을 비교하였다.

그림 3은 V-자형 양자선 레이저의 연속 발진(continuous wave)과 서로 다른 이득 스위칭 펄핑 조건에서 관찰된 서브밴드 에너지 준위를 보여준다.

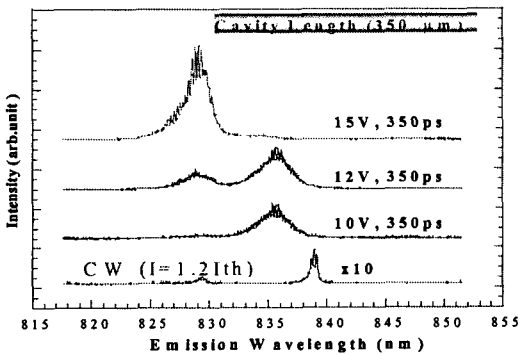


그림 3. V-자형 양자선 레이저의 연속 발진과 다른 이득 스위칭 펄핑 조건에서 관찰된 서브밴드 에너지 준위 특성.

Fig. 3. subband energy state characteristics at different bias levels under continuous wave an gain switching.

연속 발진 조건에서 양자선 레이저는 기저 준위(fundamental state)로부터 발진이 시작되었으나 주입전류($I = 1.2I_{th}$)가 증가함에 따라 높은 서브밴드로부터 또 하나의 발진 스펙트럼이 관찰되었다. 그림 2와 비교하여 다소 장파장 쪽에서 관찰되는 이유는 연속 발진시 발생하는 열(heat) 문제 때문으로 생각된다. 또한 이득 스위칭에 의한 펄핑의 세기가 증가함에 따라, 연속 발진과 마찬가지로 기저 준위로부터 높은 서브밴드 준위로 발진 스펙트럼이 이

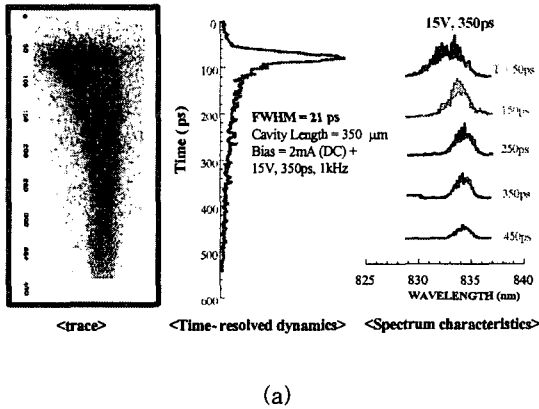
동하였다. 이 때 이득 스위칭에 의해 생성된 스펙트럼의 중심파장은 연속 발진에 비하여 3~4 nm 정도 blue shift하고 있는데 이것은 높은 주입 전류로 인한 밴드 필링(band filling) 현상 때문에 연속 발진보다 짧은 파장 쪽에서 관찰되었다. 이러한 스펙트럼 점프(jump)현상은 그림 2에서 논의한 바와 일치하였다.

시간에 따른 이득 스위칭 특성 변화를 논의하기 위하여 그림 4는 레이저 공진기 길이 변화에 따른 관찰된 광펄스의 반치폭(full-width at half maximum: FWHM)의 변화와 스트릭 카메라의 기록(trace)을 나타내었다. 각각의 $n=2$ 서브밴드(a)와 $n=1$ 서브밴드(b)에서 최단 광펄스가 서로 다른 펄핑 조건에서 관측되었다. $n=1$ 서브밴드에서 관찰된 최단 펄스의 반치폭은 직류 바이어스 2 mA, 크기 15 V, 폭 350 ps 및 반복율 1 KHz를 갖는 전기적인 펄스 상태에서 21 ps였으며, $n=2$ 서브밴드에서 관찰된 최단 펄스의 반치폭은 직류 바이어스의 인가없이 크기 14 V, 폭 350 ps 및 반복율 1 KHz를 갖는 전기적인 펄스 상태에서 29 ps로 관찰되었다. 광펄스의 반치폭은 공진기의 길이가 감소함에 따라 캐리어 수명(carrier lifetime)이 줄어들어 감소하는 경향을 보이지만, 공진기 길이가 약 350 μm 이하가 되면 반치폭이 다시 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 앞서 언급한 공진기 길이의 감소에 따른 $n=1$ 서브밴드로부터 $n=2$ 서브밴드로의 천이 에너지의 이동과 관계가 있을 것으로 생각된다.

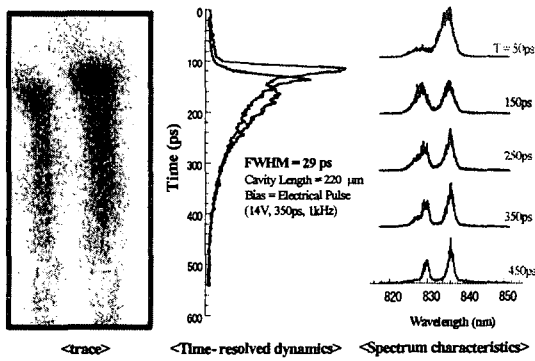
스트릭 카메라의 기록을 살펴보면 공진기 길이가 350 μm 인 경우, 주어진 광펄핑 조건 하에서 반치폭이 21 ps인 하나의 광펄스가 관측되었고 주파수 잡음(frequency chirp)은 5 A 미만이었다.

한가지 특이 사항은 생성된 광펄스가 출력 펄스폭을 넓히는 광의 긴 테일(tail)을 동반하였고, 펄스의 소멸시간은 대략 500 ps이었다. 테일을 제거하기 위하여 직류 바이어스를 인가하고 다른 크기와 폭을 갖는 전기적인 펄스를 적용하였지만 변화는 거의 관찰되지 않았다. 이것은 본 측정에 사용된 레이저가 이득 스위칭을 위해 최적화되어 있지 않아서 R, L, C 등의 전기적인 기생 요소가 크게 존재할 뿐만 아니라 양자선 나노 구조가 갖는 불충분한 모드 이득(modal gain) 때문인 것으로 생각된다. 반면 공진기 길이가 220 μm 인 경우, $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 간에 서로 교번하여 $n=1$ 에서도 레이징이 일어나지만, 순간적으로 스위칭되어 $n=2$ 에서도 레이징이 일어나서 두 파장의 대립(competition)이 일어나는 것이

관찰되었다. 이것은 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 사이에서 생기는 내부 서브밴드 산란(intersubband scattering) 때문일 것으로 생각되고, $n=2$ 서브밴드에서 초단 광펄스 생성동안에 스펙트럼의 이동으로 자극 방출이 감소되기 때문으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 4. 양자선 레이저의 스트릭 카메라 기록 비교.
(a)공진기 길이가 350 μm 인 경우, (b)공진기 길이가 220 μm 인 경우.

Fig 4. Streak camera trace of QWR laser
(a) time-resolved dynamic characteristics,
(b) measured spectral characteristics.

4. 결론

본 논문에서는 공진기 길이 변화에 따른 V-자형 AlGaAs-GaAs 양자선 레이저의 양자화 천이에 대한 스펙트럼과 시간적 스위칭 특성을 조사하였고, 이득 스위칭 방법을 이용하여 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드

에너지 천이에 대한 특성을 비교하였다. 연구 결과, $n=1$ 서브밴드로부터 $n=2$ 서브밴드로의 불연속적 파장 스위칭이 발생하였고, $n=2$ 서브밴드를 이용한 레이징보다 $n=1$ 서브밴드를 이용한 레이징이 초단 광펄스 생성에 있어서 더 유리한 초고속 변조 특성을 실험적으로 보여주었다. 이러한 초고속 레이징 특성은 본 연구에 사용된 V-자형 양자선 레이저의 $n=1$ 서브밴드의 계면 안정성으로 인하여 전위 변동이 적고, 큰 양자효율과 높은 미분이득을 갖기 때문으로 생각된다. 본 연구에서 구할 수 있는 초단 광펄스는 각 서브밴드에서 21과 29 ps 이었고, 높은 집속 효율과 좋은 계면 특성을 갖도록 소자의 결정질(crystal quality) 향상시킨다면 본 논문과는 다른 결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-20002-003-D00185)

참고 문헌

- [1] R. Nagarajan, T. Kamiya, and H. Okamoto, "Observation of ultrashort(=4 ps) gain-switched optical pulses from long wavelength multiple quantum well lasers", Appl. Phys. Lett., Vol. 55, p. 1273, 1989.
- [2] C. S. Son, "Quantum Nanostructure of InGaAs on Submicron Gratings by Constant Growth technique", J. of KIEEME(in Korea), Vol. 14, No. 12, p. 1027, 2001.
- [3] T. G. Kim, X. -L. Wang, K. Komori, K. Hikosaka, and M. Ogura, "AlGaAs/GaAs quantum wire lasers fabricated by flow-rate modulation epitaxy", Electron. Letter., Vol. 35, p. 639, 1999.
- [4] K. Berthod, A. F. J. Levi, S. J. Pearton, R. J. Malik, W. Y. Jan and J. E. Cunningham, "Bias-controlled intersubband wavelength switching in a GaAs/AlGaAs quantum well laser", Appl. Phys. Lett., Vol. 55, p. 1382, 1989.