

이득 스위칭 방법을 이용한 V-자형 양자선 레이저의 초단 광펄스 생성에 관한 연구

A Study on the Ultrashort Optical Pulse Generation of the Gain Switched V-Groove Quantum Wire Laser

최영철*, 김주연**, 김태근*
(Young-Chul Choi*, Joo-Yeon Kim**, and Tae-Geun Kim*)

Abstract

The spectral and temporal characteristics of a V-groove AlGaAs-GaAs quantum wire (QWR) laser were investigated with varying the cavity length. At cavity lengths shorter than 300 μm , a discrete shift in the wavelength occurred from the $n=1$ to the $n=2$ subband due to the increased cavity losses. Utilizing this characteristic, ultrafast lasing characteristics at each subband were investigated by the gain switching method.

Key Words : Gain switching, V-groove QWR laser, Subband transition, Ultrashort optical pulse generation

1. 서론

양자우물(quantum well) 레이저는 높은 미분 이득(differential gain)과 큰 광자 밀도(photon density)를 갖기 때문에 초고속 광통신 및 광측정 분야에서 요구되는 초단 광펄스 생성에 폭넓게 응용되어 왔다[1, 2]. 초단 광펄스 생성 기술은 초고속 광통신 시스템뿐만 아니라 초고속 측정 장치, 광 스위칭 시스템, 광 샘플링 시스템 등에 폭넓게 응용될 수 있기 때문에 꾸준한 연구의 대상이 되어 왔다. 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 있다. 지금까지 이득 스위칭 방법에 의해서 얻

어진 가장 짧은 광펄스는 1.8 ps 이하이며, 다중 양자우물 구조로부터 얻어졌다[3]. 한편, 최근 주목받고 있는 반도체 양자선(quantum wire), 양자점(quantum dot) 구조는 양자우물 구조와 비교하여 매우 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[4].

양자우물 구조는 높은 서브밴드($n=2$ subband) 에너지 천이가 낮은 서브밴드($n=1$ subband) 에너지 천이보다 큰 미분 이득과 작은 비선형 이득 포화(nonlinear gain saturation)를 갖기 때문에 초고속 변조에 있어서 우수한 특성을 갖는다[5]. 양자선 구조의 경우도 이와 유사한 특성을 보일 것으로 예상되지만, V-자형(V-groove) 양자선 구조에서 실험적으로 관찰한 미분 이득은 $n=1$ 서브밴드에서 더 높다. 따라서 $n=1$ 서브밴드를 이용한 광변조 방법이 더욱 효과적인 것으로 생각된다. 이것은 V-자형 양자선 구조에서 캐리어가 초승달 모양(crescent shape)의 형태로써 국부적으로 존재하고, $n=1$ 서브밴드에서 0.3 meV 이하의 Stokes shift를 보일 것

* : 광운대학교 전자재료공학과 반도체나노소자연구실
(서울 노원구 월계동 447-1,
Fax : 02-943-5117,

Corresponding Author : tgkim@daisy.kw.ac.kr)

** : 울산과학기술대학교 전기전자통신학부 반도체응용전공
2003년 5월 9일 접수, 2003년 5월 29일 1차 심사완료,
2003년 6월 24일 최종 심사완료

도로 가장 적은 전위 변동(potential fluctuation)을 갖기 때문이다[6-8].

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

2. 실험

본 연구에 사용된 oxide-isolated stripe V-자형 AlGaAs-GaAs 양자선 레이저는 유량 변조법(flow-rate modulation epitaxy : FME)에 의해 제작하였다. 각각의 양자선은 약 8 nm 두께와 80 nm 폭을 가지고 있는 것으로 측정되었고[9], 물질 특성의 균일성(uniformity)을 보장하기 위하여 같은 웨이퍼로부터 제작되었으며, 단지 0.2 mm로부터 1 mm까지 공진기 길이의 변화만을 주었다. 실험 결과 광출력 대 전류(L-I) 특성은 문턱 전류(threshold current)의 5배까지 킥(kinks) 현상을 보이지 않았고, 근접 전계 패턴(near-field pattern)을 통해 기본적인 도파로 모드(waveguide mode)로 동작함을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 0.2부터 1 mm까지 공진기 길이의 변화를 주면서 측정된 V-자형 AlGaAs-GaAs 양자선 레이저의 문턱 전류[그림 1(a)]와 방출 파장[그림 1(b)]을 보여준다. 그림 1(a)에서 문턱 전류는 공진기 길이 단축에 따라 감소하고, 가장 낮은 문턱 전류 값은 대략 200 μm 의 공진기 길이에서 5.5 mA (pulsed)와 8 mA (cw)를 갖는다. 또한, 그림 1(b)에서는 방출 파장이 공진기 길이의 감소에 따라 더 짧은 파장으로 이동하고, 300 μm 이하의 공진기 길이를 갖는 양자선 레이저에서 불연속적인 파장 스위칭이 발생함을 관찰하였다.

공진기 길이의 변화에 따른 서브밴드 에너지 천이를 살펴보면, 800 μm 의 긴 공진기 길이를 갖는 레이저의 경우, n=1 서브밴드의 양자화된 첫 번째 전자와 heavy-hole(1e-1hh) 준위 사이의 천이는 837.7 nm에서 방출 파장이 발생한다. 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 변화한다. n=1로부터 n=2 서브밴드로의 천이 변화를 해석하기 위하여 유효 질량 근사(effective mass approximation)을 이용한 유한 요소법을 사용하여 2차원 슈뢰딩거 파동 방정식을 풀어봄으로써 제작된 레이저 구조에서의 서브밴드 에너지 준위를 계산하였다[10-11]. 각 천이에서 계산된 에너지 준위(λ_{cal})는 7, 8, 9의 다른 선두계(Lz)를 갖는 실험적인 피크(λ_{peak})에 따라 표 1에 비교하였다.

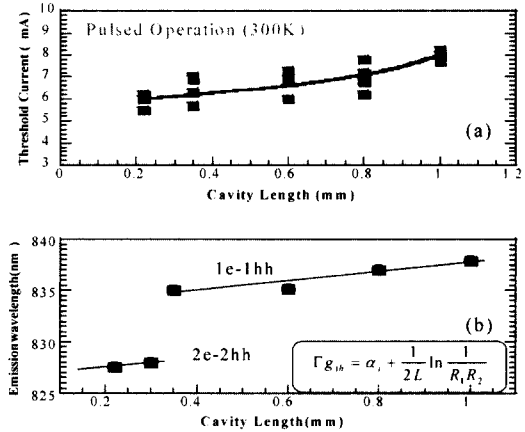


그림 1. 공진기 길이 변화에 따른 측정 (a)문턱 전류, (b)방출 파장.

Fig. 1. (a)Threshold current, (b)emission wavelength measured as a function of cavity length for various devices.

표 1. 8±1 nm의 다른 선두계 Lz를 갖는 계산된 서브밴드 에너지 천이와 실제 QWR 구조에서 실험적으로 관찰된 천이의 비교.

Table 1. Comparison of calculated subband energy transitions for QWR thickness of Lz = 8±1 nm and experimentally observed subband energy transition for the present QWR laser.

Transition	1e-1hh	2e-2hh	Lz(nm)
$\lambda_{\text{cal}}(\text{nm})$	832	820	7
	838	827	8
	843	833	9
$\lambda_{\text{peak}}(\text{nm})$	837.7(pulsed)/839(cw)	826.5(pulsed)/827.5(cw)	

측정된 에너지는 각각의 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 천이로부터 계산된 수치와 적절히 부합할 뿐만 아니라 8 nm 두께의 양자선 구조에서 계산된 $n=1$ 과 $n=2$ 준위 사이에 간격 11 nm(~ 19.6 meV)는 PLE(photoluminescence excitation) 스펙트럼의 측정 결과와 정확히 일치하였다[12].

이러한 결과 발생의 이유는 그림 1에 적용된 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 양자 우물 레이저에서와 마찬가지로 $n=2$ 서브밴드 에너지 천이에서 발생한다[13]. 그러나 V-자형 양자선 레이저는 스펙트럼의 이동이 양자 우물 레이저와는 다르게 문턱 전류의 큰 손실이 없이 변조될 수 있다는 특징을 갖는다.

V-자형 양자선 레이저의 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드에서의 변조 특성에 관하여 살펴보면, 미분 이득과 이득 포화(gain saturation)와 같은 물리적인 특성이 각 서브밴드 천이에서 다르게 나타나기 때문에 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 천이 사이에 동적 특성은 다를 것으로 생각된다. 지금까지 연구된 양자우물 레이저에서는 $n=2$ 서브밴드로부터의 레이징이 상태 밀도의 증가와 광이득 포화의 감소 때문에 광펄스 생성과 초고속 변조에 있어서 이점을 갖는다[5]. 이론적으로 양자선 레이저의 경우도 이와 유사한 경향을 보이지만, 서두에 언급했던 것처럼 V-자형[6] 또는 T-자형[14] 양자선 레이저는 $n=1$ 서브밴드에서 가장 적은 전위 변동(potential fluctuation)을 보인다. 이러한 특성을 이용하여 $n=1$ 서브밴드에서의 레이징이 $n=2$ 서브밴드에서의 레이징보다 더 유리한 준 1차원적 양자 구속 특성이 발견된다. 본 논문에서는 $n=1$ 서브밴드에서 가장 큰 준 1차원적 양자 구속 특성이 관찰되는 한, 현재의 박막 성장 및 리소그라피(lithography) 기술을 사용하여 초고속 레이징 변조 특성을 갖는 양자선 레이저의 제작이 가능함을 보이고 있으며, 이것을 뒷받침하기 위하여 각각 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 천이에서 생성된 피코초(picosecond) 펄스 특성을 비교하였다.

측정을 위하여 레이저는 50 Ω microstrip 선의 끝에 장치(mount)하고 피코초의 전기적인 펄스 생성기(상승 시간 = 43 ps; 하강 시간 = 122 ps; 최대 전압 크기 = 15 V)에 의해 펌핑되었다. 초단 광펄스 생성을 위한 최적의 상태를 찾기 위하여 350에

서 700 ps의 폭과 10에서 15 V의 높이를 갖는 전기적인 펄스는 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 스트리크 카메라(Hamamatsu C1587; 1 kHz의 스캔 주파수 840 nm에서 5 mA/W의 방사 민감도(radiant sensitivity); 타이밍 지터(timing jitter) ≤ 5 ps)와 회절격자(grating) 분석기에 의해 조사하였고, 관찰된 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다.

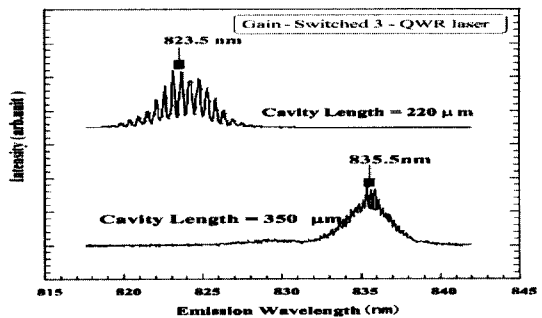


그림 2. 다른 공진기 길이에서 이득 스위칭을 이용하여 생성한 펄스의 스펙트럼 특성.

Fig. 2. Spectral characteristics of gain switched pulses at different cavity lengths.

이득 스위칭 방법에 의한 방출 스펙트럼은 높은 주입 전류로 인한 밴드 필링(band filling) 현상 때문에 연속 발진보다 짧은 파장 쪽에서 나타났고, 전자 농도의 동적 오버슈트(dynamic overshoot)때문에 레이저 공진기의 많은 종축(longitudinal) 모드들을 관찰할 수 있었다.

그림 3은 레이저 공진기 길이 변화에 따른 생성된 광펄스의 반치폭(full-width at half maximum: FWHM)의 변화를 보여준다. 각각의 $n=2$ 서브밴드(a)와 $n=1$ 서브밴드(b)에서 최단 펄스가 서로 다른 펌핑 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 감소

하는 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.

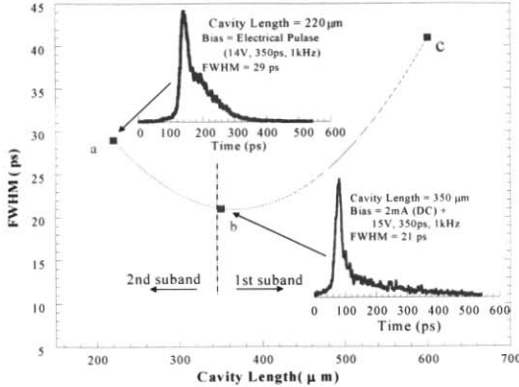


그림 3. 이득 스위칭을 이용한 $n=1$ 과 $n=2$ 서브밴드 천이에서 광펄스의 반치폭 변화.
 Fig. 3. FWHM of gain switched optical pulses for the $n=1$ and $n=2$ subband transitions.

시간에 따른 이득 스위칭 특성 변화를 보다 구체적으로 논의하기 위하여 스트릭 카메라의 기록(trace)을 그림 4에 나타내었다. 스트릭 카메라의 기록을 살펴보면 공진기 길이가 350 μm 인 경우, 주어진 광펌핑 조건 하에서 반치폭이 21 ps인 하나의 광펄스가 관측되었고 주파수 잡음(frequency chirp)은 5 Å미만이였다. 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 파간의 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.

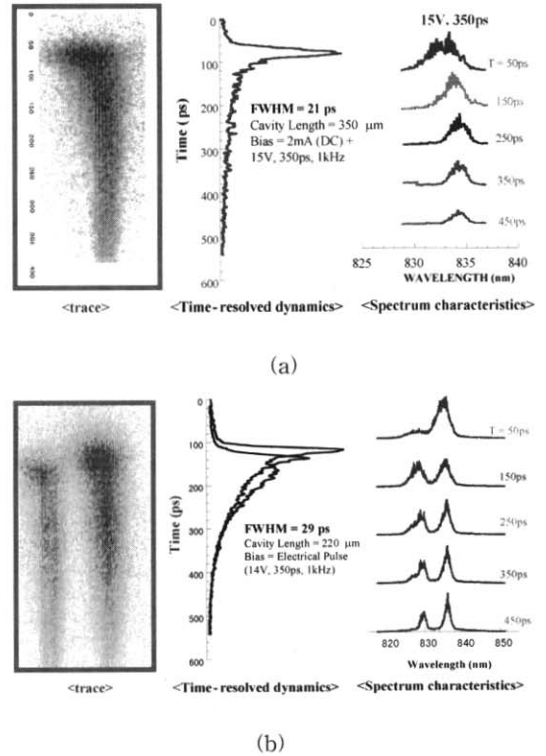


그림 4. 양자선 레이저의 다른 공진기 길이에 따른 스트릭 카메라 기록.(a)350 μm , (b)220 μm .
 Fig. 4. Streak camera trace of QWR laser with cavity lengths. (a)350 μm , (b)220 μm .

결과적으로 본 연구에서 구할 수 있는 초단 광펄스는 각 서브밴드에서 21과 29 ps 이었고, 더 우수한 특성은 소자 최적화에 따른 광펌핑(optical pumping)과 수동(passive) Q-스위칭에 의해 가능할 것으로 예상된다.

양자우물 레이저 경우와는 달리, V-자형 양자선 레이저는 $n=2$ 서브밴드 레이징보다 $n=1$ 서브밴드 레이징이 초단 광펄스 생성에 있어서 더 이점이 있다는 결과는 본 연구에서 얻은 주목할 만한 성과이다. 그러나 단지 이 결과는 8 × 80 nm 면적을 갖는 V-자형 양자선 레이저만이 적용되고, 높은 서브밴드에서 좋은 계면 특성과 높은 집속 효율을 지닌

V-자형 양자선 레이저를 가지고 연구를 진행한다면, 본 논문과는 다른 결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

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=1과 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 초단광펄스 생성에 있어서 더 유리한 초고속 변조 특성을 실험적으로 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-003-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] 강기성, 채대병, 소대화, "광변조기 제작을 위한 양자화산 및 자기정렬 방식에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 6권, 1호, p. 8, 1993.

[3] Y. Arakawa, T. Sogawa, M. Tanaka, and Sakaki, "Picosecond pulse generation(=1.8 ps) in a quantum well laser by a gain switching method", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, p. 1295, 1987.

[4] 심종인, "광통신용 반도체 레이저", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 6호, p. 524, 1998.

[5] W. Elsasser, J. Sacher, F. Hackenbuchner, M. Hofmann, E. O. Gobel, S. Schuster, T. Wicht, H. Haug, H. Jung, and E. Schlosser, "Pico-second pulse generation in a GaAs/GaAlAs single quantum well laser at

the first and second subband transition", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, p. 966, 1992.

- [6] M. Mittelstein, Y. Arakawa, A. Larsson, and A. Yariv, "Second quantized state lasing of a current pumped single quantum well laser", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 49, p. 1689, 1986.
- [7] X. -L. Wang, M. Ogura, H. Matsuhata, and A. Hamoudi, "Large excited state Stokes shift in crescent-shaped AlGaAs-GaAs quantum wires", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 2130, 1997.
- [8] C. S. Son, "Quantum Nanostructure of InGaAs on Submicron Gratings by Constant Growth Technique", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 14, No. 12, p. 1027, 2001.
- [9] 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.
- [10] K. Kojima, K. Mitsunaga, and K. Kyuma, "Calculation of two-dimensional quantum-confined structures using the finite element method", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, p. 882, 1989.
- [11] S. Adachi, "GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$: B: Material parameters for use in research and device applications", *J. Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, R1, 1985.
- [12] T. G. Kim, X. -L. Wang, R. Kaji, and M. Ogura, "First room temperature lasing from the fundamental state of V-grooved quantum wire lasers", *Physica E*, Vol. 7, p. 508, 2000.
- [13] 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.
- [14] G. Goldoni, F. Rossi, and E. Molinari, "Excitonic effects in quantum wires", *Phys. Stat. Sol.*, Vol. 164, p. 265, 1997.