

## 이득스위칭을 이용한 650 nm InGaAlP FP LD의 광펄스 파라미터 분석 및 CW 발진과의 특성 비교

오광환 · 채정혜 · 이용탁 · 백운출 · 김덕영†

광주과학기술원 정보통신공학과

Ⓣ 500-712 광주광역시 북구 오룡동 1번지

(2001년 2월 22일 받음, 2001년 4월 10일 수정본 받음)

최근 플라스틱 광섬유(Plastic Optical Fiber, POF)가 홈 네트워크(Home Network) 및 LAN(Local Area Network)의 새로운 통신채널로 등장하였다. 특히, PMMA 계에 기반을 둔 언덕형 굴절률 분포 플라스틱 광섬유(Graded Index Plastic Optical Fiber)는 500 nm와 650 nm 근처에서 아주 적은 손실을 가지므로 이 파장영역에서의 광원으로서 극초단 광펄스 생성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 650 nm InGaAlP FP(fabry perot) LD와 간단한 RF(radio frequency) 소자들을 이용한 회로를 구성하고, 이득스위칭 기술을 사용하여 1 GHz의 펄스 반복율을 가지고 33.3 psec 정도의 짧은 반치선폭(FWHM)을 가지는 광펄스를 생성시키는데 성공하였다. 이득스위칭 된 광펄스는 주입되는 직류전류(DC bias current)와 변조되는 주파수에 따라 반치선폭은 33.3~82.8 psec, 펄스 에너지는 0.97~9.69 pJ의 값을 얻었다. 또한, CW 발진과 이득스위칭 된 광펄스의 스펙트럼 폭은 각각 0.44 nm, 1.50 nm로 뒀을 측정하였다. 이러한 결과를 가지는 연속적인 광펄스는 직류전류와 VCO에 의한 변조주파수의 적절한 선택에 따라 초고속 근거리 광통신분야 뿐만 아니라 여러 가지 초고속 광소자 및 전자소자의 특성평가 등에 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

분류코드 : IP010, DT.010.

### I. 서 론

반도체 레이저를 이용하여 생성된 극초단 광펄스는 광 정보 처리나 광통신 또는 광전샘플링(electro-optic) 시스템에서 아주 중요하게 이용되고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 목적으로 이용되는 극초단 광펄스를 생성시키는 방법으로는 능동 모드 잠김(active mode locking), 수동 모드 잠김(passive mode locking), 충돌 펄스 모드 잠김(colliding pulse mode locking) 그리고 이득스위칭(gain switching) 등이 있다.<sup>[2]</sup> 능동 모드 잠김에 의하여 이미 0.58 psec의 극초단 광펄스가 생성되었으며,<sup>[3]</sup> 다른 모드 잠김에 의하여 1~2 psec의 극초단 광펄스가 성공적으로 생성되었다.<sup>[4]</sup> 반면, 이러한 모드 잠김에 의한 극초단 광펄스의 생성에는 복잡한 광학계나 높은 민감도가 요구되고 다른 장치들을 필요로 한다. 그러나 이득스위칭은 그 기술이 간단하면서도 반도체 레이저로 주입되는 직류전류의 변조만으로 상대적으로 높은 펄스 반복율을 가지는 극초단 광펄스를 쉽게 얻을 수 있으며, 특별한 광학계 대신 DCF(dispersion compensating fiber)를 사용하여 간단히 광펄스를 더욱 압축시킬 수 있는 장점을 가진다.<sup>[5]</sup>

한편, 최근 들어서 동축케이블(coaxial cable)과 비교하여 볼 때 방대한 정보전송이 가능한 POF가 근거리 광통신의 새로운 정보전송 채널로 등장함에 따라서 폴리메틸 메타크릴레이트(poly-methyl methacrylate, PMMA) 재료를 이용한 POF에 대하여 투과성이 좋은 650 nm 파장에서의 초고속 광원에 대

한 연구가 요구되고 있다.

이득스위칭 방법에 의한 극초단 광펄스 생성은 외부 공진기나 특별한 광학적 장치들이 요구되지 않고 저가의 RF 소자들만을 이용하므로 가장 편리하면서도 쉬운 펄스 생성 방법이라고 할 수 있다.<sup>[6-8]</sup>

본 논문에서는 반도체 레이저의 이득스위칭 방법에 대한 전반적인 이론적 배경을 설명하고, 650 nm InGaAlP FP LD와 RF 소자들을 이용한 이득스위칭 기술을 연구하였다. 반도체 레이저로 주입되는 직류전류와 전압제어진동기(voltage controlled oscillator)의 전압가변을 통해 펄스반복율(pulse repetition rate)을 조정함으로써 생성된 극초단 광펄스의 주요 파라미터인 반치선폭(FWHM)과 첨두값의 변화를 측정하였으며 스펙트럼 상에서 나타난 CW 발진과 이득스위칭 된 극초단 광펄스의 차이를 비교 및 분석하였다.

### II. 이득스위칭(Gain Switching)의 이론적 배경

광펄스를 형성하는 구조가 간단하고 주입되는 직류전류의 변조만으로 손쉽게 30~40 psec의 반치선폭을 가지는 극초단 광펄스를 얻을 수 있다는 이유 때문에 반도체 레이저를 이용하여 극초단 광펄스를 생성시키는 방법 중에서 이득스위칭은 다른 여러 가지 방법보다 많은 장점을 가진다. 또한 이득스위칭 방법은 고정밀도의 광학적인 기술이나 복잡한 레이저의 구조가 요구되지 않고 외부 공진기나 다른 장치들이 필요하지 않으며 특히, 임의의 반복율에서도 연속적인 광펄스를 생성시킬 수 있는 장점이 있다. 반면 이득스위칭 된 광펄스는 그 반치

†E-mail: dykim@kjist.ac.kr

선폭이 최저 30 psec 정도로 상대적으로 다른 모드 잠김을 이용한 광펄스 생성 방법보다 펄스폭이 길고 스펙트럼 폭이 넓은 단점을 가진다.

이득스위칭은 광펄스를 생성시키기 위해 침투값이 높고 속도가 빠른 전기적 펄스를 이용하여 직접적으로 반도체 레이저를 구동시키는 방법으로 그 주요 원리는 이완발진(relaxation oscillation)의 첫 번째 침투값과 주입되는 직류전류의 상호작용을 이용하는 것이다.<sup>[9,10]</sup> 즉, 이득스위칭은 이완발진의 첫 번째 침투값을 여기시키기 위하여 상승시간이 상당히 빠른 전기 펄스를 가지고 반도체 레이저를 구동시키는 방법으로 이완발진의 두 번째 침투값이 여기되기 전에 전기펄스는 차단된다. 따라서 RF 소자를 이용하여 큰 전류펄스를 레이저에 가해주면 반도체 레이저의 문턱 전류값보다 낮은 직류전류를 공급하다가 하나의 광펄스만을 생성시킬 수 있다. 짧은 전류펄스를 사용하여 빠른 펄스폭으로 반전분포를 형성하면 레이저가 발진되기 이전에 이득은 그 문턱값보다 높게 된다. 시간이 지남에 따라 방사에 의한 캐리어밀도는 감소하나 이완발진에 의해 상당히 빠른 레이저 펄스가 발진하게 된다. 이렇게 형성된 광펄스는 상승시간이 빠를 뿐 아니라 레이저의 이완발진 현상에 의해서 가해진 전기펄스의 펄스폭보다 더 짧아지게 된다.

**2.1. 비율방정식(Rate Equation)**

반도체 레이저의 정적, 동적 및 스펙트럼 특성은 전류캐리어와 광자 사이에서 일어나는 상호작용을 나타낸 비율방정식(rate equation)에 의하여 표현되어 진다. 반도체 레이저 내부의 활성영역에서 시간에 대한 전자수의 변화 및 광자수의 변화를 기술하는 비율방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.<sup>[11]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{I}{eV} - \frac{n}{\tau_s} - G(n)p \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{p}{\tau_p} + \beta \frac{n}{\tau_s} + \Gamma G(n)p \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 각각  $n$ 은 캐리어밀도,  $p$ 는 광자밀도,  $I$ 는 주입되는 직류전류,  $V$ 는 활성층의 체적,  $e$ 는 전자전하,  $G(n)$ 은 이득,  $\beta$ 는 자연방출요소,  $\tau_p$ 는 광자의 수명시간,  $\tau_s$ 는 캐리어의 자연방출 수명시간,  $\Gamma$ 는 광자의 갇힘 요소(confinement factor)이다.

식 (1)의 캐리어밀도에 대한 미분식에서 우변의 두 항은 캐리어 주입비율과 자연방출의 재결합비율을 나타내고 광자밀도에 대한 미분식에서 우변의 두 항은 공진기의 총 손실비율과 자연방출비율을 나타내고 있다. 이 두 식은 유도방출비율과 상호 연관관계를 가지고 있다.

**2.2. 레이저의 이완발진(Relaxation Oscillation)**

반도체 레이저가 주입되는 직류전류에 의하여 펄핑이 되면 정상상태에 도달하기 전에 상대적으로 긴 과도상태의 과정을 진행한다. 이러한 과도상태에서 반도체 레이저는 이완발진을 통해 공진기 모드(longitudinal mode)의 변화에 따라 파워의 분포가 주기적으로 달라지게 된다. 그림 1은 초기값이  $I_0$ 이고 최종값이  $I_{th}$ 보다 큰  $I$ 라고 하고  $t=0$ 에서 전류를 갑자기 증가시킬 때 캐리어밀도  $n$ 과 광자밀도  $p$ 사이에서 일어나는 상호작용

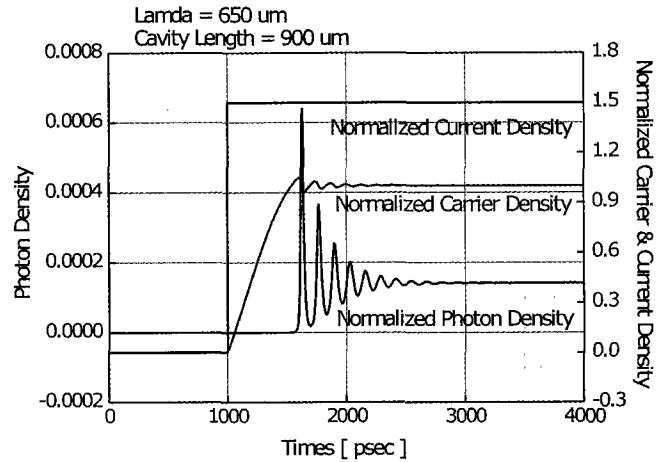


그림 1. 비율방정식에 의한 캐리어밀도와 광자밀도의 상호관계.

용을 식(1)을 사용하여 시간에 따라서 컴퓨터로 시뮬레이션한 것이고 표 1에 여기서 이용된 각각의 파라미터 값을 나타낸다.

여기서 normalized carrier density는  $n/n_{th}$ 로 정의된다. 과도상태의 경우 캐리어밀도는  $n$ 은  $n_{th}$ 를 넘어서까지 펄핑이 될 수 있지만 정상상태에서는  $n$ 이  $n_{th}$ 를 넘어설 수 없다. 그 이유는 과도상태에서는 공진기 내부에 유도방출이 일어나기 위한 충분한 캐리어밀도가 존재하지 않으므로, 캐리어의 방사가 없으면 레이저는 발진이 되지 않으나 정상상태에서는 유도방출에 의하여  $n \geq n_{th}$ 이 되는 시점에서 에너지가 전부 광으로 빠져나가기 때문이다. 그림 1의  $t=0$  시점에서 캐리어밀도는 갑작스럽게 증가하는 반면 광자밀도는 증가하기 시작하는 점까지  $t_d$  만큼의 지연시간을 가진다. 이 지연시간은 캐리어밀도가  $n_{th}$ 까지 도달하기 전에는 어떠한 유도방출도 일어나지 않음을 의미한다. 이러한 지연시간 이후에 광자밀도와 캐리어밀도는 정상상태에 도달하기 전에 수 GHz 범위의 자연주파수를 가지고 진동하게 되는데 반도체 레이저의 과도상태에 나타나는 진동을 이완발진이라고 한다. 또한 이러한 이완발진의 자연주파수는 반도체 레이저의 응답특성을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나이다. 그림 1에 나타난 이완발진의 자연주파수는 7 GHz 정도로 계산되었고 본 실험에 이용된 반도체 레이저의 이완발

표 1. 비율방정식의 수치적인 해석을 위한 파라미터 값

Parameters	Symbol	Value	Unit
Confinement factor	$\Gamma$	0.1	
Cavity Length	L	900	$\mu\text{m}$
Carrier density at transparency	$n_0$	$1 \times 10^{18}$	$\text{cm}^3$
Gain compression factor	$\epsilon$	$2 \times 10^{-5}$	$\text{cm}^3$
Gain constant	a	$2.5 \times 10^{-16}$	$\text{cm}^2$
Group velocity	$v_g$	$8.47 \times 10^4$	$\text{cm/s}$
Internal loss	$\alpha_i$	20	1/cm
Linewidth enhancement factor	$\alpha$	4	
Spontaneous emission coefficient	$\beta$	$1 \times 10^{-5}$	
Refractive index	n	3.25	
Center wavelength	$\lambda_0$	650	nm
Nonradiative recombination coefficient	$A_{nr}$	$1 \times 10^{-8}$	1/s
Radiative recombination coefficient	B	$1 \times 10^{-10}$	$\text{cm}^3/\text{s}$
Auger recombination coefficient	C	$4 \times 10^{-29}$	$\text{cm}^6/\text{s}$

진 자연주파수는 4.5 GHz 정도로 측정되었다.

### III. 실험장치 및 방법

이득스위칭을 이용하여 극초단 광펄스를 생성하고 그 광펄스를 측정 및 분석하기 위한 본 실험의 구성도는 그림 2와 같다. 펄스의 반복율을 결정하기 위하여 전압이 0~16 V까지 가 변될 때 주파수가 500 MHz~1 GHz까지 가변되며, 8 dBm의 출력을 갖는 VCO를 주파수 발생기로 사용하였고, 반도체 레이저에 주입시키기 위한 여기용 전류 펄스를 생성하기 위하여 comb 신호발생기를 사용하였다. VCO에서 발생한 정현파는 comb 신호발생기에 입력해 주기 전에 마이크로파 증폭기를 사용하여 그 출력을 +25 dBm으로 증폭시켰다. comb 신호발생기는 step recovery diode와 filtering reactive elements로 구성되어 있으며,<sup>[12]</sup> 입력단으로 들어오는 정현파의 양(+)의 반주기에서 임펄스(impulse)를 생성시키는 역할을 한다. 따라서, 전압제어진동기에 생성된 정현파의 주파수가 850 MHz의 경우 comb 신호발생기에서 발생하는 임펄스의 반복율은 입력단으로 들어오는 전압신호원의 주파수와 같아지나 펄스폭은 약 125 psec이고 그 출력은 약 +16 dBm으로 줄어든다. comb 신호발생기에서 나오는 출력은 직류전류와 bias tee에서 합쳐지며 이 출력이 FP(fabry parot) LD의 입력신호로 들어가도록 하였다. 반도체 레이저의 구동을 위한 직류전류원은 0~400 mA 까지 가변이 되는 반도체 칩 형태의 모듈을 이용하여 직접 제작하였다.

본 실험에 사용된 가시광선 영역에서 발진하는 InGaAlP FP LD는 그 중심파장이 647.8 nm이고 25°C에서 5 mW의 출력을 가진다. 이득스위칭에 의해 생성된 광펄스를 3 m 길이의 MMF(multimode fiber) patch cord(코어직경 50 μm, 광섬유 직경 125 μm)에 입사시키기 위하여 레이저 입력편에서 사용된 렌즈는 NA = 0.55, f = 4.5 mm이고 광섬유쪽 입력편에는 NA = 0.25, f = 11.0 mm인 렌즈와 FC connector가 연결된 fiber adapter 를 이용하였다. 이렇게 생성된 극초단 광펄스의 측정을 위하여 상승시간이 17 psec, 3 dB 대역폭이 25 GHz인 high speed photo detector(1434, Newfocus사)를 이용하였으

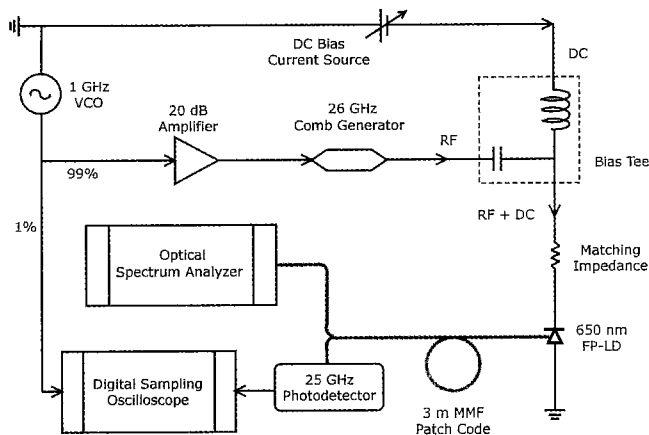


그림 2. RF소자들을 이용한 극초단 광펄스 생성을 위한 이득스위칭 회로의 개략도.

며 펄스 파라미터의 분석 및 CW 발진과의 스펙트럼 비교를 위하여 10 GHz의 연속적인 펄스측정이 가능한 디지털 샘플링 오실로스코프(digital sampling oscilloscope, Tektronix사)와 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, Ando사)를 각각 이용하였다.

### IV. 측정결과 및 논의

#### 4.1. RF소자에 의한 전류펄스와 이득스위칭에 의한 광펄스와의 관계

가변전압에 의하여 주파수제어가 되는 VCO는 30 MHz/V의 주파수 조절 민감도를 가지지만 그 출력전압의 첨두치는 8 dBm의 작은 값을 가지므로 전류펄스를 생성시키기 위해서 마이크로파 증폭기를 통과시킨 25 dBm의 신호를 comb 신호발생기의 입력에 넣어주었다. 또한, VCO의 출력단은 주출력단과 보조출력단으로 구성되어 있는데 내부에 99:1의 전압신호 분배기가 들어있으므로 보조출력단은 이득스위칭에 의한 상승시간이 빠른 광펄스의 측정을 위해 동기를 맞추어주는 트리거(trigger)신호로 이용하였다. comb 신호발생기는 증폭된 입력 신호인 정현파의 양의 반주기에서 임펄스를 만들어 주므로 출력펄스의 반복율은 VCO의 가변전압에 의해서만 결정된다. 본 실험에서는 VCO의 전압조절부를 0~16 V로 가변시킴에 따라서 주파수는 598 MHz~1.077 GHz, 25~30 MHz/V의 변화를 가지는 것으로 측정되었으며, 고주파로 갈수록 더 정확한 30 MHz/V의 주파수 조절민감도를 가지는 것을 관찰하였다. 생성된 RF 펄스신호는 bias tee에서 직류전류와 합쳐져서 이득스위칭을 위한 FP LD의 여기원이 되는 전류펄스로 사용된다. 그림 3은 bias tee의 출력인 전류펄스와 이득스위칭으로 생성된 광펄스를 비교한 그림이다. 여기서 약 125 psec의 반치선폭을 가지는 전류펄스를 반도체 레이저에 인가해 줌으로서 25 GHz의 high speed photo detector로 측정한 결과 40 mA의 직류전류와 850 MHz의 주파수에서 40.19 psec 정도의 짧은 광펄스를 생성할 수 있었다. 이득스위칭의 결과 얻어지는 광펄스 폭과 입력되는 전류펄스 폭의 비는 1:3.3 정도이다.

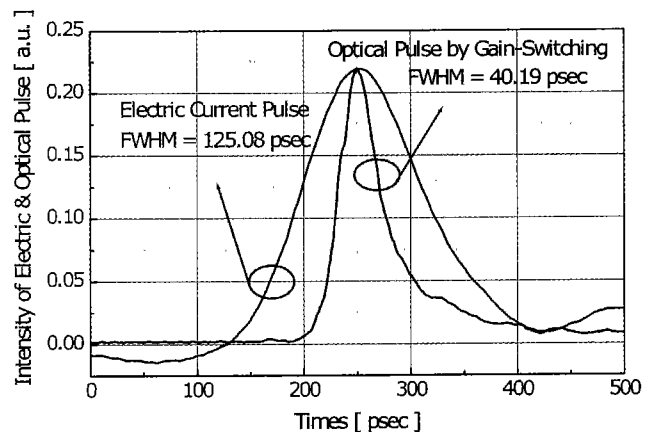


그림 3. 이득스위칭에 의한 광펄스와 전류펄스의 FWHM 비교.

**4.2. 직류전류(DC bias current)의 변화에 따른 광펄스 파라미터 분석**

반도체 레이저의 동작특성 중 가장 우선적으로 측정되어야 할 것이 반도체 레이저의 문턱전류(threshold current)이다. 이 문턱값은 레이저에서 유도방출(stimulated emission)이 일어나기 시작하는 지점으로 이득매질을 통과하는 광이 레이저 공진기 내부에서 일어나는 총손실의 합과 같아지는 곳이다.

본 실험에서 사용된 LD의 직류전류에 대한 출력파워의 관계인 L-I 특성곡선을 그림 4에 나타내었다. 직류전류를 1 mA 단위로 변화시키며 광파워측정기(lightwave multimeter 8153A, HP)를 이용하여 반도체 레이저의 출력값을 측정했는데, 외부 온도가 22°C일 때 CW 발진에서는 FP LD의 문턱 전류값이 30 mA로 측정되었다. 또한 이득스위칭을 했을 때는 VCO의 가변전압 즉 변조주파수의 변화에 따라 서로 다른 문턱 전류값을 가지는 것으로 측정되었다. VCO의 주파수  $f_m$ 이 600 MHz 일때는 17 mA, 850 MHz 일때는 22 mA의 문턱 전류값을 나타내었다. 이것은 주파수가 850 MHz에서 600 MHz로 감소하면 comb 신호발생기에서 만들어지는 각 임펄스의 크기가 증가하므로 변조주파수가 감소함에 따라 FP LD의 유도방출이 되기 시작하는 문턱 전류값이 감소하기 때문이다. 한편, CW 구동 시 펄스의 도음이 없이도 레이저가 발진해야 하므로 실험에서 보인 바와 같이 이득스위칭을 했을 때보다 더 큰 직류 전류에서 레이저가 발진됨을 알 수 있었다. 여기서  $f_m$ 은 VCO의 전압에 대응하는 변조주파수를 나타낸다.

반도체 레이저의 이득스위칭에서 문턱 전류값을 이용한 여러 파라미터 값을 표현하기 위하여 먼저 FP LD로 주입되는 직류전류에 따른 극초단 광펄스의 시간축 상에서의 변화를 600 MHz와 850 MHz의 변조주파수에서 측정하여 그림 5에 나타내었다. MMF patch cord에 RF 소자들에 의해 이득스위칭 된 광펄스를 최소손실로 입사시키면서 FP LD를 보호하기 위하여 AR 코팅이 된 fiber coupling lens pair와 FC connector 타입의 fiber adapter를 이용하였다. 이득스위칭 된 극초단 광펄스는 약 30 psec이하의 아주 빠른 상승시간을 가지는 것으로 측정되었기 때문에 3 dB 대역폭이 25 GHz, 펄스상승시간이 17 psec, 최대 측정파워가 200 mW인 InGaAs high speed

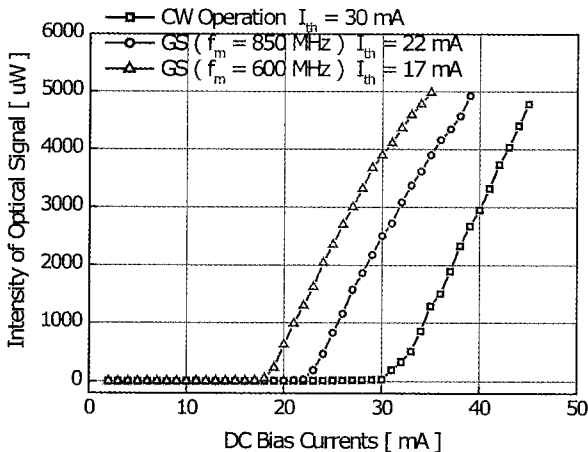


그림 4. CW operation과 이득스위칭(GS)에서의 L-I 특성곡선.

photodetector(1434, multimode용, Newfocus사)를 사용하였고, 측정된 광펄스의 확인을 위하여 1 psec/div로 10 GHz의 반복율을 가지는 펄스열까지 측정가능한 디지털 샘플링 오실로스코프를 이용하였다. 또한 99:1의 전압신호분배기가 있는 VCO 보조출력단의 전압신호를 이용한 외부 트리거링에 의하여 동기를 맞추었다.

그림 5에 나타난 극초단 광펄스는 이득스위칭에서의 L-I 특성곡선을 바탕으로 측정된 것으로 직류전류를 25 mA에서 50 mA까지 가변시키면서 디지털 샘플링 오실로스코프로 펄스의 변화를 관찰한 것이다. 이득스위칭의 경우 CW 발진과 같은 연속적인 직류전류의 주입과는 달리 RF소자들과 직류전류에 의해 생성된 임펄스 형태의 전류펄스를 FP LD에 주기적으로 주입시키므로 직류전류의 크기가 증가함에 따라 FP LD가 자주 파손되었다. 따라서 그림 4에 의해  $f_m$ 이 600 MHz일 때는 17 mA의 낮은 문턱 전류값을 가지므로 직류전류를 17 mA의 2.35배인 40 mA까지만 증가시켰고,  $f_m$ 이 850 MHz일 때는 22 mA의 조금 더 높은 문턱 전류값을 가지므로 직류전류를 22 mA의 2.27배인 50 mA까지 증가시키면서 극초단 광펄스를 측정하였다.

그림 5에서 나타나듯이 각 VCO의 변조주파수에 대한 문턱 전류값이 다르므로 서로 다른 광펄스의 침투값과 펄스모양이 측정되었다. 즉, 직류전류가 같은 25 mA이지만 그 침투값은 600 MHz로 구동할 때는 그림 5(a)의 c 경우 0.124 V이고, 850

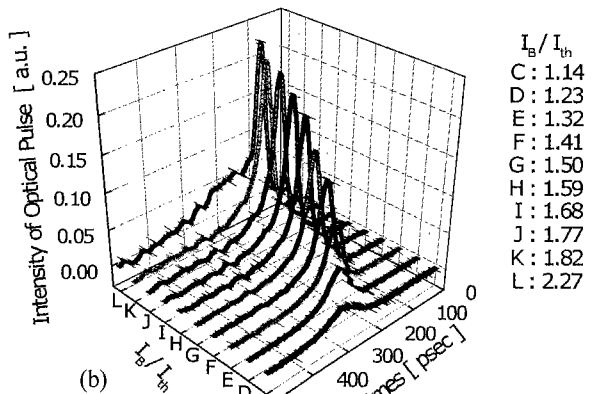
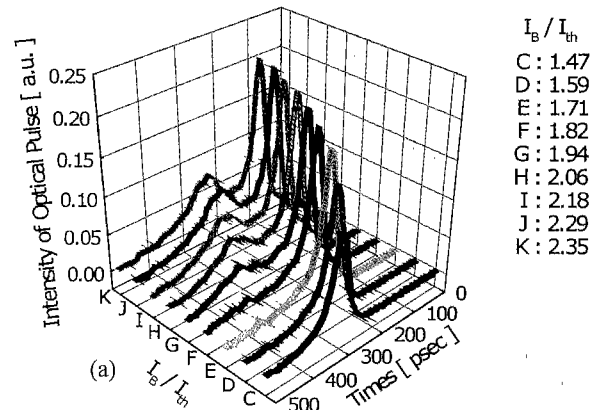


그림 5. 직류전류원과 극초단 광펄스의 관계. (a)  $f_m = 600$  MHz일 때 직류전류원에 따른 광펄스의 변화, (b)  $f_m = 850$  MHz일 때 직류전류원에 따른 광펄스의 변화.

MHz로 구동할 때는 그림 5(b)의 c 경우 0.021 V로 약 5.90 배의 차이를 보였다. 또한, 전류가 증가함에 따라 광펄스의 중심점이 빠른 시간쪽으로 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 주입되는 전류가 증가함에 따라 직류전류는 이완발전의 두 번째 펄스를 여기시킬 만큼 충분히 커지게 되고 그 결과 첫 번째 펄스에서 이루어지는 이득스위칭 다음에 제2차 광펄스가 출력으로 나오게 된다. 제2차 광펄스는 제1차 광펄스의 첨두값을 감소시키고 통신 선로상에서 주 신호와의 간섭을 일으키는 역할을 하므로 이득스위칭에서 주입되는 직류전류의 크기를 잘 조절할 필요성이 있다. 그림 5의 (a)는  $f_m$ 이 600 MHz일 때 직류전류를 증가시키에 따라 변화되는 광펄스이고 (b)는  $f_m$ 이 850 MHz일 때이다. 여기서  $f_m$ 이 600 MHz일 때는  $I_B/I_{th} = 1.94$ , 즉 직류전류가 33 mA에서부터 제2차 광펄스가 나타남을 관찰하였고,  $f_m$ 이 850 MHz일 때는  $I_B/I_{th} = 2.27$  즉, 직류전류가 50 mA까지 증가해도 제2차 광펄스는 뚜렷이 나타나지 않음을 볼 수 있었다. 그 이유는  $f_m$ 이 850 MHz의 경우, 캐리어가 소모되어 광펄스가 생성되는 주기보다 반도체 레이저를 여기시키는 펌핑 주기가 더욱 짧기 때문이라고 여겨진다.

극초단 광펄스 파라미터 중 직류전류의 변화에 대한 광펄스의 반치선폭의 변화와 첨두값의 변화를 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 변조주파수 즉, VCO의 가변전압에 관계없이 직류전류가 증가함에 따라서 극초단 광펄스의 반치선폭은 감소하다가 최종적으로는 변조주파수가 600 MHz와 850 MHz 일 때 각각 35 psec, 40 psec에서 포화상태로 되었다. 여기서 35 psec와 40 psec는 본 실험에서 사용된 FP LD의 공진주파수와 관련된 period doubling 또는 modulation efficiency의 포화에 의해 결정되는 값으로 추정된다.<sup>[13,14]</sup> 이득스위칭을 힘에 있어서 펄스의 변조주파수가 다르면 FP LD의 유도방출이 되기 위한 문턱 전류값이 달라지므로 같은 직류전류에 대하여 낮은 주파수에서는 전류의 증가에 따라 광펄스의 반치선폭이 직선적으로 감소하다가 35 psec에서 포화되지만 높은 주파수에서는 광펄스의 반치선폭이 지수함수의 형태를 가지며 감소하다가 40 psec에서 포화됨을 알 수 있었다.

극초단 광펄스의 또다른 파라미터 중 직류전류의 변화에 대한 광펄스 첨두값의 변화를 살펴보면 문턱 전류값이 상대적으

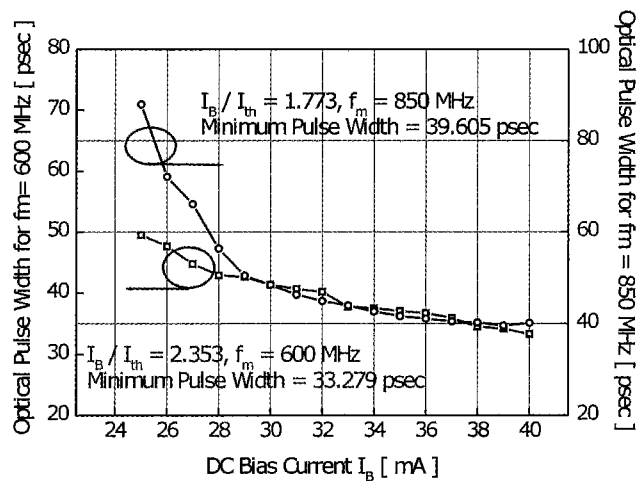


그림 6. 직류전류원의 변화에 따른 극초단 광펄스의 반치선폭의 변화.

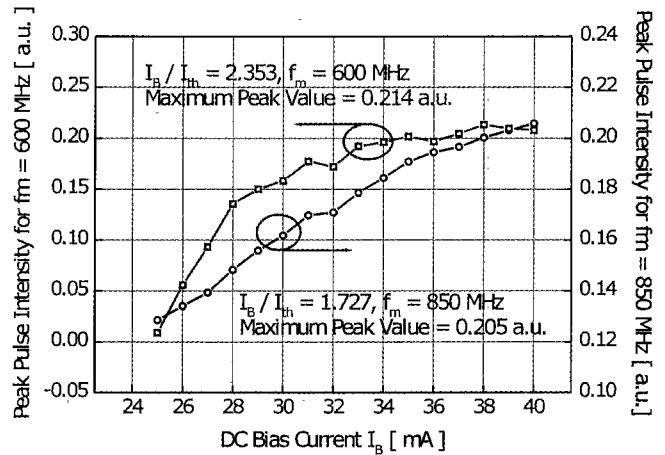


그림 7. 직류전류원의 변화에 따른 극초단 광펄스의 첨두값의 변화.

로 낮은  $f_m$ 이 600 MHz인 경우 전류 증가에 따른 광펄스 첨두값의 변화가 낮은 상승비율을 가지고 증가하였고, 제2차 광펄스가 나타나는  $I_B/I_{th} = 1.94$  시점부터는 그 첨두값이 전류가 증가함에 따라서 감소한다는 것을 gaussian fitting을 통해 확인하였다. 그러나 문턱 전류값이 상대적으로 높은  $f_m$ 이 850 MHz인 경우 전류 증가에 따른 광펄스 첨두값의 변화는  $I_B/I_{th} = 1.82$  즉 직류전류가 40 mA까지는 제2차 광펄스가 나타나지 않기 때문에 높은 상승비율을 가지며 증가하였다.

### 4.3. CW 발진과 이득스위칭 시 스펙트럼 상에서의 변화

본 실험에서 사용된 650 nm InGaAlP FP LD(TOLD9442M, Toshiba사)는 그 중심파장이 649.03 nm의 적색광으로 25°C에서 CW 발진시 최대 5 mW의 출력을 가진다. 그림 8의 (a)와 (b)는 실험에서 이용된 FP LD의 CW 발진시 나타난 스펙트럼을 광스펙트럼 분석기로 측정된 결과이다. 그림 8의 (a)는 0.1 nm의 간격으로 0.05 nm의 분해능을 가지고 전체 1 nm의 파장영역으로 측정된 광스펙트럼이고 (b)는 0.5 nm의 간격으로 역시 0.05 nm의 분해능으로 전체 5 nm의 파장영역으로 측정된 광스펙트럼이다. 이것은 CW 발진시 문턱 전류값인 30 mA 부근에서 측정된 결과로 중심파장은 약 649.03 nm이고 공진기 내부에 여기되는 모드 수는 약 8~9개로서 공진 모드 간의 간격이 0.068 nm가 됨을 관찰할 수 있었다. 또한 이때 스펙트럼의 gaussian 선폭은 0.44 nm이었다. 한편 공진기 모드의 모드 간격은  $\Delta f = c/2nL$ 이고  $c = f\lambda_0$ 이므로 반도체 레이저의 굴절률을 3.6으로 본다면 본 실험에 사용된 650 nm FP LD의 공진기 길이는 약 868  $\mu\text{m}$  정도로 계산되었다.

이득스위칭 된 FP LD를 CW 발진일 때의 스펙트럼과 비교하기 위하여 측정된 광스펙트럼을 그림 9의 (a)와 (b)에 나타내었다. 측정 파장영역은 그림 8에서 나타난 것과 같은 조건으로 하였다. 여기서 볼 때 CW 발진 때와 마찬가지로 공진 모드 간 간격은 0.068 nm이지만 광펄스가 생성되는 주기동안 주파수 영역에서의 광학적인 처핑(optical chirping) 효과와 이득스위칭 시 생기는 공진기 내부의 캐리어 밀도의 시간에 따른 변화로 인하여 스펙트럼의 gaussian 선폭이 1.50 nm 정도로 CW 발진 시보다 약 3.4배 정도 늘어남을 관찰할 수 있었다.

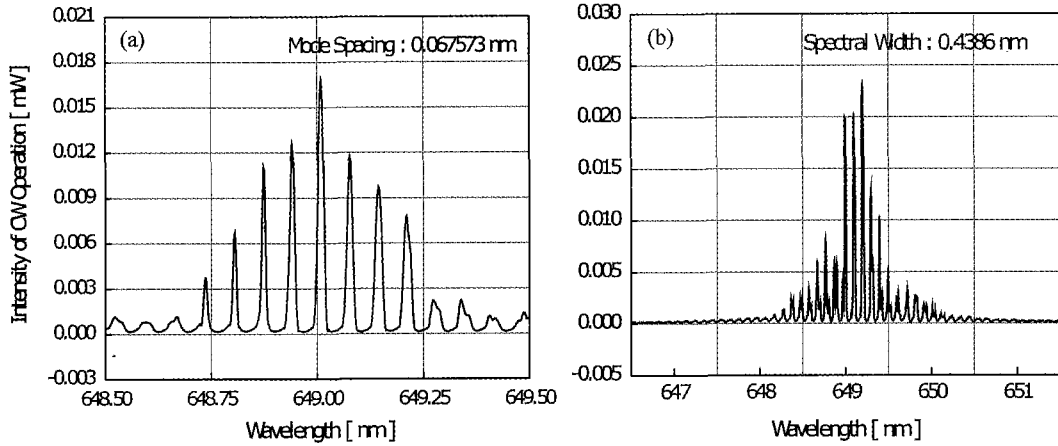


그림 8. CW 발진 시 나타나는 650 nm InGaAlP FP LD의 광스펙트럼. (a) 0.1 nm 간격으로 0.05 nm의 분해능으로 측정된 스펙트럼, (b) 0.5 nm 간격으로 0.05 nm의 분해능으로 측정된 스펙트럼.

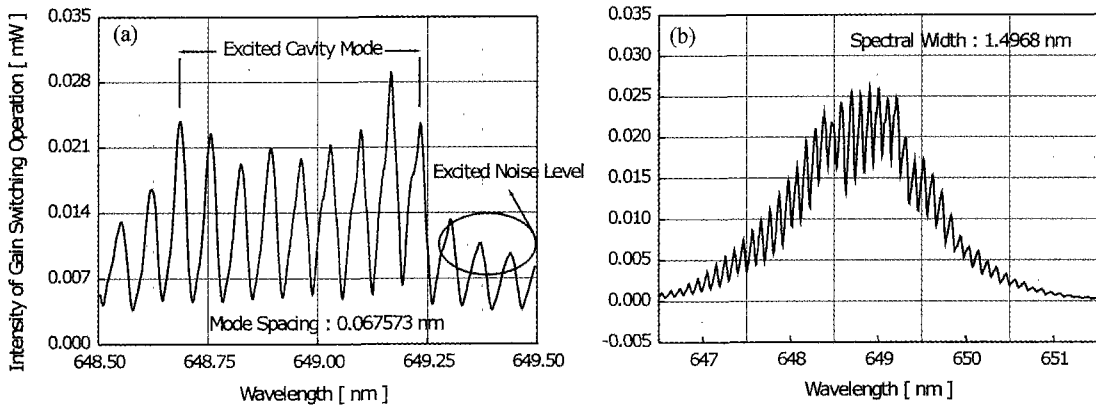


그림 9. 이득스위칭 시 나타나는 650 nm InGaAlP FP LD의 광스펙트럼. (a) 0.1 nm 간격으로 0.05 nm의 분해능으로 측정된 스펙트럼, (b) 0.5 nm 간격으로 0.05 nm의 분해능으로 측정된 스펙트럼.

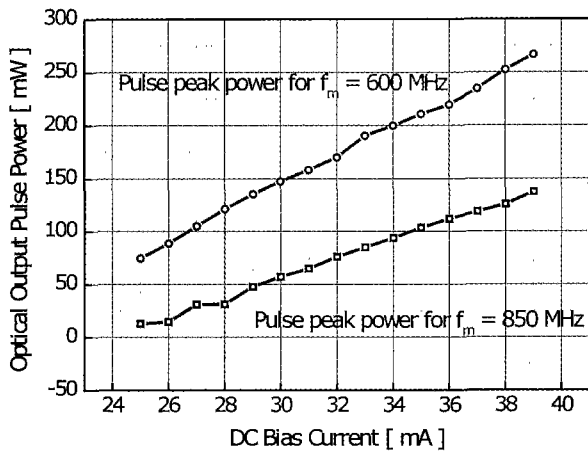


그림 10. 직류전류의 변화에 따른 이득스위칭 된 극초단 광펄스의 첨두 출력값 변화.

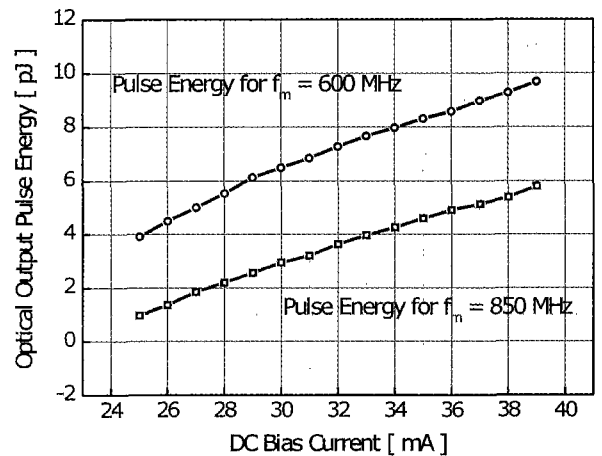


그림 11. 직류전류의 변화에 따른 이득스위칭 된 극초단 광펄스의 에너지 변화.

이득스위칭에 의하여 생성된 극초단 광펄스의 첨두 출력값 및 펄스 당 에너지의 변화를 직류전류의 변화에 따라 관찰한 결과를 각각 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 그림 10에서 보면 직류전류를 24 mA에서 39 mA까지 증가를 시키며 생

성되는 광펄스의 첨두 출력값을 측정된 결과 상대적으로 17 mA의 낮은 문턱 전류값을 가지는, 주파수가 600 MHz인 경우 74.41 mW에서 266.66 mW까지 반도체 레이저의 특성에서 쉽게 예측되는 바와 같이 직선적으로 증가함을 알 수 있었

다. 또한 22 mA의 높은 문턱 전류값을 가지는, 주파수가 850 MHz인 경우에서도 마찬가지로 직류전류의 증가에 따라 12.68 mW에서 137.54 mW까지 거의 직선적으로 증가함을 관찰하였다.

이러한 결과 및 이득스위칭 된 각 펄스의 반치선폭과 펄스 반복율을 알고 있으므로 극초단 광펄스의 펄스당 에너지의 계산이 가능하였는데, 그림 11에서 보는바와 같이 주파수가 600 MHz인 경우 직류전류 변화에 따른 펄스 에너지의 변화는 3.92 pJ에서 9.69 pJ이었고 주파수가 850 MHz인 경우 펄스 에너지의 변화는 0.97 pJ에서 5.80 pJ 사이로 직류전류의 증가에 대하여 펄스 에너지 역시 펄스의 침투 출력값처럼 직선적으로 증가하였다.

## V. 결 론

RF 소자들과 반도체 레이저의 구동을 위한 직류전류원이 이용된 간단한 실험구성으로 반치선폭이 약 35~40 psec인 극초단 광펄스를 생성시킬 수 있는 650 nm FP LD의 이득스위칭에서 나타나는 여러 가지 펄스 파라미터 중, 반도체 레이저로 주입되는 직류전류의 변화에 의하여 발생하는 광펄스의 반치선폭과 침투값의 변화를 디지털 샘플링 오실로스코프로 관찰하였다.

또한, CW 발진과 이득스위칭에서의 문턱 전류값의 변화를 측정하였으며 스펙트럼 상에서의 변화를 관찰하였다. 그 결과 FP LD의 문턱 전류값은 변조주파수가 낮은 600 MHz일 때 17 mA이고 변조주파수가 높은 850 MHz일 때 22 mA로 측정되었다. 또한 CW 발진인 경우는 30 mA의 문턱 전류값을 가지며 이득스위칭 될 때 comb 신호발생기의 출력인 임펄스의 도움으로 CW 발진 때 보다 FP LD는 더욱 낮은 문턱 전류값을 가진다는 것을 알 수 있었다.

광펄스의 반치선폭은 직류전류의 증가에 따라서 변조주파수에 관계없이 감소를 하는 것으로 측정되었다. 광펄스의 침투값은 직류전류의 증가에 따라 증가하는데 각 변조주파수에 따라서 유도방출이 일어나기 시작하는 문턱 전류값과 제2차 광펄스의 출현이 침투값의 변화에 중요한 요인임을 확인하였다.

광스펙트럼 분석기로 CW 발진과 이득스위칭 된 반도체 레이저의 광스펙트럼을 관찰하였고 모드 간격을 계산한 결과 사용된 FP LD의 공진기 길이가 약 868  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있었다. 또한, 이득스위칭 된 FP LD의 스펙트럼을 분석한 결과 CW 발진시 명확하게 관찰된 공진기 모드의 선폭은 광학적인 처평 현상에 의해 더욱 넓어진다는 것을 확인하였다.

끝으로 직류전류의 변화에 따른 이득스위칭 된 광펄스의 침투 출력값 및 에너지의 변화를 측정하였는데 전류가 증가함에 따라 펄스의 침투 출력값의 경우 12.68 mW에서 266.66 mW의 변화를 보였고, 펄스 당 에너지의 경우 0.97 pJ에서 9.69 pJ 사이에서 직선적으로 변화함을 확인하였다.

이러한 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, VCO의 변조주파수와 직류전류의 적절한 선택에 따른 이득스위칭 된 극초단 광펄스는 플라스틱 광섬유로 구성된 초고속 근거리 광통신 분야에서 뿐만 아니라 다중모드 유리광섬유의 대역폭 측정 및 광·전 정합용 초고속 전자소자의 특성평가와 다양한 광소자 및 광부품의 특성평가 등에 여러 가지 응용이 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 교육부의 두뇌한국21(BK21) 중 광주과학기술원 정보통신사업단과 초고속 광네트워크 연구센터(UFON)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의해 수행된 과제입니다. 두 기관의 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] J. M. Wiesenfeld, A. J. Taylor, R. S. Tucker, G. Eisenstein, and C. A. Burrus, *SPIE Proc.*, vol. 795, p. 339, 1987.
- [2] H. F. Liu, M. Fukazawa, Y. Kawai and T. Kamiya, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, p. 1417, 1989.
- [3] S. W. Corzine, J. E. Bowers, G. Przybylek, U. Koren, B. I. Miller, and C. E. Soccolich, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, p. 348, 1988.
- [4] P. P. Vasil'ev, V. N. Morozov, Y. M. Popov and A. B. Sergeev, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, p. 149, 1986.
- [5] 조성대, 김근영, 이창희, 신상영, 채창준, *Proc. Photonics Conference '97*, 1997, p. 299.
- [6] L. P. Barry and P. Anandarajah, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, p. 1360, 1999.
- [7] Y. Matsui, S. Kutsuzawa, S. Arahira and Y. Ogawa, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, p. 1087, 1997.
- [8] A. Mecozzi, P. Spano, and A. Sapia, *Opt. Lett.*, vol. 14, p. 1067, 1990.
- [9] Y. Suematsu and A. R. Adams, *Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits* (Chapman & Hall, 1994), Ch. 7.
- [10] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Laser* (Van Nostrand Reinhold, 1993), Ch. 6, 8.
- [11] K. Y. Lau, *Appl. Phys. Lett.* 52, 257 (1988).
- [12] R. Paiella, F. Capasso, C. Gmachl, C. G. Bethea, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson and A. Y. Cho, *LEOS '99. 12th Annual Meeting.*, vol. 1, p. 11, 1999.
- [13] S. D. Cho, C. H. Lee, and S. Y. Shin, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, p. 782, 1999.
- [14] 조성대, 채창준, 이창희, 신상영, *Proc. Photonics Conference '97*, 1997, p. 339.

**Optical pulse parameter analysis of gain switched InGaAlP FP LD at 650 nm wavelength and its characteristic in comparison with CW operation**

Kwang Hwan Oh, Jung-Hye Chae, Yong-Tak Lee, Un-Chul Paek, and Dug Young Kim<sup>†</sup>

*Department of Information and Communications, K-JIST, Kwangju 500-712, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: dykim@kjist.ac.kr*

(Received February 22, 2001 ; Revised manuscript received April 10, 2001)

Recently, plastic optical fiber draws a lot of attention as a new transmission medium for local area network (LAN) and home network applications. As PMMA based GI-POF (Graded Index Plastic Optical Fiber) has very low loss at about 500 nm and 650 nm wavelengths, it is very important to have a compact ultra short optical pulse source at these wavelength windows. In this paper, we have investigated detailed characteristics of gain switched laser system by using a commercially available low cost RF devices and an InGaAlP Fabry Perot semiconductor laser operating at 650 nm wavelength. The shortest optical pulse obtained was 33 psec with 1 GHz repetition rate. Depending on the DC bias current and the modulation frequency, the FWHM and the pulse energy of the gain switched pulses show 33.3~82.8 psec and 0.97~9.69 pJ respectively. Also, the spectral bandwidths for CW and gain switched operations are 0.44 nm and 1.50 nm. We believe that these results are quite useful for high bit rate optical transmission applications with PMMA based plastic optical fibers in addition to estimate properties of ultra fast optical components and electro-optic devices.

*Classification codes* : IP.010, DT.010.