

이득 스위칭 반도체 레이저의 직접 변조에 의한 RZ 데이터 발생

正會員 명 승 일*, 이 상 훈*, 서 동 선*, 김 남**

RZ Data Generation by Direct Modulation of a Gain-Switched Semiconductor Laser

Seung-Il Myong*, Sang-Hoon Lee*, Dong-Sun Seo*, Nam Kim** *Regular Members*

※본 연구는 정보통신연구관리단이 지원(96040-CT-11)하는 대학기초연구사업 연구결과의 일부임.

요 약

본 논문에서는 이득 스위칭 반도체 레이저의 직접 변조에 의한 1 Gbps RZ 데이터 펄스 발생에 관한 수치적 분석 및 실험 결과를 발표한다. 데이터의 패턴 의존 효과를 제거하기 위해, DC 바이어스, NRZ 데이터, 및 RF 신호 전류로 적절히 조합된 전류 파형으로 레이저를 동작시켰다. 각 전류 성분의 변화가 변조 출력에 미치는 영향을 탐구하여 최적 값을 결정하였다. 출력의 눈 패턴은 DC 바이어스 및 NRZ 데이터 전류 변화에 민감한 것으로 나타났으며, RF 신호 전류에는 비교적 덜 민감하게 나타났다.

ABSTRACT

We present our numerical and experimental results of 1 Gbps return-to-zero data pulse generation by direct modulation of a gain-switched semiconductor laser. To eliminate data pattern dependent effects, the laser is operated by a current waveform which deliberately combines DC bias, RF sinusoidal, and NRZ data currents. The effects of change in each current component on the modulated output are explored and the optimum value of the current is determined. Our results show that the eye pattern of the output is more sensitive to the DC bias and NRZ data current and relatively less sensitive to the RF current.

*명지대학교 전자공학과
**충북대학교 정보통신공학과
論文番號: 97326-0911
接受日字: 1997年 9月 11日

I. 서 론

초단 펄스의 변조에 의한 RZ(return-to-zero) 데이터 발생 기술은 광학적 시분할다중화(OTDM)에 의한 초고속 광통신 시스템뿐만 아니라 광솔리톤에 의한 장거리 정보전송 시스템의 핵심 기술로 인식되어 왔다. 고속의 초단 펄스 원으로는 이득 스위칭 반도체 레이저나 모드잠김 반도체 레이저가 많이 이용되어 왔다. 이득 스위칭 레이저는 모드잠김 레이저와 달리 외부거울이나 모드잠김 소자가 필요 없는 간단한 시스템으로 구성되며 임의의 속도로 펄스를 발생시킬 수 있다는 장점이 있는 반면, 모드잠김 레이저는 펄스발생 시간요동(timing jitter)이 낮고 이득 스위칭 같은 주파수첩핑(chirping)이 존재하지 않는다는 장점이 있다.^{1),2)} 일반적으로 이 같이 발생된 초단 펄스열(pulse train)에 정보를 실기 위해서는 외부 변조기가 필요한데, 이는 데이터 발생기의 가격을 비싸게 할뿐만 아니라 시스템의 소형화를 위한 집적화도 불가능하게 한다. 한편, 일반적인 개폐(on-off) 전류에 의한 반도체 레이저의 직접 변조는 보상이 매우 어려운 비선형 칩을 유기시킬 뿐만 아니라, 출력도 OTDM이 불가능한 NRZ(non-return-to-zero) 변조 형태를 갖게 된다. 광원과 변조기의 집적화가 중요한 문제로 대두되고 펄스 변조 및 OTDM에 기초한 초고속 솔리톤 데이터 전송에 관한 연구관심이 높아짐에 따라, 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 의한 초단 RZ 신호 발생 방법은 많은 주목을 받게 되었다.³⁾ 그러나, 유망한 잠재 능력에도 불구하고 이득 스위칭 레이저의 직접 변조는 이전 데이터의 유무("1" 또는 "0")에 따른 커다란 패턴 의존 효과(pattern dependent effect)로 인하여 비트 오류율(BER)이 크게 증가할 수 있다. 이에 따라, 레이저에 주입되는 전류의 파형을 적절히 조절함으로써 이 같은 패턴 의존 효과를 제거시키고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. Tucker 등은⁴⁾ 적절한 DC 바이어스 아래 RF 신호를 개폐 스위칭 하는 방법을 택했고, Habara 등은⁵⁾ DC 성분을 포함한 RF 신호의 진폭을 변조하는 방식을 택하여 패턴 효과가 억제된 직접 변조 출력을 얻었으며, O'Dowd 등은⁶⁾ 주입 전류의 폭을 조절함으로써 2개 및 3개 준위의 직접 변조 펄스를 얻었다. 그러나, 이들 방식은 "1"과 "0" 데이터 스위칭을 위해 전자 소자들을 사용함으로써 RZ

신호 발생 속도가 전자 소자의 속도에 의해 제한되는 단점을 갖게 되었다. Cahill 등은⁶⁾ 적절히 DC 바이어스된 레이저에 RF 정현파 전류와 NRZ 데이터 전류를 RF 결합기로 결합시킨 신호를 주입시킴으로서 스위치의 필요성을 제거시켰을 뿐만 아니라, 외부 변조기와 유사한 BER 성능을 갖는 변조신호를 얻은 바 있다. 앞으로 이 패턴 효과의 축소 및 구동 파라미터에 대한 민감성 완화에 의한 시스템의 안정성 증진, 변조 출력 펄스의 압축 및 OTDM에 의한 초고속 데이터 발생, 등에 대한 연구가 활발히 이루어질 것으로 예측된다.

본 연구에서는 Cahill 등이 시도한 바와 유사하게, RF 신호, NRZ 데이터, 및 DC 전류를 적절히 합한 변조 파형을 레이저에 인가함으로써 직접 변조를 이룩하고자 한다. 이를 위해, 직접 변조 파형의 각 구성 전류 값의 변화가 RZ 변조 출력에 미치는 영향을 분석하고 최적 전류 값을 결정한다. 즉, 간단한 비율 방정식(rate equation)에서 출발하여 이득 스위칭 반도체 레이저의 직접 변조에 의한 RZ 펄스 발생의 최적 조건-즉, DC 바이어스, RF 정현파, 및 NRZ 디지털 데이터 전류들의 값-을 모의 실험을 통하여 도출하고, 이를 실험을 통하여 확인한다. 우선 2장에서는 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 의한 RZ 신호 발생의 원리를 설명하고, 3장에서는 각 변조 전류 값의 변화에 따른 RZ 변조 출력의 의존성 및 최적 조건을 모의 실험을 통하여 조사한다. 4장에서는 최적의 변조 전류 파형을 레이저에 직접 인가하여, 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 의한 눈 패턴이 깨끗한 초단 RZ 데이터를 발생시키고, 모의 실험에서 예측된 각 변조 전류 성분에 대한 눈 패턴의 의존성을 확인한다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 이득 스위칭 레이저의 직접 변조 원리

반도체 레이저에 큰 전류 펄스를 인가하면, 초기 광자 밀도 증가율이 매우 낮아 반송자(carrier) 밀도는 분턱 값보다 훨씬 크게 되고, 이에 따라 매우 큰 광자 이득을 갖게 되어, 광자 밀도는 급격히 증가하게 된다. 그러나, 충분히 크게 증가된 광자 밀도는 반송자 밀도를 급격히 공핍(depletion)시켜, 반송자 밀도를 분턱 값 이하로 떨어뜨리고, 광자 밀도는 급격히 감소

하게 된다. 이때, 더 이상의 전류를 공급하지 않으면, 추가 발전이 없는 초단 펄스를 얻을 수 있다. 즉, 반도체 레이저에 충분히 짧은 전류 펄스를 인가하여 출력의 이완 발전(relaxation oscillation)의 첫 번째 빗살(spike)만을 여기 시키고 나머지는 여기 되지 않도록 하면, 수 10 피코초의 초단 이득 스위칭 펄스를 쉽게 얻을 수 있다. 이와 같이 이완 발전의 첫 번째 빗살만을 취하기 때문에 이득 스위칭 펄스의 모양은 인가된 전류 펄스의 모양에는 무관하게 가우시안(Gaussian) 형태를 갖게 된다. 이 같은 이득 스위칭 레이저에서는 그림 1의 실선에 보인바와 같이 인가 전류, 반송자 밀도, 및 광자 밀도의 변화가 매 전류 주기마다 똑같은 형태를 보이게 된다. 만약, 그림 1의 점선에 보인 바와 같이 각 펄스 주기 구간에서 전류 펄스의 유무와 무관하게 처음과 끝에서 똑 같은 반송자 밀도를 유지할 수만 있다면, 전류 펄스가 존재하는 "1"을 나타내는 구간에서는 이득 스위칭의 경우와 똑 같은 형태의 광자 밀도(즉, 광 출력)가 나타나고, 전류 펄스가 없는 "0"인 각 구간에서는 반송자 밀도가 문턱 값 아래 머물러 광 출력은 나타나지 않게 된다. 즉, 디지털

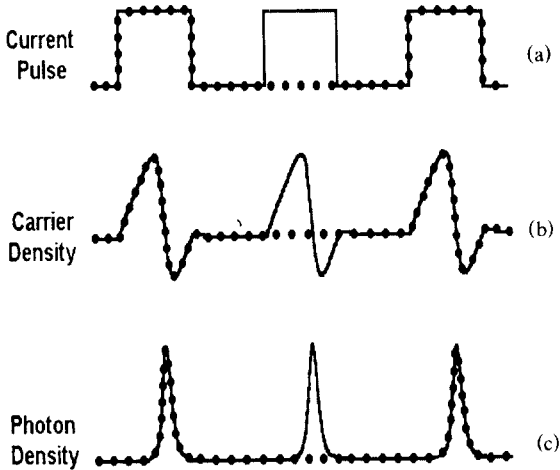


그림 1. 반도체 레이저의 일반적인 이득 스위칭(실선)과 직접 펄스 변조(점선)의 비교: a) 주입 전류, b) 반송자 밀도, c) 광자 밀도

Fig. 1 Comparison of common gain-switching (solid lines) and direct pulse modulation (dotted lines) of a semiconductor laser: a) injection current, b) carrier density, and c) photon density.

데이터의 유무에 무관하게 각 비트 구간의 처음과 끝에서 똑 같은 반송자 밀도를 유지하도록 인가 전류 파형을 선택하면, 데이터의 유무에 따른 패턴 의존 효과가 없는 직접 RZ 변조된 짧은 이득 스위칭 펄스를 발생시킬 수 있다.

패턴 효과를 없애기 위해 시도된 몇 가지의 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 Tucker 등에^[3] 의해 시도된바 있는데, 데이터가 있는 구간에서만 스위치를 이용하여 RF 전류를 인가하고 없는 구간에서는 반송자의 재결합에 의한 자연 감소를 보충할 수 있을 만큼의 DC 전류를 인가하였다. 이 방법의 단점은 매 비트 구간의 처음과 끝에서 동일한 반송자 밀도를 유지하는 조건이 매우 까다로운 단점과 고속의 스위치가 필요하다는 단점이 있다. 그림 2(b)는 Habara 등에^[4] 의해 시도된바 있는 RF 진폭 변조 방법

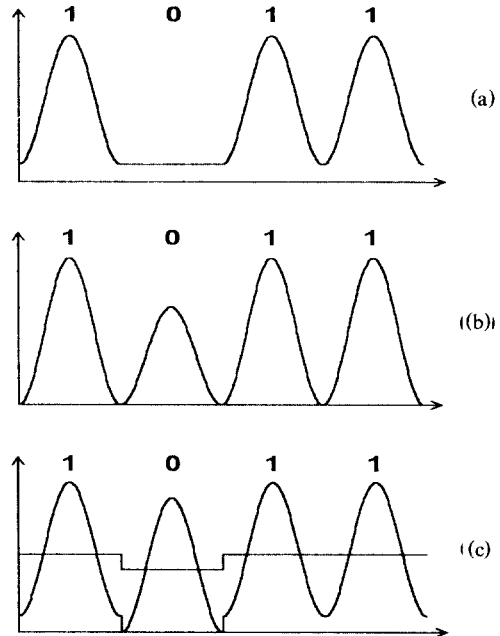


그림 2. 이득 스위칭 레이저의 직접 변조를 위한 주입 전류 형태: a) RF 개폐 변조, b) RF 진폭 변조, c) RF와 NRZ 데이터 혼합

Fig. 2 Current waveforms for direct modulation of a gain-switched laser: a) on-off RF modulation, b) RF amplitude modulation, and c) RF and NRZ data summation.

인데, 스위치를 이용하여 "1"인 경우에는 진폭이 큰 RF 신호를 인가하여 이득 스위칭 펄스를 발생시키고, "0"인 경우에는 반송자의 자연 감소량만을 보상하는 정도의 진폭이 작은 RF 신호를 인가하여 레이저의 발진이 일어나지 않도록 했다. 동일한 반송자 밀도를 유지하기 위한 조건은 완화되나 고속의 스위치가 필요한 단점은 그대로 존재한다. 마지막으로 그림 2(c)는 Cahill 등에⁶⁾ 의해 시도된 바 있는데, 고속의 스위치 없이 단순히 RF 결합기에 의해 RF 신호와 NRZ 데이터 신호를 더한 AC 신호를 AC/DC 결합소자(bias tee)를 통하여 DC 전류와 함께 인가해 줌으로서 전자 소자의 필요성을 제거했으며, 외부 변조기를 사용한 경우와 유사한 BER 특성을 갖는 변조 출력을 얻은 바 있다. 그 이외에도 그림 2 (b)와 (c)를 합한 방법이 검토된 바 있으나 시스템이 복잡하여 오히려 3 (c)의 방법보다 덜 효과적인 것으로 판명된 바 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 그림 2(c)와 같은 DC, RF, NRZ 데이터 전류가 적절히 합해진 파형을 이용하였다.

III. 모의 실험 및 고찰

모의 실험에서는 다음과 같은 반송자 밀도와 광자 밀도가 결합된 미분방정식으로 주어지는 전형적인 레이저 비율 방정식을 이용하였다.⁸⁾

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (G - \gamma)P + R_{sp} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = I/q + \gamma_e N - GP \quad (2)$$

여기서 P는 광자 밀도, G는 이득, γ 는 광자 손실, R_{sp} 는 자연 방출 요소, N은 전자 밀도, I는 단위 체적당 주입 전류, q는 전하량, γ_e 는 반송자 결합률이다. 식(1)과 (2)에서 사용한 각 파라미터 결정 수식은 참고문헌 [8]을 이용하였으며, 각 계수는 참고문헌 [9]에 주어진 값을 사용하였다.

주입 전류는 DC 바이어스, RF 정현파, 및 NRZ 디지털 데이터의 3가지 전류 성분으로 구성되므로, 각각의 전류 성분 값을 변화시키면서 P와 N에 대한 식(1)과 (2)의 해를 수치적인 방법으로 구했다. RF 주파수는 1 GHz로 가정하였으며, NRZ 데이터는 1 Gbps의 2⁷-1 준 불규칙 비트 순서(PRBS)를 이용하였다.

이득 스위칭 레이저의 동작 조건을 고려하여, DC 바이어스는 문턱 전류 값을 중심으로 문턱 전류의 0.6배에서 0.9배까지 변화시켰으며, RF 전류 진폭은 통상의 이득 스위칭 전력(20 dBm~30 dBm)을 고려하여 문턱 전류의 3.5배에서 7.0배까지, NRZ 디지털 데이터 전류의 진폭은 DC 바이어스 변화 범위를 고려하여 문턱 전류의 0.2배에서 0.5배까지 변화시키면서, 변조 출력의 특성을 조사하여 최적 전류 값을 구하고자 하였다.

그림 3은 RF 진폭(I_{RF})이 문턱 전류(I_{th})의 5.1배이고 NRZ 데이터 진폭(I_{DR} : 침두치간 간격의 1/2)이 문턱 전류의 0.3배인 조건에서, DC 바이어스(I_{DC})의 변화에 따른 RZ 변조 출력의 눈 패턴(eye pattern)을 보이고 있다. I_{DC} 값이 너무 낮은 $I_{DC} = 0.65 I_{th}$ 인 경우에는 그림 3(a)에 보인 바와 같이 발생된 펄스의 폭도 넓을 뿐만 아니라, 패턴 효과에 따라 펄스 진폭 및 시간 요동(jitter)이 아주 심함을 알 수 있다. 이는, 반송자 공급 부족으로 인한 펄스 폭 증가와 데이터 "0"이 계속되는 수에 따라 "1"인 구간의 초기 반송자 밀도 변동에 기인한 것으로 판단된다. $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 의 최적 조건에서는 그림 3(b)와 같이 진폭 및 시간 요동이 거의 없는 깨끗한 눈 열림(eye opening)을 볼 수 있을 뿐만 아니라, "1"을 나타내는 펄스도 폭이 ~30 피코초의 가우시안 형태로서 "1"만이 계속되는 경우에 해당하는 전형적인 이득 스위칭 펄스와 매우 유사함을 확인

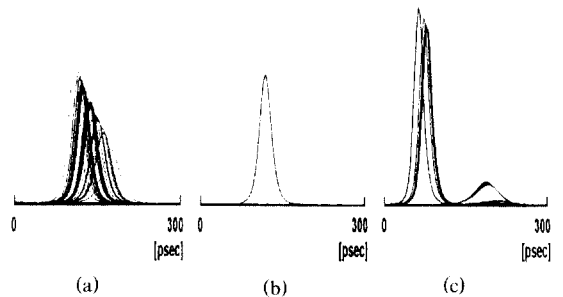


그림 3. $I_{DR} = 0.3 I_{th}$ 및 $I_{RF} = 5.1 I_{th}$ 일 때, I_{DC} 에 따른 RZ 변조 출력의 눈 패턴; a) $I_{DC} = 0.65 I_{th}$, b) $I_{DC} = 0.74 I_{th}$, c) $I_{DC} = 0.9 I_{th}$.
 Fig. 3 Eye patterns as a function of I_{DC} at $I_{DR} = 0.3 I_{th}$ and $I_{RF} = 5.1 I_{th}$; a) $I_{DC} = 0.65 I_{th}$, b) $I_{DC} = 0.74 I_{th}$, c) $I_{DC} = 0.9 I_{th}$.

하였다. 한편, $I_{DC} = 0.9 I_{th}$ 로서 주입 전류가 너무 큰 경우에는 펄스 폭은 최적의 경우와 유사하나, 펄스 진폭 및 시간 요동이 비교적 클 뿐만 아니라 데이터가 "0"인 구간에서도 "1"인 주 펄스 보다 지연된 시간에 작은 펄스가 나타났다. 그러나, 그림 3(c)에 보인 바와 같이 그림 3(a) 보다는 훨씬 양호한 특성을 보였다. 이는 같은 양의 I_{DC} 변화라 해도 최적 값보다 큰 경우에는, 반송자가 광 출력으로 소모되어, 작은 경우보다 각 비트의 초기 반송자 밀도에 미치는 영향이 작기 때문으로 판단된다. 한편 이완 발전에 의한 두 번째 빛살은 $I_{DC} = 1.0 I_{th}$ 까지도 나타나지 않았다.

그림 4는 $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 이고 $I_{RF} = 5.1 I_{th}$ 일 때, NRZ 전류 진폭 I_{DT} 의 변화에 따른 RZ 변조 출력의 눈 패턴을 보여주고 있다. I_{DT} 값이 $0.2 I_{th}$ 로서 너무 낮은 경우에는 그림 4(a)에 보인 바와 같이, 데이터의 유무에 따라 미약하지만 "0"인 구간에도 펄스가 나타나기 시작할 뿐만 아니라, "1"인 구간에서도 펄스 폭 증가와 큰 펄스 진폭 및 시간 요동이 나타났다. 이는 I_{DT} 값의 감소로 "1"과 "0"의 구분이 미약해져서, "0"인 구간에서는 충분히 작은 전류를 공급하지 못했고 "1"인 구간에서는 반대로 충분히 큰 전류를 공급하지 못했기 때문이다. I_{DT} 값이 $0.45 I_{th}$ 로서 너무 큰 경우에는 "0"인 구간에서 충분한 전류 감소로 펄스가 나타나지는 않았으나, 그림 4(c)에 보인 바와 같이 "1"인 구간에서는 펄스 폭의 변화가 큰 펄스가 나타날 뿐만 아니라, 펄스의 진폭 및 시간 요동이 매우 크게 나타

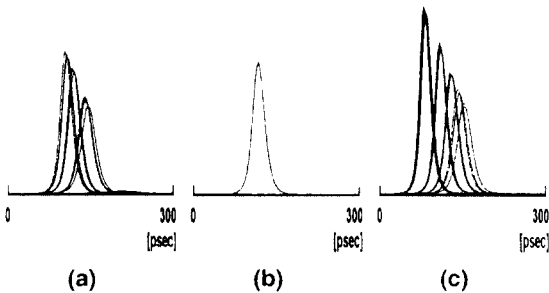


그림 4. $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 및 $I_{RF} = 5.1 I_{th}$ 일 때, I_{DT} 에 따른 RZ 변조 출력 눈 패턴; a) $I_{DT} = 0.2 I_{th}$, b) $I_{DT} = 0.3 I_{th}$, c) $I_{DT} = 0.45 I_{th}$

Fig. 4 Eye patterns as a function of I_{DT} at $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ and $I_{RF} = 5.1 I_{th}$; a) $I_{DT} = 0.2 I_{th}$, b) $I_{DT} = 0.3 I_{th}$, c) $I_{DT} = 0.45 I_{th}$.

났다. 그림 3(c)와는 매우 다르게 나타났는데, 이는 큰 IDT를 인가할 수록 레이저에 큰 불균형 교란(perturbation)을 줄뿐만 아니라 "0"인 구간에서는 그림 3(a)와 같은 DC 전류 감소 효과를 동반하기 때문으로 판단된다. 즉, 각 비트 구간의 처음과 끝에서 동일한 반송자 밀도를 갖는 정상 상태의 동작을 어렵게 할뿐만 아니라, "0"인 구간에서 반송자의 공급 부족으로 계속되는 "0"의 수에 따라 큰 진폭 요동 및 시간 요동이 나타나기 때문으로 판단된다. 그림 4(b)는 I_{DT} 값이 $0.3 I_{th}$ 로서 최적인 경우를 다시 보이고 있다.

그림 5는 $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 이고 $I_{DT} = 0.3 I_{th}$ 일 때, RF 전류 진폭 I_{RF} 의 변화에 따른 RZ 변조 출력의 눈 패턴을 보여주고 있다. I_{RF} 값이 $3.5 I_{th}$ 로서 너무 낮은 경우에는 그림 5(a)에 보인 바와 같이 펄스 폭이 넓은 뿐만 아니라 펄스 진폭 및 시간 요동이 아주 크게 나타났으며, I_{RF} 값이 $7.0 I_{th}$ 로서 너무 큰 경우에는 그림 5(c)에 보인 바와 같이 펄스 폭은 좁으나 펄스 진폭 및 시간 요동이 비교적 크고 "0"인 구간에서도 미약한 펄스가 "1"인 펄스보다 지연된 시점에서 나타나기 시작했다. 이 같이 RF 전류의 변화가 미치는 영향이 그림 3에 보인 DC 전류가 미치는 영향과 매우 유사하게 나타난 것은 RF 변화가 모든 비트 구간에 똑 같은 영향을 미쳐서 정상 상태에 쉽게 이르게 할뿐만 아니라, "1"인 구간에서 주입되는 전류 증가 효과가 이득 스위칭 레이저의 특성에 의해 구동 전류 파형의 형태에 거의 무관하게 출력에 나타나기 때문으로 판단된다.

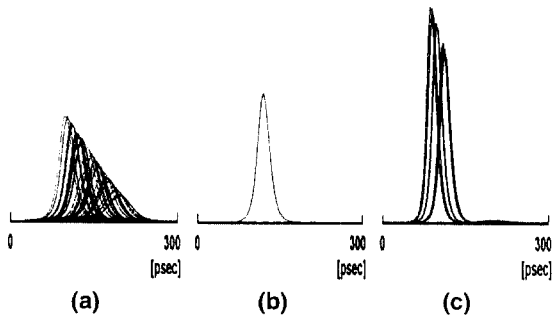


그림 5. $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 및 $I_{DT} = 0.3 I_{th}$ 일 때, I_{RF} 에 따른 RZ 변조 출력 눈 패턴; a) $I_{RF} = 3.5 I_{th}$, b) $I_{RF} = 5.1 I_{th}$, c) $I_{RF} = 7 I_{th}$

Fig. 5 Eye patterns as a function of I_{RF} at $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ and $I_{DT} = 0.3 I_{th}$; a) $I_{RF} = 3.5 I_{th}$, b) $I_{RF} = 5.1 I_{th}$, c) $I_{RF} = 7 I_{th}$.

다. 그러나, 그림 4에서 설명한 바와 같이 데이터 전류의 변화는 같은 전류의 변화라도 각 비트마다 불규칙한 변화를 의미하며, 이는 정상 상태에 이르는 안정성을 방해하여 매우 다른 결과를 가져올 수 있다.

각 전류 성분에 대한 직접 RZ 변조된 출력의 의존성을 수치 값으로 나타내기 위해, 변조된 출력 펄스의 절대진폭요동 ΔH 및 시간요동 ΔT 를 각각 그림 6과 같이 정의하였다. 통상의 진폭요동 값은 평균 진폭(H)으로 정규화하여 $\Delta H/H$ 로 정의했다. 이 진폭 및 시간 요동($\Delta H/H$ 및 ΔT) 값은 변조 펄스의 눈 패턴의 잠김양을-즉, OTDM을 할 경우 전체 시스템의 최대 속도를-결정하는 주요 요소가 된다.

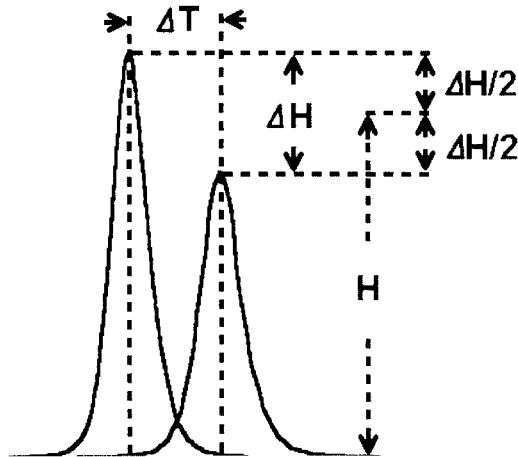
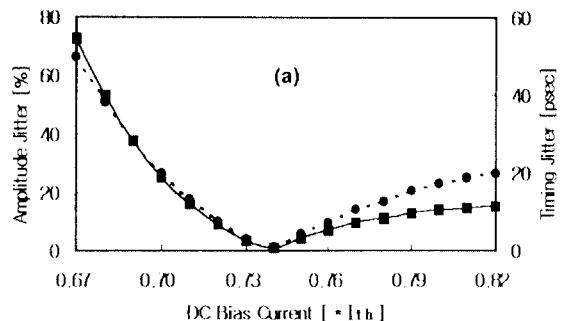


그림 6. 첨두치의 평균 값(H), 절대 진폭 요동(ΔH), 및 시간 요동(ΔT)의 정의

Fig. 6 Definitions of the averaged pulse height (H), absolute amplitude jitter (ΔH), and timing jitter (ΔT).

그림 7은 그림 3~5의 분석을 수치 값으로 종합한 것으로서, 최적 값을 중심으로 3개의 전류 성분(I_{DC} , I_{DT} , 및 I_{RF})의 변화에 따른 직접 변조 출력의 $\Delta H/H$ 와 ΔT 를 보여주고 있다. 표본화된 데이터 수의 제한에 의해 그림 7에서 진폭 및 시간 요동의 분해능은 대략 1% 및 1 피코초이다. 그림 7(a)는 $I_{RF} = 5.1 I_{th}$ 및 $I_{DT} = 0.3 I_{th}$ 에서 최적 I_{DC} 값을 중심으로 I_{DC} 에 따른 $\Delta H/H$ 와 ΔT 를 보여주고 있는데, 그림 3에서 설명한 이유에 의해 I_{DC} 가 증가함에 따라 두 값은 급격히 감소하여 최소점에 이르렀다가 서서히 증가함을 알 수

있다. $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 인 최적조건에서 진폭 및 시간 요동 값은 각각 표본화 분해능에 의해 제한된 값을 보임으로서, 변조되지 않은 이득 스위칭의 경우와 유사하게 나타났다. 그림 7(b)는 $I_{RF} = 5.1 I_{th}$ 및 $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 에서 I_{DT} 에 따른 $\Delta H/H$ 와 ΔT 를 보여주고 있다. 그림 4에서 논한 바와 같이 최적 값에서 I_{DT} 가 감소하면, DC 감소효과에서 나타나는 바와 같은 "1"인 구간에서 펄스 폭 증가를 동반하는 큰 진폭 및 시간 요동 특성을 보이게 되고, "0"인 구간에서는 미약한 펄스가 나타나기 시작한다. 한편, I_{DT} 가 증가하면 불규칙 교란의 증가 및 "0"인 구간의 연속에 따른 반송자 밀도 감소로 인하여 I_{DT} 가 감소할 때와 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 그림 7(c)는 $I_{DC} = 0.74 I_{th}$ 및 $I_{DT} = 0.3 I_{th}$ 에서 I_{RF} 에 따른 $\Delta H/H$ 와 ΔT 를 보여주고 있는데, 그림 3과 5에서 예측된 바와 같이 그림 7(a)와 매우 유사한 특성을 보이고 있다. 그림 7에서 각 전류 성분이 출력 특성에 미치는 민감도를 예측할 수 있는데, DC 및 NRZ 데이터 전류의 변화에 민감하고, RF 전류 변화에는 비교적 덜 민감함을 알 수 있다. 이는 DC와 NRZ 전류는 각 비트 구간에서 배경 반송자 밀도를 결정하는 주요 요소로서 펄스의 진폭 및 시간 요동에 크게 영향을 미치나, RF 전류는 규칙적으로 반복됨으로서 시간요동에 영향을 덜 미치기 때문으로 판단된다. 최적 동작 조건은 3개의 전류 성분 값의 조합에 의해 결정되기 때문에, 어느 하나의 전류 조건이 바뀐다 해도 다른 두 전류 성분 값을 적절히 조절하면 유사한 최적의 출력 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다.



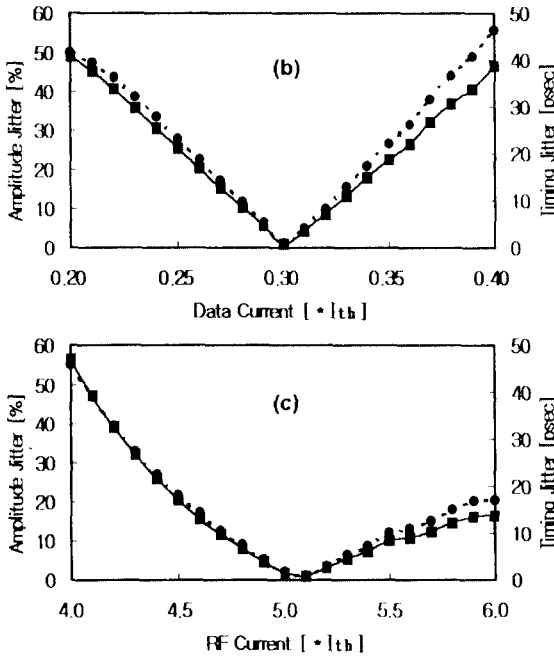


그림 7. a) I_{DC} , b) I_{DT} , 및 c) I_{RF} 에 따른 진폭(네모) 및 시간(원) 요동
 Fig. 7 Amplitude (rectangles) and timing (circles) jitters as a function of a) I_{DC} , b) I_{DT} , and c) I_{RF} .

IV. 실험 결과 및 고찰

이상의 모의 실험 결과를 토대로 직접 변조된 이득 스위칭 펄스를 발생시키기 위한 실험 장치를 그림 8에 보인 바와 같이 구현하였다. 문턱 전류 10 mA의 $1.55\mu\text{m}$ 반도체 레이저에 43Ω 의 저항을 직렬로 연결하여 고주파 임피던스 정합을 도모하였다. RF 결합기를 이용하여 1 GHz RF 신호와 1 Gbps $2^{23}-1$ 의 PRBS NRZ 데이터를 합한 직접 변조신호를 구현하고, 이를 AC/DC 결합기를 이용하여 DC 바이어스와 함께 레이저에 인가하였다. 직접 변조된 출력은 고속의 검출기(대역폭: 45 GHz)와 샘플링 스코프로 관측하였다. 패턴 효과가 거의 보이지 않는 최적의 RZ 변조된 출력은 DC 바이어스 7.5 mA, RF 결합기에 인가되는 RF 전력 및 NRZ 데이터의 진폭이 각각 28 dBm과 0.45 V에서 관측되었다. 약 3 dB 정도의 RF 결합기 및 AC/DC 결합기의 연결 손실을 고려하면, 이 값은 직렬로 연결된 43Ω 저항과 레이저에 25 dBm

의 RF 전력(즉, 진폭 79 mA의 RF 전류)과 진폭 0.32 V의 NRZ 데이터 전압(즉, 진폭 6.4 mA의 NRZ 데이터 전류)가 인가된 것에 해당하나, 고주파 반사에 의해 실제 인가된 값은 이보다 낮을 것으로 예측된다.

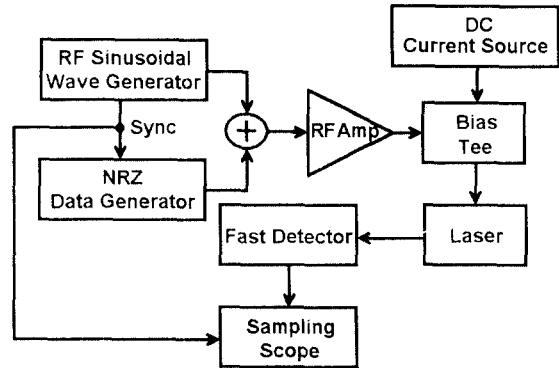


그림 8. 이득 스위칭 레이저의 직접 변조를 위한 실험 장치
 Fig. 8 Experimental set-up for direct modulation of a gain-switched laser.

그림 9는 최적 조건을 중심으로 DC 바이어스 변화에 따른 직접 변조 이득 스위칭 출력을 보여주고 있다. 그림 9(a)는 $I_{DC} = 6\text{ mA}$ ($0.6 I_{th}$)인 경우로서, 이론적인 분석에서 예측된 바와 같이 너무 낮은 바이어스 전류로 인한 반송자 공급 부족으로, 펄스 폭도 넓고 진폭 및 시간 요동이 큰 심각한 패턴 의존 효과가 출력에 나타났다. $I_{DC} = 7.5\text{ mA}$ ($0.75 I_{th}$)의 최적 DC 바이어스 조건에서는 그림 9(b)에 보인 바와 같이 거의 완벽한 눈 패턴의 열림이 관측되었다. 이 최적 조건에서, "1"인 경우에만 나타나는 데이터 펄스는 ~ 40 피코초의 가우시안 형태로서, 최적 DC 바이어스에서 25 dBm 정도의 1 GHz RF 전력으로 이득 스위칭 시킨 펄스열의 형태를 그대로 유지하였다. 측정된 ~ 40 피코초의 펄스 폭은 검출기와 샘플링 스코프의 응답 시간을 고려할 때, 이론에서 예측된 ~ 30 피코초의 펄스 폭과 매우 유사한 것으로 판단된다. 한편, $I_{DC} = 9\text{ mA}$ ($0.9 I_{th}$)로 너무 큰 바이어스 전류를 인가하면, 그림 9(c)에 보인 바와 같이 펄스 폭은 좁으나 타이밍 지터가 증가할 뿐만 아니라 데이터가 "0"인 구간에서도 미약한 펄스가 "1"인 주 펄스 발생시간보다 뒤쪽에 시간 지연되어 나타났다. 이 같은 시간 지연된 미

약한 광전력 발생은 데이터가 "0"인 구간에서도 배경 반송자 밀도의 증가에 힘입어 양(+)의 RF 전류 공급 구간 끝 부근에서 반송자 밀도가 문턱 값을 넘게 되기 때문이다. 끝으로, DC 증가는 출력 전력 증가로 이어져서 그림 9에 나타난 바와 같이 출력 펄스의 전력은 점점 증가한다. RF 및 NRZ 전류 값이 다소 다를 수는 있으나, 그림 9의 변조 출력 눈 패턴의 모양 및 DC 전류 의존성은 이론적인 분석에서 보인 그림 3과 잘 일치함을 알 수 있다.

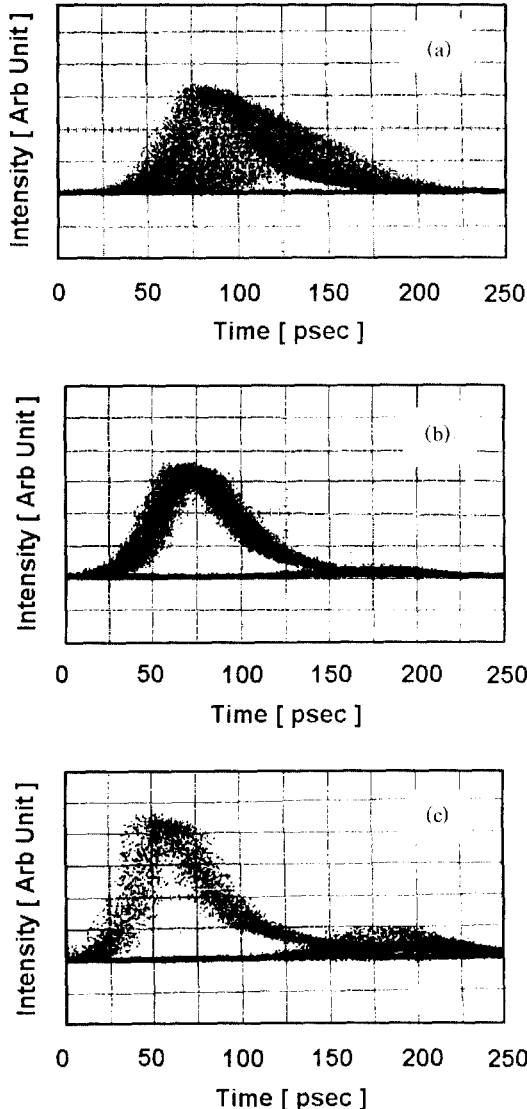


그림 9. NRZ 데이터 전압 진폭 0.45 V 및 RF 전력 28 dBm에서 DC 바이어스에 따른 RZ 변조 출력 눈 패턴. a) 6 mA, b) 7.5 mA, c) 9 mA

Fig. 9 Eye patterns as a function of DC bias at NRZ data amplitude of 0.45 V and RF power of 28 dBm; a) 6 mA, b) 7.5 mA, c) 9 mA.

그림 10은 그림 9(b)의 최적 조건에서 NRZ 데이터 전압(V_{DR})을 증가시키면서 눈 패턴을 관찰한 것이다. 그림 10(a)는 $V_{DR}=0.48$ V인 경우로서, NRZ 데이터 전류 진폭이 커져서 "0"인 구간에서는 광출력이 전혀 나타나지 않으나 "1"인 구간에서는 출력 증가와 더불어 시간요동이 다소 증가함을 알 수 있다. $V_{DR}=0.6$ V인 경우에는 그림 10(b)에 보인 바와 같이 출력 전력은 커졌으나 진폭 및 시간 요동이 크게 증가하여 눈 패턴은 그림 9(a)와 매우 유사하게 나타났다. 이는 그

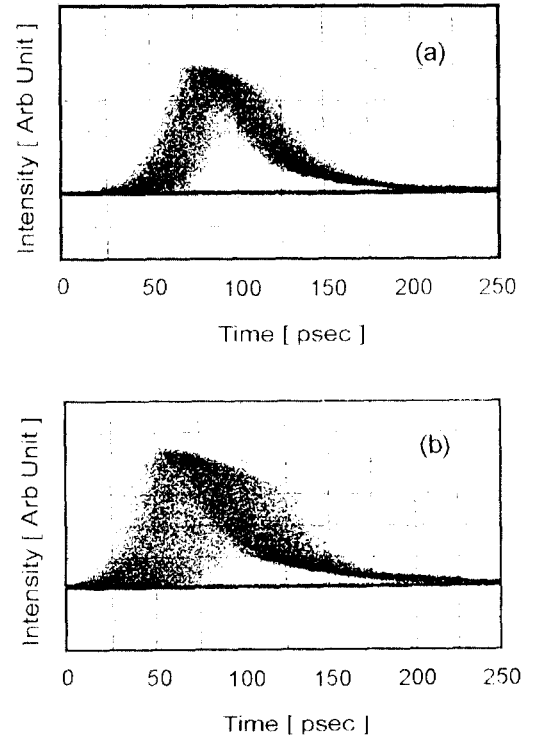


그림 10. NRZ 데이터 전압 증가에 따른 RZ 변조 출력 눈 패턴 변화; a) 0.48 V, b) 0.6 V

Fig. 10 Eye pattern changes as the NRZ data voltage increases; a) 0.48 V, b) 0.6 V.

림 4의 이론적 분석에서 설명한 바와 같이 큰 NRZ 데이터 전류를 인가할 수록 레이저에 큰 불규칙 교란을 줄뿐만 아니라 "0"인 구간에서는 DC 전류 감소 효과를 동반하기 때문에 판단된다. 그림 10의 경향 또한 이론적인 분석 결과인 그림 4와 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, RF 전력에 대한 눈 패턴 변화도 이론적인 분석과 유사한 경향을 보였다.

실제 시스템 구현에서 이 같은 동작 전류 값의 변화에 대한 눈 패턴의 의존성은 충분히 극복할 수 있을 것으로 예측된다. 예를 들면, 출력에 민감하게 영향을 미치는 DC 바이어스 값도 0.1 mA 이하로 변화하면 출력에 미치는 효과는 거의 무시할 수 있으며, 이 값이 0.1 mA 이내로 DC 바이어스를 안정화시키는 것은 큰 어려움이 없다. 즉, 이상의 실험 결과는 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 기초한 OTDM용 초단 RZ 데이터 발생 장치의 실용화가 가능함을 의미한다.

V. 결 론

본 논문에서는 이득 스위칭 레이저의 직접 변조에 의한 1 Gbps RZ 데이터 펄스 발생에 관한 이론 및 실험적인 연구를 수행하였다. 데이터의 유무에 따른 펄스 패턴 효과를 제거하기 위해, DC 바이어스, RF 정현파, 및 디지털 데이터의 전류를 혼합한 변조 전류 파형을 선택하고, 간단한 올 방정식에서 출발하여 최적의 직접 변조를 위한 각 전류 성분의 값을 결정하고자 했다. 이를 위해 각 전류 성분 값을 변화시키면서 RZ 변조신호의 특성을 눈 패턴의 모양 변화로부터 조사하였다. 조사 결과 출력의 눈 패턴은 DC 바이어스와 NRZ 데이터 전류의 변화에 민감하고, RF 전류 변화에는 비교적 덜 민감한 특성을 보였다. 이론적인 분석을 바탕으로 실험을 통하여 직접 변조된 이득 스위칭 레이저 출력의 깨끗한 눈 패턴을 얻음으로서, 제시된 방법에 의해 초단 RZ 변조된 데이터의 발생이 가능함을 입증했다. 최적의 변조 출력은 50Ω 로 정합된 레이저에 인가되는 RF 전력 28 dBm, NRZ 데이터 전압 진폭 0.45 V, 및 DC 전류 7.5 mA에서 관측되었으며, 각 전류 성분 값의 변화에 대한 눈 패턴의 의존성은 모의 실험에서 예측된 것과 비교적 잘 일치하였다. 실험에서 최적의 눈 패턴을 얻기 위한 조건을 유지하는 것은 대체적으로 쉬웠으며, 이는 이

득스위칭레이저의 직접 변조에 의해 간단한 초단 RZ 데이터 발생 모듈을 구현할 수 있음을 입증한다.

감사의 글

많은 조언과 도움을 주신 호주 멜버른대학 광자공학연구실 Mr. Cahill께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. Y. Lau, "Gain switching of semiconductor injection lasers." *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 4, pp. 257-258, Jan. 1988.
2. A. J. Taylor, J. M. Wiesenfeld, G. Eisenstein, and R. S. Tucker, "Timing jitter in mode-locked and gain-switched InGaAsP lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 12, pp. 681-683, Sept. 1986.
3. R. S. Tucker, J. M. Wiesenfeld, A. H. Gnauck, and J. E. Bowers, "8 Gbit/s return-to-zero modulation of a semiconductor laser by gain-switching", *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 25, 1329-1331, Dec. 1986.
4. K. Habara and K. Kikuchi, "Pulse code modulation of a gain-switched LD and its application to a high-speed electrooptical time multiplexer", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 10, pp. 1426-1432, Oct. 1987.
5. R. F. O'Dowd and D. M. Byrne, "Semiconductor laser precision gain switching experiment for Gbaud ternary optical signaling", *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 25, no. 6, pp. 1568-1574, Jun. 1989.
6. M. J. L. Cahill, G. J. Pendock, and D. D. Sampson, "Low error rate return-to-zero direct modulation of gain-switched lasers", *Optical and Quantum Electron.*, vol. 28, no. 9, 1181-1185, Sept. 1996.
7. 개인 서신.
8. G. P. Agrawal, *Semiconductor Lasers*, Chap. 6, VNR, New York, 1993.
9. L. V. T. Nguyen, M. J. L. Cahill, A. J. Lowery, D. Novak, P. C. R. Gurney, D. D. Sampson, and D. S. Seo, "Effects of carrier-induced modal intermodulation on dynamic spectral characteristics of multimode Fabry-Perot lasers", *Optical and Quan-*

tum Electron., vol. 28, no. 8, 1067-1080, Aug. 1996.



명승일(Seung-il Myong) 정회원
19970년 9월 1일생
1997년 2월:공학사, 명지대학교
전자공학과
1997년 3월~현재:명지대학원 전
자공학과 석사과정
※주관심분야:반도체 레이저의 이
득 스위칭 및 직접
펄스 변조, OTDM
광수신기, 광통신, 등



이상훈(Sang-Hoon Lee) 정회원
1972년 3월 18일생
1997년 2월:공학사, 명지대학교
전자공학과
1997년 3월~현재:명지대학원 전
자공학과 석사과정
※주관심분야:반도체 레이저의 이
득 스위칭 및 직접
펄스 변조, 광섬유
증폭기, 광통신, 등



서동선(Dong-Sun Seo) 정회원
1980년 2월:공학사, 연세대학교
전자공학과
1985년 8월:공학석사, 연세대학
교 전자공학과
1989년 12월:공학박사, (미)뉴멕시코
대학교 전기공
학과
1990년 3월~현재:명지대학교 전자공학과 교수
※주관심분야:반도체 레이저, 광펄스 압축, 초고속 광
정보 발생 및 전송, 전광통신망, 등

김남(Nam Kim) 정회원
한국통신학회 논문지 제 22권 5호 참조
현재:충북대학교 정보통신공학과 교수