

흡수격자를 갖는 DFB 레이저의 제작 및 특성⁺

이형종* · 홍창희** · 이용탁***

Fabrication and Characteristics of DFB Laser with Absorptive Grating

Hyung Jong Lee, Tchang Hee Hong, Yong Tak Lee

Abstract

New type of $1.3\mu\text{m}$ DFB laser diode with absorptive grating layer of $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP was fabricated. The threshold current was about 24 mA. This laser shows self-plusation for DC operation. At low of injection the relation between the pulsation frequency and the injection current shows behavior similar to the relaxation oscillation of ordinary laser diode. At high level of injection the pulsation frequency decreases compared to the relaxation oscillation. Period doubling, tripling and quadrupling were observed in AC modulation. In case of period doubling the wave form shows only one extremely short pulse within double period of the modulation current pulse without any accompanying subsidiary pulse and the oscillation frequency was quite stable. The pulse widths as short as 58.5ps was observed in that case. We suppose that this characteristics of the DFB laser diode with absorptive grating will be applicable to the modulation methods of time division multiplexing.

I. 서 론

DFB 레이저는 Fabry-Perot형의 레이저에 비하여 우수한 단일모드 파장 선택특성 때문에 고속의 광출력 변조시에도 단일모드로 동작한다. 이와 같은 장점 때문에 통신용 광원으로로서 중요하며

+ 이 논문은 1988년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

* 전남대학교 물리학과

** 한국해양대학교 전자통신공학과

*** 한국전자통신연구소 광전자연구실

지금까지 많은 연구가 되어왔다. 일반적으로 DFB 레이저는 굴절률의 변화에 의한 격자구조를 갖도록 제작되고 있다. 그러나 굴절률은 실수부와 허수부로 나누어 생각할 수 있으며, 굴절률의 허수부, 즉 이득이나 손실의 격자구조에 의한 DFB 레이저는 Kogelnik¹⁾ 반도체 레이저 연구의 초기단계에서 제시한 바 있다. 그러나 이와 같은 이득격자의 DFB 레이저가 실험적으로 제작된 것은 극히 최근의 일로서,²⁾ 바이아스 전류의 조절에 의한 발진파장의 가변동 DFB 레이저의 기능 및 성능향상에 다소간의 보탬이 될 가능성을 가지고 있다. 그런데, 손실 즉 흡수격자를 갖는 DFB 레이저 다이오드에 대해서는 아직 제작 연구된 바가 없으며, 본 보고가 처음인 것으로 생각된다.

본 연구에서는 흡수격자 DFB 구조를 갖는 반도체 레이저를 제작하고 그 동작특성을 조사하였다. 일반적으로 반도체 레이저의 공진기내에 광의 포화흡수체가 존재하면 이러한 흡수체는 광에너지의 세기에 따라 포화흡수를 일으키며, 그 결과 비선형 효과를 유발한다. 이러한 비선형 효과로서 self-pulsation, period doubling 및 optical chaos 등을 들 수가 있다³⁻⁶⁾.

본 실험에서 제작한 흡수격자 DFB 레이저는 상기한 비선형 효과를 나타내었으며, period doubling의 경우 매우 안정한 주파수의 초단펄스를 발생함을 관측하였다. 본 논문에서는 이러한 흡수격자를 갖는 DFB 레이저의 구조 및 제작의 개략과 DC 및 AC 동작특성 및 100ps 미만의 초단펄스 발생에 관한 실험적인 사실들에 관하여 기술하고자 한다.

II. 흡수격자 DFB 레이저의 구조

흡수격자 DFB 레이저의 구조는 그림 1과 같다. *n*-InP substrate 위에 밴드갭 $1.1\mu\text{m}$ 의 *n*-InGaAsP를 buffer층으로서 성장시키고 그 위에 홀로그래피 방법에 의해 $1.3\mu\text{m}$ DFB 레이저의 동작을 위한 회절격자를 제작한다. 제작된 격자 위에 $1.55\mu\text{m}$ bandgap의 *n*-InGaAsP를 500 Å 정도의 두께로 성장시켜 손실격자를 제작하고, 그 위에 2000 Å 정도의 *n*-InP channel guide층을 성장시킨다. Active layer는 $1.3\mu\text{m}$ 의 bandgap을 갖는 InGaAsP 1500 Å을 성장시키며, 그위에 다시 *p*-InP cladding층을 성장시킨다. 제작된 웨이퍼는 횡방향 단일모드 동작을 위해 스트라이프 폭 $2\mu\text{m}$ 의 DCPBH(double channel planar buried heterostructure) 구조로 식각하고, 다시 전류제한층을 재성장시켜 레이저를 완성한다.

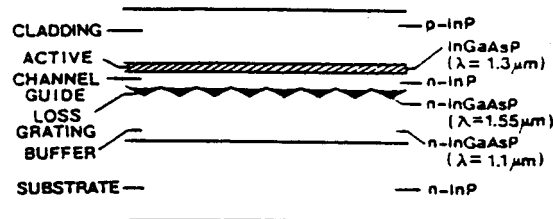


Fig. 1 Structure of DFB laser with absorptive grating.

격자층과의 적절한 모드결합을 위해서 굴절률이 큰 buffer층 ($n=3.46$)을 사용하였으며 격자층은 $1.3\mu\text{m}$ 에서 광흡수가 약 10^4cm^{-1} 인 InGaAsP의 조성이 선택되었다. $1.3\mu\text{m}$ bandgap의 활성층과 $1.55\mu\text{m}$ bandgap의 격자층의 굴절률은 3.52와 3.6이며, InP와 $1.1\mu\text{m}$ bandgap의 InGaAsP의 굴절률은 3.21과 3.33이다.

III. 동작특성

제작된 레이저의 L-I 특성은 그림 2와 같다. 그림 2의 facet a와 b는 레이저의 양쪽 출력면을 나타내며, 각 facet a와 b에서 나오는 광출력은 서로 다르다. 이같은 차이는 공진기내의 광의 공진모드와 Bragg 격자와의 coupling 세기의 공간적 분포, 그리고 격자와 출력면의 상대적인 위상차에 의하여 생기는 공진기내의 비대칭적 광분포에 의하여 일어난다⁷⁾. 본 연구에서 제작된 DCPBH DFB 레이저의 threshold 전류는 24mA 정도로서 일반 DCPBH 레이저의 threshold 전류값과 비슷하며, 발광효율은 약 2% 정도로서 일반 $1.3\mu\text{m}$ DCPBH DFB 레이저에 비하여 약 10배가 작다.

그림 3은 제작된 레이저의 동작특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 레이저 구동장치의 입력 임피던스는 50ohm이고 최대 구동속도는 4GHz이다. 광검출기는 InGaAsP PIN photo

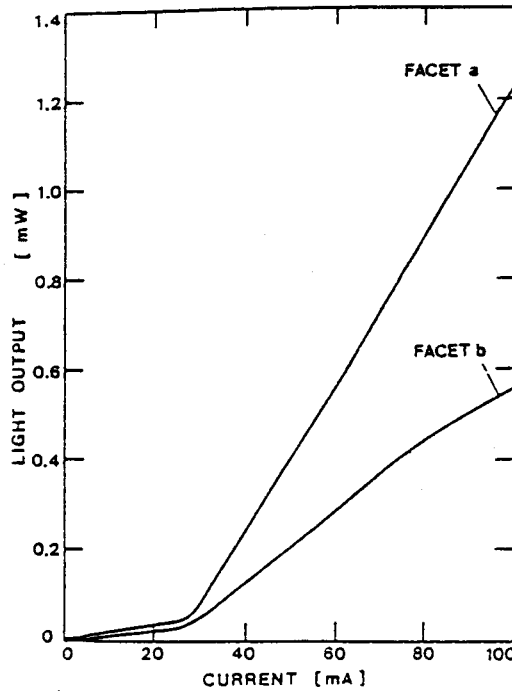


Fig. 2 Light-current characteristics of DFB laser with absorptive grating.

diode를 사용하였으며, 최대 감지속도는 20GHz이다. 사용된 측정장비는 100ps risetime의 pattern generator(Anritsy MP1601A), 최대 구동주파수 7GHz(rise-time 50ps)의 입출력 임피던스가 50ohm인 증폭기(B & H Electronics Co.의 AC7020HL), 25ps rise-time의 sampling head를 사용한 오실로스코프(Tektronics 7854 with S-4 sampling head) 및 spectrum analyzer(Hewlett Pasckard 8566B) 등이다.

그림 4는 DC bias를 가한 흡수격자 DFB laser 광출력의 RF spectrum 이며, 레이저의 self-pulsation을 확인할 수 있었다. Bias 전류를 31mA(곡선 a)부터 90mA(곡선 g)까지 증가시키에 따라서 발진주파수는 약 0.9GHz부터 2.4GHz까지 증가함을 볼 수 있으며, RF스펙트럼의 대역폭이 비교적 넓은 사실로부터 pulsation 주기가 불안정하게 요동함을 알 수가 있다.

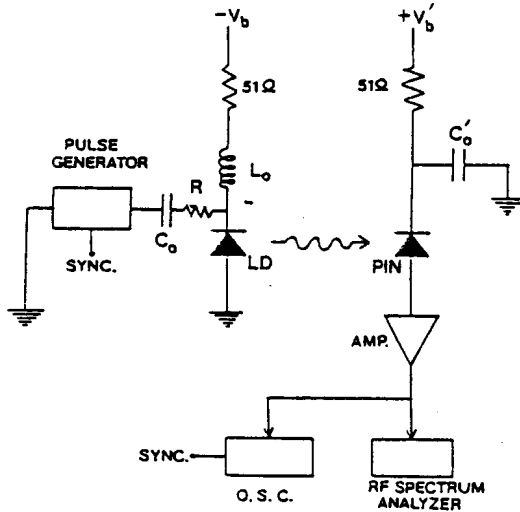


Fig. 3 Experimental setup for the measurement of operation characteristics.

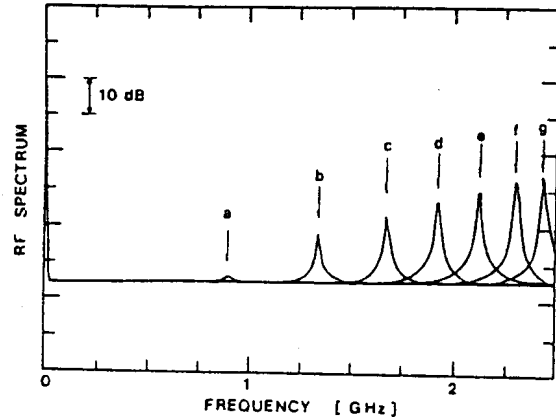


Fig. 4 RF spectrum of self pulsation in DFB laser with absorptive grating : DC currents of(a) 31mA, (b) 40mA, (c)50mA, (d)60mA, (e)70m A, (f)80mA, and (g)90mA were applied.

그림 5는 Bias 전류와 발진주파수의 관계를 나타내고 있다. 그림 5에서 이론결과는 반도체 레이저의 소신호 공진주파수에 관한 수식(1)의 계산결과이고,^{8,9)} 실험곡선은 그림 4로부터 얻은 결과이다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{(J_b - J_{th})(1 + G_N N_0 \tau_p)}{J_{th} \tau_p \tau_s} \right)^{1/2} \quad (1)$$

수식 (1)의 f_r 은 공진주파수, J_b 및 J_{th} 는 바이아스 및 임계전류밀도, G_N 은 이득치, N_0 는 공진기의 이득과 손실이 같을 때의 전하밀도, 그리고 τ_p 와 τ_s 는 광자 및 전자의 평균수명을 나타낸다. 이론과 실험결과가 거의 일치하는 것으로 미루어 보아 그림 4의 공진특성은 반도체 레이저의 공진현상에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 5에서 주입전류가 클 경우는 위 식의 예측결과보다 주파수가 작아지는 현상도 관찰되었는데 이는 비선형 이득에 의한 결과로 생각된다⁹⁾.

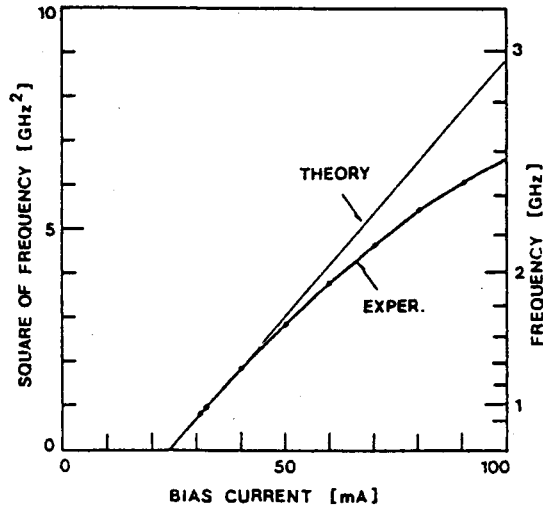


Fig. 5 Relation between the bias current and the self pulsation frequency.

그림 6은 계단모양의 전류를 주입할 때의 시간에 대한 자기발진 광출력을 보여주고 있다. 이 경우의 바이아스 전류는 20mA이고, step 전류는 40mA이다. 발진 임계전류는 24mA로서 60mA의 step 상단부에서 1 ns이 시간지연 후에 자기발진을 개시하며 발진주파수는 그림 4의 측정과 일치함을 알 수 있다.

DC bias에 의해 자기발진하는 광출력의 optical spectrum은 그림 7와 같다. 스펙트럼 측정에는 스펙트로미터에 mirror scanner를 부착한 오실로스코프를 사용하였다. 발진 임계전류 부근($I_b=31$ mA)에서 구동되는 레이저의 스펙트럼은 그림 7의 a와 같으며 그 발진파장의 $1.3282\mu\text{m}$ 로서 레이저 제작시 설계한 파장인 $1.31\mu\text{m}$ 와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 또한 bias 전류를 40mA로

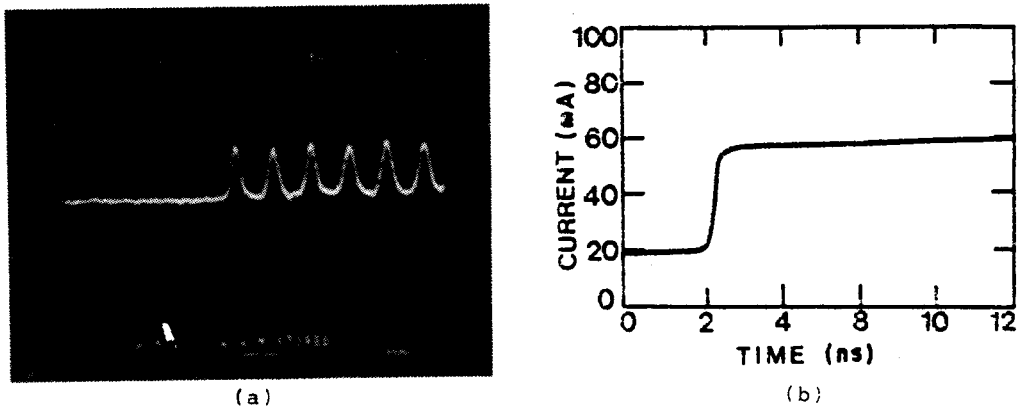


Fig. 6 Light output of self pulsation in DFB laser with absorptive grating: (a)shows the light output and (b)shows the corresponding applied current pulse.

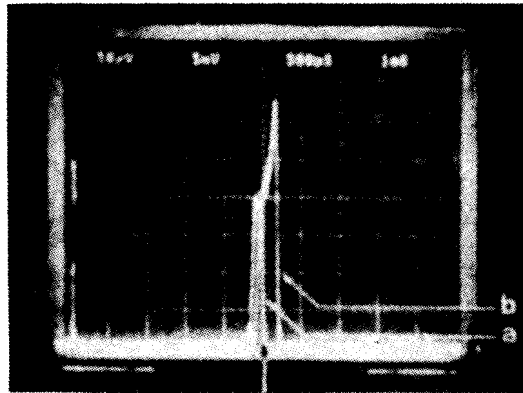


Fig. 7 Wavelength chirping of self-pulsation in DFB laser with absorptive grating : Direct currents of (a) 31mA and (b)40mA were applied.

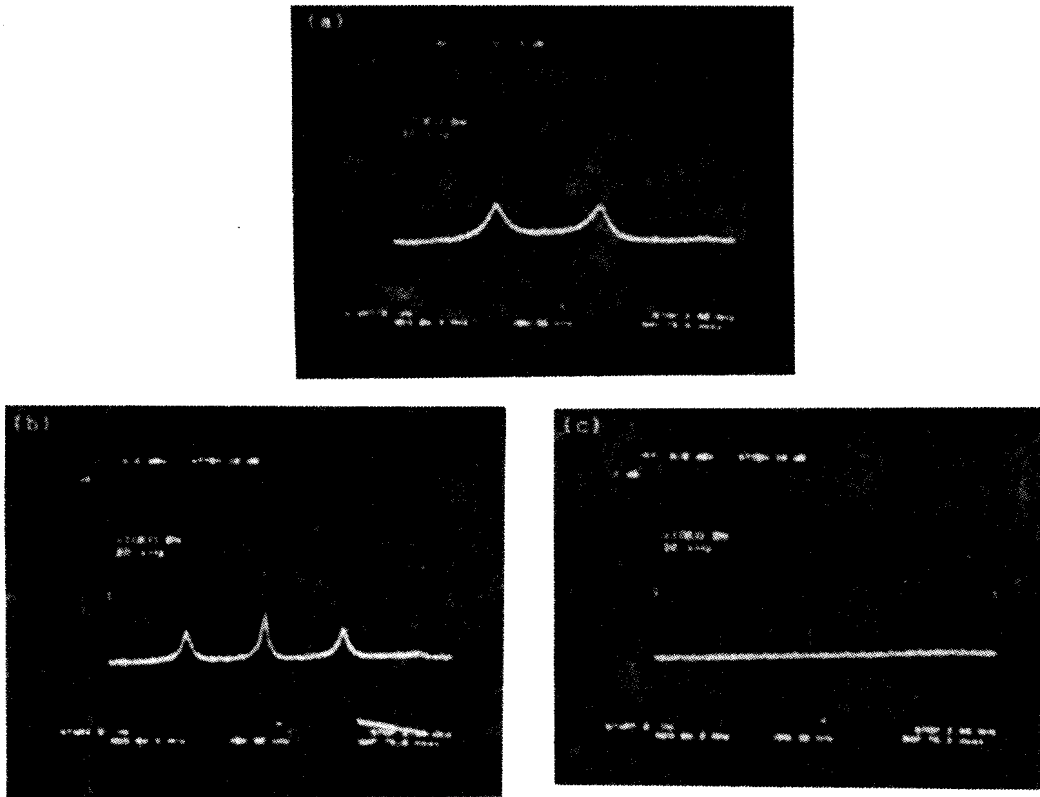


Fig. 8 RF spectrum of light output in DFB laser with adsorptive grating : 2.3 GHz modulation currents of 40mA step pulse with bias currents of (a)33mA, (b)37mA, and (c)40mA were applied.

증가시킴에 따라서(그림 7의 b) 발진파장의 chirping이 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 전류 증가에 따라 커지는 chirping은 공진현상에 의한 이득의 chirping 효과에 기인하며,¹⁰⁾ 자기발전하는 본 연구의 광펄스의 경우도 이와 유사하다. 또한 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 주입전류가 증

가할수록 RF 스펙트럼의 진폭 즉 광진폭이 증가하기 때문에 그림 7에서의 chirping도 바이아스의 증가에 따라 증가하는 것으로 보인다^{9,10}.

그림 8은 2.30GHz 및 40mA step pulse를 가할 때 DC bias 전류의 변화에 따른 광출력의 RF 스펙트럼 사진이다. DC bias 전류를 증가시키에 따라서 혼돈상태가 일어나고 33mA에 이르러 period 3가 생기며, 다시 혼돈상태를 지나 37mA에서 period 4를 거쳐서 40mA에서 스펙트럼의 대역폭이 매우 작은 period doubling에 이른다.

그림 9는 period doubling의 시간에 대한 광출력 파형이며, 주파수가 안정함과 1주기내에 부가적인 펄스가 없는 100ps 정도의 초단 광펄스가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 문헌³⁾에는 InGaAsP/InP계의 반도체 레이저에 있어서는 이득 포화효과가^{11,12)} 크기 때문에 공진 현상이 억제되며 따라서 혼돈현상이 관측되지 않는다고 지적이 되어 있다. 그러나 문헌^{4,5,6)}에는 포화흡수체를 가진 경우에는 Fabry-Perot 레이저에서도 혼돈현상이 발견된다고 보고되어 있다. 한편 문헌^{14,15)}에는 포화흡수체가 없더라도 광강도에 따라 굴절률이 변화하는 DFB 레이저에 있어서는 self-pulsing 및 chaos 현상이 유발될 수 있다는 이론적인 지적도 있다. 따라서 본 실험에서 얻어진 self-pulsing, period doubling 및 chaos 현상은 (i) 포화흡수체(in bulk), (ii) 광강도에 따른 굴절률변화(in bulk), (iii) 포화흡수(in DFB), (iv) 광강도에 따른 굴절률의 변화(in DFB)들 중 어떠한 요인이 가장 큰지는 향후 이론적인 검토가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

그림 10은 본 연구의 흡수격자를 갖는 DFB 레이저로 얻어진 58.5ps 정도의 펄스폭을 갖는 초단 광펄스를 streak camera로 잡은 결과이다. 주파수가 매우 안정한 이와 같은 고속 초단펄스는 TDM(time division multiplexing)에 응용할 수 있을 것으로 생각된다.

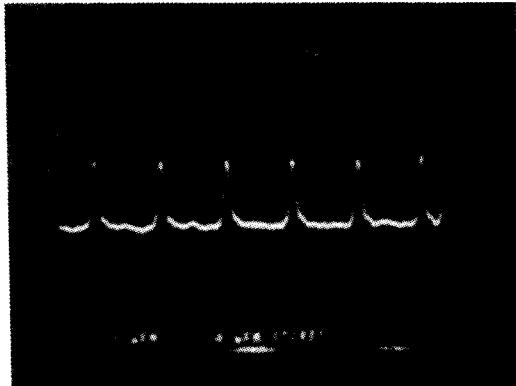


Fig. 9 Light output of period doubling : 2.3 GHz modulating currents of 40mA step pulse with bias currents of 43mA DC was applied.

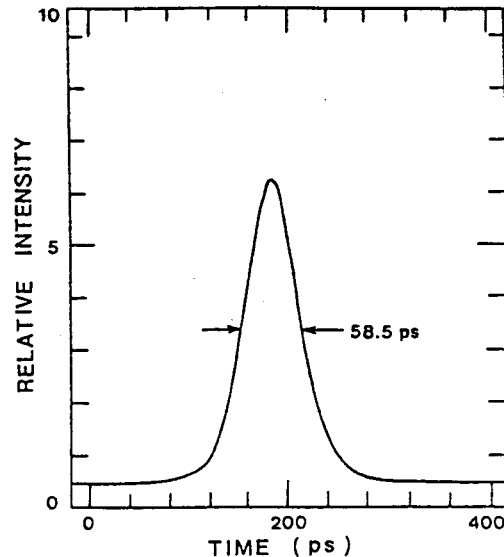


Fig. 10 Streak camera trace of short optical pulse in period doubling.

IV. 결 론

흡수격자를 갖는 DFB 레이저를 처음으로 제작하였으며, 그 동작특성을 조사하였다. 그 결과를 요약하면, (1) 발진 임계전류는 24mA, 발광 효율은 약 2%였으며, (2) DC 전류 구동시 자기발진을 일으키며, (3) 자기발진 주파수는 반도체 레이저 고유의 공진현상 주파수와 같으며, (4) AC 전류구동시 혼돈상태, 주기 2, 주기 3 및 주기 4등의 비선형 효과를 관찰하였으며, (5) 주기 2의 경우는 주파수가 안정하고 1주기내에 부가펄스가 없는 100ps 이하의 초단 광펄스가 생김을 확인했다.

본 실험에서는 58.5ps 정도의 초단 광펄스를 얻었다. 이와 같은 흡수격자 DFB의 초단 펄스 현상은 향후의 이론적 연구를 통하여 레이저의 최적 구조와 최적 동작 조건을 결정함으로써 그 최소 펄스의 폭을 더욱 줄임과 동시에 발광효율도 어느 정도 개선할 수 있을 것으로 생각된다. 흡수격자 DFB 레이저의 이같은 초단 광펄스 현상은 레이저의 고속 TDM 방식 광통신의 광원으로 서 이용 가능하리라 기대된다.

참고문헌

- 1) H. Kogelnik and C.V. Shank, J. Appl. Phys. 43, 2327(1972).
- 2) Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu and H. Iwaoka, IOOC'89, 20PDB2(1989).
- 3) Chang-Hee Lee, Tae-Hoon and Sang-Yung Shin, Appl. Phys. Lett. 46, 95(1985).
- 4) H. Kawaguchi, Appl. Phys. Lett. 45, 1264(1984).
- 5) Y.C. Chen, H.G. Winful and J.M. Liu, Appl. Phys. Lett. 47, 208(1985).
- 6) H.G. Winful, Y.C. Chen and J.M. Liu, Appl. Phys. Lett. 48, 616(1986).
- 7) Govind P. Agrawal and Andrew H. Bobeck, IEEE J. Quant. Elec. QE-24, 2407(1988).
- 8) T. Ikegami and Y. Suematsu, IEEE J. Quant. Elect., 4, (1968).
- 9) Niels H. Jensen, P. L. Christiansen and O. Skovgaard, IEEE Proc. 135, 385(1988).
- 10) Fumio Koyama and Yasuharu Suematsu, IEEE J. Quant. Elect. QE-21, 292(1985).
- 11) Y. Suematsu and K. Furuya, Trans. Inst. Elec. Commun. Eng. Japan E-60, 467(1977).
- 12) B. Zee, IEEE J. Quant. Elec. QE-14, 727(1978).
- 13) Govind P. Agrawal, Appl. Phys. Lett. 49, 1013(1986).
- 14) Herbert G. Winful, J.H. Marburger and G. Gamire Appl Phys. Lett. 35, 379(1979).
- 15) Herbert G. Winful and Gene D. Cooperman, Appl. Phys. Lett. 40, 298(1982).