

DIAL용 XeCl 레이저펌핑 쌍공진기색소레이저의 파장가변특성*

이용우 · 이주희

경희대학교 전자공학과, 레이저공학연구소

(1996년 5월 13일 받음)

XeCl 레이저로 펌핑하는 쌍공진기 색소레이저와 2단 증폭시스템을 개발하여 DIAL 시스템에 적합한 두개의 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 pm 이하이고, 펌프 에너지에 대한 전체효율은 6% 이상이다. 또한, 파장가변 영역은 제 1차 및 제 2차의 회절차수에 대해 각각 434~470 nm, 436~468 nm이며, 2단의 증폭기의 증폭이득은 37 dB, 추출효율은 9%이다. 개발된 레이저 증폭시스템에서 Coumarine-450의 색소로 발진하고, 이의 출력 6 mJ을 DIAL 시스템의 레이저 광으로 전송하여 수원 상공의 NO₂가스 농도분포를 측정하였다. 이 결과 개발된 색소레이저 시스템은 DIAL의 레이저 광원으로 매우 적합함을 확인하였다.

I. 서 론

차외선에서 적외선까지의 넓은 대역에서 발진할 수 있는 펄스형 색소레이저는 발진이득이 크고, 수십 MW의 첨두출력을 얻을 수 있는 장점 때문에 극초단 펄스레이저^[1]와 원격탐사 Lidar용 레이저^[2,3] 등 그 응용 범위가 매우 넓다. 특히, 대기의 원격탐사에 사용하는 DIAL(Differential Absorption Lidar)은 측정대상에 대해 흡수계수가 서로 다르고 매우 근접된 두개의 파장을 전송하고, 이때의 후방산란광을 비교·수신하여 측정하는 방식이므로 레이저 광원은 파장가변성과 스펙트럼 선폭의 특성이 매우 우수하여야 한다. UV 영역의 DIAL에 사용되는 레이저는 수십 nm의 파장가변 범위와 수 mJ의 출력, 10 pm 이하의 스펙트럼 선폭을 가져야 하므로 파장가변이 용이한 색소레이저 또는 고체레이저 등이 사용된다.^[4]

색소레이저에서 스펙트럼 선폭이 좁아진 두 개의 파장을 가변하는 방법은 일반적으로 몇 개의 분산광학소자로 각 공진기를 구성하고 이것들을 각각 증폭하여 큰 출력에너지를 얻는다. 이러한 구조는 광학계가 복잡하여 운전의 신뢰도가 낮고 시스템의 부피가 크다는 단점을 지닌다.^[5,6] 따라서 하나의 색소레이저 시스템으로 두개 이상의 파장을 동시 출력할 수 있는 혼합색소의 방법,^[7] 색소레이저와 Raman셀의 조합,^[8] 광학 소자만의 조합

으로 두 파장의 동시출력^[9] 등의 연구가 보고되고 있다. 특히, 회절격자를 이용하여 두 파장을 동시 출력하는 공진기의 방법은 첫 번째 회절격자를 grazing-incidence 방법으로 구성하여 제 2차 회절차수의 빔을 두 번째 회절격자에 입사하여 두개의 파장을 동시에 얻는 직렬 회절격자방법,^[9] 입사광을 반투명 거울(BS)로 분할하여 두개의 회절격자로 공진기를 구성하는 리트로방법,^[10] 프리즘에서 분산된 빔의 광로로 공진기를 구성하는 방법^[11,12] 등이 있다. 그런데, 직렬 회절격자방식과 BS를 이용한 리트로방식은 입사광을 분할하므로 출력효율이 낮고, 프리즘 방법은 근접파장을 분산하는데 한계가 있다. 따라서 출력효율을 높이고 1 nm 이하의 근접파장을 출력할 수 있는 공진기의 구성은 DIAL용 레이저에서 중요한 연구과제이다.

본 연구에서는 1200 g/mm 회절격자에 grazing-incidence 방법을 사용하여 이의 제 1차 및 제 2차 회절차수로 색소레이저의 공진기를 구성하여 두개의 파장을 동시에 출력하고 출력파장은 철퍼(chopper)로 선택하는 쌍공진기 시스템을 개발하였다. 또한 쌍공진기는 본 연구를 위해 개발된 XeCl 레이저 펌핑 색소레이저의 2단 증폭 시스템에 조합하여 파장가변 색소레이저 시스템을 구성하였다. 본 논문에서는 개발된 쌍공진기의 출력특성과 시스템의 설계 변수를 제시하고자 한다. 또한 개발된 색소레이저 시스템은 DIAL의 레이저 광원으로 사용하여 수원 상공의 NO₂가스 농도분포를 측정하였으며, 이의 결과 쌍공진기 색소레이저는 DIAL용으로 매우 유용하

*본 연구는 과학기술처 '95국제공동연구과제 [I-1-068]에 의해 과학기술처와 LG 산전주식회사의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

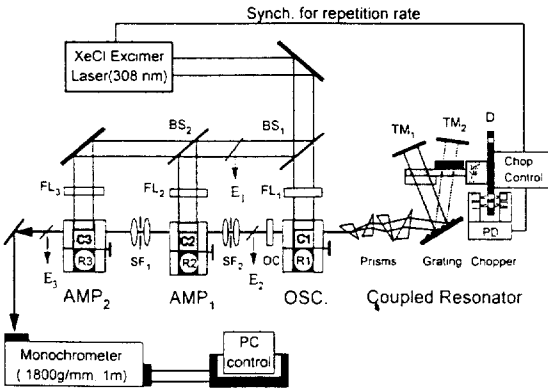


그림 1. Schematic diagram of double-cavity dye laser and two amplifiers. TM: total mirror, BS: beam splitter, SF: spatial filter, FL: focal lens, OSC: oscillator, D: disk, AMP: amplifier, OC: output coupler, PD: photodiode, C and R: dye cell.

였음을 확인하였다.

II. 실험 장치

1. Grazing-incidence형 쌍공진기

그림 1은 XeCl 레이저로 펄핑하는 펄스형 색소레이저의 쌍공진기와 이의 2단 증폭시스템에 대한 배치도를 나타낸다. 쌍공진기는 하나의 회절격자로 grazing-incidence 방법에 의해 두개의 공진기를 구성하고 각각의 출력과장은 출력로 선택한다.

회절격자와 전반사경으로 구성된 grazing-incidence 방식의 기본 식은 다음과 같고, 그림 2로 나타낸다. 여기서 입사광의 파장, m 은 회절차수, d_0 는 회절격자의 슬릿간격, α_1 은 회절격자의 법선에 대한 입사각, α_2 는 $m=1$ 때 회절각, α_2' 는 회절차수 $m=2$ 때 회절각이다. 표 1은 회절격자 1200 g/mm와 coumarin-450 색소를 사용할 때 회절각 α_2 와 α_2' 의 설계 값이다. 이때, 입사각 α_1 은 65° 이다.

$$m\lambda = d_0(\sin\alpha_1 \pm \sin\alpha_2)$$

Grazing-incidence 방식의 쌍공진기는 입사각 α_1 에 대한 제 1차 및 제 2차 회절차수의 광로에 있는 전반사경 TM_1 , TM_2 와 색소발진기의 출력거울 OC로 두개의 공진기를 구성한다. 회절격자는 크기가 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이고 격자수는 1200 g/mm이며, TM_1 과 TM_2 는 크기가 $80 \times 20 \text{ mm}^2$ 이고 400~700 nm의 파장대역에서 반사율은 40%이다. 회절격자의 출력은 프리즘으로 구성된 beam expa-

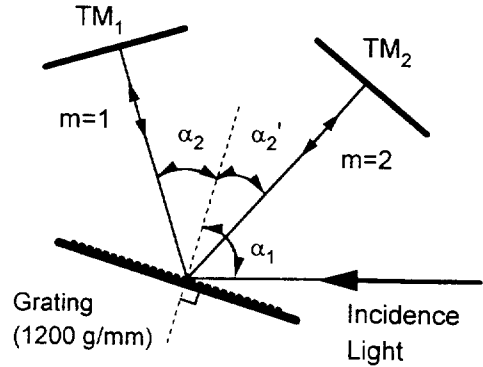


그림 2. Principle of grazing-incidence grating for double-resonator.

TM_1 and TM_2 : total mirror.

표 1. Angle of diffraction of α_2 and α_2' at $d_0=1/1200$ (g/mm) and $\alpha_1=65^\circ$.

| 회절차수 | 회절각 | 430~480 nm |
|-------|-------------|------------|
| $m=1$ | α_2 | 23.0~19.3° |
| $m=2$ | α_2' | 7.2~14.2° |

nder(BE)를 통하여 색소발진기에 입력된다.

또한 회절격자와 TM_1 과 TM_2 사이에는 두개의 날개가 설치된 출력거울이 있으며 이것은 쌍공진기의 광로를 선택한다. 출력거울의 두 날개는 원판 D에 결합되어 있고, D에는 지름 방향의 양단에 핀홀과 광다이오드를 장착하여 펄핑 레이저의 트리거 신호와 출력거울의 동작상태를 쌍공진기의 광로와 동기화하여 인식시킨다. 이와 같은 인식신호들은 5~100 Hz범위에서 조절할 수 있다.

2. 색소레이저 증폭시스템

그림 1과 같이 색소레이저의 증폭시스템은 펄핑용 XeCl 레이저, 쌍공진기로 구성된 주발진기, 제 1단 증폭기 AMP1과 제 2단 증폭기 AMP2, 이것들의 동기화 시스템과 계측기 등으로 구성되어 있다.

XeCl 레이저는 펄스폭 12 ns(FWHM), 반복율은 최대 100 Hz, 출력에너지는 100 mJ이며, 빔의 크기는 $20 \times 10 \text{ mm}^2$ 이다^[13,14]. 색소레이저를 펄핑하는 XeCl 레이저는 BS1과 BS2에 의해 배분되며, 45°의 입사각에서 80%와 40%의 반사율을 각각 갖는다. 펄핑 광은 초점거리가 10 cm인 실린더형 렌즈에 의해 집중되며, 이때 빔의 단면적은 $25 \times 0.6 \text{ mm}^2$ 이다.

주발진기 OSC와 2단의 증폭기에 사용한 색소 셀의 프레임은 SUS-306으로 제작되었으며, 펄핑 창과 공진기

창의 지름은 1인치이고 재질은 용융석영이다. 색소 셀의 펌핑 유효단면적은 $25.4 \times 5 \text{ mm}^2$ 이다. 그림과 같이 OSC와 AMP₁, AMP₂의 색소셀들은 두 종류의 색소를 필요에 따라 사용할 수 있도록 C와 R로 표기된 한 쌍의 셀로 구성되어 있다. 이것은 440~450 nm와 580~610 nm범위의 파장가변을 전제로 하고 있다. 또한 주발진기와 증폭기의 사이에는 공간필터 SF₁, SF₂를 설치하여 색소레이저의 증폭자발방출출력을 최소화하였다.

파장의 변화에 따른 레이저 출력은 에너지미터(Moletron, J-25), 분광기(Acton Research, AM-510)와 레이저 파형은 응답시간 1 ns 이하의 광다이오드(러시아 PIC 연구소 제작)를 사용하여 측정하였다. 펌핑에너지와 출력에너지는 E₁, E₂, E₃의 포인트에서 각각 측정하였다.

III. 실험 결과

1. 에너지 출력특성

실험에서 사용된 Coumarin-450 색소용액의 농도는 주발진기에서 $6.0 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 이고, 두단의 증폭기에서 $3.5 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 이고, 각 용액은 펌프에 의해 순환되도록 하였다. 색소레이저의 주발진기 셀을 XeCl 레이저로 펌핑한 후 레이저가 출력되기까지의 지연시간을 발진파장에 따라 측정할 경우 그림 3과 같다. 그림에서 435~470 nm의 파장대역에서 레이저의 형성시간은 6~13 ns의 범위 내에 분포되고, 이 값은 증폭기를 펌핑하는 펌프

필스의 지연시간의 한계를 결정한다. 또한 쌍 공진기의 TM₁과 TM₂에서 레이저가 각각 형성되는 시간차는 435~470 nm의 범위 내에서 TM₁은 TM₂보다 2~3 ns 만큼 빠르다. 이 이유는 전반사경 TM₁으로 회절되는 제 1차 회절차수 세기가 제 2차 회절차수의 세기보다 강해 상대적으로 빨리 발진하게 된다.

그림 4는 색소레이저의 주발진기의 출력 90 μJ을 두단의 증폭기에 주입했을 때, 펌프에너지에 대한 추출효율과 증폭이득을 나타내며, 이때 파장은 448 nm이다. 추출효율은 두 단의 증폭기에 가해지는 펌프에너지와 증폭기의 출력에너지의 비를 백분율한 것으로, 측정위치는 그림 1의 E₁과 E₃이다. 펌프에너지가 75 mJ일 때 증폭이득은 37 dB로 최고 값을 가지며, 펌프에너지가 75 mJ 이상 증가하더라도 이득은 더 이상 증가하지 않고 포화된다. 또한, 증폭기에서 추출효율은 펌프에너지가 증가함에 따라 증가하다가 75 mJ일 때 9%로 최고 값을 가지며, 그 이상의 값에서는 감소하게 된다. 이는 증폭이득의 증가가 둔해지면서 추출효율은 상대적으로 작아지게 되는 이유이다. 첫 번째 증폭단에 90 μJ의 입력신호를 주입했을 때 추출효율과 증폭이득의 최고 값에 대한 최적의 펌프에너지를 조사하면 28 dB의 이득과 32 mJ의 펌프에너지 값을 갖는다. 또한, 첫 번째 증폭기를 통과한 입력신호를 두 번째 증폭기에 주입시킬 때, 최적의 펌프에너지와 증폭이득은 43 mJ과 9 dB값을 갖는다.

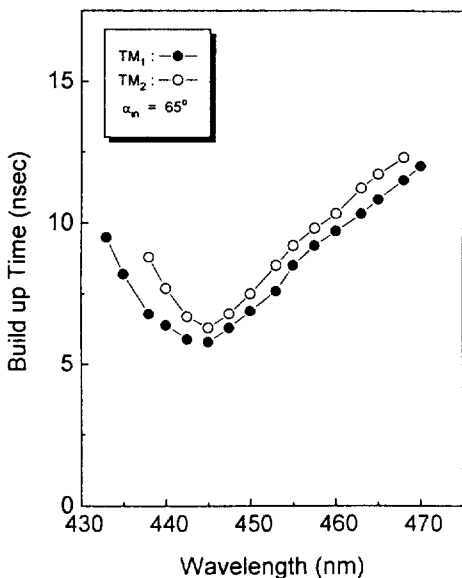


그림 3. Build-up time of coumarine-450 dye oscillator.

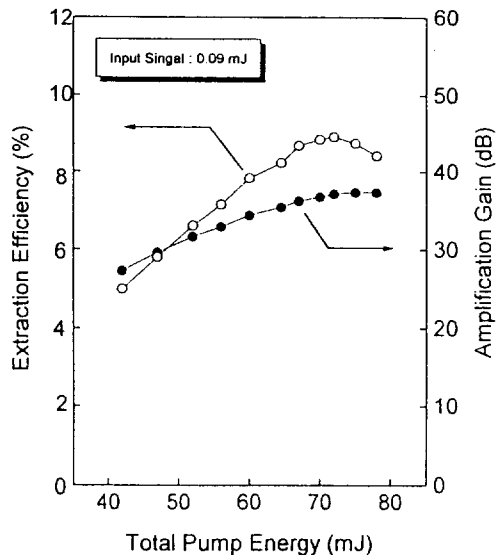


그림 4. Amplification gain and extraction efficiency dependent on pump energy of amplifier at condition input signal, E_{in}=0.09 mJ.

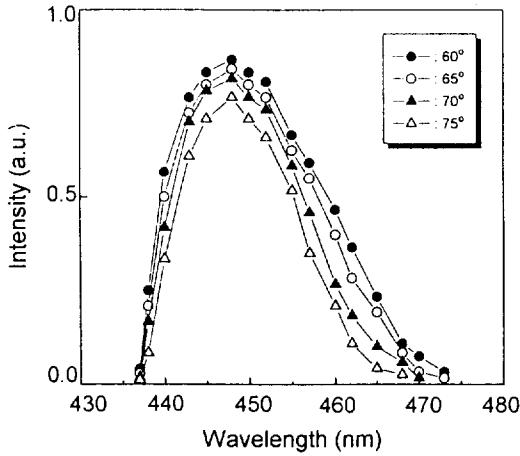


그림 5. Tuning curve dependent on incidence angle to diffraction grating.

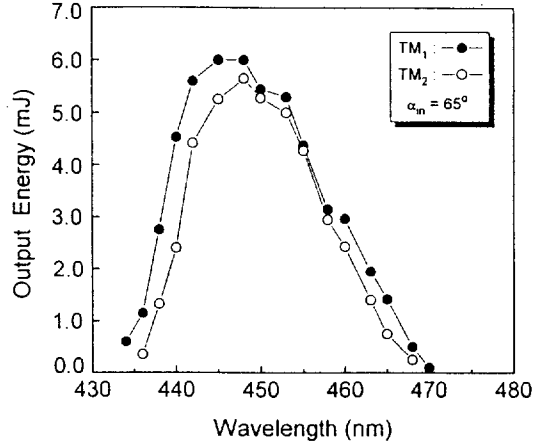


그림 6. Tuning curve of the double-cavity dye laser system.

2. 가변파장 특성

그림 5는 주발진기의 공진경로에서 회절격자에 대한 입사각의 변화에 따라 출력되는 에너지의 분포를 표현한 것이다. 회절격자에 대한 입사각이 커지면 각에 따른 회절격자의 분해능이 높아지고 스펙트럼 선폭은 좁아지지만, 상대적으로 회절격자에서 손실이 커지게 되어 출력에너지는 작아지고 가장자리 부분의 발진이 어려워진다. 스펙트럼 이득이 가장 높은 448 nm의 파장에서 회절격자의 법선에 대한 입사각이 60°일 때 스펙트럼 선폭은 10 pm보다 크고 입사각이 65°와 70°일 때 약 9 pm이며, 입사각이 75°일 때에는 8 pm보다 작은 선폭을 출력한다. 따라서 본 연구에서는 10 pm 이하의 선폭이 요구됨으로 입사각을 65°로 고정하였다.

그림 6은 완성된 레이저시스템에서 색소 Coumarine-450에 대한 Tuning Curve로 구성된 두개의 공진기를 순차적으로 동작하였을 때 얻은 결과이다. 전체 발진영역은 TM₁에 대해 434~470 nm이고, TM₂에 대해 436~468 nm이며, 448 nm에서 최대 출력에너지를 갖는다. DIAL 측정에서 이용되는 파장 448.00(TM₁: λ_{on})과 449.85 nm(TM₂: λ_{off})에서 약 6 mJ의 에너지를 가지며, 스펙트럼 선폭은 전체 파장영역에서 10 pm 이하의 선폭을 갖는다. 파장 448.00 nm에서 σ_{on}은 6.95E⁻¹⁹ cm³, α_{off}는 3.0E⁻¹⁹ cm³이고, Δσ(σ_{on}-σ_{off})는 3.95E⁻¹⁹ cm³이다.

3. NO₂ 가스의 측정

본 연구에서 개발된 쌍공진기 쌍공진기 색소레이저의 성능을 평가하기 위해 사용된 DIAL 시스템^[15]은 송신광학계, 송신용 회전거울, 수신망원경, 스펙트럼 분석기, 신호처리

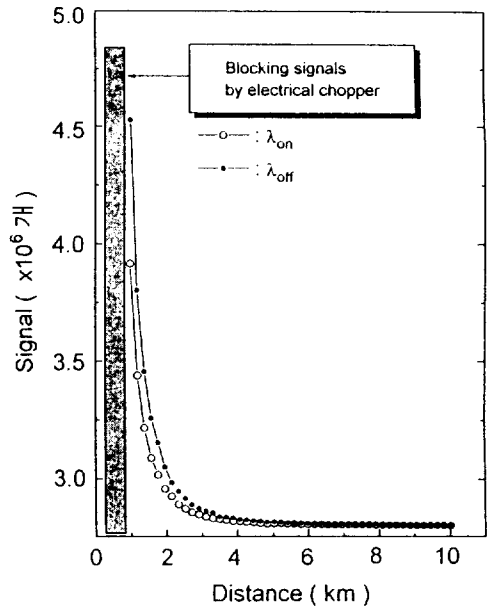


그림 7. Backscattering signals of 448.00(λ_{on}) and 449.85 (λ_{off}) nm wavelengths in atmospheric NO₂ pollutant DIAL.

컴퓨터로 구성되어 있다. DIAL 시스템의 송신광로는 레이저의 쌍공진기에서 출력되는 두 파장은 회전거울을 통하여 대기 중에 순차적으로 송신되며, 회전거울은 시준기를 통하여 수직각 0~30°, 방위각 0~360°로 조정된다. 또한 후방 산란된 수신 광은 300 mm×600 mm의 회전거울을 통해 망원경의 첫 번째 거울과 두 번째 거울에 의해 집속된다. 망원경의 지름은 302.8 mm, 초점

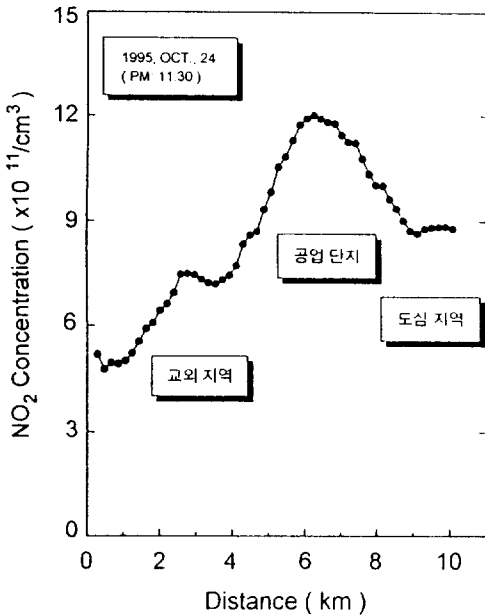


그림 8. NO₂ concentration dependent on distance over Suwon.

거리는 1514 mm, 수신 시계각(Field of View)은 5개의 구멍이 있어 0.3, 9.6, 1.6, 3.2, 6.4 mrad을 단계별로 변화시킬 수 있다. 또한 집속된 수신 광들은 광증배관(모델명: FEU-83)과 광계수기를 통하여 PC에 의해 데이터 처리를 하게 된다^[6]. 본 DIAL 시스템의 최소 검출 농도는 $5E^{+10}/cm^3$ 이며, 최대 검출가능거리는 10.5 km까지이다. 거리에 대한 측정오차는 1 m 이내이며, 농도에 대한 오차 시뮬레이션을 통해 거리에 대한 오차는 5 km까지 10%, 10 km까지 15% 이내의 결과를 갖는다.

그림 7은 파장 448.00과 449.85 nm의 두 파장을 순차적으로 송신하여 후방 산란된 수신신호이다. 측정을 위해서 북극을 기점으로 하는 방위각은 240°이고, 수직각은 5°이다. 그림에서 거리에 대한 분해능은 192 m이고, 1 km까지는 광증배관의 과포화를 막기 위해 전기적인 출력에 의해 후방산란 신호가 차단되었다.

개발된 색소레이저의 448.00 nm(on 파장)와 449.85 nm(off 파장)을 대기중에 송신하여 측정된 NO₂ 가스의 농도 분포는 그림 8과 같다. 측정된 NO₂ 가스의 농도는 거리에 따라 $3.0 \times E^{+11} \sim 1.2 \times E^{+12}/cm^3$ 의 분포를 보여주고 있다. 측정지역은 수원근교이며, 측정위치에서 5~8 km에 있는 공업단지 지역은 NO₂ 가스농도가 $\sim 1.2 \times E^{+12}/cm^3$ 로 가장 크다. 이와 같은 측정값은 수원 시내에서 측정된 1994년도 10월 평균 NO₂ 농도 $2.0 \times E^{+11} \sim 2.0 \times E^{+12}/cm^3$ 내에

포함됨^[7]을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 XeCl 레이저 펄핑 쌍공진기 색소레이저의 성능은 DIAL 시스템에 유용함을 확인하였다.

IV. 결 론

회절격자에 grazing-incidence 방법을 사용하여 이의 회절차수 제 1차 및 제 2차로 쌍공진기를 구성하여 두 개의 파장을 출력하는 주발진기를 개발하고, 이것을 2단의 증폭시스템에 조합하는 파장가변 색소레이저를 개발하였다. 개발된 레이저 시스템에 Coumarine-450 색소를 사용할 때 XeCl 레이저로 펄핑된 색소레이저 출력의 스펙트럼 선폭은 10 pm 이하, 쌍공진기의 파장가변영역은 434~470 nm와 436~468 nm이다. 일정한 펄핑에너지에서 최고의 증폭이득과 추출효율을 얻기 위해 최적화 실험하여 2단의 증폭기에서 증폭이득은 37 dB, 시스템의 추출효율은 9%를 얻었으며, 제작된 색소레이저에서 펄핑에너지에 대한 전체 출력효율은 6% 이상이었다. 주발진기의 쌍공진기에 설치된 출력은 2개의 파장을 순차적으로 출력하고, 원판의 양단에 핀홀과 광다이오드를 장착하여 펄핑레이저의 트리거 신호와 출력의 동작상태를 쌍공진기의 광로와 동기화하여 DIAL 응용에 적합하게 하였다.

본 연구에서 개발된 쌍공진기 색소레이저 시스템을 DIAL용 레이저 광원으로 사용하여 수신시 NO₂ 가스의 농도를 측정하고, 시스템의 성능을 평가하였다. 그 결과로 개발된 레이저 장치는 DIAL 시스템에 매우 적합함을 알 수 있었으며 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] F. Salin, P. Georges, G. Roger, and A. Brun, Appl. Opt. **26**, 4528 (1987).
- [2] H. Edner, K. Fredriksson, A. Sunesson, S. Svanberg, L. Uneus, and W. Wendt, Appl. Opt. **26**, 4330 (1987).
- [3] N. Sugimoto, The Review of Laser Engineering of Japan **19**, 51 (1991).
- [4] Martin, J. T. Milton, The Review of Laser Engineering of Japan **23**, 7 (1995).
- [5] I. Shohsan, N. N. Danon and U. P. Oppenheim, J. Appl. Phys. **48**, 4495 (1977).
- [6] R. Wallenstein and T. W. Hansch, Appl. Opt. **13**, 1625 (1974).
- [7] Chul H. Oh and In H. Hwang, J. Appl. Phys. **67**

- (3), 1602 (1990).
- [8] T. Imasaka, S. Kawasaki, and N. Ishibashi, *Appl. Phys.* **B49**, 389 (1989).
- [9] L. G. Nair and K. Dasgupta, *J. IEEE J. Quantum Electron.* **QE-16**, 111 (1980).
- [10] L. G. Nair, *Appl. Phys.* **20**, 97 (1979).
- [11] R. K. Jain and J. P. Heritage, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 41 (1978).
- [12] R. Scheps and J. F. Mayers, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-30**, 1050 (1994).
- [13] 박홍진, 이주희, 한국광학회지 투고중.
- [14] H. J. Park and C. H. Lee, in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, Chiba, Japan, 14 July, 1995 *Technical Digest*, WH2-1130, p75.
- [15] 이용우, 박성규, 박찬봉, 이주희, 홍경희, 제 11회 파동 및 레이저 학술 발표회 논문요약집, III-1, 7 (1996).
- [16] 이용우, 박찬봉, 이주희, 한국광학회지 투고예정.
- [17] 한국환경부, 1995년도 환경통계연감, pp 70~71.

Wavelength Tunability of XeCl Laser pumped Double-resonator Dye Laser for DIAL

Yong Woo Yi and Choo Hie Lee

Institute for Laser Engineering, Kyung Hee University, Yongin, 449-701, Korea

(Received: May 13, 1996)

We have developed XeCl laser pumped double-resonator Dye laser and two-stage amplifier system, and generated simultaneously or alternatively two wavelengths suitable in DIAL system. The developed double-resonator is composed of 1st and 2nd diffraction orders on light incidence angle in grazing-incidence grating method with 1200 g/mm. We have obtained spectral linewidth below 10 pm and the total efficiency dependent on pump energy over 6%. The tuning ranges dependent on 1st and 2nd diffraction orders are 434~470 nm and 436~468 nm, respectively. The amplification gain and extraction efficiency of two-stage amplifier are 37 dB and 9%, respectively. We have generated Coumarine-450 dye laser by using the double-resonator laser system and measured the distribution of NO₂ concentration over Suwon as the result of transmission of laser output of 6 mJ in this DIAL system. Consequently, we have confirmed that the developed dye laser system is very useful as the tunable source for DIAL.