

선형 공진기 구조 광섬유 레이저에서 Sagnac loop를 이용한 수동형 모우드록킹*

박희갑 · 이경화

전북대학교 물리학과

오왕열 · 이해웅 · 김병운

한국과학기술원 물리학과

(1994년 1월 17일 받음)

광섬유 레이저의 수동형 모우드록킹을 위한 새로운 공진기 구조를 제안하고 이를 실험하였다. 광섬유 레이저 공진기의 한쪽 끝에는 이색성 평면경을 부착하였으며, 다른쪽 끝은 긴길이의 광섬유 Sagnac loop로 이루어진 비선형 loop mirror로 구성하였다. Er 첨가 광섬유 레이저와 Nd 첨가 광섬유 레이저의 각각의 경우에 대한 모우드록킹의 실험결과를 기술하였다.

I. 서 론

회토류 원소가 첨가된 광섬유 레이저는 회토류 물질이 가지는 넓은 파장 범위에 걸친 광방출 특성과 외부환경 요인으로부터의 안정성, 그리고 근래에 매우 향상된 광섬유 제조 기술에 힘입어 광통신과 센서 분야에의 응용연구가 활발히 이루어져 왔다.^[1-3] 특히 모우드록킹된 광섬유 레이저는 광섬유내에서의 자기위상변조(self-phase modulation) 효과를 이용하여 공진기내에서 펄스 압축을 일으킬수 있어서 극초단 펄스의 생성에 이용되고 있으며 미래의 광 솔리톤 전송을 위한 광원으로서의 가능성으로 인하여 기대를 모으고 있다.^[4-7]

본 논문에서는 광섬유 레이저의 수동형 모우드록킹(passive mode locking)을 위한 새로운 공진기 구조를 제안하고 erbium 첨가 광섬유 레이저와 neodymium 첨가 광섬유 레이저 각각의 경우에 대하여 실험한 결과를 보고한다. 종래의 광섬유 레이저의 수동형 모우드록킹에서는 주로 고리형 공진기 구조를 사용해 왔으나^[4-8] 본 논문에서 제안하여 실험한 공진기 구조는 기본적으로 선형구조로서, 공진기를 이루는 두 mirror 중 하나는 Sagnac loop 형태의 긴 길이의 광섬유 loop mirror를 사

용하였다. Loop mirror를 이루는 광섬유가 충분히 긴 경우에 loop를 서로 반대방향으로 진행하는 두 광파간에 비선형적 위상차가 발생하여 loop mirror의 반사율은 입사광의 순간 강도(intensity)에 따라 달라지게 된다. 따라서 이러한 현상을 이용하면 지속적인 능동적 변조 없이도 수동형의 모우드록킹이 가능하다.

본 연구에서의 loop mirror를 이용한 한 펄스압축과 모우드록킹의 기본 개념은 기존의 '8'자 형태의 고리형 광섬유 레이저의 경우^[4,6,8]와 유사하다. 그러나 '8'자 고리형 구조에서 레이저 펄스를 고리내의 한 방향으로만 진행시키기 위해 공진기내에 반드시 광 isolator를 포함 시켜야 하는 것과는 달리, 본 논문의 경우는 고가의 광 isolator를 필요로 하지 않으며 보다 단순하다는 장점이 있다. 그리고 '8'자 고리형 구조에서 레이저의 발진은 loop mirror의 투과광에 의해 이루어지나 본 논문의 레이저 발진은 loop mirror의 반사광이 기여하므로 펄스 압축과 모우드록킹이 가능하기 위해서는 Sagnac loop에 π 의 추가적인 위상 bias를 주어야 한다는 차이가 있다.

II. 공진기 구조와 동작 원리

본 논문에서의 광섬유 레이저의 개념도를 그림 1에 나타내었다. 공진기는 이득매질인 능동광섬유(active fiber)의 한쪽 끝에 이색성 거울(dichroic mirror)이 부착

* 본 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대학 육성과제 학술연구조성비 지원에 의한 연구 결과임.

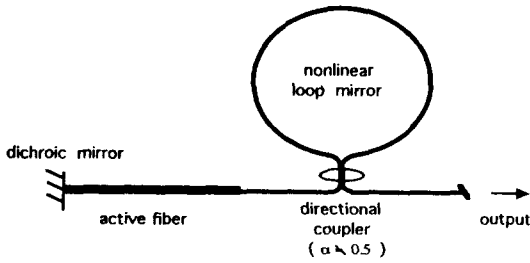


그림 1. 제안된 광섬유 레이저의 개념도.

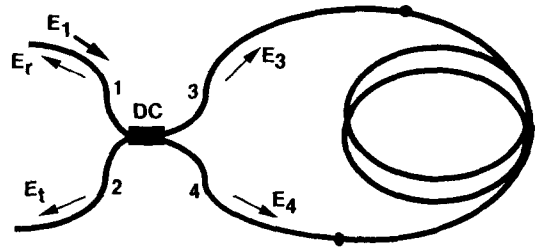


그림 2. 광섬유 loop mirror (DC: directional coupler).

되며 다른쪽 끝은 모우드록킹을 위하여 Sagnac loop 형태의 비선형 loop mirror로 구성된다. Sagnac loop를 이루는 방향성 광섬유 결합기의 광 power 분할비는 50:50이 아닌것을 사용하여 loop의 양방향간에 광 power의 차이가 나도록 한다. 능동광섬유를 여기시키는 펌프광은 이색성 거울을 통하여 능동광섬유에 입사시키거나 또는 공진기내에 별도의 파장 선택성 광섬유 결합기(wavelength-selective fiber coupler)를 통해 입사시킨다.

비선형 loop mirror의 원리는 다음과 같다. 빛이 짧은 길이의 광섬유를 따라 진행할때는 매질의 비선형 효과가 작으므로 무시할 수 있으나 빛의 세기가 세거나 광섬유의 길이가 긴 경우에는 비선형 효과가 축적되어 그 효과가 두드러진다. 유리질 광섬유에서 나타나는 비선형 효과는 3차 현상으로 매질의 굴절율이 빛의 세기(intensity)에 의존한다. 이 경우 매질의 굴절율은 $n = n_0 + n_2 |E|^2$ 으로 표현된다. 여기서 n_0 는 매질의 선형굴절율, n_2 는 self-focusing coefficient, E 는 전기장의 세기를 나타낸다. Loop를 따라 진행하는 빛이 겪는 위상변화에는 선형적 위상변화량 ϕ_0 에 비선형 현상에 의한 위상변화량이 추가되고 이때의 위상은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \phi_0 + \frac{2\pi n_2 L |E|^2}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 L 은 loop의 길이이며 λ 는 진공중에서의 빛의 파장이다.

Sagnac loop를 이루는 방향성 광섬유 결합기의 광 power 분배비율이 $\alpha:1-\alpha$ 이고 $\alpha \neq 0.5$ 인 unbalanced coupler인 경우에 loop를 시계방향으로 진행하는 빛과 반시계방향으로 진행하는 빛의 세기가 서로 달라 loop를 진행하는 동안 양방향으로 진행하는 빛은 서로 다른 크기의 위상변화를 겪게 된다. Loop를 일주한 후 다시 만났을 때의 두 빛의 위상차 $\Delta\phi$ 를 계산해 보자. 그림 2에서 loop mirror에 입사한 빛(전기장 E_1)이 방향성 결합기에서 E_3 와 E_4 로 나뉘어 길이 L 의 loop를 각각 다른 방향으로

진행한 후의 전기장을 각각 E_3' , E_4' 라 하면

$$E_3' = \sqrt{\alpha} E_1 \exp(i\phi_3) \quad (2)$$

$$E_4' = i\sqrt{1-\alpha} E_1 \exp(i\phi_4) \quad (3)$$

로 표현할 수 있으며, ϕ_3 와 ϕ_4 는 (1)식에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_3 = \phi_0 + \frac{2\pi m_2 L \alpha |E_1|^2}{\lambda} \quad (4)$$

$$\phi_4 = \phi_0 + \frac{2\pi m_2 L (1-\alpha) |E_1|^2}{\lambda} + \phi_{NR} \quad (5)$$

여기서 ϕ_{NR} 는 비선형성 이외의 다른 요인에 의한 두 빛간의 비가역적 위상차(nonreciprocal phase shift)를 의미한다. 따라서 loop를 양방향으로 진행한 후 만나는 두 빛간의 위상차 $\Delta\phi$ 는 (4)(5)식으로부터

$$\Delta\phi = \phi_4 - \phi_3 = \Delta\phi_{NL} + \phi_{NR} \quad (6)$$

로 쓸 수 있으며 $\Delta\phi_{NL}$ 은 비선형적 위상차로서

$$\Delta\phi_{NL} = 2\pi m_2 \frac{L}{\lambda} (1-2\alpha) |E_1|^2 \quad (7)$$

이다. 한편 광섬유결합기에서 합해져 입력단으로 다시 나오는 빛(E_r)은

$$E_r = (i\sqrt{1-\alpha} E_3' + -\sqrt{\alpha} E_4') \quad (8)$$

이므로 loop mirror의 반사율은 다음과 같이 계산된다.

$$R = \frac{|E_r|^2}{|E_1|^2} = 2\alpha(1-\alpha)[1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (9)$$

(9)식에 의해 계산된 loop mirror의 반사율을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 반사율은 입사광의 세기 $|E_1|^2$ 에 비례하는 위상차 ϕ_{NL} 에 대해 주기적으로 변화하며, 비

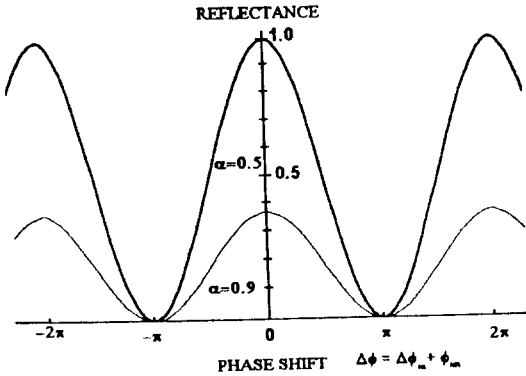


그림 3. 비선형 loop mirror의 반사율.

선형성 이외의 다른 요인에 의한 비가역적 위상차 ϕ_{NR} 은 반사율 곡선상의 위상 bias로 생각할 수 있다. 비가역적 위상 bias는 광섬유내에 불가피하게 존재하는 복굴절에 의해 영향을 받는데^[9] loop내에 편광조절기를 두어 어느 정도 범위내에서 조절이 가능하다. Loop mirror의 반사율은 위상 bias에 따라 달라지는데 $\phi_{NR} = \pi$ 이면 입사광의 세기가 증가함에 따라 반사율도 증가한다. 비가역적 위상 bias가 그림 3의 반사율 곡선상의 양의 경사범위에 위치하는 경우에는 레이저 발진은 낮은 power의 연속출력보다는 큰 peak power의 펄스발진이 선호된다. 또한 펄스의 peak 부분이 강하게 반사되고 wing 부분은 반사가 억제되므로 펄스가 공진기 왕복을 반복하는 동안에 펄스압축이 일어날 수 있다. 따라서 편광조절기를 조절하거나 적당한 회전을 주어 비가역적 위상 bias가 그림 3의 양의 경사 범위에 오도록 해주면 noise spike와 같은 잡음 광펄스로부터 펄스가 압축되며 정상상태의 모우드록킹에 이르도록 유도될 수 있다.

III. Erbium 첨가 광섬유 레이저의 모우드록킹

앞에서 설명한 구조를 기본으로 하고 이득매질로서 길이 9.7 m의 Er 첨가 광섬유를 사용하여 제작된 레이저의 구성도는 그림 4와 같다. 사용된 Er 첨가 광섬유는 Finland의 VTT사에서 제공한 것으로 코어직경 4.5 μm , 코어 클래딩간 굴절율차 0013, LP₁₁ 모우드의 차단파장 1.1 μm , 코어의 조성은 SiO₂에 Al₂O₃가 함께 첨가되었으며 흡수율은 제조사의 규격상 1.53 μm 파장에서 7 dB/m 이상으로 되어 있다. Er 첨가 광섬유의 한쪽 끝에는 1550 nm 파장에 대하여 99% 이상의 반사율을 가지는 이색성 거울을 광섬유 단면에 부착시켰으며, 다른 쪽 끝에는 펌핑을 위하여 파장선택성 광섬유 결합기를 용착접속하였다. 펌핑광원으로서 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 파장 선택성 광섬유 결합기는 514.5 nm 파장의 Ar-ion 레이저광을 Er 첨가 광섬유내로 결합시킨다. 비선형 loop mirror는 1.01 km 길이의 분산천이 광섬유(영분산 파장: 1.55 μm)를 직경 14.8 cm의 spool에 감고 1550 nm 파장대에서 $\alpha=0.9$ 인 방향성 광섬유 결합기의 두 단말과 연결하여 구성하였다. $\alpha=0.9$ 인 경우의 이 loop mirror의 최대반사율은 그림 3으로부터 0.36이 된다.

Loop 내의 입출력단과 loop 외부에 각각 편광조절기를 두어 레이저광의 편광상태와 Sagnac loop의 위상 bias를 조절하였다. 출력광섬유의 단말과 파장 선택성 결합기의 쓰이지 않는 단말로부터의 반사광이 모우드록킹에 악영향을 주므로 각 단말을 단면이 8° 경사지도록 연마된 광코트(FC/APC type)와 용착접속하여 반사광이 공진기 내로 다시 유입되지 못하도록 하였다.

한편 loop내의 입출력단 부분에 약 5 cm 직경의 원통형 PZT에 loop 광섬유를 4 m 정도 감아 위상 변조기로 사용하였다. 이 PZT 위상변조기는 정상적인 수동모우

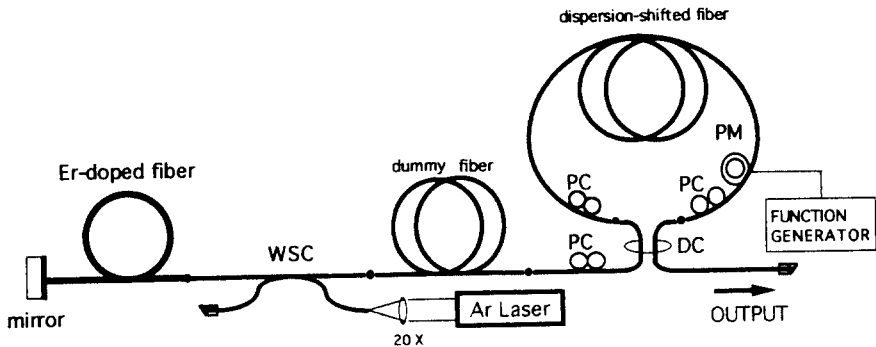
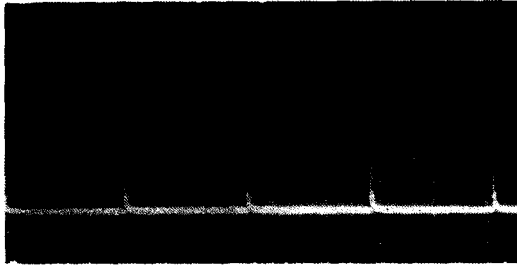
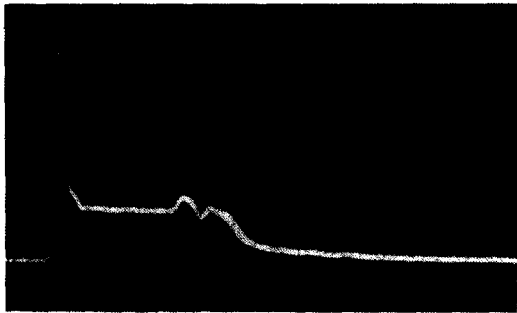


그림 4. Er 첨가 광섬유 레이저의 실험 구성도. (PC: polarization controller, DC: directional coupler, WSC: wave-length-selective coupler, PM: phase modulator, •: splice point).



(a)

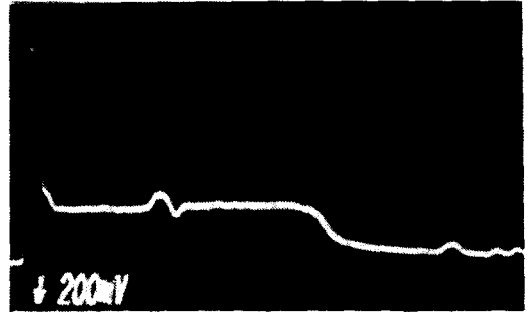


(b)

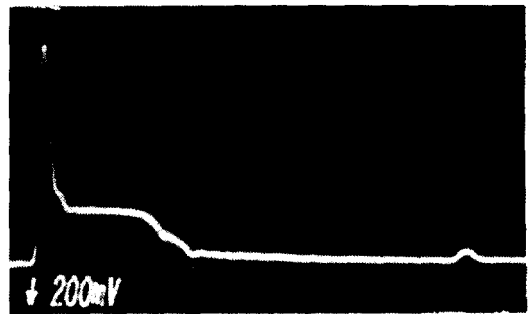
그림 5. Er 첨가 광섬유 레이저의 수동형 모우드록킹에 의한 펄스 출력
(a) 주기적 반복펄스 (5 μ s/div.), (b) 단일 펄스 파형 (20 ns/div.).

드록킹 상태에서 불필요한 것이나 본 실험에서 모우드록킹을 시작시키고자 할때의 초기 변조용으로 사용하였다. 또한 PZT의 공명 주파수(88 kHz)와 모우드록킹 주파수와 거의 일치하도록 공진기의 길이를 맞춰주기 위해 625 m 길이의 dummy 광섬유를 파장 선택성 결합기와 비선형 loop mirror 사이에 음착접속하여 삽입하였다. 이로써 레이저 광이 loop를 포함하여 공진기를 왕복하기까지 광섬유상의 전체길이는 약 2290 m이며 광섬유 매질의 굴절률 $n_0 \cong 1.48$ 을 고려할때 종모우드간 주파수 간격, 즉 모우드록킹 주파수는 약 88.5 kHz에 해당된다.

Ar-ion 레이저로 펌핑하여 광섬유 레이저를 일단 연속 발진시킨후 광섬유 레이저의 평균 출력이 1~2 mW 수준에서 모우드록킹을 시도하였다. PZT 위상 변조기를 88 kHz 부근의 주파수로 구동시키며 편광조절기들을 조절함으로써 모우드록킹을 시작시킬 수 있었다. 그러나 일단 모우드록킹된 펄스대열이 얻어진 후에는 PZT 구동을 하지 않더라도 모우드록킹상태가 스스로 안정적으로 유지됨을 관찰할 수 있었으며 이로써 수동형의 모우드록킹임을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 펌프광의 강도변화에 따른 펄스파형 변화 (펌프광의 강도가 (a)(b)(c)순으로 감소).

오실로스코프 화면에 나타난 모우드록킹된 펄스대열은 그림 5(a)와 같다. 그림 5(a)의 사진으로부터 모우드록킹된 펄스의 주기는 11.3 μ s임을 알 수 있다. 이는 펄스가 레이저 공진기를 왕복하는데 걸리는 시간과 일치한다. 단일 펄스의 파형은 그림 5(b)와 같은 형태로 나타났다. 단일 펄스의 파형을 보면 앞부분의 날카로운 짧은 펄스와 함께 뒷부분에는 펄스폭이 넓고 뒷부분이 평탄한 square 펄스가 함께 나타났다. 앞부분의 펄스에 대하여 별도의

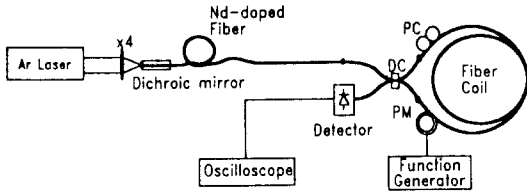


그림 7. Nd 첨가 광섬유 레이저의 실험 구성도 (PC: polarization controller, DC: directional coupler, PM: phase modulator, •: splice point).

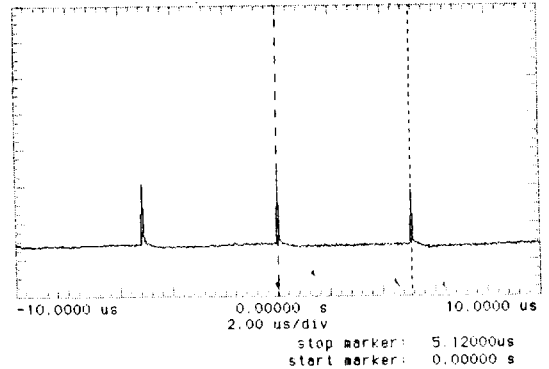
측정을 한 결과, 광검출기 회로에 의해 대역폭이 제한된 상태에서 대략 1.5 ns 정도로 측정되었는데 실제의 폭은 이보다 작을 것으로 추정된다.

그림 5(b)에 나타난 펄스파형에 대하여 펌프광의 세기를 변화시켜 보았으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 펌프광의 세기 변화에 따라 앞부분의 짧은 펄스의 변화는 거의 없었으며 뒷부분의 square 펄스의 변화는 뚜렷하게 관찰되었다. 즉, 펌프광의 세기를 크게 하면 square 펄스의 높이는 변화하지 않고 폭이 늘어났으며 square 펄스의 끝부분이 주로 변화함을 볼 수 있었다. 펌프광의 세기를 줄이면 square 펄스의 높이에는 변화가 없지만 square 펄스의 폭이 끝부분에서부터 서서히 줄어들고 펌프광의 세기를 계속 줄이면 square 펄스 부분이 없어지면서 펄스가 완전히 사라져 버렸다.

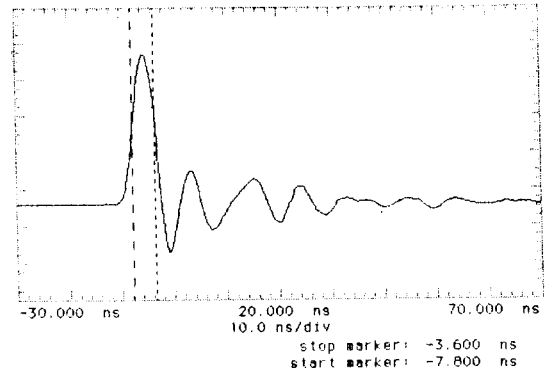
그림 5, 6의 펄스파형에 관한 실험결과는 참고문헌 8에서 보고한 '8'자 고리형 레이저의 경우와 본질적으로 동일한 결과이다. 이는 비선형 loop mirror의 구성이 두 경우가 거의 비슷하고, 본 논문의 경우에서 이색성 거울이 부착된 Er 광섬유의 끝단을 레이저의 출력단으로 개환시키면 '8'자 고리 구조와 위상학(topology)적으로 같아지기 때문인 것으로 보인다. 따라서 펄스파형에 관해서는 참고문헌 8에서와 동일한 논의가 가능할 것으로 생각되어 이에 관한 논의는 본 논문에서 생략하기로 한다.

IV. Neodymium첨가 광섬유 레이저의 모우드록킹

앞에서의 Er 첨가 광섬유 레이저와는 별도의 실험장치로서 Nd 첨가 광섬유 레이저를 구성하여 모우드록킹 실험을 하였다. 그림 7은 실험의 개략적인 장치도이다. 실험에서 사용된 Nd 첨가 광섬유는 BTRL에서 제공한 것으로 길이가 약 10 m이다. Er레이저의 경우와 마찬가지로 Nd가 첨가된 광섬유의 한쪽 끝에는 이색성 거울을



(a)



(b)

그림 8. Nd 첨가 광섬유 레이저의 수동형 모우드록킹에 의한 펄스 출력.

(a) 주기적 반복펄스 (2 μ s/div.), (b) 단일 펄스 파형 (10 ns/div.).

붙이고 다른 한쪽에는 loop mirror를 연결하여 광섬유를 구성하였다. Ar-ion 레이저광을 이색성 거울을 통해서 입사시켜 Nd첨가 광섬유를 여기시켰다. 광섬유 loop의 길이는 약 1 km이며 공진기 전체의 왕복 길이는 약 1045 m였다. loop mirror에 장치된 위상변조기를 모우드록킹 주파수(194 kHz) 부근에서 구동하면서 편광조절기를 조절하거나 loop mirror에 적당한 회전을 주면 모우드록킹된 펄스가 발생되었다. Loop에 회전을 주면 Sagnac loop의 위상 bias가 변화하므로 어느 순간에 최적의 위상 bias 를 얻을 수 있으며 이로부터 모우드록킹된 펄스가 시작될 수 있다. 발생된 이 펄스는 위상변조기를 꺼주어도 계속 유지되는 수동형 모우드록킹된 펄스이다. 위상변조기를 끈 상태에서 편광조절기를 어떤 적절한 상태에 맞추어 놓은 후 loop 광섬유를 만지는 등의 자극을 가하면 모우드록킹이 그러한 perturbation으로부터

시작되는 경우를 관찰할 수 있었다.

그림 8(a)은 수동형 모우드록킹된 펄스이다. 펄스의 반복율은 공진기의 왕복주기에 해당하는 194 kHz이다. 그림 8(b)는 모우드록킹된 단일 펄스의 모양을 본 것이다. 실험에서 측정된 펄스의 폭은 4.2 ns 였으나 이 값은 측정기의 측정한계에 걸려있는 값이기 때문에 실제의 펄스 폭은 이보다 짧은 것으로 예상하고 있다.

V. 결 론

Sagnac loop를 이용하는 선형구조의 광섬유 레이저 공진기 방식을 제안하고 Er 첨가 광섬유와 Nd 첨가 광섬유를 이득매질로 하여 모우드록킹 실험을 하였다. 긴 길이의 Sagnac loop가 입사광의 강도에 의존하는 반사율을 가지는 비선형 mirror로서 역할을 함으로써 안정적인 모우드록킹이 이루어졌다. 모우드록킹의 self-starting은 이루어지지 않았으나, loop 광섬유에 모우드록킹 주파수 부근의 위상변조를 가하면서 편광조절기를 조절하거나 loop에 약간의 회전을 주어 Sagnac loop의 위상 bias 를 변화시킴으로써 모우드록킹을 시작시킬 수 있었다. 모우드록킹이 일단 시작된 후에는 위상변조나 회전을 가하지 않더라도 안정적으로 모우드록킹상태가 유지되었다. 이는 self-starting이 가능한 '8'자 고리형 레이저의 경우와 비교하여 π 의 추가적인 위상 bias가 필요하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 Er 광섬유 레이저와 Nd 광섬유 레이저의 경우에 서로 다른 펄스형태가 나타났다. Er의 경우에는 이미 보고된 바 있는 '8'자 고리형의 경우^[8]와 유사한 파형, 즉, 짧고 강한 펄스에 이은 긴폭의 평탄한 square 펄스형태가 나타났으며 Nd의

경우에는 이와 같은 현상이 관찰되지 않았다. 이는 본 실험에서의 Er 레이저와 Nd 레이저의 발진 중심파장이 각각 1.56 μm 와 1.06 μm 으로서, loop 광섬유 (영분산 파장 1.55 μm)에 대하여 각기 음의 군속도 분산과 양의 군속도 분산을 가지는 차이에 기인하는 것으로 보이나 정확한 펄스 파형을 측정할수 있다면 보다 상세한 원인규명이 가능할 것이며 이에 관한 분석 연구가 현재 진행중에 있다.

참 고 문 헌

[1] P. Urquhart, IEE Proc. **135**, 385(1988).
 [2] K. A. Fesler, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, Opt. Lett. **15**, 1321(1990).
 [3] H. K. Kim, S. K. Kim, H. G. Park, and B. Y. Kim, Opt. Lett. **18**, 317(1993).
 [4] D. J. Richardson, V. V. Afanasjev, A. B. Grudinin, and D. N. Payne, Opt. Lett. **17**, 1596(1992).
 [5] V. J. Matsas, W. H. Loh, and D. J. Richardson, IEEE Photonics Technol. Lett. **5**, 492(1993).
 [6] D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, V. J. Matsas, and M. W. Phillips, Electron. Lett. **27**, 1451(1991).
 [7] D. V. Noske, N. Pandit, and J. R. Taylor, Electron. Lett. **28**, 2185(1992).
 [8] 박희갑, 박경현, 이상수, 주무정, 심창섭, 김병윤, 한국광학회지 **4**, 330(1993).
 [9] R. Ulrich, "Polarization and depolarization in the fiber-optic gyroscope", in "Fiber-Optic Rotation Sensors" Springer-Verlag series in *Optical Sciences* 32(1982).

Passive Mode Locking of Linear Cavity Fiber Laser with a Sagnac Loop

Hee Gap Park and Kyoung Hwa Lee

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

Wang Yuhl Oh, Hai Woong Lee, and Byung Yoon Kim

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: January 17, 1994)

A new cavity configuration for passive mode locking of fiber laser is proposed and demonstrated. It consists of a dichroic mirror at one end of the cavity, and a nonlinear loop mirror, which is a Sagnac loop, at the other end. The experimental observations are described for both Er-doped fiber laser and Nd-doped fiber laser.