

論文96-33A-7-1

2.5Gbps 광통신용 DFB-LD 모듈에 대한 외부 광궤환의 영향 (Effects of the external optical feedback on the DFB-LD modules for 2.5Gbps optical communication system)

朴景鉉*, 李重基*, 韓正熙*, 曹豪成*, 張東薰*, 朴喆淳*

(Kyung Hyun Park, Jung Kee Lee, Jung Hee Hahn, Ho Sung Cho,
Dong Hoon Jang, and Chul Soon Park)

요 약

상용화된 3종류의 2.5Gbps 광통신용 DFB-LD 모듈을 대상으로 외부 광궤환이 광송신 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 궤환율이 증가할수록 DFB-LD의 단일 발진 모드가 외부 공진기의 다중 모드로 분할되면서 이들 다중 모드 사이의 beating에 의한 강도 잡음이 현저하게 발생하여, 광섬유 경로중에서 발생할 수 있는 최대 반사율을 가정한 -8.8dB의 궤환율에서는 각각 1.5dB, 1.2dB 및 1.0dB의 수신 감도 저하(penalty)가 발생하였다. 이때 궤환광의 편광을 DFB-LD 모듈이 광궤환에 가장 민감한 상태로 조정할 경우 위의 penalty에 각각 0.5dB의 추가 penalty가 발생하였다. DFB-LD 모듈 제작에 사용되는 단일 편광용 광 isolator에 대한 궤환광 차단율 평가 실험으로부터, 광 isolator의 실제 편광 의존 차단율은 규격보다 10dB 정도 낮게 나타나고 여기에 편광 필터링 효과에 의해 유효 차단율은 규격보다 20dB 정도 낮게 나타남으로서, DFB-LD 모듈이 궤환광에 의해 민감하게 영향을 받는 것으로 해석되었다. 2.5Gbps DFB-LD 모듈의 안정된 광송신 특성을 확보하기 위해서는 기존의 광 isolator 대신에 편광에 무관한 광 isolator를 사용하거나 단일 편광용 광 isolator의 궤환광 차단율 규격을 30dB에서 40dB 이상으로 증가시켜야 됨을 지적하였다.

Abstract

Effects of the external optical feedback on the optical transmission characteristics were evaluated for 3 kinds of commercialized DFB-LD modules for 2.5Gbps optical communication systems. As a result, intensity noise induced by external optical feedback via generating the external cavity modes deteriorated the transmission performances of the DFB-LD modules as much as 1.5dB, 1.2dB, and 1.0dB for the maximum feedback ratio of -8.8dB which corresponds to the worst reflection along the fiber transmission line. Additional penalty of 0.5dB was occurred when state of polarization of feedback light was adjusted. From the experiments evaluating the isolation ratio of the single polarization optical isolator, decrease of the polarization dependent isolation ratio as much as 10dB from that of specification and the effective isolation ratio as much as 20dB from that of specification was major cause of high sensitivity of DFB-LD modules to external feedback. It was suggested that polarization independent optical isolator or single polarization optical isolator with isolation ratio specification of more than 40dB is required for 2.5Gbps DFB-LD modules with complete suppression of external feedback effects.

* 正會員, 韓國電子通信研究所 화합물반도체 연구부
(ETRI, Compound Semiconductor Research Dept.)
接受日字: 1996年2月10日, 수정완료일: 1996年6月21日

I. 서론

DFB(distributed feedback)-LD(laser diode)는
고속 강도 변조에도 단일 주파수 동작을 유지하여 대

용광, 장거리 광통신의 광원으로서 적합한 특성을 가진다. 현재 상용화되고 있는 2.5Gbps 광통신 시스템은 DFB-LD를 광학계를 이용하여 부착 광섬유와 광결합시킨 DFB-LD 모듈을 광원으로 사용하고 있다. DFB-LD 모듈이 Gbps급 광통신의 광원으로서 만족시켜야 하는 고속 변조, 저 chirping 등의 여러 조건 중에서 외부 광궤환(external optical feedback)에 대한 동작 안정성이 변조 속도가 높아질수록 중요한 문제로 대두되고 있다. 일반적으로 LD는 LD로부터 방출된 빛이 외부에서 반사되어 공진기로 되돌아오는 궤환광에 의해 정적, 동적 동작 특성 변화를 보이며, 특히 DFB-LD와 같이 단일 주파수 동작의 경우는 더욱 민감하게 영향을 받는다. 이것은 LD가 주입 전하밀도로부터 주어지는 이득과 굴절률이 서로 선폭 확대 계수로 결합되어 있고 전/광 변환 기구에서의 위상 지연에 따른 공진 특성을 가짐으로서, 고립된 LD의 발진 모드에 포함되어 있는 자연 방출광보다 큰 궤환광이 있을 때 공진을 매개로 한 공진기내의 광자, 전하밀도 및 굴절률이 서로 연동되어 변화함으로써 고립된 LD의 발진 조건이 교란을 받기 때문이다. 이때 LD가 이득도 파형에서 굴절률 도파형으로, 다중 종모드 발진에서 단일 주파수 발진으로 갈수록 발진 모드에 포함되어 있는 자연 방출광이 작아져서 DFB-LD의 경우 $-60\text{dB} \sim -80\text{dB}$ 의 궤환율(feedback ratio)에도 동작 특성 변화가 유발된다.^[11] 또한 LD의 자연 방출광은 그 자체로도 광출력의 강도 잡음원이지만 고립된 LD의 발진 모드의 진폭, 위상과 전하밀도의 섭동을 일으켜 광궤환이 있을 때 LD가 안정화 상태로 되돌아가는 것을 방해함으로써^[12] 이득과 굴절률의 상호 연동 관계 및 공진 현상과 더불어 광궤환에 의한 LD 고유의 동작 특성 변화를 결정하는 기본 요인이 된다. 따라서 지금까지 외부 광궤환에 의한 Fabry-Perot형 LD의 정적 동작 특성 변화에 대해서는 많은 연구가 진행되어 궤환율, 궤환광의 편광 상태, 위상 및 가 간섭성에 따라 이득 변동(발진 임계 전류의 변동을 유발)^[3]에 의한 광출력 변동(optical power undulation)^[14]과 최소 임계 전류 또는 최소 선폭 발진 조건에 의한 발진 선폭 축소/확대 및 발진 모드 불안정성(mode hopping)^[5] 등이 보고되었다. 동적 동작 특성 측면에서는 LD와 외부 반사면으로 구성되는 외부 공진기 모드의 주파수 간격에 대해 역정수배 및 정수배로 주어지는 저주파수^[6] 및 고주파수^[7] 분포의 강도 잡음을 유발할

뿐만 아니라 특히 광궤환량이 임계치를 초과할 때의 coherence collapse 상태에서의 급격한 발진 선폭 확대에 동반되는 강도 잡음의 급격한 증가^[8]는 LD가 광통신용 광원으로 사용될 때의 광신호 특성을 크게 나쁘게 하는 것으로 그 발생 과정이 혼돈(chaos) 현상과 동일시되고 있다.^[9] 단일 주파수로 동작하는 DFB-LD에 대한 외부 광궤환의 영향은, 출력광의 가간섭성이 크고 발진 모드에 포함된 자연 방출광의 비가 작아서 광궤환에 민감한 면을 제외하면, 원리적으로는 다중 종모드 발진 LD의 경우와 같아서 연구가 미흡하지만 궤환광의 위상에 따른 정적 특성인 측모드 억제율(side mode suppression ratio;SMSR)의 변화^[10]와 광궤환량에 따른 동적 특성인 timing jitter의 증가^[11]가 보고되고 있으며, 광신호의 품질을 떨어뜨리는 광출력의 상대 강도 잡음(relative intensity noise;RIN)의 증가가 DFB-LD의 단일 주파수 발진 모드 내부에 외부 공진기 모드가 발생하여^[12,13] DFB 모드와 이들 사이의 beating으로부터 기인한다는 것이 밝혀지면서^[14] 이의 전송 오류(bit error rate;BER)에 미치는 영향을 분석한 결과도 발표되었다.^[15]

DFB-LD 모듈을 광원으로 하여 광통신 시스템을 구성할 때 광 콘넥터가 다량 사용되고 있다. 광 접속면이 사각으로 연마되지 않은 2.5Gbps 광통신용 일반 광 콘넥터에 있어서 완전히 밀착되지 않은 접속면은 큰 궤환광 발생원이 된다. 즉 광 콘넥터의 접속면의 간격이 사용 광원의 반 파장의 정수배가 될 때마다 최대 13.2%의 반사면으로 작용한다. 이와 같은 광궤환 조건에서도 광신호의 품질을 유지함으로써 주어진 BER을 유지하기 위한 수신감도의 저하(penalty)가 발생하지 않도록 하기 위해서, DFB-LD를 모듈로 제작할 때는 필히 궤환광 차단용 광 isolator를 광학계에 내장시킨다. 2.5 Gbps 광통신용 광원을 기준으로 볼 때 외부 궤환광을 차단함으로써 RIN의 급격한 증가 없이 안정된 광신호 송신 성능을 확보할 수 있는 광 isolator의 궤환광 차단율은 20~30dB 정도이면 충분한 것으로 알려져 있으며,^[16,17] 현재 상용화된 DFB-LD 모듈은 30dB 정도의 차단율을 가진 광 isolator를 내장하고 있다. 그러나 DFB-LD 모듈에 내장된 광 isolator는 DFB-LD의 발진 편광 성분(일반적으로 전계가 LD의 접합면에 평행인 TE 편광)만 투과시키는 단일 편광형이기 때문에 궤환광의 편광 상태에 따라 차단율이 서로 다르게 주어질 것으로 예측되는데, 이에 대한

DFB-LD 모듈의 동작 특성 변화에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 광 isolator를 내장한 3 종류의 상용화된 DFB-LD 모듈을 대상으로 광섬유 경로에서 발생할 수 있는 최대 반사율을 가정한 광케환이 발생했을 때의 DFB-LD 모듈의 강도 잡음을 측정하고 이것이 2.5 Gbps 광신호 전송에 미치는 영향을 평가하였으며, 수신감도 penalty의 원인이 되는 케환광에 대한 광 isolator의 편광에 따른 차단 특성을 평가한 후 이에 대한 해결책을 논의하였다.

II. 이론적 배경

그림 1에 광학계, 광 isolator 및 부착 광섬유로 구성된 DFB-LD 모듈을 보였다. 그림에서 광학계의 광결합 효율을 η , 광 isolator의 역방향 케환광 차단율을 χ 로 두고 부착 광섬유 외부의 광섬유 경로중의 L_{ext} 떨어진 곳에 반사율이 R_{ext} 인 반사면을 가정하면, 광 isolator를 역방향으로 통과한 외부 케환광은 LD의 발진 주파수 및 이득을 고립된 상태에서의 값으로부터 변화시킨다.^[18] 외부 광케환이 LD의 발진 조건에 미치는 영향을 알아보기 위해, LD 공진기내의 진계를 LD 고유의 선폭 확대 계수 α 를 써서 Van der Pol 진동자로 표현하면^[19]

$$\frac{dE(t)}{dt} = (i\omega_o + \frac{\Delta G}{2}(1 + \alpha))E(t) + kE(t - \tau_{ext}) \quad (1)$$

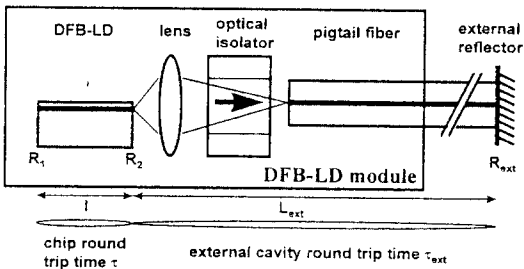


그림 1. DFB-LD 모듈의 내부구조와 외부반사면
Fig. 1. Structure of DFB-LD module with external reflector.

여기서 ω_o 는 고립된 LD의 공진 모드의 각주파수이며 ΔG 는 케환광에 의한 이득 변동을 나타내는 포화 이득이다. 광케환의 케환 변수인 k 는 외부 케환 전계가 LD의 공진 모드로 결합되는 효율을 나타내는 것으로

본 실험에서는 다음과 같이 주어진다.

$$k = \frac{(1-R_2)}{\tau\sqrt{R_2}} \sqrt{\eta^2 \chi R_{ext}} \equiv \frac{C_{DFB}}{\tau} \sqrt{R_{eff}} \quad (2)$$

(2) 식에서 C_{DFB} 는 내장 회절격자에 의한 광결합 계수(coupling coefficient; κ)와 cavity 길이(L)의 $\kappa \cdot L$ 값 및 R_2 반사면에서의 회절격자의 위상에 따라 DFB-LD의 외부 광케환에 대한 민감도를 결정하는 비례 상수이다.^[20] 참고로 $\kappa \cdot L$ 이 2인 전형적인 DFB-LD의 C_{DFB} 의 최소값은 0.8(평균값 1.5)로서 양면이 벽개로 형성된 Fabry-Perot LD의 $(1-R_2)/2\sqrt{R_2}=0.64$ 와 비교할 때 외부 광케환에 대해 더 민감함을 알 수 있다. (1)식에 전계의 일반적인 형태로서 $E(t)=E_o(t)\exp(i(\omega_o t + \psi(t)))$ 를 대입하고 실수 부분과 허수 부분을 나누면 LD의 외부 광케환 조건에서의 rate equation을 얻는다.

$$\frac{dE_o(t)}{dt} = \frac{1}{2} \Delta G E_o(t) + k E_o(t - \tau_{ext}) \cos \Delta(t) \quad (3)$$

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \Delta G \alpha - k \frac{E_o(t - \tau_{ext})}{E_o(t)} \sin \Delta(t) \quad (4)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = J - \frac{n(t)}{\tau_s} - G |E_o(t)|^2 \quad (5)$$

여기서 $\Delta(t) = \omega_o \tau_{ext} + \psi(t) - \psi(t - \tau_{ext})$ 이다. (5) 식은 전하 밀도 $n(t)$ 의 rate equation으로 G 는 이득, J 는 주입 전하 밀도, τ_s 는 전하 수명이다. $E_o(t)=E_o$ 및 천천히 변하는 $E_o(t)$ 의 envelope의 위상 $\psi(t)=\Delta \omega t$ 조건에서의 rate equation의 정적 해를 구하면

$$\Delta G = -2k \cos(\omega \tau_{ext}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \omega = \omega - \omega_o &= -k(\alpha \cos \omega \tau_{ext} + \sin \omega \tau_{ext}) \\ &= -k\sqrt{1 + \alpha^2} \sin(\omega \tau_{ext} + \tan^{-1} \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

로서 케환광의 위상($\omega \tau_{ext}$)에 따라 LD의 발진 모드의 이득과 발진 각주파수가 고립된 LD의 발진 임계 조건으로부터 각각 ΔG , $\Delta \omega$ 만큼 변화됨을 보여준다. 여기서 (7)식의 양변에 τ_{ext} 를 곱하면 위상 조건식이 되는데 다음과 같이 주어지는 무차원 케환계수 C 의 크기에 따라 이 위상 조건을 만족시키는 한 개 또는 여러 개의 ω 가 존재할 수 있음을 나타낸다.

$$C = k \tau_{ext} \sqrt{1 + \alpha^2} = \frac{\tau_{ext}}{\tau} C_{DFB} \sqrt{R_{eff}} \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (8)$$

(7)식으로부터 coherence 길이 이내의 외부 광궤환에 의한 발진선폭 변화는 고립된 LD의 발진선폭 ν_0 에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \delta \nu &= \delta \nu_0 \left(\frac{d\omega}{d\omega_0} \right)^2 \\ &= \delta \nu_0 [1 + C \cos(\omega \tau_{\text{ext}} + \tan^{-1} \alpha)]^{-2} \end{aligned} \quad (9)$$

(9)식으로부터 외부 광궤환에 의한 최소 발진 선폭 조건은 $\omega \tau_{\text{ext}} = \tan^{-1} \alpha$, (6)식으로부터 최소 발진 임계 이득 조건은 $\omega \tau_{\text{ext}} = 2n\pi$ ($n=0,1,2, \dots$)이나, 이 두 조건은 동시에 만족되지 않고 C의 크기에 의해 좌우된다. 먼저 $C \ll 1$ 인 경우는 광궤환의 영향을 거의 받지 않으나 $C \geq 1$ 일 경우 (7) 식의 위상조건을 만족하는 여러 개의 ω 중에서 최소 발진 선폭/임계 이득 조건에 따라 발진 선폭의 확대/축소 또는 mode hopping이 나타나고 $C \gg 1$ 일 경우, 특히 C가 LD의 공진 주파수와 같아질 때, 공진이 완화되지 않고 광 스펙트럼 상에 공진 주파수 간격의 측 모드를 형성하기 시작하여 자연방출에 의해 증폭됨으로써 발진 선폭이 급격하게 확대되는 coherence collapse가 발생된다. coherence collapse에서는 광출력의 세기와 위상이 극심하게 요동하고, 따라서 RIN도 급격하게 증가함으로서 LD를 광통신용 광원으로 부적합하게 하므로 모듈 제작시 궤환광이 coherence collapse의 발생 임계 광궤환량을 넘지 않도록 해야 한다.

외부 광궤환 조건에서 광출력에 포함되어 있는 강도 및 주파수 fluctuation은 전하 밀도와 광자 밀도의 미소 변동 $\Delta n(t)$ 와 $\Delta S(t)$ 를 가정하여 이들에 대해서 (3)~(5) 식과 동일한 과정으로 구한 rate equation으로 표현된다.¹²⁾ 이때 전계에 대해 임의의 위상으로 발생하는 자연 방출에 의한 광자밀도, 위상 및 전하밀도의 교란을 표현하는 Langevin noise force항을 부가했을 때 광자밀도의 미소 변동 $\langle \Delta S \rangle^2$ 를 평균 광출력으로 나눈 것이 RIN이 된다.

III. 실험

1. 실험 장치의 구성

그림 2에 실험에 사용된 장치의 구성을 보였다. DFB-LD 모듈로부터 나온 빛을 2×2 3dB 방향성 광결합기를 이용하여 인위적인 광궤환과 특성 측정이 동시에 이루어지도록 하였고, 광궤환율은 전반사 거울과 광 감쇠기(optical attenuator)를 이용하여 -35dB로부터

최대 -8.6dB(약 14%의 빛이 DFB-LD 모듈로 궤환)까지 연속적으로 조절되도록 하였다.

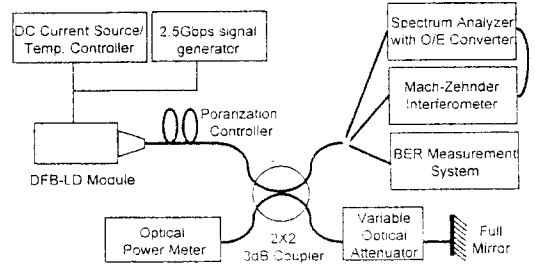


그림 2. 광궤환 실험 장치 구성도

Fig. 2. Block diagram of external optical feedback experiment.

DFB-LD의 강도 잡음은 20 GHz 대역폭의 광수신기와 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였으며, 여기에 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 부가하여 발진 선폭도 self-homodyne 방식으로 측정하였다. 2.5Gbps 광통신에 대한 실험은 신호 발생기와 BER 측정기를 이용하여 수행하였다. 그림 1과 같이 구성되는 DFB-LD 모듈에 있어서, 광궤환 실험에서 일반적으로 인용되는 궤환 광량비(fractional feedback : f_{ext})는 광학계의 광결합 효율 η 와 광 isolator의 궤환광 차단율 χ 때문에 정확하게 평가하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 DFB-LD 모듈의 부착 광섬유를 통해 출력된 광량과 궤환되는 광량의 비를 궤환율(feedback ratio)로 정의하고 이것을 기준으로 실험을 수행하였다. 궤환율과 f_{ext} 및 (2) 식의 R_{eff} 와의 관계는

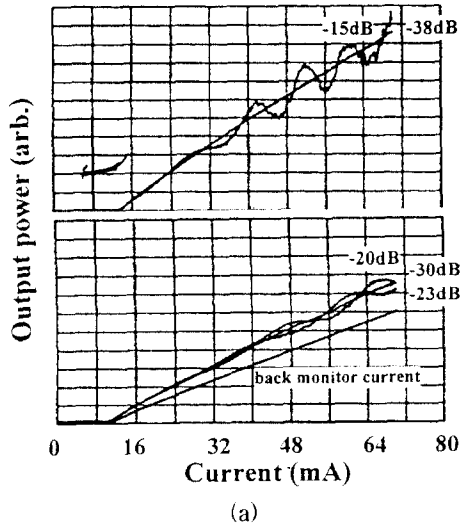
$$f_{\text{ext}} = \eta^2 \chi (\text{feedback ratio}) = R_{\text{eff}} \quad (10)$$

로 주어지며, 궤환율은 다시 손실로 환산한 R_{ext} 에 2회의 방향성 결합기, 광 감쇠기 통과 손실을 더한 값으로 주어진다. 실험에 사용된 DFB-LD 모듈은 2.5Gbps용으로 상용화된 제품으로서 제작 회사에 따라 A, B, C로 분류하였으며 이들 사이의 차이점은 다음과 같다. 먼저 A, B는 균일한 회절 격자를 가지며 전면 출력면을 무반사 코팅하고 후면을 벽개(A), 고반사 코팅(B)한 DFB-LD로, C는 $\lambda/4$ 위상천이된 회절격자를 가지며 전, 후면을 무반사 코팅한 DFB-LD로 제작되었다. 광결합계는 A는 단일 렌즈, B, C는 quasi-confocal의 2중 렌즈로 구성되며 모두 30dB 이상의 궤환광 차단율을 규격을 가지는 광 isolator를 내장하고

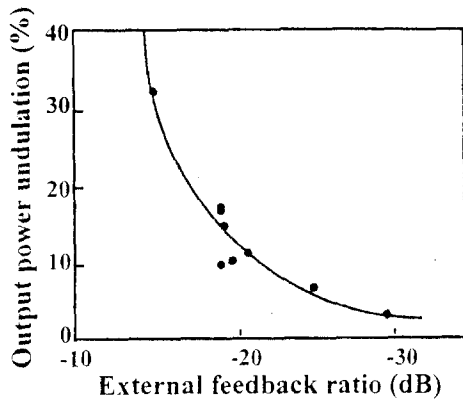
있다. A, B, C의 광결합 효율 η 는 $\sim 40\%$ (손실 -4dB)로 평가된다.

2. 광궤환에 의한 정적 특성 변화

광궤환이 정적 특성인 광출력에 미치는 영향을 평가하기 위해, A 그룹에 속하는 여러 개의 DFB-LD 모듈을 대상으로 궤환율에 대한 주입전류-광출력(I-L) 특성을 측정된 결과를 그림 3의 (a)에 보였다.



(a)



(b)

그림 3. 광궤환에 의한 DFB-LD 모듈의 광출력 특성 변화

(a) 주입전류-광출력 특성 (b) 궤환율에 따른 undulation 진폭

Fig. 3. Effects of external feedback on optical output power of DFB-LD module.

(a) Injection current-Light output (b) Amplitude of undulation vs various feedback ratio

그림으로부터 주입 전류에 대해서 광출력이 주기적으로 변화하는 undulation이 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 지금까지의 Fabry-Perot형 LD를 대상으로한 수~수십 cm 떨어진 곳으로부터의 광궤환 실험^[4,6]과는 상이한 결과를 얻었다. 즉 외부 반사면까지의 광경로가 4~5m 길이(L_{ext})의 광섬유로 구성된 본 실험에서는 undulation의 발생이 발진 이후부터 바로 시작되지 않고, 일정한 광출력(주입전류)에서 현저해지며 발진 임계 전류 및 평균적인 양자 효율이 광궤환이 없을 때와 동일하게 나타났다. 비교를 위해서 A 그룹의 DFB-LD 모듈에 광 isolator를 내장시키지 않고 수행한 광궤환 실험에서는 일반적인 incoherent 광궤환에 의한 전면 출력면의 유효 반사율 증가 효과를 반영하는 발진 임계 전류와 양자 효율의 감소 현상이 나타났으며, 동일 궤환율에 대해 undulation의 진폭은 오히려 크게 줄어들었다. 따라서 본 실험과 같이 광 isolator를 내장하고 단일 모드로 발진하며 광궤환 거리(L_{ext})가 길어서 외부 공진기 모드의 주파수 간격이 좁은 경우는, LD와 외부 cavity의 공진 모드 사이의 위상 정합 조건 변화^[4]로는 광출력 undulation을 설명할 수 없는 것으로 생각된다. I-L 실험과 병행하여 수행된 self-homodyne 방식의 발진 선폭 측정 결과, 주어진 궤환율에서의 주입 전류에 따른 발진 선폭은 [(광출력)·(발진 선폭)=상수] 조건을 만족시키지 않고 평균값에서 $\pm 25\%$ 정도의 폭으로 축소/확대를 반복하였는데, 선폭의 최대 축소/확대가 광출력 undulation의 peak 또는 valley에 일치하였고 궤환율로부터 추정된 f_{ext} (χ 를 20dB로 가정하였고 η 는 -10dB 로 측정됨)에 따른 평균 선폭의 축소 경향이 참고문헌 [5]와 일치하고 있음을 확인하였다. 이상의 I-L 및 발진 선폭 실험으로부터 DFB-LD에 대한 먼 거리로부터의 광궤환의 영향은 주입 전류에 따라 광출력이 증가할수록 LD의 coherence 길이(L_c)가 증가하고(실험 대상 DFB-LD의 선폭이 광궤환이 없을 때 $10\text{MHz} \cdot \text{mW}$ 이므로 광출력이 2mW를 초과하면 $L_c > 2L_{ext}$ 가 성립된다), 활성층 온도 상승에 의한 발진 주파수의 감소로 위상 조건이 변함으로써 전체적으로 coherent/incoherent 광궤환의 반복에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉 (주입 전류 증가에 의한 광출력 증가)-($L_c > L_{ext}$)-(coherent 광궤환)-(최소 이득/선폭 발진 조건에 의한 광출력 증가/감소 및 발진 선폭 확대/축소)-(발진 선폭 확대시 $L_c < L_{ext}$ 또는 축소시 위상

조건 변화에 의한 최소 이득 발진 조건으로 이동)-(incoherent 광케환)-(광출력 증가에 의한 발진 선폭 축소)의 단계로 케환광에 의한 출력광의 locking (coherent)과 unlocking(incoherent) 과정을 반복하며, 이때 활성층 온도 상승에 의한 위상 조건의 변화에도 Fabry-Perot LD^[4]와는 달리 단일 DFB 모드 발진 특성 때문에 mode hopping이 일어날 수 없어서 광출력의 undulation이 크게 발생한 것으로 해석될 수 있다. 그림 3의 (a)에 DFB-LD의 후면 광출력에 의한 monitor 광검출기의 광전류를 함께 보였는데, 전면 광출력의 undulation에 상관없이 선형적인 I-L 특성을 나타내고 있다. 이것은 실험에 사용된 DFB-LD의 양면 반사면이 서로 다른 반사율을 가짐으로서 공진기내의 광자/전하 밀도가 공진기 길이 방향으로 비대칭 분포를 하는 것과 상관성이 있는 것으로 생각되며 향후 이에 대한 자세한 연구가 필요하다. 케환율에 따른 평균 광출력에 대한 undulation 진폭을 그림 3의 (b)에 보였다. 그림에서 undulation이 배제되는 케환율은 -30dB 이하로 나타났으며, 케환율과 케환광에 의한 이득 변동으로부터 주어지는 undulation 진폭 사이가 식 (6), (10)의 관계를 만족시키고 있음을 알 수 있다. 여기서 케환광의 편광을 바꾸어 주기 위해 부착 광섬유를 직경 5cm 정도로 수회 감은 loop의 방향을 조정할 경우 undulation의 발생을 최대화시키거나 완전히 배제하는 것이 가능하였다. 이것은 LD에 있어서 편광 상호간의 직교성(orthogonality)을 감안하더라도 광 isolator를 내장하지 않은 DFB-LD 모듈과의 undulation 진폭 비교에서 알 수 있듯이, 단일 편광형 광 isolator를 내장한 DFB-LD 모듈이 케환광의 편광에 대해서 더 민감하게 영향을 받는다는 의미를 가진다. 본 논문에서는 광케환의 영향을 측정할 때 인위적으로 편광을 조정하지 않고 편광이 평균적인 분포를 가지고 케환되도록 두었다.

연속 동작 조건에서 A 모듈의 광케환율에 따른 광출력 변동을 그림 4에 보였다.

광케환율이 증가할수록 시간에 따른 광출력의 변동이 증가하여 -10dB에서는 평균 광출력의 8%에 달하는 진폭으로 변동하였다. 여기서도 케환광의 편광을 조정할 경우, 케환율에 상관없이 DFB-LD 모듈의 광출력을 바로 광 파워미터로 접속한 경우(direct)와 비슷한 결과를 얻었다. 광케환 조건에서의 연속 동작 광출력의 시간적인 변동은 주어진 주입 전류와 케환율에

대해 DFB-LD가 광케환의 발진 주파수 또는 발진 임계 전류 변동 효과를 최대화하는 방향으로 이동하여 동작함으로써 안정화되려는 것을 자연방출 및 뒤에서 자세히 밝혀질 외부 공진기 모드의 불안정성이 교란시키기 때문에 발생한 것으로 해석된다.^[2]

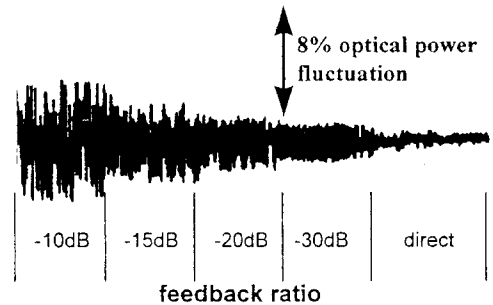


그림 4. 광케환에 의한 연속 동작 DFB-LD 모듈의 광출력 변동

Fig. 4. Optical output power fluctuation of DFB-LD module for various feedback ratio.

3. 광케환에 의한 동적 특성 변화

그림 5에 케환율에 따른 B 모듈의 강도 잡음을 보였다. 측정시 스펙트럼 분석기의 분해 대역폭은 100kHz이고 50회의 측정 결과를 평균함으로써 케환광의 편광 효과가 평균적으로 나타나도록 하였다. DFB-LD 모듈의 구동 조건으로는 2.5Gbps 강도 변조시의 "ON" level에 해당하는 전류를 주입했다.

측정 결과, 케환율이 증가할수록 LD로부터 외부 반사면까지의 왕복 시간의 역수로 주어지는 주파수 간격의 ripple의 발생과 크기 증가가 현저하고, RIN에 해당하는 ripple 아래 부분의 연결선도 점진적으로 증가하며, 전체적으로 두 개의 잡음 성분이 미치는 주파수 영역도 확대되었다. B 모듈의 구동 전류에서의 광출력과 분해 대역폭으로부터 잡음의 ground RIN은 -150dB/Hz로 계산되었으며, 그림에서 excess 잡음으로 표시된 각각의 주파수 성분의 잡음은 양자효율이 보정된 광수신기로 측정하였으므로 ground RIN 값을 더하면 그 주파수에서의 RIN이 된다. 그림 5에는 나와 있지 않지만 광케환에 의한 고주파수 성분의 잡음으로 알려진^[7] 공진 주파수 부근에서의 강화된 RIN 및 위의 주파수 간격과 동일한 ripple형 잡음도 관찰되었으나, 케환율에 따른 RIN과 ripple의 크기 증가가

500MHz 이하의 저주파수 영역보다 훨씬 작아서 논의에서 제외하였다. 그림 5의 DC로부터 수백 MHz 대역에 분포하는 강도 잡음은 공진 주파수가 광캐환에 의해 수백 MHz 대역으로 이동하여 좁은 주파수 분포를 갖는 저주파수 잡음^[6]과는 뚜렷이 구별되는 현상으로 지금까지 이에 대한 보고가 거의 없었다. 또한 그림 5의 저주파수 대역에 분포해 있는 강도 잡음이 동일 캐환율에서도 광 isolator를 내장하지 않은 DFB-LD 모듈에서는(f_{ext} 가 2 자리수 이상 증가) 발생되지 않음을 확인하였다. 이와 같이 광 isolator를 내장한 상용화된 DFB-LD 모듈의 광캐환에 의한 특이한 동적 특성 및 앞에서 논의한 정적 특성의 변화의 원인을 규명하고, 특성 변화가 실제 2.5Gbps 광신호 전송에 미치는 영향을 평가하는 것에 본 논문의 주안점을 두었다.

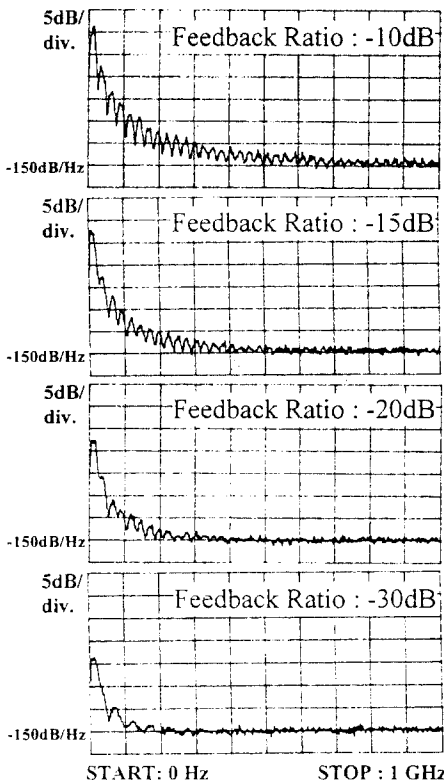


그림 5. 캐환율에 따른 DFB-LD 모듈의 강도 잡음 스펙트럼
 Fig. 5. Intensity noise spectra of DFB-LD module for various feedback ratio.

A, B, C 모듈의 캐환율에 따른 각 주파수 성분의 강도 잡음 증가를 그림 6에 보였다. 그림에서 캐환율은

광섬유 경로에서 발생할 수 있는 최대/최소 반사율을 고려하여 -8.8dB ~ -30.8dB로 변화시켰으며, ground RIN으로부터의 excess 잡음은 ripple의 중간 값을 취하였다.

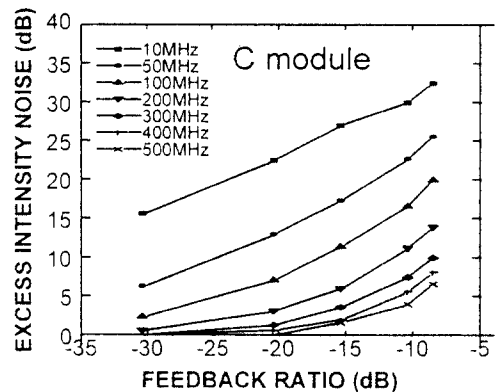
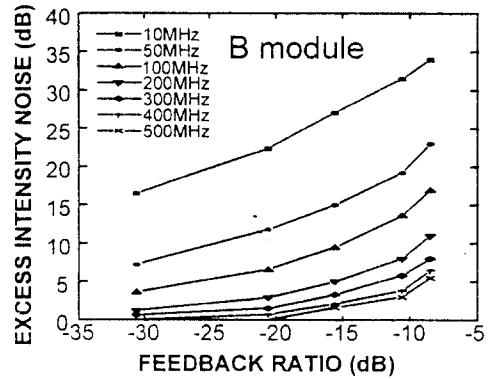
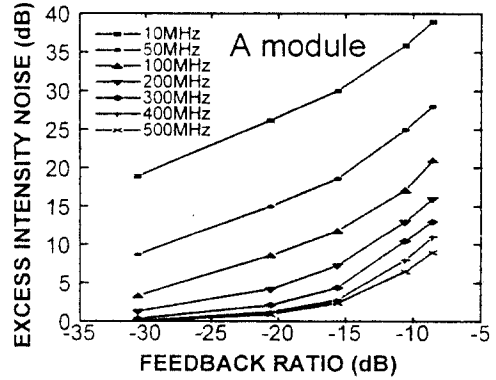


그림 6. 캐환율에 따른 각 주파수 성분의 강도 잡음 증가
 Fig. 6. Excess intensity noise at each frequency for various feedback ratio.

측정시 DFB-LD의 주입 전류를 증가시키면 절대 캐환 광량이 증가하여 excess 잡음도 비례하여 커지는

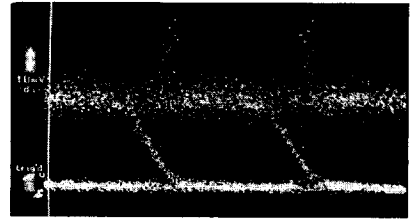
경향을 보였다. 그림 6은 DFB-LD 모듈에 2.5Gbps 신호의 "ON" level에 해당하는 전류를 주입한 것으로 "OFF" level 구동의 경우와 비교하면 낮은 주파수로 갈수록 excess 잡음의 크기 차이가 벌어져서 10MHz, 50MHz에서는 모듈에 따라 5~15dB까지 차이가 났다. 그림 6의 궤환율에 따른 RIN의 전반적인 경향은 coherence collapse 영역에서의 급격한 증가^[8]와는 달리 점진적으로 증가하고 있지만, 증가폭이 15dB나 되고, 특히 최대 궤환율 부근에서는 증가율이 커지는 것을 미루어 볼 때 coherence collapse로의 전이가 가까워지고 있는 것으로 해석된다.

IV. 결과 및 논의

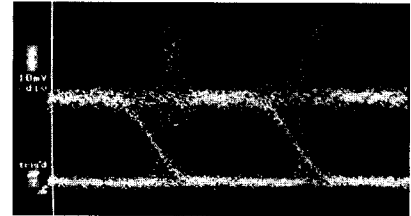
1. 2.5Gbps 광전송 실험

궤환율에 따른 A 모듈의 2.5Gbps 광신호의 eye diagram을 그림 7에 보였다. 큰 외부 광궤환이 있을 때, 특히 "ON(1)" level에서 광신호의 분포가 넓어지는 현상을 볼 수 있는데 이것은 앞에서 측정된 광궤환에 의한 LD의 RIN 증가에 따른 것이다. 또한 발진 임계 전류의 1.5배로 구동(pre-bias)되는 "OFF(0)" level에서의 광출력 변동은 상대적으로 작은 증가를 보이고 있고, pre-bias에 민감한 광신호의 발생 지연 시간과 timing jitter도 약간 증가하지만 2.5Gbps의 요구 규격 40ps보다 작게 나타남으로써, 결과적으로 수신기의 광신호 판별을 어렵게 함으로써 BER을 나쁘게 하는 주요인은 "ON" level의 강도 잡음인 것으로 생각된다.

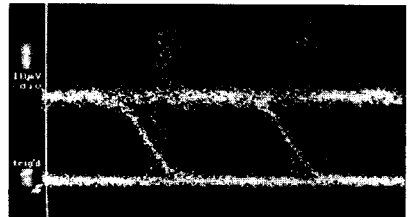
여기서 그림 7은 "1"과 "0"이 반복되는 신호에 대한 것으로 광궤환의 영향이 균일하게 나타났지만, 실제 광통신에서 사용하는 $(2^{23}-1)$ 길이의 NRZ(non return to zero) 변조의 PRBS(pseudo random binary sequence)에 대한 광신호 패턴에서는 참고 문헌 [17]에서 나타난 바와 같이 현재의 광신호와 LD로부터 외부 반사면까지 왕복하는데 걸리는 시간 전의 광신호가 "1"로서 서로 일치할 때만 그림 7에서 보인 광궤환에 의한 강도 잡음이 나타났고 그 외의 조합에서는 강도 잡음의 영향을 무시할 수 있는 수준이었다. 이것은 DFB-LD 모듈이 고속 변조됨에 따라 chirping에 의해 발진 선폰이 확대됨으로써, LD 내에서 궤환광이 단지 incoherent한 광자 밀도의 가감에만 기여하기 때문인 것으로 생각된다.



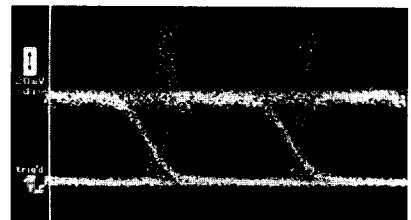
Feedback Ratio : -8.8dB



Feedback Ratio : -15.8dB



Feedback Ratio : -25.8dB



Feedback Ratio : <-31dB

그림 7. 궤환율에 따른 2.5Gbps 광신호의 eye diagram

Fig. 7. Eye diagrams of 2.5Gbps optical signal for various feedback ratio.

기준 광수신기를 이용하여 궤환율에 따른 A, B, C 모듈의 2.5Gbps 신호에 대한 수신 감도를 측정된 결과를 그림 8에 보였다.

DFB-LD 모듈의 광신호를 광수신기에 직결한 경우 (direct)와 비교할 때 10^{-10} 의 BER에 대해 최대 궤환율 -8.8dB에서의 수신 감도 penalty는 각각 1.5dB(A), 1.2dB(B), 1.0dB(C)로 나타났으며 세 모듈 모두 낮은 BER에서 수신 감도가 크게 나빠지고 있는데, 궤환율이 이보다 더 증가할 경우 error floor가 발생될 가능성이 높음을 시사하고 있다. 여기서 C 모듈

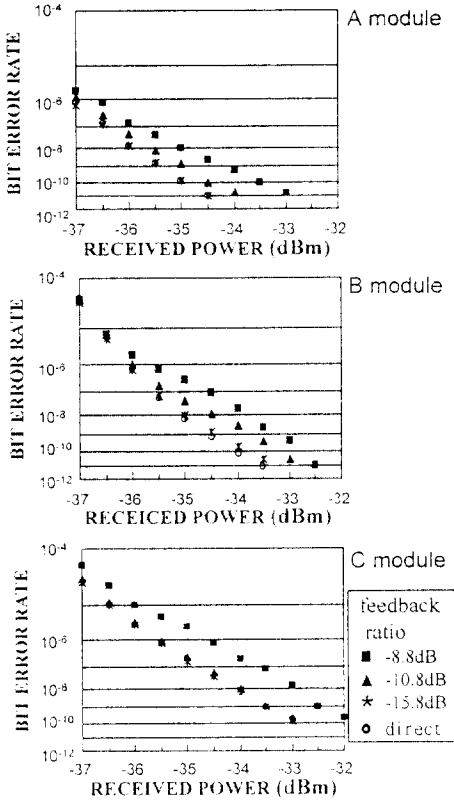


그림 8. 궤환율에 따른 각 모듈의 수신 감도 특성
 Fig. 8. Receiver sensitivity of each module for various feedback ratio.

은 최대 궤환율에서만 수신 감도 penalty가 발생함으로서 다른 종류의 모듈과는 구별되었는데, 이것은 $\lambda/4$ 위상 천이된 회절격자를 가지며 양면 반사면이 무반사 코팅됨으로서 공진기내의 광자/전하 밀도 분포가 대칭인 DFB-LD가 발진 모드 선택성이 크고 따라서 궤환율에도 덜 민감하기 때문인 것으로 해석된다. 측정된 수신 감도 열화는 그림 7의 eye diagram으로부터 예상되는 것보다 작은 penalty로 주어졌는데, 이것은 앞에서 언급한 궤환율의 영향이 미칠 수 있는 조건이 만족될 확률에 의해 BER이 감소했기 때문인 것으로 해석된다.^[22] 또한 DFB-LD 모듈과 광수신기 사이에 길이 40km, 80km의 광섬유를 삽입하여 전송 실험한 경우에는 궤환율이 없을 때와 동일한 1dB 정도의 분산 penalty만 발생하고 궤환율에 의한 추가적인 분산 penalty는 발생하지 않았다. 이것은 궤환율이 분산 penalty를 유발하는 DFB-LD의 chirping에 영향을 미치지 않는다는 의미로서 참고 문헌 [15]의 계산

결과와도 일치한다. 참고로 먼 거리로부터의 광궤환을 대상으로 하는 본 실험에서는 연속 발진 광 스펙트럼이 궤환율에 무관하게 동일한 SMSR과 스펙트럼 형태를 유지하였으며, 소신호 응답 특성도 응답 곡선이 매끈하지 못한 것을 제외하면 변화가 발생하지 않았다. 정적, 동적 특성 평가에서와 마찬가지로 궤환광의 편광을 조절할 경우 BER가 민감하게 변화하였으며, 강도 잡음이 최대화되도록 편광을 조정하였을 때 10^{-10} 의 BER을 유지하기 위한 수신감도 penalty는 평균적인 편광 조건으로 측정된 위의 penalty에 각각 0.5dB를 더한 값으로 주어졌다. 앞 절의 동적 특성 측정과 본 절의 광전송 실험용 A, B, C 모듈은 발진 파장이 모두 1540nm 부근인 것을 선별하여 사용하였다.

2. 강도 잡음 논의

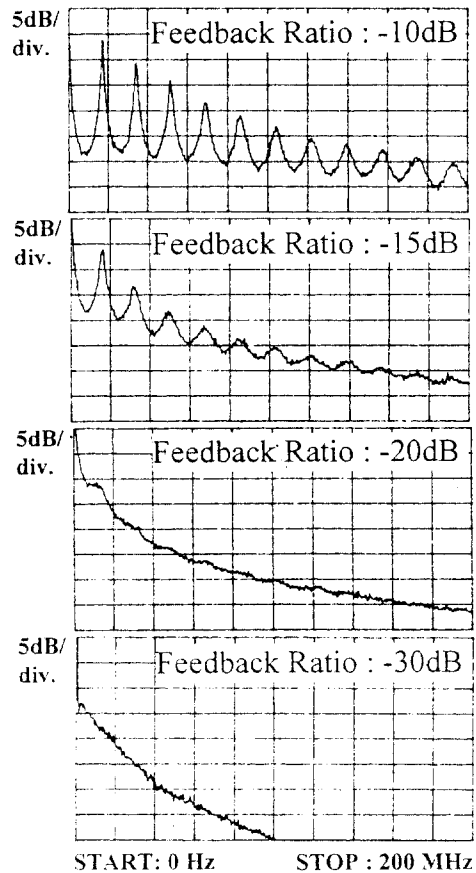


그림 9. 궤환율에 따른 DFB-LD 모듈의 발진 선폭 특성
 Fig. 9. Emission linewidth of DFB-LD module for various feedback ratio.

매우 낮은 BER에서 현저한 수신 감도 저하를 유발하는 DFB-LD 모듈의 외부 케환광에 의한 강도 잡음의 근원을 알아보기 위해 케환율에 따른 B 모듈의 발진 선폭을 측정하여 그림 9에 보였다.

실험에 사용된 delayed self-homodyne 측정 장치의 선폭 분해능은 1 MHz 이하이며 0Hz를 중심으로 대칭 분포하는 잡음(선폭의 beat)의 세기가 반으로 (-3dB) 줄어드는 지점의 한쪽 주파수가 발진 선폭으로 주어진다. 측정시 모듈에 대한 주입 전류는 "ON" level과 동일하게 두었다. 그림으로부터 광 스펙트럼은 광 콘넥터의 평균 잔류 케환율(-30dB 이하)에서 3MHz의 선폭으로 단일 주파수 발진하였으나, 케환율이 증가함에 따라 1MHz 이하의 좁은 주파수 분포를 가지면서, LD로부터 외부 반사면까지의 왕복 시간의 역수로 주어지는 주파수 간격의 ripple이 발생됨을 보여주고 있다. 이것은 케환율이 증가함에 따라 DFB 모드의 주파수 분포(envelope)가 넓어지면서 그 내부가 외부 공진기 모드들로 분할(splitting)되는 것을 의미하는 것으로서 이것은 다시 finesse가 1000이고 FSR(free spectral range)이 6GHz인 super cavity scanning Fabry-Perot 간섭계로 측정했을 때 그림 10에서 보인 바와 같이 발진 모드가 다중 중모드로 분해됨으로써 확인되었다.

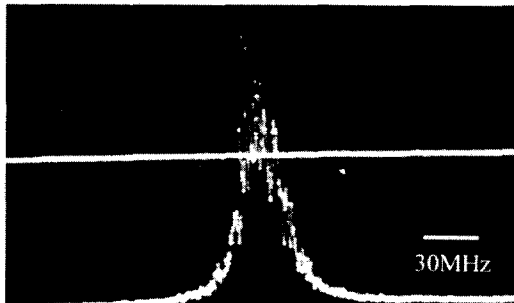


그림 10. scanning Fabry-Perot 간섭계로 측정된 발진 선폭

Fig. 10. Emission linewidth measured by scanning Fabry-Perot interferometer.

여기서 선폭 곡선의 ripple과 강도 잡음의 주파수 분포에서 나타나는 ripple은 모듈의 종류에 상관없이 서로 발생이 시작되는 케환율, 발생 주파수 및 ripple의 높이 증가 경향 등에서 완전한 상관 관계를 가지는 것으로 나타났다. 이것은 외부 광케환에 따라 DFB 모

드 내에 외부 광케환 지점과 LD로 구성되는 외부 공진기 모드가 형성됨으로써 발진 선폭이 나누어지고 이들 불안정한 외부 공진기 모드 사이의 beating에 의해 강도 잡음의 ripple이 발생할 뿐만 아니라 저주파수 영역으로 갈수록 beating의 기여가 커짐으로써 1/f 형태의 강도잡음 분포를 유발하는 것으로 해석된다. 여기서 강도 잡음을 유발하는 외부 공진기 모드 사이의 beating은 개별적으로 coherent 광케환하는 외부 공진기 모드들이 DFB-LD를 통과할 때 DFB 모드의 중심 주파수에서 벗어난 외부 공진기 모드일수록 작은 이득과 큰 위상지연을 받게되어 모드 사이의 록킹이 깨어질 뿐만 아니라 이들 모드 사이의 주파수 간격이 좁아서 hole burning을 통한 이득 경쟁이 심화되기 때문인 것으로 생각되며, 이는 scanning Fabry-Perot 간섭계로 관찰한 외부 공진기 모드들이 서로 에너지(크기)를 주고받으며 큰 폭으로 fluctuation하고 있는 사실로부터 확인되었다. 본 실험에서 나타난 선폭과 강도 잡음의 ripple의 주파수 간격은 외부 반사면의 길이에 대해 정확히 등간격으로 주어지지 않고 케환율이 증가할수록 등간격에 가까워지는 경향을 보였다. 반사면까지의 광섬유 길이 6m에 대해서 케환율에 따른 첫 번째 ripple의 주파수를 측정한 결과 16.5MHz(-10dB), 15.8MHz(-15dB), 15.2MHz(-20dB)를 얻었으며 이것은 (7) 식의 위상조건을 만족시키기 위해 다음과 같이 Fabry-Perot LD에 대한 것으로 근사한 외부 공진기 모드의 주파수가 조정된 것이다.^[13]

$$\theta = \frac{4\pi n_{LD}l}{\lambda} - a \sin\left(\frac{4\pi n_F L_{ext}}{\lambda}\right) \quad (11)$$

$n_{LD}l$ 은 DFB-LD의 굴절률을 고려한 유효 길이, $n_F L_{ext}$ 은 광섬유로 구성된 외부 반사면의 유효 길이이고 a 는 (2) 식으로부터 k/τ 로 정의된다. (11) 식으로부터 위상조건($\theta=0$)을 만족시키기 위해 a (케환율에 비례)가 증가할수록 첫 번째 ripple의 λ 가 감소(주파수는 증가)함을 알 수 있다.

3. 광 isolator의 케환광 차단율 평가

케환광 차단용 광 isolator를 내장한 상용화된 2.5Gbps DFB-LD 모듈이 민감하게 광케환의 영향을 받는 원인을 알아보기 위해 DFB-LD 모듈에 사용되는 단일 편광용 광 isolator의 케환광 차단 성능을 평가해보았다. 여기서 DFB-LD 모듈용 광 isolator는 1.55 μ m 파장의 입사광에 대해서 편광을 45도 회전시키

는 두께로 결정 성장된 Faraday rotator(예;yttrium iron garnet)의 양면에 편광자(polarizer)와 검광자(analyzer)를 투과 편광축이 45도 기울여지도록 접착한 후 자석으로 둘러싼 형태를 가지며, 모듈 제작시 DFB-LD의 편광과 편광자의 편광이 일치하도록 정렬하여 사용된다. 이러한 단일 편광용(편광 의존형) 광 isolator는 편광기 및 검광기의 편광 소광비뿐만 아니라 Faraday rotator의 편광 회전 오차에 의해 역방향 투과광에 대한 차단율이 크게 나빠지는데 Faraday rotator의 편광 회전이 45도로부터 $\Delta\theta$ 만큼 오차가 있을 때 차단율의 감소는 다음과 같이 주어진다.^[23]

$$4L = -10 \log [10^{L_m} \sin^2(\Delta\theta) + \cos(2\Delta\theta)] \quad (12)$$

(12) 식은 편광기와 검광기가 이상적인 것으로 가정하더라도 주위 온도 또는 입사광 파장의 변화로 Faraday rotator의 편광 회전 오차가 10%(4.5도)만 발생하여도 광 isolator의 최대 차단율(L_m) 30dB로부터 8.5dB의 차단율 감소가 유발됨을 나타내며, 실제 최대 차단율이 30dB보다 크고 편광기와 검광기의 편광 소광비가 이상적이지 못할 뿐만 아니라 편광축 정렬이 45도로부터 벗어나는 경우에는 더욱 큰 차단율 감소가 예상된다.

광 isolator의 케환광 차단율을 실험적으로 평가하기 위해 DFB-LD 모듈의 광학계와 유사한 광 isolator, 렌즈 및 부착 광섬유로 구성되는 광학계를 대상으로 DFB-LD의 출력광을 역방향으로 입사시킬 때, 입사광의 편광을 회전시키면서 광 isolator를 투과하는 광의 편광에 따른 광출력을 측정한 결과, DFB-LD에 가장 유효하게 영향을 미치는 편광(DFB-LD의 발진 편광과 평행인 것)의 케환광 차단율이 17dB로서 DFB-LD의 발진 편광에 직교하여 영향을 미치지 않는 편광의 케환광 차단율 28dB에 비해 크게 낮게 나타났다.

A 모듈의 내부를 분해능이 높은 OTDR(optical time domain reflectometer)로 측정된 결과를 그림 11에 보였다. 그림 11은 1.55 μ m 파장의 LED 출력광을 부착 광섬유를 통하여 모듈로 역방향 입사시켰을 때 모듈 내부의 반사면에 의한 반사광의 세기를 측정된 것으로, 이것으로부터 광 isolator의 차단율을 유추할 수 있다. 먼저 <1>의 -13.9dB의 반사는 DFB-LD 모듈 내부의 부착 광섬유 단면에 의한 것으로 4%의 Fresnel 반사와 일치하고 있다. <2>, <3>은 광 isolator의 양면에서의 반사로 검광기, Faraday

rotator 및 편광기의 광학 두께가 0.53mm임을 나타내고 있고, 렌즈 양면의 반사는 검출되지 않고 있다. <4>는 편광성이 없는(unpolarized) LED 출력광 중에서 광 isolator를 역방향으로 통과한 빛의 편광이 DFB-LD의 편광과 평행일 때 DFB-LD의 전면 출력면을 만나 반사한 것이다. 이때 수직인 성분의 기여는 광 isolator에 의해 2회(왕복)에 걸쳐 차단되므로 무시된다. 4의 반사율 -45.5dB에 광학계를 왕복할 때의 결합 손실 9dB, LED의 편광 손실 3dB, 광 isolator의 삽입 손실 0.5dB 및 DFB-LD의 전면 출력면(5%로 무반사 코팅됨)의 반사 손실 13dB를 고려하면 광 isolator의 차단율은 20dB로 평가된다.

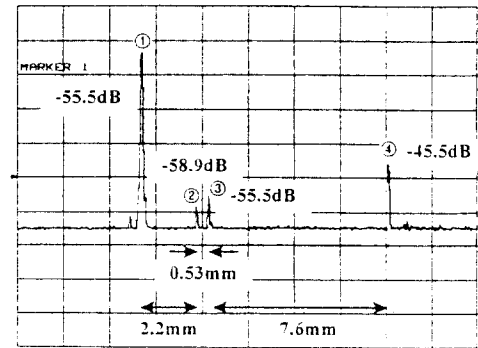


그림 11. DFB-LD 모듈 내부의 OTDR 측정 결과
Fig. 11. OTDR measurement of inner DFB-LD module.

케환광의 편광에 대한 비등방성 차단율의 영향을 평가하기 위해, A 모듈의 DFB-LD를 대상으로 광 isolator를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우에 대해서 강도 잡음 및 발진 선폭 분할이 시작되는 임계 케환 광량을 서로 비교해 보았다. 실험 결과 광 isolator를 삽입한 경우의 임계 케환 광량은 차단율을 포함해서 80 μ W로, 광 isolator를 삽입하지 않은 경우는 90 μ W로 주어졌다. 이것은 광 isolator에 의한 유효한 케환광 차단율이 9.5dB임을 의미하는 것으로 위에서 측정된 편광에 따른 최소 차단율보다도 10dB 정도 낮은 값이다. 여기서 광 isolator의 유효 차단율이 실제 차단율보다 나빠지는 것은 임의의 편광 상태인 케환광에 대해 비등방성 차단으로 케환광의 편광을 DFB-LD에 영향을 주는 편광으로만 필터링하는 효과가 유발되었기 때문인 것으로 생각되며 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다.

결론적으로 DFB-LD 모듈 제작에 사용되는 단일 편광용 광 isolator의 차단율은 광 isolator를 역방향으로 통과한 빛의 편광이 순방향 통과 편광과 직교할 때는 규격상의 차단율 30dB를 가지지만, 평행할 때는 원래의 차단율보다 10dB 정도 낮은 차단율을 가질 뿐만 아니라 편광 필터링 효과에 의해 유효 차단율은 이보다 10dB 더 낮은 10dB로 주어짐으로서 상용화된 DFB-LD 모듈이 광케환의 영향을 피할 수 없었던 것으로 해석된다.

V. 결 론

광 isolator가 내장된 상용화된 DFB-LD 모듈 3종을 대상으로 외부 광케환의 영향을 평가해 보았다. 이때 외부 광케환의 세기는 모듈에 부착된 광섬유를 통하여 출력되는 광량과 케환되는 광량의 비인 케환율을 기준으로 하여 광섬유 전송 경로중에서 발생할 수 있는 최대 반사율을 가정하여 -8.8dB로부터 광 콘넥터의 잔류 반사율을 고려한 -30dB까지 변화시켰다. 실험 결과 광케환은 광출력의 undulation을 유발하였을 뿐만 아니라 외부 공진기를 형성하여 DFB-LD의 단일 종모드를 외부 공진기의 다중 공진 모드로 분할 발전케함으로써 이들 다중 모드 사이의 beating에 의한 강도 잡음이 DFB-LD 모듈의 광통신 성능을 저하시켰다. 특히 DFB-LD 모듈에 -8.8dB의 케환율에 해당하는 광케환이 인가되었을 때, 2.5Gbps 광신호 전송시 10^{-10} 의 BER을 유지하기 위한 수신 감도의 저하(penalty)는 광케환이 없을 때와 비교해서 모듈에 따라 각각 1.5dB, 1.2dB, 1.0dB가 발생하였다. 여기서 DFB-LD 모듈의 I-L 특성, 강도 잡음, 발진 선폭 분할 및 최종적인 수신감도 등의 정적, 동적 특성은 광케환의 편광 상태에 따라 민감하게 변화하였는데 편광 조정으로 광케환의 영향을 완전히 배제하거나 극대화시킬 수 있었다. 본 논문에서는 광케환의 편광을 인위적으로 조정하지 않고 평균적인 편광 케환의 조건으로 실험하였으나 편광을 조정할 경우 위의 수신 감도 penalty에 각각 0.5dB의 추가 penalty가 발생하였다. 실험 과정에서 밝혀진 광케환의 영향이 편광에 민감한 원인을 알아보기 위해 DFB-LD 모듈에 사용되는 단일 편광용 광 isolator의 편광에 따른 광케환 차단율을 평가해 보았다. DFB-LD 모듈에 대한 OTDR 측정과 광 isolator를 내장한 광학계에 대한 역방향 입사광의 투과율 측

정으로부터 광 isolator를 거친 광케환의 편광이 DFB-LD의 발진 편광(광 isolator의 순방향 통과 편광)과 평행하여 광케환의 영향이 가장 큰 편광 성분에 대해서는 차단율이 규격보다 10dB 정도 낮은 20dB로 나타났다. 또한 광케환의 영향이 시작되는 임계 광케환에 대한 비교 실험으로부터 단일 편광용 광 isolator의 유효 차단율은 편광 의존 차단율보다 10dB 정도 낮은 10dB로 주어졌으며, 이는 광케환 차단시 편광 필터링 효과가 발생했기 때문인 것으로 생각된다. 결론적으로 DFB-LD 모듈 제작에 사용되는 단일 편광용 광 isolator는 30dB의 광케환 차단율 규격을 가질 때 실제 유효한 차단율은 10dB에 불과하여 기존의 알려진 절대 요구 차단율보다 최소 10dB 낮은 차단율을 가짐으로서 2.5Gbps 광신호 전송시 수신 감도 penalty의 발생을 피할 수 없게 된 것으로 해석되며 이는 BER 측정에서 나타난 바와 같이 -8.8dB로부터 7dB 이상 작은 케환율 범위까지도 penalty가 발생하는 사실과도 부합한다. 2.5Gbps 광통신의 광섬유 경로중에서 발생할 수 있는 최대 케환율에 대해서도 DFB-LD 모듈의 동작 안정성을 확보하기 위해서는 기존의 광 isolator 대신에 편광에 무관한 광 isolator를 사용하거나, 현재의 광 isolator의 광케환 차단율 규격을 30dB에서 40dB 이상으로 증가시켜야 한다.

감사의 글

※ 본 논문은 한국통신 출연금에 의해 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Peterman and G. Arnold, "Noise and Distortion Characteristics of Semiconductor Lasers in Optical Fiber Communication Systems", IEEE J. of Quantum Electron., vol. QE-18, no. 4, pp.543-555, 1982.
- [2] C. H. Henry and R. F. Kazarinov, "Instability of Semiconductor Lasers Due to Optical Feedback from Distant Reflectors", IEEE J. of Quantum Electron., vol. QE-22, no. 2, pp.294-301, 1986.

- [3] J. Sigg, "Effects of Optical Feedback on the Light-Current Characteristics of Semiconductor Lasers", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-29, no. 5, pp.1262-1270, 1993.
- [4] R. Lang and K. Kobayashi, "External Optical Feedback Effects on Semiconductor Injection Laser Properties", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-16, no. 3, pp.347-355, 1980.
- [5] R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "Regimes of Feedback Effects in 1.5- μ m Distributed Feedback Lasers", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 11, pp.1655-1661, 1986.
- [6] M. Fujiwara, K. Kubota, and R. Lang, "Low-frequency Intensity Fluctuation in Laser Diodes with External Optical Feedback", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 4, pp.217-220, 1981.
- [7] H. Temkin, N. A. Olsson, J. H. Abeles, R. A. Logan, and M. B. Panish, "Reflection Noise in Index-Guided In-GaAsP Lasers", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 2, pp.286-293, 1986.
- [8] N. Schunk and K. Petermann, "Measured Feedback-Induced Intensity Noise for 1.3 μ m DFB Laser Diodes", *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp.63-64, 1989.
- [9] H. Li, J. Ye, and J. G. McNerney, "Detailed Analysis of Coherence Collapse in Semiconductor Lasers", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-29, no. 9, pp.2421-2432, 1993.
- [10] Y. Twu, P. Parayanthal, B. A. Dean, and R. L. Hartman, "Studies of Reflection Effects on Device Characteristics and System Performances of 1.5- μ m Semiconductor DFB Lasers", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 9, pp.1267-1271, 1992.
- [11] L. N. Langley and K. A. Shore, "The Effect of External Optical Feedback on Timing Jitter in Modulated Laser Diodes", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 3, pp.434-441, 1993.
- [12] I. Ikushima and M. Maeda, "Lasing Spectra of Semiconductor Lasers Coupled to an Optical Fiber", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-15, no. 9, pp.844-845, 1979.
- [13] L. Goldberg, H. F. Taylor, A. Dangridge, J. F. Weller, and R. O. Miles, "Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with Optical Feedback", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 4, pp.555-563, 1982.
- [14] H. Sato, T. Fujita, and K. Fujito, "Intensity Fluctuation in Semiconductor Lasers Coupled to External Cavity", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 1, pp.46-51, 1985.
- [15] G. P. Agrawal and T. M. Shen, "Effects of Fiber-Far-End Reflection on the Bit Error Rate in Optical Communication with Single-Frequency Semiconductor Lasers", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 1, pp.58-63, 1986.
- [16] M. Shikada, S. Takano, S. Fujita, I. Mito, and K. Minemura, "Evaluation of Power Penalties Caused by Feedback Noise of Distributed Feedback Laser Diodes", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 6, no. 5, pp.655-659, 1988.
- [17] B. R. Clarke, "The Effects of Reflections on the System Performance of Intensity Modulated Laser Diodes", *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 6, pp.741-749, 1991.
- [18] K. Petermann, "Laser Diode Modulation and Noise", Kluwer Academic Publishers, Netherland, 1988.
- [19] B. Tromborg, J. H. Osmundsen, and H. Olesen, "Stability Analysis for a Semiconductor Laser in an External Cavity", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-20, no. 9, pp.1023-1032, 1984.
- [20] F. Favre, "Theoretical Analysis of External Optical Feedback on DFB Semiconductor Lasers", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 1,

pp.81-88, 1987.

[21] P. Spano, S. Piazzola, and M. Tamburrini, "Theory of Noise in Semiconductor Lasers in the Presence of Optical Feedback", IEEE J. of Quantum Electron., vol. QE-20, no. 1, pp.350-357, 1984.

[22] G. Koay, A. Lowery, R. Tucker, T. Higashi, S. Ogita, and H. Soda, "Data-

Rate Dependence of Suppression of Reflection-Induced Intensity Noise in Fabry-Perot Semiconductor Lasers", IEEE J. of Quantum Electron., vol. 31, no. 10, pp.1835-1839, 1994.

[23] X. Ma and S. Tao, "High-isolation Optical Isolator Using a BiCaInVIG Single Crystal", vol. 31, no. 21, pp.4122-4124, 1992

저 자 소 개

朴景鉉(正會員) 第32券A編第6號參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물
 소자 연구실

韓正熙(正會員) 第32券A編第6號參照
 현재 한국전자통신연구소 광통신
 연구실

曹豪成(正會員) 第32券A編第6號參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물
 소자 연구실

李重基(正會員) 第32券A編第6號參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물소자
 연구실

張東薰(正會員) 第32券A編第6號參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물소자
 연구실

朴喆淳(正會員) 第31券A編第7號參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물소자
 연구실 실장