

論文95-32A-1-14

AlGaAs 진행파 반도체 레이저 광증폭기의 모드록킹 (Mode Locking of AlGaAs Semiconductor Laser Traveling Wave Amplifiers)

李昌熹*, 姜承求**, 鄭基雄***, 林時鍾***, 劉泰京***
(Chang-Hee Lee, Seung-Goo Kang, Ki-Wong Jeong, See-Jong Leem and
Tae-Kyung Yoo)

요약

내부에 포화흡수체를 갖고 있는 AlGaAs 진행파 반도체 레이저 광증폭기를 설계 제작하고 이를 혼성형 및 수동형으로 모드록킹한 결과들을 기술하였다. 레이저의 바이어스 전류와 필터의 대역폭, 그리고 모드록킹 주파수가 펄스폭에 미치는 영향을 고찰하였으며, 혼성형 모드록킹으로 파장가변이 가능한 4 ps 광펄스를 생성하였다. 펄스의 반복율과 최대출력은 각각 516 MHz와 170 mW이며, 파장가변폭은 약 10 nm이고, 펄스의 중심 파장은 780 nm이다. 수동모드록킹으로는 2.7 ps의 펄스를 생성하였으며, 펄스의 최대출력은 830 mW이다.

Abstract

We report hybrid and passive mode-locking results of tilted-stripe AlGaAs semiconductor laser traveling wave amplifiers with saturable absorbers. Dependence of the pulse width on the mode locking frequency, the bandwidth of spectral filters, and the bias current of the laser amplifier are investigated. We generate 4 ps optical pulses by using the hybrid mode locking technique. The repetition rate and the peak power of generated pulses are 516 MHz and 170 mW, respectively. The tuning range of our mode locked laser is 10 nm with the center wavelength of 780 nm. We also generate 2.7 ps optical pulses with peak power of 830 mW by using the passive mode locking technique.

* 正會員, 韓國電子通信研究所 光通信 研究室
(Optical Transmissions Section, Electronics
and Telecommunications Research Institute)

** 正會員, 韓國電子通信研究所 半導體實裝 研究室
(Semiconductor Packaging Section, Electronics
and Telecommunications Research Institute)

*** 正會員, 金星中央研究所 基礎 1 室
(Central Research Laboratory, Goldstar)

接受日字: 1994年 3月 2日

I. 서론

반도체 레이저를 이용한 소형 고효율의 극초단 광 펄스를 생성하려는 노력은 초고속 광통신, 광 컴퓨팅, 광전 샘플링 등의 응용을 목적으로 계속되고 있다.^[1] 반도체 레이저를 이용한 극초단 광펄스 생성법에는 이득 혹은 Q 스위칭법과, 자기발진하는 레이저를 이용하는 법, 광전계환을 이용하는 법^[2], 그리고 모드록킹법 등이 있다. 이들에 대해서는 참고문헌 [3,4]에 자세

히 기술되어 있다. 이득 스위칭과 Q-스위칭은 공진기 내의 자연방출(spontaneous emission)이 짧은 시간 동안에 증폭되어 광펄스로 방출되는 과정으로 출력 펄스의 가간섭성이 좋지 않으며(최근에 개발된 distributed feedback laser를 사용하면 가간섭성이 양호한 펄스의 생성이 가능함) 생성 가능한 펄스폭이 공진기의 광자수명에 의해서 결정된다. 또, 펄스의 반복율은 레이저 매질의 전자 수명에 의해서 제한을 받으나, 펄스의 최대출력은 모드록킹으로 생성한 펄스보다 높다.

모드록킹은 공진기의 종모드간의 위상을 일정한 관계를 갖도록 하여 짧은 광펄스를 얻으므로 광펄스의 가간섭성이 좋고 매질의 전자수명보다 짧은 주기의 펄스열을 생성할 수 있으나 펄스의 최대 출력이 낮다. 표 1에 이득 스위칭과 모드록킹에 의해 생성된 펄스의 특징을 종합 비교하였다. 모드록킹법에는 외부에서 변조 신호를 인가하는 능동모드록킹법과 변조신호를 인가하지 않는 수동모드록킹법이 있다. 일반적으로 전자는 안정성이 좋고 지터가 적은 펄스열을 생성하나 펄스폭이 넓고(반도체 레이저의 경우 20 ps 정도) 후자는 펄스열의 안정성은 떨어지나 펄스폭이 좁다(반도체 레이저의 경우 수 ps 정도). 그래서 이들의 장점만을 취합한 혼성형 모드록킹법이 개발되었다.

표 1. 이득 스위칭과 모드록킹의 비교표

Table 1. Comparison of mode locking and gain switching.

Method	Pulse Width	Repetition Rate	Coherence	Peak Power	Jitter
Mode locking	$1/\Delta\nu$	$> 1/\tau_s$	Good	Low	Small
Q Switching	τ_p	$< 1/\tau_s$	Poor	High	Large

- $\Delta\nu$: Gain bandwidth
- τ_p : Photon lifetime
- τ_s : Carrier lifetime

반도체 레이저는 공진기의 길이가 300 μm 정도로 매우 짧으므로 모드 록킹을 위해서는 외부 공진기를 구성하는 것이 보통이다. 능동 모드록킹은 반도체 레이저의 장점인 직접변조 특성을 이용하여 이득을 외부공진기의 왕복시간의 역수에 해당하는 주파수로 변조하여 구현한다. 이 때 펄스 주기는 공진기 왕복시간이다. 만약 변조신호 주파수를 공진기 왕복시간의 역수의 배수가 되도록 하면 펄스의 주기가 공진기 왕복시간보다 짧은 펄스열의 생성도 가능하다. 이러한 경우를 고조파 모드록킹이라 부른다. 외부공진기를 구성하여 반도체 레이저를 모드록킹하는 경우에 반도체 레이저 facet의

반사율이 충분히 적지 않으면 펄스는 단일 펄스가 아니라 공진기의 왕복주기 마다 펄스군이 방출된다. 단일 펄스열을 생성하기 위해서는 반도체 레이저 facet의 반사율이 10^{-4} 이하로 되어야 한다^[5].

수동 및 혼성형 모드록킹을 위해서는 입사광의 세기가 증가하면 흡수율이 감소하는 포화 흡수체가 필요하다. 수동모드록킹 조건을 만족하는 포화흡수체의 흡수 완화시간은 이득의 이득완화시간보다 짧아야 하고 흡수계수가 이득 계수보다 커야한다^[6]. 이러한 조건을 만족하는 포화흡수체를 구현하기 위해서 다전극 구조 반도체 레이저, 반도체 레이저의 거울면을 양성자(proton)으로 매리는 방법들이 제안되었다^[4]. 최근에 반도체 레이저 광증폭기와 다중 양자우물 포화흡수체를 이용한 혼성형 모드록킹으로 5 ps의 광펄스를 생성하고 이를 압축하여 560 fs의 대출력 광펄스 생성한 결과가 보고되었다.^[7] 또, 포화흡수체를 갖는 양자우물 반도체 레이저를 모드록킹하여 ps의 광펄스를 생성한 결과들이 보고되었다.^[8-10]

본 논문에서는 포화흡수체를 함유하고 있는 AlGaAs 반도체 레이저 광증폭기의 제작 결과와 이를 혼성형 및 수동 모드록킹한 결과를 기술하였다. 제 2장에서는 모드록킹을 위해 제작한 진행파형 반도체 레이저 광증폭기에 대해서 기술하였다. 전류를 주입하기 위한 전극을 공진기 거울면(facet)에서 5° 기울이고, 양쪽 거울에 무반사 코팅을 함으로써 거울의 반사율이 10^{-4} 이하인 진행파 광증폭기를 구현하였다. 제 3장에서는 이를 이용한 모드록킹 실험 결과를 혼성형 모드록킹과 수동형 모드록킹의 순서로 기술하였다. 혼성형 모드록킹으로 최대출력인 170mW이고 10nm범위에서 파장가변이 가능한 4 ps 광펄스를 생성하였다. 중심파장은 780nm이다. 수동모드록킹으로는 2.7ps의 펄스를 생성하였으며, 펄스의 최대출력은 830mW이다. 레이저의 바이어스 전류와 필터의 대역폭, 그리고 모드록킹 주파수가 펄스폭에 미치는 영향에 대해서도 기술하였다. 그리고 제 4장에 검토 및 결론을 실었다.

II. 반도체 레이저 진행파 광증폭기

반도체 레이저를 이용한 모드록킹에서 펄스폭을 줄이고, 외부공진기 왕복시간의 역수에 해당하는 반복율의 단일 펄스열을 얻기 위해서는 반도체 레이저 거울에서의 잔류반사율을 최소로 하는 것이 매우 중요하다.^[5] 이를 위해서 양질의 무반사 코팅을 하는 방법^[11]과 전류를 흘려주는 띠가 거울면에서 기울어진 tilted-stripe 반도체 레이저가 개발되었다.^[12] 본 논

문에서의 실험실 사정상 양질의 무반사 코팅이 어려워서 후자를 이용하여 반도체 레이저 광증폭기를 구현하였다. 또, 혼성형 모드록킹 및 수동형 모드록킹을 위하여 광증폭기내에 포화흡수체를 집적화 하였다.

그림 1은 구현한 반도체 레이저 광증폭기의 구조이다. 광증폭기의 구조는 CSP(Channeled Substrated Planner)형이며, 활성층의 두께는 80nm이고 LPE(Liquid Phase Epitaxy) 공법으로 성장하였다. 광증폭기의 길이는 400 μ m이고 중앙에 길이 50 μ m의 전류흐름방지층(current blocking layer)가 있다. 전류흐름방지층은 p-n 접합의 p 영역에 있으며, n 형으로 도핑되어 있기 때문에 반도체 레이저를 순방향으로 바이어스하는 경우 이 영역은 역방향 바이어스가 되어 전류가 흐르지 못한다. 또, 이 영역은 속도가 빠른 포화흡수체로도 동작한다.

측면방향의 전류제한을 위해서 그림 1(b) 처럼 전류를 흘리기 위한 폭 3.5 μ m의 띠를 제외하고는 전류흐름방지층을 넣었다. 또, 이 띠는 광증폭기의 거울면(cleaving 면)과 5° 로 기울어져 있으므로 레이저의 종방향으로 양질의 공진기가 형성되지 않는다. 이는 광증폭기가 레이저로 발진하지 않고 순수한 index guiding 이득매질로 동작하도록 한다(기판에 형성된 채널에 의해서 광증폭기는 weakly index guiding이 된다). 거울에 의한 잔류 반사율을 제거하고 광증폭기의 출력을 높이기 위해 광증폭기의 양쪽 거울에 반사율 10⁻² 정도의 무반사 코팅을 하였다(무반사 코팅을

하지 않으면 광증폭기의 출력의 30%가 감소한다). 제작한 광증폭기의 활성영역은 Al_{0.14}Ga_{0.86}As이며, 레이저로 발진 시킬 때 중심파장이 780nm 근방이다.

그림 2에 측정된 반도체 레이저 광증폭기의 자연방출 스펙트럼을 보였다.

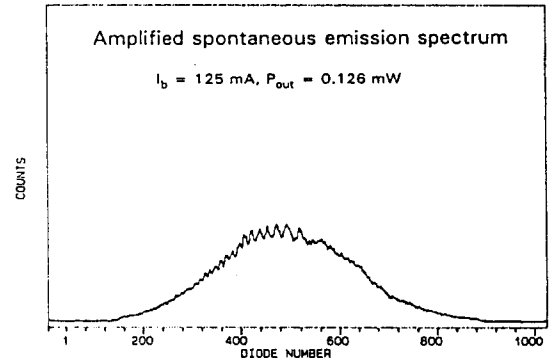


그림 2. 측정된 증폭기의 자연방출 스펙트럼
Fig. 2. Measured spontaneous emission spectrum of the amplifier.

이 때 바이어스 전류는 157 mA 이고 한쪽 거울의 광출력은 0.13 mW 이다. 거울의 잔류 반사율에서 기인하는 스펙트럼상의 굴곡(modulation)이 거의 보이지 않는 것은 진행파 광증폭기라는 것을 의미한다. 측정된 스펙트럼으로부터 산출한 광증폭기의 내부이득은

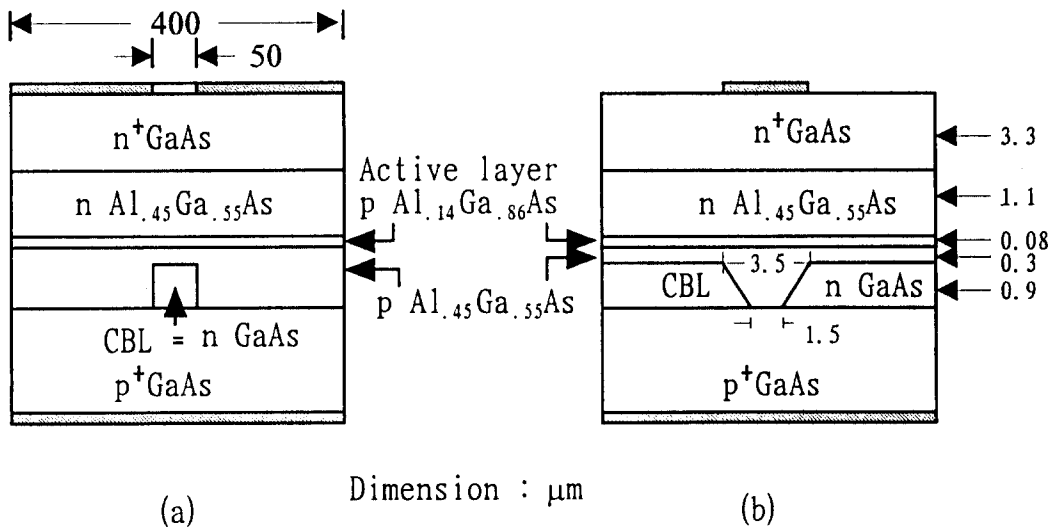


그림 1. 광증폭기의 구조 (a) 종방향의 층 구조, (b) 횡방향의 층 구조
Fig. 1. Structure of semiconductor laser traveling wave amplifier,
(a) layers in longitudinal direction, (b) layers in transverse direction

약 23 dB 이며 거울의 제일 높은 반사율(스펙트럼에서 골목이 가장 큰 지점에서의 반사율)은 10^{-4} 정도이다. 이와같이 순수한 이득매질(거울의 반사율이 10^{-4} 이하)을 구현하는 것은 단일 펄스열을 생성하기 위해서 필연적으로 요구된다.

III. 모드록킹 실험 및 결과

1. 실험장치

앞에서 설명한 바와 같이 혼성형 및 수동형 모드록킹을 위하여 제작한 반도체 레이저 광증폭기 거울의 잔류반사율이 충분히 낮으므로 이를 이용한 모드록킹 실험을 착수하였다.

먼저 양질의 모드록킹을 위해서는 Q(cavity quality factor)가 큰 공진기(광자수명이 긴 공진기)를 구성하여야 한다. 이를 위해서는 광증폭기 출력 빛의 횡모드(transverse mode 혹은 spatial mode pattern)가 중요하므로 양쪽 facet에서 나오는 빛이 방열판에서 반사되어 간섭이 일어나지 않도록 방열판을 설계하였다. 이 방열판을 thermoelectric cooler 위에 붙이고 반도체 레이저의 동작온도를 0.1°C 이하로 안정화 하였다. 모드록킹 실험 장치의 구성도를 그림 3에 나타내었다.

반도체 레이저 광증폭기에는 직류 바이어스 전류와 1 W 정도의 RF 신호를 가한다. RF신호의 주파수는 빛의 외부 공진기 왕복시간의 역수이며, Systron Doner사의 고주파신호발생기(freq. synthesizer)의 출력을 Minicircuit 사의 전력증폭기(power amp.)로 증폭하여 bias-T를 통하여 반도체 레이저 광증폭기에 가한다. 외부공진기는 50%의 반사율을 가지는 거울과 회절격자로 구성되어 있다. 회절격자는 600 l/mm와 1200 l/mm를 사용하여 필터대역폭 변화에 의한 펄스폭의 변화를 고찰하였다. 공진기의 안정도를 향상시키기 위해서 GRIN 렌즈로 반도체 레이저 광증폭기의 한 쪽 출력을 회절격자에 집속하였다. 또, 반도체 레이저 광증폭기의 다른 쪽 출력은 collimating 한 다음 렌즈를 사용하여 출력 거울에 집속하고 출력 거울밖에서 다시 collimating 하였다. 이는 구면거울(spherical mirror)을 사용한 것과 동일하므로 공진기의 Q와 안정도를 높인다.

외부공진기 반도체 레이저의 출력 중에서 2% 는 OMA (optical multichannel analyzer) 가 부착된 회절격자 분광기(monochrometer)에 보내서 레이징 스펙트럼을 측정하고, 나머지 98 %는 다시 반으로 나누어 그 하나는 초고속 광검출기(Antel : 상승시간 25 ps)로 검출하여 샘플링스코프(Tektronix model

Experimental Set-up

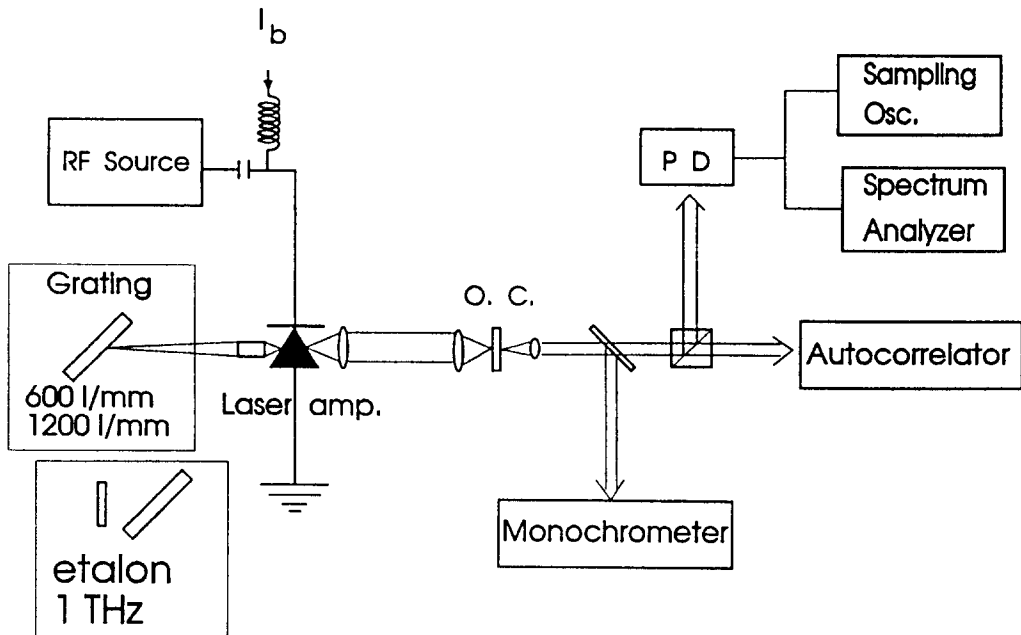


그림 3. 실험장치의 구성도

Fig. 3. Experimental set-up.

CSA 803)를 이용하여 실시간으로 펄스파형 및 펄스 폭을 측정하거나 고주파 주파수 분석기(RF spectrum analyzer)(Tektronix model 256p)로 보내서 펄스 열의 RF 스펙트럼을 측정한다. RF 스펙트럼의 측정은 수동 모드록킹의 여부를 판단하기 위해서 사용한다. 그러나, 이 장치들은 모드록킹으로 생성한 실제의 펄스폭을 측정하기에는 적당치 않으므로 나머지 절반의 광출력을 자기상관기(autocorrelator)(INRAD model LD050)에 보내서 생성한 실제의 펄스폭을 측정하였다.

2. 혼성형 모드록킹

혼성형 모드록킹을 위해 구성한 외부공진기 반도체 레이저의 발진 임계 전류는 105mA 이며, 1 W의 RF를 가하면 발진임계전류는 54mA 로 감소한다. 그림 4에 외부공진기 반도체 레이저의 바이어스 전류에 따른 광출력 곡선 (L - I 곡선)을 나타내었다. L - I 곡선이 발진 임계전류 부근에서 비발진 상태에서 발진 상태로 갑작스럽게 천이되는 것은 레이저가 포화흡수체를 포함하고 있다는 것을 의미한다. 모드록킹은 먼저 RF 주파수를 변화시키면서 샘플링 스크로프상에서 최대출력을 갖는 주파수를 찾고 이를 중심으로 하여 변조 주파수를 변화시키면서 펄스폭의 변화를 자기상관기(autocorrelator)로 관측하였다.

RF 신호의 레벨과 바이어스 전류를 조정하면서 반복실험하여 최소펄스폭을 찾아내고 이들 변수의 변화가 펄스폭에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 5에는 바이어스 전류가 60mA이고 1200 l/mm의 회절격자를 사용하였을 때의 모드록킹 주파수의 변화에 대한 펄스폭의 변화 및 평균출력의 변화를

나타낸 것이다(모드록킹 임계전류 57 mA). 이 때 발진 파장은 이득이 최대인 파장 (발진 임계전류가 최소인 파장) 에서 4 nm 짧은 파장쪽이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모드록킹 주파수를 낮은 주파수에서 높은 주파수쪽으로 증가시키면 처음에는 평균출력이 천천히 증가하고 펄스폭도 천천히 감소한다. 그러다가 변조주파수가 특정한 주파수에 이르면 평균출력과 펄스폭이 급격히 감소한다(이 때 펄스의 발진선폭은 급격히 증가한다.). 펄스폭은 평균출력이 감소하여 떨어지는 우물모양의 최소점에서 최소화이다. 이 점을 지나서 모드록킹 주파수를 더 증가시키면 평균출력과 펄스폭이 약간 증가한다. 본 실험에서는 관측한 결과는 일반적으로 알려진 평균출력이 최대인 점에서 펄스폭이 최소라는 것과 상이하다. 이의 기작에 대해서는 현재 연구중이다. 한가지 첨부하고 싶은 것은 평균 출력이 최대인 점에서 펄스폭이 최소가 아니라는 것은 다른 사람들에 의해서도 보고된 바 있다.^[13]

본 실험에서 또 한가지 특이한 점은 모드록킹이 잘 되는 모드록킹 주파수 영역은 약 0.02 MHz(변조주파수의 $4 * 10^{-5}$)로 매우 좁다는 것이다. 참고로 능동 모드록킹의 경우는 모드록킹 영역이 변조주파수의 10^{-3} 정도이다. 혼성형 모드록킹으로 최소 펄스폭은 6 ps의 자기상관(autocorrelation) 폭(펄스 최대치값의 절반이 되는 폭)을 갖는다. 이는 펄스를 sech² 라 가정하면 4 ps의 펄스이다. 이 때 펄스의 반복율은 516 MHz이고, 펄스의 최대출력은 170 mW이다. 그림 6에 측정된 자기상관곡선을 나타내었다. 이 때 발진 스펙트럼의 폭은 1.6nm로 펄스가 푸리에 변환에 의해 제한되는 펄스(Fourier transform limited pulse)

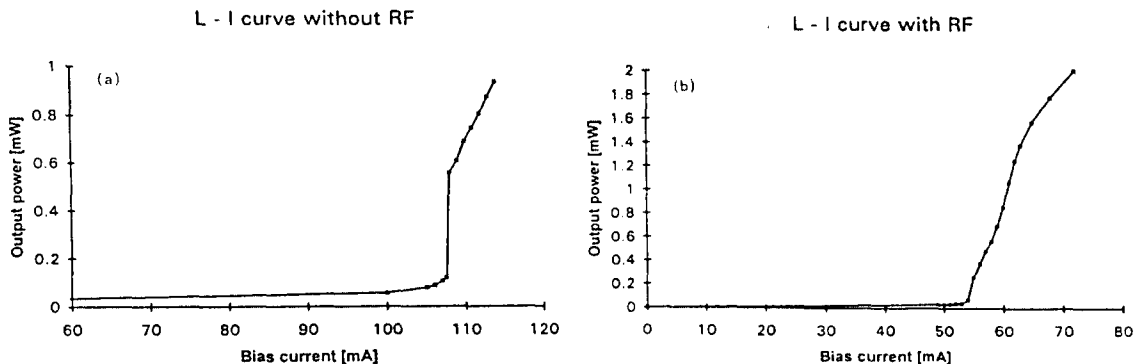


그림 4. 측정한 외부공진기 레이저의 L-I 곡선. (a) RF 신호를 인가하지 않은 경우, (b) RF 신호를 인가한 경우

Fig. 4. Measured L-I curve of the external cavity laser. (a) without RF signal and (b) with RF signal

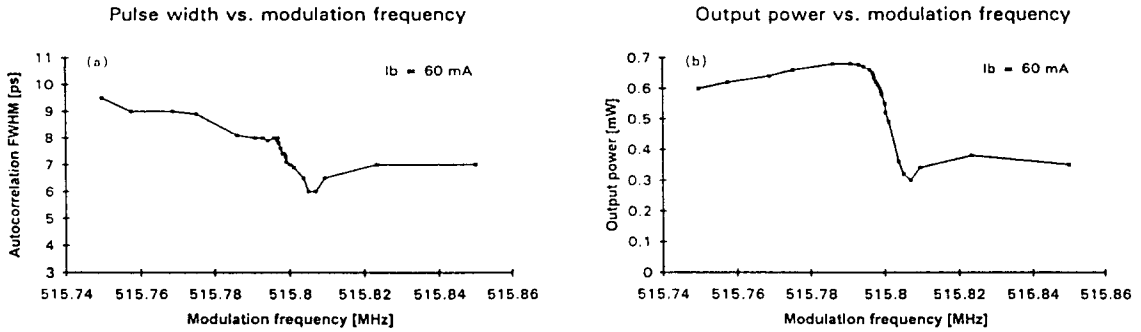


그림 5. 모드록킹 주파수의 변화에 따른 (a) 펄스폭 및 (b) 평균출력의 변화
 Fig. 5. (a) Pulse width and (b) average power as a function of mode-locking frequency.

가 아니고 펄스에 처핑(chirping)이 있다는 것을 의미한다(time bandwidth product $\Delta t \cdot \Delta f = 3.1$). 그러므로 이를 회절격자쌍 펄스압축기로 압축하면 ps 이하의 펄스 생성이 가능할 것이다.^[7]

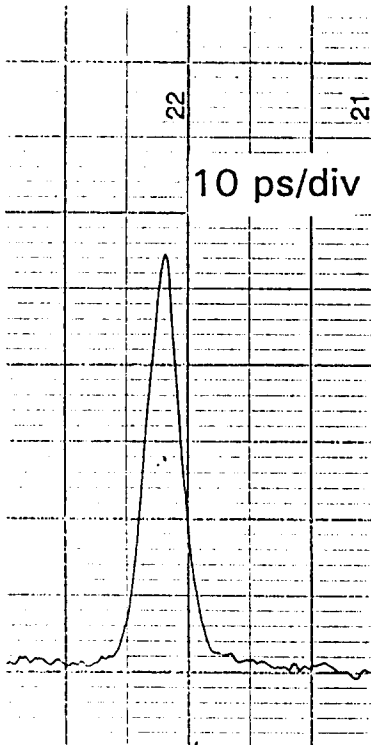


그림 6. 측정된 혼성형 모드록킹된 펄스의 auto-correlation 곡선
 Fig. 6. Measured autocorrelation curve of the hybrid mode-locked pulses.

발전파장을 변화하면서 최소 펄스폭과 그 점에서 모드록킹 주파수의 변화(최적 모드록킹 주파수)를 보면 이득이 최대인 파장(발전파장만을 변화시킬 때 평균출력이 최대인 파장)에서 짧은 파장으로 이동시키면 최소 자기상관폭은 6 ps로 일정하지만 최적 모드록킹 주파수는 감소하였다. 이득이 최대인 파장에서의 최적 모드록킹 주파수는 515.9885MHz이나, 4nm 단파장쪽으로 모드록킹 파장을 변화시키면 최적 모드록킹 주파수는 515.8052MHz로 낮아졌다. 반면에 이득이 최대가 되는 파장에서 긴 파장쪽으로 이동시키면 최소 펄스폭은 증가하고 최적 모드록킹 주파수는 감소하였다. 모드록킹 파장을 6nm 장파장쪽으로 이동시키면 최소 자기상관폭은 7ps로 증가하고, 최적 모드록킹 주파수는 515.6108MHz로 감소하였다. 발전파장의 변화에 따른 최적 모드록킹 주파수의 변화는 반도체 레이저 광증폭기의 분산곡선(dispersion특성)^[14] 및 발전파장변화에 의한 공진기의 길이 변화로 설명할 수 있다. 그리고, 생성한 최소 펄스폭의 변화는 반도체 레이저의 발전선폭증대상수(linewidth enhancement factor)가 발전 파장에 따라 달라서 펄스에 처핑이 생기는 정도가 달라지기 때문이라고 생각된다(반도체 레이저의 발전선폭 증대상수는 밴드 갭에서 가장 크고 파장이 감소하면 감소한다).

필터의 대역폭이 모드록킹 펄스폭에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 1200 1/mm의 회절격자에 광증폭기의 출력을 집속시키지 않고 collimating된 빛을 보내서 필터의 대역폭이 감소하였을 때의 영향을 고찰하였다. 이 경우 모드록킹된 펄스의 발전선폭은 감소하였으며 (1nm) 최소 자기상관폭(auto-correlation) 폭은 7 ps로 증가하였다(time bandwidth product $\Delta t \cdot \Delta f =$

2.3). 필터의 대역폭이 증가했을 때의 펄스폭의 변화를 고찰하기 위해서 회절격자를 600l/mm로 교체하였다. 그 결과 모드록킹된 펄스의 발진선폭은 2nm로 증가하였으나, 최소 자기상관폭(auto correlation의 FWHM)이 7.2ps로 오히려 증가하였다(time bandwidth product $\Delta t \Delta f = 4.7$). 표 2에 실험결과를 정리하였다. 이상의 실험결과로 반도체 레이저의 혼성형 모드록킹에서는 필터의 대역폭이 증가할수록 펄스폭이 감소하는 것이 아니라 최적의 필터폭이 존재한다는 것을 알 수 있다. 필터의 대역폭이 넓어 질 때 펄스폭이 감소하지 않고 오히려 증가하는 것은 자연방출에 의한 잡음과 펄스의 처평이 필터의 대역폭과 함께 증가하여 모드록킹을 방해하기 때문으로 생각된다.

표 2. 여러가지 필터 대역폭에서의 펄스폭 및 펄스폭과 발진선폭의 곱

Table 2. Pulse width and time bandwidth product at different spectral bandwidth of filters.

Filter	Pulse width	$\Delta t \Delta f$
600 I/mm(focusing)	4.8 ps	4.7
1200 I/mm (focusing)	4.0 ps	3.1
1200 I/mm (collimating)	4.7 ps	2.3
1 THz etalon	2.7 ps	0.66

바이어스 전류가 펄스폭에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 RF 레벨과 모드록킹 주파수를 고정하고 바이어스 전류의 변화에 따른 펄스폭의 변화를 고찰하였다. 바이어스 전류가 모드록킹 임계치에서 증가하면 펄스폭은 서서히 감소하다가 다시 증가한다. 바이어스 전류가 어느 값 이상이 되면 자기상관곡선에 새로운 피크가 나타나기 시작한다. 이는 기생펄스(satellite 펄스)로서 바이어스 전류가 증가하여 기생 펄스가 충분한 이득을 얻어서 발진하게 되는 것이다. 이러한 사실은 능동 모드록킹에서 잘 알려진 사실이다. 모드록킹에서는 바이어스 전류를 더 증가하면 펄스폭이 증가하면서 자기상관곡선에 coherence spike가 보이기 시작한다. 이는 모드록킹이 잘 되지 않았다는 것을 나타낸다.

다음에는 바이어스 전류와 변조주파수를 고정하고 RF 레벨을 변화하면서 펄스폭의 변화를 관찰 하였다. RF 레벨이 매우 약할 때 모드록킹을 보기 위해서 바이어스 전류를 RF 'OFF'시에 수동 모드록킹이되는 110 mA로 고정하고 모드록킹 실험을 하였다. 이 때

펄스폭은 RF 레벨이 낮을 때는 수동모드록킹의 경우와 같으나, RF 레벨이 증가하면 서서히 증가한다. 이는 앞의 바이어스 전류가 증가하면 모드록킹 펄스폭이 증가하는 것과 같이 설명할 수 있다.

참고로 RF 신호를 제거하고 수동 모드록킹으로 생성한 최소 펄스폭이 혼성형 모드록킹으로 얻은 최소 펄스폭과 동일하였다는 것을 밝힌다.

3. 수동모드록킹

수동모드록킹을 위해서 외부 공진기를 구성하는 회절격자를 반사율이 100 %인 거울로 바꾸고 모드록킹용 필터로는 대역폭 1 THz인 etalon를 사용하였다. 또, 펄스폭을 줄이기 위해 반도체 레이저 광증폭기도 흡수포화체의 양이 더 많은 것으로 교체하였다. 수동 모드록킹이 되는 영역을 찾기 위해서 레이저의 바이어스 전류를 변화하면서 RF 스펙트럼을 측정한다. RF 스펙트럼상에 공진기 왕복주기의 역수에 해당하는 주파수와 이의 고조파에서 피크가 보이던 이를 수동모드록킹이 된 것으로 간주하고 자기상관기를 이용하여 펄스폭을 측정한다.

일단 펄스폭을 측정할 수 있으면 공진기의 정렬상태, 레이저의 바이어스 전류, 발진 파장 등을 조정하면서 펄스폭을 최소화하였다. 이렇게 하여 레이저의 바이어스 전류가 173 mA일 때, 자기상관곡선의 최소 펄스폭 4ps를 얻었다. 이는 $sech^2$ 펄스라고 가정하면 펄스폭은 2.7 ps이다. 그림 7에 측정된 자기상관곡선을 보았다. 이 때 외부공진기 반도체 레이저의 발진임계전류는 171mA이고, 바이어스전류가 173mA에서 195mA까지 변화하여도 펄스폭은 변화하지 않았다(바이어스 전류가 195mA 이상이 되면 기생펄스(satellite pulse)가 보이기 시작한다.). 펄스의 평균출력은 바이어스 전류의 증가와 함께 증가하였으며, 펄스 스펙트럼의 폭은 바이어스 전류에 거의 무관하게 0.5nm를 유지하였다(time bandwidth product $\Delta t \Delta f = 0.66$). 최대 평균 출력은 레이저의 바이어스 전류가 195mA일 때 1.2mW이었다. 이 때 펄스의 반복율이 536 MHz이므로 펄스의 최대출력은 830 mW이다.

공진기내의 필터인 etalon을 제거하고 수동 모드록킹을 한 결과 유사한 펄스폭을 얻었으나, 펄스 스펙트럼의 폭은 4nm 정도로 증가하였다(time bandwidth product $\Delta t \Delta f = 5.2$). 또, etalon 대신 회절격자를 사용하며는 기생펄스 없이 모드록킹이 가능한 영역이 급격히 감소한다. 이 결과로부터 수동모드록킹의 경우도 처평이 적고 폭이 좁은 펄스를 얻기 위해서는 최적의 필터 대역폭이 존재 한다는 것을 알 수 있다.

공진기를 앞에서의 혼성형 모드록킹에서처럼 회절격

자를 사용하고 마찬가지로 혼성형 모드록킹을 하여 앞 절의 경우와 유사한 모드록킹 주파수에 대한 펄스폭의 변화곡선을 얻었다.

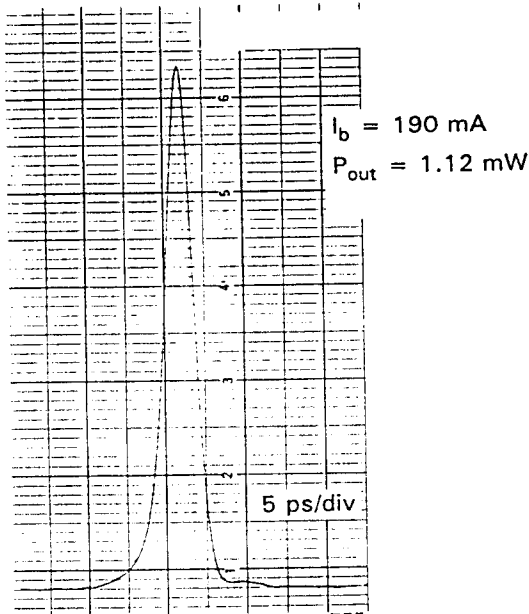


그림 7. 측정된 수동 모드록킹된 펄스의 auto-correlation 곡선
 Fig. 7. Measured autocorrelation curve of the passively mode-locked pulses.

IV. 검토 및 결론

반도체 레이저로 극초단 광펄스를 생성하기 위하여 먼저 반도체 레이저 광증폭기를 제작하였다. 제작한 반도체 레이저 광증폭기는 거울의 잔류반사율이 10^{-4} 이하로 진행파 광증폭기 특성을 보였다. 이를 이용하여 혼성형 및 수동형 모드록킹하였을 때 펄스는 외부공진기 왕복시간의 역수에 해당하는 반복율을 갖는 매우 안정된 펄스열이었다. 혼성형 및 수동모드록킹을 할 수 있었던 것은 반도체 레이저 광증폭기의 중앙에 있는 전류흐름 방지층에 의한 포화흡수체 때문이다. 그러나 아직 확실치 않은 것은 포화흡수체의 흡수 완화시간이 수동모드록킹의 조건을 만족할 수 있을 만큼 빠르다는 점이다. 이는 포화흡수체에서 흡수에 의해서 생성된 전자 양쪽의 이득 영역으로 확산되므로 포화흡수체의 완화 시간이 감소한 것으로 추정된다. 또, 전류흐름방지층은 역방향 바이어스되어 있기 때문에 이영역의 일

부가 매우 빠른 포화흡수체로 작용할 수 있다.

혼성형 모드록킹 주파수에 대한 펄스폭 변화를 나타내는 곡선(detuning 곡선)에서 평균출력이 최대인 점에서 펄스폭이 최소가 아니고 평균출력이 최대에서 감소하는 곳에서 펄스폭이 최소로 나타나는 기작에 관해서 알아보자. 이의 기작은 다음과 같은 3 가지 원인에서 기인하는 것으로 추정하고 있다. 먼저 능동모드록킹에서처럼 모드록킹 주파수의 detuning에 의한 효과이다. 반도체 레이저는 이득 완화시간이 펄스의 반복율과 비슷하고, 이득이 매우 크므로 펄스가 증폭될 때 이득이 많이 감소되면서 펄스의 상승부분은 크게 증폭되고 하강부분은 증폭이 적게 된다. 그 결과 모드록킹 주파수를 높은 쪽으로 detuning 하면 펄스폭이 좁아지면서 동시에 펄스의 평균출력이 감소하는 영역이 생긴다. 이에 대해서는 다음 기회에 자세히 기술할 것이다.

또, 수동모드록킹시의 레이저의 평균출력 및 펄스폭이 detuning 곡선에서 펄스폭이 최소일 때의 평균출력 및 펄스폭과 유사한다는 점으로부터 다음과 같은 유추할 수 있다. 즉 레이저의 평균출력이 큰 경우는 흡수포화체가 주로 포화된 영역에서 동작하므로 이의 효과가 줄어들어서 생성할 수 있는 펄스폭이 넓어지고, detuning에 의해서 펄스의 평균출력이 감소되어 수동 모드록킹의 경우와 유사하게 되면 흡수포화체에 의한 펄스폭의 감소가 최대가 되어 펄스폭이 감소하는 것으로 생각된다.

마지막으로 반도체 레이저 광증폭기에서 방출되는 펄스가 주어진 시간에 어느 거울쪽으로 나오느냐에는 두 가지 가능성이 있다. 구성된 공진기에서는 반도체 레이저 광증폭기가 외부공진기의 중앙에 있지 않으므로 이 두가지 가능성은 서로 다른 왕복이득(round trip gain)을 가질 수 있다. 그래서 이득이 큰 쪽이 살아 남을 것이다. 한편 이 펄스는 모드록킹 주파수를 변화시키면 광펄스가 나오는 시간이 달라지므로 광증폭기에서 증폭된 펄스가 다시 광증폭기에 돌아와서 느끼는 이득 혹은 손실의 정도가 변화한다. 본 실험에서와 같이 반도체 레이저에 공급되는 신호가 충분히 크면, 이득을 얻고 증폭된 펄스가 외부공진기 거울에서 반사되어 다시 광증폭기로 되돌아 왔을 때는 손실을 보게 된다. 이와같이 펄스가 보는 손실의 변화(흡수포화체의 양의 변화)와 모드록킹 주파수의 변화에 의한 펄스의 시간상에서의 방출위치 변화가 비정상적인 모드록킹 주파수변화에 대한 펄스폭의 변화곡선의 원인의 하나라고 생각된다.

결론적으로 포화흡수체를 가지고 있는 반도체 레이저 진행파 광증폭기를 구현하고 이를 이용하여 외부공진기 반도체 레이저를 구성하고 혼성형 모드록킹하여

10 nm의 파장가변이 가능한 최대출력이 180 mW인 4 ps의 광펄스를 생성하였다. 이 때 펄스의 반복율은 516 MHz이고 최소펄스폭을 주는 모드록킹 주파수의 영역은 0.02 MHz 정도로 매우 좁다. 공진기를 구성하는 필터의 대역폭이 펄스폭에 미치는 영향을 측정하여 최소펄스폭을 얻기위해서는 최적의 필터 대역폭이 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 또, 수동모드록킹으로는 2.7 ps의 펄스를 생성하였으며, 펄스의 최대출력은 830 mW이다.

참 고 문 헌

- [1] P. P. Vasil'ev, "Picosecond optoelectronics," *Sov. J. Quantum Electron.*, 30, pp. 209-227, 1990.
- [2] Chang-Hee Lee, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Optical short-pulse generation using diode lasers with negative optoelectronic feedback," *Opt. Lett.*, 13, pp. 464-466, 1988.
- [3] 신상영, 이창희, "극초단 광펄스 생성법," 전기학회지, 제 137권, pp. 20-26, 1988
- [4] 이창희, 정태형, "극초단 펄스의 새로운 생성법과 그 응용," 전자공학회지, 제 17권, pp. 488-500, 1990
- [5] J. E. Bowers, P. A. Morton, A. Mar, and S. W. Corzine, "Actively mode-locked semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 25, pp. 1426-1438, 1989.
- [6] H.A. Haus, "Theory of mode locking with a slow saturable absorber," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-11, pp. 736-746, 1975.
- [7] P. J. Delfyett, C.-H. Lee, L. T. Florez, N. G. Stoffel, T. J. Gmitter, and N. C. Andreadakis, G. A. Alphonse, and J. C. Connolly, "High peak power picosecond pulse generation from AlGaAs external cavity mode-locked semiconductor laser and traveling-wave amplifier," *Opt. Lett.*, 15, pp. 1371-1373, 1990.
- [8] S. Sanders and A. Yariv, "Passive mode locking of a two-section multiple quantum well laser at harmonics of cavity round-trip frequency," *Appl. Phys. Lett.*, 58, pp. 681-683, 1991
- [9] M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, M. A. Chin, and G. Raybon, "Trnasmfrom-limited [1] 4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser," *Appl. Phys. Lett.*, 57, pp. 759-761, 1990.
- [10] S. Sanders, L. Eng, J. Paslaski, and A. Yariv, "108 GHz passive mode locking of a multiple quantum well semiconductor laser with an intracavity absorber," *Appl. Phys. Lett.*, 56, pp. 310-312, 1990.
- [11] T. Saitoh and T. Mukai, "Recent progress in semiconductor laser amplifiers," *J. Lightwave Tech.*, 6, pp. 1656-1664, 1988.
- [12] G. A. Alphonse, D. B. Gilbert, M. G. Harvey, and M. Ettenberg, "High-power superluminescent diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, 24, pp. 2454-2457, 1988.
- [13] S. W. Corzine, J. E. Bowers, G. Przybylek, U. Koren, B. I. Miller, and C.E. Socolih, "Actively mode-locked GaInAsP laser with subpicosecond output," *Appl. Phys. Lett.*, 52, pp. 348-350, 1988.
- [14] A. Yariv, *Quantum Electronics 3rd Ed.*, New York, John Wiley and Sons, 1989.

저 자 소 개



李 昌 燾(正會員)

1961년 9월 23일생. 1983년 2월 한양대학교 전자공학과(학사)
1985년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1989년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사) 1989.7 ~

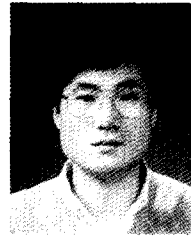
1990.6 Bellcore Post-Doc. 1989.3 ~ 현재 전자통신연구소 선임연구원. 주관심분야 : 광통신시스템에서의 광링크 구현, 광증폭기(EDFA, SLDA), 극초단 펄스 생성, 반도체 레이저, 비선형 동역학

鄭 基 雄(正會員)

1962년 2월 9日生. 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 학사 졸업. 1986년 2월 ~ 1990년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석,박사 졸업. 1990년 4월 ~ 1991년 7월까지 한국과학재단후원으로 Univ. of Minnesota 전자공학과 Research Associate 연구. 1991년 8월부터 현재까지 금성중앙연구소 재직중. 주관심분야는 화합물반도체 전자소자의 설계, 측정, 평가 및 이동통신용 MMIC연구임.

劉 泰 京(正會員)

1983년 서울대학교 전자공학과 학사(B.S.) 졸업. 1985년 한국과학기술원(KAIST) 전기전자공학과 박사(M.S.) 졸업. 1989년 한국과학기술원(KAIST) 전기전자공학과 박사(Ph.D) 졸업. 1989년 1월 ~ 1991년 10월 금성 중앙연구소 선임연구원 팀장. 1991년 11월 ~ 1992년 10월 Cornell대학 전자공학과 Visiting Scholar. 1992년 11월 ~ 1993년 2월 Bodcore 연구소(미국) 방문연구원. 1993년 2월 ~ 현재 금성 중앙연구소 책임연구원 실장. 전공분야 화합물 반도체 소자 설계 및 반도체 공정 광소자 반도체 레이저, 고휘도 렌즈 직접 LED, 광 집적 Module 전자소자 High Power/ High Speed HEMT 설계 반도체 Epitaxy(MOCVD, LPE)등



姜 承 求(正會員)

1962년 11월 24일생. 1988년 서강대학교 물리학과(이학사). 1990년 서울대학교 물리학과(이학석사). 1994년 현재 한국전자통신 연구소 선임연구원. 주관심분야는 반도체 광소자 및 패키징임.

林 時 鍾(正會員)

1960년 12월 23日生. 1983년 2월 고려대학교 재료공학과 학사 졸업. 1987년 8월 고려대학교 재료공학과 석사 졸업. 1987년 9월부터 현재까지 금성중앙연구소 재직중. 주관심 분야는 화합물반도체 광소자의 제작, 측정, 평가임.