파장 가변 레이저의 발전

DOI: 10.3938/PhiT.19.015

조원배·이상민

Development of Tunable Lasers

Won Bae CHO and Fabian ROTERMUND

Tunable continuous-wave (cw) and pulsed lasers are widely used for applications in many diverse fields including basic science, medicine, and industry. Depending on gain media, which can be gas, liquid or solid-state, the lasers emit widely tunable broadband or discretely and line-tunable coherent lights. In this article we present various tunable lasers and their applications. In addition, nonlinear optical wavelength conversion techniques such as sum/different frequency generation and optical parametric processes, which enable to extend the operation wavelength of lasers, are briefly introduced.

들어가는 글

레이저(LASER)는 이를 개발하고 다양한 분야에 응용하는 연구자들에게 뿐만 아니라 공상과학 영화나 소설 등의 소재로도 많이 활용되어옴으로써 일반인들에게까지 널리 인식되어 있는 첨단 연구 장비이다. 1960년도에 T. H. Maiman이 Nature지에 발표한 루비 레이저에 관한 연구 결과는 인간이 단색성(monochromaticity), 결맞음(coherence), 그리고 방향성(directionality)을 지니는 빛을 인위적으로 만들어 냈으로써 이를 연구의 도구로 적극 활용하게 되는 중요한 계기가 되었다. 그 이후 전 세계의 수많은 연구팀들이 실험 용도와 연구 목적에 따라 고출력 레이저, 연속발진(cw: continuous-wave) 또는 펄

스(pulsed) 레이저, 그리고 다양한 파장대역에서 동작하는 파장 가변 레이저들에 대한 개발 연구들을 활발하게 수행하고 있다. 그림 1은 현재까지 개발된 다양한 레이저들 중에서도 이미 상용화된 주요 레이저들의 동작파장 대역 및 파장 가변 영역 그리고 출력 특성에 대해서 간략히 보여주고 있다. 특히 이 글에서는 다양한 파장 가변 레이저들에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

LASER는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약어이며, 레이저를 구성하는데 필요한 가장 기본적인 요소는 이득매질과 이에 에너지를 공급해 줄 펌프를 포함한 공진기이다. 방사(radiation)된 빛이 유도방출(stimulated emission) 과정을 통해 증폭되기 위해서는 적절한 이득매질이 반드시 필요하며, 이득매질 종류에 따라서 레이저의 발진 파장대역이 결정된다. 상대적으로 파장 가변이 용이한 레이저로는 이득매질의 종류에 따라서 기체(gas) 레이저, 색소(dye) 레이저 그리고 고체(solid-state) 레이저 등을 그 대표적인 예로 들 수 있다. 하지만 이러한 일반적인 공진기 기반의 레이저의 경우 동작하는 파장대역이 이득매질이 지니고 있는 방출 대역폭(emission bandwidth) 이내로 제한되기 때문에 이를 극복할 수 있는 방안으로 비선형 주파수 변환기법이 자주 사용된다. 레이저로부터 방출된 빛을 위상 정합 조건에 맞추어 적합한 비선형 단결정에 투과시켜 비선형 단결정 내에서의 합주파수 생성(SFG; sum frequency generation), 차주파수 생성(DFG; difference frequency generation), 그리고 광매개 방출 및 증폭(OPG & OPA; optical parametric generation & amplification) 방법 등을 이용하면 별도의 공진기를 제작하지 않고도 파장 가변 영역을 자외선에서부터 적외선 영역까지 넓힐 수가 있다. 그 이외에도 광매개 공진기(OPO; optical parametric oscillator)와 같이 비선형 단결정이 포함된 추가적인 공진기를 구성하여 공진기 내에서 광매개 효과에 의해 생성된 빛을 공진시킴으로써 파장 조절 범위를 넓힐 수도 있다. 이러한 다양한 파장 가변 레이저들에 대하여 기본 공진기 구조의 레이저들부터 순차적으로 소개하고 비선형 주파수 변환 기술을 활용한 파장 가변 기술에 대해서도 간략히 언급하고자 한다.

저자약력

조원배 박사는 아주대학교 이학박사(2010)로서 현재 아주대학교 나노정보 융합기술 연구소에 박사후 연구원으로 재직 중이며, 다양한 파장영역에서 발진하는 극초단 펄스 레이저 개발 및 그를 이용한 응용 연구를 수행하고 있다. (chowonbae@gmail.com)

이상민(Fabian Rotermund) 교수는 독일 베를린 공과대학(Technical Univ. of Berlin) 이학박사(2000)로서 막스보른 연구소(Max-Born-Institute)의 연구원(1997-2002)을 거쳐 2002년부터 아주대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (rotermund@ajou.ac.kr)

REFERENCES

- [1] Photograph image by Daniel Haertle, <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>.

Fig. 3. Schematic diagram of a rare gas excimer laser, pumped by electron-beam.^[3]

rare gas들의 경우 낮은 유도 방출 단면적(stimulated emission cross section) 및 들뜬 상태(upper state)에서의 짧은 생존시간(lifetime) 등으로 인해 대부분 높은 에너지의 전자빔 여기 방법을 통해서 rare gas 엑시머 레이저 구현이 가능하다는 단점을 지니고 있다.^[4] 그림 3은 전자빔으로 여기되는 rare gas 레이저 공진기의 개략도이며 파장 가변을 위해서 MgF_2 재질의 프리즘을 사용하였다. Rare gas 엑시머 레이저의 경우 수 nm 가량의 파장 조절이 가능하며, 예를 들어 Ar 엑시머 레이저의 경우 약 124–128 nm, 그리고 Xe 엑시머 레이저의 경우 170–176 nm 정도의 파장 조절이 가능하다.^[3] 그림 2에 표시된 F_2 (fluorine) 레이저는 엄밀히 말해 엑시머 레이저가 아니지만 엑시머 레이저와 거의 동일한 원리로 이득매질을 여기시켜 레이저를 동작시킨다. 상대적으로 많이 활용되는 이원자(diatomic) rare gas-halogen 엑시머 레이저들 이외에도 매우 넓은 대역폭(50–120 nm)을 지니고 있는 삼원자(triatomic) 엑시머 레이저들도 구현되어 연구되고 있지만 삼원자 rare-gas-halides는 높은 rare gas 밀도에서 주로 형성되고, 낮은 유도 방출 단면적 특성으로 인하여 높은 에너지의 전자빔 여기 방법 등을 필요로 한다.^[5]

일반적인 엑시머 레이저의 경우 수백 Hz에서 수 kHz의 반복률로 나노초 수준의 펄스폭을 지닌 펄스를 방출하며 이때의 평균 출력은 수 와트(Watt)에서 수백 와트 수준으로 자외선 영역에서 가장 높은 출력 특성을 보인다. 짧은 파장 대역의 빛을 방출하는 엑시머 레이저를 활용하여 반도체 칩 생산 등을 위한 목적으로 100 nm 이하의 구조를 패터닝하는 microlithography 분야에 응용되거나 짧은 파장의 자외선 빛이 생물학적 물질이나 유기 합성물 등에 매우 잘 흡수되는 특성을 지니고 있어 레이저 어블레이션(ablation)을 활용한 미세가공 및 미세구조 제작 등에 응용이 가능하다. 일반인들에게 가장 많이 알려진 미세공정 기술의 대표적인 예는 사람의 시력을 개선하기 위해 현재 많이 활용되고 있는 LASIK 수술이다. 이러한 응용 이외에도 높은 출력특성으로 인해 색소 레이저의 펌프 광원으로도 엑시머 레이저 활용이 가능하다.^[2]

Fig. 4. Laser dyes and their operating wavelengths. (Lambda Physik Inc.)

색소(Dye) 레이저

1966년 처음으로 레이저 이득매질로써의 활용 가능성이 검증된 색소 레이저는 수백 가지의 레이저 색소 분자를 이용하여 자외선부터 근적외선 영역(300–1200 nm, 그림 4)까지 활용 가능한 넓은 파장 가변 특성을 지닌 레이저로써, 일반적으로 색소를 에탄올이나 클로로폼(chloroform) 등과 같은 용매에 10^{-3} – 10^{-4} 몰 농도로 용해시켜 액체 상태의 색소를 레이저 이득매질로 사용한다. 각 색소들은 대략 40–60 nm 가량의 방출 대역폭을 지니고 있으며 여러 가지 종류의 색소들을 혼합하여 이득매질로 활용하여 더욱 넓은 파장대역 ($\Delta\lambda \geq 100$ nm)에서 가변성(tunability)을 지닌 연속발진 레이저를 구현할 수 있다. 또한 색소의 넓은 방출 대역폭 특성을 활용해 펨토초 수준의 극초단 펄스 레이저도 구현 가능하다.^[2] 펄스 레이저의 경우 레이저 공진기 외부에 프리즘과 grating을 활용하여 6-fs 수준의 극초단 펄스 생성에 관한 연구 결과들도 있지만^[6] 이 글에서는 파장 가변이 용이한 연속발진 색소 레이저를 중심으로 기술하고자 한다. 그림 5는 Ring 형태의 연속발진 색소 레이저 공진기의 개략도를 보여주고 있다. 색소 레이저의 경우 일반적으로 녹색 레이저 (아르곤 레이저 또는 Nd:YAG 레이저의 이차조화파)나 자외선 영역에서 동작하는 엑시머 레이저 등이 펌프 광원으로 사용되거나 플래쉬 램프를 펌프 광원으로 활용하기도 한다. 공진기 내부에 설치된 에탈론은 좁은 선폭을 지닌 레이저 빛을 방출하기 위해서 사용되며, 함께 설치된 복굴절 필터는 색소 레

REFERENCES

- [3] W. Sasaki *et al.*, J. Photopolym. Sci. Technol. **11**, 361 (1998).
- [4] F. J. Duarte (Ed.), *Tunable Lasers Handbook* (Academic, New York, 1995).
- [5] Ch. K. Rhodes (Ed.), *Excimer Lasers* (Springer, New York, 1984).
- [6] R. L. Fork *et al.*, Opt. Lett. **12**, 483 (1987).

Fig. 5. Setup of a continuous-wave (cw) ring dye laser.^[2]

Fig. 6. Photograph image of a Rhodamine 6G dye laser (Coherent, Model 899 ring dye laser) operating near 580 nm. An argon-ion laser was used as pumping source. © Han-Kwang Nienhuys^[7]

이저의 파장 조절 목적으로 설치되었다. 그리고 Faraday isolator는 ring 형태의 공진기에서 진행되는 빛이 한쪽 방향으로만 진행하도록 하여 공간적 hole-burning 현상을 없애도록 하였다. 색소 레이저의 이득매질로써 가장 많이 알려진 색소는 Rhodamine 6G로 스펙트럼 방출 중심 대역은 대략 590 nm이며 녹색 레이저를 펌프 광원으로 사용한다. 그림 6은 이미 상용화된 Rhodamine 6G 기반의 색소 레이저의 예(Coherent, Model 899 ring dye laser)를 보여주고 있다. 펌프 광원으로는 514 nm의 아르곤 레이저가 사용되었고, 레이저 발진 대역인 580 nm 영역에서 파장 조절이 가능하다. 그림에서 나타난 주황색 관을 통해 색소 용액이 계속 순환하면서 공진기 내부에 설치된 색소 셀(cell)을 통과하게 되며 펌프 광원은 셀을 통과하는 색소를 여기시킨다. 레이저 동작 시 색소 용액은 매우 빠른 속도로 순환하게 되는데 이는 레이저의 동작 특성을 저하시키는 긴 수명을 가진 색소 분자의 triple state를 제거하고 높은 펌프 에너지로 인한 색소의 기능 저하를 최소화하기 위해서이

다.^[4] 일반적으로 색소 레이저는 액체 상태의 색소를 이득매질로 활용하지만 색소 분자가 도핑된 고분자 또는 유리 등을 레이저 이득매질로 활용하는 고체 타입의 색소 레이저(solid-state dye laser; SSDL)에 대한 연구도 1967년에 처음 구현된 이후 많은 연구팀들에 의해 지속적으로 수행되고 있다.

색소 레이저는 이득매질로 사용되는 색소가 대부분 인체에 유해하고 이득매질을 정기적으로 교환해 주어야 하는 등의 많은 단점을 지니고 있으나, 다양한 색소의 종류만큼이나 자외선 영역에서 근적외선 영역까지 커버할 수 있는 넓은 파장 조절 능력으로 인하여 매우 광범위한 분야에서 활용이 가능하다. 그중에서도 넓은 파장 가변 능력을 활용하여 다양한 물질들의 흡수 방출 특성을 확인할 수 있는 분광학(spectroscopy) 분야나, 좁은 선폭을 지니면서도 원하는 파장 대역의 레이저 방출이 가능하므로 피부 치료 등의 의학 목적으로도 많이 활용되고 있다. 그 이외에도 천문학과나 제조업 등의 분야에서도 많이 활용되고 있다.

고체(Solid-state) 레이저

1960년도는 레이저 시대를 개막하게 된 역사적인 해이다. Maiman에 의해서 최초로 구현된 루비($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) 레이저는 역사상 최초의 레이저일 뿐만 아니라 최초의 고체 레이저이기도 하다. 그림 7은 Maiman의 사진과 그가 개발한 루비 레이저의 단면도를 보여주고 있다. 루비 레이저는 일반적으로 제논(xenon) 플래쉬 램프를 이용하여 이득매질을 여기시키며 레이저 동작 파장 대역은 694 nm로 현재까지도 홀로그래피나 비파괴 검사 테스트 등에 활용되어 오고 있다. 성공적인 루비 레이저의 연구 결과는 이후 수십 년간 다양한 단결정 및 glass 레이저들의 개발을 이끌게 되었으며, 각 레이저의 대표적인 예는 Nd:YAG와 광섬유 레이저이다. 현재까지 수백여 종의 고체 레이저 매질들이 개발되어 왔으나 광범위하게 사용되는 레이저 매질은 제한적이며, 이 글에서는 주로 단결정 덩어리(bulk) 레이저들을 중심으로 소개하고자 한다.

주요 고체 레이저들은 주로 근/중적외선 영역에서 동작하는 희토류 원소(rare earth element) Er, Tm, Ho 이온 등이 첨가(doping)되거나 Yb 이온이 첨가된 단결정 기반의 레이저들과 가시광선에서 중적외선 영역 일부를 커버하는 전이금속(transition metal)이 첨가된 이득결정 기반의 레이저 등 다양한 레이저들이 있지만 실질적으로 실온에서 파장 가변 레이저

REFERENCES

- [7] Photograph image by Han-Kwang Nienhuys at the AMOLF Institute, Netherlands, http://en.wikipedia.org/wiki/dye_laser.

Fig. 7. Dr. T. H. Maiman (left) who invented the first optical laser and his invention, i.e. the ruby laser (right) operating at 694 nm. © Hughes Aircraft Co., July 1960^[8]

Fig. 8. Photograph image of a typical Ti:sapphire laser. This laser enables to generate tunable cw and ultrashort pulses around 800 nm.

의 목적으로 개발되어 많이 활용되고 있는 것은 전이금속 기반의 레이저들이다. 전이금속이 첨가된 고체 레이저가 커버할 수 있는 파장 대역은 약 670–3000 nm 가량이며, 대표적인 전이금속 레이저는 Ti- 혹은 Cr-이온이 첨가된 고체 레이저들이다. 그림 8은 세계적으로 널리 보급되어 다양한 분야에 많이 활용되고 있는 레이저 중 하나인 타이타늄 사파이어(Ti:sapphire: $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) 레이저의 사진이다. 타이타늄 사파이어 레이저는 넓은 방출 대역폭으로 인하여 극초단 펄스 레이저 또는 파장 가변 레이저의 목적 등으로 개발되어 많이 사용되고 있는 대표적인 고체레이저로 파장 가변폭은 약 400 nm(670–1100 nm)이다. 전이금속이 첨가된 레이저 매질은 전이금속과 이를 첨가하고자 하는 host 재료에 따라서 레이저 동작 파장 대역이 달라지며 그림 9는 다양한 전이금속들이 첨가된 레이저 이득매질들과 각 레이저가 동작하는 파장 대역을 보여주고 있다.^[2]

넓은 방출 대역폭 특성으로 인하여 넓은 파장 가변성과 극초단 펄스 생성 능력을 지니면서도 동시에 고효율 특성을 지닌 고체 레이저는 각 레이저의 2차 및 3차 조화파 발생 가능성까지 고려할 경우 자외선 영역부터 중적외선 영역까지 광범

Fig. 9. Transition metal-doped laser gain media and their operation bandwidths.^[2]

위한 파장 영역에서의 발진이 가능하기 때문에 분광학 분야를 비롯하여 레이저를 활용한 다양한 응용분야에서 광범위하게 응용되고 있다.

비선형 주파수 변환(Nonlinear Frequency Conversion) 기술 기반의 파장 가변 레이저

앞서 설명한 다양한 종류의 공진기 기반의 레이저들의 경우 각 레이저가 지니고 있는 한정적인 방출 대역폭 특성으로 인해 파장 가변성에 한계가 있다. 따라서 상대적으로 넓은 파장 대역의 광원이 필요한 응용 분야의 경우, 비용이나 공간적인 측면에서 다양한 파장 대역의 레이저들을 모두 보유하기에는 많은 어려움이 따른다. 하지만 SFG, DFG, 그리고 OPG 등 물질의 2차 비선형성을 활용한 다양한 비선형 주파수 변환 기술을 이용하면 손쉽게 자외선 또는 적외선 파장 영역으로 파장 가변 범위를 넓힐 수 있다. 이러한 비선형 주파수 변환 기술은 입사되는 빛과 비선형 물질간의 상호작용 현상을 이용하기 때문에 비선형 효과를 유도하기 위해 입사되는 빛의 세기가 충분히 강해야 하고, 주파수 변환의 매개체로 사용되는 단결정의 비선형 계수가 커야 하며, 입사 및 새롭게 생성되는 빛의 파장 대역에서 손실을 최소화 하기 위해서는 동작 파장대역에서 단결정의 투과율이 높아야 한다. 그림 10은 다양한 비선형 단결정들 중에서 특히 중적외선 영역의 광원을 생성할

REFERENCES

[8] <http://www.aip.org/history/exhibits/laser/sections/therace.html>.

Fig. 10. Transmission and nonlinear optical coefficient of non-linear crystals, applicable for generation of near- and mid-IR laser lights by frequency conversion techniques.^[2]

Fig. 11. Schematic diagram of an optical parametric oscillator (OPO). The green line shows the pump beam and the orange and red lines the signal and idler beams generated in OPO.^[9]

때 사용되는 비선형 단결정들의 투과 영역 및 2차 비선형 계수를 보여주고 있다. 이 단결정들은 DFG뿐만 아니라 그 외의 비선형 주파수 변환 기술에도 모두 활용이 가능하다. 그 중에서 OPG 기술을 기반으로 한 광매개 공진기 OPO는 소규모 제작이 가능하며, 상대적으로 용이하게 파장 가변이 가능한 기술 중 하나이다. OPG는 주파수가 높은 펌프(pump) 광이 위상정합(phase matching) 조건($\vec{k}_{\text{pump}} = \vec{k}_{\text{signal}} + \vec{k}_{\text{idler}}$) 하에서 2차 비선형성을 지닌 물질에 입사하는 경우 에너지 및 운동량 보존법칙에 따라서 주파수가 낮은 두 개의 광(signal과 idler; $\omega_{\text{signal}} > \omega_{\text{idler}}$)으로 나누어지는 현상을 말한다. 이렇게 비선형 단결정을 통과하면서 나누어진 signal과 idler 광은 OPO 내에서 공진을 하면서 펌프 광으로부터 에너지를 받아 더욱더 증폭된 후에 출력경을 통해서 공진기 외부로 방출된다. 그림 11

Fig. 12. Line strengths and absorption ranges of atmospheric and toxic gases in the 3-5 μm spectral range.^[10]

은 개략적인 OPO의 구성도를 보여주고 있으며 녹색으로 표현된 것은 펌프광에 해당하고 오렌지색과 붉은색으로 표현된 것은 signal과 idler 광을 의미한다. 그리고 서로 평행한 두 거울 사이에 위치한 것(하늘색으로 표현)이 비선형 단결정에 해당된다. OPO는 펌프 광원과 사용되는 비선형 단결정의 종류에 따라서 파장 가변 범위가 다르지만 근적외선 영역뿐만 아니라 중적외선 영역에서도 파장 가변이 가능하다.^[2]

일반 레이저로부터 직접적으로 얻을 수 없는 이러한 중적외선 광원은 대부분의 유기물과 비유기물 분자들이 강한 진동(vibrational) 혹은 회전(rotational) 전이(transition) 특성을 보이는 분자 분광학 분야에서 사용되고 있으며, 특히 환경, 기후, 그리고 의학 등의 목적으로 다양한 가스 탐지(gas sensing)에도 응용되고 있다.^[10]

마치는 글

가시광선 영역에서 동작하는 루비 레이저가 최초로 개발되면서 인간은 빛을 더욱 더 유용한 도구로 인식하게 되었고, 지금까지 반세기의 시간이 지나는 동안 헤아릴 수 없을 만큼 많은 종류의 레이저들은 다양한 분야에서 다양한 목적으로 광범위하게 사용되고 있다. 육안으로 보이는 파장 영역 이외에도 진공자외선에서 중적외선 영역에 이르는 광범위한 파장 영역에서 발전되는 수많은 레이저들이 개발되어 왔고, 이와 관련된 연구는 아직까지도 세계적으로 매우 활발히 진행되고 있다. 이 글에서는 극히 제한적으로 몇몇 파장 가변이 가능한 레이저들과 그에 따른 응용분야를 짧게 소개하였으나, 이 기회를 통해서 더 많은 사람들이 다양한 레이저 광원에 관심을 갖고, 이를 다양한 응용분야에서 적극 활용할 수 있기를 바란다.

REFERENCES

- [9] A. S. Coelho *et al.*, Science **326**, 823 (2009).
- [10] W. Chen *et al.*, Appl. Phys. B, **72**, 873 (2001).