

콜레스테릭 액정 폴리머 박막을 이용한 광섬유 원편광 거울 제작 및 이를 이용한 모드 록킹 된 광섬유 레이저

장도일 · 김경현

한국전자통신연구원, 원천기술연구본부

김인선 · 김성태

LG전선(주), 광전자재료연구실

(1999년 11월 17일 받음, 2000년 3월 2일 수정본 받음)

콜레스테릭 액정 폴리머 박막을 이용한 새로운 개념의 광섬유 원편광 거울을 제작하고 그 특성을 분석하였다. 콜레스테릭 액정 거울의 광학적 특성을 보여주는 Jones Matrix를 유도하고 실험을 통하여 검증하였다. 제작된 광섬유 원편광 거울은 선형 광섬유 레이저 공진기에서 공간적 홀버닝을 제거하는데 사용 될 수 있으며, 광섬유 내에서의 비선형 편광 변화 효과를 이용한 모드록킹 동작을 얻을 수 있다. 실험을 통해 얻은 모드 록킹 된 레이저의 펄스 폭은 630 fs로 측정 되었다.

I. 서 론

콜레스테릭 액정(cholesteric liquid crystal, CLC)은 액정상 의 하나로서 그 조성은 네마틱(nematic) 액정과 카이랄 중심(chiral center)을 가지는 액정의 조합으로 볼 수 있다. CLC는 층의 구조를 갖는데 각 층에서 액정들은 일반 네마틱의 규칙성을 보인다. 이러한 구조를 지닌 CLC는 선택적 반사(selective reflection)라는 고유의 광학적 특성을 지니며, 이 성질을 이용하면 원편광 거울을 구현할 수 있다.^[1] 기존의 1/4 파장판과 선형 편광기 그리고 거울로 이루어진 원편광 거울에 비하여, 액정을 이용한 원편광 거울은 단일 부품으로 구현되기 때문에, 정렬하기가 매우 편하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 특히 CLC 거울은 원편광이 반사될 때 편광 방향을 유지시키는 일반 거울과는 달리 반사되는 원편광의 회전 방향을 반대방향으로 변화 시키는 특성이 있다(실험실 좌표계에서 관측할 경우). 이와 같은 특성은 액정 표시 장치(liquid crystal display)의 반사형 편광기로 사용하거나^[2] 선형 레이저 공진기 내의 공간적 홀 버닝을 제거하기 위하여^[3] 효과적으로 사용 될 수 있다.

본 논문에서는 CLC를 이용한 새로운 개념의 광섬유 액정 원편광 거울의 제작과 특성 분석, 그리고 이를 이용한 모드 록킹 된 광섬유 레이저에 대하여 기술한다. 우선 CLC 액정 원 편광 거울의 광학적 특성을 설명하기 위하여 Jones Matrix를 유도하고 이를 실험적으로 검증하기 위한 방법을 제안하며, 1530 nm 파장대의 어븀첨가 광섬유(EDF, erbium doped fiber) 레이저 시스템에 사용하기 위하여 제작된 CLC 액정 폴리머 박막의 특성을 살펴본다. 또한 이를 이용하여 공진기 구조를 단순화 하고 모드 록킹 동작에 필요한 펌프광의 문턱 세기를 낮출 수 있는 광섬유 레이저를 구성한 후, 실험 결과를 기술한다.

II. CLC 액정의 Jones Matrix 유도

CLC 액정의 분자 배열은 그림 1과 같다. 미시적으로 볼 때 각 층은 네마틱 액정과 같은 구조를 나타내나, 층을 이루는 분자가 광활성(optical active)이므로 층마다 작은 각도(10°-30°)로 회전하게 되어 전체적으로는 방향자(director)가 광축을 따라 나선을 그리는 구조를 가진다. 이와같은 구조의 CLC 액정은 파장과 편광에 따라 선택적 반사를 일으킨다.^[1]

그림 2에서는 좌선 CLC 액정의 광학적 특성을 보여준다. CLC 액정의 광학적 특성은 액정이 좌선형(우선형)으로 제작 되었을 경우, 입사하는 광의 파장이 CLC 액정의 피치(pitch)와 일치 할 때, 우원편광(좌원편광) 빛은 모두 투과시키고 좌 원편광(우원편광) 빛은 모두 반사 시키게 된다(그림 2a). 이와 같이 CLC 액정은 그 피치에 해당하는 파장에 대한 원편광기의 역할을 할 수 있으며, 반사되는 편광에 대해서는 일반 거울과는 다른 특이한 반사 특성을 보인다.

실험실 좌표계에서 관측할 경우, 일반거울에 원편광 된 빛이 반사할 때는 원편광 방향이 변하지 않지만(b), CLC에서 반사 될 경우 원편광 방향이 반대로 변하는 것으로 알려져 있다(a).

먼저 액정을 투과하는 광에 대한 특성을 살펴보면 좌선(우 선) CLC은 우원(좌원) 편광된 광만을 투과시키게 되므로, 우(좌) 원 편광기로서의 역할을 하게 된다. 이러한 원 편광기의 Jones Matrix는 잘 알려져 있으며,^[4] 이는 아래와 같이 주어 진다.

$$\text{투과하는 광에 대한 LHCLC의 Jones matrix : } \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{투과하는 광에 대한 RHCLC의 Jones matrix : } \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 LHCLC(left handed cholesteric liquid crystal)은

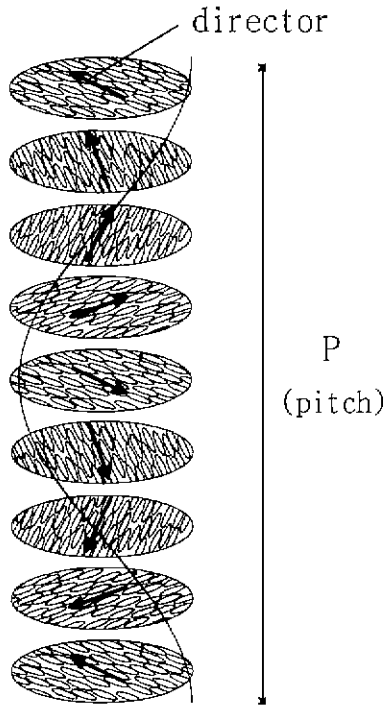


그림 1. 콜레스테릭 액정의 구조.

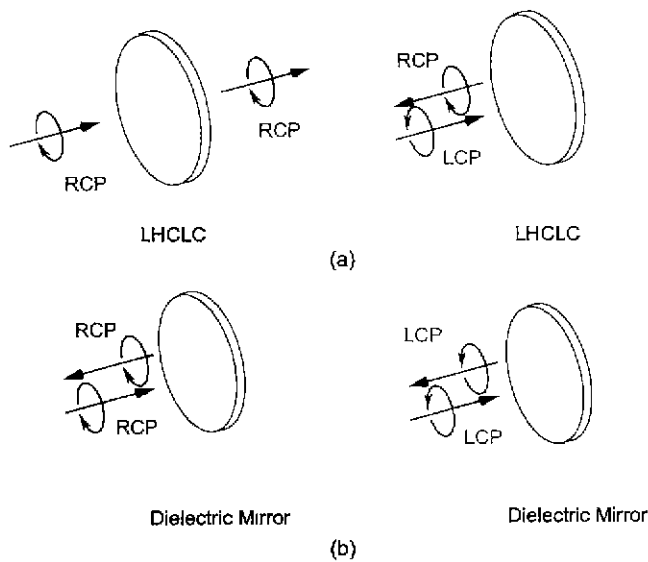


그림 2. 콜레스테릭 액정과 dielectric mirror의 광학적 특성 비교
좌선 콜레스테릭 액정, (b) dielectric mirror (그림에서는 lab frame의 원편광을 나타냄)

LHCLC: Left Handed Cholesteric Liquid Crystal
RCP: Right Circular Polarization
LCP: Left Circular Polarization

좌선으로 제작된 CLC을, RHCLC(right handed cholesteric liquid crystal)은 우선으로 제작된 CLC을 의미한다.

다음으로 반사하는 광에 대한 특성을 살펴보기로 하자. 좌선(우선) CLC은 좌원(우원) 편광된 광만을 선택하여 반사시키며, 실험실 좌표계에서 관측할 경우 반사하는 광의 편광이 우원(좌원)으로 바뀌게 된다. 이와 같은 CLC의 광학적 특성은 아

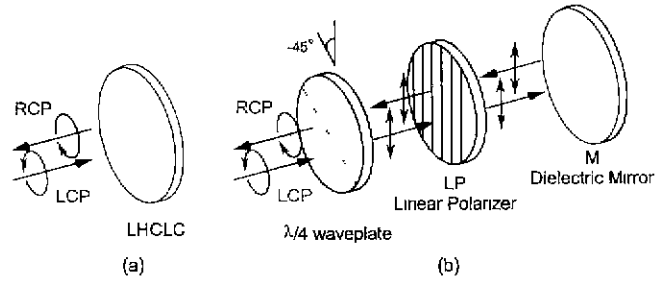


그림 3. 좌선 원편광 거울을 구현하기 위한 CLC와 유전체 거울의 구조 비교 (a) 좌선 콜레스테릭 액정, (b) 1/4 파장판과 선편광기, 유전체 거울 조합.

래의 그림 3과 같이 1/4 파장판과 선편광기 그리고 일반 거울로 이루어진 조합과 같다.

그림 3의 (b)의 조합에 빛이 입사되어 반사하는 경우 Jones matrix 를 표시하면 아래와 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}_{\lambda/4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{M} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}_{\lambda/4} \quad (3)$$

이를 계산하여 이와 동일한 광학적 반사 특성을 지닌 좌선 CLC 거울의 Jones matrix를 유도하면 아래와 같다.

$$LHCLC = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}_{LHCLC} \quad (4)$$

마찬가지 방식으로 우선 CLC 거울도 유도할 수 있으며 그 결과는 아래와 같다.

$$RHCLC = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix}_{RHCLC} \quad (5)$$

III. 유도된 CLC의 Jones Matrix 검증 방법

유도된 CLC의 Jones Matrix를 검증하기 위하여 그림 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 사용된 광원은 Tunable LD를 1530 nm 파장으로 조절하여 사용하였으며, 광섬유에서 나오는 출력을 광섬유 집속기(fiber collimator)를 사용하여 집속하였으며 이 빛은 선속 분할기(BS, beam splitter)를 지나 선형 편광기 LP를 거쳐 1/4 파장판을 지나 액정에서 반사하여 다시 1/4 파장판과 선형 편광기를 지나오게 된다. 이 때 1/4 파장판의 빠른축을 조절하게 되면, 액정에 입사되는 광의 편광

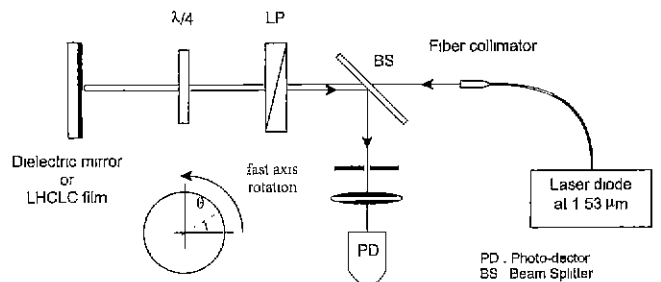


그림 4. 콜레스테릭 액정 편광 특성을 검증하기 위한 실험장치.

상태가 조절되며 반사되어 1/4 파장판을 지나온 빛은 액정의 특성에 따라 편광이 변하게 되어 선형 편광기를 통과하는 빛의 세기가 변하게 되므로 광검출기(PD)에 회전각도에 따른 빛의 세기가 검출된다.

먼저 결과를 simulation 하기 위해서 먼저 입의의 각도에 따른 1/4 파장판의 Jones matrix $\begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix}$ 를 유도하면

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}_R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}_{\lambda/4} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}_{R^{-1}} \\ &= \begin{bmatrix} \cos^2\theta + i\sin^2\theta & \cos\theta\sin\theta(1-i) \\ \cos\theta\sin\theta(1-i) & \sin^2\theta + i\cos^2\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

이되며 유전체거울(dielectric mirror)의 경우 광검출기에 도달하는 빛의 Jones matrix는

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \cdot \begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_M \cdot \begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \cdot \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \cos 2\theta \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고, 빛의 세기는 $|\cos 2\theta|^2$ 이 된다.

LHCLC의 경우에는

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \cdot \begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}_{LHCLC} \cdot \begin{bmatrix} \lambda/4(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{LP} \\ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1-\sin 2\theta) \cdot (\cos 2\theta - i\sin 2\theta) & \cos 2\theta \cdot e^{2i\theta} \\ \cos 2\theta \cdot e^{2i\theta} & (1+\sin 2\theta) \cdot (\cos 2\theta - i\sin 2\theta) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} &= (1-\sin 2\theta) \cdot (\cos 2\theta - i\sin 2\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

이 되어 빛의 세기는

$$\left| \frac{1}{2} (1-\sin 2\theta) \cdot (\cos 2\theta - i\sin 2\theta) \right|^2 = \frac{1}{4} (1-\sin 2\theta)^2 \quad (9)$$

이 된다.

IV. 광섬유 CLC 원편광 거울의 제작 및 특성

그림 5는 제작된 광섬유 CLC 원편광 거울의 형태와 반사 특성을 백색광을 이용하여 OSA(optical spectrum analyser: HP 70951A)로 측정한 결과를 보여준다. 원편광 거울을 제작하기 위해서 Walker Chemie 사의 좌선 CLC 실리콘을 사용하였다. EDF(erbium doped fiber)를 사용한 레이저를 구성하기 위해 E. Merck 사의 네마틱 액정(BL001)을 첨가하여 1530 nm 파장대에서 선택적 반사를 일으키도록 혼합비를 조절하였다. 이와 같은 혼합물을 유리 기판위에 코팅한 후 UV를 사용하여 폴리머 박막 형태로 변형시킨 후, 제작된 박막을 광학 접착제를 사용하여 광섬유 FC 커넥터의 끝에 부착하여 광섬유 원편광 거울을 완성하였다. 폴리머 박막 형태의 액정은 기

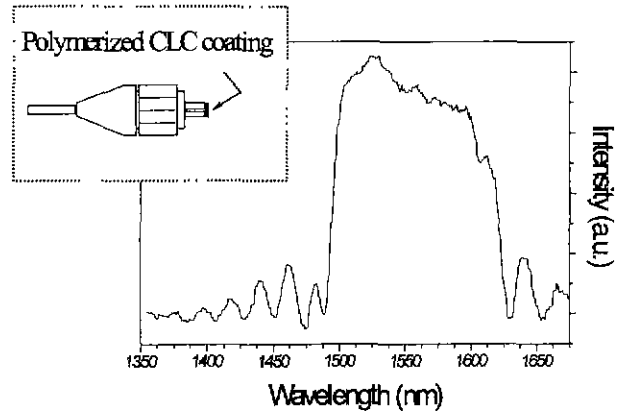


그림 5. 광섬유 콜레스테릭 액정 원편광 거울의 도면 및 파장에 따른 반사 특성

존의 액정에 비해서 구조적, 열적 특성이 우수하다는 장점이 있다. 측정된 파장에 대한 반사 선폭은 220 nm 정도로 극초단 펄스의 동작에 충분함을 알 수 있다. 반사 스펙트럼이 파장에 걸쳐 일정하지 않은 이유는 제작된 액정의 배열 정렬이 정확히 이루어 지지 않음에 기인한다.

그림 6에서는 유전체 코팅된 일반 거울과 제작된 폴리머

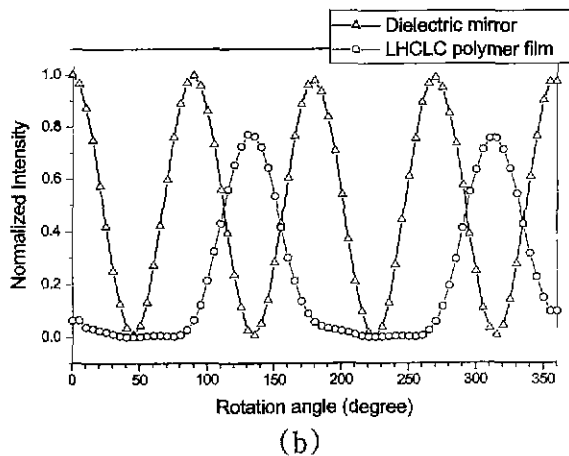
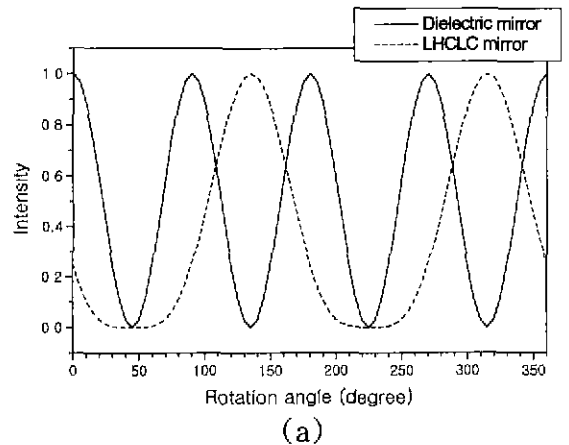


그림 6. 유전체 거울과 좌선 콜레스테릭 액정 특성의 (a) 이론치와 (b) 실험 데이터.

CLC 박막을 그림 4의 장치를 통해서 측정 한 후 얻어진 실험 결과를 이론치와 비교 하였다. 실험치(b)와 이론치(a)가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 여기서 유전체 거울의 경우와 CLC 거울의 경우 반사가 최대치를 보이는 각도가 서로 45도가량 어긋나는 것은 각각의 거울에서 반사되는 빛의 원편광 상태가 서로 반대임을 보여준다. 실험치에 있어서 CLC의 경우 반사되는 빛의 세기가 유전체 거울에 비해서 낮은 것은 제작된 CLC 박막에서 빛의 손실이 발생함을 의미한다. 제작된 액정의 반사율도 박막 전체에 걸쳐서 일정하지 않음이 발견 되었으며 좌원 편광에 대해서도 아직까지는 85% 정도의 반사율을 얻을 수 있었다. 차후 1530 nm 파장대의 CLC 편광 거울의 제작 조건의 최적화가 필요함을 알 수 있다.

V. CLC 원편광기를 이용한 광섬유 모드 록킹 된 레이저

광섬유 레이저에서 발생된 초단 펄스는 짧은 펄스폭을 갖고 있기 때문에 초고속 광통신에 이용할 수 있는 광원중의 하나이다. 이와 같은 초단 펄스를 발생시키기 위하여 가장 효과적으로 사용되는 방법은 모드 록킹 동작이며 종래의 광섬유 레이저에서의 모드 록킹 된 광섬유 레이저는 8자형 구조나^{15,16} 고리형 구조¹⁷에서 대부분 이루어 졌다. 그러나 이 구조는 구조가 복잡하고 광 아이솔레이터와 같이 공진기 내에서 비교적 손실이 크며, 또한 고가인 광 부품을 필요로 하므로 효율성과 경제성이 떨어진다. 선형 구조의 경우 광 아이솔레이터를 필요로 하지는 않지만 정상파 형성에 의한 공간적 홀 버닝에 의하여 모드 록킹 동작을 발전시키기 위한 펌프광의 세기가 상대적으로 높은 단점이 있다.¹⁸ 이번 장에서는 CLC 편광기 거울을 사용하여 공진기 구조를 단순화 하고 모드 록킹 동작에 필요한 펌프광의 문턱 세기를 낮출 수 있는 초단 펄스를 생성할 수 있는 광섬유 레이저의 동작 원리와 특성을 기술한다.

CLC 원편광기를 이용한 모드 록킹 된 광섬유 레이저의 구조는 그림 7에서 설명되어 있다. 15 m의 EDF를 이득 매질로 사용하였으며, 50 m의 단일모드 광섬유(SMF, single mode fiber)를 EDF의 분산을 보상하기 위하여 사용하였고 270 m의 분산천이 광섬유(DSF, dispersion shifted fiber)를 사용하였다. 편광 조절기, PC1은 EDF와 콜레스테릭 거울 사이의 광섬유에서 야기되는 복굴절을 보상하기 위하여 사용되었으며, PC2는 공진기 내의 편광을 추가로 조절하기 위하여 사용하였다. 980/1550 nm 파장분할기는 펌프용 레이저 다이오드에서 발생하는 펌프광을 공진기에 주입시키기 위하여 사용하였다. 레이저 출력경으로는 Sagnac loop 형태의 광섬유 결합기를 사용하였으며 반사율은 90% 이상이 됨을 확인하였

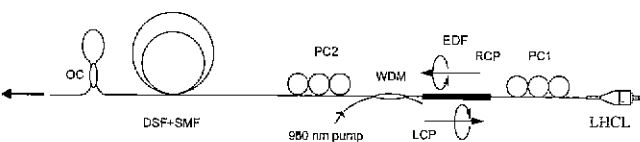


그림 7. 광섬유 원편광 거울을 사용한 광섬유 모드록킹 레이저의 구성도

다. 레이저 공진기 거울로는 제작된 좌선형 CLC를 사용한 광섬유 원편광 거울을 사용하였다.

이와 같은 CLC 원편광 거울을 사용한 모드 록킹 된 레이저의 구조는 CLC의 선택적 반사(selective reflection)의 고유 광학적 특성을 이용한다. 액정 셀을 좌선형으로 제작하였기 때문에 액정셀의 피치에 해당하는 파장의 빛이 입사될 경우 좌선 원편광의 빛을 반사시키고 우선 원 편광의 빛을 투과시킨다. 따라서 이득 매질에서 발생한 광은 CLC 편광 거울에 의하여 우원편광 상태로 변하여 반사된다. 이 빛은 편광 조절기 PC2에 의하여 타원 편광으로 편광 상태가 변하게 되며, 다시 SMF와 DSF 에 의하여 선형 및 비선형 복굴절을 경험하게 되어 편광상태가 추가로 변한다. 이렇게 진행된 광은 레이저 출력경, OC에 의하여 일부는 투과되어 출력되며, 일부는 반사되어 다시 SMF와 DSF 에서 다시 복굴절을 경험하고 편광 조절기 PC2를 지나 편광이 변화되어 이득 매질에서 재 증폭된다. 이 과정에서 빛의 편광상태는 SMF와 DSF에서의 선형 및 비선형 복굴절과 편광 조절기, PC2에 의하여 변하게 되기 때문에 편광 조절기, PC2를 사용하면 CLC 편광 거울에 재 입사하는 편광 상태를 조절할 수 있다. 액정 편광 거울에 입사하는 빛의 편광 상태를 좌선 원편광 상태로 조절하면 이 빛은 전반사 한다. 앞서 설명한 바와 같이 일반적인 유전체 거울은 좌선 원편광의 빛이 반사 할 경우 원편광 방향이 유지되면서 반사되지만, CLC의 경우에는 반사되는 원편광의 방향이 반대로 바뀌기 때문에 반사된 빛은 우선으로 원편광되어 있다. 즉 좌선형으로 제작된 CLC에 입사하는 좌선 원편광의 빛은 반사하여 방향이 반대인 우선 원편광의 빛으로 진행한다. 따라서 레이저가 발진하기 위한 공진기의 최적 조건은 편광 조절기를 조절하여 좌선으로 CLC 편광 거울에 입사하는 빛의 편광 상태를 좌선 원편광 상태로 조절하는 것이다.

광섬유 레이저에서 수동형 모드 록킹이 일어나는 최적의 조건은 연속파(continuous wave)에 대하여서는 원편광 거울의 반사율이 0이 되어야 하고, 펄스에 대해서는 최대의 반사율을 갖도록 해야한다. 펄스의 경우 빛의 세기가 크기 때문에 분산천이 광섬유 내에서 비선형 복굴절을 많이 경험하게 되어, 연속파와는 다른 편광 상태로 진행하게 된다. 따라서 편광 조절기 PC2를 펄스의 경우에 대하여 최대의 반사율을 지니도록 조절하면 수동형 모드록킹 동작이 일어나게 된다. 이 경우 빛이 한 주기 동안 진행할 때, 발진되는 빛의 편광 상태는 한 주기 진행전과 한 주기 돌고 난 후가 동일하여야 한다는 레이저 공진 조건을 잘 만족한다. 따라서 초단 펄스가 발진되는 동안 레이저 공진기의 한 주기동안 편광 상태가 잘 맞아 안정된 펄스 신호가 나옴을 기대 할 수 있다. CLC 편광 거울의 파장에 따른 선폭은 매우 넓게 제작할 수 있기 때문에 극 초단파의 수동형 모드 록킹 동작에 적합하다.

여기서 주의하여야 할 점은 CLC 편광 거울의 고유의 반사 특성에 의하여 이득침가 광섬유의 양방향으로 진행되는 빛의 원편광 상태가 서로 수직이라는 점이다. 서로 수직인 두 광은 간섭을 할 수 없기 때문에 이득 매질에 두 파의 간섭에 의한 정상파가 형성이 되지 않으며 따라서 선형 공진기에서 문제시되었던 공간적 홀 버닝이 일어나지 않는다는 장점이 있다.

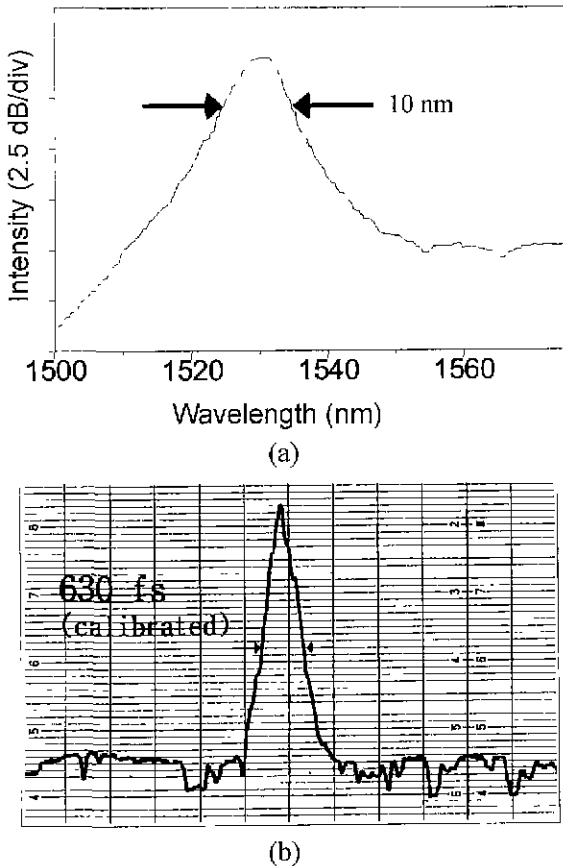


그림 8 모드록킹 펄스들의 (a) 스펙트럼과 자기 상관계를 이용한 (b) 펄스 폭 측정.

편광 조절기 PC1과 PC2를 조절하여 광섬유 원편광 거울을 사용한 수동형 모드 록킹 동작을 발진 시킬 수 있다. 측정된 출력 스펙트럼(a)과 자기 상관계를 통해 얻은 펄스의 형태(b)가 그림 8에 나타났다. 스펙트럼의 선포는 10 nm이며 가우시안 형태의 펄스 모양을 가정한 펄스의 폭은 630 fsec이다. Time-bandwidth product의 값은 0.82로 아직까지는 완전히 transform limited 되어 있지 않기 때문에 차후 공진기의 분산 등을 최적화 할 필요가 있다. 이와 같은 수동형 모드록킹 동작을 얻기 위해 필요한 펌프광원의 세기는 980 nm 레이저 다이오드의 경우 약 50 mW가 필요했으며, 일단 동작이 되고나면 펌프 광원을 10 mW 정도로 낮추어도 모드록킹 동작을 유지 할 수 있었다. 펄스들의 반복률은 레이저 공진기의 왕복

시간에 해당하는 1.24 MHz로 측정 되었다. 이와 같은 구조에서 레이저 공진기에 광변조기, PM를 삽입하면 수동형과 능동형이 결합되어 높은 반복율을 갖은 안정된 펄스신호의 모드 록킹 된 광 펄스가 발진될 수 있다.^[9]

VI. 결 론

본 논문에서는 광섬유 광부품으로서의 CLC의 응용 가능성을 살펴보았다. 폴리머 박막 형태의 CLC를 사용하여 새로운 개념의 광섬유 원편광 거울을 구현하였으며, 이와 같은 광부품의 특성을 효과적으로 측정하기 위한 Jones matrix 표시 방법과 실험 결과를 기술하였다. 이러한 Jones matrix 표시 방법은 차 후 레이저 공진기 내에서의 편광 상태를 분석하기 위한 유용한 도구로 사용될 수 있다. 광섬유 원편광 거울은 광섬유 레이저에 유용하게 사용 될 수 있음을 알 수 있었다. 이 부품은 선형 공진기 구조내에서 공간적 흠뻑을 제거하는데 사용할 수 있기 때문에 레이저의 발진 모드의 수를 줄일 수 있다. 또한 원편광 거울로서의 기능은 광섬유 내에서의 비선형 편광 변화 효과를 이용한 수동형으로 모드 록킹 된 레이저 발진에 응용 될 수도 있다.

참고문헌

- [1] Jae-Cheul Lee, and Stephen D. Jacobs. *J. Appl. Phys.* **68**, 6523 (1990).
- [2] Ming Xu, Fudong Xu, and Deng-Ke Yang. *J. Appl. Phys.* **83**, 1938 (1998).
- [3] Jae-Cheul Lee, S. D. Jacobs, T. Gunderman, A. Schmid, T. J. Kessler and M. D. Skeldon, *Opt. Lett.* **15**, 959 (1990).
- [4] Grant R. Fowles, *Introduction to modern optics* (HOLT, RINEHART AND WINSTON, INC, 1975) Chapter 2.
- [5] D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, V. Matsas, M., and W. Phillips, *Elec. Lett.* **27**, 542, (1991).
- [6] K. H. Kim M. Y. Jeon, S. Y. Park, H. K. Lee, and E. H. Lee, *ETRI Journal* **18**, 1 (1996).
- [7] H. A. Haus. E. P. Ippen, K., and Tamura, *IEEE J. Quant. Elec.* **30**, 200 (1994).
- [8] V. J. Matsas. W. H. Loh, and D. J. Richardson, *IEEE Photonics Tech. Lett.* **5**, 492 (1993).
- [9] Do Il Chang, Ho Young Kim, Min Young Jeon. Hak Kyu Lee, Dong Seong Lim. Kyong Hon, Insun Kim, and Sung Tae Kim, *Opt. Comm.* **162**, 251 (1999).

Fiber optic circular polarizing mirror using polymer cholesteric liquid crystal and it's application in the mode-locked fiber laser

Do Il Chang and Kyong Hon Kim

*Telecommunication Basic Research Lab., Electronics and Telecommunication
Research Institute, Taejeon 305-600, Korea*

Insun Kim and Sung Tae Kim

Optoelectronic Material Dept. Research Lab. LG Cable & Machinery Ltd., Kyungki 431-080, Korea

(Received November 17, 1999, Revised manuscript received March 2, 2000)

We propose a novel in-line fiber optic circular polarizing mirror utilizing cholesteric liquid crystal (CLC) polymer film for the fiber laser applications. Jones matrix representation of this device has been derived and verified experimentally. In a Fabry-Perot cavity configuration, a CLC fiber optic mirror has been used to achieve longitudinal mode suppression as well as to obtain passively mode-locked laser operations with 630 fs laser pulses via nonlinear polarization evolution.