

DFB 반사기가 집적된 다중전극 레이저 다이오드를 이용한 RZ 및 NRZ 데이터 신호의 광클럭 재생

전민용[†]

충남대학교 물리천문우주과학부 양자제어물성연구소
☎ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

임영안 · 김동철 · 심은덕 · 김성복 · 박경현

한국전자통신연구원 IT융합 부품 연구소 광소자연구부 차세대 광전소자팀
☎ 305-700 대전광역시 유성구 가정동 161번지

이대수

한국표준과학연구원
☎ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2005년 10월 7일 받음, 2005년 12월 26일 수정본 받음)

DFB 반사기가 집적된 다중전극 레이저 다이오드에 Return-to-zero (RZ) pseudorandom bit sequence (PRBS) 데이터와 nonreturn-to-zero (NRZ) PRBS 데이터를 주입하여 이 신호로부터 광 클럭 신호를 추출하였다. 11.727 Gbit/s RZ PRBS 데이터와 NRZ PRBS 데이터로부터 재생된 광 클럭의 root-mean-square (rms) 타이밍 지터 (timing jitter)는 약 1 ps 정도로써 아주 우수한 결과를 얻어냈다. NRZ PRBS 데이터로부터 pseudo return-to-zero (PRZ) 데이터로 포맷변환을 구현하고, 클럭 성분을 갖고 있는 PRZ 신호를 이용하여 광 클럭을 추출하였다. 입력 PRZ 데이터 신호의 rms 타이밍 지터는 2ps 이상일지라도 이로부터 추출해 낸 광 클럭의 rms 타이밍 지터는 1ps 정도의 좋은 특성을 얻어냈다.

주제어 : 클럭재생, DFB LD, 반도체 광증폭기, 펄스발전, format 변환

I. 서 론

초고속 광통신 시스템에서 광 증폭기(EDFA: Erbium-doped fiber amplifier)의 누적된 잡음, 광섬유의 비선형성, 군속도 분산(group velocity dispersion), 편광 모드 분산(polarization mode dispersion) 및 크로스토크(cross-talk) 등은 신호의 질에 상당한 영향을 준다. 3R 재생(retiming, reshaping, reamplification)은 미래의 장거리 광 전송 시스템에서 중요한 기술이며, 이러한 많은 문제점들을 극복할 수 있는 효과적인 방법이다.^[1] 이 기술은 전송거리를 증가시킬 뿐만 아니라 데이터 성능을 초기 상태와 같도록 유지시킨다. 3R 재생을 구현하기 위해서는 기존의 데이터로부터 광 클럭 재생이 필요하며, 이는 광 전송 시스템에서 누적된 타이밍 지터를 해결하고 원래의 신호로 재생하는 핵심 기술이 된다.

광 클럭 재생을 위한 기술은 크게 세 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째 기술은 적당한 광학적 필터를 사용하여 클럭 신호의 주파수 성분을 걸러내는 방법이다.^[2] 이 방법은 구조가 간단하지만 높은 finesse를 갖는 필터를 필요로 하고, 타이밍 지터가 크며, 진폭의 요동이 심한 단점이 있다. 두 번째 기술로는 수동형 모드 록킹 광섬유 레이저나 반도체 광 증폭기가

삽입된 레이저 시스템에서 주입 잠금 방법으로 광 클럭을 재생하는 것이다.^[3,4] 이 방법으로 재생된 클럭 펄스는 깨끗한 파형을 갖는 반면 비선형 광학 현상을 이용하기 때문에 주입하는 광 신호의 파워가 커야 하고, 레이저 공진기의 길이에 해당하는 종 모드 주파수와 주입하는 신호의 주파수가 정확하게 정합 되어야 한다. 또한 반도체 광 증폭기를 삽입한 레이저에서의 광 클럭 재생 신호는 패턴 효과와 전송 속도의 제한이 나타나게 된다. 세 번째 방법은 다중 전극 DFB 레이저 다이오드에서의 주입 잠금 방법을 이용하는 것이다.^[5-8] 이 기술로부터 클럭을 추출하는 방법은 상대적으로 간단하기 때문에 많은 연구가 되어왔다. 반면 상용으로 쉽게 구입할 수가 없고 또한 제조 과정이 복잡하여 일반적인 실험실에서 구현하기 어려운 방법이다. 본 연구에서는 DFB 반사기가 집적된 다중전극 레이저 다이오드(이하 펄스발전 DFB LD로 칭함) 소자를 제작하고 이 소자를 이용하여 RZ와 NRZ PRBS 데이터로부터 낮은 root-mean-square(rms) 타이밍 지터를 갖는 광 클럭을 추출하였다. 펄스발전 레이저 다이오드에서 주입 잠금 방법을 이용한 클럭 추출 방법에 대한 연구는 dispersive Q-switching^[5], 모드 비팅(mode beating)^[6], 복합 공진기 모드 비팅(compound cavity mode beating(CCMB))^[7,8] 등으로 분류된다. 최근에 CCMB 방법을 이용하여 10 GHz에서 광 클럭

[†] E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

을 재생한 연구결과를 발표하였는데 이때 얻어진 광 클럭의 rms 타이밍 지터는 2.3 ps 정도였다.^[8] 하지만 이 논문에서 보고한 영역 외에 최근에 rms 타이밍 지터 값이 현저히 줄어드는 새로운 영역을 찾아냈고 본 논문에서는 이 영역에 대한 소자 특성과 이를 이용한 클럭 추출의 연구결과를 보고하였다. 새로운 자기 펄스발진 조건에서 재생된 클럭의 타이밍 지터 성능이 기존의 CCMB에서 얻어낸 값보다 월등한 성능을 보여주었다.

II. 펄스발진 다중전극 DFB LD 소자 특성

이 절에서는 펄스발진 다중전극 DFB LD의 간단한 제작과 특성에 대해 보고한다. 펄스발진 DFB LD는 그림 1에서 보여주는 것과 같이 DFB, 위상조절(phase control), 이득(gain) 영역의 세 부분으로 나뉘어 진다. 이득 영역이 너무 길어 균일한 전류를 주입하기 위하여 두개의 전기적으로 고립된 전극(이득1과 이득2)으로 나누어 전류를 인가하였다. 각 영역의 길이는 DFB 영역이 0.4 mm, 위상조절 영역이 0.5 mm, 이득1 영역이 1 mm, 이득2 영역이 1.5 mm이다. 레이저 소자는 metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD)를 이용하여 n-InP 기판 위에서 성장시켰다. 소자제작에 대한 내용은 참고문헌에 잘 나와 있다.^[9,10]

펄스발진 DFB LD를 언급하기 전에 먼저 AFL(amplified feedback laser diode) 소자로부터 동작 특성을 이야기하고 이로부터 새로이 규명된 낮은 타이밍 지터를 갖는 펄스 발생 영역에 대한 연구 결과를 서술한다. AFL 소자는 DFB영역이 하나의 레이저로서 작동을 하고 이 영역으로부터 나온 빛이 위상 조절 영역을 지나 이득영역에서 증폭되고 facet에서 반사되어 다시 DFB 영역에 귀환된다. 이 귀환에 의해 레이저 공진기 모드의 해가 바뀌게 되는데 이러한 모드들을 복합 공진기 모드(compound cavity mode)라고 한다. 즉, AFL 소자에서는 이 복합 공진기 모드 중 두 개 모드의 비팅에 의해 펄스 형태로 발진하게 된다. 그리고, 증폭되는 과정에서 ASE

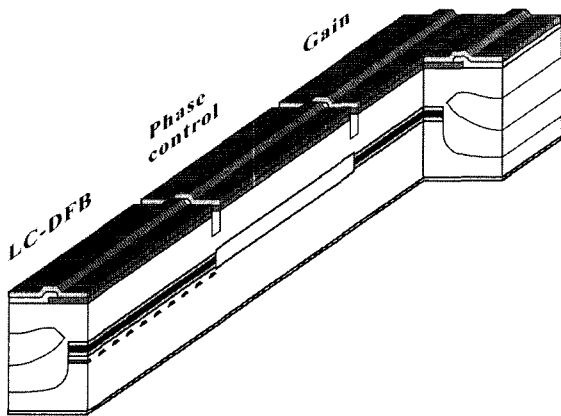


그림 1. 펄스발진 DFB (DFB 반사기가 집적된 다중전극 레이저 다이오드)의 구조

(amplified spontaneous emission)가 발생하며 이러한 ASE에 의한 잡음이 타이밍 지터를 크게 만들어주고 이것이 소자의 문제점으로 대두된다.

그러나 새로이 규명된 펄스 발생은 이 DFB 영역에 걸어주는 전류를 문턱 전류 이하로 하여 DFB를 단순히 반사체로 사용한다. 즉, 이득영역이 증폭을 위해 사용되는 것이 아니라 소자의 이득을 주는 역할을 하게 되어 상대적으로 ASE가 줄어들게 된다. 이 조건으로 구동하는 레이저 소자를 펄스 발진형 DFB 반사기가 집적된 다중전극 DFB LD라 한다. 이러한 전류인가 조건에 따른 펄스발진 영역의 변화를 그림 2에서 보여준다. 그림 2는 이득 1 영역(I_{Gain1}) 과 DFB 영역(I_{DFB})에 가해주는 전류에 대한 RF 주파수 지도를 보여준다. 레이저 다이오드로부터의 광 펄스 발진 신호는 50 GHz 대역을 갖는 초고속 광 검출기를 통하여 RF 스펙트럼 분석기로 특성을 분석하였다. 위상 조절 영역에 가해주는 전류는 약 10mA 정도로 유지시켰다. 그림 2의 전류에 대한 RF 주파수 지도는 x축이 이득1에 인가된 전류로 표시되어 있으며, 이득2에 인가되는 전류는 $I_{Gain2}=1.5I_{Gain1}$ 을 유지하도록 전류를 맞춰주었다. 그림에서 좌측 상단이 기존에 동작하는 AFL 소자의 동작 영역이고 하단의 넓은 영역이 새로이 발견된 펄스발진 영역이다. 지금까지 이런 현상에 대하여 많은 연구가 되어있지 않았다. 단지 이러한 현상은 흡수 포화체가 없는 수동형 모드록킹이라고 보고되어 왔다.^[11,12] 그림에서 넓은 영역에 대해 펄스 발진이 원활하게 이루어지며 이 영역이 중요한 것은 주입 잠금에 의해 재생된 광 클럭의 지터가 매우 작다는 사실이다. 이러한 우수성으로 인하여 본 실험에서는 RZ와 NRZ 데이터 신호로부터 펄스발진 DFB LD를 이용하여 광 클럭 신호를 재생하였다.

III. RZ PRBS 데이터로부터 클럭 재생 실험 및 결과

그림 3은 펄스발진 DFB LD를 이용하여 RZ 펄스로부터

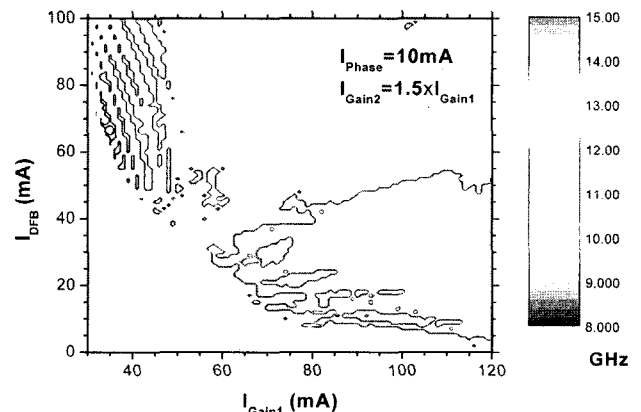


그림 2. 전류 인가 조건에 따른 펄스 발진 영역의 변화 (DFB 영역에 걸어주는 전류와 이득1 영역에 걸어주는 전류에 대한 펄스 발진 주파수 map) (여기서 위상 조절 영역의 전류는 10mA로 고정하였다. $I_{Gain2}=1.5I_{Gain1}$)

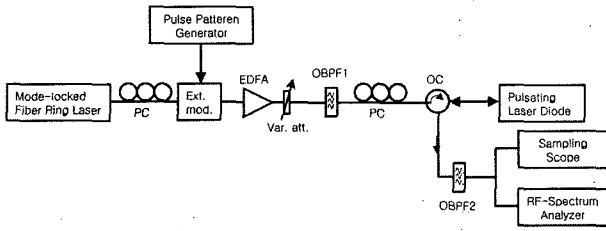


그림 3. RZ 데이터로부터 클럭 추출을 위한 실험 장치도.

광 클럭을 재생시키기 위한 실험 장치도이다. 광 펄스는 모드 록킹 광섬유 링 레이저(Pritel 사)로부터 생성되며, 광 펄스 폭은 약 3 ps이고 중심파장은 1545 nm 이다. DFB LD로부터 free-running 펄스발진 주파수는 11.727 GHz 이다. 이 주파수와 동기화시키기 위하여 광 펄스의 반복률을 11.727 GHz 로 맞추어주었다. 또한 11.727 Gbit/s로 RZ PRBS 데이터를 생성하기 위하여 광 변조기를 변조시켰다. RZ 데이터 광 신호를 증폭한 후 광 가변 감쇄기를 통해 입력 광 파워를 조절한다. 또한 편광조절기로 적당히 편광을 조절한 후 광 circulator를 통해 펄스발진 DFB LD의 DFB 영역으로 주입시킨다. 이 때 펄스발진 DFB LD의 free-running 주파수는 11.727 GHz로 잠금된다. 광 circulator를 통해서 출력되는 재생된 클럭 신호는 샘플링 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기를 통해서 측정하였다.

그림 4(a)는 모드 록킹 광섬유 레이저로부터 발생된 광 펄스를 광 변조기에 입사하여 얻어낸 RZ PRBS 데이터를 보여준다. 이 신호를 펄스발진 DFB LD에 주입시켜서 얻어낸 클럭 신호가 그림 4(b)에서 보여준다. 이 때 얻어진 클럭 신호의 rms 타이밍 지터는 수백 펨토 초 정도이다. 그림 5는 펄스발진 DFB LD에 주입하는 RZ 데이터의 주입 파워에 따른 rms 타이밍 지터를 보여준다. 펄스발진 DFB LD에 주입하기 전의 모드 록킹 광섬유 링 레이저로부터의 펄스 열과 RZ PRBS 데이터의 입력신호의 rms 타이밍 지터 값은 450 fs이다. 펄스발진 DFB LD에 주입 잠금하여 얻어진 광 클럭에 대해 RZ 펄스 열의 경우 -13 dBm의 낮은 입력 광 파워에서는 타이밍 지터 값이 2 ps 이상이였지만 입력되는 광 파워가 증가함에 따라서 재생된 광 클럭의 rms 타이밍 지터 값은 점차 감소함을 보여준다. 입력 광 파워가 1 dBm에서는 rms 타이밍 지터 값이 540 fs 까지 감소됨을 볼 수 있다(그림 5의 밝은 원). 그림 5 안의 작은 그림은 PRBS RZ 데이터 신호의 입력 파워가 -3 dBm 일때 펄스발진 DFB LD로부터 재생된 클럭 신호에 대한 샘플링 오실로스코프 상에서 펄스 열을 보여준다. 이 소자로부터 얻어지는 클럭의 소광률(extinction ratio)은 14 dB에 이른다. 반면 RZ PRBS 데이터를 주입하여 얻어진 광 클럭의 rms 타이밍 지터 값은 입력되는 광 파워가 증가함에 따라서 U-형태의 모양을 갖는다 (그림 5의 검은 원). 이는 높은 광 파워를 주입하면 펄스발진 DFB LD의 캐리어 밀도(carrier density)가 불규칙적으로 요동치기 때문으

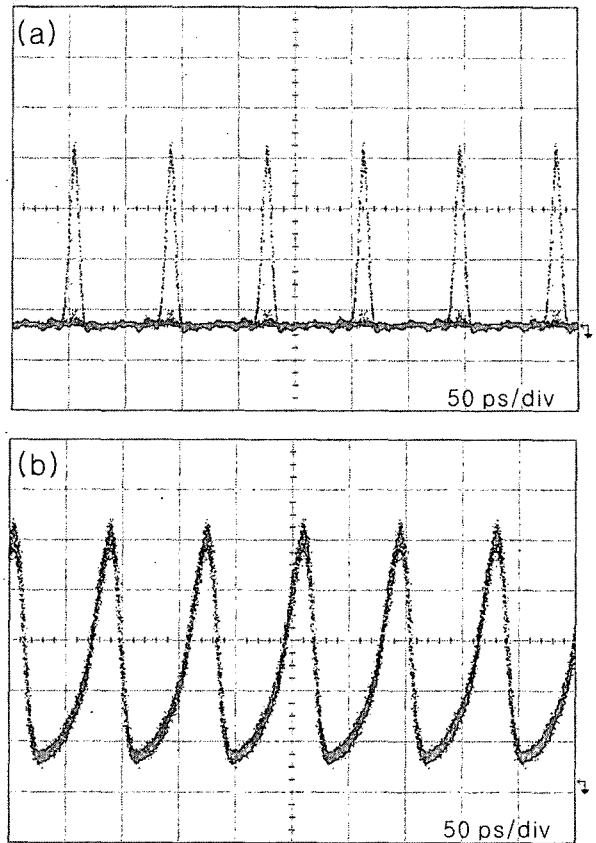


그림 4. (a) RZ PRBS 데이터 (b)RZ PRBS로부터 추출한 클럭 신호.

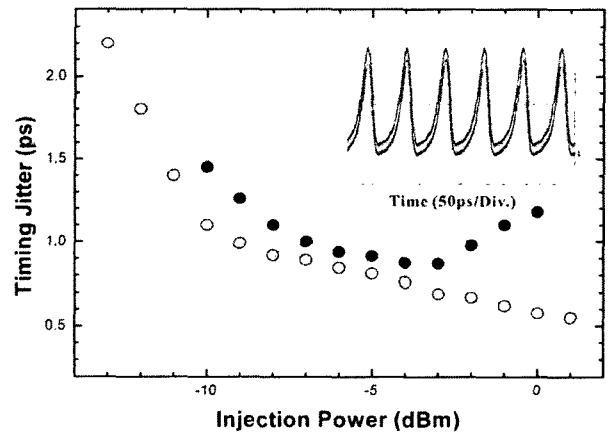


그림 5. 주입전류에 따른 rms 타이밍 지터의 변화. (밝은 원 : 모드 록킹된 광 펄스 열, 검은 원 : $2^{31}-1$ PRBS RZ data), 가해진 전류 조건 : $I_{DFB}=48\text{mA}$, $I_{Phase}=10\text{mA}$, $I_{Gain1}=120\text{mA}$, and $I_{Gain2}=180\text{mA}$. (삽입그림 : 3 dBm RZ PRBS 신호로부터 추출된 클럭 신호의 샘플링 오실로스코프 사진. 측정된 rms 타이밍 지터는 870 fs이고 소광률은 14 dB임.)

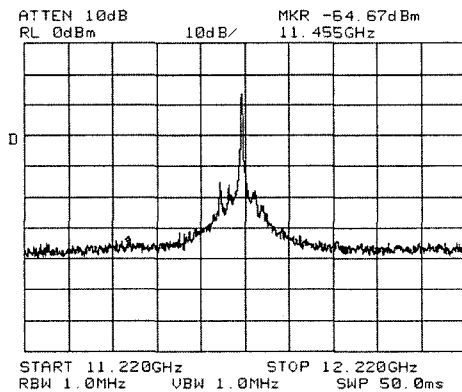
로 해석된다. 이 경우 rms 타이밍 지터는 입력 파워가 - 8 dBm ~ - 2 dBm의 범위에 대해 1 ps 이하의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 동일한 신호를 펄스발진 DFB LD와 AFL 소자

에 입력하여 비교해보면 RZ PRBS 신호를 주입했을 경우 지터의 최소값이 펄스발진 DFB LD의 경우 900 fs로 AFL의 값 2.3 ps와 비교하여 매우 적은 값을 얻어냈다. 실제 10 GHz 펄스 열에서 이러한 sub-ps의 rms 타이밍 지터를 얻기란 매우 어려운 일이다. 단순히 펄스 열로 주입한 경우는 약 500 fs에 이른다. 이 소자는 이러한 지터의 우수성 뿐 아니라 수동형 모드 록킹에서 단점으로 지적되고 있는 주파수 가변성의 성질을 갖고 있음을 알 수 있었다.^[8]

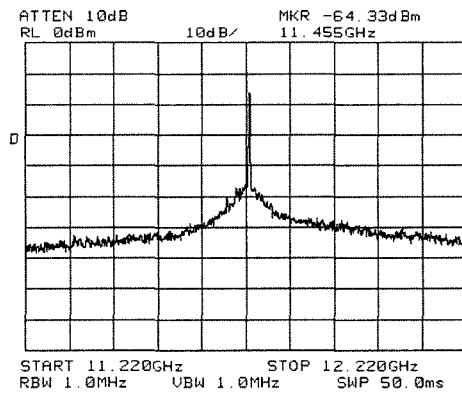
11.727 GHz를 중심으로 펄스 잠금 DFB LD의 free running 상태와 광 신호를 주입하여 잠금 시켰을 때의 RF 스펙트럼 신호를 그림 6에서 보여준다. 그림 6-(a)는 free running 상태로 잡음으로 인하여 11.727 GHz 주변에서 RF 스펙트럼 선 폭이 넓게 뒬을 볼 수 있다. 하지만 RZ 신호를 주입하여 펄스발진 DFB LD를 잠금시키면 11.727 GHz에서 RF 선 폭이 좁아지며 안정된 광 펄스 신호에 대한 RF 스펙트럼을 얻어낼 수 있었다(그림 6-(b)).

IV. NRZ, PRBS 데이터로부터 클럭 재생 실험 및 결과

그림 7은 펄스 발진 DFB LD를 이용하여 NRZ 데이터로부터



(a)



(b)

그림 6. (a) Free running 상태에서의 펄스발진 DFB LD의 RF 스펙트럼 (b) RZ PRBS로부터 추출한 클럭의 RF 스펙트럼.

터 광 클럭을 재생시키기 위한 실험 장치도를 보여준다. 앞 3절에서와 마찬가지로 NRZ PRBS 데이터 신호는 펄스발진 DFB LD의 free-running 펄스발진 주파수와 동기화 시키기 위하여 11.727 Gbit/s로 맞춰주었다. 패턴 생성기를 이용하여 DFB 레이저 다이오드로부터 나오는 연속 빔을 외부 변조기를 이용하여 변조시켜줌으로써 $2^{31}-1$ 의 길이를 갖는 NRZ PRBS 신호를 생성하였다. 이론적으로 NRZ 데이터 신호는 걸어주는 주파수에 대한 클럭 주파수 성분을 갖고 있지 않는다. 단순히 NRZ 데이터를 입력하여 클럭 신호를 재생하는 것은 변조 주파수 성분이 없기 때문에 어려운 일이다. 하지만 실제 NRZ 데이터에 대하여 RF주파수를 측정해 보면 변조 주파수에서 미약하게 신호가 나타남을 볼 수 있다. 그림 7의 실험장치도에서 점선으로 표시된 상자는 NRZ-to-PRZ 변환기 모듈을 보여준다. 이 모듈은 반도체 광 증폭기와 좁은 선 폭을 갖는 전광 밴드패스필터(optical band pass filter)로 구성되어 있다. 일반적으로 반도체 광 증폭기에 NRZ 신호가 입력되면 SOA의 이득포화현상으로 인하여 시간상(time domain)에서 앞쪽에 해당(leading edge)하는 부분에 overshoot이 발생하고, 자기 위상변조에 의하여 이 성분의 파장은 장파장쪽으로 이동하는 결과를 가져온다. 이러한 성질을 이용하여 NRZ 신호가 반도체 광 증폭기를 통과한 후 좁은 선 폭을 갖는 격자형(grating) 밴드패스 필터를 장파장 영역에 해당하는 신호에 정렬하여 통과시키면 overshoot이 된 신호만을 얻어낼 수 있다. 이렇게 얻어진 신호가 PRZ신호가 된다. PRZ 신호는 NRZ 데이터와 달리 변조시켜주는 주파수 성분을 갖게 된다. 이 신호를 펄스발진 DFB LD에 주입시키면 3절에서와 같이 잠금된 클럭 신호를 얻어낼 수 있다.

그림 8(a)에 NRZ 데이터 신호에 대한 RF 스펙트럼을 보여준다. DC신호부터 5 GHz 영역까지 잡음이 많아서 11.727 Gb/s에 대한 RF 신호의 크기가 묻혀 있음을 볼 수 있다. 따라서 이 신호를 변조신호에 의한 RF 성분보다 더 크게 하는 방법을 필요로 하는데, 여기서는 NRZ 신호를 pseudo-return-to-zero(PRZ) 신호로 변환하는 방법을 사용하였다.^[13,14] 그림 8 (b)는 PRZ로 변환된 신호의 RF스펙트럼 성분을 보여준다. 그림(a)와 비교해 보면 낮은 주파수 성분 부근의 잡음이 제거되었고 11.727 GHz에서 약 20 dB의 신호가 있음을 볼 수

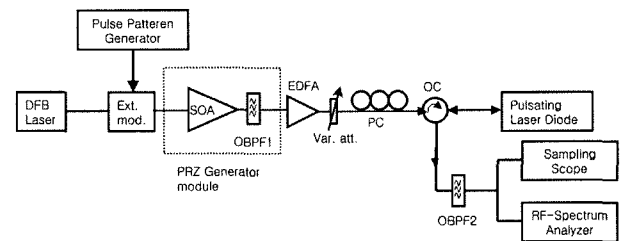


그림 7. NRZ 데이터로부터 클럭 추출을 위한 실험 장치도.

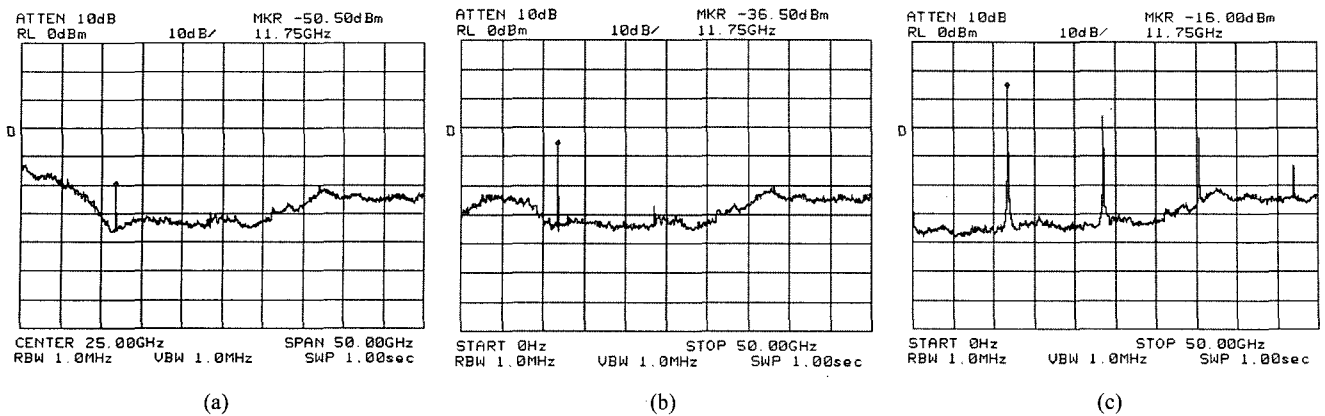


그림 8. (a) NRZ PRBS 데이터의 RF 스펙트럼 (b) PRZ 데이터의 RF 스펙트럼 (c) NRZ PRBS로부터 추출한 클럭의 RF 스펙트럼.

있다. 본 연구에서 적용한 기술은 그 중 반도체 광 증폭기가 갖고 있는 비선형 광학 현상인 자기위상변조와 광 이득포화에 의한 PRZ 변환이다. 그림 8(c)에 추출해 낸 클럭의 RF 스펙트럼을 볼 수 있다. 11.727 GHz 에서 약 50 dB정도의 신호를 얻어 낼 수 있었다.

그림 9(a)는 입력 NRZ 데이터 패턴이고 (b)는 PRZ 생성 모듈에서 반도체 광 증폭기를 통과한 후 비선형 효과인 자기 위상 변조에 의하여 데이터 패턴의 overshoot이 나타남을 보여준다. 선 폭이 좁은 격자형 밴드패스 필터로 overshoot 성

분을 추출하여 PRZ 데이터 패턴을 만들 수 있으며, 그림 9(c)는 이렇게 얻어진 샘플링 오실로스코프 상에서의 PRZ 데이터 패턴 신호를 보여준다. PRZ 신호를 3절에서 수행한 RZ신호에 대한 클럭 재생 실험과 마찬가지로 광 circulator를 통해서 펄스발진 DFB LD에 주입시킨다. 광 circulator를 통해서 나온 출력 신호는 클럭 재생된 신호가 나오며 이 신호를 샘플링 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 그림 9(c)의 입력 PRZ 데이터 신호의 타이밍 지터는 약 2ps의 값을 갖는다. 그림 9(d)는 입력된 NRZ 데이

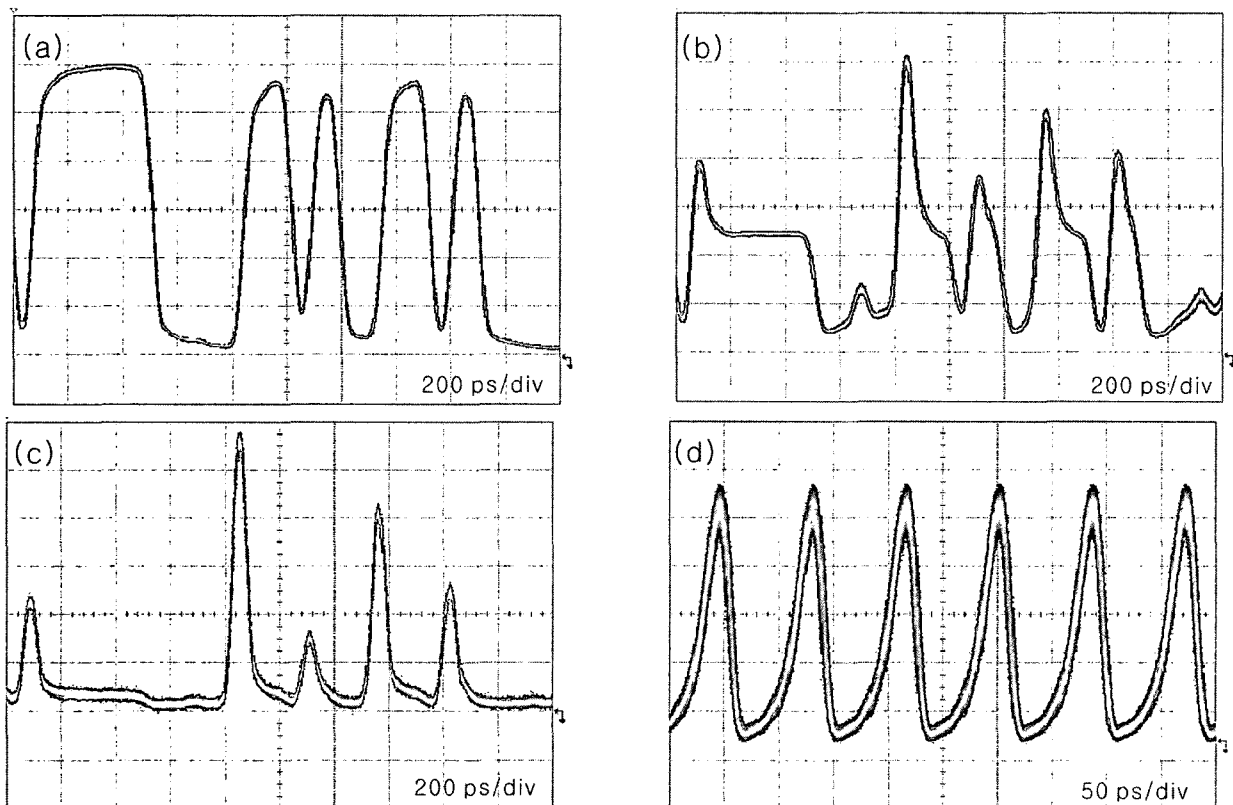


그림 9. (a) 입력 NRZ 데이터 (b) 반도체 광 증폭기를 통과한 후 NRZ 신호 (c) PRZ로 변환된 신호 (d) 추출된 클럭 신호.

터로부터 추출한 클럭의 신호를 오실로스코프 상에서 보여준다. 세기 진폭의 요동에도 불구하고 펄스발진 DFB LD로부터 추출된 광 클럭 신호의 rms 타이밍 지터는 ~1 ps 정도의 값을 얻어냈다. 이것은 펄스발진 DFB LD의 소자가 주입되는 광 신호의 세기진폭의 요동과 큰 지터를 가지더라도 낮은 rms 타이밍 지터 값을 갖는 클럭을 재생한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 10 Gbit/s 이상의 완전 광 3R 재생의 클럭으로 사용할 수 있다.

V. 결 론

AFL레이저의 동작영역을 개선하여 새로운 영역에서 펄스 발진 DFB LD를 구동하여 rms 타이밍 지터 특성을 향상시켰고, 이를 이용하여 RZ PRBS 데이터와 NRZ PRBS 데이터에 대한 광 클럭 신호를 재생하였다. 모드 록킹 광섬유 링 레이저로부터 발진한 광 펄스 열로부터 재생된 광 클럭의 rms 타이밍 지터는 540 fs였고, RZ PRBS 데이터로부터 재생된 광 클럭의 rms 타이밍 지터는 1 ps 이하의 아주 우수한 결과를 얻어냈다. 또한 NRZ PRBS 신호로부터 광 클럭 성분을 갖고 있는 PRZ 데이터로 변환을 한 후 이 신호로부터 광 클럭을 재생하였다. 입력 PRZ 데이터 신호의 rms 타이밍 지터는 2 ps 이상일지라도 이로부터 추출해 낸 광 클럭의 rms 타이밍 지터는 1 ps 정도의 좋은 특성을 얻어냈다. 이로부터 본 논문에서 연구한 DFB 반사기가 집적된 다중전극 레이저 다이오드는 3R 재생을 위한 광 클럭 재생 소자로서 우수한 성능을 보여주며, 이를 이용하여 10 Gbit/s 이상의 완전 광 3R 재생을 구현할 수 있으리라 기대한다.

감사의 글

이 논문의 일부는 2004년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] C. Bornholdt, J. Solvak and B. Sartorius, "Semiconductor-based all-optical 3R regenerator demonstrated at 40 Gbit/s", *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 192-194, Feb. 2004.
- [2] T. Wang, C. Lou, L. Huo, Z. Wang, Y. Gao, "A simple method for clock recovery", *Optics & Laser Tech.* Vol. 36, pp.613-616, 2004.
- [3] K. Vlachos, K. Zoiros, T. Houbavlis, H. Avramopoulos, "10 x 30 GHz pulse train generation from semiconductor amplifier fiber ring laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.12, no.1, pp. 25-27, Jan. 2000.
- [4] L. Wang, Y. SU, A. Agrawal, P. Kumar, "Polarization insensitive widely tunable all-optical clock recovery based on AM mode-locking of a fiber ring laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.12, no.2, pp. 211-213, Feb. 2000.
- [5] U. Bandelow, H. -J. Wünsche, B. Sartorius, and M. Möhrle, "Dispersive self-Q-switching in DFB lasers-theory versus experiment", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2. pp. 270-278, Apr. 1997.
- [6] M. Möhrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox, A. Signund, R. Steingrüber, M. Radziunas, and H. -J. Wünsche, "Detuned grating multisection-RW-DFB lasers for high-speed optical signal processing", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 7, no. 2. pp. 217-222, Mar./Apr. 2001.
- [7] Brox, S. Bauer, M. Biletzke, H. Ding, J. Kreissl, H.-J. Wünsche, and B. Sartorius, "Self-pulsating DFB for 40GHz clock-recovery: Impact on intensity fluctuations on jitter", in Proc. Conf. Optical Fiber Communication, 2004, Los Angeles, CA, Paper MF55.
- [8] D. -S Yee, Y. A. Leem, S.-B. Kiim, E. Sim, H.-G Yun, D. C. Kim, and K. H. Park, "Widely frequency-tunable amplified feedback lasers for 10-GHz optical pulsation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.17, no.6, pp. 1151-1153, Jun. 2005.
- [9] C. Park, J. S. Kim, D. K. Oh, D. H. Jang, C. Y. Park, J. H. Ahn, H. M. Kim, H. R. Choo, H. Kim, and K. E. Pyun, "Low-threshold loss-coupled laser diode by new grating fabrication technique", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 22-24, Jan. 1997.
- [10] K. H. Park, Y. A. Lee, D. -S. Yee, Y. S. Back, D. C. Kim, S. -B. Kim and E. Shim, "Self-pulsation in multi-section distributed feedback laser with a novel dual grating structure", *ETRI J.*, vol. 25, pp-149-155, Jun. 2003.
- [11] J. Renaudier, G.-H Duan, J.-G. Provost, H. Debregeas-Sillard, and P. Gallion, "Phase correlation between longitudinal modes in semiconductor self-pulsating DBR lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 17, no. 4, 741-743, Apr. 2005.
- [12] Y. Nomura, S. Ochi, N. Tomita, K. Akiyama, T. Isu, T. Takiguchi, and H. Higuchi, "Mode locking in Fabry-Perot semiconductor lasers," *Phys. Rev. A.* vol. 65, 043 807, 2002.
- [13] H. J. Lee, H. G. Kim, J. Y. Choi, and H. K. Lee, "All-optical clock recovery from NRZ data with simple NRZ-to-PRZ converter based on self-phase modulation of semiconductor optical amplifier", *IEE Electron. Lett.*, vol.35, pp.989-990, June 1999.
- [14] W. Mao, Y. Li, M. Al-Mumin, G. Li, "All-optical clock recovery for both RZ and NRZ data", *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 14, no. 6, 873-875, Jun. 2002.

Optical Clock Recovery from RZ and NRZ data using a Multi-Section Laser Diode with a DFB Reflector

Min Yong Jeon[†]

Department of Physics, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

Young Ahn Leem, Dong Churl Kim, Eundeok Sim, Sung-Bock Kim and Kyung Hyun Park

*Optical Devices Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute,
161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea*

Dae-Su Yee

*Division of Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,
1 Doryong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea*

[†]*E-mail: myjeon@cnu.ac.kr*

(Received October 7, 2005, Revised manuscript December 26, 2005)

We have extracted an optical clock signal from a return-to-zero(RZ) pseudorandom bit sequence(PRBS) and non-return-to-zero(NRZ) PRBS data in a pulsation multi-section laser diode with DFB reflector. The rms timing jitter achieved less than 1 ps for the input 11.727 Gbit/s RZ PRBS and NRZ PRBS data. The PRZ data was converted from the NRZ data using an NRZ to pseudo-return to zero(PRZ) converter module. The optical clock was extracted from the PRZ data which contains the clock components. Although the input PRZ data gives a timing jitter of 2 ps, the extracted clock has timing jitter of ~ 1 ps.

OCIS Codes : 140.3490, 140.5960, 140.2020.