

무반사 코팅된 다이오드 레이저의 능동형 모드락킹

Active Mode-Locking of an Antireflection-Coated Diode Laser

나기운*, 신상영, 지윤규
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

다이오드 레이저의 능동형 모드락킹 구조로부터 극초단 광펄스를 발생시켰다. 모드락킹된 광펄스를 얻기 위해 다이오드 레이저의 한쪽 면을 무반사 코팅했으며, 얻어진 광펄스의 폭(FWHM)은 22pscc였다.

1. 서론

레이저를 이용한 극초단 광펄스는 과학 및 공학 전반에 걸쳐 그 응용범위가 넓어 많은 관심과 노력이 기울여지고 있다. 극초단 광펄스를 이용한 자연현상에 대한 측정으로 이제껏 우리가 접할 수 없었던 여러가지 현상들을 알게 되었으며 그 현상들로부터 더욱 짧은 시간영역의 실험과 응용으로 발전할 수 있게 되었다. 특히 전자공학적으로 볼 때 극초단 광펄스는 초고속 광통신이나 초고속 광전소자 등의 구현에 없어서는 안된다.

본 논문에서는 작고 견고하며 높은 효율과 긴 수명을 갖는 다이오드 레이저를 능동형 모드락킹 시킴으로써 극초단 광펄스를 얻었다. 능동형 모드락킹은 다이오드 레이저의 많은 발진모드들이 입정한 위상을 갖도록 위상을 락킹(Locking)시켜서 극초단 광펄스를 얻어낸다. 이에 따르는 근본적인 문제점은 다이오드 레이저의 양쪽면으로 형성된

Fabry-Perot (이하 F-P) 공진기로 인해 위상이 락킹된 모드들끼리 군(Group)이 형성되고 이 군들 사이에서는 위상관계가 없어진다는 것이다. 이로 인해 이론적으로 얻을 수 있는 것보다 더 넓은 광펄스가 얻이지므로 이런 부정적인 효과를 최소한으로 줄이는 것이 다이오드 레이저 능동형 모드락킹의 주된 연구과제가 되고 있다.

본 실험에서는 다이오드 레이저의 한쪽면에 무반사 코팅을 해서 다이오드 레이저의 F-P 공진기의 영향을 줄이는 방법을 사용했다.

2. 능동형 모드락킹

Laser Diode (이하 LD)는 [그림1-a]와 같은 이득곡선을 가진 활성매질과 [그림1-b]와 같은 투과특성을 갖는 F-P로 구성되었다고 볼 수 있다. 따라서 LD의 이득곡선은 [그림1-a]처럼 활성매질의

이득곡선이 F-P의 전달특성곡선으로 변조된 형태를 갖는다. [그림1-c]에서 볼 수 있듯이 LD의 표면 반사율이 30% 정도로 낮기 때문에 모드의 Linewidth는 매우 넓다. 또한 LD의 길이는 보통 수백 μm 정도이고 활성영역의 대역폭은 수 THz 정도이므로 존재할 수 있는 모드수는 수십개에 지나지 않는다. 이렇게 형성된 모드들은 모드간격에 해당하는 Microwave를 LD에 가해 이득을 변조시킴으로써 위상이 일치하게 되어 모드락킹을 일으킬 수 있다. 그러나 모드간격이 수백 GHz 정도이므로 이에 알맞는 Microwave source를 구할 수 없기에 [그림2-a]처럼 외부에 거울을 두어 공진기의 길이를 늘리는 방법을 쓴다. 본 실험에서는 거울을 LD로부터 15 cm 정도에 놓았는데 1GHz 정도의 Microwave를 가했을 때 모드락킹이 일어났다. 이런 구조의 장점은 외부거울의 반사율이 크므로 모드의 Linewidth가 매우 좁아지고 모드간격이 좁아지므로 활성매질의 대역폭 안에서 매우 많은 모드가 발견할 수 있다는 것이다. 단점으로는 LD의 양쪽면으로 형성된 F-P공진기 모드와, 외부거울과 LD의 한쪽 면으로 형성된 F-P모드가 섞여서 모드락킹이 제대로 일어나지 않는다는 것이다. 이 점을 자세히 살펴보자. [그림2-b]는 외부거울 없는 LD의 이득곡선이다. 이 LD가 외부거울과 혼성공진기를 형성하면 이득곡선은 [그림2-c]처럼 변한다. 이런 상태에서 외부 공진기 모드 간격으로 Microwave를 가하면 외부공진기 모드들 간에는 모드락킹이 일어나나 LD모드간에는 모드락킹이 일어나지 않는다. 그래서 LD의 한쪽 면을 무반사 코팅해서 LD의 F-P를 없애주면 LD공진기 모드가 사라지고 이득곡선은 [그림2-d]처럼 되어 모든 외부 공진기 모드가 모드락킹을 일으키게 된다[1].

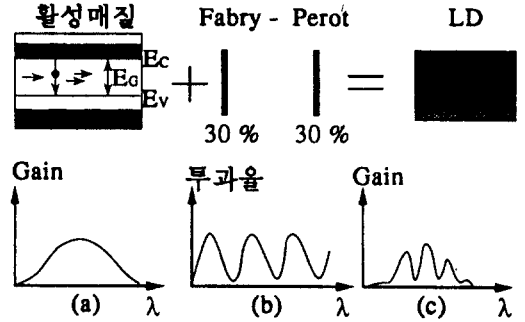


그림1: 다이오드 레이저의 이득곡선

- (a) 활성매질의 이득곡선
- (b) F-P의 부과특성
- (c) 다이오드 레이저의 이득곡선

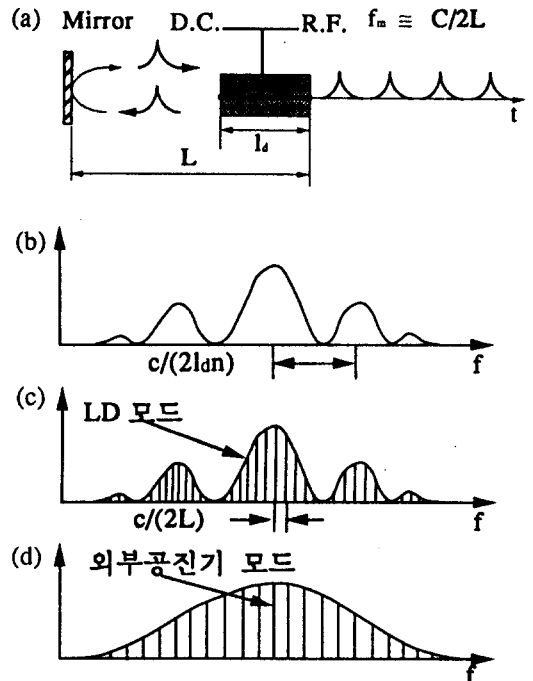


그림2: LD의 능동형 모드락킹

- (a) 능동형 모드락킹 구조
- (b) LD의 모드
- (c) 외부공진기에서의 LD의 모드
- (d) 무반사 코팅 후 LD의 모드

3. 무반사 코팅

무반사 코팅은 굴절율이 1.81인 SiO를 Thermal Evaporator로 LD의 한쪽 면에 증착시켰다. Thermal Evaporator로 SiO를 증착시키는 데 있어 SiO가 불안정한 상태의 물질이라 굴절율이나 두께의 조절이 매우 어렵기에 [그림3-a]와 같이 진공 Chamber 안에서 LD를 켜놓고 증착을 했다. 코팅하기 전에 LD를 문턱전류 약간 위에서 동작시킨다. 코팅을 시작하면 [그림 3-b]처럼 L-I curve가 이동하는 데, 코팅이 가장 적절한 상태가 지나면 L-I curve는 거꾸로 이동하기 시작한다. 그러므로 LD에서 일정한 Intensity의 빛이 나오도록 전류를 공급하는 회로를 만들어 증착하는 도중 계속 전류를 모니터해서 LD에 흐르는 전류가 최대가 되는 점에서 코팅을 중지한다. 코팅한 면의 반사율은 (1)식에 의해 계산할 수 있다[2].

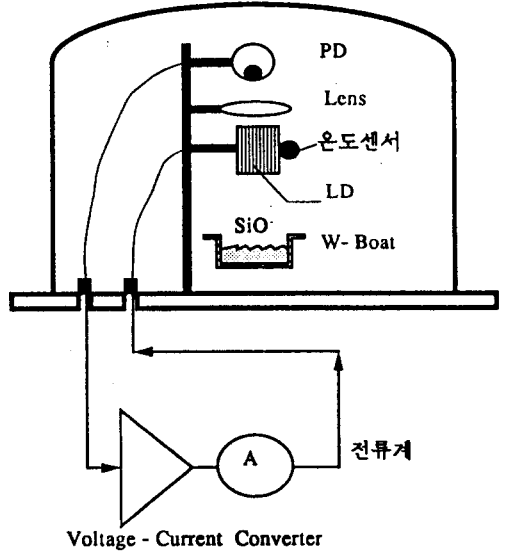
$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{1/2} \frac{1 - R_1}{1 - R_2} \quad (1)$$

- P_1 : 코팅한 면에서 나오는 Intensity
- P_2 : 코팅하지 않은 면에서 나오는 Intensity
- R_1 : 코팅한 면의 반사율
- R_2 : 코팅하지 않은 면 반사율 (= 30%)

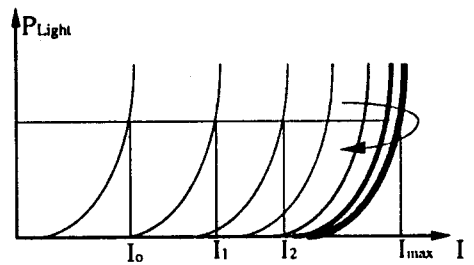
코팅한 후 LD의 L-I curve [그림4]로부터 $R_1 = 6.4 \pm 3\%$ 가 된다.

4. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서 사용한 LD는 Hitachi의 HLP140으로 중심파장은 830nm이다. 전체 실험장치는 [그림5]와 같다. 코팅된 LD에 직류바이어스와 1GHz 정도의 Microwave를 가해서 극초단 광펄스를 발생시켰는데 코팅 전과 후에 있어서 자기상관은 [그림 6]과 같다. 코팅 전과 후의 자기상관에 있어서



(a)



(b)

그림3: 무반사 코팅

(a) Thermal Evaporator

(b) 코팅 도중 L-I curve의 이동

Spike의 존재로부터 완전한 모드락킹이 이루어지지 않았음을 알 수 있으며 Spike의 상대적 크기가 코팅 후에 있어서 현저히 줄어든 점으로 보아 무반사 코팅이 어느 정도 효과가 있음을 알 수 있다. 바이어스 전류를 크게 올렸을 때 한 주기 동안 두개의 광펄스가 관측되었다[그림6-d][3].

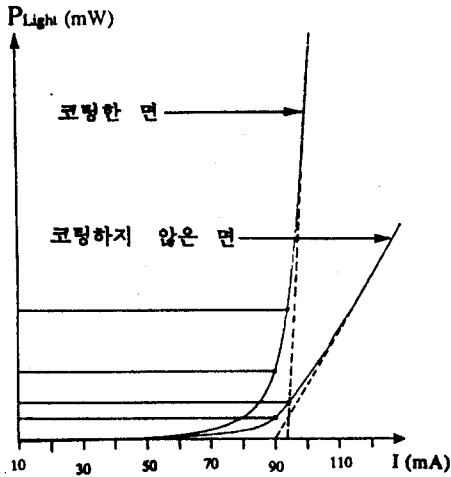
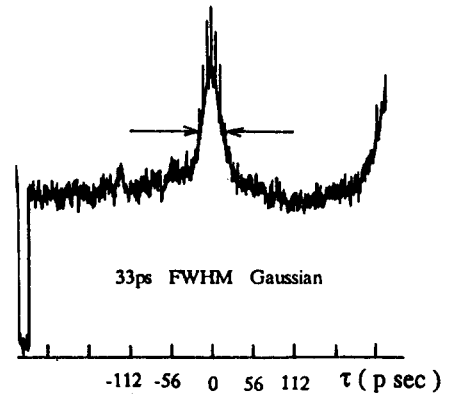


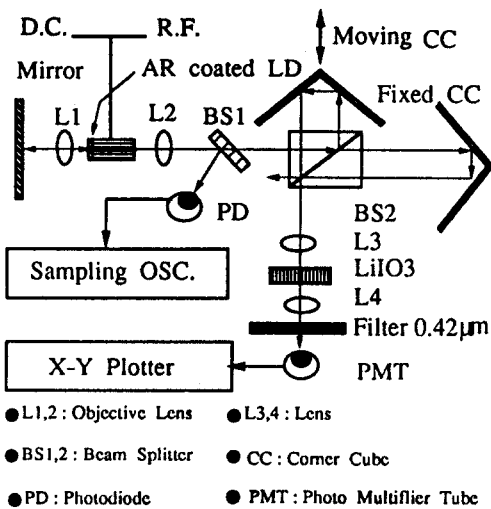
그림4: 코팅한 후 LD의 L-I curve

그림6: Autocorrelation trace

- (a) 코팅 전: $I_{dc} = 53.3 \text{ mA}$, $f_m = 1.04 \text{ GHz}$
- (b) 코팅 전: $I_{dc} = 60 \text{ mA}$, $f_m = 1.04 \text{ GHz}$
- (c) 코팅 후: $I_{dc} = 100 \text{ mA}$, $f_m = 1.02 \text{ GHz}$
- (d) 코팅 후: $I_{dc} = 140 \text{ mA}$, $f_m = 1.02 \text{ GHz}$

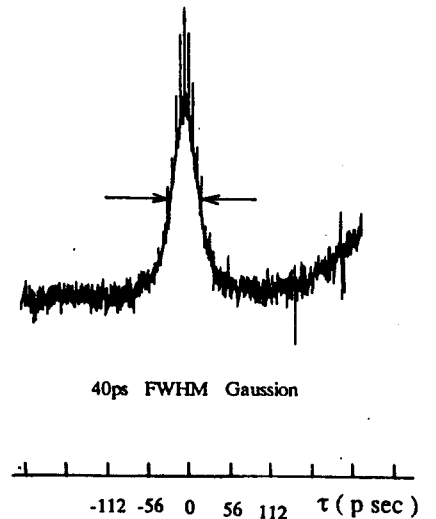


(a)

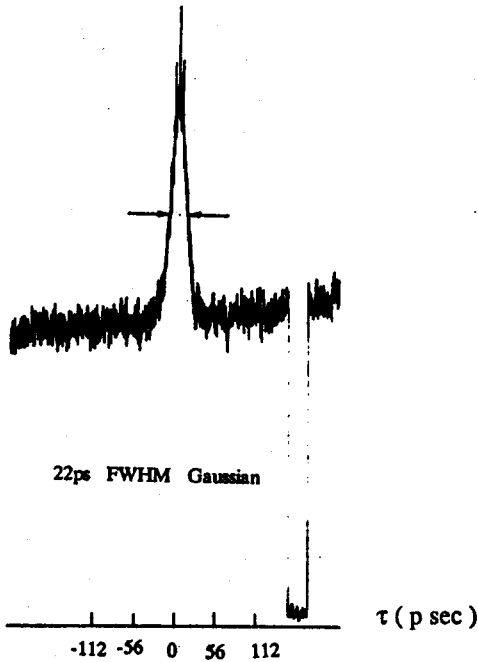


- L1,2: Objective Lens ● L3,4: Lens
- BS1,2: Beam Splitter ● CC: Corner Cube
- PD: Photodiode ● PMT: Photo Multiplier Tube

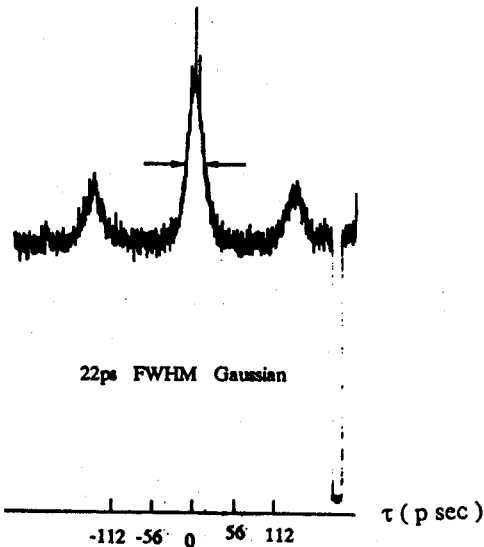
그림5: 전체실험장치



(b)



(c)



(d)

5. 결론

능동형 모드락킹의 가장 큰 장애요인인 LD의 공진기 모드를 없애기 위해 무반사 코팅을 했다. 반사율을 30%에서 $6.4 \pm 3\%$ 로 줄인 후 능동형 모드락킹을 시도한 결과 코팅 전과 후에 있어서 FWHM이 각각 33ps, 22ps 의 극초단 광펄스를 얻을 수 있었다. 더 짧은 광펄스를 얻기 위해선 반사율이 영이 되도록 코팅을 계속 개선해야 하고 아울러 Grating이나 Etalon 등을 사용해서 모드락킹에 기여하지 못하는 모드들을 제거해 줄 필요가 있다[4].

참고 문헌

- [1] M.S.Demokan, Mode-Locking in Solid - State and Semiconductor Laser, Reserch Studies Press, 1982
- [2] Hiroo Ukita, Keisuke Mise and Yoshitada Katagiri, " Simple Measurement of the Reflectivity of Antireflection-Coated Laser Diode Facets", Japan. J. Appl. Phys., Vol.27, pp.L1128-L1130
- [3] J.E.Bower, P.A.Morton, A.Mar, and S.W.Corzine, "Actively Mode-Locked Semiconductor Laser", IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-25, pp.1426-1439, 1989
- [4] E.P.Ippen, and D.J. Eilenberger, R.W.Dixon, "Picosecond pulse generation by passive mode locking of diode laser", Appl.Phys.Lett., Vol.37, pp.267-269, 1980