XeCl 엑시머레이저 펌핑 쌍공진기형 색소레이저의 출력 특성

이 용 우

전남도립담양대학 초고속정보통신공학부, 광산업기술지원센터

Output Characteristics of 2-wavelength Resonator Dye Laser Pumped by XeCl Excimer Laser

Yong Woo Yi

Dept. of Electronic Engineering, Provincial College of Damyang

E-mail : ywyi@damyang.ac.kr

요 약

XeCl 엑시머 레이저로 펌핑되는 쌍공진기형 색소레이저와 2단 증폭시스템을 개발하여 원격계측 시스템에 적합한 두 개의 파장을 동시 또는 순차적으로 출력하였다. 개발된 쌍공진기는 1200 g/mm의 회절격자를 갖는 grazing-incidence 방법에서 제 1차 및 제 2차 회절차수를 이용하여 구성되었다. 출력특성은 스펙트럼 선폭이 10 pm이하이고, 펌프 에너지에 대하 전체효율은 6% 이상이다. 또한, 파장가변 영역은 제 1차 및 제 2차의 회절차수에 대해 각각 434~470 nm, 436~468 nm 이며, 2단의 증폭기의 증폭이득은 37dB, 추출효율은 9%이다. 개발된 레이저 증폭시스템에서 Coumarine-450의 색소로 발진하고, 이의 출력 6 mJ을 원격계측시스템에 적용하여 수원상공의 NO_2의 가스농도분포를 측정하였다. 이 결과 개발된 색소레이저 시스템은 원격계측 시스템의 광원으로 매우 적합함을 확인하였다.

키워드

XeCl 엑시머 레이저, 쌍공진기형 색소레이저, 증폭시스템, grazing-incidence

I. 서 론

원격탐사 방법은 전자파 또는 레이저 광을 오염물질에 발사하여 이것들의 상호작용 결과를 수신하여 분석하는 능동적 방법[1]이며 대기 중의 비행체나 지상의 계측기를 사용한다. 특히 레이저 광을 사용하여 원격탐사하는 장치를 라이다(light detection and ranging, LIDAR)라 한다.

이것을 최초로 사용한 것은 레이저 발진이 성공한 직후인 1963년에 Fiocco 등이 초고층의 에어로졸 관측에 라이다를 시도한 것에서 비롯된다[2]. 레이저 광의 강력한 펄스출력과 뛰어난 지향성을 이용하면 원거리에 있는 물체의 형태, 거리, 방향, 크기, 속도, 밀도 및 조성 등의 정보를 원격적으로 측정할 수 있다[3-5]. 대기물질과 레이저 광의 상호작용에 따라 라이다는 몇까지의 종류로 구분할 수 있으나, 오염물질 농도의 계측에는 대기의 산란과 흡수를 조합한 DIAL (differential absorption LIDAR)이 가장 적합한 것으로 알려져 있다[6]. DIAL은 측정대상 분자에 대하여 흡수가 큰 파장과 적은 파장의 두 파장을 오염가스에 작용시켜서 후방 산란되는 두 파장을 계측함으로써 측정실태를 거리별 농도분포로 환산하는 방법이다.

DIAL 측정기술은 측정가스에 대해 뛰어난 파장특성을 갖는 레이저 광원과 수광소자에 크게 의존하게 된다. 그 외에 파장가변성, 펄스폭, 펄스에너지, 스펙트럼 선폭, 레이저 빔의 지향성 등이 중요한 항목이며[7], 태양광에 의한 배경잡음이 적은 자외영역의 파장이 최적이라 할 수 있다. 이러한 파장을 얻기 위해 매질의 비선형 특성을 이용한 유도라만 산란과 조화파 발생에 대한 연구가 지속되고 있다. 자외영역과 가시영역의 대표적인 대기오염물질은 SO_2(290~310 nm), O_3(270~

300 nm), NO(220~250nm), 방향족탄화수소(255~270 nm)와 NO_2(440~450 nm) 등이 있다[7]. 이들을 측정하기 위한 DIAL용 레이저 광원은 좁은 스펙트럼 선폭과 수 nm이하의 근접한 파장을 동시 또는 순차적으로 발진되어야 한다.

본 연구에서는 색소레이저의 1200 g/mm 회절격자에 grazing-incidence 방식의 제 1차, 2차 회절차수로 2-파장 공진기를 구성하여 두 파장을 동시 또는 순차적으로 출력하는 발진기를 개발하였다. 동일한 광축에 두 개의 색소셀을 교체하도록 설계하여 Coumarin 계열과 Rhodamine 계열의

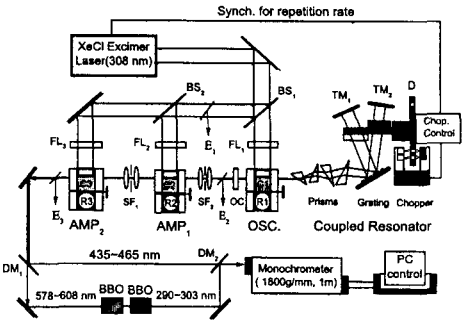

Fig. 1. Schematic diagram of the two-wavelength resonator dye laser and its second harmonic generator. TM: total mirror, BS: beam splitter, SF: spatial filter, FL: focal lens, OSC: oscillator, D: disk, AMP: amplifier, OC: output coupler, PD: Photodiode, C and R: dye cell.

색소레이저를 한 시스템에서 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 2단의 증폭기를 부착하여 효율과 이득을 향상시켰다. 색소발진기의 회절격자와 두 개의 전반사경 사이에 기계식 촙퍼를 설치하여 두 파장을 순차적으로 발진시켰으며, 원판에 핀홀(pinhole)과 광 결합기(optical coupler) 쌍을 장착하여 펌핑 레이저의 반복율을 직류 전동기(DC motor)의 회전속도에 따라 조정하도록 제작하여 DIAL 측정에 직접 응용이 가능하도록 하였다.

II. 본 론

1. XeCl 레이저 펌핑 2-파장 공진기형

색소레이저

본 실험에서 회절격자의 제 1차와 2차의 회절광을 이용하여 하나의 매질과 회절격자에서 두 개의 공진기가 구성되는 발진기를 개발하였다. XeCl 레이저로 펄스 펌핑된 색소레이저의 2-파장 공진기형 발진기와 2단 증폭의 전체 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 1)XeCl 레이저로 펌핑된 2-파장 공진기형 색소레이저, 2)두 파장을 선택하는 기계적인 촙퍼와 동기화 장치 부분으로 이루어져 있다.

측정 대상인 NO_2와 SO_2 가스는 on과 off 파장에 대해 매우 좁은 흡수 스펙트럼 분포를 보이므로 약 2 nm 이하의 파장간격에서 두 파장을 발진시켜야 한다. 따라서, Grazing-incidence 방식의 2-파장 공진기는 입사각 α_1에 대한 제 1차 및 제 2차 회절차수의 광경로에 있는 전반사경 TM_1(total mirror), TM_2(total mirror)와 색소발진기의 출력거울 OC(output coupler)로 두개의 공진기를 구성한다. 회절격자는 크기가 50x50

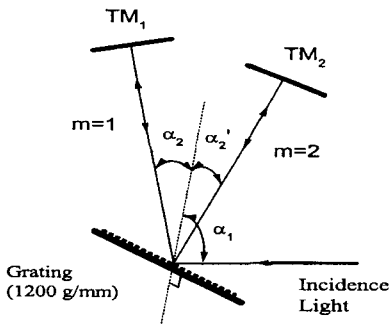

Fig. 2. Principle of grazing-incidence grating.

mm^2이고 격자수는 1200 g/mm이며, TM_1과 TM_2는 크기가 80x20 mm^2이고 400~700 nm의 파장대역에서 반사율은 99 %이상이다. 출력거울 OC는 400~700 nm의 파장대역에서 40 %의 반사율을 가지며, 프리즘으로 구성된 선속확대기는 레이저 빔을 20 mm로 수평 확대하여 회절격자의 분해능을 높인다. Fig.과 같이 OSC(oscillator)와 AMP_1(amplifier), AMP_2(amplifier)의 색소 셀들은 두 종류의 색소를 필요에 따라 사용할 수 있도록 C와 R로 표기된 한 쌍의 셀로 구성되어 있다. 이것은 Coumarin-450(440~450 nm)과 Rhodamine-590(580~610 nm) 범위의 파장가변을 전제로 하고 있다. 또한 주발진기와 증폭기의 사이에는 공간필터 SF_1(spatial filter), SF_2(spatial filter)를 설치하여 색소레이저의 ASE(amplified spontaneous emission) 발생을 최소화하였다.

색소레이저의 2-파장 공진기를 구성하기 위해서는 Fig. 2와 같이 입사각 α_1에 대해 생성되는 회절각 α_2와 α_2'를 이용한다. 회절격자의 일반식[8]에서 입사각 α_1에 대해 생성되는 회절각 α_2는 $m=1$의 회절차수 일 때의 회절각과 α_2'는 $m=2$의 회절차수일 때의 회절각을 나타낸다. 본 실험에서 색소레이저의 공진기를 구성하기 위해 1200 g/mm의 회절격자를 사용하고, 65°의 입사각일 때 560~620 nm와 430~480 nm의 파장범위에서 계산된 회절각 α_2와 α_2'는 표 1과 같다.

표 1. Calculated values of diffraction angles of α_2 and α_2' with 1200 g/mm diffraction grating at α_1=65°.

Order	Angle	560~620 nm	430~480 nm
m=1	α_2	13.5~9.3°	23.0~19.3°
m=2	α_2'	26.0~35.6°	7.2~14.2°

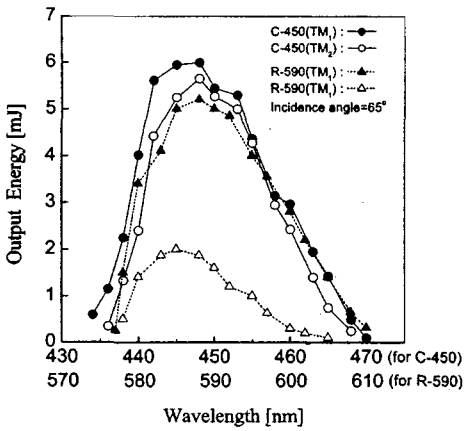

Fig. 3. Tuning curve of the Coumarin-450(C- 450) and Rhodamine-590(R-590) dye lasers.

Fig. 3은 완성된 색소레이저 시스템에서 색소 Coumarin-450과 Rhodamine-590에 대한 파장가변 곡선으로 두 개의 공진기를 순차적으로 동작하였을 때 얻은 결과이다. Coumarin-450 색소에서 전체 발진영역은 TM_1에 대해 434~470 nm이고, TM_2에 대해 436~468 nm이며, 448 nm에서 최대 출력에너지를 갖는다. DIAL 측정에서 이용되는 파장 448.00과 449.85 nm에서 약 6 mJ의 에너지를 가지며, 스펙트럼 선폭은 전체 파장영역에서 10 pm이하이다. Rhodamine-590 색소레이저에서 전체 발진영역은 TM_1에 대해 576~608 nm이고, TM_2에 대해 578~605 nm이며, 585 nm에서 최대 출력에너지를 갖는다. Coumarin-450의 출력은 Rhodamine-590의 출력보다 높은 이유는 회절격자의 효율이 400 nm에서 최고 값을 갖기 때문이다. Rhodamine-590 색소의 경우, TM_2의 출력에너지는 TM_1의 출력에 비해 절반 이하의 값을 갖게 되는데, 이는 회절격자의 파장에 대한 효율이 500 nm 이상에서 급격히 낮아지기 때문이라 생각된다.

Rhodamine-590 색소레이저의 발진영역에 대해 제 2조화파를 형성하면 280~310 nm의 범위를 갖기 때문에 자외선에 대한 투과율이 좋은 비선형 결정 KDP나 BBO가 많이 사용된다[9]. 본 실험에서는 2-파장 공진기형 색소레이저의 개발로 한 시스템에서 두 파장이 동시 또는 순차적으로 발생하기 때문에, 두 파장에 대한 제 2조화파 발생을 위해서는 두 개의 비선형 결정이 필요하다. 따라서, Rhodamine-590 색소레이저의 제 2조화파 발생을 위해 두 개의 BBO 비선형 결정을 사용했다. 사용된 BBO-I와 BBO-II는 각각 5x5x7 mm3; θ=40°, ϕ=90° 와 5x5x7 mm^3, θ=38°, ϕ=90° 의 특성을 갖는다. 각 파장에 대한 제 2조화파 발생의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. TM1(576~608 nm)에 대해 288~304 nm, TM2(578~605 nm)에 대해 290~300 nm의 발진영역을 가지며, 제 2조화파의 변환효율은 약 10 %이다.

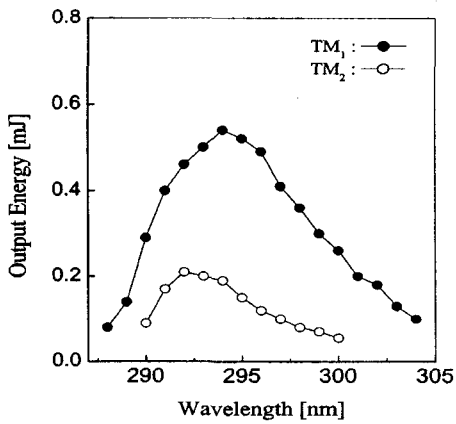

Fig. 7. Second harmonic generation of the Rhodamine-590 dye laser using BBO crystal. TM; total mirror.

2. 파장선택 촙퍼

송신되는 두 파장의 간격이 좁기 때문에 대기중에서 후방산란되어 돌아오는 수신신호를 광학적으로 분리하는 문제에 부딪힌다. 현재 이용되는 간섭필터는 수 nm의 전반치폭을 지니므로 사실상 광학적으로 두 파장을 분리하는 것은 불가능하며, 회절격자나 에탈론을 이용하는 경우는 수신신호의 손실이 매우 크다. 따라서, 본 연구에서는 두 파장을 순차적으로 송수신하여 데이터를 처리하는 구조를 선택하였다. 개발된 2-파장 공진기형 색소레이저에 기계식 촙퍼를 부착하여 두 파장을 순차적으로 송신할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 5는 2-파장 공진기 내에서 두 날개로 동작되는 촙퍼부분과 광결합기 쌍과 회전원판에 의해 동작되는 동기화장치의 구성을 나타낸다. 촙퍼는 회절격자와 두개의 전반사경 사이에 설치되어 있으며, 두 날개가 회전할 때 공진기는 교대로 열리고 닫히게 된다. 이때, 회전속도는 직류 전동기의 속도를 제어함으로써 가능하다. 반복율 제어 및

발진파장의 인식을 위한 동기화장치는 직류 전동기와 직접 연결된 회전원판의 두개의 구멍에 의해 제어된다. 회전원판이 광결합기 쌍을 통과할 때 1회 회전시 2번의 신호를 발생하며,

이 신호는 XeCl 펌핑레이저를 50 Hz까지 동작 가능하게 한다. 다른 광결합기 쌍은 약 10 μs의 펄스폭을 갖는 신호를 발생하며, 원판이 1회 반복할 때 한번의 신호를 생성한다. 즉, XeCl 펌핑레이저를 두 번 동작시킬 때 한번의 동기신호를 발생함으로써 TM1과 TM2 중에서 어느 한쪽의 발진파장을 선택하게 된다. 따라서, 이러한 방식은 두 파장을 교대로 송신하는 DIAL 시스템에 효율적으로 적용될 것이다.

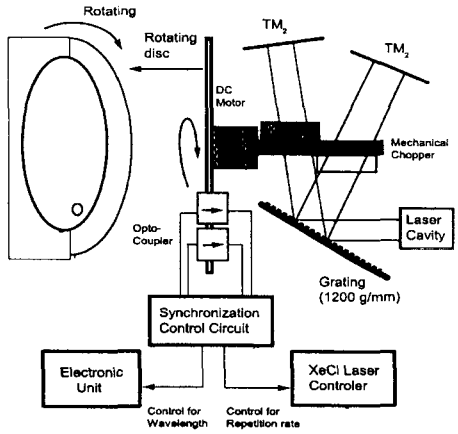

Fig. 8. Arrangement of a mechanical chopper and rotating disc for synchronization control. TM; total mirror.

Fig. 6은 XeCl 레이저의 반복율 제어신호와 발생파장의 동기신호를 동시에 보여준다. Fig. 6(a)의 오실로스코프 사진은 20 ms/div, 5 volt/div의 스케일이며, 상단의 구형파는 펄스신호가 0에서 -15 volt로 -15에서 0 volt로 각각 변할 때 XeCl 레이저는 동작을 하게된다. 이때의 반복율은 50 Hz이다. 또한, 하단의 임펄스 신호는 40 ms에 한번씩 신호가 발생하며, XeCl 레이저 반복율의 절반인 25 Hz로 동작한다. 이때의 펄스 폭은 10 μs로 사진에서는 하나의 선으로 나타났다. 이 신호는 기계식 촙퍼의 한쪽 날개에 대한 인식를 DIAL에 전달하게 된다. Fig. 6(b)의 오실로스코프 사진은 10 μs/div, 5 volt/div의 스케일로 Fig. (a)의 하단 파형을 나타낸 것이다.

III. 결 론

본 연구에서는 DIAL 시스템에서 요구하는 송신 광학계와 2-파장 공진기형 색소레이저의 설계 · 제작을 통해 요구되는 조건을 제안하였다. 개발된 2-파장 공진기형 색소레이저에서 448.00 nm(on 파장)/449.85 nm(off 파장)를 송신하여 NO2 가스의 농도를 측정, Rhodamine- 590 색소레이저의 출력파장을 제 2조화파 한 292.00 nm(on 파장)/295.20 nm(off 파장)과 299.38 nm(on 파장)/300.05 nm(off 파장)을 송신하여 O_3, SO_2의 농도를 각각 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

향후 소형화 된 2-파장 공진기형 색소레이저를 광원으로 한 DIAL시스템을 이용하여 대기오염측정에 직접적인 응용이 가능하리라 생각된다.

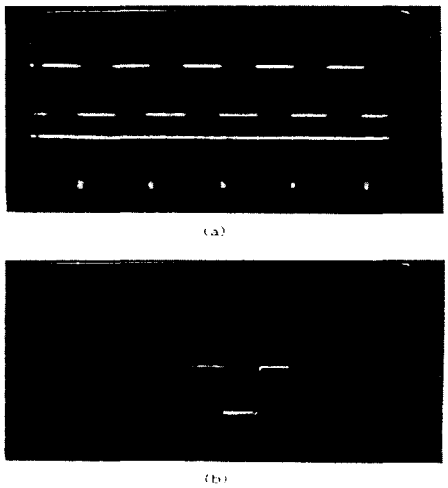

Fig. 9. Oscilloscope traces of the signal for synchronization and repetition rate, (a) 20 ms/div and 5 volt/div and (b) 10 μs/div and 5 volt/div.

참고 문헌

[1] E. D. Hinkley, "Laser monitoring of the atmosphere," Topics in Appl. Phys. 14 (Splinger-Verlag, New York, 1976).

[2] G. Fiocco and L. D. Smullin, Nature 199, 1275(1963).

[3] S. P. Palm, S. H. Melfi, and D. L. Carter, "New airborne scanning lidar system: applications for atmospheric remote sensing," Appl. Opt. 33, 5674(1994).

[4] E. Voss, C. Weitkamp, and V. Michaelis, "Lead-Vapor filters for high-spectral-resolution temperature lidar," Appl. Opt. 33, 3250(1994).

[5] D. Hutt, L. R. Bissonnette, and L. Durand, "Multiple field of view lidar returns from atmospheric aerosols," Appl. Opt., 33, 2338(1994).

[6] R. M. Schotland, J. Appl. Meteorol. 13, 71 (1974).

[7] M. J. T. Milton, "Tunable lasers for DIAL applications", The review of laser engineering of Japanese 23(2), 7 (1995).
[8] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics," Pergamon Press Inc., New York, 403 (1970).
[9] G. A. Rines, H. H. Zenzie, R. A. Schwarz, Y. Isyanova, and P. F. Moulton. "Nonlinear conversion of Ti:sapphire laser wavelengths," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. QE-1, 50 (1992).