

## WDM-PON 시스템용 저가형 Fiber Grating Laser의 제작 및 성능 분석

조승현<sup>†</sup> · 이우람 · 이지현 · 박재동 · 김병휘

한국전자통신연구원 WPON 기술팀

⑨ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

### 강민호

한국정보통신대학원대학교 공학부

⑨ 305-714 대전시 유성구 문지동 119번지

### 신동욱

한양대학교 세라믹공학과

⑨ 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

(2004년 8월 18일 받음, 2004년 11월 27일 수정본 받음)

광섬유 브라그 격자를 외부 공진기로 사용하는 레이저 다이오드(이하 FGL ; fiber grating laser 이라 약칭함)를 제작한 후 그 성능을 실현적으로 측정하고 분석하였다. FGL을 WDM기반의 수동형 광 가입자망 시스템에 적용하기 위해서는 저가 구현이 필수적이며, 이를 위해, TO-CAN 형태의 모듈로 패키징하였다. 제작된 FGL의 동작 전류 대 광 출력 특성을 측정한 결과, 25°C에서 60 mA 일 때 약 3.6 mW를 얻을 수 있었고, 주입 전류 변화에 따른 발진 파장의 변화율은 5.2 pm/mA이었다. 또한, FGL의 온도 변화에 따른 발진 파장의 변화율은 30 pm/°C로 주변 온도 변화에 대한 발진 파장의 안정도가 매우 우수함을 확인하였다. 문턱 전류 이상의 동작 전류 영역에서 각각 30 dB 이상의 양호한 주변 모드 억압비(SMSR)를 얻을 수 있었고, 단일 종 모드 발진 특성을 유지함을 확인하였다. 제작된 FGL의 전송 성능을 분석하기 위하여 155 Mb/s의 NRZ 신호로 직접 변조 실험을 수행하였다. BER 성능을 측정한 결과, 단일 모드 광섬유 20 km를 통과하더라도 광경로 파워 페널티가 발생하지 않았고 수신파워가 -37.5 dBm 이상에서 BER<10<sup>-9</sup>을 얻을 수 있었다.

주제어 : fiber Bragg grating, laser diode, fiber grating laser, WDM, optical access network.

### I. 서 론

최근 멀티미디어 데이터 서비스 등과 같은 정보 통신 기술의 급속한 발전으로 사용자가 요구하는 데이터의 용량은 날날이 증가하고 있는 추세이다.<sup>[1]</sup> 이러한 가입자의 요구를 만족시키기 위해 중앙기지국에서 가입자까지 광섬유로 연결하는 수동형 광 가입자망 시스템의 도입이 필요하다.<sup>[2,3]</sup> 특히, 이러한 수동형 광 가입자망 시스템 중에서 가입자마다 하나의 파장을 할당하여 통신하는 방식의 파장 분할 다중화(WDM ; wavelength division multiplexing) 기술 기반의 수동형 광 가입자망 시스템은 가입자에게 대용량의 데이터와 독립적인 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있어 최근 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>[4,5]</sup> WDM 기반의 수동형 광가입자망 시스템 기술은 향후 수년 내에 지금보다 훨씬 많은 가입자 수와 보다 많은 전송 용량이 요구될 것이고, 이러한 경우 WDM 기술은, 사용 가능한 파장 영역을 넓히거나 또는 WDM 채널 간 주파수 간격을 좁히는 방법 등을 통해 발전해 나갈 것이다.<sup>[6,7]</sup> 이 같은 WDM 기술의 발전을 위해서는 좀 더 높은

파장 정밀도와 파장 안정성을 가진 광원에 대한 연구 개발은 필수적이다. 그리고, 가입자에게 경제적인 부담을 주지 않기 위해 광원의 저가 구현 가능 여부도 충분히 고려되어야 한다.<sup>[8]</sup>

현재까지 구축된 대부분의 WDM 기반의 광 가입자망 시스템에서는, 저가형의 uncooled-DFB-LD(distributed feed-back laser diode)가 단일 종 모드(single longitudinal mode) 발진 광원으로 가장 널리 사용되어 왔다. 하지만 uncooled-DFB-LD의 경우 주입되는 전류와 주변 온도의 미세한 변화에도 발진 파장이 흔들리는 단점을 갖고 있다.<sup>[6]</sup> 이러한 발진 파장의 낮은 파장 정밀도와 불안정성은 전송 성능 열화의 주된 요인으로 작용하게 된다.

광섬유 브라그 격자를 외부 공진기로 사용하는 레이저 다이오드(FGL)는 파장 선택성을 갖는 광섬유 브라그 격자의 브라그 공진 파장에 해당하는 빛만 발진하게 되므로 WDM 시스템용 광원으로 사용이 가능하다.<sup>[6-10]</sup> FGL의 최대 장점은 광섬유 브라그 격자의 온도 의존성이 매우 낮으므로 주변 온도 변화에 대한 발진 파장 안정성이 기존의 상용화된 uncooled-DFB-LD에 비해 매우 우수하다는 점이다.<sup>[11,12,17]</sup> 또한 저가의 TO-CAN 모듈 형태로 패키징하게 될 경우 광원의

<sup>†</sup>E-mail: shc@etri.re.kr

경제성이 중요하게 고려되는 WDM 기반의 수동형 광 가입자망 시스템에서 적용이 용이하다.<sup>[8,9,12]</sup>

본 논문에서는 동작 전류와 주변 온도 변화에 의한 발진 파장의 안정성 및 정확도가 우수한 FGL의 구현을 위해, 무 반사 코팅된 FP-LD(Fabry-Perot laser diode)칩과 광섬유 브라그 격자를 광학적으로 결합한 후 TO-CAN 형태의 모듈로 패키징하여 제작하였다. 제작된 FGL의 성능을 분석하기 위해 동작 전류와 주변 온도 변화에 따른 출력 광파워와 광 스펙트럼을 측정하였으며, 20 km에 이르는 단일 모드 광섬유 전송 실험을 통해 WDM 기반의 수동형 광 가입자망 시스템에서 가입자용 광원으로의 적용 가능성을 확인하였다.

## II. FGL의 구조 및 동작 원리

경제성을 고려하여 저가의 TO-CAN 형태로 패키징한 FGL 모듈의 개략적인 구조를 그림 1에 나타내었다. FGL 모듈은 FP-LD 칩, aspherical lens cap, 패키징 슬리브, 폐를 및 브라그 격자가 형성된 광섬유로 구성되어 있다. FP-LD 칩은 InGaAsP 계열로 strained MQW 구조를 가지며, stripe 두께는 1  $\mu\text{m}$ , 칩 자체의 길이는 600  $\mu\text{m}$ 이다. 광섬유 격자가 연결된 front facet에는 AR(anti-reflection, 1%) 코팅 처리가 되어 있고, back facet에는 HR(high reflection, 60%) 코팅 처리가 되어 있다. FP-LD 칩과 광섬유 브라그 격자는 aspherical lens를 통해 광학적으로 결합되어 FGL의 공진기를 형성한다.

여타의 논문들에서 이미 언급되었듯이, FP-LD 칩의 HR, AR 코팅 비율, FP-LD 칩과 브라그 격자의 광결합효율, 브라그 격자의 반사도, FGL 공진기의 길이 등은 FGL의 성능과 관련이 있다. FP-LD 칩의 back facet은 HR 코팅이 잘 되어 있을수록 LD의 광출력이 증가하고 문턱 전류가 작아지는 장점이 있다.

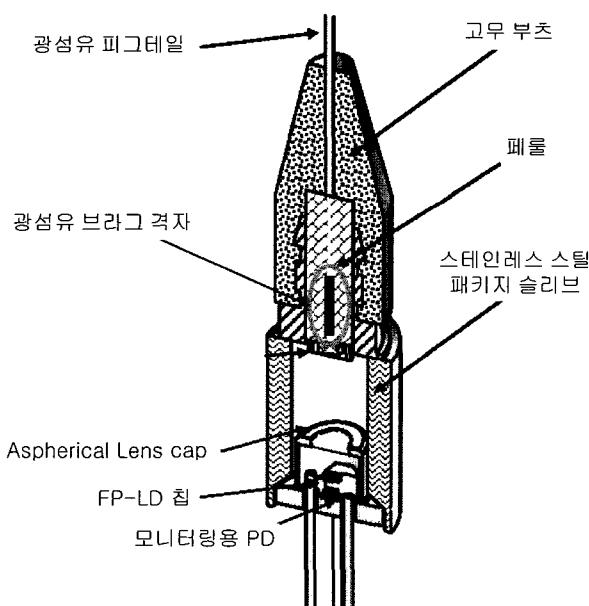


그림 1. FGL의 개략적인 구조.

그러나 LD의 안정적인 동작특성 유지를 위해 APC (auto power control) 기능을 수행하는 m-PD(monitoring photodetector)를 FP-LD 칩의 후면에 설치하고자 하면, m-PD 동작에 필요한 입력 파워의 양을 고려해야 하고, 이에 따라 FP-LD 칩의 HR 코팅비율을 조정하여야 한다. FP-LD 칩의 front facet은 FGL에서 FP-LD 칩이 별도의 intra-cavity를 형성하지 않도록 AR 코팅을 잘 하여야 한다. 광섬유 브라그 격자의 반사도는 높게 할수록 FGL의 문턱 전류가 작아지고 mode-competition noise를 줄일 수 있지만, 최종적으로 FGL에서 나오는 광출력 파워를 고려하여 그 값을 정하여야 한다. 또한 단일 종모드 발진과 고속 변조를 위해서 FGL 공진기의 길이를 짧게 할 필요가 있다.<sup>[18-19]</sup>

광섬유에 격자를 제작하는 과정과 다른 제작 조건을 고려하여 본 실험에 사용된 FGL모듈은 다음과 같이 설계되었다. 600  $\mu\text{m}$  길이의 FP-LD 칩과 aspherical lens까지의 거리는 2.7 mm, lens로부터 광섬유 폐를 까지는 5 mm, 그리고 폐를 내에 존재하는 광섬유 브라그 격자와 광섬유 종단 사이의 거리는 15 mm로 전체 FGL 공진기의 길이는 약 22.7 mm이다. FGL 공진기에서 FP-LD 칩 쪽 facet은 60%로 HR 코팅이 되어 있고, 광섬유 격자는 84%의 반사도를 갖는다.

FGL 제작에 사용된 광섬유 브라그 격자는 수소화 처리되지 않은 광민감성 광섬유(INO사 ; PS-RMS-50)에 위상마스크와 248 nm 파장에 해당하는 UV를 발진하는 KrF 액시머레이저(LambdaPhysik사 ; COMPEX 102)를 사용하여 제작하였다. 제작된 광섬유 브라그 격자는 그림 2와 같은 반사 스펙트럼 형태를 가지며, 브라그 공진 파장이 약 1552.8 nm이고 FWHM이 약 0.2 nm이며 반사도는 약 84%이다.

## III. 제작된 FGL의 성능 분석

제작된 FGL의 바이어스 전류 대 출력 광파워 특성을 상온(25°C)과 고온(60°C)에서 측정하고 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 상온에서, 경사 효율(slope efficiency)은 약 0.08 mW/mA

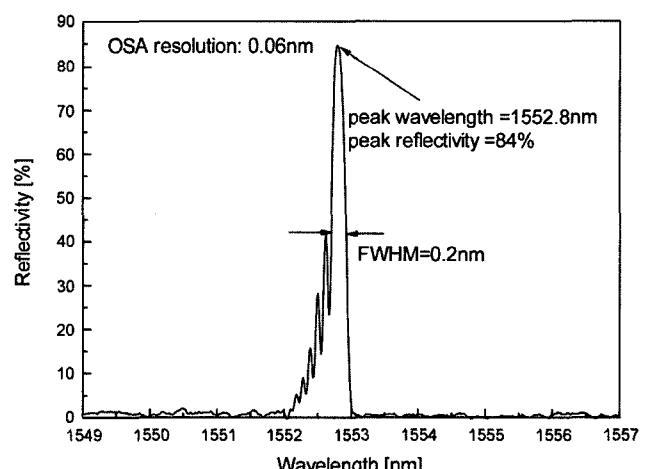


그림 2. FGL 제작에 사용된 광섬유 브라그 격자의 반사 스펙트럼.

이고, 문턱 전류(threshold current)는 약 13 mA이며, 동작 전류를 최대 60 mA까지 증가시킬 경우 제작된 FGL의 광 출력은 약 3.6 mW까지 얻을 수 있었다.

이와 같은 FGL의 동작 전류 대 광 출력 특성은, 25°C에서 측정한 uncooled-DFB-LD의 동작 전류 대 광 출력 특성과 비교할 때, 상용화된 uncooled-DFB-LD와 유사한 성능을 보임을 확인하였다. 주변 온도가 높을 때 FGL의 특성 변화를 알아보기 위하여 FGL을 60°C로 온도가 맞춰진 항온기 안에 넣고 동일한 실험을 반복하였다. 60°C에서, 경사 효율(slope efficiency)은 약 0.065 mW/mA이었고, FGL의 문턱 전류 값은 24 mA이었으며, 광 출력은 약 2.3 mW까지 얻을 수 있었다. 제작된 FGL의 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화를 확인해보기 위해 상온과 60°C의 항온기 안에 놓였을 때 두 가지 경우에 대해 FGL의 발진 파장을 측정하고, 이를 그림 4에 나타내었다.

25°C에서 FGL의 동작 전류를 10 mA에서 60 mA까지 변화시켰을 때 발진 파장은 최대 약 0.26 nm까지 변화하였으며, linear interpolation 과정을 통해 동작 전류에 따른 발진

파장의 변화율이 약 5.2 pm/mA임을 알 수 있었다. FGL을 60°C의 항온기에 넣었을 때는 주변 온도 변화에 따른 공진기의 유효 길이의 변화로 발진 파장이 상온에서보다 장파장 쪽으로 천이했음을 알 수 있다. FGL이 60°C에서 발진을 시작하는 문턱 전류 부근인 25 mA부터 60 mA까지 동작 전류를 증가시켰을 때 발진 파장은 최대 약 0.11 nm까지 변화하였으며, 이를 통해 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화율이 약 3.1 pm/mA임을 알 수 있었다. 이 같은 변화량은 상용화된 uncooled DFB-LD의 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화율이 7 pm/mA임을 고려할 때, 제작된 FGL이 동작 전류 변화에 따른 발진 파장 안정성이 우수함을 확인시켜준다.<sup>[6,13,14]</sup>

특별히, 주변 온도가 25°C 일 때는 전류 변화에 따른 발진 파장의 변화가 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있는데, 60°C 일 때는 동작 전류의 증가에 따른 발진 파장의 이동이, 25°C 일 때 측정한 결과와는 달리 선형적이지 않다. 이는 전류 변화에 따른 동작 파장의 안정성이 25°C에서는 5.2 pm/mA인데 반해, 60°C에서는 3.1 pm/mA인 결과와 무관하지 않다. 일반적인 반도체 레이저 다이오드에서, 주변 온도의 변화에 따른 발진 파장의 변화는 공진기의 유효 길이 변화와 매질로 사용된 반도체 재료의 에너지 밴드갭 변화가 원인이고, 동작 전류의 증가에 따른 발진 파장의 변화는 공진기 내의 charge carrier flux 변동에 따른 굴절률 변화가 원인인 것으로 알려져 있다. 전류 주입에 따라 LD에서 발진 현상이 발생하면, 공진기 자체의 온도를 증가시켜 상기에서 언급한 현상들이 복합적으로 나타날 수 있다. 만일 주변온도를 60°C로 고정한 후, 동작 전류를 증가시키게되면, 공진기의 유효 길이 변화에 따른 발진 파장의 변화 현상이 지배적으로 나타나게 되고, 동작 전류 변화에 의한 발진 파장 변화량은 그에 미치지 못하여 그림 4와 같이 전류량 증가에 따른 발진 파장의 이동이 비선형적으로 나타나는 것으로 보인다.

주변 온도 변화에 따른 FGL 동작 특성 변화를 알아보기 위하여 FGL을 항온기에 넣고 주변 온도를 +20°C에서 +40°C 까지 변화시키면서 출력 스펙트럼으로부터 발진 파장과 피크 파워를 측정하였다. 이때 FGL에 인가한 동작 전류는 25

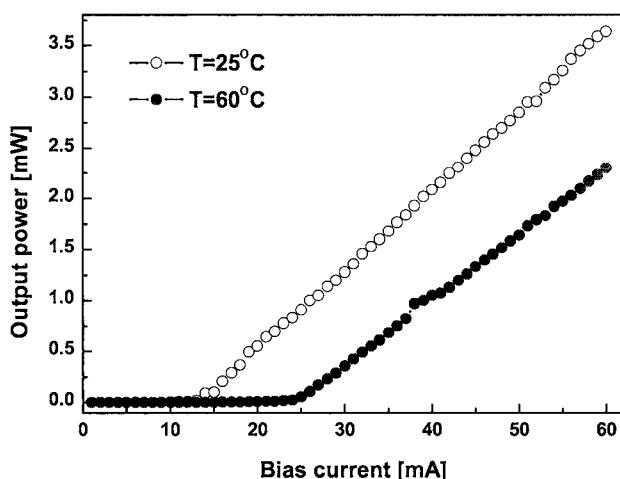


그림 3. 제작된 FGL의 동작 전류 대 광 출력 특성.

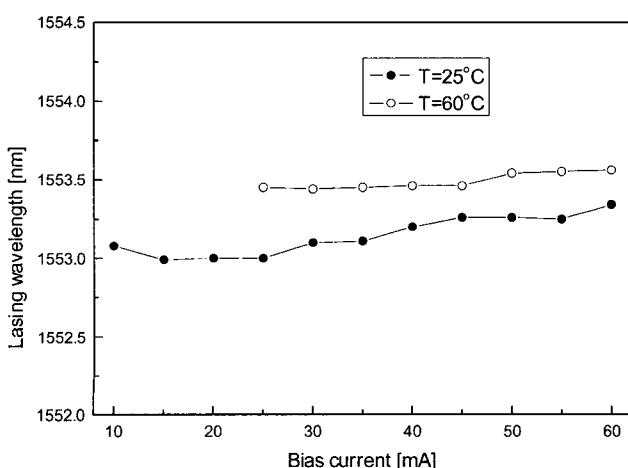


그림 4. 제작된 FGL의 동작 전류에 따른 발진 파장의 변화.

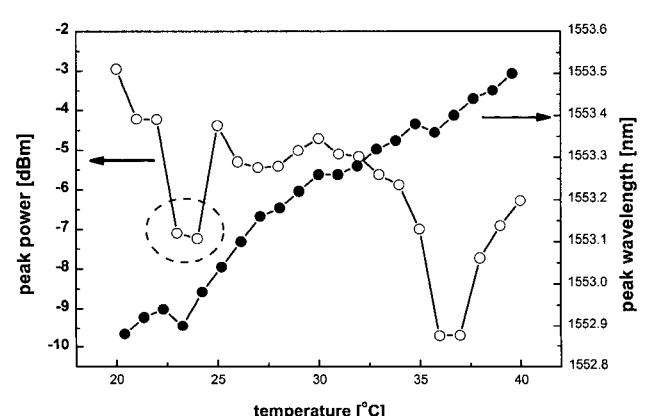


그림 5. 주변 온도 변화에 따른 발진 파장 및 피크 파워 변화.

mA로 고정하였다. 그림 5의 실험 결과로부터 온도가 증가함에 따라 FGL의 발진 파장이 장파장 쪽으로 천이함을 볼 수 있는데, 이는 앞서 언급하였듯이 발진 파장을 결정짓는 FGL 공진기의 유효 길이가 주변 온도가 올라감에 따라 증가하기 때문이다. 그런데 임의의 온도에서는 발진 파장이 단파장 쪽으로 천이함을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 발진하고 있던 FGL의 모드들이 온도 증가에 의해 FBG의 반사 대역폭 바깥 쪽으로 천이하게 될 경우 발생하는 모드 호핑 현상이 원인인 것으로 알려져 있다. 이 같은 모드 호핑 현상은 그림 5에서 보여진 피크 파워의 변화에서도 뚜렷이 관찰할 수 있다. 온도 증가에 따라 피크 파워가 점차 감소하는 경향을 보이나 특정 온도에서는 모드 호핑에 의해 급격히 피크 파워가 줄어드는 현상이 발생된다. 이러한 모드 호핑이 나타나는 온도 구간은 +23°C에서부터 +36°C 까지 약 13°C이며 이 같은 수치는 FBG의 반사 대역폭과 FGL 공진기의 길이가 비슷한 기준의 논문들에서 제시한 값과 거의 유사한 수준이다<sup>[6]</sup>. 모드 호핑이 발생하는 구간을 제외하고 주변 온도 변화에 따라 발진 파장이 선형적으로 변화하는 구간인 +23°C에서부터 +36°C 까지 온도 변화에 따른 발진 파장의 변화율은 약 30 pm/°C이며, 이 값은 여러 참고문헌들에서 제시한 값들과 비교할 때 비슷함을 확인할 수 있다<sup>[6]</sup>. 이러한 온도에 따른 발진 파장의 안정성은 상용화된 uncooled-DFB-LD의 온도 변화에 따른 발진 파장의 변화율이 약 100 pm/°C임을 고려할 때, 제작된 FGL이 온도 변화에 따라 매우 우수한 발진 파장 안정성을 가진다는 사실을 확인시켜 준다.<sup>[6,13,14]</sup> FGL의 주변 온도 변화에 따른 발진 파장 안정도가 이와 같이 우수한 이유는 FGL의 공진 파장이 front mirror로 사용된 FBG의 브라그 공진 파장의 온도 의존성에 의해 결정되기 때문이다. 이처럼 FBG의 온도에 따른 공진 파장 변화율(약 10 pm/°C) 보다 약 3배정도 더 큰 온도에 따른 발진 파장 특성을 보이는 이유는 FGL 자체의 발진 메커니즘과 관련된다고 할 수 있다. 온도에 대한 발진 파장의 온도 의존성과 관련된 내용은 참고문헌<sup>[14]</sup>에 자세히 다루어져 있으며, 실제로 제작된 FGL의 온도에 따른 발진 파장에 관하여 다음과 같은 관계가 성립한다고 한다.

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{n_1 L_1 \left( \frac{d\lambda}{dT} \right)_1 + n_2 L_2 \left( \frac{d\lambda}{dT} \right)_2}{n_1 L_1 + n_2 L_2} \quad (1)$$

식 (1)에 따라 FGL의 온도에 따른 발진 파장 변화율은 공진기의 길이와 굴절률 및 각 매질의 온도에 따른 파장 변화율에 의해 결정됨을 알 수 있고, 각각의 파라미터들에 적절한 값을 대입해 계산한 결과 약 25 pm/°C를 얻을 수 있었으며, 이는 실험적으로 얻은 30 pm/°C와 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

제작된 FGL의 발진 파장 안정성의 궁극적인 한계는 위의 수식 (1)에 의해 결정될 수 있으며, 온도에 따른 발진 파장의 안정성을 향상하기 위해서는 결국 FP-LD chip 자체의 공진기 길이( $L_2$ )와 FP-LD chip과 광섬유 브라그 격자사이의 거리( $L_1$ )를 줄임으로써 가능할 것이라고 보여진다.<sup>[18,19]</sup>

그림 6에는 제작된 FGL의 동작 전류에 따른 주변 모드 억압비 변화를 나타내었다. 주변 모드 억압비 측정 결과, 동작 전류의 증가에 따라 주변 모드 억압비가 임의의 지점에서 갑자기 감소함을 볼 수 있는데, 이는 FBG의 반사 대역폭 내에서 외부 공진기 모드의 모드 호핑 현상이 원인이다.<sup>[6,15,16]</sup> 실제로 FGL을 광통신 시스템이나 광 네트워크 상에 적용할 경우, 이러한 모드 호핑이 발생하는 전류 영역에서 동작시키는 것은 시스템의 전송 성능 저하를 가져올 수 있으므로 적절한 동작 전류 영역을 잘 선택하여 FGL을 구동하는 것이 매우 중요하다.

그림 7에는 제작된 FGL의 주변 온도 변화에 따른 주변 모드 억압비 및 발진 파장 변화를 나타내었다. 주변 모드 억압비 측정 결과 주변 온도의 증가에 따라 임의의 온도에서 갑자기 감소함을 볼 수 있는데, 이는 앞서 언급한 전류에 따른 주변 모드 억압비 변화 결과와 마찬가지로 FBG의 반사 대역폭 내에서 외부 공진기 모드의 모드 호핑 현상이 원인이며, 이를 보다 명확히 보여주기 위해서 발진 파장의 변화와 동시에 나타내었다.<sup>[6,15,16]</sup>

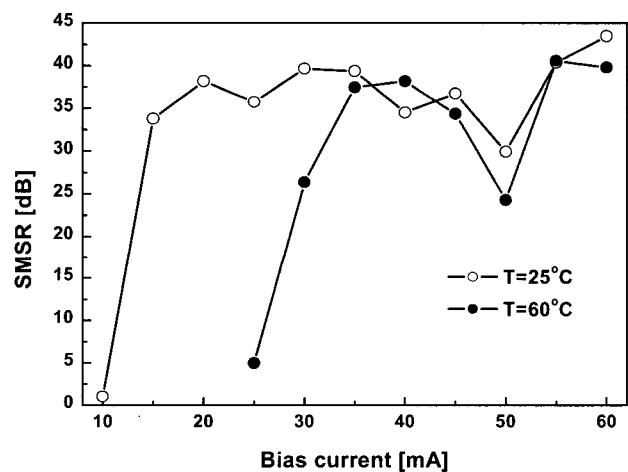


그림 6. 제작된 FGL의 동작 전류에 따른 주변 모드 억압비 변화.

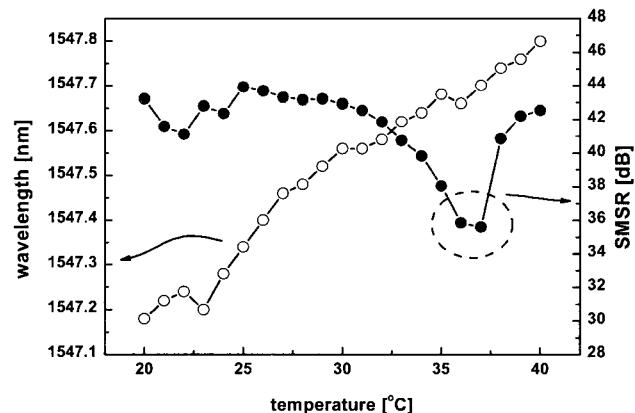


그림 7. 제작된 FGL의 주변 온도 변화에 따른 주변 모드 억압비 및 발진 파장 변화.

그림 8에는 25°C에서 측정한 FGL의 동작 전류에 따른 광 출력 스펙트럼을 나타내었다. 측정에 사용된 광 스펙트럼 분석기의 분해능은 0.06 nm이었다. 측정 결과, 비교적 모든 동작 전류 범위에 대해서 약  $\pm 0.4$  dB 이내의 출력 피크 파워 변동을 관찰 할 수 있었다. 특이한 점은 동작 전류가 50 mA 근처의 영역일 때, 주 모드의 피크 파워가 갑자기 감소하면서 동시에 주변 모드 억압비 또한 감소 하였음을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 외부 공진기 모드의 모드 호핑

현상이 원인이다. 동작 전류를 60 mA로 하였을 때, 주 모드 피크의 중심 파장은 1553.3 nm이고, 주 모드의 피크 파워는 +3.75 dBm이었으며, 주변 모드 억압비는 43.4 dB이었다.

그림 9에는 60°C에서 측정한 FGL의 동작 전류에 따른 광 출력 스펙트럼을 나타내었다. 모든 동작 전류 범위에 대해서 약  $\pm 0.2$  dB 이내의 비교적 안정된 출력 피크 파워 변동을 관찰 할 수 있었다. 실온인 25°C에서 측정하였을 때와 마찬가지로 동작 전류가 50 mA 근처의 영역에서, 모드 호핑으로

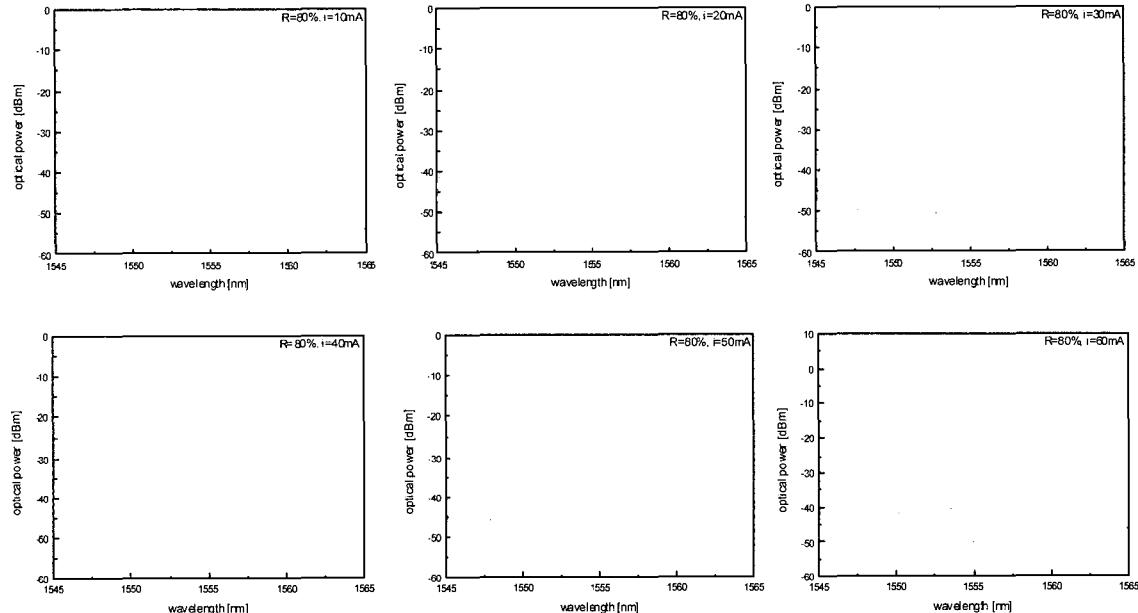


그림 8. 25°C에서 측정한 FGL의 동작 전류에 따른 광 출력 스펙트럼.

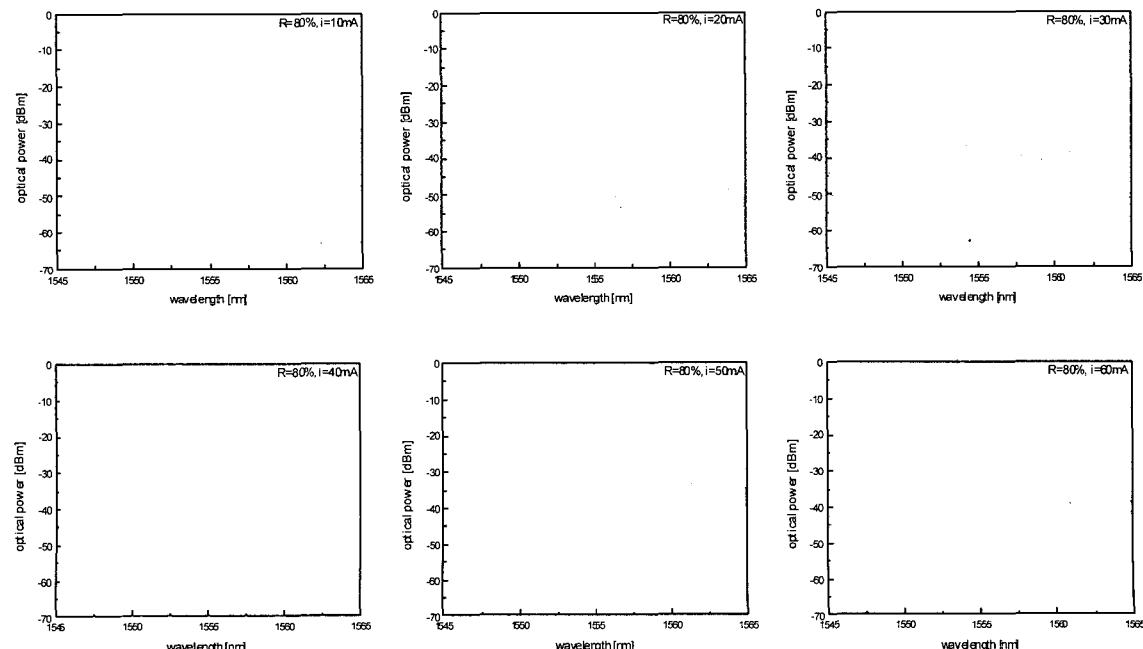


그림 9. 60°C에서 측정한 FGL의 인가 전류에 따른 광 출력 스펙트럼.

인해 주 모드의 피크 파워의 감소 및 주변 모드 억압비 감소 현상을 볼 수 있다. 하지만 앞서 제시한 그림 4에서는 약 50 mA의 동작 전류에서, 모드 호평에 따른 발진 파장의 단파장 천이를 확인 할 수 없었다. 이와 같은 현상이 나타난 이유는, 실제로 40 mA에서 50 mA로 동작 전류를 증가시킬 경우 수 pm정도 단파장으로 천이하였으나 실험시 사용한 OSA의 분해능(0.06 nm)의 한계로 인해 이를 감지할 수 없어 발생한 것으로 보인다.

바이어스 전류를 60 mA로 하였을 때, 주 모드 피크의 중심 파장은 1553.56 nm로 실온에서 측정한 결과와 비교할 때 약 0.2 nm 정도 장파장 쪽으로 이동하였고, 주 모드의 피크 파워는 +1.63 dBm로 온도 증가에 따른 경사 효율의 감소가 원인이었음을 알 수 있었다. 그리고 주변 모드 억압비는 39.8 dB로 실온인 25°C에서 측정한 결과와 비교 시 약 3.7dB 감소하였다. 온도 증가에 따른 주변 모드 억압비 감소는 FGL 자체의 동작 온도가 증가함에 따라 경사 효율의 감소로 인한 주 모드의 피크 파워 감소가 원인인 것으로 보여진다.

그림 10에는 제작된 FGL을 60°C의 온도에서, 동작 전류를 43 mA로 고정시킨 후, 155 Mbps의 NRZ 신호로 직접 변조시

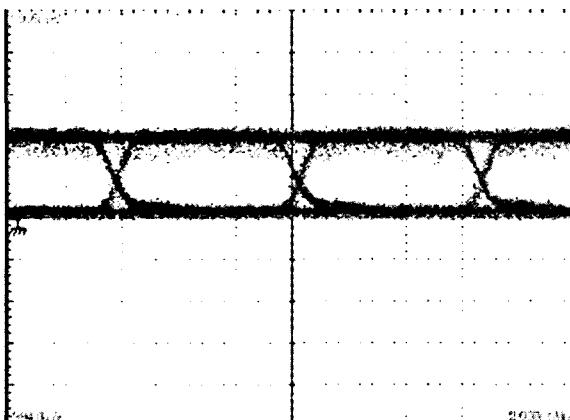


그림 10. 60°C에서 155 Mbps로 직접 변조한 FGL의 아이 다이어그램.

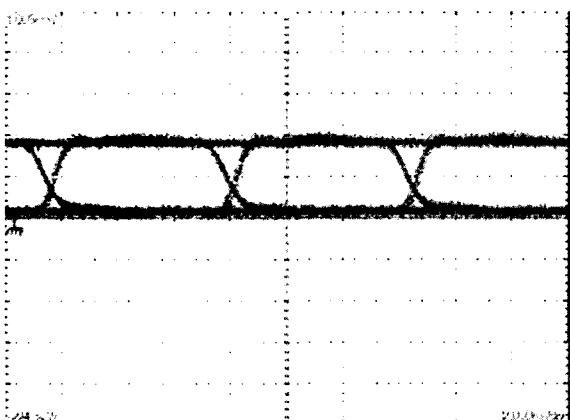


그림 11. FGL의 광 출력 단에 광 고립기(optical isolator)를 장착하였을 때에 측정한 아이 다이어그램.

켰을 때 측정한 아이 다이어그램을 나타내었다. 그림 10으로부터, 아이 다이어그램 상의 “1레벨” 신호 성분에 상당한 잡음이 존재함을 알 수 있다. 이는 FGL의 광 출력 단에 연결된 광섬유로부터 발생하는 레일리이 산란(Rayleigh Scattering)과 광섬유 종단처리를 위해 장착한 광 커넥트로부터 발생하는 프레넬 반사(Fresnel Reflection)가 원인으로 보인다. 만일 FGL의 출력 단에 광 고립기를 추가로 장착하거나 또는 APC (angled physical contact) 형태의 광 커넥터로 종단 처리(fiber pigtailing)를 하는 경우 이러한 잡음을 레벨을 충분히 감소시킬 수 있다.

그림 11에는 제작된 FGL의 광 출력 단에 광 고립기(optical isolator)를 장착하였을 때에 측정한 아이 다이어그램을 나타내었다. 측정 조건은 앞서 언급한 바와 마찬가지로, 60°C의 온도에서 바이어스 전류를 43 mA로 고정시킨 후 155 Mbps의 NRZ신호로 직접 변조한 후 측정하였다.

그림 10과 11을 비교해 볼 때, 광 고립기를 FGL의 출력 단에 추가로 장착할 경우, “1 레벨”에 존재하는 잡음이 감소되었음을 확인할 수 있다.

그림 12에는 광 고립기를 추가로 장착한 경우와 하지 않은 경우에 따른 BER 성능을 나타내었다. 측정 조건은 앞의 그림 10에서 설명한 아이 다이어그램을 측정했을 때와 동일한 조건이다. Back to Back 구성에서는 광 고립기 장착 여부에 따른 파워 페널티는 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 단일 모드 광섬유 20 km 전송 시에는 광 고립기의 장착 여부에 따른 파워 페널티가 약 0.5 dB(@BER<10<sup>-9</sup>)정도 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 FGL의 광섬유 종단 처리를 위해 사용한 광 커넥터로부터 발생하는 프레넬 반사에 의한 잡음보다는 FGL의 출력단에 연결된 광섬유로부터 발생하는 레일리이 산란에 의한 잡음이 FGL의 전송 특성 저하에 더 많이 기여하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 광고립기를 FGL의 출력 단에 장착할 경우 전송 성능의 향상이 기대된다. 결론적으로, 광고립기를 장착한 FGL은 단일 모드 광섬유 20 km를 통과하더라도 광경로 파워 페널티가 발생하지

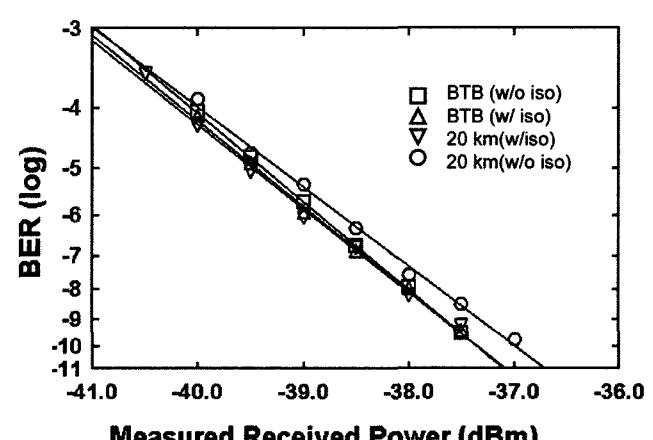


그림 12. 광 고립기 장착 유무에 따른 BER 성능.

않았고 수신파워가 -37.5 dBm 이상에서  $BER < 10^{-9}$ 을 얻을 수 있음을 확인하였다.

또한 FGL의 동적 특성 중 하나로 상대 강도 잡음(RIN : relative intensity noise) 또한 광원의 성능을 나타내는 파라미터 중 하나이다. 대부분의 FGL 제작과 관련된 참고 문헌에서는 3 GHz 이하의 주파수 영역에서 FGL의 상대 강도 잡음을 DFB-LD와 유사한 약 -150 dB/Hz에서 -160 dB/Hz 사이의 값을 가진 것으로 보고 하고 있다.<sup>[6,13,14]</sup> 이는 본 실험에서 측정된 FGL의 BER 특성이 참고 문헌들에서 발표한 결과들과 유사한 점을 감안할 때, 제작된 FGL의 RIN값은 최소 -150 dB/Hz 이상일 것으로 추정된다.

#### IV. 결 론

WDM기반의 수동형 광 가입자 망 시스템의 구현을 위해 필요한 저가형의 광원으로 무반사 코팅된 페브리-페로 반도체 레이저 다이오드 칩과 광섬유 브라그 격자를 광학적으로 결합하여 FGL을 제작한 후 그 특성을 실험적으로 측정하고 분석하였다. 제작된 FGL은 동작 전류 대 광 출력 특성이 상용화된 DFB-LD와 성능이 동일하였으며, 동작 전류 변화에 따른 발진 파장의 변화율 및 주변 온도 변화에 따른 발진 파장의 변화율 특성은 DFB-LD와 비교해 매우 우수함을 확인하였다. 제작된 FGL은 문턱 전류 이상의 바이어스 전류 범위 내에서 단일 종 모드 발진 특성을 유지하였으며, 주변 모드 억압비 또한 WDM 전송에 적절한 값을 가졌다. 제작된 FGL을 155 Mb/s의 NRZ 신호로 직접 변조한 후, BER 성능을 측정한 결과, 단일 모드 광섬유 20 km를 통과하더라도 광경로 파워 폐널티가 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 제작된 FGL의 성능 분석 결과, WDM 기반의 수동형 광 가입자망 시스템에서 가입자용 광원이 요구하는 사양을 충분히 만족시키므로 가까운 장래에 적용이 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부의 선도기반기술 개발사업비와 한국 과학재단의 OIRC 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] B. W. Kim, H. H. Lee, and J. W. Yang, "Access network technologies for broadband subscriber services in Korea: Present and Future," *IEICE TRANS. COMMUN.*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2273-2286, 2003.
- [2] N. J. Frigo, P. P. Iannone, P. D. Magill, T. E. Darcie, M. M. Downs, B. N. Deasi, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, H. M. Presby, and G. E. Bodeep, "A wavelength -division multiplexed passive optical network with cost-shared components", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 11, pp. 1365-1367, 1994.
- [3] 김봉규, 연영희, 김병희, 박상조, "초고속 광 가입자망 구축을 위한 PN 부호와 FBG를 이용한 광 CDMA의 특성분석," *한국광학회지*, 제13권, 6호, pp. 501-505, 2002.
- [4] G. Maier, M. Martinelli, A. Pattavina, and E. Salvadori, "Design and cost performance of the multistage WDM-PON access networks," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. 18, no. 2, pp. 125-143, 2000.
- [5] 조승현, 정의석, 박재동, 김병희, 강민호, 신통욱, "WDM 기반의 광통신망을 위한 저가형 광신호 삽입/추출 모듈," *한국광학회지*, 제14권, 6호, pp. 578-582, 2003.
- [6] J. Hashimoto, T. Tahagi, T. Kato, G. Sasaki, M. Shigehara, K. Murashima, M. Shiozaki, and T. Iwashima, "Fiber Bragg grating external cavity laser(FGL) module for DWDM transmission," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. 21, no. 9, pp. 2002-2009, 2003.
- [7] T. Kato, T. Takagi, A. Hamakawa, K. Iwai, and G. Sasaki, "Fiber-Grating Semiconductor Laser Modules for Dense-WDM Systems," *IEICE TRANS. ELECTRON.*, vol. E82-C, no. 2, pp. 357~359, 1999.
- [8] J. Hashimoto, T. Kato, H. Nakanishi, K. Yoshida, G. Sasaki, A. Yamaguchi, T. Katsuyama, and N. Yamabayashi, "Eight-channel wavelength multiplexing with 200-GHz spacing using uncooled coaxial fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser module," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1617-1619, 2002.
- [9] M. Shigematsu, M. Tanaka, T. Okuno, J. Hashimoto, Y. Kawabata, S. Takahashi, H. Nakanishi, A. Yamaguchi, T. Shibata, A. Inoue, T. Katsuyama, M. Nishimura, and H. Hayashi, "Amplified coarse WDM systems employing un-cooled fiber Bragg grating lasers with 600GHz channel spacing," in *Optical Fiber Communication Conference '2003*, Optical Society of America, Atlanta, USA, pp. 96-97, 2003.
- [10] T. S. Lay, H. M. Yabg, C. W. Lee, and W. H. Cheng, "Fiber Grating Laser: a performance study on coupling efficiency of fiber microlens and the Bragg reflectivity," *Opt. Com.*, 233, pp. 89-96, 2004.
- [11] T. Takagi, T. Kato, G. Sasaki, A. Miki, S. Inano, K. Iwai, A. Hamakawa, and M. Shigehara, "Fiber grating external cavity laser diode module for 2.5 Gb/s dense WDM transmission," in *European Conference on Optical Communication '98*, Madrid, Spain, pp. 81-82, 1998.
- [12] J. Hashimoto, T. Kato, H. Nakanishi, K. Yoshida, G. Sasaki, A. Yamaguchi, T. Katsuyama, and N. Yamabayashi, "Coaxial fiber-Bragg grating external cavity semiconductor laser module without temperature control," in *European Conference on Optical Communication '2001*, Amsterdam, Holland, pp. 130-131, 2001.
- [13] G. D. Maxwell, R. Kashyap, G. Sherlock, J. V. Collins, and B. J. Ainslie, "Demonstration of semiconductor external cavity laser using a UV written grating in a planar silica waveguide," *IEE Electron. Lett.*, vol. 30, no. 18, pp. 1486-

- 1487, 1994.
- [14] T. Tanaka, H. Takahashi, Y. Hibino, T. Hashimoto, A. Himeno, Y. Yamada, and Y. Tohmori, "Hybrid external cavity lasers composed of spot-size converter integrated LDs and UV written Bragg gratings in a planar lightwave circuit on Si," *IEICE TRANS. ELECTRON.*, vol. E83-C, no. 6, pp. 875-883, 2000.
- [15] T. Tanaka, Y. Hibino, T. Hashimoto, R. Kasahara, Y. Inoue, A. Himeno, M Itoh, M. Abe, H. Oohashi, and Y. Tohmori, "PLC-type hybrid external cavity laser integrated with front-monitor photodiode on Si platform," *IEE Electron. Lett.*, vol. 37, no. 2, pp. 95-96, 2001.
- [16] J. V. Collins, I. F. Lealman, A. Kelly, and C. W. Ford, "Passive alignment of second generation optoelectronic devices", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 6, pp. 1441-1444, 1997.
- [17] F. N. Timofeev, P. Bayvel, J. E. Midwinter, R. Wyatt, R. Kashyap, and M. Robertson, "2.6 Gb/s dense WDM transmission in standard fiber using directly-modulated fiber grating lasers," *IEE Electron. Lett.*, vol. 33, no. 19, pp. 1632-1633, 1997.
- [18] R. H. QU, et al, "Analysis of High Frequency Modulated Fiber Bragg Grating External Cavity Laser," *Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO/Pacific Rim 2001. The 4th Pacific Rim Conference on*, Volume: 2, 94-95 July 2001.
- [19] Jean-Luc Archambault and Stephen G. Grubb, "Fiber Gratings in Lasers and Amplifiers," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 8, pp. 1378-1390, 1998.

## Fabrication and performance analysis of cost-effective fiber grating lasers for WDM-PON systems

Seung-Hyun Cho<sup>†</sup>, Wooram Lee, Jie Hyun Lee, Jae-Dong Park, and Byoungwhi Kim

WPON Technology Team, ETRI, Daejeon, 305-350, Korea

<sup>†</sup>E-mail: shc@etri.re.kr

Min-Ho Kang

School of Engineering, Information & Communication University, Daejeon, 305-714, Korea

Dong-Wook Shin

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received August 18, 2004, Revised manuscript November 27, 2004)

Fiber-Bragg-grating external cavity laser(FGL) modules were fabricated and experimentally analyzed. Proposed as a cost-effective solution for optical sources in the WDM-PON access network, FGL modules were packaged to TO-CAN type. We obtained a low threshold current of 13 mA, and an optical output power of 3.6 mW with a bias current of 60 mA at 25°C. The lasing wavelength dependencies on current and temperature were as small as 5.2 pm/mA and 30 pm/°C, respectively. These change rates of the wavelength with the temperature and current are smaller than those of the DFB laser. Single-mode oscillations with the side-mode suppression ratio(SMSR) over 30 dB are maintained above the threshold current level. The FGL modules can be directly modulated at 155 Mbps, PRBS(2<sup>23</sup>-1) NRZ signal. Through the BER plots, we did not see the significant degradations before and after the transmission over 20km of the SMF at 155 Mb/s.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2310, 060.2330, 060.2340, 140.2020.