

결합형 모드록킹 극초단 색소레이저의 공진기 길이변화 특성

서정철 · 정영봉 · 김동호

한국표준연구소 분광·색채연구실

(1990년 2월 1일 받음)

결합형 모드록킹 극초단 색소레이저의 공진기 길이변화에 따른 펄스형태 및 펄스폭의 변화를 선형 자체상관기를 이용하여 연구하였다. 색소레이저의 공진기 길이가 여기레이저의 공진기 길이와 일치하였을 경우 펄스폭은 0.64 ps이며 완벽하게 모드록킹 되었다. 그러나 최적조건보다 색소레이저 공진기 길이가 긴 경우나 짧은 경우에는 펄스폭은 넓어지며 불완전 모드록킹이 되었다. 즉 색소레이저의 공진기 길이가 여기레이저의 공진기 길이보다 길 경우는 자연방출에 의한 noise 때문에 broad base가 형성되며, 색소 이득이 증가되기 때문에 자체 상관함수의 침투출력은 최적조건에서의 색소레이저 공진기 길이보다 5 μm 긴 조건에서 최대가 되었다. 또 색소레이저의 스펙트럼은 자연방출에 의한 형광 및 색소 이득이 증가되기 때문에 넓게 뒤를 관찰할 수 있었다. 그러나 색소레이저의 공진기 길이가 여기레이저의 공진기 길이보다 짧은 경우에는, 색소 이득이 적게 됨으로 자체 상관함수의 침투출력도 약하게 되며 스펙트럼의 전반치폭은 좁게 되었다. 한편 최적조건을 벗어나면 스펙트럼의 중심파장이 이동되는 현상을 관찰할 수 있었다.

I. 서 론

초고속 광소자 부품 성능평가, 분자의 운동 및 여기상태의 이완현상 등 초고속 현상(ultra fast phenomena)을 연구하기 위하여, 극초단 펄스 색소레이저(ultra-short pulse dye laser)의 개발 및 특성에 대하여 많이 연구되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

1968년 Glenn 등이⁽⁵⁾ 모드록킹된 Nd: Glass 레이저를 여기광원(pumping source)으로 하여 색소레이저를 동기 모드록킹(synchronous mode locking)시켜 ~십 ps의 펄스레이저를 개발한 이후로 subpicosecond 펄스폭의 극초단 펄스레이저를 발전시킬 수 있게 되었다.^(6,7)

동시 모드록킹은 모드록킹된 레이저(Art, Nd: YAG 레이저 등)를 여기광원으로 이용하여 색소레이저를 발전시키면서 모드록킹하는 것으로 파장을 쉽게 변화시킬 수 있으며, 안정된 펄스를 얻을 수 있으므로 많이 이용되고 있다. 이러한 방법은 여기레이저의 펄스폭에 직접 영향을 받기 때문에 여기레이저의 모드록킹을 정확하게 하여 여기레이저의 펄스폭을 최소화시켜야 하며, 색소레이저의 공진기 길이와 여기레이저의 공진기 길이를 일치시켜야 한다.⁽⁸⁾ 동기 모드록킹 방법에 의한 색소레이저의 펄

스폭은 ~ps 정도가 되는데, GVD(group-velocity dispersion)를 보정하며, pulse compression을 하여 subpicosecond 펄스를 발전시킬 수 있다.⁽⁹⁾

한편 ~ps 정도의 펄스폭을 갖는 동시 모드록킹 레이저에서 포화 흡수체(saturable absorber)를 사용하여 수동형 모드록킹(passive mode locking)도 함께 일어날 수 있도록 하면 subpicosecond 펄스레이저를 발전시킬 수 있는데, 이와 같은 방법을 결합형 모드록킹(hybrid mode locking)라 한다.⁽¹⁰⁾ 결합형 모드록킹 색소레이저는 포화 흡수체(DODCI 등)에 의하여 satellite 펄스를 제거할 수 있으며, 펄스폭을 축소할 수 있기 때문에 극초단 펄스레이저를 발전시킬 수 있다. 이와 같은 모드록킹 방법은 여기광원에 의한 색소의 이득변조와 포화 흡수체에 의한 손실변조에 의하여 모드록킹하는 것으로 파장을 변화시킬 수 있으며, 모드록킹이 안정하게 되며, 고효율 subpicosecond 펄스를 발생시킬 수 있기 때문에 많이 연구되고 있다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 동기 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이변화에 따른 펄스 변화를 관찰하였으며, 결합형 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이변화 특성과 비교하였다. 또 결합형 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이에 따른 펄스폭 변화, 자체 상관함수의 침투출력, 스펙트럼의 전반치폭(FWHM), 중심파장 변화 등에 대하여 연구하였다.

* 본 연구는 과학기술처 특정연구과제의 일환으로 수행되었음.

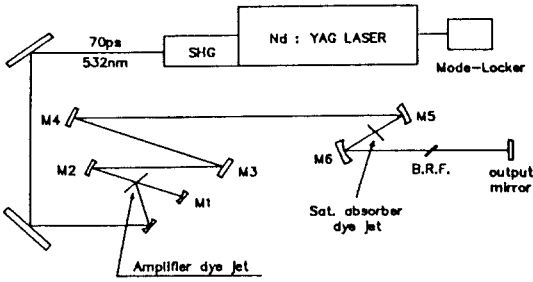


Fig. 1. Schematic diagram of the hybrid mode-locking system.

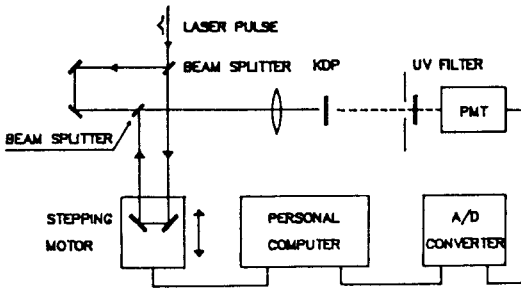


Fig. 2. Experimental setup for collinear autocorrelator using SHG.

II. 실험

극초단 펄스 색소레이저의 공진기 길이변화에 따른 특성을 연구하기 위한 레이저 장치는 그림 1과 같은데, 여기레이저는 모드록킹된 Nd:YAG 레이저로 2차 조화파(Second Harmonic Generation)를 발생시켜 활성매질(active medium)에 접촉하게 된다. 활성매질은 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 에서 흡수가 잘되는 Rhodamine-6G이며, 포화흡수체는 DODCI(3-3'-Diethylloxadicarbocyanine Iodide)로 메타놀에 녹여 에틸렌 글리콜에 혼합하여 사용하였다. 파장변환 소자는 birefringent 필터이며 출력경은 투과율이 17%인 평면거울로 되어 있다.

여기레이저인 모드록킹된 Nd:YAG 레이저의 반복률(repetition rate)은 76 MHz 이므로 색소레이저의 공진기 길이가 197 cm 가 되도록 마이크로미터로 미세 조정하였다. SHG 된 여기레이저(펄스폭 약 70 ps 임)의 출력은 1.7 W 가 되도록 하였으며 모드록킹이 완벽하게 되도록 Nd:YAG 레이저의 출력경을 미세 조정하였다.

한편 동시 모드록킹 실험을 할 경우에는 포화흡수체를 제거한 다음 활성매질만을 가지고 모드록킹하였으며 공진기 길이변화에 따른 펄스폭의 변화를 관찰하였다. 결

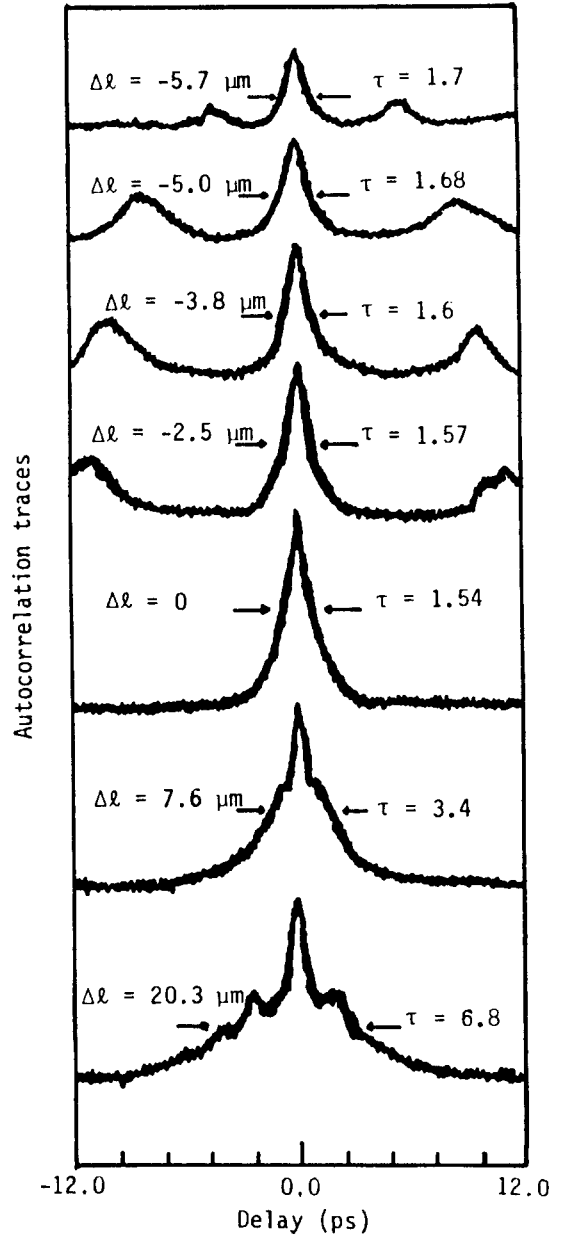


Fig. 3. Autocorrelation traces versus cavity-length mismatch (Δl) for the synchronous mode-locking dye laser.

합형 모드록킹은 포화흡수체를 사용하여 수동형 모드록킹(passive mode locking)도 함께 일어날 수 있도록 하였으며 동시 모드록킹과 비교하였다.

한편 펄스폭을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 optical autocorrelator를 제작하였는데,⁽¹²⁾ 일반적으로

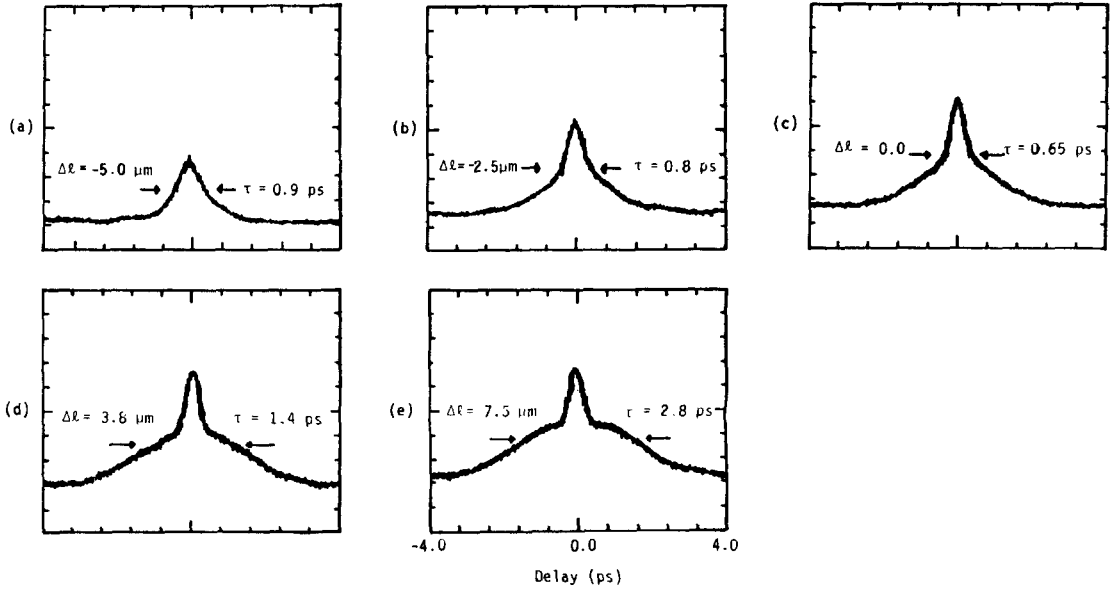


Fig. 4. Autocorrelation traces versus cavity-length mismatch (Δl) for the hybrid mode-locking dye laser.

동시 모드록킹 및 결합형 모드록킹 색소레이저의 펄스형태는 sech^2 으로 가정할 수 있으므로, (13,14) 레이저 펄스를 sech^2 으로 하여 펄스폭을 CRT에 나타내게 하였다. 또 결합형 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이에 따른 중심 파장 변화 및 스펙트럼의 전반치폭의 변화를 측정하기 위하여 분해능이 0.25 nm인 단색화장치(Jobin Yvon H-20)를 컴퓨터에 연결하여 사용하였다.

III. 결과 및 논의

그림 3은 동시 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이변화에 따른 autocorrelation traces로 공진기 길이가 여기레이저의 공진기 길이와 일치되었을 때 펄스폭이 1.54 ps 이었다. 한편 공진기 길이가 일치되었을 때 보다 짧은 경우에 펄스폭은 증가되며, satellite 펄스가 나타나는 것을 관찰할 수 있으며, 공진기 길이가 길 때는 자연방출에 의한 noise 때문에 broad base가 형성되고 펄스폭은 넓어진다. (15) 그림에서 satellite 펄스는 공진기 길이가 짧아질수록 중심 펄스에 접근하며, 그 효과가 증폭되게 되는데 이러한 현상은 이득이 적은 상태에서 유도방출이 일어나기 때문에 남아있는 이득이 다시 발진하기 때문이다. 따라서 공진기 길이가 짧아질수록 자체 상관함수($G^2(\tau_0) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) I(t+\tau_0) dt$)의 첨두출력은 점점 약하게 되며, 유도방출이 일어난 후 좀더 빨리 threshold를 넘게 되므로 satellite 펄스가 중심펄스에

접근하게 된다. 또 공진기 길이가 최적조건에서 보다 점점 길어지면 satellite 펄스는 약하게 되지만, 이득은 점점 증가되기 때문에 자연방출에 의한 noise 영향이 크게 되어 broad base가 형성되는 불완전 모드록킹(incomplete mode locking)이 일어나게 된다.

그림 4는 결합형 모드록킹 색소레이저에서 공진기 길이변화에 따른 autocorrelation traces로 색소레이저 공진기 길이가 여기레이저의 공진기 길이와 일치되었을 때 펄스폭은 650 fs이었으며, 공진기 길이가 일치되지 못하면 펄스폭이 증가되는 것을 관찰할 수 있었다. 결합형 모드록킹 색소레이저의 펄스폭 650 fs는 동시 모드록킹만으로 얻는 펄스폭 1.54 ps의 색소레이저보다 포화흡수체에 의하여 펄스폭이 약 2.4배 더 축소되었다. 그림 5는 결합형 모드록킹 색소레이저의 이득변화를 나타낸 것으로 포화흡수체의 비선형 흡수에 의하여 레이저 공진기 내부에서 빛의 세기가 높아질수록 투과도가 높아지므로, 이득곡선이 threshold를 넘게 되면 급하게 변하기 때문에 펄스폭이 축소된다. 유도방출이 일어난 후 이득은 포화흡수체에 의하여 약한 빛을 흡수하기 때문에 다시 threshold를 넘지 못하게 됨으로 satellite 펄스가 제거된다. 그러나 공진기 길이가 최적조건보다 짧으면 유도방출이 충분히 일어나지 않기 때문에 satellite 펄스는 발생될 수 있다.

한편 그림 6은 결합형 모드록킹 색소레이저에서 공진기 길이변화에 따른 펄스폭을 나타낸 것인데, 안정된

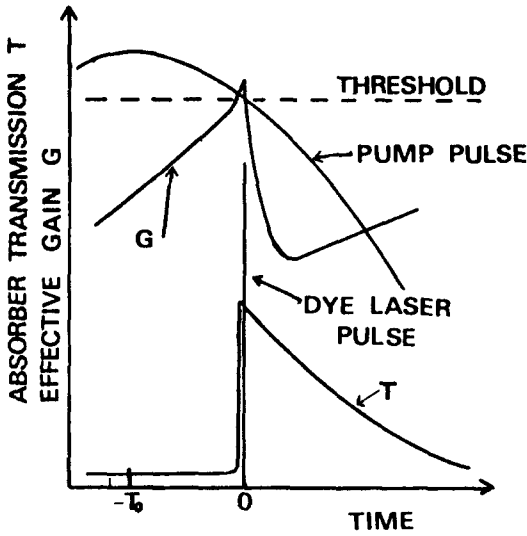


Fig. 5. Time variation of the effective gain of the amplifier dye (R-6G), of the absorber transmission (DODCI).

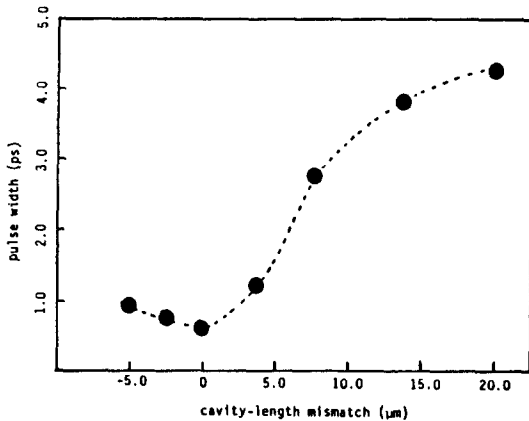


Fig. 6. Pulse width as a function of cavity mismatch for the hybrid mode locking dye laser.

subpicosecond 펄스를 발생시키기 위해서는 $|\Delta l| < 2.5 \mu\text{m}$ 범위로 공진기 길이를 일치시켜야 한다. 만약 $\Delta l < -5.0 \mu\text{m}$ 이면 펄스가 공진기를 왕복했을 때의 이득 폭선이 threshold 를 넘지 못하므로 모드록킹이 되지 않는다. 그리고 공진기 길이가 최적조건에서 보다 길 때는 이득폭선의 기울기가 완만하고, 자연방출에 의한 noise 때문에 펄스폭이 넓어지게 되었다. 즉 공진기 길이가 최적조건보다 긴 경우와 짧은 경우의 펄스는 안정되지 못하며 펄스폭은 넓어지는데, 공진기 길이변화에 이득폭선이 다른 모양을 갖기 때문에 대칭적으로 변화하지 않는다.

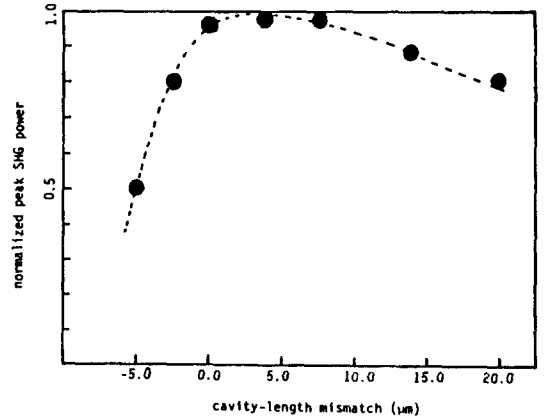


Fig. 7. Normalized peak power of autocorrelation versus cavity-length mismatch (Δl) for the hybride mode-locking dye laser.

그림 7은 결합형 모드록킹 색소레이저의 공진기 길이 변화에 따른 자체 상관함수의 첨두출력 변화를 나타낸 것인데, 공진기 길이가 최적조건보다 짧은 경우는 이득이 급하게 적어지므로 그림에서와 같이 기울기가 크게 나타나며, 길 때는 이득이 완만하게 변하기 때문에 자체 상관함수의 첨두출력도 완만하게 변한다. 그런데 자체 상관함수의 첨두출력은 펄스폭이 최소인 최적조건에서 보다 공진기 길이가 5.0 μm 긴 조건에서 최대가 되었는데, 이것은 펄스폭은 넓어지나 이득이 증가되기 때문이다. 즉 이득은 공진기 길이가 길어지면 증가되지만, 자연방출에 의한 효과와 공진기 길이가 일치되지 못했기 때문에 공진기를 왕복했을 때 유도방출이 일어나는 시점이 달라지므로, 펄스폭은 넓어지게 된다. 자체 상관함수의 첨두출력은 이득과 펄스폭의 두 요인에 따라 달라지게 되므로 최적조건에서 보다 공진기 길이가 5 μm 긴 경우에 자체 상관함수의 첨두출력이 최대가 되었다.

한편 그림 8은 공진기 길이변화에 따른 스펙트럼의 전반치폭과 중심파장 이동을 나타낸 것인데, 공진기 길이가 최적조건일 때의 전반치폭은 640 GHz 이며 중심파장은 591 nm 이다. 최적조건에서 결합형 모드록킹 색소레이저의 펄스폭은 650 fs 이며 전반치폭은 640 GHz 이므로 $\Delta t \Delta \nu = 0.416$ 인데 레이저 펄스가 sech^2 함수인 경우 transform limit 는 $\Delta t \Delta \nu = 0.315$ 이다.⁽¹⁶⁾ 따라서 프리즘을 사용하여 군속도 분산(group velocity dispersion)을 보정하면 transform limit 에 접근할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 최적조건보다 공진기 길이가 길면 스펙트럼의 전반치폭도 넓어지게 되는데, 그림 4와 같이 펄스폭도 넓어지게 되므로 time bandwidth product 는 공진기 길이가 길어질수록 커지게 된다. 즉

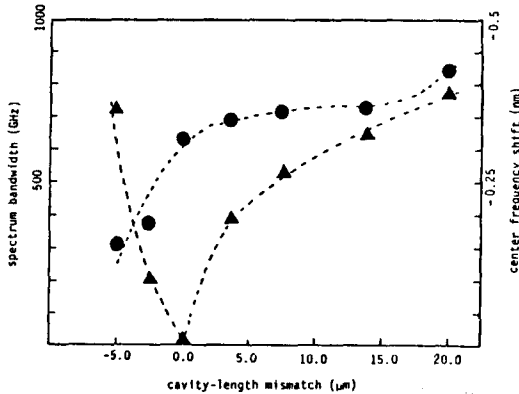


Fig. 8. Spectrum bandwidth (●) and center frequency shift (▲) versus cavity-length mismatch for the hybrid mode-locking dye laser.

공진기 길이가 긴 경우에 이득은 증가하여 스펙트럼은 넓게 되지만 자연방출에 의한 효과가 증대되어 완전한 모드록킹이 되지 않고 broad base가 형성되는 불안전 모드록킹이 됨을 알 수 있다. 또 최적조건보다 공진기 길이가 짧은 경우는 이득이 적게 되므로 스펙트럼의 전 반치폭은 좁게 된다.

한편 공진기 길이변화에 따른 중심파장의 이동은 공진기 길이가 최적조건보다 긴 경우는 이득이 증가하여 포화흡수체의 최대흡수 파장(582 nm)으로 이동되기 때문이다.⁽¹⁷⁾ 또 공진기 길이가 최적조건보다 짧은 경우는 공진기 길이가 짧아질수록 satellite 펄스 효과가 증가되는 것을 보면, satellite 펄스 영향으로 추측된다. 즉 공진기 길이가 짧아지면 질수록 satellite 펄스는 빨리 발생되므로 색소이득이 큰 파장(580 nm)으로 이동하기 때문이다.

IV. 결 론

동시 모드록킹 색소레이저는 최적조건에서 펄스폭은 1.54 ps이며 공진기 길이가 최적조건보다 길 경우에는 불안전 모드록킹됨을 관찰하였으며, 짧은 경우에는 펄스폭은 증가되며 satellite 펄스가 발생됨을 알 수 있었다. 결합형 모드록킹 색소레이저는 포화흡수체의 펄스폭 축소작용으로 동시 모드록킹보다 2.4 배 짧은 0.65 ps의 극초단 펄스가 발전하였다. 한편 색소레이저의 공진기 길이변화에 따른 펄스폭의 변화, 자체 상관함수의 출력 변화, 스펙트럼 전반치폭 변화 등을 색소 이득곡선으로 설명할 수 있었다. 즉 안정된 subpicosecond 펄스가 발생

되기 위해서는 $|\Delta l| < 2.5 \mu\text{m}$ 범위로 공진기 길이를 일치시켜야 하였는데, 만약 $\Delta l < -5.0 \mu\text{m}$ 이면 모드록킹이 되지 않았다. 또한 최적조건보다 공진기가 길어지면 불안전 모드록킹이 일어나게 되었다. 한편 자체 상관함수의 첨두출력은 색소이득과 펄스폭 두 요인에 의하여 최적조건보다 긴 $\Delta l = 5 \mu\text{m}$ 에서 최대가 되었다.

결합형 모드록킹 색소레이저의 스펙트럼은 최적조건에서 전반치폭이 640 GHz이었으며, time-bandwidth product $\Delta f \Delta \nu = 0.416$ 이었다. 공진기 길이가 최적조건보다 긴 경우에 스펙트럼의 전반치폭은 넓어지며 펄스폭도 넓게 되어 time-bandwidth product가 증가되기 때문에 불안정 모드록킹 됨을 알 수 있었다. 또 색소레이저의 중심파장이 공진기 길이가 최적조건에서 벗어나면 단파장 쪽으로 이동됨을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] CHC New, Rep. Prog. Phys., **46**, 877 (1983).
- [2] T. Norris, T. Sizer II, and G. Mourou, J. Opt. Soc. Am., **B2**, 613 (1985).
- [3] R. L. Fork, B. I. Greene, and C. V. Shank, Appl. Phys. Lett., **38**, 671 (1981).
- [4] D. L. MacFarlane and Lee W. Casperson, Opt. Lett., **14**, 314 (1989).
- [5] W. H. Glenn, M. J. Brienza, and A. J. DeMari, Appl. Phys. Lett., **12**, 54 (1968).
- [6] Christopher P. Ausschnitt, R. K. Jain, and J. P. Heritage, IEEE, J. Quantum Electron, **QE-15**, 912 (1979).
- [7] Martin D. Dawson and Dwight Maxson, Opt. Lett., **13**, 126 (1988).
- [8] 정영봉, 서정철, 김동호, New Physics, **29**, 706 (1989).
- [9] A. M. Johnson and W. M. Simpson, J. Opt. Soc. Am., **B2**, 619 (1985).
- [10] P. G. May, W. Sibbett, and J. R. Taylor, Appl. Phys. **B26**, 179 (1981).
- [11] A. J. Taylor, J. P. Roberts, T. R. Gosnell, and C. S. Lester, Opt. Lett., **14**, 444 (1989).
- [12] KSRI-89-43-IR (한국표준연구소 연구보고서, 1989).
- [13] Z. A. Yasa, Opt. Lett., **8**, 277 (1983).
- [14] M. L. Lambsdorff and J. Kubl, J. Opt. Soc. Am. **B5**, 2311 (1988).
- [15] R. S. Putnam, J. Opt. Soc. Am., **B1**, 771 (1984).
- [16] S. L. Shapiro, "Ultrashort Light Pulses", (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York (1977).
- [17] J. Chesnoy and L. Fini, Opt. Lett., **11**, 635 (1986).

Cavity-Length Detuning Characteristics of a Hybridly Mode-Locked Ultrashort Pulse Dye Laser

Jung-Chul Seo, Young-Boong Chung and Dongho Kim
Spectroscopy & Color Laboratory, Korea Standards Research Institute, Taejeon 305-606

(Received; February 1, 1990)

The cavity-length detuning characteristics of the hybridly mode-locked dye laser have been studied with a collinear autocorrelator. In the optimum condition, the pulse width is 0.65 ps about three times as short as that of the synchronously mode-locked dye laser. As the cavity length is increased, the pulse width becomes broader than that at the optimum cavity length because of the effect of spontaneous emission. Also, the spectrum width becomes broad, therefore the time bandwidth product ($\Delta t \Delta \nu$) is increased. The peak power of autocorrelation is maximum at $\Delta l = 5.0 \mu\text{m}$ longer than the optimum cavity length. On the other hand, as the cavity length is decreased, the pulse width becomes broader and the satellite pulses appear because of the gain recovery. Also the spectrum width becomes narrower than that at the optimum cavity length. In particular, at the mismatched cavity length the center of the lasing spectrum moves to shorter wavelengths.