《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 15, Number 6, December 2004

광음향 효과에 의한 고주파 여기식 CO_2 레이저의 주파수 및 출력 안정화

최종운† · 유문종

호남대학교 정보통신공학과
㉾ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

우삼용 · 서호성

한국표준과학연구원
㉾ 305-600 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2004년 7월 30일 받음, 2004년 11월 4일 수정본 받음)

고주파 여기식 CO_2 레이저의 주파수와 출력을 레이저 공진기 자체에서 발생하는 광음향효과를 이용하여 안정화하였다. 레이저 공진기 속의 복사선 세기를 임의로 변화시킬 때 광음향효과에 의해서 레이저 매질가스의 압력이 변화하였다. 공진기 속에 설치한 컨덴서마이크를 사용하여 미세한 압력변화를 전압신호로 변환시켜 록인안정기의 입력신호로 사용하였다. P(20)선에서 발진하는 레이저를 이득곡선의 꼭지점에 레이저의 주파수와 출력을 안정화 시켰을 때, 광주파수 상대 안정도는 5.4×10^{-8}이었고, 레이저 출력 변화율은 9.3%로 안정화되었다.

주제어 : RF excited, CO_2 laser, photoacoustic effect, frequency stabilization.

I. 서 론

CO_2 레이저는 원적외선 영역에서 정밀한 광주파수 표준으로 사용되고 있으며,[1] 고분해 적외선 분광학에서도 중요한 도구로 많이 사용되고 있다.[2] 이와 같은 계측학 분야에 응용하기 위해서는 레이저의 주파수와 출력이 안정되어야 한다.

레이저의 광주파수는 공진기를 구성하는 두 개의 반사경 사이의 간격에 의해서 달라진다. 따라서 공진기의 길이를 일정하게 안정시키면 레이저의 주파수가 안정화된다. 통상, 열팽창이나 진동에 따른 공진기 길이변화에 대응하여 공진기 길이를 일정하게 하기 위해서, 안정화 시키려고 하는 레이저 이득곡선의 꼭지점을 기준으로 삼아 안정화를 시키게 된다.[3]

레이저의 광주파수와 출력을 안정화하기 위해서는 안정화 시키고자 하는 레이저의 이득곡선 상의 발진위치 변화와 레이저 외부에서 관찰 가능한 요소와의 관계를 찾아야 한다. 이를 위해서 다음과 같은 세 가지 방법이 많이 사용된다. 첫째 방법은 레이저 공진기의 한쪽 반사경에 PZT(Piezoelectric translator)를 부착한 뒤 임의의 진동수로 공진기 길이를 변화시키면, 이에 따라서 레이저 출력의 크기도 진동을 하게 된다. 이때 레이저 출력의 일부를 광분할기로 분할한 뒤 광 검출기로 검출한 출력 변화를 안정화를 위한 기준신호로 사용하여 이득곡선의 꼭짓점에 안정화하는 방법이다. 이 방법은 레이저 출력의 일부를 사용하므로 출력이 감소되며, 레이저 광로에 광분할기를 설치하므로 광분할기의 광축정렬에 어려움이 있고 레이저 횡모드의 변화 우려가 있다. 둘째 방법은 레이저 공진기 내부 혹은 외부에 고전압 직류 방전관과 같은 기준관을 설치하여 방전관에서 발생하는 물리적인 신호를 기준신호로 사용하는 방법이다.[4] 이 경우는 레이저 공진기 내외부에 기준관 설치로 인하여 레이저 발진 효율이 저하될 수 있고 레이저 구조가 복잡하게 된다. 셋째방법은 공진기 자체에서 발생하는 광전류효과(opto-galvanic)[5] 혹은 광음향(photoacoustic)[6] 효과와 같은 물리적인 현상을 이용하는 방법이다. 광전류효과는 DC 고전압 방전을 이용한 CO_2 레이저 공진기 속의 복사선 세기가 변화할 때 레이저 방전관 양단에서 발생하는 전압 혹은 전류변화이고, 광음향효과는 공진기 속의 압력변화이다. 광전류효과를 이용하면 비교적 간단한 장치로 레이저의 주파수를 안정화 할 수 있다. 그러나 광전류효과는 안정화 장치의 구조가 대단히 간단한 장점을 가지고 있으나, 고전압 방전에 따른 강한 잡음 발생에 의해서 안정화가 불안정한 단점을 가지고 있다.

본 논문은 고주파 방전 여기식 CO_2 레이저를 공진기 자체에서 발생하는 광음향효과를 사용하여 레이저의 출력과 주파수를 안정시키는 방법에 관하여 기술하였다. 즉 레이저 공진기 내부에 레이저 가스 압력변화를 검출하기 위한 콘덴서 마이크를 설치하여 레이저 공진기 자체에서 발생하는 광음향효과에 따른 미세한 압력변화를 전기신호로 변환하여 안정화에 이용하였다. 레이저 이득곡선의 꼭지점에 레이저가 동작하도록 공진기 길이를 안정화하여 고주파 방전 여기식 CO_2 레이저의 출력과 주파수를 안정화시키는 방법에 관하여 기술하였다.

†E-mail: woon@honam.ac.kr

II. 광음향효과와 주파수 안정화 방법

2.1. 고주파 방전관의 광음향효과

연속발진 CO_2 레이저는 높은 효율을 가지고 있고 레이저 복사선의 세기가 크므로 복사선의 세기를 변화시키면 거시적 매개 변수들에 변화를 줄 수 있다.[7] 만약 공진기 내부에 설치된 변조기를 사용하거나 공진기의 정열을 바꾸는 방법 등을 이용하여 공진기 내부의 레이저 복사선 세기를 변화시키면 광의 세기, 스펙트럼 분포, 가스압력, 방전 전류와 방전 임피던스 등의 모든 것이 함께 변하게 된다.

공진기 속의 복사선 세기가 변화할 때 연속발진 레이저의 매질가스 압력이 변화하는 현상은 광음향 효과라 한다.[8] 따라서 레이저 공진기의 광축상에 놓인 PZT에 회절격자를 설치하고, PZT를 임의의 주파수로 진동을 가하면 공진기 길이는 임의의 주파수로 진동하게 된다. 이때 공진기 속의 복사선의 세기는 레이저 이득곡선을 따라서 같은 진동수로 변조되게 된다. 공진기 속의 복사선의 세기가 1% 정도만 변화하여도 방전관 속의 가스압력이 상당한 변화(~0.1%)를 일으키게 된다[7]. 이와 같은 레이저 방전관의 미세한 압력 변화를 콘덴서 마이크를 사용하여 검출하면 공진기 속에서 변화하는 복사선의 세기를 측정할 수 있다.

2.2. 공진기 길이 안정화 방법

패브리페로(Fabry-Perot) 공진기로 동작하는 기체 레이저의 발진 주파수와 출력은 공진기의 광학적 길이에 의해서 달라진다. 기체 레이저의 방전관은 방전 전류에 의해 가열되어 열팽창을 하게 된다. 이에 따라 공진기의 길이가 변화하게 되고 공진기의 길이 변화는 레이저의 발진 주파수와 출력의 변동으로 나타난다. 즉 방전관 온도의 변화, 기계적인 진동, 레이저 매질 가스의 압력 변화 등 주위 환경에 따라 변화하는 레이저 공진기의 광학적 길이가 외부 조건과 관계없이 일정하게 유지되도록 해 주어야 레이저의 주파수와 출력을 안정화 시킬 수 있다.

본 연구에서는 레이저 공진기의 길이를 일정하게 유지하는 방법으로 그림 1과 같은 레이저의 이득곡선 꼭짓점을 기준으로 한 안정화 방법을 사용하였다. 이득곡선의 꼭짓점을 찾는 장치로 록인앰프를 사용하였다. 록인앰프는 일반적으로 잡음이 심한 환경에서 아주 작은 신호를 측정하고자 할 때 많이 사용되나, 본 실험에서는 레이저의 주파수를 변조시키고 그 1차 하모닉 신호를 이용하여 레이저 이득곡선의 꼭짓점에 레이저의 주파수를 안정할 목적으로 사용하였다.

가스 레이저의 이득곡선은 가우스형 분포로 나타나는 도플러 확대(Doppler broadening), 로렌츠형 분포로 나타나는 압력 확대(pressure broadening) 및 레이저 천이선의 자연선폭의 합으로 나타나게 된다. 즉, 레이저 이득곡선은 이들 넓어지기가 종합되어 있는 Voigt profile로 주어진다[7,8]. 가스압력에 의한 확대 효과가 가장 크게 나타나는 CO_2 레이저의 경우에는 가우시안 형태로 이득곡선에 근사한다.[9]

$$g(\omega) = g_0 e^{-\frac{4\ln 2(\omega-\omega_0)^2}{\Gamma^2}} = g_0 f(\omega) \tag{1}$$

여기에서 $g(w)$는 주파수에 따른 이득이고, g_0는 이득의 최고 값, w_0는 레이저 천이 중심 주파수, Γ 자연선폭(FWHM)이다.

레이저 공진기의 길이를 변화시키는 방법을 사용하여 레이저 광주파수를 변조하면,

$$w_m(t) = w(1 + M \sin \Omega t) \tag{2}$$

여기에서 M은 변조도이며 1보다 아주 작은 값이고, Ω는 변조주파수이다. 이때 레이저 출력도 함께 변조되는데, 레이저 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$P_m(t) = P_0 f(\omega_m) \tag{3}$$

만약 변조도가 대단히 작은 경우($M \ll 1$)는 다음과 같이 이 함수의 테일러 전개로 표시할 수 있다.

$$f(w_m) \approx f(w) + f'(w)(w_m - w) + \ldots \tag{4}$$

위와 같은 방법으로 변조시킨 레이저 출력 변화를 록인앰프의 위상민감 검출기(Phase Sensitive Detector, PSD)를 사용하여 1차 하모닉 신호를 검출하고 저주파 필터를 사용하여 적분하면 록인앰프의 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$S(\omega) \propto \int_0^{2\pi/\Omega} P_m(t) \sin(\Omega t + \phi) dt \tag{5}$$

ϕ는 입력신호와 기준신호사이의 위상차이다. 따라서 록인 안정기의 위상 조절기를 사용하면 ϕ를 제거할 수 있다. 식 (2), (3), (4)를 식 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S(\omega) &\propto \int_0^{2\pi/\Omega} P_0\{f(\omega) + f'(\omega)(\omega_m - \omega)\} \sin \Omega t dt \\ &\propto P_0 f'(\omega) \omega M \end{aligned} \tag{6}$$

록인앰프에서 $\phi = 0$으로 조절하면 $S(w) \propto f'(w)$이 된다. 결국 록인앰프의 출력은 이득곡선의 미분 꼴에 비례하는 형태로 된다. 여기에서 $f'(w)$는 식 (1)에서 곧바로 구할 수 있다.

$$f'(\omega) = -8\ln 2(\omega - \omega_0)\Gamma^{-2} e^{-\frac{4\ln 2(\omega-\omega_0)^2}{\Gamma^2}}$$

그림 1(a)은 레이저 이득곡선에서 임의의 주파수 w를 중심으로 w_m로 변조되었을 때 레이저 출력 변화 $\triangle P$를 표시하였다. $\triangle P$ 값의 위상변화를 살펴보면, w가 w_0보다 작은 값

에서는 ($w<w_0$) 변조주파수 신호 위상과 $\triangle P$ 신호위상이 같아져서 록인앰프의 출력신호와 전압이 출력된다. 한편 w가 w_0보다 큰 값에서는 ($w<w_0$) 변조 주파수 신호 위상과 $\triangle P'$ 신호 위상이 반대가 되어 록인앰프의 출력신호는 전압값이 출력된다. 결국 록인앰프의 출력신호는 그림 1의 아래 그래프와 같이 미분신호인 분산형 신호가 된다. 이득곡선 상에서 변조된 신호가 록인앰프에 의해서 혼합되고 적분되었을 때 이득곡선의 미분신호는 그림 1(b)와 같이 표시된다. 만약 레이저가 중심주파수 w_0와 정확히 일치하면 록인앰프의 출력이 영이 되므로 레이저 공진기로 궤환 되는 값도 영이 된다. 만약 레이저가 중심주파수 w_0보다 낮은 쪽에서 공진되면, 록인앰프의 출력은 플러스 값으로 출력되므로 공진주파수는 높은 쪽으로 변화 하게 된다. 따라서 록인앰프의 출력신호를 이용하면 레이저 주파수를 중심주파수 w_0쪽으로 유도할 수 있게 된다.[11]

레이저 주파수를 전기적인 신호로 제어하기 위해서 레이저 공진기의 광축상에 놓인 PZT에 Litttow 회절격자를 설치하였다. PZT에 임의의 주파수를 갖는 전기신호를 가하면 공진기 길이 L 은 임의의 주파수로 진동하게 된다. 광의 세기는 레이저 이득곡선을 따라서 같은 진동수로 변조되게 된다. 이때 레이저 발진 모드 주파수가 중심 주파수 보다 낮다면, 광의 세기변화와 레이저 매질가스의 압력변화의 위상은 반대이고, 모드 주파수가 중심선 주파수 보다 높으면 압력변화의 크기는 발진선 중심으로부터 주파수 차와 같이 증가한다. 이와 같이 레이저 공진기의 길이 변화에 의해서 레이저 출력이 변화하면 광음향효과에 의해서 레이저 매질가스의 압력도 변화하게 된다. 따라서 공진기 속의 미세한 압력변화를 측정하면 레이저 출력변화를 알 수 있다. 공진기속의 미세한 압력변화를 측정하기 위해서 공진기 속에 콘덴서 마이크를 부착하였다. 콘덴서 마이크는 자체에 증폭기를 가지고 있기 때문에 외부 바이어스를 가해주는 것만으로 공진기 내부의 복사선 세기 변화에 따른 압력변화를 검출할 수 있다. 검출된 광음향 신호를 록인안정기의 주파수 분별기(discriminator)를 이용하여 오차신호로 만든 뒤, 이를 다시 PZT에 궤환 시키는 방법으로 레이저 공진기 길이를 안정화하였다. 레이저 공진기 길이 안정화에 의해서 레이저 광주파수와 광출력도 함께 안정화 된다.

III. 실험 및 결과

3.1. 실험장치

주파수 안정화에 사용한 고주파 여기식 이산화탄소 레이저의 구성도는 그림 2와 같다. 본 실험에 사용한 고주파 여기식 이산화탄소 레이저는 공냉식으로 가스 순환형이다. 길이 646 mm의 공진기에 반사율이 98% 이상이고, 초점거리가 10 m인 실리콘(Si) 재질의 반사경을 설치하였고, 파장선택 및 출력 광학계로는 금코팅된 150 g/mm 평면 회절격자(Jobin-Yovon사)를 사용하였다. 고주파 방전관은 폭이 5 mm이고 길이가 300 mm인 알루미늄으로 된 두개의 전극으로 구성되어 있고, 양쪽 전극 사이에 고주파 에너지를 공급하여 고주파 방전이 일어나도록 하였다. 고주파 방전을 위한 고주파 전원은 주파수는 83 MHz이고 출력은 160 W를 사용하였다. 고주파 발생기와 레이저 공진기 사이에 π-matching 회로를 설치하여 임피던스를 매칭 시킴으로써 레이저 공진기로부터 고주파 에너지의 반사를 최소화 하였다.

레이저 매질용 가스로서 CO_2 : N_2 : He을 5 : 5 : 15 비율로 총 25 torr 압력이 유지되도록 연속적으로 고주파 방전관에 공급하였다. 레이저 출력광에서 선형편광을 얻으면서 반사경과 방전관을 분리하기 위하여 방전관 양쪽에 ZnSe 재질의 브루스터(Brewster) 창을 부착하였다. 공진기 길이의 변

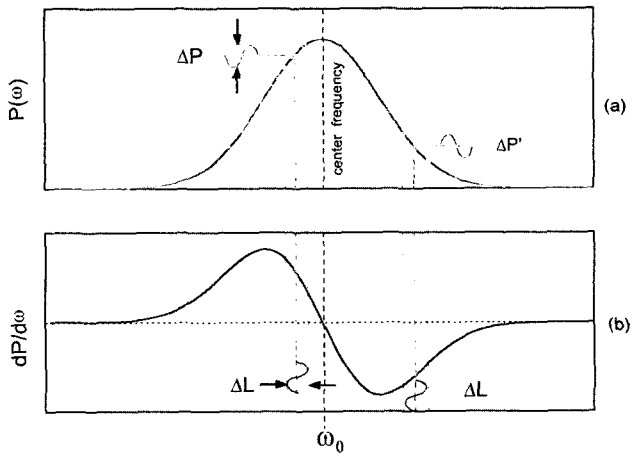

Fig. 1. (a) Gain profile showing the amplitude modulation as a result of the frequency modulation of the laser light. (b) Derivative of the gain profile serving as a feedback signal.

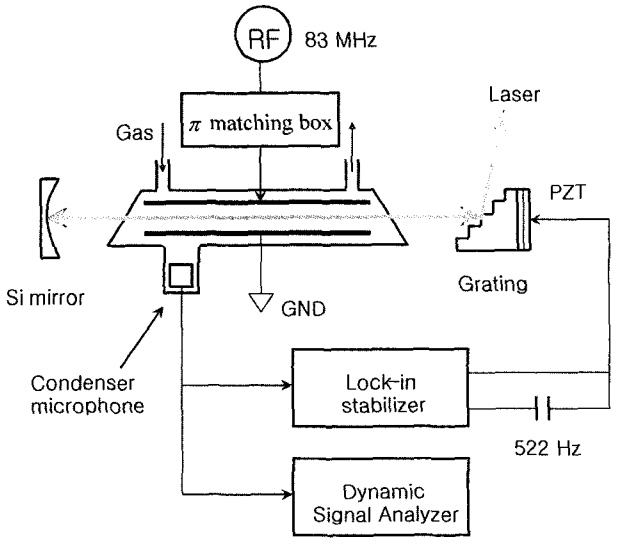

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for the stabilization of radio frequency excited CO_2 laser using the photoacoustic effect.

화, 즉 레이저 주파수를 변화시키기 위해서 최고 16 μm/1600 V의 변이를 줄 수 있는 PZT를 회절격자 뒤쪽에 부착하였다. 레이저의 주파수를 안정화시키기 위해서는 단일 종모드 및 단일 횡모드 발진이 우선되어야 한다. 따라서 기본 발진모드인 TEM_{00} 횡모드로 만들기 위해서, 방전관과 회절격자 사이에 직경이 5 mm인 구멍을 가진 알루미늄 판을 설치하였다. 이와 같은 조건에서 약 1.6 W의 연속출력을 내는 P(20) 레이저 발진선을 선택하여 실험하였다.

기본적인 횡 모드와 10.59 ㎛ P(20)에서 단일 종모드로 동작함을 레이저광 스펙트럼 분석기(Optical engineering: 16A)를 사용하여 확인하였다. 광음향 효과에 따른 방전관 내부의 압력변화를 검출하기 위해서 음극과 브류스터 창 사이에 80 mm 길이의 광음향 검출부를 부착하였다. 검출부 중앙에 직경이 5 mm인 콘덴서 마이크를 설치하였다.

주파수 안정을 위해 사용한 록인안정기(LANSING RESEARCH : 80.215)는 PZT를 직접 구동할 수 있는 고전압 증폭기와 참조 신호용 신호발생기를 함께 가지고 있는 제어용 록인앰프의 일종이다.

3.2. 공진기 길이 변화에 따른 광음향효과 신호

레이저 출력변화에 따른 광음향 신호 유무를 검출하고 공진기 길이변화에 대한 광음향 신호의 추종성을 확인하기 위해서, PZT를 이용해서 공진기 길이를 변화시켰다. 기체 내에서 발생하는 광음향효과에 의한 압력변화의 최대 및 최소 값은 $\tau_{th} \gg 1/\nu \gg \tau_{nr}$로 보고 되었다. τ_{th}는 열이완 시간으로 수초 정도의 시간이고, τ_{nr}은 분자가 여기 되었을 때 비방사 수명으로 $10^{-6} \sim 10^{-9}$초 이다.[10] 따라서 광음향효과로 측정 및 제어 가능한 최고 주파수 대역은 수 MHz로 예상된다. 본 실험에서는 상용으로 사용되는 대역폭이 약 20 kHz인 콘덴서 마이크를 사용하였다. 공진기 변화에 따라 변조된 광의 세기는 광음향효과에 의해서 미세한 압력변화로 나타나므로 그림 2의 공진기 속에 설치된 콘덴서 마이크 양단에 전위차로 나타나게 된다. 여기에서 직류 값을 커패시터를 사용하여 제거한 뒤 다이내믹 신호 분석기(SRS사: SR785)를 사용하여 공진기 진동을 확인하였다. 광음향(PA) 신호 발생을 확인하기 위해 그림 2에서와 같이 PZT에 0~1600 V의 DC 바이어스 전압을 가하여 공진기 길이 변화에 따라 발생하는 임의의 발진선를 검출하였다. 광음향 신호를 유도하기 위해 522 Hz의 정현파를 PZT에 가하였다. 여기에서 정현파의 주파수는 PZT의 공진 주파수 영역 내에서 선택하면 되는데, 미약한 PA 신호와 상용전원 주파수와의 간섭을 피하기 위해서, 상용주파수 60 Hz의 고조파를 제외한 주파수중에서 선택하여 사용하였다.

PZT 진동에 따른 광음향 신호의 유무를 확인하기 위해서, PZT에 약 150 V peak-to-peak 전압의 정현파(522 Hz) 전압 신호를 가하였다. PZT 진동에 따라서 레이저 출력이 변조가 되고, 레이저의 출력변화는 공진기속의 압력 변화로 나타난다. 압력변화는 공진기 속에 설치한 콘덴서 마이크를 사용하면 전위차로 검출된다. 그림 3은 PZT를 정현파로 진동시킬 때 공진기에 발생되는 광음향 신호를 콘덴서 마이크와 DSA를 사용하여 관찰한 것이다.

레이저 이득곡선에 따른 광음향 신호의 크기 변화를 관찰하기 위하여, PZT에 정현파와 함께 1600 V의 램프(ramp)신호를 가하여 공진기 길이를 약 16 μm 변화시켰다. 공진기의 길이가 변화하게 되면 발진선의 이득곡선은 그림 4(b)와 같이 변화하게 된다. 또한 광출력 변화에 대응하는 방전전류는 광음향 효과에 의해서 콘덴서 마이크 양단에 전위변화로 나타나게 된다. 그림 4(c)는 레이저 이득곡선에 따른 광음향 신호의 크기 변화를 관찰 한 것이다. 광음향 신호의 크기는 이득곡선의 기울기에 비례하며, 공진기 길이 760 mm에 해당하는 FSR(Free spectral range) 197.4 MHz 마다 선택한 발진선인 P(20)선의 이득곡선이 반복됨을 확인할 수 있다

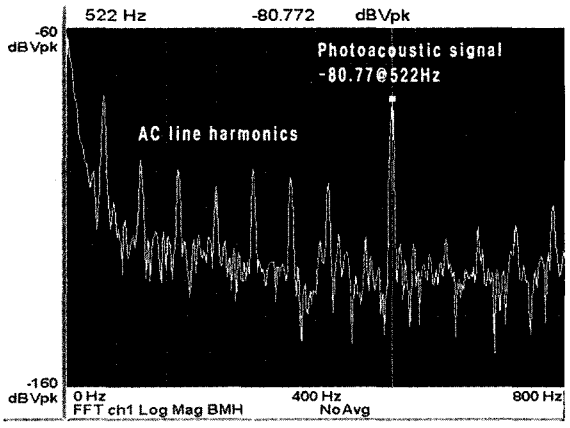

Fig. 3. Spectrum of photoacoustic signal (522 Hz) with harmonics of power line noise, and laser discharge noise.

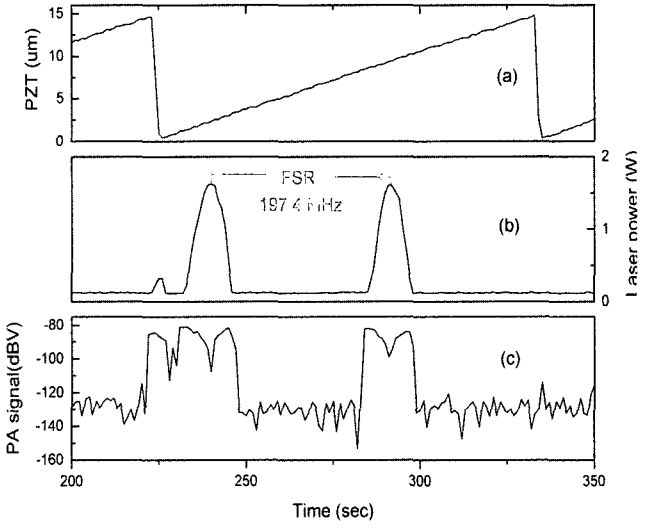

Fig. 4. Variation of laser power and photoacoustic signal as a change of cavity length (a) Variation of laser cavity length, (b) Variation of laser power, distance between two picks shows free spectral range of 760 mm cavity, (c) Variation of photoacoustic signal.

3.3. 주파수 및 출력 안정화

이득곡선의 중앙에 레이저 주파수를 안정화하는 방법은 먼저 회절격자를 회전시켜 천이선을 선택하고, PZT에 가하는 DC 바이어스 전압을 가변 하여 이득곡선의 꼭짓점 주위에서 레이저가 PZT에 변조신호를 가하고 콘덴서 마이크로폰에서 검출된 신호를 록인안정기에 입력하고 출력신호를 다시 PZT에 궤환시키도록 하였다. 이때 PZT에 가해지는 3가지 다음과 같다. 동작점을 찾기 위한 DC 바이어스전압, 레이저 공진기의 길이를 변조하는 록인앰프의 참조 신호인 정현파 신호전압, 오차신호를 적분한 뒤 증폭한 제어 신호전압이다. PZT에 정현파를 가하면 레이저의 출력이 변조된다. 또한 광음향 효과로 인하여 방전관의 압력도 변조된다. 정현파를 기준으로 해서 압력변화 신호를 동시 검파하면 이득곡선의 기울기에 비례하는 전압을 구할 수 있고, 이득곡선의 꼭짓점의 위치를 알 수 있다. 동시검파된 신호는 적분된 뒤 DC 전압으로 바뀌어 PZT에 다시 공급된다. 이때 적분 값은 동시검파된 신호의 크기가 영이 될 때까지 레이저 공진기 길이를 계속 변화시켜 레이저가 이득곡선의 꼭짓점에서 발진하도록 제어한다.

그림 5는 레이저를 광음향효과를 이용하여 주파수 안정화한 것이다. 록인안정기에 의해서 주파수 안정화가 이루어지면서 레이저의 출력도 안정화됨을 알 수 있다.

3.4. 안정도 평가

레이저 주파수 안정도를 판별하기 위해서는 주파수를 정확히 알고 있는 레이저와 혼합될 때 발생되는 비트주파수를 측정하는 방법을 사용하고 있으나, 본 실험에서는 간접적인 방법으로 주파수 안정도를 판별하였다. 그림 5(a)는 공진기 길이 변화에 따른 레이저 출력변화이고, 5(b)는 출력 변화의 1차 미분신호이다. 레이저 출력이 변화하는 구간의 주파수폭을 그림 4(b)와 비교하여 알 수 있다. 그림 5(b)에서 안정화

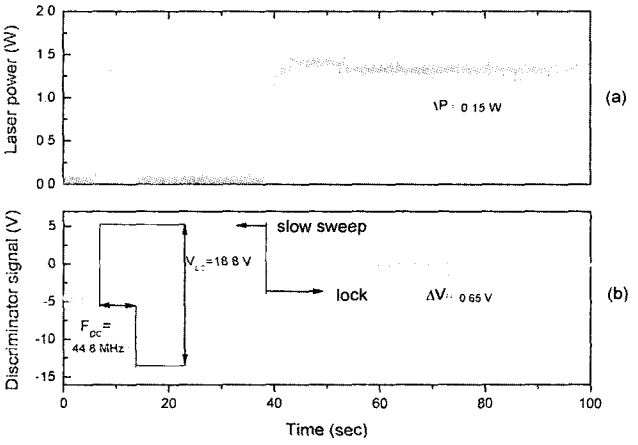

Fig. 5. Results of laser frequency and power stabilization (a) Variation of laser power. (b) DC discriminator signal before and after the laser frequency is locked. Here the laser line is P(20) and the power is 1.3 W.

전의 전압변화와 안정화 되었을 때 미분 신호의 변화폭을 비교하면 안정도를 간접적으로 유추할 수 있다. 즉 5(b)에서 안정화된 레이저 주파수의 흔들림 폭 $\triangle\nu$는 식 (7)과 같이 레이저가 안정화 되었을 때 최대 오차신호의 진폭 $\triangle V$를 주파수 흔들림 폭 V_{DC}와 이득분포의 폭 F_{DC}의 비율에 곱해준 값으로 표시된다.

$$\Delta\nu = \frac{F_{DC}}{V_{DC}}\Delta V \tag{7}$$

본 실험 결과인 그림 5(a)에서 구한 F_{DC}/V_{DC} = 44.8 *MHz*/188.8 *V* = 2.4 *MHz* /*V*이고, 그림 5(b)에서 전압 흔들림 폭은 0.65 V이다. 따라서 본 실험에서 얻어진 주파수 흔들림 폭은 그림 5에서 구하면 약 1.6 MHz이다. 이 값은 발진주파수 10.6 μm(주파수: 2.8×10^{14} Hz))에 대하여 5.7×10^{-8}의 상대 주파수 안정도($\triangle\nu/\nu$)를 의미한다.

한편 레이저를 자유 동작시켰을 때의 출력 변동률은 $\Delta P/P$로 표시되는데, 실험에 사용된 레이저의 공진기 길이를 변화시킬 때 출력이 0 W에서 최고 출력까지 변화(100%)하였다. 이에 대하여 본 방법으로 레이저의 공진기 길이를 안정화했을 때는 흔들림이 9.3%로 개선됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

고주파 여기식 이산화탄소 레이저의 공진기 자체에서 발생하는 광음향 효과를 이용하여 도플러 이득분포의 최대 값에 레이저의 주파수를 안정화 시켰다. 레이저 공진기 자체에서 발생하는 광음향 효과를 이용한 레이저 주파수 안정화는 공진기 내부에 신호 검출용 콘덴서 마이크만을 설치하는 단순한 구조로서 레이저 주파수 안정화와 동시에 출력도 최대 값에 안정화됨을 확인하였다. $CO_2/N_2/He$=5/5/15[torr]의 혼합가스를 이용하여 P(20)라인에 주파수를 안정화 시켰을 때 주파수 흔들림은 1.6 MHz이고, 이를 발진파장에 대하여 환산하면 5.7×10^{-8}($\triangle\nu/\nu$)의 안정도를 나타낸다. 또한 레이저 주파수를 안정화시키면 출력도 함께 안정화 되었을 때 평균출력에 대한 출력안정도는 9.3%로 개선됨을 확인하였다. 본 연구결과는 원적외선 파장에서의 광파장 표준이나 출력 표준 레이저 광원으로 분광기의 파장 교정 등에 사용할 수 있으며 적외선 광계측의 기준광원으로 활용할 수 있을 것이다. 또한 본 방법은 고전압 혹은 고주파로 여기 되는 기체레이저인 CO 레이저와 Xe 레이저의 주파수 및 출력 안정화에도 똑같이 적용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] D.G. Whitford, IEEE QE-18, 428, 1982.
[2] F. R. Petersen, E. C. Beatty and C. R. Pollock, *J. Mol. Spectrosc.*, 102, 1983.
[3] Rohrbeck, A. Hinz, P. Nelle, M. A. Gondal and W. Urban,

Appl. Phys., B31, 139, 1983.
[4] L. Zink, F. S. Pavone, R. Meucci, and M. Inguscio, *Optics Comm.*, 77(1), 41, 1990.
[5] J. W. Choi, Y. P. Kim, and Y. M.Kim, Rev. Sci. Instrum. 68, 12, 4623-4624, 1997.
[6] Chin-Chun Tsai, Tyson Lin, Cherng-Yn Shieh, Tsu-Chiang Yen, and Jow-Tsong Shy, *Appl. Opt.*, 30(27), 3842, 1991.
[7] A. L. S. Smith and S. Moffatt, Optics comm., 30, 409, 1975.
[8] P. E. Jackson, K. M. Abramsik, and D. R. Hall, *Appl, Phys.*, B 47, 149, 1988.
[9] M. F. Baclayon, J. W. F. Liwang and G. J. Kuik, Annual report, Univ. San Carlos, 2004,
[10] Thony A., Sigrist M.W., Infrared Phys. Technol., 36, 585-615, 1995.
[11] 서호성, 박사학위논문, 영남대학교 물리학과, 1993.

Frequency and power stabilization of radio frequency excited CO_2 laser using photoacoustic effect

Jong-woon Choi† and Moon-jong Yu

Department of Information and Communication, Honam University, Gwangju, 506-714, Korea
†*E-mail: woon@honam.ac.kr*

Sam-yong Woo and Ho-suhng Suh

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejon, 305-600, Korea

(Received July 30, 2004, Revised manuscript November 4, 2004)

We stabilized the frequency and power of a CW radio-frequency-excited CO_2 laser on the peak of the Doppler broadened gain curve using the photoacoustic effect generated from the laser itself. The condenser microphone is installed in the radio frequency discharge chamber to detect a photoacoustic signal. The photoacoustic signal is fed to a lock-in stabilizer as a reference signal for stabilization. The frequency stability is estimated to be better then 5.4×10^{-8} at the P(20) line. The stabilized output variation was reduced 9.3%, compared to 100% for a free running laser.

OCIS Codes : 140.3470, 140.3410, 230.7400.