《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji Volume 9, Number 6, December 1998
(Journal of the Optical Society of Korea - Korean Edition)

# 내부 반사경 543 nm 헬륨 네온 레이저의 편광특성과 단일모드 동작

**김경찬**
계명대학교 물리학과

**서호성 · 엄태봉**
한국표준과학연구원 역학연구부 길이그룹

(1998년 7월 29일 받음, 1998년 11월 12일 수정본 받음)

단일모드 출력을 얻기 위해, 횡자장을 걸었을 때와 걸지 않았을 때 내부 반사경 543 nm 헬륨 네온 레이저의 편광특성을 조사하였다. 레이저 출력이 선편광일 때 두 개의 직교하는 편광성분을 측정하였다. 자장을 가하지 않고 레이저 주파수를 이득곡선상에서 주사하였을 경우, 편광 불안정이 크게 발생하였다. 레이저 고유편광에 대하여 35° 방향으로 500 gauss의 횡자장을 가하였을 때 편광 불안정을 억제할 수 있었다. 같은 조건에서 543 nm 헬륨 네온 레이저 주파수를 요오드 분자의 포화흡수분광선에 안정화시키는데 필요한 880 MHz 대역폭 안에서 안정된 단일모드 동작을 얻을 수 있었다.

## I. 서 론

543.5 nm 청록색 헬륨 네온 레이저(이하 "543 nm 레이저"로 표기)는 헬륨 네온 레이저의 레이저 매질인 Ne 원자의 여러 에너지 준위 사이의 약 160개 천이 중에[1] $3S_2$-$2P_{10}$($j=1\rightarrow j=1$) 천이에서 발진된다. 543 nm 레이저의 경우, 레이저 이득이 632.8 nm 적색 헬륨 네온 레이저(이하 "633 nm 레이저"로 표기) 이득의 1/20로 매우 작고[2,3] 또한 짧은 파장으로 인한 심한 산란으로 손실이 많아서 레이저 발진을 안정하게 장시간 동안 유지시키기 어렵다. 이러한 이유로 1985년에 Perry[4]에 의해 레이저 발진이 처음으로 보고되었으나, 그 이후 상용으로의 개발이 잘 이루어지지 않았다. 그러나 최근에 전자빔에 의한 다중 증착기술의 발달로 저손실-파장선택형 고반사율의 반사경 제조와 고밀봉(hard seal) 레이저관 제조 기술이 크게 개선됨에 따라 저이득에서도 레이저가 오랫동안 안정하게 발진하게 되었으며 상용화가 이루어졌다.[5]

레이저의 편광특성은 레이저의 주파수 안정화에 중요한 수단이 되기도 하며, 경우에 따라 복잡한 편광현상은 안정화를 저해하는 요소로도 작용하기 때문에 레이저의 편광특성을 연구하는 것은 매우 중요하다. 633 nm 레이저에서 편광선호(polarization preference), 자장의 영향 및 편광반전(polarization flipping) 등의 편광특성이 이론과 실험적으로 많이 연구되었다.[6-11] 그러나 내부 반사경 543 nm 레이저의 경우 편광특성과 안정화에 대한 연구가 국내에서 보고된 바 없다. 543 nm 헬륨 네온 레이저의 주파수를 요오드분자($^{127}I_2$) 포화흡수분광선에 안정화하기 위해서는 요오드분자의 543 nm에 해당하는 흡수 스펙트럼선 R(12) 26-0과 R(106) 28-0에 대한 약 800 MHz 대역폭내에서 레이저의 모드에 불안정한 변화가 생기는 것을 최대한 억제하여야 한다. 그러므로 543 nm 헬륨 네온 레이저에서 편광반전 등의 편광 불안정을 억제하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상용 내부 반사경 543 nm 레이저의 모드와 편광특성을 자장을 가하지 않았을 때와 횡자장을 가하였을 때에 대하여 조사하였으며, 이로부터 레이저의 주파수 안정화에 필요한 단일모드의 안정된 동작을 얻기 위한 최적조건을 구하였다.

## II. 이론적 배경

대부분의 내부 반사경 헬륨 네온 레이저들의 종모드는 레이저관의 고유광축(eigen optical axes)중 어느 하나를 따라 편광되는 강한 성분과 다른 직교된 축을 따라 편광되는 다소 약한 성분을 갖는 경향이 있는데 이것을 편광선호라고 한다. 모드-모드 경쟁 때문에 이웃한 모드의 편광성분들은 서로 직교편광이 된다.[7] 레이저 매질의 비등방성(anisotropy)과 유전체 반사경으로 인한 공진기의 비등방성에 따라 생겨나는 편광선호 때문에 직교편광이 레이저관축에 따라 정해진다.[6] 여기에서 비등방성은 첫째로 외부자장이 0일 때 레이저 활성매질의 비등방성, 둘째로 외부에서 강한 자장으로 유도되는 비등방성, 셋째로 매질이 없을 때의 빈 공진기 내에 존재하는 비등방성의 세가지 형태로 분류된다.[12]

먼저, 첫번째 비등방성은 활성매질 내에 존재하는 비등방성으로 레이저 천이준위들의 각운동량 양자수에 따라 결정되는 편광선호 때문에 생겨난다. 단일모드 동작에서 Polder와 Van Haeringen[10]의 이론에 의하면 $j=1/2\rightarrow j=1/2$과 $j\leftrightarrow j+1 (j>0)$ 천이일 때 편광선호가 선편광으로, 그리고 $j\rightarrow j (j>1)$ 천이일 때 편광선호는 원편광이 된다. 또한 $j=0\leftrightarrow j=1$과 $j=1\rightarrow j=1$ 천이에서는 특별한 편광선호가 없다. 따라서 $3S_2$-$2P_4$ ($j=1\rightarrow j=2$) 천이의 633 nm 레이저는 선편광을 선호하는 비등방성을 가지게 되고, 이것은 공진기의 비등방성보다 커서

고유편광축(eigenpolarization axes)의 주 원인이 된다.[11] 그러나 $3S_2$-$2P_{10}(j=1\rightarrow j=1)$ 천이의 543 nm 레이저의 경우, 특별히 선호하는 편광이 없어서 공진기의 비등방성으로 인한 편광축만 존재하게 되어 온도변화나 응력변화 등 외부로부터 주어지는 약간의 요동(disturbance)만으로도 고유편광축이 매우 불안해진다.[6, 13]

두번째 비등방성은 외부로부터 가한 횡자장에 의해 유도되는 활성매질의 위상비등방성으로 매질에 복굴절(birefringence)을 생기게 하여 편광축을 형성한다. 또한 자장의 세기는 에너지 준위에 Zeeman 분리를 생기게 하고, 이로 인해 두 개의 직교편광성분을 갖게 한다[14]. 자장에 의해 유도되는 비등방성은 대부분의 경우 다음 세번째의 비등방성인 공진기의 비등방성보다 훨씬 더 강하여 레이저의 편광 불안정을 제거하는데 유용하게 사용된다.[15, 16]

세번째 공진기의 비등방성은 레이저 양단에 있는 유전체 다중 반사경의 복굴절이 주 원인이다. 복굴절로 인한 공진기의 고유편광축의 직교방향은 각각 π와 σ인데, 일반적으로 π는 자장과 나란한 방향을 나타낸다.[17] 공진기의 비등방성은 반사경의 다중 증착방법과 방전전극과 같은 레이저관의 구조 및 반사경 부착방법 등에 따라 다르므로, 제조회사에 따라 편광특성이 다르게 나타나고 같은 제조사의 동일한 모델이라 할지라도 제품에 따라 약간씩 편광특성이 다르게 나타난다.[18, 19]

외부에서 레이저관에 자장을 가하면 편광현상은 위에서 언급한 세종류의 비등방성의 결합효과 때문에 생겨난다. 특히 543 nm 레이저의 경우, 자장을 가하지 않았을 때 활성매질에는 선호하는 편광이 없고 단지 공진기의 비등방성으로 인한 레이저관에 고정된 고유편광축에 의한 선편광만이 약하게 존재하여 약간의 외부 요동만으로도 편광반전과 모드진동이 심해지는 등 전체적으로 편광이 불안정하게 된다. Fellman 등은 543 nm 레이저의 편광 불안정에 의해 생겨나는 문제점들을 보고했다.[13] 그러나 이 때 자장을 가하면 자장에 의해 유도되는 매질의 비등방성 때문에 생기는 직교편광축으로 인해 편광반전이 제거되며 모드진동도 줄어들어 전체적으로 편광이 안정하게 된다.[18]

## III. 실 험

543 nm 레이저의 편광특성을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. PMS(particle measurement system)사의 LTGR-0100 내부 반사경 헬륨 네온 레이저(543.5 nm)를 사용하였으며, 레이저 출력은 1 mW이다. 레이저 공진기의 길이는 340 mm이므로 종모드 간격은 440 MHz이다. 따라서 레이저 이득곡선의 선폭이 1.4 GHz이므로 종모드가 3~4개 정도 생겨난다. 이것은 543 nm 레이저에서 2-모드를 얻을 수 있을 만큼 짧은 레이저관을 구할 수 없었기 때문이다. 3-모드로 발진시킨 상태에서 레이저관의 한쪽 끝에 있는 반사경이 붙은 가는 금속관을 플라스틱 나사로 밀어 강제로 조금씩 휘게하면 레이저의 반사경이 약간 틀어지게 된다. 그러면 반사경이 정열선에서 조금씩 벗어나게 되어 레이저 임계치가 높아짐으로써 2-모드 레이저 동작이 가능하게 된다.

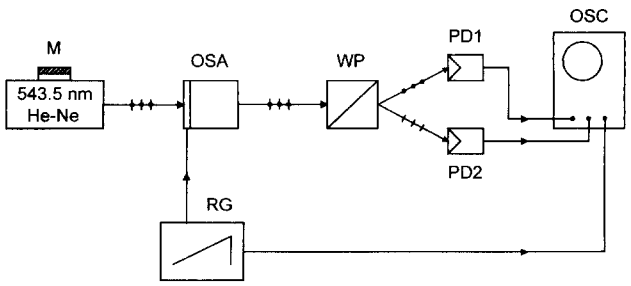


Fig. 1. Experimental setup used to investigate the polarization characteristics of the laser modes. M: magnet, OSA: optical spectrum analyzer, WP: Wallaston prism, PD: photodiodes, RG: ramp generator, OSC: oscilloscope.

레이저 빔이 광스펙트럼분석기(OSA)를 통과한 후 Wallaston 프리즘(WP)에 의해 두 개의 직교 편광성분으로 분리된다. 고압 톱니파 발진기(RG)로 광스펙트럼분석기를 구동하면 레이저 종모드의 특성을 관찰할 수 있다. 광다이오드 PD1과 PD 2에서 각각의 직교 편광성분 σ와 π를 검출하여 오실로스코프(OSC)에서 모드의 편광특성을 관찰하도록 하였다. 레이저관의 중심에서 폭 2 cm, 길이 5 cm, 두께 0.8 cm인 페라이트 영구자석(M)을 200 gauss부터 3000 gauss의 여러 종류로 바꾸면서 횡자장을 가했을 때 자장의 세기와 고유광축에 대한 자장의 각도에 따른 편광모드의 변화를 측정하였다.

## IV. 결과 및 논의

### 4.1. 자장을 가하지 않았을 때의 편광특성

자장을 가하지 않은 2-모드 레이저 동작에서 관측한 편광반전 현상을 Fig. 2에 나타내었다. 레이저의 전원을 켠 직후에 레이저관의 열팽창 때문에 두 개의 종모드의 주파수는 낮은 쪽으로 바뀌게 되고 이득곡선을 가로질러 흐르게 된다. 공진기의 비등방성으로 인해 레이저 종모드들은 선편광이 되며, 모드들 사이의 모드경쟁으로 인하여 서로 직교가 된다. 또한 편광방향은 레이저관에 대해 고정되며, 이것을 고유편광축 또는 고유광축이라고 한다. 이득곡선의 중심영역에서 고유광축에 대한 편광선호 현상이 나타난다. 편의상 편광선호 방향을 π로 다른 방향을 σ로 표기한다.[15]

Fig. 2에 자장을 가하지 않았을 때 주파수에 대해 편광모드가 변하는 과정을 스케치로 보였다. 편광반전은 편광선호를 유지하기 위해서 생겨난다.[16] Fig. 2(a)에서 편광선호 모드 π가 이득의 중심에 있으며, 시간이 지남에 따라 낮은 주파수 쪽(그림의 왼쪽)으로 이동해 나가게 된다(Fig. 2(b)). 그러나 편광모드 π가 편광모드 σ보다 강도가 작아지기 시작할 때, 강한 편광방향을 그대로 유지하려는 편광선호 때문에 갑자기 각각의 모드 주파수에서 편광모드 π와 편광모드 σ가 서로 바뀌게 되며 이것을 편광반전이라고 한다(Fig. 2(c)). Fig. 2(d)에서 Fig. 2(e)로 변하는 것은 편광반전이 아니고 낮은 주파수를 향하여 이동해 나가던 편광모드 σ가 이득곡선의 한쪽 끝을 지나 반대편의 끝에서 다시 나타나는 것을 보인 것이다. 레이저관 길이가 34 cm인 2-모드 543 nm 레이저에서 편광선호에

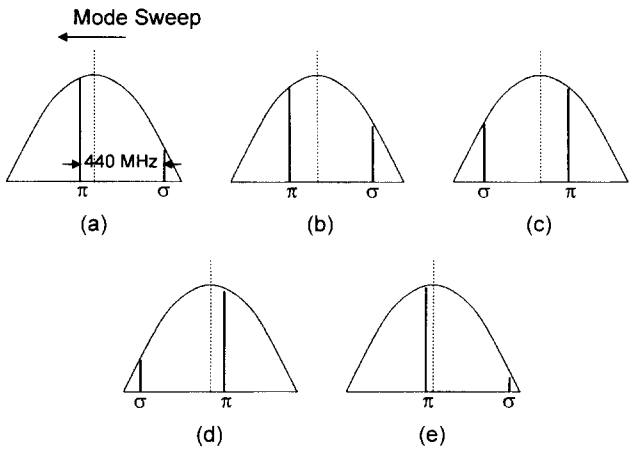


Fig. 2. Observed mode evolution under the gain curve without magnetic field.

의한 편광반전만 존재하면, 단일모드 스펙트럼영역(FSR)은 종모드 간격과 같은 440 MHz가 된다.

그러나 543 nm 레이저에는 이러한 편광선호로 인한 편광반전이 생길 뿐만 아니라, 활성매질이 선호하는 편광이 없으며 공진기의 비등방성도 크지 않기 때문에 약간의 외부 요동으로도 쉽게 편광반전이 발생하거나 모드가 갑자기 뛰어버리는 모드도약(mode jump)현상도 발생한다. 특히 3-모드 이상의 다중모드 동작일 때는 편광현상이 아주 복잡해진다. 3-모드 레이저 동작에서 일반적으로 양끝의 모드는 서로 직교이며 그 중 하나는 중심모드와 같은 편광을 가지는데,[12, 20] 각 모드들이 이득곡선상에서 흘러갈 때 외부의 요동에 의해 양끝의 모드들의 편광이 서로 자주 바뀌게 되는 모드진동(mode oscillation) 현상도 나타난다.[12, 18] 따라서 543 nm 레이저는 633 nm 레이저보다 편광상태가 매우 불안정하다. Brand 등의 실험에 의하면, 본 실험에서 사용한 레이저관과 거의 유사한 PMS사의 LHGR-050 내부 반사경 레이저관(543.5 nm)에서 자장을 걸지 않고 3-모드로 동작시켰을 때 편광반전, 모드도약 및 모드진동을 포함하여 한 이득곡선상에서 편광이 23 번 바뀌었다.[18]

543 nm 레이저가 2-모드(이득곡선의 너비가 약 1 GHz)로 동작할 때, 한 편광모드의 출력만을 측정한 것을 Fig. 3에 보

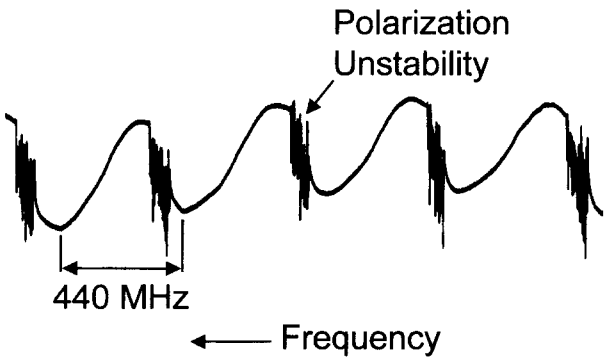


Fig. 3. The laser intensity during mode sweep without magnetic field.

였다. 종모드 간격(440 MHz)에 해당하는 $\Delta f$ 동안은 각 모드의 편광에 변화가 없다가, 두 직교편광 모드의 크기가 같아지는 출력 최대점을 지나면서 갑자기 편광에 불안정한 변화가 심하게 생겨 출력이 크게 변하는 것을 볼 수 있다.

### 4.2. 횡자장을 가했을 때의 편광특성

543 nm 레이저관에 폭 2 cm, 길이 5 cm, 두께 0.8 cm인 페라이트 영구자석으로 200 gauss부터 3000 gauss까지 바꾸어 가면서 횡자장을 가했을 때 자장의 세기, 레이저관에서의 자장의 위치 및 레이저관의 고유광축과 자장 사이의 각도에 따라 편광효과가 크게 영향을 받음을 관찰할 수 있었다. 자장이 세어짐에 따라 출력이 약간 증가하며 이득폭은 더욱 좁아짐을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 Ferguson 등의 결과와 잘 일치한다.[15] 레이저관의 중심부근에서 레이저관의 고유광축 중 하나의 방향으로 횡자장을 걸었을 때, 자장의 세기를 증가시킴에 따라 각각의 모드는 레이저 고유광축에 나란하게 직교선편광되었다.

543 nm 레이저 매질에 자장이 없을 때, 서로 다른 직교편광이 같은 준위에서 천이하므로 서로 강하게 결합되어 있고 주파수가 같다. 따라서 두 개의 직교편광이 이득곡선의 같은 주파수에서 서로 이득을 경합하게 되어 편광 불안정이 쉽게 일어난다. 레이저 매질에 횡자장을 걸어주면 두 개의 직교편광 사이에 종모드축으로 Zeeman 분리가 생겨난다. 543 nm 레이저에서 자장에 따른 Zeeman 분리 주파수의 크기 $F_z$는

$$F_z = \mu_B g_a B / h$$

이며, 1.81 MHz/gauss이다. 여기서 $\mu_B$는 Bohr 마그네톤이며, $g_a$는 상위 $3s_2$의 Lande $g$ 값이고, $B$는 자속밀도이다. 그러므로 종모드 440 MHz 간격 만큼 분리를 일어나게 하는 특성자장(Zeeman 분리가 종모드 간격과 같이 되는 자장의 세기)의 값은 243 gauss이다. 자장을 강하게 거는데 비례하여 두 개의 직교편광이 크게 분리되므로 이득곡선의 한 주파수를 서로 경합하지 않고 그 주파수에 맞는 한 개의 편광만이 이득을 얻게 되며 이웃한 종모드는 여기에 직교되는 편광을 가지므로 편광 불안정이 감소하게 된다.

633 nm 레이저의 경우에는 $3S_2$-$2P_4$($j=1 \rightarrow j=2$) 천이에 의한 매질내의 선편광선호가 공진기의 비등방성보다 더 지배적이어서 50 gauss 정도의 약한 자장에서의 Zeeman 분리로도 쉽게 레이저의 모드를 직교 선편광시킬 수 있었으나, 543 nm 레이저에서는 633 nm 레이저에 비해 자장으로 유도되는 비등방성이 상대적으로 약하여 자장의 세기가 특성자장 이상일 때 비로서 편광 불안정이 억제되기 시작하였다. 300 gauss 이상의 자장을 가하여야 편광을 어느 정도 안정시킬 수 있었고, 800 gauss를 넘어서면 다시 불안정해지는 상태로 변하였으며 500 gauss에서 최적으로 안정시킬 수 있었다. 그러나 편광 불안정 현상이 여전히 조금 남아 있었다. 레이저관의 중심에서 자장을 회전시키면 수직한 고유광축에 대해 자장이 약 35° 부근일 때 편광반전을 완전히 제거할 수 있었으며, 자장 각도에 따라 편광 불안정이 달라지는 것은 533 nm 레이저에서 반사경의 비등방성이 매질의 비등방성보다 상대적으로

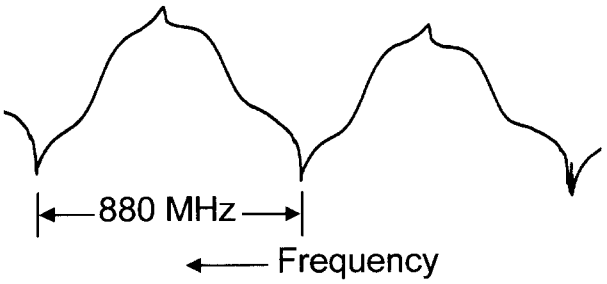


Fig. 4. The laser intensity during mode sweep when transverse magnetic field (500 gauss, $\theta = 35^{\circ}$) is applied.

크기 때문이다. 자장의 세기 500 gauss에서 Fig. 4와 같은 불안정한 편광변화 없이 완전한 단일모드의 레이저 동작을 종모드간격의 두배($2\Delta f$)인 880 MHz 범위동안 Fig. 5와 같이 얻을 수 있었다. 그러므로 단일모드 FSR은 880 MHz이다.

레이저관의 중심에서 횡자장 500 gauss를 공진기의 수직한 고유광축에 대해 35°로 가했을 때, 편광반전이나 모드진동이 전혀 없는 편광 안정상태로 2-모드 동작을 하였다. 이 때 주파수에 대해 편광모드가 변하는 과정을 Fig. 6에 스케치로 보였다. π모드가 우측 끝에서 생겨서(Fig. 6(a)) 좌측 끝으로 사라지는(Fig. 6(e)) 한 과정에서, Fig. 6(a)에서 Fig. 6(b)로 변화는 과정은 Fig. 2(a)에서 Fig. 2(d)로 변할 때 편광반전이 생기는 것과는 달리 편광의 변화가 없이 시간에 따라 주파수가 적어지는 방향(왼쪽)으로 이동하면서 스펙트럼 강도가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이득곡선의 중심인 Fig. 6(c)에서 다른 편광성분이 없는 완전한 단일모드 상태로 최대 강도가 되며, Fig. 6(d)를 거쳐 Fig. 6(e)로 강도가 점차적으로 감소하면서 좌측으로 사라져 간다. Fig. 6(a)에서 Fig. 6(e)까지 변하는 전체의 과정중 한 고유편광에 대한 과정을 찍은 사진을 Fig. 7에 보였다. 한 개의 고유편광 스펙트럼이 우측 끝에서 생겨서 좌측 끝으로 사라지는 한 과정동안의 방출선모양(emission profile)과 안정성을 기록하기 위해서 한번 중복되게 충분히 긴 시간동안 노출하였다. 이로부터 레이저 주파수를 안정화시키는데 필요한 안정된 단일모드의 동작을 880 MHz의 영역동안 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 방출선모양의 중

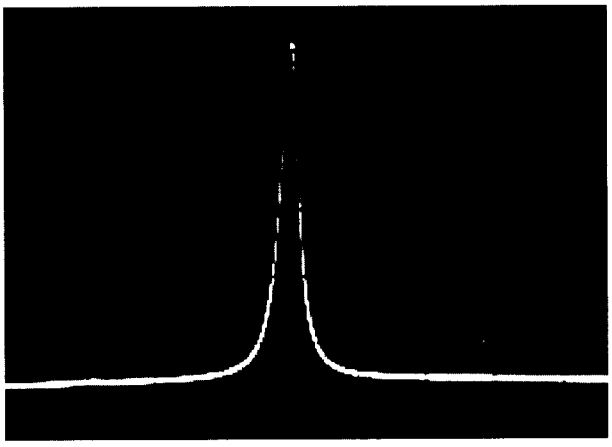

Fig. 5. Single-mode spectrum observed through a linear polarization with the transverse magnetic field (500 gauss, $\theta = 35^{\circ}$).

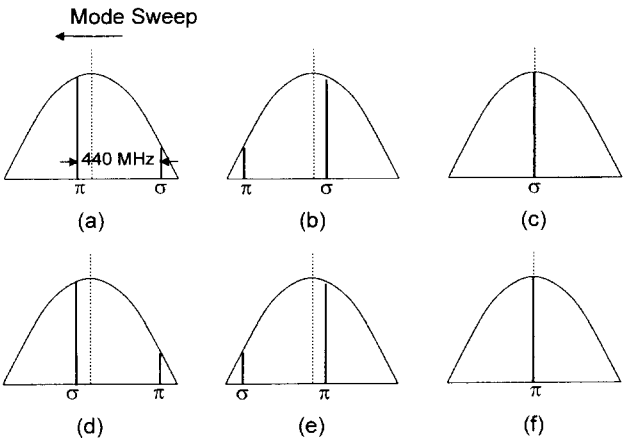


Fig. 6. Observed mode evolution under the gain curve with the transverse magnetic field (500 gauss, $\theta = 35^{\circ}$).

심에 특성 봉우리가 나타나 있다. Fig. 6(b)에서 Fig. 6(c)로 변하는 과정과 같이 두 개의 서로 다른 편광모드가 이득곡선을 같이 주사하고 있다가 둘 중 하나가 이득곡선 밖으로 벗어나 모드 발진이 사라질 때와 Fig. 6(c)에서 Fig. 6(d)로 변하는 과정과 같이 한 개의 모드만 주사하고 있다가 다른 한 모드가 이득곡선 안으로 들어와 모드 발진이 새로 생길 때 이와 같은 현상이 일어남을 볼 수 있다. 이것은 한 편광모드에 이웃한 직교 편광모드가 갑자기 생기거나 사라질 때 편광 불안정이 생길정도로 심하지는 않지만 약간의 이득경쟁이 생기거나 이득에서 포화가 일시적으로 줄어드는 등의 과도현상 때문일 것으로 추측된다.

## V. 결 론

상용 내부 반사경 543 nm 레이저에서 자장에 따른 편광특

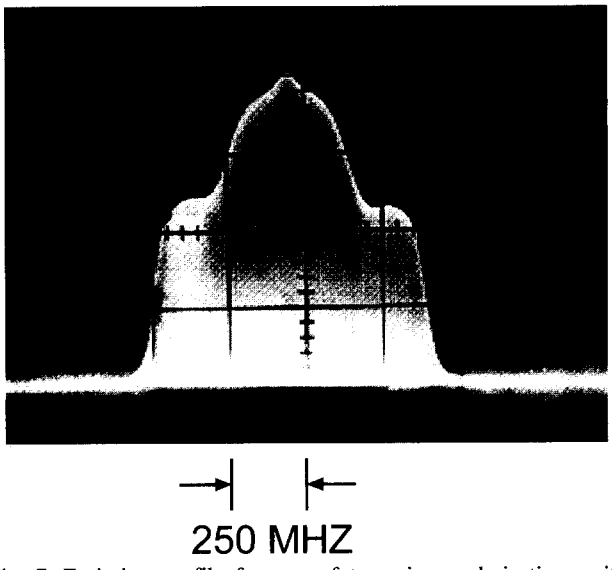


Fig. 7. Emission profile for one of two eigen-polarizations with the transverse magnetic field (500 gauss, $\theta = 35^{\circ}$).

성을 실험적으로 살펴보았다. 자장을 가하였을 경우, 633 nm 레이저에서 일반적으로 나타나는 편광선호로 인한 편광반전이 나타나는 동시에 543 nm 레이저에는 특별히 모드도약과 모드진동 등의 현상도 발생하여 3-모드 이상의 다중모드 동작일 때는 편광모양이 아주 복잡한 것으로 알려져 있다. 2-모드로 동작시켜 그 중 한 편광모드만 출력시켰을 경우에도 FSR이 440 MHz 이하이고, 편광에 불안정한 변화가 심하게 나타나 레이저 출력이 크게 변하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 레이저관의 중심에서 약 500 gauss의 횡자장을 공진기의 수직한 고유광축에 대해 35°로 가했을 때 편광반전과 모드도약을 포함한 편광 불안정 현상을 억제할 수 있었다. 이로부터 레이저 주파수를 안정화시키는데 필요한 단일모드 동작을 880 MHz의 영역동안 안정되게 얻을 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 1996년도 계명대학교 연구년 지원과 과학기술부의 기간고유사업으로 수행된 국제표준개발 연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

[1] W. Luhs, B. Struve, and G. Litfin, Laser und Optoelektronik **Nr4**, 319 (1986).
[2] S. C. Sheny and D. C. Gerstenberger, Proc. SPIE **737**, 76 (1987).
[3] 出來恭一, 羽田博成, 氏家啓一, レ-ザ-研究 **16**, 818 (1988).
[4] D. L. Perry, IEEE J. Quantum Electron. **QE-7**, 102 (1971).
[5] Lasers & Applications, **4**, No. 12, 59 (1985).
[6] D. Lenstra and G. C. Herman, Physica, **95C**, 405 (1978).
[7] T. Yoshino, Jpn. J. Appl. Phys., **18**, 1503 (1979).
[8] C. Zhang and K. Lu, Opt Commun., **53**, 335 (1985).
[9] H. De Lang, G. Bouwhuis, and E. T. Ferguson, Phys. Lett. **19**, 482 (1965).
[10] D. Polder and W. Van Haeringen, Phys. Lett. **19**, 380 (1965).
[11] H. De Lang and G. Bouwhuis, Phys. Lett. **20**, 383 (1966).
[12] T. Lin and J. T. Shy, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 878 (1990).
[13] T. Fellman, P. Jungner, and B. Stahlberg, Appl. Opt. **26**, 2705 (1987).
[14] H. Takasaki, N. Umeda, and M. Tsukiji, Appl. Opt. **19**, 435 (1980).
[15] J. B. Ferguson and R. H. Morris, Appl. Opt. **17**, 2924 (1978).
[16] 엄천일, 엄태봉, 임재선, 새물리 **30**, 364 (1990).
[17] R. A. J. Keijser, Opt. Commun. **23**, 194 (1977).
[18] U. Brand, F. Mensing, and J. Helmcke, Appl. Phys. **B48**, 343 (1989).
[19] W. R. C. Rowley and P. Gill, Appl. Phys. **B51**, 421 (1990).
[20] P. N. Puntambekar, H. S. Dahiya, and V. T. Chitnis, Opt. Commun. **42**, 60 (1982).

## Polarization properties and single-mode operation of an internal-mirror 543 nm He-Ne laser

Kyung Chan Kim
*Department of Physics, Keimyung University, Taegu 704-701, Korea*

Ho Sung Suh and Tae Bong Eom
*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea*

(Received July 29, 1998, Revised manuscript received November 12, 1998)

The polarization properties of an internal-mirror 543 nm He-Ne laser with and without a transverse magnetic field were investigated for single-mode operation. Two orthogonal eigenpolarizations field to the natural tube axes of laser were observed when the emitted laser output was linearly polarized. Polarization unstability between these polarizations occurred when the laser frequency was scanned through the gain profile at zero magnetic field. The polarization unstability was suppressed by applying a 500 gauss transverse magnetic field at 35° with respect to the natural tube axes of laser. Under such conditions stable single-mode operation which is useful for the frequency stabilization of a 543 He-Ne laser to $I_2$-saturated absorptions was obtained in the tuning range of 880 MHz.