

이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에서 외부 광 주입 효과의 수치적 분석

이명우

동원대학 전자과

엄정현 · 서등선

명지대학교 정보통신우수연구센터/전자공학과

(2000년 3월 29일 받음, 2000년 7월 25일 수정본 받음)

이득 스위칭된 1.55 μm DFB 반도체 레이저에서 외부 주입 광의 전력과 파장이 시간 지터와 펄스 폭에 미치는 영향을 전송선로 레이저 모델에 기초한 모의실험을 통하여 분석하였다. 주입 광 전력이 증가함에 따라 시간지터는 감소하고 펄스폭은 증가했으며, 최소 시간 지터는 주입 광의 파장이 컷된 스펙트럼의 중심과 일치할 때에 나타났다. 이에 따라, 외부 광 주입에 의해 펄스 폭의 증가 없이도 시간 지터를 대략 1/2.7배로 감소시킬 수 있었다. 모의실험 결과는 본 실험결과와는 물론이고 이미 발표된 실험결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였으며, 이는 본 모델이 반도체 레이저에 기초한 시스템 분석에 유용함을 입증한다.

OCIS codes : 230.0230, 140.3490, 140.3520.

I. 서 론

반도체 레이저를 이용한 초단펄스 발생장치는 광시분할 다중화 및 광솔리톤에 의한 초고속의 장거리 광통신에 매우 유용하게 이용될 수 있다. 반도체 레이저를 이용하여 초단 펄스를 발생시키는 대표적인 방법으로 모드 잠김 방법과 이득 스위칭 방법이 제안된 바 있다. 먼저 모드잠김 방법은 변환 제한 급의 초단 펄스를 발생시킬 수 있는 장점은 있으나, 반도체 레이저의 절단면에 무반사 코팅을 해야하며 별도의 외부 공진기가 필요하고, 외부 공진기의 길이로 결정되는 펄스 반복율의 변화가 어렵고 기계적으로 불안정하다는 단점이 있다. 반면, 본 논문에서 사용한 이득 스위칭 방법은 무반사 코팅과 외부 공진기가 필요없고 펄스 반복율의 조정이 외부 주입 전류의 주파수 가변으로 이루어지는 장점이 있다. 또한 이득 스위칭에 따른 급격한 운반자 밀도 변화에 유도되는 칩(chirp)도 광섬유를 이용하여 간단히 보상할 수 있으며, 보상과 더불어 압축된 광펄스도 얻을 수 있다. 그러나, 이득 스위칭에 의해 광펄스가 생성되는 매카니즘이 랜덤신호인 임의방사(spontaneous emission)에 기초로 하므로, 광펄스의 발생시점이 불규칙하여 비교적 큰 수 피코초의 시간 지터가 발생된다. 초고속 광통신 시스템에서는 이 시간 지터가 시스템 성능의 저하를 가져올 수 있으므로 시간 지터의 축소가 필요하다.

이득 스위칭 반도체 레이저의 출력 광펄스의 시간 지터를 감소시키는 방법으로서 자기광 주입(self-seeding)^[1]과 외부 광 주입(external seeding)^[2,3]이 제시된 바 있다. 자기광 주입에 의한 시간 지터 감소는 이득 스위칭 출력 광펄스의 일부를 외부의 주파수 선별 소자나 거울을 이용해 귀환시키는 외부 공진기 레이저의 구조를 갖고 있다. 따라서, 별도의 광원은 필요없으나 외부 공진기 레이저와 동일하게 광펄스의 반복율의 조

정이 어렵고 외부 환경 변화에 민감하다는 단점이 있다.

외부 광 주입 방법은 이득 스위칭 되는 반도체 레이저에 발진파장 부근의 연속광(cw)을 외부에서 주입시키는 것이다. 이득 스위칭 펄스가 생성되는 시점이 임의방사보다는 외부에서 주입된 발진파장 부근의 코히어런트 광에 의해 결정되므로 출력 광펄스의 시간 지터가 감소한다고 알려져 있다.^[1,2]

시간지터와 광 주입과의 관계에 대해서 많은 실험결과가 발표되었지만 정확한 모델에 대한 논의는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 DFB 반도체 레이저 모델로 참고문헌 [4]와 [5]의 모델을 이용하여 이득스위칭 DFB 반도체 레이저에서 외부 광 주입이 있는 경우 외부광의 조건 즉, 주입광의 전력과 주입광의 파장에 따른 시간지터의 변화를 조사하였다. 즉, 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에 여러 가지 다른 조건의 외부 광이 주입될 때 출력되는 광펄스의 시간 지터 및 폭의 변화를 모의실험하였으며, 그 결과의 일부를 실험으로 검증하였다.

II. 모의실험 및 결과

2.1. DFB 반도체 레이저 모델

본 논문에서 DFB 반도체 레이저의 동특성을 해석하기 위해 Runge-Kutta 등의 알고리즘을 이용하여 직접 율(rate)방정식을 푸는 방법 대신 전송선로 모델(transmission line model)을 이용하였다. 기존의 율 방정식을 직접 푸는 방법은 단일모드 반도체 레이저 단독의 해석은 간단하지만 다중모드 반도체 레이저와 광 귀환이 있는 외부 공진기 레이저 그리고 출력광의 스펙트럼 분석 등을 위한 모델링이 쉽지 않고 해석에 많은 계산 시간이 필요하다는 단점이 있다. 반면에 전송선로 모델은 다중모드의 모델링이 쉽고 출력 광의 스펙트럼 분석이 간단한

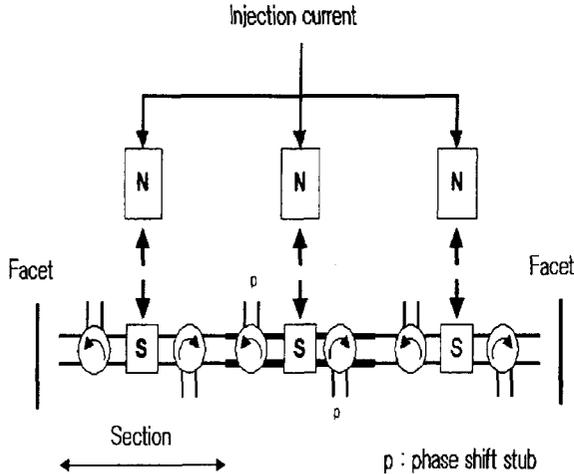


그림 1. DFB 반도체 레이저 모델.

후리에(Fourier) 변환으로 가능하며 외부 공진기의 경우 시간 지연을 갖는 배열로 쉽게 모델링할 수 있는 장점이 있다.

DFB 반도체 레이저에 대한 전송선로 모델은 그림 1과 같이 이득 매질을 발진 주파수와 모의실험에 사용된 표본화 시간에 의해 결정되는 일정한 길이의 구역(section)으로 구분한다. 각각의 구역은 외부에서 인가되는 전류에 의한 이득 변화와 이에 따른 방사·비방사 재결합에 따른 운반자 밀도 변화 그리고 임의방사, 여기방사(stimulated emission)에 의한 광자밀도 변화 등 전류주입에 따라 발생하는 레이저 이득 매질에서의 제반 사항을 계산한다.

간단한 F-P 반도체 레이저의 경우 외부전류 주입에 따라 공진기 내부의 운반자 밀도변화와 광자 밀도변화를 고려하고 레이저의 출력광 스펙트럼이 이득 곡선에 의해 결정되므로 주파수 선별 특성은 이득 곡선을 모델링한 대역통과 필터로 간단히 모델링 된다. 또한 발생된 광파는 단순히 양쪽 절단면의 반사로 이득 매질 내부로 재주입되는 부분과 외부로 출력되는 광만을 고려하면 되었다. 그러나 DFB 반도체 레이저에서 전진파와 후진파는 레이저 공진기에 분포된 그레이팅에 의해 공진기 전체에서 결합된다. 이러한 결합은 각 구역 사이의 임피던스 불연속으로 나타낼 수 있다. 전진파와 후진파의 결합을 나타내기 위해 고저 임피던스 천이 행렬과 저-고 임피던스 천이 행렬이 필요하다. 평균 어드미턴스 Y 로부터 $\pm \Delta Y$ 로 변조되었다고 가정하면 임피던스 천이 행렬을 구할 수 있다. 작은 변조 임피던스에 대해서 ΔY 는 단위길이 당 결합계수 κ 와 다음의 식의 관계를 갖는다.

$$\Delta Y/Y = \kappa \Delta L \tag{1}$$

식에서 ΔL 은 행렬이 나타내는 구역의 미소길이이며 그레이팅 주기 Λ 의 절반과 같다. 저 임피던스에서 고 임피던스로의 천이 행렬과 고 임피던스와 저 임피던스로의 천이 행렬은 표준 전송 선로 방정식으로부터 다음과 같이 주어진다.^[4,5]

$${}^{k+1} \begin{bmatrix} A(n+1) \\ B(n) \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} 1+\kappa\Delta L & -\kappa\Delta L \\ \kappa\Delta L & 1-\kappa\Delta L \end{bmatrix} {}^k \begin{bmatrix} A(n) \\ B(n+1) \end{bmatrix}^r \tag{2}$$

$${}^{k+1} \begin{bmatrix} A(n+2) \\ B(n+1) \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} 1-\kappa\Delta L & \kappa\Delta L \\ -\kappa\Delta L & 1+\kappa\Delta L \end{bmatrix} {}^k \begin{bmatrix} A(n+1) \\ B(n+2) \end{bmatrix}^r \tag{3}$$

식에서 A와 B는 각각 좌·우측 방향으로 진행하는 광파의 전계, r은 반사파, i는 입사파, n은 구역번호, 그리고 k는 반복 계산 횟수를 나타낸다. DFB 반도체 레이저의 전체 모델을 그림 1에 보였다. 외부에서 전류가 주입되면 주입 전류에 따른 운반자 밀도를 계산한다. 운반자 밀도에 따라 임의방사 값이 계산되고 임의방사광이 진행하면서 이득매질에 분포된 그레이팅에 따라 주파수 선별된 광만이 귀환되어 발진하게 된다.

2.2. 외부 광 주입 DFB 반도체 레이저 모델

외부 광 주입에 의한 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저의 출력 광 특성을 모의실험으로 조사하기 위해 모델링한 실험 장치도를 그림 2에 나타냈다. 먼저 외부 광 주입을 위한 광원으로 DFB 반도체 레이저 모델에 사용된 파라미터와 동일한 값을 갖는 외부 공진기 F-P 반도체 레이저로 모델링 하였다. 출력 광펄스의 특성을 조사하기 위한 광 스펙트럼 분석기는 블랙만-해리스 창(blackman-harris window)을 갖는 후리에(Fourier) 변환으로 각각 모델링 하였으며 고속의 광 검출기는 시간 지연이 없는 50 GHz의 대역폭을 갖는 저역 통과 필터로 모델링 하였다. 모의실험은 먼저 외부 광 주입을 위한 파장가변광원을 미리 동작시켜 출력 광을 안정화시킨 후에 이득 스위칭 DFB 레이저에 주입시켰다. 또한 DFB 반도체 레이저 모델의 경우 빠른 응답을 얻기 위해 초기 운반자 밀도를 임계 값으로 바이어스 하였다.

외부 광 주입을 위해 파장가변이 가능한 파장가변 광원의 출력 광을 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에 주입시키고 이득 스위칭된 출력 광펄스 열을 광 스펙트럼 분석기와 고속 광 검출기를 이용하여 주입광의 조건에 따른 결과를 저장한다.

2.3. 모의실험 결과

반복률이 1 GHz인 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에서 출력 광펄스의 시간 지터가 가장 최소가 되도록 직류는 문턱 전류의 1.2배, 교류는 문턱전류의 2배로 인가하였다. 외부 광

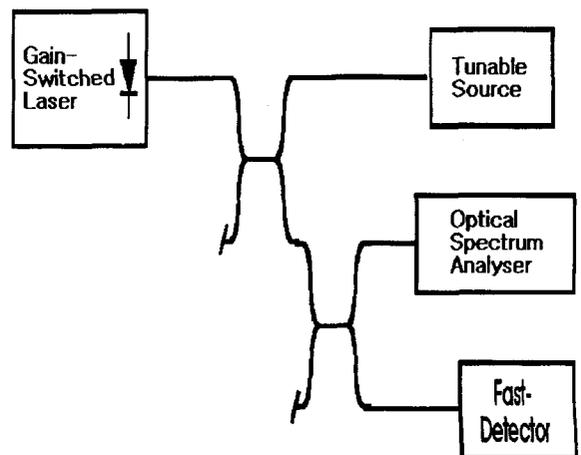


그림 2. 외부 광주입 이득스위칭 DFB 반도체 레이저 실험 장치도.

주입이 없는 경우 이득 스위칭 광펄스의 광 스펙트럼과 광펄스를 시간적으로 중첩시킨 그림을 그림 3(a)와 (b)에 보였다. 그림(a)에서 가로축은 파장이고 세로축은 눈금 당 10 dB인 스펙트럼 전력이며, 그림(b)의 가로축은 눈금당 30 ps인 시간축이고 세로축은 출력 광펄스의 광 전력을 나타낸다. 그림 (a)는 DFB 반도체 레이저를 이득 스위칭 할 경우 주모드와 부모드 간의 전력차이가 대략 13 dB정도로 나타나는 전형적인 스펙트럼 분포를 보인다. 그림(b)는 200 ns 동안 발생하는 광펄스를 시간축 상에서 겹친 그림으로 이득 스위칭된 출력 광펄스는 시간축에서 많이 흔들리는 것을 볼 수 있다. 시간 지터를 구하기 위해 이득 스위칭 광펄스의 상승 모서리에서 FWHM(full width at half maximum)이 위치하는 시간을 히스토그램으로 분석한 뒤 가우시안(Gaussian)으로 근사화하고 이의 표준편차를 계산하였다. 그 결과 외부 광 주입이 없는 경우 시간지터는 대략 7.35 ps로 나타났다.

외부 주입광의 파장에 따른 시간 지터의 영향을 조사하기 위하여 광 전력 -6.4 dBm의 외부 광을 1.5495 μm 에서 1.5504 μm 까지 1 nm 간격으로 파장을 가변하여 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에 주입할 때 시간 지터와 광펄스 폭의 변화를 그림 4에 보였다. 가로축은 주입광의 파장이며 우측의 세로축은 펄스폭이고 좌측의 세로축은 이때의 시간 지터이다. 주입되는 외부 광이 이득 스위칭 레이저의 발진 모드 이외의 파장일 경우는 시간 지터의 감소가 이루어지지 않았

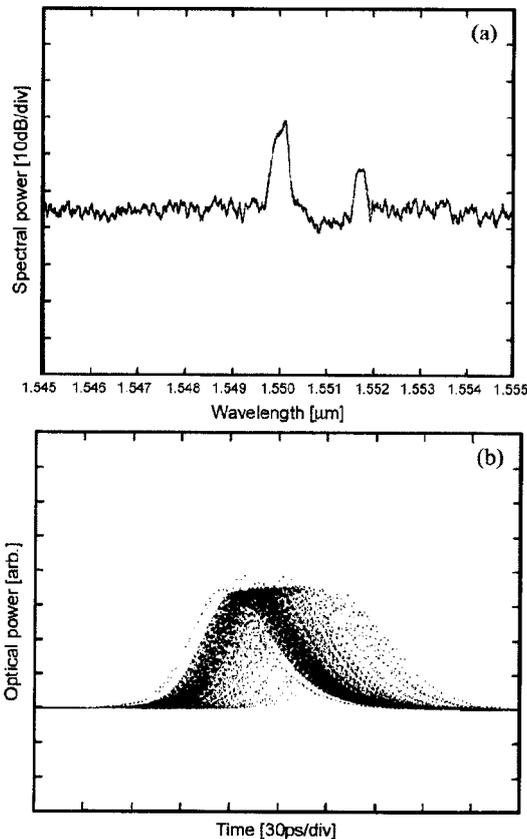


그림 3. 모의실험 : 외부광주입이 없는 경우 이득스위칭 광펄스의 스펙트럼(a)과 중첩된 시간계적(b).

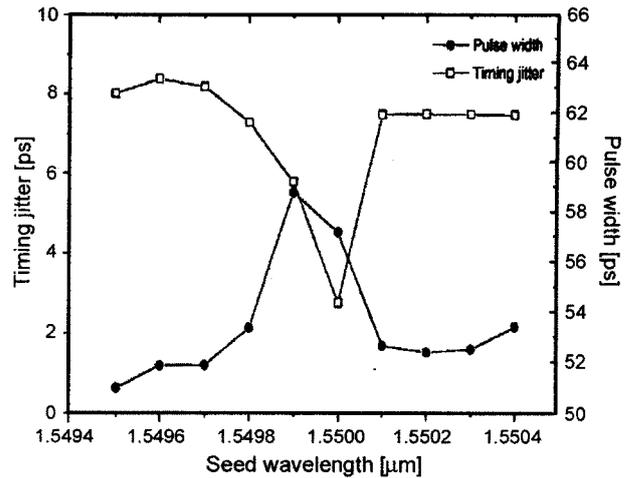


그림 4. 주입광의 파장에 따른 시간지터와 펄스폭의 변화.

며 발진모드 내의 파장에 대해서만 시간 지터가 감소하였다. 또한 시간 지터의 감소와 더불어 대략 6 ps 정도 펄스폭의 증가도 보였다. 동일한 전력의 외부 광을 주입할 경우 시간 지터가 최소가 되는 파장은 칩된 스펙트럼의 중심 근처인 1.550 μm 로 나타났다.

주입광 전력에 대한 시간지터의 의존성을 조사하기 위하여 주입광의 파장을 1.550 μm 로 고정시키고 주입광의 전력을 -15 dBm에서 -4 dBm까지 가변시켜 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에 주입시킨 결과를 그림 5에 보였다. 가로축은 주입광의 전력이며 우측의 세로축은 펄스폭이고 좌측의 세로축은 시간 지터를 나타낸다. 먼저 주입광 전력이 -16 dBm에서 -10 dBm 범위 내에서는 외부 광 주입이 없는 경우보다 시간 지터가 증가하였는데 이는 주입광의 전력이 너무 적어 레이저 발진에 잡음으로 기여되기 때문으로 판단된다. -10 dBm에서 -6 dBm 범위에서 주입광의 전력 증가가 시간 지터의 급격한 감소를 가져오며 광펄스의 폭이 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때 발생하는 광펄스의 폭은 대략 55 ps 이내로 됨을 알 수 있다. -6 dBm에서 -4 dBm 범위에서 주입광의 전력

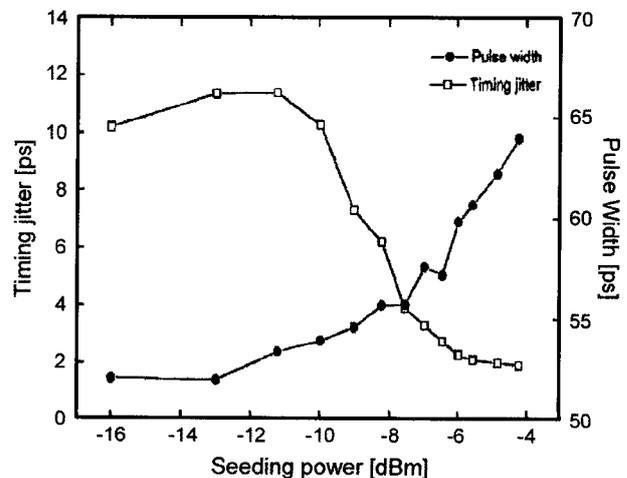


그림 5. 주입광 전력에 따른 시간지터와 펄스폭 변화.

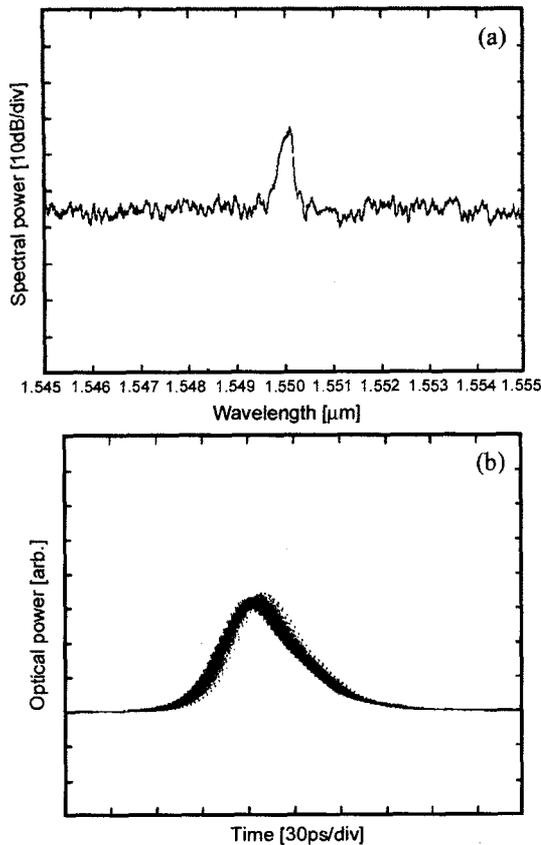


그림 6. 모의실험 : 외부광 주입이 있는 경우 이득스위칭 광펄스의 스펙트럼(a)과 증첩된 시간계획(b).

증가에 따른 시간지터의 감소는 포화되어 일정한 수준을 유지하나 광펄스의 폭은 급격하게 증가됨을 볼 수 있다. 이 같은 모의실험 결과는 기발표된 논문^[2]의 경향과 잘 일치함을 알 수 있다. 최적의 주입광 전력에 대한 기준으로 시간 지터는 포화되기 시작하며 광펄스의 폭이 급격하게 증가하기 직전의 광전력으로 할 때 -6.4 dBm으로 나타났다.

그림 6에 주입되는 외부 광의 파장이 1.55 μm이고 전력이 -6.4 dBm인 최적의 조건 아래에서의 광 스펙트럼과 광펄스를 시간적으로 증첩시켜 (a)와 (b)에 보였다. 그림 (a)에서 외부 광 주입으로 부모드가 거의 사라지고 주모드와 바닥 준위 사이의 전력차이가 대략 20 dB 정도로 나타났다. 그림 (b)에서 시간 지터는 외부 광 주입으로 급격하게 감소하여 대략 2.74 ps로 나타났다. 결과적으로 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에서 외부 광 주입의 유무에 따라 출력 광펄스의 주모드와 부모드 간의 전력 차이는 약 13 dB에서 약 20 dB로 7 dB 정도 커졌고, 시간 지터는 7.35 ps에서 2.74 ps로 대략 1/2.7 배 정도 감소되었으며 펄스폭은 52.9 ps에서 57.2 ps로 약 4.7 ps의 증가를 보였다.

일반적으로 Fabry-Parot 반도체 레이저의 경우 시간지터가 DFB 반도체 레이저의 경우보다 적게 나타나는데 이는 Fabry-Parot 반도체 레이저의 발진 대역이 DFB 반도체 레이저와 비교해서 상당히 넓고 이에 따라 임의 방사 광이 발진에 기여할 수 있는 확률이 크다. 반면 DFB 반도체 레이저의 경우 단일

모드 발진을 하므로 발진 대역폭은 상대적으로 좁아 임의방사 광이 발진에 기여할 수 있는 확률이 그만큼 적어진다. 즉, 임의방사광이 레이저의 발진에 기여할 수 있는 확률에 따라 시간지터의 차이가 난다고 판단된다.

III. 실험 및 결과

모의실험에서 얻은 결과를 확인하기 위해 중심파장이 1.5541 μm DFB 반도체 레이저와 HP8168D 파장가변광원을 사용하여 외부 광 주입 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저 실험을 수행하였다. 실험에서도 모의실험의 경우와 유사하게 DFB 반도체 레이저를 주파수 1 GHz에서 25 dBm의 교류와 임계값의 직류전류를 인가하였다.

외부 광 주입이 없는 경우, 최적의 구동조건 아래에서 이득 스위칭 광펄스의 광 스펙트럼과 광펄스를 시간적으로 증첩시킨 그림을 그림 7(a)와 (b)에 나타냈다. 그림 (a)에서 이득 스위칭된 광펄스의 스펙트럼은 주모드와 부모드가 대략 20 dB 정도의 차이가 났다. 또한 광펄스의 증첩된 시간계획을 나타낸 그림 (b)에서 광펄스의 양 모서리가 매우 넓게 퍼짐을 알 수 있고 이때의 펄스폭은 50.4 ps이고 시간 지터는 대략 8.08 ps이었다.

시간 지터가 최소로 되는 외부 광의 파장은 1.5536 μm이었으며, 외부 광 주입으로 시간지터는 충분히 감소되면서 펄스

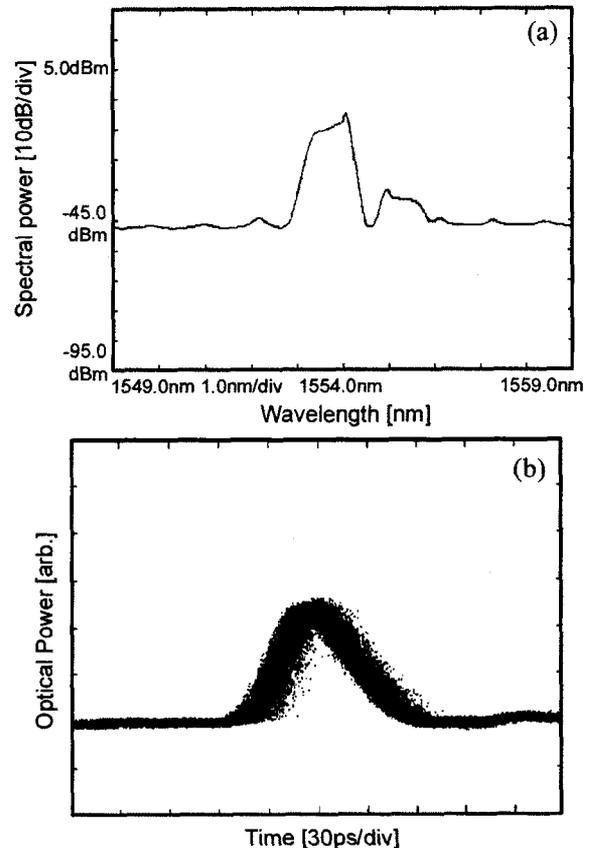


그림 7. 실험 : 외부광주입이 없는 경우 이득스위칭 광펄스의 스펙트럼(a)과 증첩된 시간계획(b).

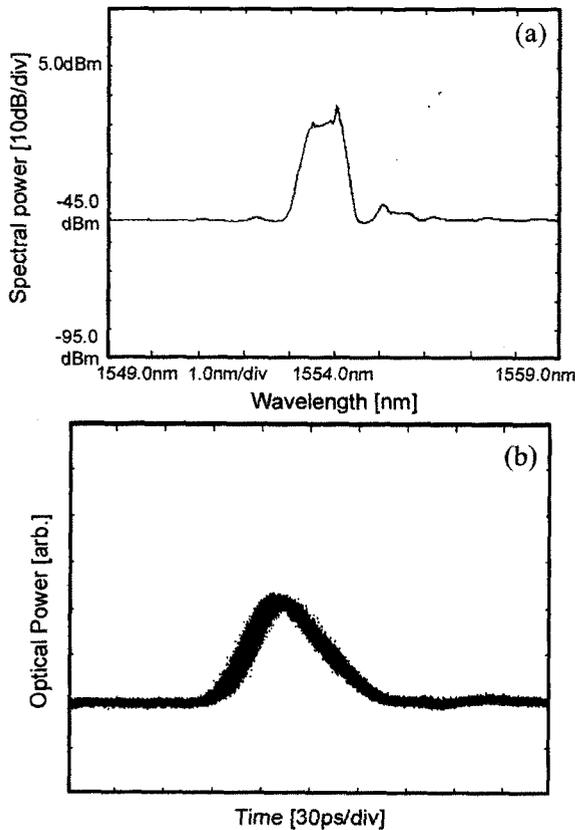


그림 8. 실험 : 외부광 주입이 있는 경우 이득스위칭 광펄스의 스펙트럼(a)과 중첩된 시간계적(b).

폭은 크게 변화가 없는 최적주입 광전력은 -5 dBm으로 나타났다. 최적조건에서 광펄스의 스펙트럼과 중첩된 광계적을 그림 8(a)와 (b)에 보였다. 실험에서 사용한 주입광 전력은 DFB 레이저에 입력되는 광섬유의 끝(pig tail)에서 기준점을 잡은 것으로서, 모의 실험에서 가정한 것과 레이저에 실제적으로 주입되는 광 전력과는 차이가 있을 것으로 생각된다. 그림 (a)에서 외부의 광 주입으로 주모드와 부모드 간의 전력차이가 대략 30 dB정도로 확대되었으며 그림 (b)에서 시간 지터의 감소로 광펄스의 양 모서리가 좁게 됨을 알 수 있고 이때의 펄스 폭은 52.4 ps이고 시간 지터는 대략 4.75 ps로 나타났다. 결과적으로 외부광주입으로 시간지터는 1/1.8배 감소되었다.

이 같은 실험결과는 본 논문에서 제안한 모델의 모의실험

결과와 매우 유사함을 알 수 있으며 이는 본 논문에서 제안한 모델의 유용성을 입증한다.

IV. 결 론

이득 스위칭 반도체 레이저는 구현상의 간결성에도 불구하고 시간 지터가 큰 것이 단점으로 지적되어왔다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 제안된 외부 광 주입 방법에 대한 광 주입 효과 분석을 위해 전송선로 모델을 구현하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 외부 광 주입이 출력 펄스 시간 지터와 폭 및 스펙트럼 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 모의 실험 결과의 일부를 실험적으로 입증하였다.

모의실험 결과, 주입 광전력이 증가함에 따라 시간지터는 감소하고 부모드 억제율과 펄스폭은 증가했으며, 최소 시간 지터는 주입 광의 파장이 쉰 스펙트럼의 중심과 일치할 때 나타났다. 예를 들면, 광 전력이 -6.4 dBm인 외부 광을 주입한 경우에서 부모드 억제율은 13 dB에서 20 dB로 7 dB정도 증가했으며, 시간 지터는 외부 광 주입으로 7.35 ps에서 2.74 ps로 대략 2.7배 정도로 감소됨을 확인하였다. 모의실험 결과를 검증하기 위해, 이득 스위칭 DFB 반도체 레이저에 연결된 광섬유 끝단에 -5 dBm의 외부 광을 인가 하였다. 그 결과, 주모드에 대한 부모드 억제율은 20 dB에서 30 dB로 10 dB 정도 향상되었으며, 시간 지터는 대략 8.08 ps에서 대략 4.75 ps로 대략 1.8배 정도로 감소되었다.

모의실험과 실험결과 그리고 기 발표된 논문의 결과와의 유사성은 본 논문에서 제시한 모델의 유용성을 확인해주며, 본 논문에서 제시한 모델이 반도체 레이저를 이용하는 모든 시스템의 성능예측 연구에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 증명한다.

참고문헌

- [1] L. P. Barry, B. C. Thomsen, J. M. Dudley, and J. D. Harvey, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 935 (1998).
- [2] D. S. Seo and H. F. Liu, *Electron. Lett.* **33**, 2129 (1997).
- [3] D. S. Seo, D. Y. Kim, and H. F. Liu, *Electron. Lett.* **32**, 44 (1996).
- [4] A. J. Lowery, *Electron. Lett.* **25**, 1307 (1989).
- [5] A. J. Lowery, *IEE Proc. J.* **137**, 293 (1990).

Numerical analysis on the effects of external light injection seeding in a gain-switched DFB semiconductor laser

Myoung Woo Lee

Department of Electronics, Tong Won College, Kyunggi-do 464-711, Korea

Jung Hyun Eom and Dong Sun Seo

Department of Electronics Engineering, Myong Ji University, Kyunggi-do 449-728, Korea

(Received March 29, 2000, Revised manuscript received July 25, 2000)

We investigate the effects of the power and wavelength of externally injection seeded light on timing jitter and pulse width in a gain-switched 1.55 μm DFB semiconductor laser by numerical simulation based on the transmission line laser model. As external seeding power increases, the timing jitter decreases and the pulse width increases. The lowest timing jitter is observed when the seed wavelength is aligned with the chirped spectrum center. By external seeding, we can decrease the timing jitter up to 1/2.7 without noticeable increase in pulse width. Our simulation results reasonably well agree with our sampled experiment and the other published papers. This proves the validity of our model to analyze a system based on a semiconductor laser.

OCIS codes : 230.0230, 140.3490, 140.3520.