파장가변 Ti:sapphire 레이저의 협대역 특성

이용우 · 이주희
경희대학교 전자공학과

Sergey Nikolaevich Sergeev
Physical Instrumentation Center of General Physics Institute, Russia

(1994년 10월 11일 받음)

본 논문은 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파로 펄스 펌핑된 파장가변형 Ti:sapphire 레이저의 협대역 특성을 연구하였다. Ti:sapphire 레이저는 rod의 양단에서 펌핑하여 균일한 여기 분포를 갖도록 하였고, 공진기의 격자를 선형적으로 제어하여 705~835 nm의 넓은 범위에서 연속적인 파장 선택을 실현하였다. 이때, 회절격자 제어계의 분해각은 0.27″/pulse 이다. 중심파장 790 nm때 출력 에너지는 380 μJ, 레이저 출력이 최대 출력의 50% 이상되는 파장 범위는 730~825 nm, 스펙트럼 선폭은 0.13 cm^{-1}, 빔 발산각은 1.2 mrad을 각각 얻었다.

I. 서 론

Ti:sapphire 레이저는 1982년 Moulton에 의해 파장가변 레이저로 처음 개발된 후,[1] 색소 레이저의 특성에 대체될 수 있는 레이저로 주목을 받으면서 최근 극초단파 레이저 분야[2] 및 LIDAR 분야[3] 등에서 연구가 매우 활발하다. 더우기 CW 및 펄스에서 동작이 모두 가능하고, 스펙트럼 대역은 색소 레이저의 3배 이상되는 660~1178 nm의 넓은 대역,[4] 또한 π-편광의 이득 단면적은 다른 파장가변 고체 레이저의 10배 이상되는 3×10^{-19} cm^2의 큰 값 등의 우수성을 가지고 있으므로 주파수 가변의 대출력 레이저로써 주목 받고 있다.[5] 그러나 free-running때 스펙트럼의 대역폭은 10 nm 정도이므로 분광학 등의 응용에서는 이것을 협대역해야 하는 문제가 있다. 특히 이것을 대기 오염 관측용 LIDAR(Light Detection and Ranging) 광원으로 사용하기 위해서는 수십 mJ의 출력과 스펙트럼 선폭은 수 10 pm로 가공되어야 한다.[6]

Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼을 협대역화하는 방법은 색소 레이저의 동기 주입(injection-locking), 광학 분산 소자의 삽입, 또는 이것들의 복합형이 있다. Brockman 등은 스펙트럼의 선폭이 수 pm인 색소 레이저를 Ti:sapphire 레이저에 동기주입하여 선폭을 협대역화 하였고,[7] Funayama 등은 grazing-incidence grating으로 공진기를 구성하여 750~820 nm의 영역에서 선폭 10 pm를 얻었다.[8] 또한 Nagasawa는 LIDAR용으로 프리즘과 에탈론을 조합한 공진기를 구성해서 스펙트럼을 0.14 cm^{-1}로 협대역화 하였다.[6] 그런데 이와 같은 보고에서는 공진기의 손실 증가 문제와 광학계를 넓은 대역으로 코팅하는 문제 때문에 넓은 대역에서 연속적인 파장선택을 실현하지 못하였다.

본 논문에서는 Q 스위칭 된 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파로 Ti:sapphire 레이저를 펄스 펌핑하고, 공진기를 MPLG(Multiple Prism Littrow Grating)방식으로 구성하여 연속적인 파장 선택을 하였을때, 스펙트럼의 협대역 특성에 대하여 연구한 바를 보고한다. 본 연구에서는 Ti:sapphire rod를 양단 펌핑하여 rod의 활성 체적을 증가시키고, 입사면에서 파워 밀도를 절반으로 감소하여 레이저의 대출력 가능성을 제시하였다. 또한 MPLG 방식에서 격자의 입사각을 선형적으로 조정하여 연속적인 파장 선택을 실현하였다. 최적조건에서 파장선택을 연속적으로 제어할 때 레이저 출력의 파장 범위는 705~835 nm이고, 이때 최대 출력은 0.38 mJ, 스펙트럼 선폭은 0.13 cm^{-1}를 각각 얻었다.

II. 실험 장치의 구성

본 연구에서 사용된 실험 장치의 구성은 그림 1과

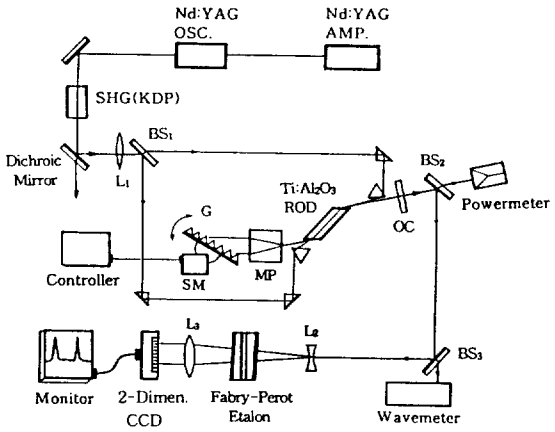

그림 1. Schematic diagram of a Ti:sapphire laser with narrow spectral linewidth. TM: total mirror, MP: multiple prism, G: grating (1800 G/mm), L: focal lens, BS: beam splitter, OC: output coupler, SM: stepping motor, SMC: stepping motor controller.

같다. 실험 장치는 Q 스위칭 Nd:YAG 레이저와 비선형 결정으로 구성된 펌핑 광원, Ti:sapphire rod의 펌핑 광학계, MPL 격자방식으로 구성된 공진기 및 파장 선택 제어 시스템, 출력 에너지 및 스펙트럼 선폭의 측정 장치 등으로 구성하였다.

Ti:sapphire 레이저의 펌핑 광원으로 사용된 Nd:YAG 레이저의 발진기는 Q 스위칭에 의해 10 ns(FWHM)의 펄스를 발생하였고, 반복율은 10 Hz로 동작할 때 최대 출력에너지는 40 mJ이다. 이때 레이저 빔의 지름은 3 mm, 스펙트럼 선폭은 0.1 cm $^{-1}$, 빔의 발산각은 1.0 mrad이다. 또한 Nd:YAG 레이저를 1단 증폭하였을때 최대 출력은 200 mJ이다. Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파(532 nm)로 변환하기 위하여 비선형 결정 KDP를 사용하였으며, 이의 크기는 10×10×50(mm^3)이다. KDP 결정에 의해 제 2 고조파로 변환된 최대 출력 에너지는 30 mJ이고, 이것을 이색 거울(dichroic mirror)을 사용하여 1.06 μm와 532 nm로 분리하였다. 실험에서 펌핑 광원은 13 mJ의 제 2 고조파 빔을 사용하였으나, 실제로 Ti:sapphire rod에 입사된 에너지는 광학기기의 손실 때문에 9 mJ이다. 이때, 초점거리가 75 cm인 집속 렌즈를 사용하였고, Ti:sapphire rod에서 펌핑 빔의 지름은 0.6 mm이고 펌핑 빔의 파워 밀도는 320 MW/cm^{2}이다.

실험에 사용된 Ti:sapphire rod의 크기는 지름이 6 mm, 길이가 19.5 mm이다. Rod의 양단은 60°4′5″로 절단하여 Fresnel 반사 손실을 최소로 하고 무반사 코팅은 하지 않았다. 또한 실험에서 사용된 rod는 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파(532 nm)에 대하여 95%의 흡수율을 갖는다.

Ti:sapphire rod를 한쪽 단에서 종 펌핑할 경우, 펌핑 에너지는 rod의 길이 방향에 지수함수적으로 흡수되어 불균일한 여기 분포를 형성하고, 입사면의 파워 밀도는 커서 rod가 손상될 우려가 있다. 그러나 양단 펌핑[10]의 경우는 rod의 종축으로 고른 여기 분포를 형성하여 파워 밀도를 감소시키는 장점이 있다. 본 연구에서는 고품질 레이저 개발을 목표하고 있으므로 rod의 양단 펌핑 방법을 사용하였다. 이때 펌핑 빔은 50% beam-splitter(BS_1)에 의해 두 방향으로 분리되고, 프리즘을 통하여 Ti:sapphire rod의 양단에 입사하였다. 또한 rod에서 공진기의 광축과 펌핑 빔 중심축의 중첩면적을 최대로 하여 여기 체적을 크게하기 위하여 광축과 펌핑 빔 중심축과의 입사각 차를 0.7°로 최소화하였다.

MPLG 방식의 공진기는 프리즘 beam expander(MP), 회절격자(G, 1800 g/mm), 출력거울(OC; 680～750 nm에서 투과율 15%, 750～835 nm에서 투과율 23%)로 구성하였고, 공진기의 전체 길이는 40 cm이다. 출력 파장을 연속적으로 가변할 수 있는 제어 시스템은 스텝핑 모터와 제어계로 구성하였다. 회절격자의 회전각을 36～59°로 변동할 때 파장 범위는 650～950 nm이며, 스텝핑 모터는 1 pm/pulse의 펄스 동작으로 제어할 수 있다.

파장의 변화에 따른 레이저 출력은 powermeter와 1200 g/mm의 회절격자를 내장한 wavemeter를 사용하여 파장을 가변함과 동시에 측정하였다. 펌핑 빔과 Ti:sapphire 레이저 빔의 파형은 응답시간 1 ns 이하의 photodiode를 사용하여 측정하였다. 선폭 측정은 1.25 cm $^{-1}$의 자유 스펙트럼 영역을 갖는 Fabry-Perot 모니터 에탈론, 간섭무늬는 2048 Pixel의 2 차원 CCD와 IBM-PC 286을 각각 사용하여 측정하였다.

III. 출력 특성

그림 2는 펌핑 에너지를 9 mJ로 일정하게 고정하고 rod의 양단 또는 한쪽단에서 펌핑할 때, 파장 변화에 대하여 Ti:sapphire 레이저의 출력 에너지의 변화를 나타낸다. 그림에서 (■)부호는 양단에서 펌핑, (□)부호는 한쪽단에서 펌핑하는 경우에 대한 각각의 결과이다. 양단 펌핑 때의 파장가변 영역은 705～835 nm이며, 출력 에너지는 730～825 nm의 범위에서 200～380 μJ이다. 이때 최대 출력 에너지는 파장 790 nm에서 380 μJ이며, 에너지 변환효율은 4.2%이다. 한쪽단에서 펌핑할 때 파장가변

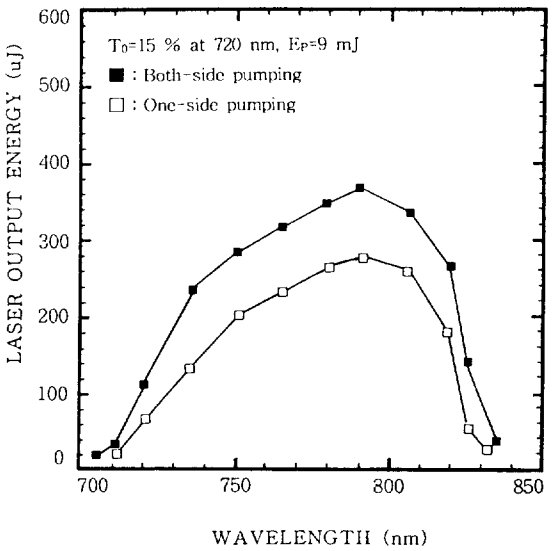

그림 2. Tuning curve of the Ti:sapphire laser with a multiple-prism Littrow grating cavity.

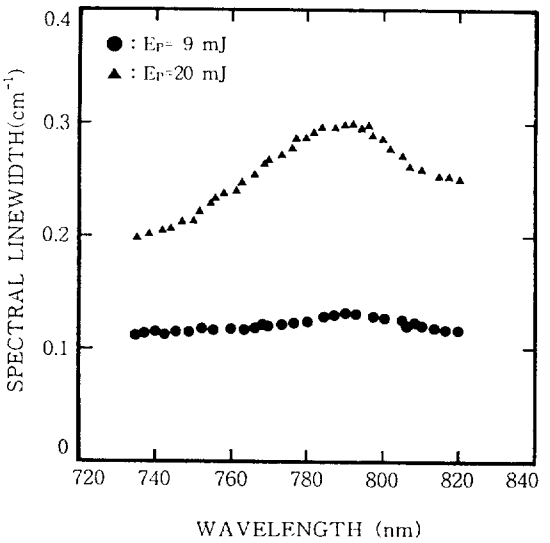

그림 4. Laser spectral linewidth versus wavelength at pumping energy of 9 mJ (●) and 20 mJ (▲).

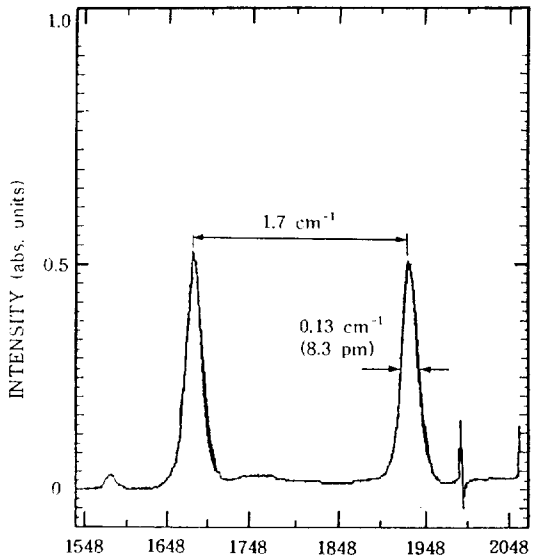

그림 3. Fabry-Perot fringe pattern of output spectrum of the Ti:sapphire laser with a multiple-prism Littrow grating cavity as observed by using a 2-dimensional CCD.

영역은 710~835 nm이며, 최대 출력 에너지는 790 nm에서 280 μJ이고, 이때 에너지 변환효율은 3.1%이다. 따라서 양단 펌핑은 한쪽단 펌핑보다 효율이 1.1% 증가하였는데, 이것은 rod의 여기 분포가 양단 펌핑에 의해 개선되었음을 설명한다.

그림 2에서 출력 에너지는 820 nm 이상에서 급격히 감소하고, 835 nm 이상의 파장에서는 레이저 발진은 정지하고 있다. 이것은 출력 거울 유전체 코팅의 파장 제한 때문이다. 보다 광대역 파장의 코팅을 실현하면 800 nm보다 긴 파장 영역에서도 안정된 레이저 발진이 일어날 것으로 생각된다. 그러나 Funayama 등이 실험한 결과 750~820 nm[8]와 비교할때, 본 실험에서 파장가변 영역은 최대 출력의 50% 범위에서 730~825 nm가 되어 더 넓은 영역으로 가변되었다.

그림 3은 양단 펌핑에너지를 9 mJ로 하고, 중심 파장이 790 nm일 때 스펙트럼의 선폭을 나타낸다. 스펙트럼 선폭의 측정은 1.25 cm^{-1}의 자유 스펙트럼 영역을 가지는 Fabry-Perot 에탈론으로 한개의 고리무늬를 형성하고, 이것을 2048 pixel의 2차원 CCD로 측정한 결과를 IBM-PC 286로 분석하였다. 그림 3에서 선폭은 0.13 cm^{-1} (8.3 pm)이며, 공진기 길이가 40 cm일 때 5~6개의 종 모드를 포함하는 것으로 계산되었다. 한쪽단만 펌핑할 때에도 양단 펌핑과 같은 결과를 같는다. 이 결과는 최근 Nagasawa 등[6]의 실험 결과인 0.14 cm^{-1}와 비슷하다. 그들은 Ti:sapphire 레이저의 공진기에 2개의 프리즘, 4개의 에탈론을 사용하였다.

그림 4는 735~820 nm의 파장 범위에서 펌핑 에너지를 9 mJ(●)과 20 mJ(▲)로 할 때 선폭 변화를 나타낸다.

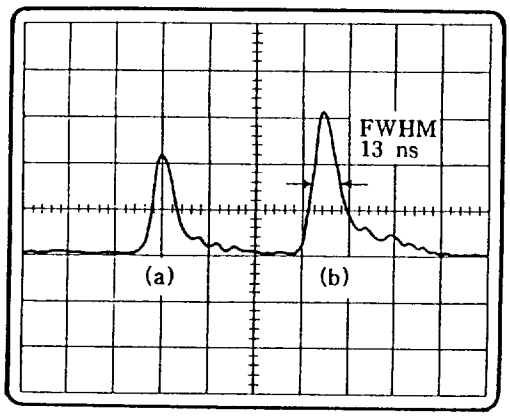

그림 5. Temporal waveform of pump and output beam of the Ti:sapphire laser. Horizontal scale: 20 ns/div. (a) Pump beam, (b) Laser output beam.

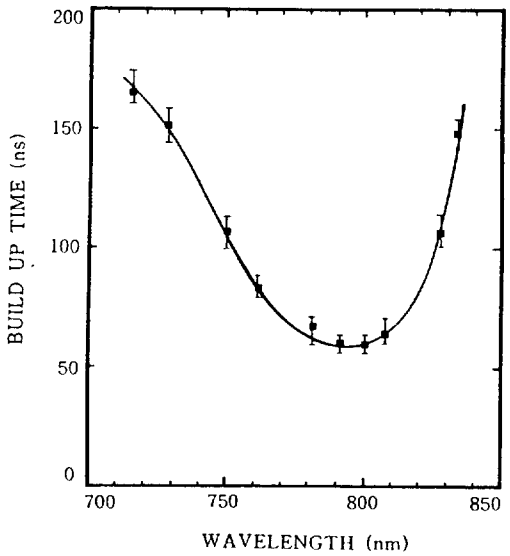

그림 6. Build-up time of the Ti:sapphire laser with a multipleprism Littrow grating cavity.

펌핑 에너지를 9 mJ로 일정하게 할 때, 선폭은 0.12～0.13 cm^{-1}으로 변화가 매우 작다. 그림 4에서 (▲)는 펌핑에너지를 20 mJ로 증가시킨 경우로 선폭은 0.2～0.3 cm^{-1}로 넓어지며 그 변동율은 크다. 이유는 여기강도가 높을수록 발진 모우드 수가 증가하기 때문이다. 또한 790 nm 부근에서 선폭이 넓어지는 것은 이 파장에서 π-편광의 이득 단면적이 최대값 3×10^{-19} cm^2를 갖는데 이득 또한 최대가 되어 발진 모우드 수가 증가하기 때문이다.[18]

스펙트럼 선폭의 크기는 양단과 한쪽단의 각 펌핑을 비교할 때에 차이가 없지만, 레이저 빔의 빔 발산각은 큰 차이가 있다. 양단 펌핑 때의 레이저 빔 발산각은 1.2 mrad이고, 한쪽단 펌핑 때의 빔 발산각은 1.4 mrad이다. 여기서 빔 발산각의 측정 실험은 레이저 출력 거울로부터 1 m, 3.5 m가 되는 두 지점에서 2차원 CCD를 사용하여 레이저 빔의 지름을 측정하였다. 이때, 2차원 CCD로 측정한 레이저의 공간 분포는 가우시안 분포를 나타내었다.

그림 5는 파장이 780 nm일 때, Ti:sapphire 레이저의 출력 파형과 KDP의 출력 파형을 동시에 측정한 결과이다. 그림 5에서 (a)는 Ti:sapphire rod에 입사되는 제 2 고조파로 10 ns(FWHM)이고, (b)는 13 ns(FWHM)의 레이저 출력 파형을 나타낸다. 펌핑 빔과 Ti:sapphire 레이저 펄스의 지연시간은 70 ns이다.

그림 6은 펌핑 빔(532 nm)에 의해 공진기에서 레이저가 형성되기까지의 지연 시간의 변화를 파장에 따라 나타낸다. Ti:sapphire 레이저의 제어 시스템과 오실로스코프를 동기화시키고, 파장을 변화시키면서 펌핑 빔과 레이저 출력 빔의 시간차를 측정하였다. 펌핑 빔이 결정에 입사한 후, 레이저 발진이 생성될 때까지의 시간은 문턱 에너지에 밀접한 관계가 있는데[18], 그것은 Ti:sapphire rod의 π-편광에 대한 이득 단면적은 790 nm에서 최고값 3×10^{-19} cm^2을 가지며, 유사 가우샨 분포를 형성하여 700～900 nm에서 2.0×10^{-19} cm^2값 이상으로 이 값들은 이득 계수에 영향을 주기 때문이다.[5] 즉 펌핑 후 레이저 발진까지의 형성시간이 이득 단면적 분포의 가장자리 부분에서 100 ns 이상으로 길어짐을 볼 수 있다. 이 결과는 증폭시스템 및 LIDAR 시스템의 제어 설계에서 동기화를 위한 중요한 파라미터로 이용될 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 대기 오염 측정용 LIDAR에 필요한 좁은 스펙트럼 선폭을 얻기 위해, MPLG 방식의 공진기를 구성하고, 회절격자의 연속 제어 시스템을 외부에 부가하여 연속적인 파장 선택이 자동으로 이루어지도록 하였다. 또한 Ti:sapphire rod를 양단 펌핑하여 rod의 활성 체적을 증가시키고, 여기 파워 밀도를 감소하여 레이저의 대출력 가능성을 제시하였다. 구성된 Ti: sapphire 레이저에서 연속적인 파장가변 영역은 705～835 nm이고, 790 nm에서 최대 출력 에너지는 0.38 mJ, 에너지 변환 효율은 4.2%, 스펙트럼 선폭은 0.13 cm^{-1} (8.3 pm)를 각각 얻었다. 이때, 빔 발산각은 1.2 mrad이었다.

파장 변화에 대한 스펙트럼의 선폭 변화를 0.12~0.13 cm^{-1}으로 안정화하고, π-편광 이득 단면적과의 관계를 논하였다. 펌프 빔에 대한 레이저 출력의 형성 시간은 파장 변화에 따라 70~165 ns로 변화됨을 알 수 있었다.

Q 스위칭 된 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파 출력 특성을 개선하고, 본 연구에서 제작된 Ti:sapphire 레이저에 증폭 시스템을 부가하면, LIDAR 광원에 필요한 수십 mJ 에너지를 얻을 수 있으리라 생각된다.

본 연구는 과학기술처와 금성산전 주식회사의 산·학 협동연구[93-I-0057]에 의해 수행되었으며, 실험에 필요한 장비 지원을 해준 러시아의 Physical Instrumentation Center of General Physics Institute의 여러분에게 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

[1] G. A. Rines and P. F. Moulton, Opt. Lett. **15**, 434 (1982).
[2] J. D. Kafka, M. L. Watts, and J. J. Pietwrse, IEEE. J. Quantum. Electron. **QE-28**, 2151(1992).
[3] S. E. Moody, Laser Focus World, **27**, 117(1991).
[4] P. F. Moulton, Proceedings of the IEEE, **80**, 348 (1992).
[5] J. M. Eggleston, L. G. Deshazer, and K. W. Kangas, IEEE. J. Quantum. Electron. **QE-24**, 1009(1988).
[6] C. Nagasawa, M. Abo, and Y. Hata, The Review of Laser Engineering, **20**, 35(1992).
[7] P. Brockman, C. H. Bair, J. C. Barnes, R. V. Hess, and E. V. Browell, Opt. Lett. **11**, 712(1986).
[8] M. Funayama, K. Mukaihara, T. Okada, M. Maeda, N. Tomonaga, J. Izumi, K. Matsud, and Y. Hasegawa, The Review of Laser Engineering, **20**, 41 (1992).
[9] J. C. Barnes, N. P. Barnes, and G. E. Miller, IEEE. J. Quantum. Electron. **QE-24**, 1029(1988).

Spectrum Narrowing Characteristics of a Tunable Ti:sapphire laser

Yong Woo Yi and Choo Hie Lee
Department of Electronic Engineering, Kyung Hee University, Kyunggi, 449-701, Korea

Sergey Nikolaevich Sergeev
Physical Instrumentation Center of General Physics Institute, Russia

(Received: October 11, 1994)

We have studied the spectral narrowing characteristics of the tunable Ti:sapphire laser pumped by the second harmonic generation of Nd:YAG laser. Ti:sapphire laser has uniform excitation distribution by both-side end pumping. We have controlled the angle of grating linearly and achieved the continuous selection of wavelength in the broad range from 705 to 835 nm. The output energy of 380 μJ at 790 nm, the spectral linewidth of 0.13 cm^{-1} and the beam divergence of 1.2 mrad have been obtained. The wavelength range with power more than 50% of maximum output was 730~825 nm.