

論文98-35D-4-14

이득 스위칭 반도체 레이저에서 동작 파라미터에 대한 출력 펄스 폭의 의존성

(Dependence of Pulse Width on the Operating Parameters in a Gain-Switched Semiconductor Laser)

李尙勳*, 明承一*, 李明雨*, 徐東善*

(Sang-Hoon Lee, Seung-Il Myong, Myong-Woo Lee, and Dong-Sun Seo)

요 약

이득 스위칭 반도체 레이저에서 DC 바이어스, RF 정현파 전력 및 RF 주파수에 대한 출력 펄스 폭의 의존성을 실험을 통하여 조사하였다. 최적의 짧은 펄스는 문턱 전류 부근의 DC 바이어스 전류에서 얻어졌다. 보다 짧은 펄스를 발생시키기 위한 DC 바이어스는 RF 전력이 클수록 감소하나, RF 주파수가 증가하면 이 전류는 문턱 전류 값 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 출력 펄스 폭은 RF 전력이나 주파수가 증가할수록 DC 바이어스의 변화에 덜 민감하게 나타났다.

Abstract

We examine experimentally the dependence of output pulse width on DC bias, RF power, and RF frequency in a gain-switched semiconductor laser. The optimum short pulses are obtained around threshold DC bias. The DC bias to generate shorter pulses decreases as the RF power increases, whereas it increases to above threshold as the RF frequency increases. The pulse width becomes less sensitive to the variations of the DC bias, as the RF power or frequency increases.

I. 서 론

반도체 레이저에 기초한 초단 펄스 발생 장치는 솔리톤에 의한 초 장거리 광통신은 물론이고, 미래의 Tbps급 초고속 광통신 망의 광원 구현에 매우 유용하게 이용될 수 있다.^[1,2] 이외에도 반도체 레이저에 기초한 광 펄스원은 반도체 레이저의 특성상 펄스의 발생 속도 조절이 용이하기 때문에, 광 측정 시스템, 광 스위칭 시스템, 광 샘플링 시스템, 스펙트로스코피, 등에도 매우 유용하게 응용될 수 있다. 이 같은 많은 응

용 잠재력 때문에, 반도체 레이저로부터 초단 펄스 발생에 대한 연구는 매우 활발하게 진행되고 있다.

반도체 레이저를 이용하여 초단 펄스를 발생시키는 대표적인 방법 중에는 이득 스위칭과 모드 잠금이 있다. 모드 잠금 방법은 변환 제한급의 짧은 펄스를 발생시킬 수 있다는 장점은 있으나, 반도체 레이저 면에 무반사 코팅과 별도의 외부 공진기가 필요하고 펄스 발생 주파수가 외부 공진기의 공진 주파수로 제한된다는 단점이 있다.^[3] 반면, 본 연구의 대상인 이득 스위칭은 반도체 레이저에 어떤 부가 장치도 필요 없기 때문에 시스템이 간단하게 구성되고, 광통신 및 여타의 응용에 용이도록 펄스 발생 주파수를 임의로 조절할 수 있다는 장점이 있다.^[4,5] 이 같은 독특한 장점은 출력 펄스에 주파수 칩(frequency chirp)이 존재한다는 상대적인 단점을 충분히 보상하여, 이득 스위칭 레이저에 대한 지속적인 연구 관심을 불러일으키고

* 正會員, 明知大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics, Myong-Ji University)

※ 이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字:1997年12月8日, 수정완료일:1998年3月30日

있다. 더욱이, 이 첩도 거의 선형적인 적색 첩으로서 광섬유와 같은 수동 분산소자를 이용하면 쉽게 보상될 수 있고 동시에 펄스 압축 효과도 얻을 수 있기 때문에, 더 이상 단점으로 지적되지는 않고 있다. 즉, 이 적색 첩은 오히려 압축된 수 피코초의 초단 펄스를 얻는 수단으로 활용될 수 있다. 이에 따라, 이득 스위칭 펄스의 첩 보상에 의한 수 피코초의 변환 제한 광 펄스 발생,^[5] 이득 스위칭 웨브리 페롯(FP) 레이저의 발진 모드 선택 및 첩 보상에 의한 변환 제한급의 파장 가변 펄스 발생,^[6] 첩 보상된 변환 제한 펄스의 솔리톤 펄스 압축에 의한 펄스폭 대의 펄스 발생,^[7] 등에 관한 활발한 연구 결과가 발표된 바 있다. 또한, 웨브리 대의 압축된 펄스의 응용에 문제가 될 수 있는 이득 스위칭 출력 펄스의 타이밍 지터(timing jitter)를 외부 광 주입에 의해 1/2 정도로 축소시킨 연구 결과도 발표된 바 있다.^[8,9] 국내 학회에도 반도체 레이저의 이득 스위칭에 관한 활발한 연구 결과가 발표된바 있는데, 이득 스위칭 FP 레이저로부터 변환 제한급의 파장가변 펄스 발생,^[10] 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 이득 스위칭 펄스 발생 과정 해석,^[11] 이득 스위칭 출력의 동작 특성 조사,^[12] DFB 레이저로부터 5 GHz의 이득 스위칭 펄스 발생 및 압축,^[13] 이득 스위칭에 의해 발생 가능한 최소 펄스 폭,^[14] 등에 대한 괄목할 만한 연구 결과가 발표된바 있다.

본 연구에서는 이득 스위칭 레이저를 이용한 실용 시스템의 구현을 위한 기초 연구로서, 주요 동작 파라미터인 DC 바이어스(bias), RF 전력 및 RF 주파수에 따른 이득 스위칭 레이저 출력 펄스의 특성을 실험을 통하여 체계적으로 조사하고자 한다. 이는 최적의 이득 스위칭 펄스 발생은 물론이고, 최근에 관심이 집중되고 있는 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 의한 초단 RZ 신호 발생^[15] 및 첩 보상에 의한 펄스 압축의 기초 자료로 활용될 수 있으리라 기대된다. 우선 2장에서는 이득 스위칭에 의한 초단 펄스 발생 원리를 살펴보고, 3장에서는 DC 바이어스, RF 전력 및 RF 주파수에 따른 이득 스위칭 출력의 펄스 폭 변화 특성을 비롯한 광 스펙트럼 및 광 전력 특성을 실험적으로 조사하고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. 이득 스위칭에 의한 초단 펄스 발생 원리

반도체 레이저를 문턱 전류 아래에 DC 바이어스시

키고 첩두 전류 값이 매우 큰 전류 펄스를 인가하면, 매우 큰 주입 전류와 매우 낮은 초기 광자 밀도에 의해 반송자(carrier) 밀도는 정상 상태의 레이저 문턱 밀도 값 보다 훨씬 크게된다. 이는 매우 큰 광자 이득이 존재함을 의미하고, 이에 따라 광자 밀도는 매우 빠르게 증가하여, 출력 광 전력은 급격히 증가하게 된다. 그러나, 충분히 크게 증가된 광자 밀도는 반송자 밀도를 급격히 공핍시켜 반송자 밀도를 문턱 값 이하로 떨어뜨리고, 이로 인한 급격한 손실 증가로 광자 밀도는 급격히 감소하게 된다. 이때, 더 이상의 (펄스) 전류를 공급하지 않으면 레이저의 발진은 멈추게 된다. 그러므로, 급격히 변하는 반송자 밀도에 비례하는 이득의 빠른 증가와 곧 이은 급격한 감소에 의해 초단 광 펄스가 발생되게 된다. 즉, 이득 스위칭에 의한 초단 펄스 발생의 기본 아이디어는 짧은 전류 펄스를 인가하여 반도체 레이저 출력의 이완 발진(relaxation oscillation)의 첫 번째 스파이크(spike)만을 여기 시키고, 나머지 스파이크는 여기 되지 않도록 하는 것이다.^[4] 이와 같이 이완 발진의 첫 번째 스파이크만을 취하기 때문에 출력 펄스의 모양은 인가된 전류 펄스의 모양에는 무관하게 가우시안(Gaussian) 형태를 갖게된다. 즉, 인가된 펄스의 형태가 빗살 형태, 삼각파, 구형파, 또는 정현파든지간에 첩두 전류 값이 충분히 커서 큰 반송자 밀도 반전을 유기하고, 이에 따라 빠른 광 펄스를 구축(build-up)한 후에, 충분히 큰 광자 밀도에 의해 반송자 밀도가 문턱 전류 이하로 공핍되기만 하면 초단의 가우시안 광 펄스가 발생된다. 펄스 발생 후에는 반송자 밀도가 또 다시 문턱 전류 값을 넘어 이완 발진에 의한 두 번째 스파이크가 여기 되지 않도록 반송자 밀도가 문턱 값 이하로 공핍됨과 동시에 펄스 및 교류 전류 값은 궁극적으로 영(0) 또는 음이 되게 한다. 이 같이 발생된 광 펄스의 폭은 반전된 반송자 밀도 및 이완 발진 주파수 값이 클수록 짧게 나타난다. 일반적으로 0.5 GHz 이상의 이득 스위칭 펄스는 RF 정현파를 인가하여 발생시키고, 그 이하는 빗살 발생기(comb generator) 출력을 이용하여 발생시킨다. 반송자 밀도를 적절한 수준으로 유지시키기 위한 DC 값이나 전류 펄스 폭이 너무 크면, 반전된 반송자 밀도가 충분히 높지 못하여 펄스 폭이 증가하거나 이완 발진의 두 번째 스파이크가 나타나게 된다. 이 같은 현상은 간단한 비율 방정식(rate equation)의 수치적 해에서도 쉽게 확인 할 수 있다.^[16] 한편, 광

펄스 발생 중에 반송자 밀도는 거의 선형적인 감소 형태를 보이게 되어, 이득 스위칭 펄스 출력에는 선형적색 찢이 존재하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 이 같은 선형 찢은 광섬유와 같은 분산 소자에 의해 쉽게 보상될 수 있다.^[5]

III. 실험 결과 및 분석

1. 실험 장치

이득 스위칭 레이저의 주요 동작 파라미터인 DC 바이어스, RF 전력, 및 RF 주파수에 따른 이득 스위칭 출력 펄스의 특성 변화를 조사하고자 그림 1과 같은 간단한 실험 장치를 구현하였다. 그림에서 반도체 레이저(LD)는 광섬유 피그테일(pig-tail)된 문턱 전류 10.5 mA의 FP 레이저 또는 문턱 전류 7.5 mA의 DFB 레이저를 사용했으며, 저 잡음의 RF 정현파 발생기의 출력을 RF 증폭기로 증폭하여 DC 바이어스와 함께 바이어스 티(bias tee)를 통하여 반도체 레이저에 인가하였다. DC 바이어스는 레이저가 역 바이어스 되는 것을 막고, 적절한 크기의 전류 펄스 또는 RF 전력에서 충분한 광 출력 전력을 유지하는 역할을 한다. RF 신호의 효율적인 인가를 위하여 반도체 레이저와 43Ω 저항을 직렬로 연결함으로써 50Ω의 부하를 형성하였다. 그러므로, 본 연구에서 인가되는 RF 전력은 레이저와 저항에 인가되는 총 전력을 의미한다. 이득 스위칭 출력은 샘플링 스코프가 연결된 고속의 검출기(대역 폭 : 45 GHz) 또는 광 자기 상관기를 이용하여 관측하였으며, 동시에 광 스펙트럼 분석기(분해능 0.07 nm)로 광 스펙트럼도 관측하였다. 광 상관기에 제2고조파를 얻을 수 있는 충분한 전력을 공급하기 위해 광섬유증폭기(EDFA)를 사용하였다.

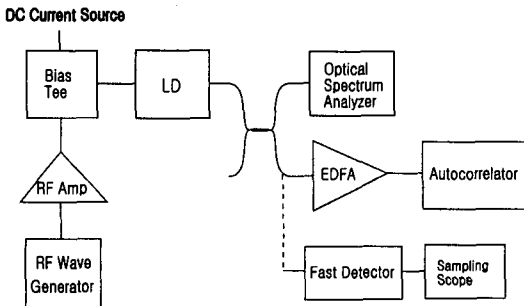
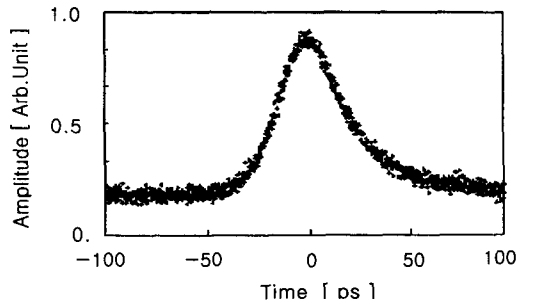


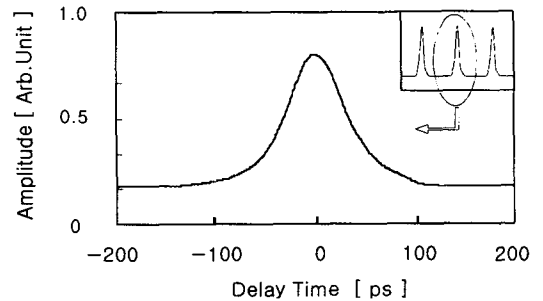
그림 1. 실험 장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

2. 광펄스 모양 및 광 스펙트럼

광펄스의 직접적인 모양은 일반적으로 고속 검출기나 스트릭(streak) 카메라로 관측하고 개략적인 모양과 정확한 펄스 폭은 광 자기 상관기로 관측한다. 그림 2의 a)는 문턱전류 부근에 DC 바이어스된 FP 레이저에 1 GHz의 26 dBm RF 전력을 인가시켜 얻은 이득 스위칭 출력 펄스를 고속 검출기 및 샘플링 스코프에 의해 측정된 시간 궤적이다. ~ 40 피코초의 가우시안 형태를 보임을 알 수 있다. 그림 2의 b)는 유사한 조건에서 DFB 레이저를 이득스위칭 시킨 출력을 광 자기 상관기에 의해 관측한 자기 상관 궤적이다. 광 자기 상관기 출력의 불규칙 잡음을 제거하기 위해 16번의 상관 궤적에 대한 평균치를 취하였다. 상당한 작은 박스는 1 GHz 펄스열의 광 상관 궤적을 보이고 있는데, 궤적의 주기로부터 정확한 광 지연 시간을 결정할 수 있다. 그림 b) 하단에 자세히 보인 궤적은 폭이 ~ 70 피코초로서 발생된 펄스가 ~ 50 피코초의 가우시안 펄스임을 보이고 있다.



(a)

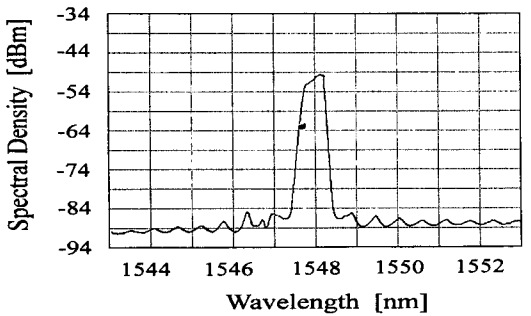


(b)

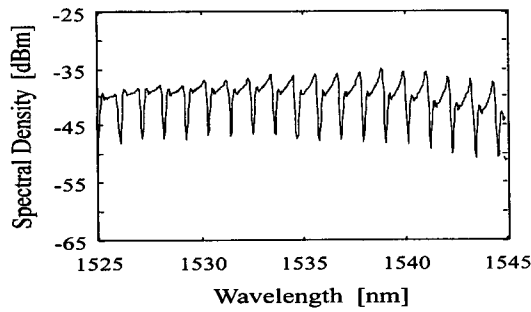
그림 2. 이득스위칭 출력 펄스의 모양; a) 시간 궤적, b) 광 자기 상관 궤적
Fig. 2. Pulse shapes of gain-switched outputs; a) time trace, and b) autocorrelation trace.

그림 3은 그림 2의 이득 스위칭 출력에 해당하는

광 스펙트럼을 보이는데, 전형적인 주파수 첩과 DFB 레이저의 단일 모드 발진 및 FP 레이저의 다중 모드 발진 현상을 볼 수 있다. 선형 첩을 가정하면, DFB 레이저 출력의 이 같은 첩은 시간 폭과 스펙트럼 폭간의 관계식에 의해 주어지는 적절한 분산 보상 광섬유에 의해 쉽게 보정될 수 있다.^[5] 그러나, 펄스의 양 끝에서는 비선형 첩이 나타나기 때문에, 이 부분을 광 필터로 제거시킨 후에 첩 보정하여 변환 제한된 펄스를 얻는 방법이 많이 사용되고 있다.



(a)



(b)

그림 3. 이득 스위칭된 DFB(a) 및 FP(b) 레이저의 광 스펙트럼

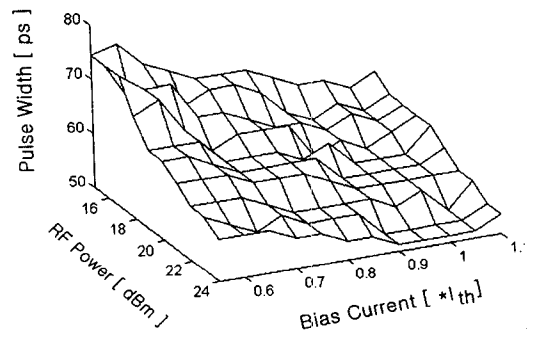
Fig. 3. Optical spectra of gain-switched (a) DFB and (b) FP lasers.

3. DC 바이어스 및 RF 전력에 대한 의존성

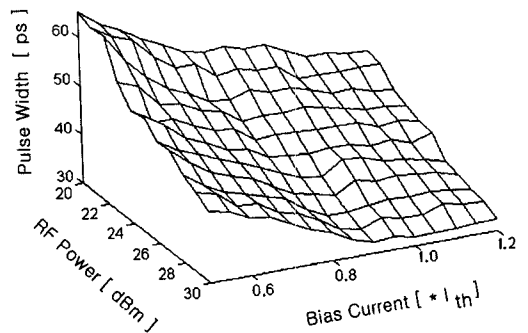
이득 스위칭 출력 펄스의 동작 파라미터에 대한 의존성을 조사하기 위해, 우선 RF 주파수를 1 GHz로 고정하고, DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 이득 스위칭 출력의 펄스 폭 및 광 스펙트럼 폭을 조사하였다.

그림 4는 두 동작 파라미터에 대한 DFB 레이저(a)와 FP 레이저(b) 출력 펄스 폭의 의존성을 종합적으로 나타낸 실험 결과를 보여준다. 레이저의 유형에 관계없이, 이득 스위칭 출력 펄스의 폭은 DC 바이어스

가 증가하면 급격히 감소하여 문턱 전류 근처에서 최단의 특성을 보이다가 바이어스 전류가 증가하면 서서히 증가함을 알 수 있다. RF 전력이 증가하면 최단의 펄스를 얻기 위한 DC 바이어스는 약간 감소하는 경향을 보였다. 일반적인 전류 펄스 구동에서 알려진 것과는 달리 최단의 출력 펄스를 얻기 위한 DC 바이어스가 문턱 전류 아래가 아닌 문턱 전류 근처 및 그 이상에서 나타났다. 이 같이 높은 DC 바이어스에서 최단의 펄스가 얻어지는 실험 결과는 구동 주파수는 다르지만 다른 연구팀에 의해서도 최근에 관측된 바 있다.^[13] 출력 광펄스 폭은 주로 광펄스 발생 초기에 레이저 능동 영역내의 반송자 밀도와 이완 발진 주파수에 의해 결정되므로, 본 실험 결과는 다음과 같이 해석될 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 펄스 폭; a) DFB 레이저, b) FP 레이저

Fig. 4. Pulse widths as a function of DC bias and RF power; a) DFB laser, and b) FP laser.

즉, 너무 낮은 RF 전력에서는 RF 전력 자체만으로는 펄스 발생 초기에 충분히 크게 반전된 반송자 밀도를 얻을 수 없고, 오히려 DC 바이어스에 의한 적절한

양의 초기 반송자 밀도 유지가 광펄스 발생 초기에 더 높은 반송자 밀도 반전을 유지하는데 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 높은 DC 바이어스는 이완 발진 주파수를 높이는 결과를 가져오기 때문에 이해된다. 그러나, 너무 높은 DC 바이어스는 잘 알려진 바와 같이 능동 영역내의 광자 밀도를 증가시켜서 오히려 도달할 수 있는 최대 반송자 밀도를 낮추는 효과와 이득포화 효과를 가져오고, 이 효과가 DC 바이어스 증가에 의한 이완 발진 주파수 증가보다 크게 작용하여, 펄스 폭은 실험에서 관측된 바와 같이 DC 바이어스의 증가에 따른 감소에서 증가로 돌아서게 된다. 또한, 보다 큰 RF 전력의 증가는 음의 전류 공급 구간에서 레이저내의 반송자 밀도의 완전한 공핍에 의한 실질적인 역 바이어스 상태로 돌입하여, 공급 전류의 형태가 DC가 함유된 빗살(comb) 형태로 인식되어, 최단의 출력 펄스를 보이는 DC 바이어스 값은 보다 빠르게 감소하게 될 것이다.

한편, RF 전력이 증가하면, 그림 4에 보인 바와 같이 펄스 폭은 줄어들고 DC에 대한 의존성은 낮아짐을 알 수 있다. RF 전력이 증가함에 따라 펄스 폭이 줄어 든 것은 앞서 언급한 바와 같이 충분한 펌핑 전류에 의해 펄스 발생 초기에 반송자 밀도 반전이 크게 나타났기 때문으로 판단된다. 물론, 지나치게 큰 RF 전력의 인가는 반도체 레이저의 수명도 크게 단축하게 될 뿐만 아니라, 이완 발진 주파수의 감소를 가져와서 주기 배가(period doubling) 현상이 발생하여 더 이상 광펄스 원으로 이용하는 것이 불가능하다고 알려져 있다.^[14] RF 전력 증가에 따른 출력 펄스 폭의 DC 바이어스에 대한 의존성이 낮아지는 것은 DC 바이어스에 의해 공급되는 반송자의 영향이 상대적으로 감소되기 때문으로 판단된다.

그림 5는 최단 펄스가 나타나는 문턱 전류 근처의 DC 바이어스를 중심으로 DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 DFB 레이저의 -10 dB 광 스펙트럼 폭을 보이고 있다. RF 전력이 증가하면 반전된 최대 반송자 밀도와 이로 인한 침의 증가로 스펙트럼 폭은 급격히 증가했으며, DC 바이어스가 증가하면 반전된 최대 반송자 밀도의 감소로 서서히 감소함을 보이고 있다. 그림 6은 DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 FP 레이저의 출력 전력을 나타내는데, 두 파라미터에 대한 의존성은 DFB 레이저도 유사한 특성을 보였다. 예상된 바와 같이 DC 바이어스나 RF 전력이 증가하면 주입

반송자의 증가로 인하여 출력 전력은 증가한다. 이 결과는 이득 스위칭 출력 전력을 증가시키기 위한 방법으로서 RF 전력 증가보다는 DC 바이어스 증가가 훨씬 바람직한 방법임을 보여주는데, 이 같은 DC 증가는 반도체 레이저를 보호하여 레이저의 수명을 연장시킬 뿐만 아니라, 앞서 설명한 바와 같이 발생 가능한 펄스 속도를 증가시켜서 고 속의 이득 스위칭 펄스 발생이 가능케 한다. 그러나, 지나친 DC 바이어스 증가는 앞서 설명한 바와 같이 펄스 폭 증가를 동반하게 된다.

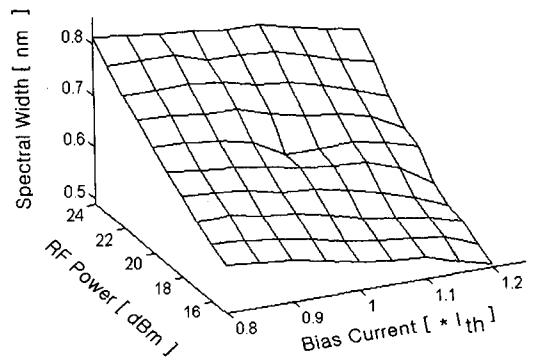


그림 5. DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 DFB 레이저의 -10 dB 광 스펙트럼 폭

Fig. 5. -10 dB spectral widths of the DFB laser as a function of DC bias and RF power.

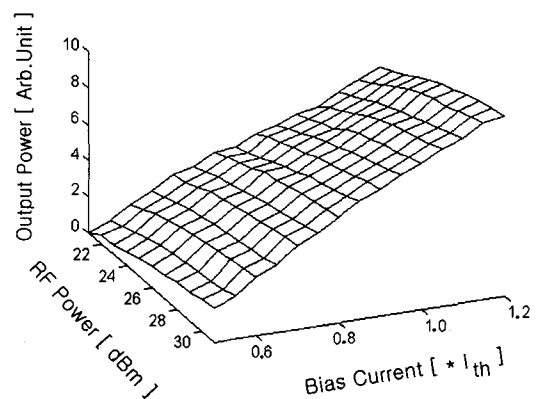


그림 6. DC 바이어스 및 RF 전력에 따른 FP 레이저의 출력 전력

Fig. 6. Output power of the FP laser as a function of DC bias and RF power.

4. RF 주파수 및 DC 바이어스에 대한 의존성

RF 전력을 26 dBm으로 고정시키고, DC 바이어스 및 RF 주파수에 따른 이득스위칭 출력의 의존성을 조

사하였다. 그림 7은 이들 두 파라미터에 따른 이득스위칭 FP 출력 펄스 폭의 변화를 보여 주고 있다. 펄스 폭은 그림 4와 유사하게 DC 바이어스가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 문턱 전류 근처 및 그 이상에서 최단의 특성을 보임을 알 수 있다. RF 주파수가 증가할수록 최단의 출력을 보이는 DC 바이어스는 증가하는데, 이 같은 현상은 3절에서 논한 바와 같은 원리로 설명할 수 있다. 즉, RF 주파수 증가에 따른 펄스 발생 주기의 증가로 반송자 소모량이 증가하여, 각 펄스 발생 초기에 충분한 반송자 밀도를 유지하기 위해서는 더 많은 배경 반송자의 공급이 필요하게되기 때문으로 생각된다. 또한, 높은 RF 주파수에서 보다 효율적인 펄스 발생을 위해서는 이완 발진 주파수의 증대가 필요한데,^[14] 이를 위해서도 DC의 증가는 바람직한 것으로 판단된다. 한편, RF 주파수가 증가하면 펄스 폭 다소 감소했는데, 이는 전류 펄스 폭의 감소 및 이완 발진의 영향 때문으로 판단된다. 이 같은 DC 바이어스 및 RF 주파수에 대한 의존성은 DFB 레이저도 유사한 특성을 보였다.

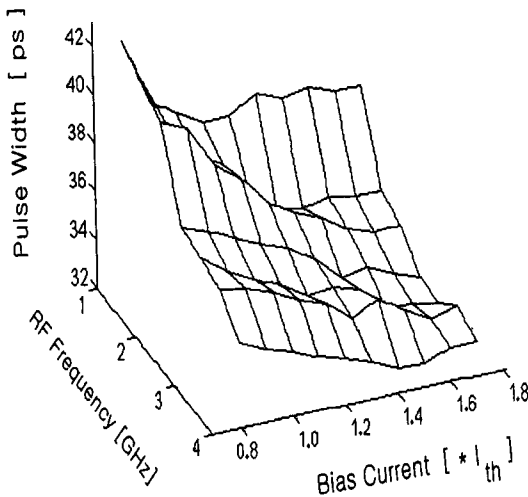


그림 7. DC 바이어스 및 RF 주파수에 따른 FP 레이저의 펄스 폭

Fig. 7. Pulse widths of the FP laser as a function of DC bias and RF frequency.

IV. 결론

이득 스위칭 레이저의 실용화를 위한 기초 연구로서, DC 바이어스, RF 정현파 전력 및 주파수의 함수로서 이득스위칭 출력 펄스의 특성을 조사하였다. 짧

은 출력을 얻기 위한 동작조건은 세 개의 파라미터 값의 변화에 따라 결정되는데, DC 바이어스 값은 일반적으로 문턱 전류 근처에서 가장 짧은 펄스 폭을 유지하였다. 그러나, RF 전력이 증가하면 이 DC 값은 감소하고, RF 주파수가 증가하면 증가하는 것으로 나타났다. 높은 DC 바이어스에서 최단의 펄스가 나타나는 것은 이득스위칭 출력의 증가와 더불어 펄스 발생 속도를 증가시킬 수 있다는 의미에서도 바람직하다. RF 전력이 너무 낮거나 RF 주파수가 높을 때 나타나는 이 같은 최단의 출력을 얻기 위한 DC 값의 증가는, 낮은 RF 또는 고속의 광펄스 발생으로 인한 배경 반송자 밀도의 부족에 대한 보충이 있어야만 보다 높은 반송자 밀도 반전을 얻을 수 있기 때문으로 판단된다. RF 전력이 증가할수록 반전된 반송자 밀도가 증가하여 보다 짧은 펄스를 발생시켰으며, DC 바이어스 변화에도 덜 민감한 펄스 폭 특성을 보였다. 그러나, 지나친 RF 전력의 인가는 레이저의 수명을 감소시킬 뿐만 아니라 펄스의 진폭을 변화시키는 펄스 발생 주기 배가 현상을 가져올 수 있다. 한편, 광 스펙트럼 폭은 RF 전력이 증가하면 칩의 증가로 급격히 증가하였으며, 문턱 전류 근처에서 DC 바이어스가 증가하면 반전된 반송자 밀도 감소 및 이득포화로 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 끝으로, RF 주파수가 증가하면 출력 펄스 폭은 서서히 감소하고, 최단의 펄스를 얻기 위한 DC 값은 증가하나 DC의 변화에 덜 민감한 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 초단 펄스 발생 및 칩 보상에 의한 펄스 압축뿐만 아니라 이득스위칭 레이저의 직접변조, 등의 응용분야에 기초자료로 활용되리라 판단된다.

참고 문헌

[1] I. Morita, M. Suzuki, N. Edgawa, S. Yamamoto, H. Taga, and S. Akiba, "20-Gb/s single-channel soliton transmission over 9000 km without inline filters", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 11, pp. 1573-1575, Nov. 1996.

[2] K. Suzuki, K. Iwatsuki, S. Nishi, M. Saruwatari, and T. Kitoh, "160 Gb/s sub-picosecond transform-limited pulse signal generation utilizing adiabatic soliton compression and optical time-division

- multiplexing”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 352-354, Mar. 1994.
- [3] S. W. Corzine, J. E. Bower, G. Przyblek, U. Koren, B. I. Miller, and C. E. Soccolich, “Actively mode-locked GaInAsP laser with subpicosecond output”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 1, pp. 348-350, Feb. 1988.
- [4] K. Y. Lau, “Gain switching of semiconductor injection lasers”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 4, pp. 257-258, Jan. 1988.
- [5] H. F. Liu, Y. Ogawa, and S. Oshiba, “Generation of an extremely short single mode pulse (~ 2 ps) by fiber compression of a gain-switched pulse from a 1.3 μm distributed feedback laser diode,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 11, pp. 1284-1286, Sept. 1991.
- [6] Y. C. Lee, and C. Chu, “Wavelength-tunable nearly transform-limited pulse generation by self injection-seeding of a laser diode at an arbitrary repetition rate”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 590-592, May 1997.
- [7] K. A. Ahmed, K. C. Chan, and H. F. Liu, “Femtosecond pulse generation from semiconductor laser using the soliton-effect compression technique”, *IEEE Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 1, no. 2, pp. 592-600, Jun. 1996.
- [8] M. Schell, W. Utz, D. Huhse, and D. Bimberg, “Low jitter single-mode pulse generation by a self-seeded, gain-switched Fabry-Perot semiconductor laser”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 24, pp. 3045-3047, Dec. 1994.
- [9] D. S. Seo, H. F. Liu, and D. Y. Kim, “Timing jitter reduction of a gain-switched DFB laser by external-injection seeding,” *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 1, pp. 44-45, Jan. 1996.
- [10] D. S. Seo, and R. S. Kim, “Wavelength-tunable nearly transform-limited pulse generation from an injection-seeded gain-switched Fabry-Perot laser”, *J. Electrical Engr. & Inform. Science*, vol. 1, no. 4, pp. 59-64, Dec. 1996.
- [11] 김운중, 김동각, 김창민, “LD Gain-switching에 의한 초단 광펄스 발생 해석”, *전자공학회논문지*, 제34권, D편, 제10호, pp. 85-92, 1997년 10월
- [12] 명승일, 이상훈, 이명우, 서동선, 권근범, 김란숙, “이득 스위칭 반도체 레이저의 특성”, *Proc. Photonics Conference '97*, pp. 233-234, 1997년 11월
- [13] 조성대, 이창희, 신상영, 김근영, 채창준, “DFB LD 이득 스위칭과 광펄스 압축”, *Proc. Photonics Conference '97*, pp. 299-300, 1997년 11월
- [14] 조성대, 이창희, 신상영, 채창준, “반도체 레이저의 이득 스위칭이 생성 가능한 최소 펄스 폭”, *Proc. Photonics Conference '97*, pp. 339-340, 1997년 11월
- [15] 명승일, 이상훈, 서동선, 김남, “이득 스위칭 반도체 레이저의 직접 변조에 의한 RZ 데이터 발생”, *한국통신학회논문지*, 23권 3호, pp. 613-622, 1998년 3월
- [16] H. F. Liu and W. F. Ngai, “Nonlinear dynamics of directly modulated 1.55 μm InGaAsP distributed feedback laser”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1668-1675, Jun. 1993.

저 자 소 개



李尙勳(正會員)
 19972년 3월 18일생. 1997년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 3월 ~ 현재 명지대학원 전자공학과 석사과정. 주관심 분야는 반도체 레이저의 이득 스위칭 및 직접 펄스 변조, 광섬유 증폭기, 광통신 등임



明承一(正會員)
 1970년 9월 1일생. 1997년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 3월 ~ 현재 명지대학원 전자공학과 석사과정. 주관심 분야는 반도체 레이저의 이득 스위칭 및 직접 펄스 변조, OTDM 광수신기, 광통신 등임



李明雨(正會員)
 1966년 1월 30일생. 1990년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 2월 명지대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 3월 ~ 현재 명지대학원 전자공학과 박사과정. 1996년 3월 ~현재 동원공업전문대학 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 광소자 및 광 시스템 모델링, 광 솔리톤 전송 분석, 광통신 등임

분야는 광소자 및 광 시스템 모델링, 광 솔리톤 전송 분석, 광통신 등임

徐東善(正會員) 第33卷 D編 第3號 參照
 현재 명지대학교 전자공학과 부교수