

Efficient Second Harmonic Generation of a High-power Yb-doped Fiber MOPA Incorporating MgO:PPSLT

Seungbeen Song¹, Eunji Park², Jong Sun Park¹, Yejin Oh¹, Hoon Jeong³, and Ji Won Kim^{1†}

¹Department of Photonics and Nanoelectronics, University of Hanyang ERICA, 55, Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan 15588, Korea

²Department of Applied Physics, University of Hanyang ERICA, 55, Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan 15588, Korea

³Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,

89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

(Received March 23, 2020; Revised April 15, 2020; Accepted April 22, 2020)

In this paper, we report highly efficient second harmonic generation of continuous-wave Yb fiber lasers incorporating a periodically poled LiTaO₃ device (MgO:PPSLT) as a frequency converter. The seed laser output from a Yb fiber master oscillator using a Fabry-Perot feedback cavity was amplified in a Yb fiber amplifier stage, yielding 28.5 W of linearly polarized output at 1064 nm in a beam with beam quality, M^2 , of ~ 1.07 . Second harmonic generation was achieved by passing the laser beam through MgO:PPSLT. Under optimized conditions, we obtained 11.1 W of green laser output at 532 nm for an incident signal power of 25.0 W at 1064 nm, corresponding to a conversion efficiency of 44.4%. The detailed investigation to find the optimized operating conditions and prospects for further improvement are discussed.

Keywords: High-power fiber laser, IR lasers, Visible laser, Quasi-phase matching, Second harmonic generation

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3515) Lasers, frequency doubled; (140.7300) Visible lasers; (190.4360) Nonlinear optics, devices

MgO:PPSLT를 이용한 고풠력 Yb 광섬유 레이저 빔의 고풠율 이차조화파 변환

송승빈¹ · 박은지² · 박종선¹ · 오예진¹ · 정 훈³ · 김지원^{1†}

¹한양대학교 ERICA 나노광전자학과

☎ 15588 경기도 안산시 상록구 한양대학교로 55

²한양대학교 ERICA 응용물리학과

☎ 15588 경기도 안산시 상록구 한양대학교로 55

³한국생산기술연구원 청정생산시스템연구소

☎ 31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

(2020년 3월 23일 받음, 2020년 4월 15일 수정본 받음, 2020년 4월 22일 게재 확정)

본 연구에서는 Yb 광섬유 레이저 MOPA (master oscillator power amplifier) 시스템을 구축하여 고풠력, 고풠율의 근적외선 레이저 빔을 발진시키고, 이를 주기분극반전 준위상정합 비선형 광학 소자인 MgO:PPSLT에 단일 통과시키는 방식을 통하여 고풠력 고풠율 연속발진 녹색 레이저 빔을 생성하는 방법을 보고한다. 자발 펄싱을 억제할 수 있는 패브리-페롯 피드백 공진기 구조를 사용한 광섬유 레이저 주공진기를 사용하여 선폭이 좁고 선형 편광된 1064 nm 레이저 씨앗 빔을 안정적으로 생성할 수 있었으며, 이를 Yb 광섬유 증폭단에서 고풠력으로 증폭시켰다. 증폭된 레이저 빔을 MgO:PPSLT에 통과시켜 고풠력 고풠율의 이차조화파를 얻을 수 있었는데, 이때 얻은 532 nm 레이저의 최고 출력은 기본 입사광의 출력이 25.0 W일 때 11.1 W였으며, 변환 효율은 44.4%를 얻었다.

Keywords: 고풠력 광섬유 레이저, 근적외선 레이저, 가시광선 레이저, 준위상정합, 이차조화파 생성

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.3515) Lasers, frequency doubled; (140.7300) Visible lasers; (190.4360) Nonlinear optics, devices

[†]E-mail: jwk7417@hanyang.ac.kr, ORCID: 0000-0002-9451-1789

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

가시광선 영역의 빛을 내는 레이저는 분광학, Ti:sapphire 레이저의 펄핑 광원, 이미징, 디스플레이 등 기존 전통 학문 분야에서 많이 사용되고 있을 뿐 아니라 최근 들어서는 산업용 미세 가공 및 금속 용접, 의료, 환경, 국방 분야에서도 널리 활용되고 있다¹⁻³⁾. 더 나아가 치안 과학 분야에서 법광원으로 사용되는 가시광선 영역의 레이저 빛은 범죄 현장에 남아 있는 지문, 체액, 족적흔 등의 증거물을 발견하는데 있어 기존 LED 광원을 사용하는 것에 비해 탁월한 성능을 보여서 많은 관심을 받고 있다⁴⁻⁶⁾. 가시광선 레이저 빛은 레이저 다이오드(LD)로부터 직접 얻을 수 있으나, LD의 출력 빔은 빔질이 매우 나쁘고, 고출력 출력을 가지는 펄스 동작이 불가능하며 파란색 LD 레이저빔 대비 녹색 LD 레이저빔의 출력이 상대적으로 낮은 문제가 있다. 따라서 많은 연구자들이 빔질이 우수하고 펄스 동작이 가능한 가시광선 레이저 빛을 얻기 위해 노력하고 있는데 그 중 가장 직접적인 방법은 프라세오디뮴(Pr)을 도핑한 레이저 이득 매질을 GaN 청색 LD로 펌핑하여 청색, 녹색, 적색 레이저 빔을 발진시키는 방법이다. 이 방법은 시스템이 매우 간단하고 세 가지 색의 레이저 빛을 한 이득 매질에서 모두 얻을 수 있는 장점이 있지만, 효율이 낮고, 레이저 이득 매질의 물리적, 광학적 손상치가 낮아 고출력 고에너지 레이저빔을 얻는데 적합하지 않다⁷⁻¹¹⁾. 그래서 현재 고출력 고효율 가시광선 레이저 빔을 얻기 위해 가장 많이 사용되는 방법은 ~1 μm 영역의 근적외선 레이저 빔을 비선형 광학 결정에 입사시켜 이차조화파를 생성하는 것으로 출력 범위, 용도 및 요구하는 시스템 사양에 따라 크게 3가지 방법이 널리 사용된다¹²⁻¹⁴⁾. 우선 고출력 레이저 빔을 비선형 광학 결정에 단순 통과시켜 파장 변환된 빔을 얻는 방법이 있고, 다른 방법으로는 공진기 내부에 비선형 광학 결정을 삽입, 높은 공진기 내부 출력을 이용해 변환 효율을 높이는 내부공진기형 방법도 많이 사용되고 있으며, 마지막으로 단일 주파수의 레이저 빔을 비선형 광학 결정이 포함된 공진기에 입사시켜 파장 변환하는 외부공진기 변환 방법도 잘 알려진 방법이다. 이 중에서 첫번째 방법은 시스템 구성이 간단하여 침투 출력이 높은 고에너지 펄스 레이저의 파장 변환 방법으로 가장 많이 사용되고 있으나, 침투 출력이 낮은 연속발진 레이저 빔의 경우 변환 효율이 낮아 고출력 고효율 파장 변환 레이저 빔을 얻는 것은 쉽지 않다. 이와 같은 한계를 극복하기 위하여 가장 많이 사용되는 방법이 주기분극반전된(periodically poled) 구조를 가진 준위상정합 비선형 광학 결정 소자를 이용하여 파장 변환하는 것이다. 주기분극반전 준위상정합 비선형 광학 소자는 사용하는 결정의 가장 큰 이차비선형 광학 계수 값을 선택적으로 사용할 수 있고, 분산 효과로 인한 워크-오프(walk-off)를 제거할 수 있으므로 매우 긴 길이의 소자를 사용하여 파장 변환 효율을 극대화시킬 수 있다¹⁵⁾. 이와 같은 용도로 주기분극반전 리튬 나يو베이트 소자(LiNbO₃, PPLN)가 가장 많이 사용되고 있지만, 재료로 사용되는 결정의 광굴절 손상치가 낮아 수 W

급의 가시광선 레이저 빔을 안정적으로 얻기 매우 어렵다¹⁶⁾. 이에 반해 산화 마그네슘이 도핑된 리튬탄탈레이트(LiTaO₃)를 주기분극반전시킨 준위상정합 소자 MgO:PPLTL (PPLTL)는 광손상치가 높아서 고출력 고효율 이차조화파 생성이 가능하다고 알려져 있으며 최근 들어 상용화된 소자를 사용한 좋은 결과들이 보고되고 있다¹⁷⁻¹⁹⁾. 리튬탄탈레이트 결정은 리튬나يو베이트 결정과 같은 페로브스카이트 구조를 가지는 강유전체 물질로 주기분극반전 소자 제작이 가능하고, 이차비선형 광학 계수가 최고 13.8 pm/V로 일반적인 다른 비선형 광학 결정에 비해 훨씬 커서 고효율 이차조화파 변환이 가능할 뿐 아니라, 532 nm 파장에서 >2 MW/cm²의 높은 광굴절 손상을 가져서, PPLN으로는 얻기 불가능한 수 W급 이상의 고출력 가시광선 레이저 빔 생성이 가능하다²⁰⁻²³⁾. 특히 고출력 연속발진 레이저 빔을 얻는데 가장 최적화된 레이저인 광섬유 레이저를 사용하여 이차조화파 변환을 할 경우, 작고 간단한 구조의 고출력 고효율의 연속발진 가시광선 레이저 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 Yb이 도핑된 편광 유지 광섬유를 이득 매질로 하는 MOPA 레이저 시스템을 구축하여 고출력 1064 nm 레이저를 제작하고, 생성된 레이저 빔을 주기분극반전 준위상정합 비선형 광학 소자인 MgO:PPLTL에 통과시켜 효율적 이차조화파 생성을 유도함으로써 >10 W 급의 녹색 레이저 빔을 얻는 연구 결과에 대해 보고하고자 한다.

II. 실험 및 결과

그림 1은 녹색 레이저를 생성하기 위해 구축한 실험 구조의 모식도이다. Yb 이온이 도핑된 광섬유를 사용한 MOPA 시스템을 구축하고, 생성된 1064 nm 파장의 레이저 빔을 주기분극반전 준위상정합 소자 MgO:PPLTL에 통과시켜 이차조화파 발생을 유도, 532 nm 파장의 녹색 레이저 빔을 생성하였다. 연속발진 근적외선 레이저 빔을 생성하는 Yb 광섬유 MOPA 시스템은 선형 편광된 씨앗 빔을 만들어주는 광섬유 주공진기와 생성된 씨앗 빔의 출력 증폭을 위한 광섬유 증폭단으로 구성되어 있다. 일반적으로 광섬유 레이저를 이용하여 효율적 이차조화파를 생성하기 위해서는 선형 편광된 좁은 파장 선포의 레이저 빔이 필요하므로 단일 모드 다이오드 레이저(예를 들어 DFB, DBR 레이저)를 씨앗 빔 광원으로 사용하고 그 출력 빔을 단계적으로 증폭하는 방법을 가장 많이 채택하고 있다^{24,25)}. 하지만 본 실험에서는 Yb 광섬유 레이저 공진기를 씨앗 빔 광원으로 사용하였는데, 이 경우 씨앗 레이저 빔의 출력을 수 W 이상 크게 높일 수 있어, 최고 출력 수백 mW가 한계인 단일 모드 다이오드 레이저를 사용할 때와 비교하여 증폭단의 수를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 단일 모드 다이오드 씨앗 빔의 좁은 선포는 고출력 증폭 시 유도브릴루앙 증폭(SBS)이 쉽게 발생한다는 문제점이 있지만²⁶⁾, 본 실험에서 사용한 광섬유 레이저 씨앗 빔은 효율적 이차조화파 생성을 하기에는 충분히 좁은 선포를 가질 수 있으면서도 단일 모드 다이오드 레이저 광원에 비해서는

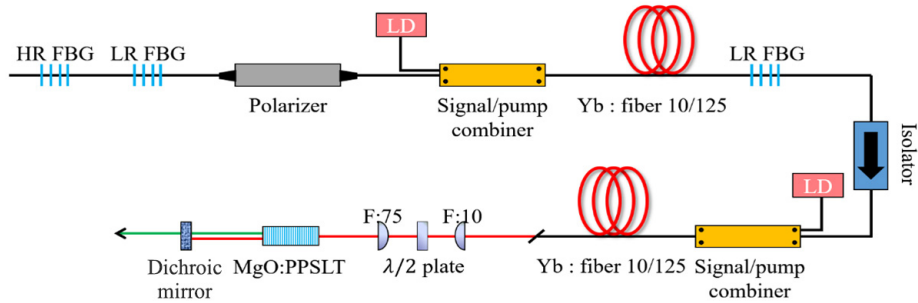


Fig. 1. Schematic diagram of the green laser using a Yb fiber laser and MgO:PPLST.

선폭이 매우 넓어 SBS 효과를 크게 줄일 수 있다. 씨앗 빔을 생성하는 광섬유 레이저 공진기의 이득 매질로 사용된 Yb 이중 클래딩 편광 유지 광섬유(Liekki Yb1200-10/125DC-PM)는 직경 10 μm, NA 0.08의 Yb이 도핑된 코어와 이를 둘러싼 직경 125 μm, NA 0.48의 실리카 내부 클래딩, 그리고 광섬유를 보호함과 동시에 펌프 광이 도파되도록 실리카 내부 클래딩을 폴리머로 코팅한 이중 클래딩 구조를 가지고 있다. 내부 클래딩에는 코어를 중심으로 대칭적으로 스트레스 봉이 나란히 있어 실리카 내 복굴절을 유도하여 진행하는 빛의 편광을 유지시켜 준다. 펌프 광원으로 직경 105 μm 코어와 직경 125 μm 클래딩 구조의 광섬유가 연결된 976 nm 파장의 고툰률 다이오드 레이저를 사용하였고, 펌프-시그널 컴바이너를 사용하여 Yb 광섬유를 펌핑하였다. Yb 광섬유는 976 nm 파장에서 ~6.9 dB/m의 흡수율을 가지고 있으므로 약 4 m 길이의 Yb 광섬유를 사용하였다. 레이저 발진을 위한 피드백을 주기 위하여 단일 클래딩, 단일 모드 광섬유에 새겨진 고반사율/저반사율 광섬유 회절 격자(fiber Bragg grating, FBG) 쌍을 Yb 이득 광섬유 양 끝에 직접 연결하였는데, 한쪽 끝은 반사율 10%의 FBG가 연결되어 레이저 빔이 출력으로 나오게 된다. 출력 반대쪽에는 반사율 99%의 고반사율 FBG, ~1 m의 수동 광섬유, 그리고 반사율 10%의 저반사율 FBG로 구성된 광섬유 패브리-패롯 구조의 광섬유 공진기를 연결하여 레이저 시그널 피드백을 주었다. 이와 같은 피드백 구조는 레이저 출력의 파장 선폭을 줄여 줄 뿐 아니라, 광섬유 레이저에서 종종 발생하여 출력 불안정을 야기하고 레이저를 손상시키는 자발 펄싱 현상을 억제하는 효과가 있는데, 관련 연구 결과는 수 년 전 본 연구 그룹에서 자세히 보고하였다^[27,28]. 광섬유 패브리-패롯 피드백 공진기와 이득 광섬유 사이에 광섬유 선형 편광기를 연결하여 광섬유 내부 공진하는 레이저 빛의 선형 편광을 강제하였다. 이와 같은 구조 하에서 Yb 광섬유 레이저 공진기는 펌프 출력 5.9 W를 공급하였을 때 최고 출력 3.3 W의 레이저 출력을 생성하였으며 이 때 기울기 효율은 58.8%였다. 그리고 출력 레이저 빔의 선형 편광 소광비는 약 14 dB, 그리고 레이저 빛의 파장 선폭은 약 0.2 nm로 측정되었다. 기울기 효율이 일반적으로 알려진 광섬유 레이저의 효율보다 약 30% 정도 낮는데, 이는 공진기 내부에 펌프-시그널 컴바이너와 광섬유 선형 편광기의 존재로 인한 내부 전파 손실로 인한 것이다. 추후 적합한 구조

의 광섬유로 제작된 광섬유 회절 격자를 사용하여 이득 광섬유에 직접 연결하거나, 광섬유 복굴절 방향을 조절하여 선형 편광기를 사용하지 않고도 편광을 선택할 수 있는 방법을 채택한다면^[29,30] 현재보다 높은 효율로 레이저를 발진시킬 수 있을 것으로 기대된다. 주공진기 이후 광아이솔레이터를 삽입하여 주공진기를 증폭단으로부터 보호하였고, Yb 광섬유로 구성된 증폭단을 펌프-시그널 컴바이너와 함께 광아이솔레이터 후단에 연결하였다. 주공진기에서 사용한 것과 같은 Yb 광섬유를 증폭단에 사용하였으며 광섬유의 끝 단은 약 10도의 각도로 절단하여 프레넬 반사로 인한 피드백이 형성되는 것을 막았다. 그 결과 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 흡수한 펌프 출력이 34.6 W일 때 최고 출력 28.5 W를 얻을 수

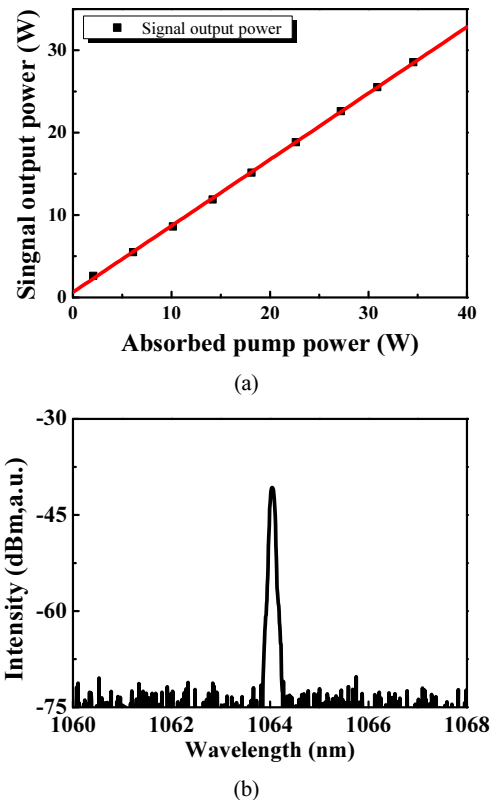


Fig. 2. (a) Yb fiber MOPA output power at 1064 nm as a function of the absorbed pump power at 976 nm. (b) MOPA output spectrum.

있었으며, 이 때의 기울기 효율은 80.5%였다. 선형 편광 소광 비는 >15 dB로 증폭 후에도 씨앗 빔의 편광 특성이 잘 유지됨을 알 수 있었다. 광섬유 출력단에 초점 거리가 6.24 mm 와 250 mm인 한 쌍의 볼록 렌즈를 광섬유 출력 이후에 위치시켜 빔을 모은 후, 초점 근처에서 빔프로파일러(scanning slit optical beam profiler, BP209-IR, Thorlabs)로 빔 크기를 측정하고 그 변화를 이론치와 비교함으로써 출력 레이저 빔의 빔질(M²)을 결정하였는데 그 값은 1.07로 출력 빔이 회절 한계 빔 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 측정한 레이저 빔의 중심 파장은 1064 nm, 반치 선폭은 약 0.2 nm이다 (그림 2(b)).

증폭된 출력 레이저 빔으로 이차조화파 생성을 유도하기 위하여 주기분극반전 준위상정합 소자인 MgO:PPSLT에 입사시켰다. 사용한 MgO:PPSLT 소자의 크기는 2.0 × 0.5 × 30 mm³이고 유효 비선형 광학계수(d_{eff})는 7.5 pm/V이다^[31]. 결정의 양 끝 면은 1064 nm와 532 nm에 대해 무반사 코팅이 되어 있으며, 온도 조절이 가능한 오븐 안에 MgO:PPSLT 소자를 두어서 위상정합조건을 만족시켰다. 그림 3은 오븐의 온도에 따른 변환된 녹색 레이저 빔의 출력을 보여주고 있는데, 최고 변환 효율을 얻을 수 있는 위상정합 온도는 42.8도, 온도 반치폭은 1.6도로 측정되었다. Sellmeier 방정식을 사용하여 계산한 위상정합 온도 반치폭은 약 1.3도로 실험치와 이론치가 비교적 잘 들어맞음을 알 수 있다^[32].

레이저 빔을 MgO:PPSLT에 입사시킬 때 회절로 인한 빔의 손실과 빔질의 저하를 막기 위하여 결정 내부에서 빔 직경이 소자 단면 크기의 약 1/2 이하가 되어야 하므로, 이를 위해서는 MgO:PPSLT 내부에서 레이저 빔 반경이

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_n}{\pi w_0^2}\right)^2} \leq 125 \mu\text{m} \quad (1)$$

을 만족시켜야 한다^[33]. 여기서 w₀는 최소 빔 반경, λ는 입사 빔의 파장, z_n은 물질 내 광경로 길이이며 실제 물리적 길이

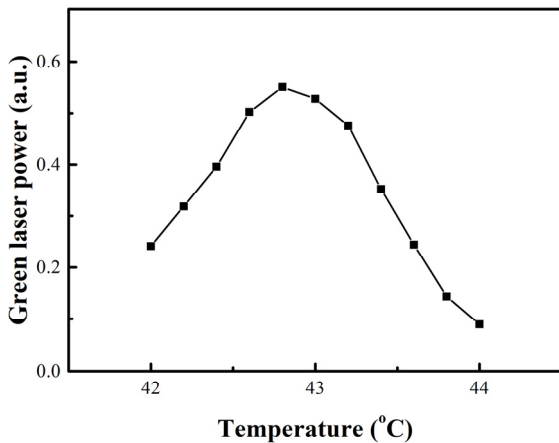


Fig. 3. Green output power as a function of temperature.

에 MgO:PPSLT의 굴절율(n=2.1)을 곱한 값이다. 최소 크기의 빔이 소자 중앙에 위치한다고 가정하면 길이 30 mm의 MgO:PPSLT 소자 내부에서 위 조건을 만족시키기 위한 최소 빔 반경 w₀는 약 36 μm이므로 이보다 더 크게 빔 크기를 조절하였다. 또한 MgO:PPSLT에 입사시킨 가우시안 빔의 이상적인 빔 직경은 다음 Boyd-Kleinman 매개 변수 식으로 얻을 수 있다^[34].

$$\xi_{opt} = \frac{l}{b} = 2.84 \quad (2)$$

여기서 l은 광학결정의 길이, b = 2πw₀²n/λ는 공초점 거리이다. 이 식에 따르면 이상적인 빔 직경은 60 μm이나 고효율 레이저 빔의 입사로 인한 표면 손상을 막으면서도 충분한 변환 효율을 얻을 수 있도록 입사 빔 직경을 90 μm로 조정하였다. 입사된 1064 nm 레이저 출력 대비 변환된 532 nm 레이저 빔의 출력 및 변환 효율은 그림 4(a)에서 확인할 수 있다. 입사 레이저 빔의 출력이 25.0 W일 때 생성된 532 nm 파장의 녹색 레이저 빔의 출력은 11.1 W였으며 이 때의 변환 효율은 44.4%였다. 또한 그림 4(a)의 기본파 출력 대비 생성된 녹색 레이저의 변환 효율은 저출력에서 출력의 제공에 비례하여 증가하고, 약 10% 이상의 고효율 변환에서는

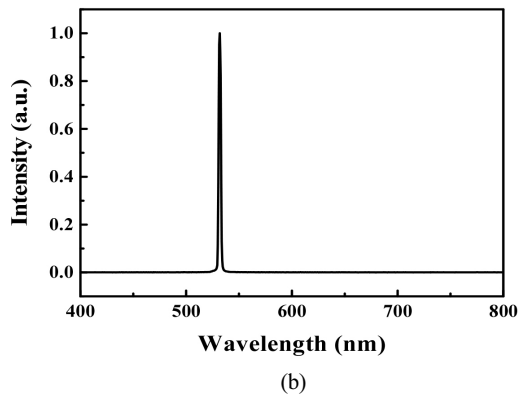
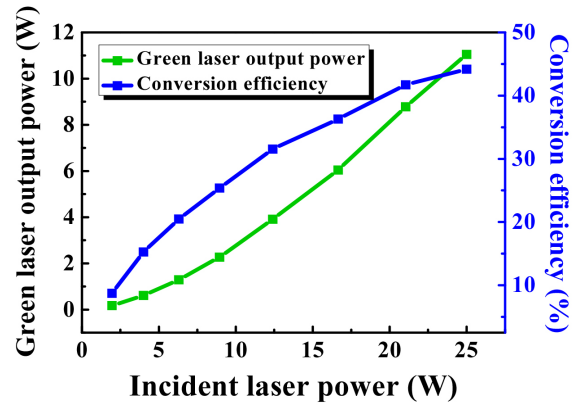


Fig. 4. (a) Green output power and the conversion efficiency at 532 nm as a function of the incident laser power at 1064 nm. (b) Green output spectrum.

기본파의 고갈로 인해 출력 P 에 대한 하이퍼볼릭 탄젠트 제곱($\tanh^2(P)$) 형태에 가까워진다는 이론적 예측과 잘 부합하는 결과이다³⁵⁾. 그림 4(b)는 분광기(Ocean Optics STS-VIS Spectrometers)를 이용하여 측정된 녹색 레이저 빛의 스펙트럼으로 중심 파장이 532 nm, 파장 선포는 2.44 nm이다. 이론적으로 계산되는 녹색 레이저 빛의 파장 선포는 0.15 nm 정도인데 훨씬 넓게 측정된 이유는 분광기의 분해능 한계(1 nm) 때문인 것으로 판단된다. CCD 카메라를 사용하여 측정된 녹색 빛의 빔질(M^2)은 약 1.1로 변환 이전 근적외선 레이저 빛의 빔질과 큰 차이가 없었다. 출력 안정도를 보기 위하여 1 시간 동안 532 nm 녹색 레이저 빔 세기를 측정한 결과, 실효 값 안정도(RMS stability)가 1% 이하로 매우 안정적으로 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

III. 결 론

Yb 광섬유를 사용한 레이저 MOPA 시스템을 구축하여 1064 nm에서 선형 편광된 1064 nm 파장의 레이저 빔을 발진시키고, 이를 주기분극반전 준위상정합 소자인 MgO:PPLT에 단순 통과시켜 고효율 532 nm 녹색 레이저 빔을 생성시키는데 성공하였다. 패브리-패롯 외부 공진기형 피드백을 주는 방식을 사용하여 선포가 좁으면서 자발 펄싱이 억제된 안정된 광섬유 레이저 씨앗 빔을 생성시켰고, 이 빔을 Yb 광섬유 증폭단에서 증폭시킨 후 준위상정합 소자 MgO:PPLT로 고효율의 이차조화파 변환을 얻을 수 있었다. 최종 생성된 532 nm 녹색 레이저 빔의 출력은 11.1 W, 변환 효율은 44.4%였으며 빔질은 약 1.1로 회절 한계 빔 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구는 연속발진 광섬유 레이저 구조를 기반으로 하여 가시광선 레이저 출력을 얻은 연구로서 간단한 구조와 방법으로 >10 W 이상의 고효율, >40% 이상의 높은 변환 효율을 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구 결과는 향후 연속발진 가시광선 레이저 빔이 필요한 분광학, 이미징, 홀로그래피, 지문 검출 등 다방면으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 경찰청과 치안과학기술연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 치안과학기술연구개발사업(PA-B000001).

References

1. S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa, and K. Yasui, "High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser," *Opt. Lett.* **25**, 105-107 (2000).
2. S. M. Cristescu, S. T. Persijn, S. T. L. Hekkert, and F. J. M. Harren, "Laser-based systems for trace gas detection in life sciences," *Appl. Phys. B* **92**, 343-349 (2008).
3. G. K. Samanta, S. C. Kumar, R. Das, and M. Ebrahim-Zadeh, "Continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a fiber laser green source at 532 nm," *Opt. Lett.* **34**, 2255-2257 (2009).
4. A. Nakamura, H. Okuda, T. Nagaoka, N. Akiba, K. Kurosawa, K. Kuroki, F. Ichikawa, A. Torao, and T. Sota, "Portable hyperspectral imager with continuous wave green laser for identification and detection of untreated latent fingerprints on walls," *Forensic Sci. Int.* **254**, 100-105 (2015).
5. A. A. S. Marouf and M. A. D. A. Daood, "Detection of fingerprint using He-Ne and diode lasers on aluminium and glass surfaces," *Radiation Sci. Technol.* **5**, 37-40 (2019).
6. N. Saitoh and N. Akiba, "Ultraviolet fluorescence spectra of fingerprints," *Sci. World J.* **5**, 355-366 (2005).
7. P. Metz, S. Müller, F. Reichert, D.-T. Marzahl, F. Moglia, C. Kränkel, and G. Huber, "Wide wavelength tunability and green laser operation of diode-pumped Pr³⁺:KY₃F₁₀," *Opt. Express* **21**, 31274-31281 (2013).
8. A. Richter, E. Heumann, E. Osiaç, G. Huber, W. Seelert, and A. Dening, "Diode pumping of a continuous-wave Pr³⁺-doped LiYF₄ laser," *Opt. Lett.* **29**, 2638-2640 (2004).
9. M. Fibrich, H. Jelinková, J. Šulc, K. Nejezchleb, and V. Škoda, "Visible cw laser emission of GaN-diode pumped Pr:YAlO₃ crystal," *Appl. Phys. B* **97**, 363 (2009).
10. F. Reichert, D.-T. Marzahl, P. Metz, M. Fechner, N.-O. Hansen, and G. Huber, "Efficient laser operation of Pr³⁺, Mg²⁺:SrAl₁₂O₁₉," *Opt. Lett.* **37**, 4889-4891 (2012).
11. J. Nakanishi, Y. Horiuchi, T. Yamada, O. Ishii, M. Yamazaki, M. Yoshida, and Y. Fujimoto, "High-power direct green laser oscillation of 598 mW in Pr³⁺-doped waterproof fluorooaluminate glass fiber excited by two-polarization-combined GaN laser diodes," *Opt. Lett.* **36**, 1836-1838 (2011).
12. G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch, D. R. Weise, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate," *Opt. Lett.* **22**, 1834-1836 (1997).
13. S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa, and K. Yasui, "High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser," *Opt. Lett.* **25**, 105-107 (2000).
14. Q. Liu, X. Yan, M. Gong, X. Fu, and D. Wang, "103 W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation," *Opt. Express* **16**, 14335-14340 (2008).
15. K. Yamamoto, H. Furuya, and K. Mizuuchi, "Highly-efficient SHG laser by using periodically poled MgO:LiNbO₃ and its application," in *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference* (Lake Buena Vista, FL, USA, Oct. 2007), pp. 693-694.
16. S. V. Tovstonoga, S. Kurimura, and K. Kitamura, "High power continuous-wave green light generation by quasiphase matching in Mg stoichiometric lithium tantalate," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 051115 (2007).
17. N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, and K. Kitamura, "Stable high-power green light generation with thermally conductive

- periodically poled stoichiometric lithium tantalate,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L 1265 (2004).
18. M. Stappel, D. Kolbe, and J. Walz, “Continuous-wave, double-pass second-harmonic generation with 60% efficiency in a single MgO:PPSLT crystal,” *Opt. Lett.* **39**, 2951-2954 (2014).
 19. S. Sinha, D. S. Hum, K. E. Urbanek, Y.-W. Lee, M. J. F. Digonnet, M. M. Fejer, and R. L. Byer, “Room-temperature stable generation of 19 watts of single-frequency 532-nm radiation in a periodically poled lithium tantalate crystal,” *J. Lightwave Technol.* **26**, 3866-3871 (2008).
 20. K. Kitamura and Y. Furukawa, “Crystal growth and low coercive field 180° domain switching characteristics of stoichiometric LiTaO₃,” *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3073-3075 (1998).
 21. S. Kurimura, N. E. Yu, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura, and T. Sumiyoshi, “QPM wavelength converters based on stoichiometric lithium tantalate,” in *Advanced Solid-State Photonics, Technical Digest* (Optical Society of America, 2005), paper TuB18
 22. G. K. Samanta, S. C. Kumar, and M. Ebrahim-Zadeh, “Stable, 9.6 W, continuous-wave, single-frequency, fiber-based green source at 532 nm,” *Opt. Lett.* **34**, 1561-1563 (2009).
 23. M. Nakamura, S. Takekawa, K. Terabe, K. Kitamura, T. Usami, K. Nakamura, H. Ito, and Y. Furukawa, “Near-stoichiometric LiTaO₃ for bulk quasi-phase-matched devices,” *Ferroelectrics* **273**, 199-204 (2002).
 24. T. Tekin, H. Schröder, B. Wunderle, G. Erbert, A. Klehr, O. Brox, J. Wiedmann, and F. Scholz, “A compact integrated green-light source by second harmonic generation of a GaAs distributed feedback laser diode,” *Proc. SPIE* **6992**, 699200 (2008).
 25. J. Wiedmann, F. Scholz, T. Tekin, S. Marx, G. Lang, H. Schröder, O. Brox, and G. Erbert, “Green light source by single-pass second harmonic generation with laser and crystal in a tilted butt joint setup,” *Proc. SPIE* **7212**, 72120B (2009).
 26. C. Alegria, Y. Jeong, C. Codemard, J. K. Sahu, J. A. Alvarez-Chavez, L. Fu, M. Ibsen, and J. Nilsson, “83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1825-1827 (2004).
 27. J. Lee, H. Jeong, and J. W. Kim, “Self-pulsing-free continuous-wave operation of an all-fiberized Yb fiber laser,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 072701 (2015).
 28. J. S Lee and J. W. Kim, “Suppression of self-pulsing in Yb fibre lasers coupled with external Fabry-Pérot cavity,” *Electron. Lett.* **50**, 695-697 (2014).
 29. A. Liu, M. A. Norsen, and R. D. Mead, “60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser,” *Opt. Lett.* **30**, 67-69 (2005).
 30. P. P. Jiang, D. Z. Yang, Y. X. Wang, T. Chen, B. Wu, and Y. H. Shen, “All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W,” *Laser Phys. Lett.* **6**, 384 (2009).
 31. OXIDE Co., “Custom PPMgSLT,” (OXIDE Co.), <https://www.opt-oxide.com/products/customized-ppmgslt> (accessed Mar. 15, 2020).
 32. S. C. Kumar, G. K. Samanta and M. Ebrahim-Zadeh, “High-power, single-frequency, continuous-wave second-harmonic-generation of ytterbium fiber laser in PPKTP and MgO:sPPLT,” *Opt. Express* **17**, 13711-13726 (2009).
 33. H. Kogelnik and T. Li, “Laser beams and resonators,” *Appl. Opt.* **5**, 1550-1567 (1966).
 34. G. D. Boyd and D. A. Kleinman, “Parametric interaction of focused Gaussian light beams,” *J. Appl. Opt.* **39**, 3597-3639 (1968).
 35. W. P. Risk, T. Gosnell, and A. V. Nurmikko, *Compact Blue-Green Lasers*, 1st ed. (Cambridge University Press, NY, US, 2003), Chapter 2, pp. 30-40.