

Study of the Variation of Optical Amplification Characteristics with Incident Beam Size and Temperature of a Cesium-vapor-based Optical Amplifier

Siheon Ryu¹, Yujae Jeong¹, and Dong-Il Yeom^{1,2†}

¹Department of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 16499, Korea

²Department of Physics, Ajou University, Suwon 16499, Korea

(Received October 28, 2021; Revised November 12, 2021; Accepted November 15, 2021)

We study the amplification properties of an optical amplifier based on a cesium-vapor cell. An optical amplification system including cesium vapor mixed with a buffer gas is built, and its amplification feature is investigated as a function of the size of the incident beam and the temperature of the cesium-vapor cell. We observe that the optical amplification properties, such as amplification factor and extraction efficiency, change significantly depending on the temperature and beam diameter of the pump and seed light. A maximum extraction efficiency of 56% is obtained when the temperature of the cesium cell is 90 °C, with a 200- μ m diameter of the pump (500 mW) and seed light (10 mW). The numerical simulation of the amplification properties agrees reasonably with the results obtained from the experiment.

Keywords: Alkali laser, Optical pumping alkali amplifier

OCIS codes: (140.1340) Atomic gas lasers; (140.3480) Laser, diode-pumped; (140.4480) Optical amplifiers

세슘 원자 증기 기반 광 증폭기의 온도와 빔 크기에 따른 광 증폭 특성 연구

류시현¹ · 정유재¹ · 염동일^{1,2†}

¹아주대학교 에너지시스템학과

☎ 16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

²아주대학교 물리학과

☎ 16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

(2021년 10월 28일 받음, 2021년 11월 12일 수정본 받음, 2021년 11월 15일 게재 확정)

버퍼가스와 세슘 증기가 혼합된 광 증폭 시스템을 구성하고 세슘 용기의 온도 및 빔 직경의 변화에 따른 광 증폭 특성을 조사하였다. 광 증폭 인자 및 추출 효율 등 광 증폭기 특성이 세슘 용기의 온도 및 빔 직경에 따라 크게 변하는 것을 확인하였는데, 90 °C의 세슘 용기온도에서 200 μ m 직경을 가진 펌프(500 mW) 및 씨앗 광(10 mW)이 입사하였을 때 최대 56%의 광 추출효율을 얻을 수 있었다. 또한, 전산 모사를 통하여 계산한 광 증폭 특성이 실험으로부터 얻은 결과와 합리적으로 일치하는 것을 확인하였다.

Keywords: 알칼리 레이저, 광펌핑 알칼리 증폭기

OCIS codes: (140.1340) Atomic gas lasers; (140.3480) Laser, diode-pumped; (140.4480) Optical amplifiers

†Corresponding author: diyeom@ajou.ac.kr, ORCID: 0000-0002-9696-4837

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

1960년에 Maiman^[1]에 의해 발명된 이후, 레이저는 광 기 반 정밀계측, 물질가공 및 광대역 정보 전달 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 반도체 및 디스플레이 분야에서 레이저를 이용한 물질가공 및 국방 분야에서 지향성 에너지 전달 등에 응용하기 위하여 광섬유를 이득 매질로 하는 고출력 광섬유 레이저가 활발히 연구되어 왔다^[2-6]. 광섬유 레이저는 고체레이저와 비교하여 빔 품질, 열 발생 특성 및 동작안정성 등에서 상대적으로 우월한 특성을 가지고 있으나, 고출력 동작 시 유도 브릴루앙(Brillouin) 산란반사 및 공간모드 불안정성 등의 광 특성 현상으로 인하여 출력 향상의 한계를 가지고 있다^[7,8]. 이에 대한 대안으로 최근 알칼리 원자 증기를 이득물질로 하는 알칼리 레이저가 관심을 모으고 있다^[9-13]. 알칼리 레이저는 고유의 에너지 준위 특성으로 인하여 고체레이저 혹은 광섬유 레이저와 비교하여 고효율 동작 가능성이 높다^[12,14]. 또한 이득물질인 알칼리 증기가 기체이기 때문에 알칼리 증기를 순환시키는 구조를 구현할 경우 고출력 동작 시 발생하는 열이나 비선형 광 특성을 억제하는데 유리할 수 있다^[15,16]. 이러한 장점들로 인하여 알칼리 레이저는 국방분야의 고효율 레이저 구현을 위한 대안으로 지속적인 연구가 진행되고 있다^[17].

2000년도 후반까지 알칼리 레이저는 흡수 선폭이 매우 좁아 선폭이 상대적으로 넓은 일반적인 다이오드 레이저로 광 펌핑을 시키기 어려웠으나 최근 고출력의 협대역 다이오드 레이저 개발로 인하여 이를 펌프 광원으로 사용하여 알칼리 레이저를 구현하는 것이 가능하게 되었다^[18]. 이 경우 다이오드 레이저를 펌프광으로 활용하기에 다이오드 펌프 알칼리 레이저(diode pumped alkali laser, DPAL)로 불린다. 한편 단일 레이저만으로 고출력 구현의 한계가 있기에 알칼리 증기 기반의 광 증폭기인 다이오드 펌프 알칼리 증폭기(diode

pumped alkali amplifier, DPAA)에 대한 연구가 동시에 진행되고 있다^[19-22]. 알칼리 기반 광 증폭기의 광 증폭 특성은 세슘의 온도, 펌프 및 씨앗광의 출력 및 빔 집속 크기 등 다양한 변수에 의존하기 때문에 이에 대한 면밀한 연구가 필요하나 아직 알칼리 증기 기반 광 증폭기의 특성 연구는 초기 단계에 머물고 있다. 본 논문에서는 세슘(cesium) 증기를 이득 매질로 하는 알칼리 증폭기 시스템을 구현하고 세슘 용기의 온도, 빔의 집속 크기 및 출력에 따른 알칼리 광 증폭기의 특성을 살펴보고자 하였다. 또한 알칼리 증폭기에서 각 에너지 준위 간의 전이 특성을 고려한 광 증폭 특성 전산모사를 수행하여 실험결과와 비교함으로써 세슘 증기 기반 광 증폭기에서 얼마나 큰 광 증폭 효율을 얻을 수 있는지 살펴보고자 하였다.

II. DPAA 작동원리 및 실험장치 구성

DPAA에서 이득매질로 활용하는 알칼리 원자의 에너지 다이어그램은 그림 1(a)와 같이 3준위계로 이루어져 있다^[18]. 3개의 에너지 준위는 각각 $n^2S_{1/2}$, $n^2P_{1/2}$, $n^2P_{3/2}$ 이며 여기서 n 은 주 양자수로 포타슘(potassium), 루비듐(rubidium), 세슘 원자의 경우 각각 4, 5, 6의 값을 가진다. 펌프광에 의해 알칼리 원자들이 $n^2S_{1/2}$ 준위에서 $n^2P_{3/2}$ 준위로 여기되는 과정을 D_2 전이라고 하며 $n^2P_{1/2}$ 준위에서 $n^2S_{1/2}$ 준위로 내려오는 과정을 D_1 전이라고 정의한다. 통상적으로 알칼리 증기 기반 광 증폭기에서 버퍼가스를 혼합하여 사용하는데 이때 버퍼가스는 D_1 전이선의 자발방출 시간(27.6-34.5 ns)보다 $n^2P_{3/2}$ 준위에서 $n^2P_{1/2}$ 준위로 내려오는 시간(~1 ns)을 짧게 하여 밀도반전이 용이하게 하는 동시에 알칼리 원자의 흡수선폭을 늘려 펌프광의 효율적인 흡수를 도와주는 역할을 한다^[18]. 본 연구에서는 400 torr의 에테인(ethane) 버퍼가스가 주입된 세슘 용기를 광 증폭 매질로 이용하였다. 그림 1(b)는 온도에 따른 알칼리 원자들의 개수밀도(number density)를 보여주고 있다^[23-25]. 그림

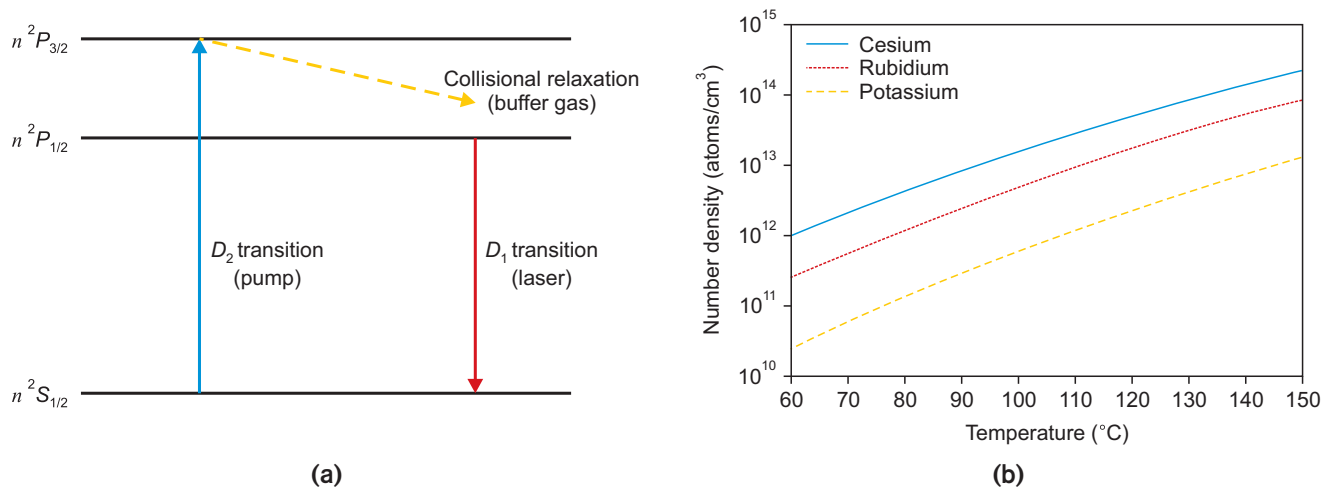


Fig. 1. Physical properties of alkali atoms. (a) Energy diagram. (b) Calculated number density with temperature.

과 같이 주어진 온도에서 다른 알칼리 원자들과 비교하여 세슘은 큰 개수밀도를 가지게 되는데 이는 세슘의 기화열이 작기 때문이라고 알려져 있다. 예를 들어 섭씨 130 °C에서 포타슘, 루비듐, 세슘은 각각 3×10^{12} , 30×10^{12} 및 80×10^{12} atom/cm³의 개수밀도를 가진다. 따라서 세슘을 광 증폭 이득매질로 활용할 경우 상대적으로 큰 흡수 단면적을 가지고 빛과의 높은 상호작용을 기대할 수 있어 본 연구에서는 세슘을 광 증폭을 위한 이득매질로 선택하였다.

그림 2는 세슘 이득매질 기반 광 증폭 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험장치는 그림과 같이 크게 펌프 및 씨앗 광원에 해당하는 부분과 결합된 광이 세슘 용기로 입사되어 광 증폭을 일으키고 이를 검출하는 부분으로 구성되어 있다. 씨앗 광으로 선풍이 협소한(약 0.5 MHz) 894 nm 근처 중심파장의 분포형 브래그 반사거울(distributed Bragg reflector, DBR) 레이저를 활용하였으며 펌프광의 경우 852 nm 근처의 중심파장을 가지는 좁은 선풍(약 0.5 MHz)의 DBR 레이저를 반도체 기반 테이퍼 증폭기(tapered amplifier)로 증폭하여 사용하였다. 그림과 같이 반파장 위상 지연기(half-wave plate, HWP)를 통하여 씨앗광과 펌프광의 선편광 방향을 제어한 후 서로 수직한 선편광 상태인 두 빔을 편광 빔가르개(polarizing beam splitter, PBS)를 통하여 결합하였다. 또한 씨앗

광과 펌프광의 공간모드 간 겹침을 최대화하여 광 증폭 효율을 높이기 위하여 그림과 같이 비구면 렌즈(aspheric lens)로 통하게 하여 단일모드 편광유지 광섬유(P5-780PMAR-2; Thorlabs, NJ, USA)에 집속한 후 광 증폭을 시도하였다. 이때 광섬유에 결합된 씨앗광과 펌프광의 최대 출력은 각각 40 mW, 500 mW로 측정되었다. 광섬유 출력단으로 나온 서로 수직한 선편광의 펌프광과 씨앗광은 시준렌즈를 거친 후 두 개의 렌즈를 거쳐 버퍼가스와 혼합된 세슘 용기로 집속된다. 본 실험에서 5 cm 및 10 cm 초점거리를 가지는 두 개의 렌즈 사이의 간격 조절 및 세슘 용기의 상대적 위치 조절을 통하여 세슘 용기의 중심에서 빔이 다양한 크기로 집속되도록 조정하였다. 그림 2에 삽입된 사진은 실제 실험에 사용된 세슘 용기의 사진을 보여주고 있다. 세슘 용기는 2 cm 길이와 원통형의 구조를 가지고 있고 빛이 통과하는 광경로의 경우 씨앗광과 펌프광 파장에 대하여 무반사 윈도우로 구성된다. 세슘 증기의 밀도는 온도에 따라 크게 달라지게 되는데 효율적인 빛 흡수를 위하여 통상적으로 섭씨 80 °C 이상에서 동작시킨다. 이를 위하여 세슘 용기를 열선으로 가열할 수 있는 장치를 결합하였다. 이 때 세슘 용기의 온도는 80-110 °C까지 조절이 가능하도록 하였다. 세슘 용기에서 잔여 펌프광을 걸러주기 위하여 중심파장이 875 nm인 장파장 투과 필터(long-pass

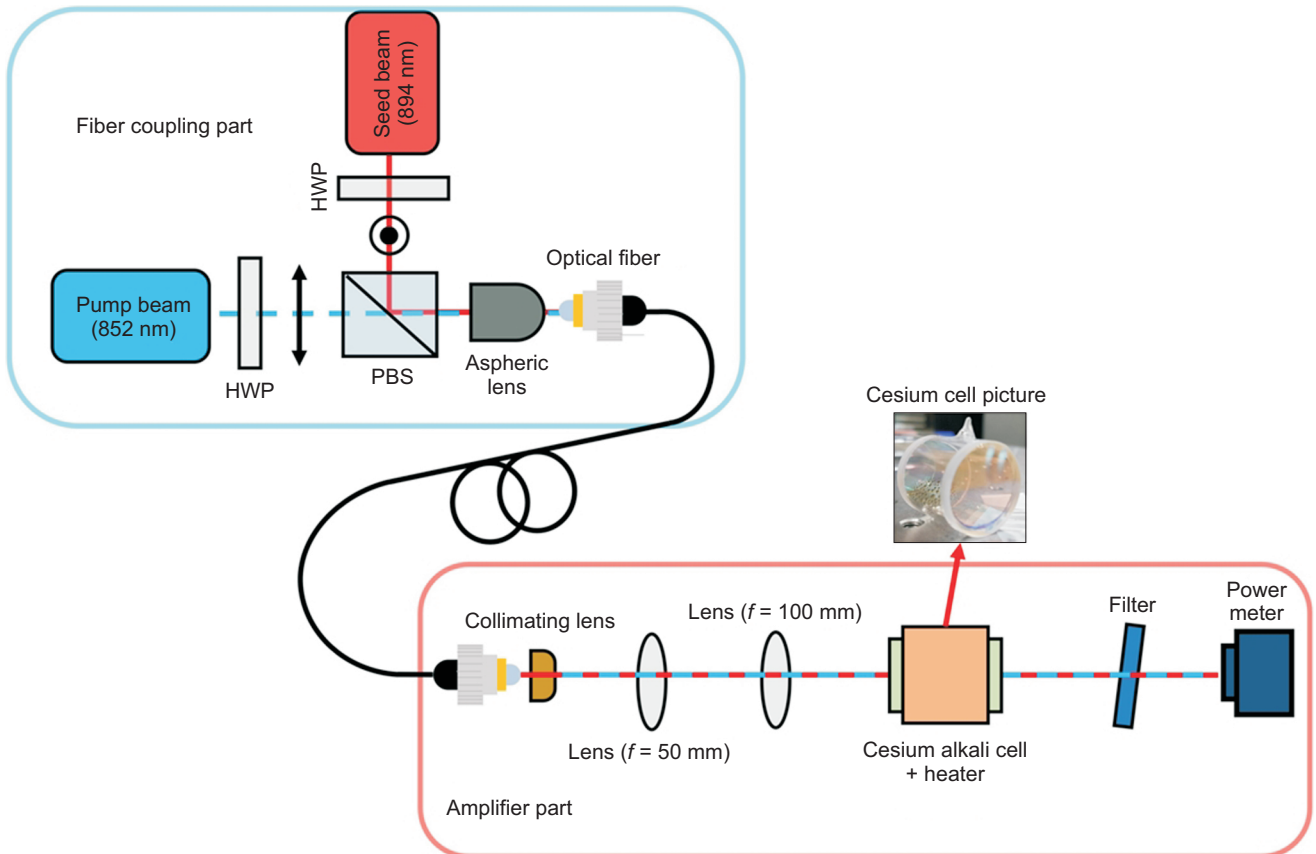


Fig. 2. Schematic of experimental setup.

filter)를 배치한 후 증폭된 출력특성을 측정하였다.

III. 세슘 광 증폭기의 광 특성 실험

버퍼가스가 혼합되어 있더라도 세슘은 여전히 상대적으로 좁은 흡수 스펙트럼 선폭을 가지고 있으며($\Delta\nu \sim 20$ GHz), 따라서 세슘에서 효율적인 광흡수를 위해서 씨앗광과 펌프광 DBR 레이저의 중심파장을 정밀하게 조절할 필요가 있다. 이를 위하여 펌프광 및 씨앗광에 해당하는 DBR 레이저의 중심파장을 레이저의 온도(TEC temperature) 변화를 통해 정밀하게 조정하며 실험에 사용하는 버퍼가스 혼합된 알칼리 용기의 D_2 및 D_1 전이선에 해당하는 투과 스펙트럼을 측정하였다. 그림 3(a)는 세슘 용기의 온도 110 °C에서 500 mW 출력을 가지는 펌프광을 이용하여 측정한 D_2 전이선의 투과 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 그래프의 가로축은 사용한 DBR 레이저의 TEC 조절온도 및 이에 해당하는 중심파장을 보여주고 있으며 세로축은 세슘 용기를 투과한 빛의 투과 특성을 나타낸다. 그림 3(a)의 그래프에서 공명흡수가 일어나지 않는 파장에서 투과율이 100%로 회복되지 않는 이유는 세슘 증기를 이득 매질로 사용하는 경우 광 윈도우 내부에 세슘이 증착되어 입사된 빛의 일부가 파장에 관계없이 산란되기 때문으로 추정된다. 이를 고려하여 그래프에서 투과율 50%를 기준으로 측정 한 D_2 전이선의 흡수 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 약 0.11 nm이었다. 이는 통상적으로 약 0.03 nm의 선폭을 가지는 고휘출력 협대역 레이저 다이오드를 효율적으로 흡수하기에 충분할 것으로 예상된다. 최대 흡수율을 보이는 D_2 전이선 흡수 스펙트럼의 중심파장은 852.4 nm 근처로 추정되었다. 그림 3(b)는 동일한 세슘 용기 온도(110 °C)에서 출력 40 mW의 씨앗광을 이용하여 측정한 D_1 전이선의 흡수

스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 최대 투과율(60%)을 기준으로 D_1 전이선 흡수 스펙트럼의 반치폭은 약 0.11 nm로 추정되었으며 최대 흡수율을 보이는 파장은 894.6 nm로 추정되었다. 세슘 용기에서 펌프광 및 씨앗광에 대한 투과율 측정을 통하여 실험에서 활용하는 광원이 세슘과 공명 흡수를 보이는 것을 확인하였으며 온도조절을 통한 정밀한 파장제어를 통하여 특정파장에서 대부분의 빛이 세슘 용기에 흡수될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 펌프광 및 씨앗광에서 최대 흡수율을 보이는 852.4 nm 및 894.6 nm 근처에 광원의 중심파장을 고정시킨 후 광 증폭실험을 수행하였다.

세슘 증폭기의 광 증폭 특성을 알아보기 위하여 그림 2에서 기술된 실험장치를 이용하여 다양한 온도 및 빔 집속 크기에 따른 광 증폭실험을 수행하였다. 렌즈를 통하여 집속된 펌프 및 씨앗광에 대한 세슘 용기의 상대적 위치를 이동시키며 흡수 및 광 증폭 특성을 측정하였으며 그 결과를 그림 4에서 보여주고 있다. 그래프의 가로축에서 빔의 직경은 세슘 용기의 중심 위치를 기준으로 정의하였으며 빔의 중심위치에서 추정된 펌프광의 빔세기(intensity)를 같이 보여주고 있다. 그림 4(a)는 500 mW 출력을 가지는 펌프광에 대하여 세슘 용기의 온도를 80-110 °C 범위에서 변동시키며 펌프광의 빔 직경에 따른 광 흡수 특성을 보여주고 있다. 그래프에서 온도가 증가할수록 펌프광의 흡수가 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 온도가 증가할수록 세슘 증기의 개수밀도가 증가하기 때문이다. 또한 빔 직경이 증가할수록 펌프광의 흡수율 또한 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 80 °C 온도의 세슘 용기에서 펌프광은 200 μm 직경에서 30% 이하의 흡수특성을 보이나 1,000 μm 직경에서는 거의 100%에 근접하는 흡수율을 가지게 된다. 한편 세슘 용기의 온도가 110 °C일 경우 펌프광은 200 μm 직경에서 70%에 근접하는 흡수율을 보이며 약 500 μm 직경에

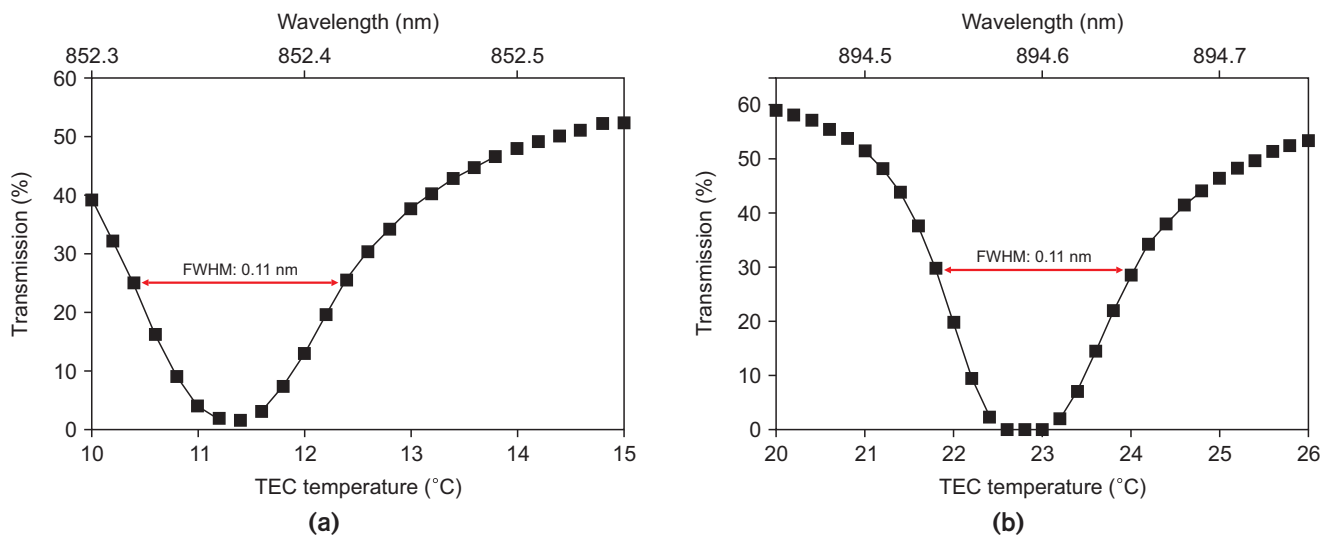


Fig. 3. Transmission spectrum of an alkali cell at (a) D_2 transition line and (b) D_1 transition line.

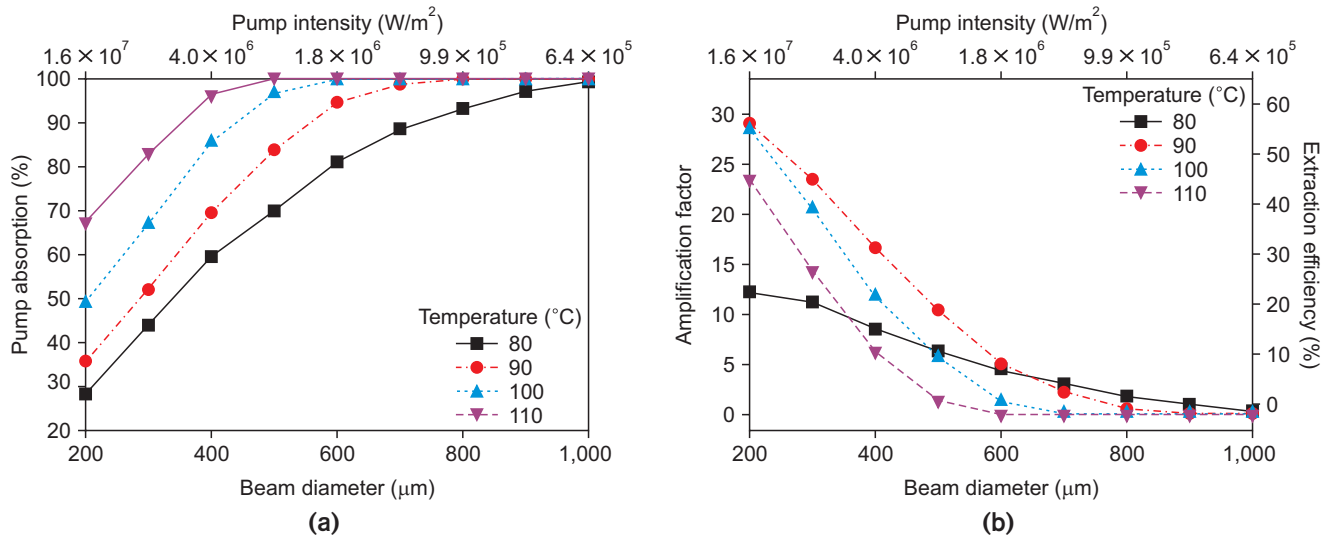


Fig. 4. Experimental results. (a) Pump absorption and (b) extraction efficiency and amplification factor as a function of beam diameter.

서는 100%에 가까이 용기에 흡수됨을 알 수 있다. 이와 같이 세습 용기에 흡수되는 펄프광 특성은 용기의 온도 및 빔의 직경에 따라 크게 변하게 되며 이는 세습 기반 광 증폭기 특성을 변화시키는 주요한 원인이 된다. 그림 4(b)는 펄프광의 빔 직경에 따른 세습 증기의 광 증폭 특성을 보여주고 있다. 증폭실험에서 사용한 씨앗광 및 펄프광의 출력은 각각 10 mW 및 500 mW로 고정하였으며 마찬가지로 세습 용기의 온도를 80-110 °C 범위에서 변동시키며 실험을 수행하였다. 그래프에서 증폭 인자(amplification factor)는 입력된 씨앗광의 세기 대비 증폭된 출력 세기 비율을 나타내며, 광 추출 효율(extraction efficiency)은 펄프광에서 씨앗광 파장대역으로 증폭된 출력 에너지의 전환효율을 나타낸다. 그림과 같이 세습 증기 광 증폭은 빔 직경이 비교적 작은 영역(200-500 μm)과 큰 영역범위(600-1000 μm)에서 구별되는 특성을 가지고 있다. 세습 용기에서 빔 직경이 비교적 큰 경우(600-1000 μm) 세습원자의 개수밀도에 비해 펄프광의 세기가 작아 펄프광에 의한 밀도반전이 용이하지 않고 증폭된 씨앗광이 다시 재흡수될 수 있다. 이로 인하여 주어진 온도영역(80-110 °C)에서 10% 이하의 낮은 광 추출 효율 및 5 이하의 낮은 광 증폭 인자를 보이게 된다. 이와 같이 빔 직경이 큰 영역에서는 세습 원자의 개수밀도가 낮아 작은 광흡수를 보이는 낮은 온도(80 °C)에서 오히려 더 높은 광 증폭 인자를 가지는 것을 알 수 있다. 작은 빔 직경(200-500 μm)으로 집속하였을 경우 펄프광의 세기가 증가하여 80 °C 온도보다 더 높은 온도에서 더 큰 광 증폭 인자 및 추출효율을 보이게 된다. 그림과 같이 80 °C 온도의 세습 용기에서 빔 집속 크기를 줄여나갈 때 광 증폭 인자는 최대 12에 그치는 반면 더 높은 온도로 세습 용기를 가열하였을 경우 200 μm의 빔 직경에서 20배 이상으로 씨앗광이 증폭되는 것을 알 수 있다. 현재 주어진 실험 환경에서 90 °C

의 세습 용기 온도에서 빔을 200 μm 직경으로 집속하였을 경우 최대 29배의 광 증폭 인자를 얻을 수 있었으며 이 때 광 추출 효율은 56%로 측정되었다. 더 작은 빔 직경으로 집속할 경우 세습 용기의 중심에서 더 높은 세기의 펄프광을 얻을 수 있으나 가우시안 빔의 특성상 더 큰 발산각으로 인하여 세습 용기 중심에서 벗어난 지역에서 오히려 더 큰 빔 직경을 가지게 되어 광 증폭 특성이 저하될 수 있다. 보다 짧은 길이를 가지는 고온의 세습 용기에 빔을 집속하거나 광 밴드갭 광섬유와 같이 집속된 크기를 유지할 수 있는 도파관에 세습 증기를 채워 넣을 경우 보다 높은 광 추출효율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 세습 광 증폭기의 광 증폭 특성 전산모사

세습 증기 기반 광 증폭에 대한 실험결과에 대한 이론적 분석을 위하여 3준위 기반의 비율 방정식(rate equation)을 기반으로 전산모사를 수행하였다. 그림 1(a)의 세 가지 에너지 준위에 해당하는 세습원자의 개수밀도를 각각 n_1 , n_2 및 n_3 라 가정할 때 시간에 따른 개수밀도 변화의 비율 방정식은 다음과 같이 기술할 수 있다^[13,26,27].

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= -\Gamma_p + \Gamma_L + n_2(A_{21} + Q_{21}) + n_3(A_{31} + Q_{31}), \\ \frac{dn_2}{dt} &= -\Gamma_L + \gamma_{32}[n_3 - 2n_2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)] - n_2(A_{21} + Q_{21}), \\ \frac{dn_3}{dt} &= \Gamma_p - \gamma_{32}[n_3 - 2n_2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)] - n_3(A_{31} + Q_{31}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$n_0 = n_1 + n_2 + n_3$$

여기서 Γ_p 는 펌프광에 의한 D_2 전이율, Γ_L 는 유도방출에 의한 D_1 전이율이며, A_{21} 및 A_{31} 은 각각 $6^2P_{1/2}$ 준위 및 $6^2P_{3/2}$ 준위로부터 $6^2S_{1/2}$ 준위로의 자발방출 전이율을 나타낸다. 또한 Q_{21} , Q_{31} 은 각각 세슘과 버퍼가스의 충돌로 인한 $6^2P_{1/2}$ 준위 및 $6^2P_{3/2}$ 준위로부터 $6^2S_{1/2}$ 준위로의 전이율을 나타내며, γ_{32} 는 버퍼가스와 충돌로 인한 $6^2P_{3/2}$ 준위에서 $6^2P_{1/2}$ 준위로의 전이율을 나타낸다. 마지막으로 ΔE 는 $6^2P_{3/2}$ 준위와 $6^2P_{1/2}$ 준위 사이의 에너지 차이이며 k 와 T 는 볼츠만 상수 및 세슘 용기 내부의 절대온도를 나타낸다. 세슘 용기의 온도 110 °C, 버퍼가스의 압력 400 torr일 때 γ_{32} 는 3.32×10^9 /s로 계산되었으며, Q_{21} 과 Q_{31} 의 값은 모두 8.93×10^6 /s의 값을 사용하였다. n_1 , n_2 및 n_3 는 정상 상태에서 비울방정식의 해로써 결정되며, 이를 통해 다음 식 (2)와 같이 광 증폭되는 씨앗광의 출력 및 펌프광의 흡수율을 알 수 있다.

$$P_L = P_s \cdot \exp[(n_2 - n_1)\sigma_{D_1}l] \quad (2)$$

이 때 P_s 는 세슘 용기에 입사하는 씨앗광의 출력, σ_{D_1} 는 버퍼가스와 충돌로 확장된 세슘의 D_1 전이 단면적이며, l 은 빔이 통과하는 세슘 용기의 길이를 나타낸다. 전산모사에서 세슘 용기에 입사되는 빔은 가우시안 세기 분포를 가지므로 가정하였고, 펌프 빔과 씨앗 빔은 공간적으로 겹치는 것으로 가정하여 전산모사를 진행하였다. 그림 5(a)는 전산모사를 통하여 500 mW 출력을 가지는 펌프광에 대하여 세슘 용기의 온도를 80-110 °C 범위에서 변동시키며 펌프광의 빔 직경에 따른 광 흡수 특성의 계산 결과를 보여주고 있다. 그래프에서 빔의 크기와 온도가 증가할수록 펌프광의 흡수율이 증가하는 경향은 실험결과인 그림 4(a)와 유사하지만 전산모사로 수행한 펌프광의 흡수율 그래프보다 실험결과의 펌프광의 흡

수율이 더 높음을 관찰할 수 있다. 이는 실험에서는 광 윈도우 내부의 오염에 의해 펌프광이 산란되어 상정한 펌프광의 크기보다 더 작은 양의 펌프광이 세슘 용기 내부로 입사되었기 때문으로 추정된다. 그림 5(b)는 전산모사를 통하여 계산한 세슘 광 증폭기의 광 증폭특성을 보여주고 있다. 500 mW 출력의 펌프광 및 10 mW 출력의 씨앗광에 대하여 80-110 °C 세슘 용기 온도 범위에서 빔 직경에 따른 광 증폭인자 및 광 추출 효율을 그래프에서 보여주고 있다. 빔의 크기가 비교적 큰 영역(600-1000 μm)에서는 낮은 온도범위(80-90 °C)에서 높은 온도범위(100-110 °C)보다 높은 광 증폭 인자의 특성을 보이고 있다. 반면 입사광의 크기가 비교적 작은 영역(200-500 μm)에서는 높은 온도범위에서 상대적으로 광 증폭이 원활하게 발생하는 것을 알 수 있다. 전산모사 수행결과로부터 온도 100 °C 및 입사광의 크기 200 μm 에서 최대 74%의 광추출효율과 38배의 증폭배수를 얻을 수 있었다. 이와 같은 광 추출 효율 및 광 증폭 배수는 실제 실험결과와 수치상 다소 차이가 있는데, 이는 전산모사 결과가 세슘 용기에서의 빛의 산란 등 실제 실험환경을 완전히 구현하지 못하는 한계에 기인한다고 추측된다. 그러나 빔 직경 및 온도에 따른 광 증폭 특성 등의 측면에서 실제 실험결과와 전산모사 결과의 경향이 대체적으로 일치한다고 볼 수 있다.

세슘 광 증폭기의 광 증폭 특성 및 에너지 전환 효율에 대한 이해를 위하여 펌프광의 일부가 광 증폭에 기여하지 않고 다른 형태의 에너지로 전환되는 과정을 전산모사를 통하여 살펴보았다. 세슘 용기에 입사한 펌프광은 씨앗광에 의한 광 증폭뿐만 아니라, 열에너지(thermal), 버퍼가스와 세슘 원자와의 충돌로 인한 소광 현상(quenching) 및 자발방출(fluorescence) 등 여러 형태의 에너지로 전환된다^[13,28]. 그림 6은 세슘 용기로 입사된 펌프광이 진행하면서 다양한 형태의 에너지

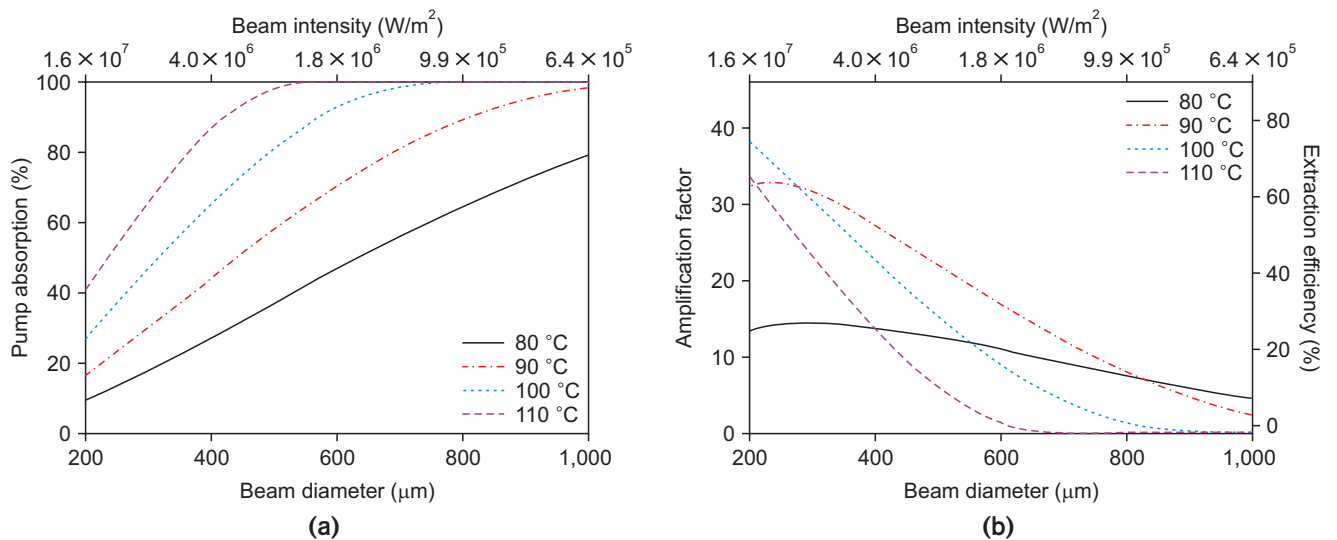


Fig. 5. Simulation results. (a) Pump absorption and (b) extraction efficiency and amplification factor as a function of beam diameter.

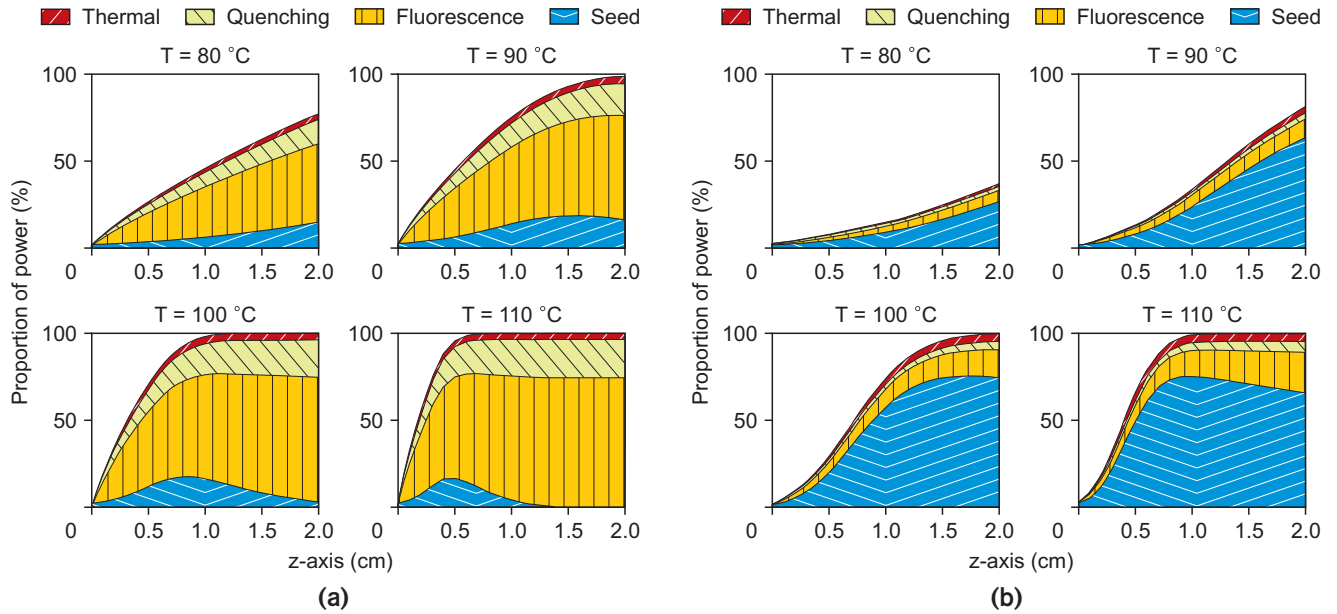


Fig. 6. Calculated energy conversion of the pump light propagating along the amplifier for different beam diameters of (a) 800 μm and (b) 200 μm .

로 전환되는 과정에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 실험과 동일한 조건, 즉 20 mm 길이의 세습 용기에 500 mW 출력의 펌프광 및 10 mW의 씨앗광이 동시에 진행할 때 온도와 빔 직경에 따라 다양한 형태로 전환되는 에너지의 양상을 구분하여 표현하였다. 열에너지(thermal), 소광현상(quenching), 자발방출에너지(fluorescence), 광 증폭된 씨앗광(seed)으로 에너지를 구분하였으며 나머지는 흡수되지 못한 펌프광을 나타내고 있다. 또한 가로축인 z-axis는 세습 용기 내 빔의 진행 거리를 의미한다. 그림 6(a)는 다양한 온도의 세습 용기에 낮은 세기의 빔(빔 직경: 800 μm)이 입사할 때 빛의 진행방향에 따른 에너지 전환 특성을 보여주고 있다. 온도에 따라 펌프광의 흡수가 다소 차이를 보이지만 대체적으로 모든 온도에서 씨앗광의 광 증폭은 매우 작은 반면 자발방출로의 에너지 전환이 지배적임을 알 수 있다. 또한 고온(100 $^{\circ}\text{C}$ 및 110 $^{\circ}\text{C}$)의 세습 용기에서 증폭되던 씨앗광이 재흡수되며 감소되는 현상이 뚜렷이 관찰된다. 예를 들어 110 $^{\circ}\text{C}$ 에서 세습 용기의 길이가 0-0.5 cm까지 씨앗광은 증폭되나 0.5-2 cm에서는 광 증폭된 빛이 재흡수되어 0%에 가까운 출력을 확인할 수 있다. 이는 결과적으로 광 증폭 효율의 저하를 초래하게 된다. 그림 6(b)는 빔의 세기가 비교적 높은 영역(빔 직경: 200 μm)에서 빛의 진행 방향에 따른 에너지 전환 특성을 보여주고 있다. 그림 6(a) 결과와 대조적으로 그림 6(b)에서는 씨앗광으로 광 증폭된 비율이 지배적임을 알 수 있다. 이는 펌프광의 세기가 세습의 개수밀도에 비해 충분히 크기 때문에 씨앗광이 재흡수가 아닌 광 증폭에너지로 대부분 변환되었기 때문이다. 또한 고온의 세습 용기에서는 광 증폭된 에너지의 재흡수 때문에 길이에 따라서 광 증폭 에너지가 증가하다가 다시 감소하는 것

을 확인할 수 있다. 이와 같이 세습 광 증폭기의 추가적인 전산모사를 통해 펌프광의 세기와 온도변화에 따라 펌프광이 어떠한 형태의 에너지로 전환되는지에 대한 이해를 도울 수 있었다.

V. 결 론

에테인 버퍼가스 400 torr가 주입된 세습 용기를 이용하여 광 증폭기를 제작하고 입사된 빔 크기 및 온도에 따른 광 증폭 특성을 실험적, 이론적으로 살펴보았다. 실험결과를 통하여 입사된 빔 크기 및 온도에 따라 광 증폭 특성이 크게 변화할 수 있음을 확인하였으며 펌프광 500 mW, 씨앗광 10 mW 조건에서 최대 광추출효율 56%를 얻을 수 있었다. 또한 전산모사를 통하여 실험에서 얻은 광 증폭 특성 결과와 유사한 경향을 확인하였으며 추가적으로 세습 광 증폭기에서 진행방향에 따른 에너지 전환 특성에 대하여 살펴보았다. 본 논문에서 수행한 세습 증기 기반 DPAA의 광 증폭 특성에 대한 연구는 향후 고효율 DPAA를 구현하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 고효율레이저 특화연구실 프로그램의 일환으로 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(No. UD190015ID).

References

1. T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature* **187**, 493-494 (1960).
2. E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, "Double clad, offset core Nd fiber laser," in *Optical fiber sensors* (Optical Society of America, 1988), paper PD5.
3. Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," *Opt. Express* **12**, 6088-6092 (2004).
4. L. Zenteno, "High-power double-clad fiber lasers," *J. Lightwave Technol.* **11**, 1435-1446 (1993).
5. D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.* **55**, 447-449 (1985).
6. J. Limpert, F. Roser, T. Schreiber, and A. Tunnermann, "High-power ultrafast fiber laser systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12**, 233-244 (2006).
7. E. P. Ippen and R. H. Stolen, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," *Appl. Phys. Lett.* **21**, 539-541 (1972).
8. N. A. Brilliant, "Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier," *J. Opt. Soc. Am. B* **19**, 2551-2557 (2002).
9. W. F. Krupke, R. J. Beach, V. K. Kanz, and S. A. Payne, "Resonance transition 795-nm rubidium laser," *Opt. Lett.* **28**, 2336-2338 (2003).
10. W. F. Krupke, R. J. Beach, V. K. Kanz, S. A. Payne, and J. T. Early, "New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs)," *Proc. SPIE* **5448**, 7-17 (2004).
11. W. F. Krupke, R. J. Beach, S. A. Payne, V. K. Kanz, and J. T. Early, "DPAL: a new class of lasers for CW power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths," *AIP Conf. Proc.* **702**, 367 (2004).
12. W. F. Krupke, "Diode pumped alkali lasers (DPALs): an overview," *Proc. SPIE* **7005**, 700521 (2008).
13. R. J. Beach, W. F. Krupke, V. K. Kanz, S. A. Payne, M. A. Dubinskii, and L. D. Merkle, "End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling," *J. Opt. Soc. Am. B* **21**, 2151-2163 (2004).
14. B. V. Zhdanov and R. J. Knize, "Review of alkali laser research and development," *Opt. Eng.* **52**, 021010 (2012).
15. B. V. Zhdanov, M. D. Rotondaro, M. K. Shaffer, and R. J. Knize, "Potassium diode pumped alkali laser demonstration using a closed cycle flowing system," *Opt. Commun.* **354**, 256-258 (2015).
16. G. A. Pitz and M. D. Anderson, "Recent advances in optically pumped alkali lasers," *Appl. Phys. Rev.* **4**, 041101 (2017).
17. J. Grosek, S. Naderi, B. Olikier, R. Lane, I. Dajani, and T. Madden, "Laser simulation at the Air Force Research Laboratory," *Proc. SPIE* **10254**, 102450N (2017).
18. W. F. Krupke, "Diode pumped alkali lasers (DPALs)—A review (rev1)," *Prog. Quantum Electron.* **36**, 4-28 (2012).
19. D. A. Hostutler and W. L. Klennert, "Power enhancement of a Rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier," *Opt. Express* **16**, 8050-8053 (2008).
20. B. V. Zhdanov and R. J. Knize, "Efficient diode pumped cesium vapor amplifier," *Opt. Commun.* **281**, 4068-4070 (2008).
21. P. Bai-Liang, W. Ya-Juan, Z. Qi, and Y. Jing, "Modeling of an alkali vapor laser MOPA system," *Opt. Commun.* **284**, 1963-1966 (2011).
22. Y. Li, W. Hua, L. Li, H. Wang, Z. Yang, and X. Xu, "Experimental research of a chain of diode pumped rubidium amplifiers," *Opt. Express* **23**, 25906-25911 (2015).
23. D. A. Steck, "Cesium D line data," (Daniel A. Steck, Published date: 2003 October 14), <https://steck.us/alkalidata/> (Accessed date: 2021 October 1).
24. D. A. Steck, "Rubidium 87 D line data," (Daniel A. Steck, Published date: 2003), <https://steck.us/alkalidata/> (Accessed date: 2021 October 1).
25. T. G. Tiecke, "Properties of potassium," Ph. D. dissertation, University of Amsterdam, The Netherlands (2010), p. 2.
26. Z. Yang, H. Wang, Q. Lu, W. Hua, and X. Xu, "Modeling of an optically side-pumped alkali vapor amplifier with consideration of amplified spontaneous emission," *Opt. Express* **19**, 23118-23131 (2011).
27. P. Bai-Liang, W. Ya-Juan, Z. Qi, and Y. Jing, "Modeling of an alkali vapor laser MOPA system," *Opt. Commun.* **284**, 1963-1966 (2011).
28. M. Endo, R. Nagaoka, H. Nagaoka, T. Nagai, and F. Wani, "Output power characteristics of diode-pumped cesium vapor laser," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 122701 (2015).