《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 29, No. 6, December 2018, pp. 247-252 ISSN : 1225-6285(Print)
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2018.29.6.247 ISSN : 2287-321X(Online)

Light Amplification in Diode-pumped Cesium Vapor Cell

Jongmin Hwang, Taek Jeong, and Han Seb Moon†

Department of Physics, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

(Received November 1, 2018; Revised November 25, 2018; Accepted November 26, 2018)

We report amplification of a small signal in a diode-pumped Cs vapor cell with 500 torr of ethane buffer gas, in the low-pump-power regime of 200 mW or less. For efficient amplifier operation, the pump and signal beams were coupled to a single-mode optical fiber, and completely overlapped in the Cs vapor cell. We investigated the amplification of the small signal according to cell temperature, signal power, and pump power. An amplification factor of 56 was achieved under the conditions of cell temperature of 115°C, signal power of 0.1 mW, and pump power of 200 mW.

Keywords: Alkali laser, Optically pumped alkali amplifier
OCIS codes: (140.3280) Laser amplifiers; (140.1340) Atomic gas lasers

다이오드 펌프 세슘 원자 증기에서의 증폭

황종민 · 정 택 · 문한섭†

부산대학교 물리학과
㊞ 46214 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

(2018년 11월 1일 받음, 2018년 11월 25일 수정본 받음, 2018년 11월 26일 게재 확정)

본 논문에서는 200 mW 이하의 낮은 펌핑 조건의 다이오드 펌프 세슘 증기 셀에서 약한 신호광 증폭을 보고한다. 고효율 증폭 효과를 얻기 위해서 펌프빔과 신호빔을 하나의 단일 모드 광섬유로 통과시켜 세슘 증기 셀 내부에서 완전히 겹치도록 하였다. 우리는 약한 신호광의 증폭 정도를 셀의 온도, 신호광의 세기, 펌프광의 세기에 따라 조사하였다. 증기 셀의 온도 115°C, 신호광의 출력 0.1 mW, 그리고 펌프광의 출력 200 mW인 조건에서 56배의 증폭효과를 얻을 수 있었다.

Keywords: 알칼리 레이저, 광펌핑 알칼리 증폭기
OCIS codes: (140.3280) Laser amplifiers; (140.1340) Atomic gas lasers

I. 서 론

1960년 레이저가 처음 개발된 이후, 지난 수십 년 동안 다양한 종류의 레이저가 개발되었고 레이저 기술의 발전으로 순수 과학 연구, 산업적 응용, 그리고 국방 응용 등으로 다양한 분야에서 활용되고 있다. 전력-광출력 전환 효율 및 펌프광-출력광 전환효율을 획기적으로 향상시키기 위해서는 근본적으로 기존 레이저 이득매질보다 양자 효율이 월등히 높은 이득 매질을 사용해야 하며, 이 조건을 만족시키는 것이 바로 알칼리 증기 이득매질이고 이를 기반으로 한 레이저 개발이 요구된다. 최근에 알칼리 원자 증기를 이용한 고효율 레이저 개발에 대한 관심이 높아지고 있는데, 그 이유는 고효율, 우수한 빔 특성, 그리고 고출력으로 확장할 수 있는 잠재력을 가지고 있기 때문이다[1-13].

레이저의 특성 중에서 전기적 에너지를 광학적 에너지 전환하는 변환효율이 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 레이저의 변환효율은 고체 레이저인 Nd:YAG laser가 갖는 양자효율 76%, Yb:silica 광도파로 레이저가 갖는 양자효율 약 80%이다. 한편, 다이오드 여기 알칼리 레이저(diode pumped alkali laser, DPAL)는 알칼리 원자인 Cs, Rb, K을 증기상태로 만들어 이를 광이득 매질로 사용하는데, 원리적으로 양자효율이 95% 이상으로 현재 기술로 얻을 수 있는 광이득 매질 가장 높은 효율 수준이며, 고효율 레이저로 개발할 수 있는 잠재력이 있는 것으로 알려져 있다[5]. 그리고 양자효율이 높을수록 에너지 전환효율이 높을 뿐 아니라 여기과정에서 발생하는 열이 적은 장점을 가질 수 있기 때문에

†E-mail: hsmoon@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0003-0913-0648
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

레이저의 여기과정, 발진과정에서 발생하는 열을 최소화할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

한편, 이러한 DPAL의 장점을 이용하여 고출력 레이저로 발전시키기 위해서 DPAL의 출력을 증가시키는 연구가 필수적이다. DPAL의 출력을 증가시키기 위해서 고출력 고체 레이저에서 사용하고 있는 증폭기 기술을 적용한 광펌핑 알칼리 증폭기(optically pumped alkali amplifier, OPAA)에 대한 연구가 진행되었다[14,15]. 이러한 OPAA의 확장으로 다중 펌핑광을 이용한 다중 증폭 효과가 적용되는 경우에 고출력의 DPAL로 발전할 수 있기 때문에 OPAA에 대한 연구는 중요하다. 국제적으로 DPAL와 OPAA에 대한 연구가 활발히 진행되었지만, 지금까지 국내에서는 OPAA에 대한 연구가 수행된 적이 없었다.

본 연구에서는 펌핑광과 신호광을 단일 모드 광섬유에 결합시켜서 두 빔의 공간 모드를 에탄(ethane) 가스가 포함된 Cs 원자 증기 셀에서 완전히 중첩시켜서 효과적인 OPAA에 대한 연구를 수행하였다. OPAA의 효율에 가장 큰 영향을 주는 원자 증기 셀의 온도, 펌프광의 세기, 그리고 신호광의 세기에 따라서 OPAA의 증폭 정도를 조사하였다. 이러한 결과는 OPAA에서 사용되는 광증폭 매질의 특성을 이해할 수 있는 실험결과로서 고출력 DAPL 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

II. OPAA 실험 장치

DPAL와 OPAA의 구도는 그림 1과 같이 기본적으로 3준위 원자계를 기반으로 한다. 본 연구에서 사용하고 있는 세슘 원자의 미세 구조의 바닥준위는 $6S_{1/2}$상태이며, 핵스핀(I = 7/2)을 고려한 초미세 구조의 상태는 F = 3과 4로 약 9.8 GHz 에너지 차이를 가지고 분리되어 있다. 펌프레이저에 의해서 Cs 원자는 $6P_{3/2}$상태로 여기되며, 이 때 $6S_{1/2}$-$6P_{3/2}$ 전이선을 D2-전이선이라고 하고, 공진파장은 852 nm이다. $6P_{3/2}$상태의 초미세 구조는 F' = 2, 3, 4, 5로 그림 1에서 보는 것과 같이 $6S_{1/2}$상태의 초미세 구조 에너지 차이보다는 매우 좁다. 본 연구에서 사용하고 있는 Cs 원자 증기 셀은 500 torr 에탄이 포함되어 있기 때문에 에탄과 세슘과의 충돌로 인한 선폭 확대가 약 10 GHz 정도로 추정된다. 따라서 충돌에 의한 선폭 확대로 인하여 $6P_{3/2}$상태의 초미세 구조와는 무관하게 여기 상태로 광펌핑이 이루어진다. 세슘의 $6P_{3/2}$상태에서 에탄 버퍼 가스에 의한 스핀교환으로 $6P_{3/2}$에서 $6P_{1/2}$상태로 전이가 유도된다. 일반적으로 $6P_{3/2}$와 $6P_{1/2}$상태에서 자발적으로 방출 시간은 수십 ns 정도이지만, 에탄 버퍼 가스에 의한 충돌로 수십 ps로 자발방출이 빨리 일어난다.

그림 1(b)와 1(c)는 펌프레이저가 공진하는 $6S_{1/2}$(F = 4)-$6P_{3/2}$(F' = 3, 4, 5) 전이와 광증폭이 일어나는 신호레이저가 공진하는 $6S_{1/2}$(F = 4)-$6P_{1/2}$(F' = 3, 4) 전이에 의한 포화흡수 분광 스펙트럼(saturated absorption spectrum, SAS)을 각각 보여주고 있다. SAS신호는 순수한 세슘 원자 증기 셀을 이용하여 각각 펌프와 신호 레이저의 일부를 분리하여 측정한 신호이다. 이 SAS신호를 이용하여 펌프와 신호 레이저의 파장을 세슘 원자의 전이선에 정확히 일치시키는 파장 모니터링을 위해서 이용되었다. 그리고 측정된 SAS를 이용하면 레이저의 파장을 제어할 수 있는 신호로 이용할 수 있기 때문에 레이저 주파수 안정화를 위해서 이용할 수 있다.

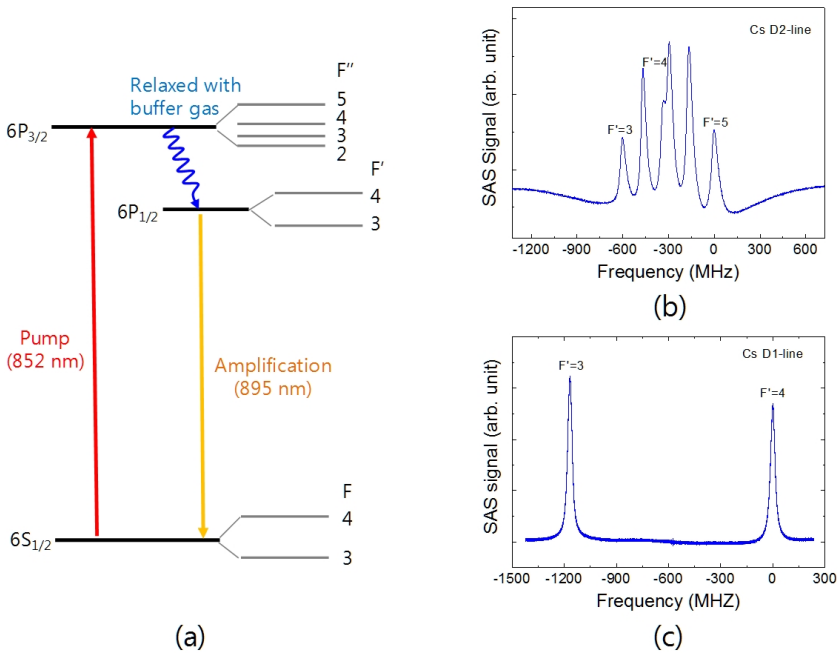

Fig. 1. Energy-level diagram for optically pumped alkali amplifier (OPAA) and saturated absorption spectra (SAS) of D_1 and D_2 transition of Cs atom. (a) Three-level atomic system with $5S_{5/2}$, $5P_{5/2}$, and $5P_{7/2}$ states of Cs. (b) SAS of the D_2 transition for pump laser. (c) SAS of the D_2 transition for signal laser.

그림 2는 OPAA를 위한 실험장치 구도를 보여주고 있다. 펌프레이저는 DFB (distributed feedback laser) 반도체 레이저를 반도체 MOPA (master oscillator power amplifier)로 증폭하여 출력은 약 900 mW이다. 펌프광의 출력은 반파장 위상지연판(half-wave plate, HWP)와 편광 빔 분리기(polarization beam splitter, PBS)를 이용하여 출력을 조절할 수 있게 하였다. 신호레이저는 50 mW 출력의 DFB 반도체 레이저를 사용하였다. 신호레이저의 출력은 ND (neutral density) 필터와 HWP를 이용하여 출력을 조절할 수 있게 하였다. 두 레이저의 발진 파장을 세슘의 전이선과 일치시키고 레이저의 파장을 제어하기 위한 모니터를 위해서 포화흡수 분광장치(SAS 장치)를 각각 설치하였다. SAS 장치는 고분해 레이저 분광에서 이러한 도플러 선폭 확대를 극복하기 위하여 조사광과 펌프광을 서로 반대 방향으로 진행하도록 정렬하는 레이저 분광 장치이다. 이 때 서로 반대 방향으로 진행하는 두 레이저 빔과 동시에 상호작용하는 원자는 정지 상태의 원자이기 때문에 원자 증기셀에서 레이저 분광을 하는 경우에 원자들의 빠른 운동으로 인하여 분광 신호에 도플러 효과에 의한 선폭 확대를 극복할 수 있다. 그림 1(b)와 1(c)에서 얻어진 SAS 신호로부터 본 연구에서 사용하고 있는 두 레이저의 선폭은 10 MHz 이하라는 것을 알 수 있고, 이러한 레이저의 선폭은 광펌핑을 위해서 충분히 좁다는 것을 알 수 있다. 펌프광과 신호광은 PBS에서 서로 수직한 편광으로 결합되었고, 두 레이저증폭 효율을 높이기 위해서 두 레이저는 하나의 광섬유를 통과시켜 공간 모드가 완전히 일치하도록 하였다. 단일 모드 광섬유로 결합되어 모드 필터링을 한 후에 세슘 증기 셀 전에서 펌프광과 신호광의 최대 출력은 각각 200 mW와 20 mW이었다. 그리고 광섬유를 통과한 두 레이저는 평행광 렌즈에 의해서 레이저의 빔의 지름이 약 1.2 mm인 평행광이 만들어졌다. 평행광이 된 두 레이저는 초점거리 200 mm 렌즈를 이용하여 세슘 증기 셀이 놓여있는 곳에서 집광이 되도록 하였다.

실험에서 사용한 세슘 증기 셀은 길이 25 mm이고 지름이 25 mm인 유리 재질의 원통형으로 되어 있으며, 셀 내부에는 500 torr의 에탄 가스가 버퍼 가스로 주입되어 있다. 그리고 펌프광과 신호광이 셀의 윈도우에서 반사되는 것을 줄이기 위해서 세슘 증기 셀의 윈도우에 무반사 코팅을 하였다. 세슘 원자의 증기 양에 따라서 광증폭 효과가 달라지기 때문에 이러한 효과를 조사하기 위해서 셀의 온도는 상온에서 115°C까지 조절할 수 있도록 온도센서와 히팅밴드 그리고 온도조절 장치를 설치하였다. 세슘 원자는 상온에서 금속 고체 상태로 있고, 약 28.44°C 이상의 온도에서 융해되며 일부는 기체상태가 된다. 따라서 셀의 온도 변화에 따라서 기체 상태의 세슘 원자는 셀의 온도가 낮은 곳에서 증착되는 현상이 발생된다. 특히 레이저가 통과하는 윈도우에 증착이 되면 레이저 출력이 줄어드는 효과가 발생되기 때문에 이를 막기 위해서 히팅밴드가 있는 위치를 셀의 윈도우에 있도록 설치하였고, 셀의 원통형 중간 부분은 상대적으로 온도가 낮게 함으로써 레이저가 통과하지 않는 원통 몸통 부분에 세슘이 증착될 수 있도록 하였다.

펌프광과 신호광이 함께 세슘 증기 셀을 통과하면서 그림 1(a)의 과정을 통해서 신호광의 광증폭 현상이 나타난다. 증폭된 신호광으로부터 펌프광을 분리하기 위해서 PBS와 밴드패스 필터(bandpass filter, BF)를 사용하였다. 신호광과 펌프광을 서로 수직한 선편광 상태로 광섬유로 결합시켰지만, 광섬유를 통과하면서 두 레이저의 편광상태가 변하고, 세슘 원자 증기 셀의 윈도우에 복굴절 현상으로 편광상태가 변하기 때문에 PBS로 펌프광을 모두 제거할 수 없다. 따라서 신호광인 895 nm 파장은 통과하고 852 nm 파장은 반사시키는 BF로 펌프광을 제거하였다. 그리고 증폭된 신호광은 광출력계를 이용하여 측정되었다.

III. 실험결과 및 분석

우리는 그림 2의 실험장치를 이용하여 펌핑광과 신호광의 공간적인 모드 겹침이 완벽한 조건에서 OPAA의 효율에 가

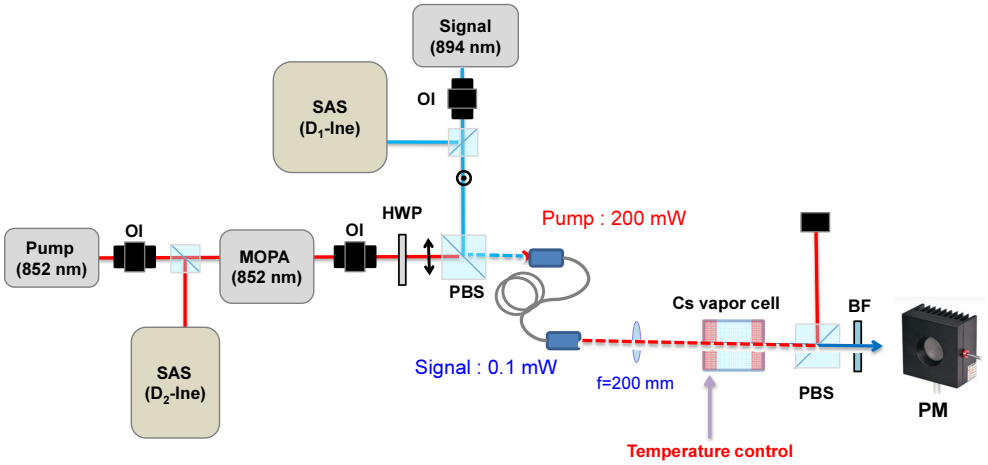

Fig. 2. Experimental setup for OPAA in Cs vapor cell with ethane buffer gas. Pump laser (wavelength 852 nm); signal laser (wavelength 895 nm); OI, optical isolator; SMF, single mode fiber; PBS, polarization beam splitter; HWP, half-wave plate; BF, bandpass filter.

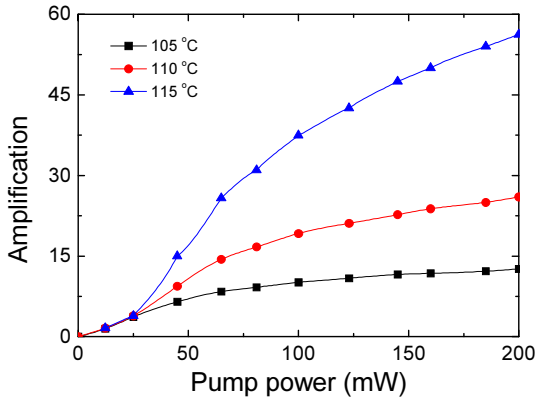

Fig. 3. Cs amplifier small signal amplification factor vs pump power according to the cell temperature (105°C, 110°C, and 115°C) under the condition of input signal of 0.1 mW.

장 큰 영향을 주는 펌프광의 세기, 원자 증기 셀의 온도, 그리고 신호광의 세기에 따라서 광증폭 정도를 조사하였다. 먼저, 그림 3은 신호광의 세기가 0.1 mW인 약한 신호광의 광증폭 정도를 펌프광의 세기에 따라서 세슘 증기 셀의 온도가 105°C, 110°C, 그리고 115°C인 조건에서 측정한 것이다. 펌프광이 없는 경우에 약한 신호광은 세슘 원자 증기에 의해서 모두 흡수되어 신호가 측정되지 않는 것을 확인하였다. 펌프광의 세기에 따른 신호광의 광증폭 효과를 측정하기 위해서 펌프광의 세기를 12 mW에서 200 mW까지 변화시키면서 증폭인자(amplification factor, A)를 측정하였다. 증폭인자(A)는 세슘 원자 셀로 입사한 신호광의 세기와 증폭된 신호광의 세기의 비율로 나타낸 것이다. 펌프광의 세기가 증가함에 따라서 A가 로그 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 펌프광의 세기가 수십 mW 수준으로 낮은 조건에서도 광 증폭현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 우리의 장치에 증폭효율이 높은 이유는 펌프광과 신호광의 공간적인 모드 겹침이 매우 좋고 두 레이저의 선폭이 충분히 좁기 때문이다.

그림 3에서 셀의 온도와 펌핑광의 세기를 변화시키면서 측정된 A를 보여주고 있다. 셀의 온도가 증가함에 따라서 A가 급격히 증가하고, 펌프광의 세기에 따른 변화에 대해서도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 온도가 다른 세가지 경우에 펌프광의 세기에 따른 A는 로그 형태로 증가하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 50 mW 이하의 낮은 펌프세기 영역에서는 선형적인 증가를 보이는데, 이 때 A가 증가하는 기울기는 증기 셀의 온도에 따라 다르지만, 선형적인 영역에서 펌프광에 대한 A의 증가율이 100/W 이상으로 추정되었다. 선행 연구된 연구결과[14]와 비교하면 10배 이상 높은 값이고, 또한 200 mW 이하의 낮은 펌핑광 출력에서 높은 A 증가율을 보이는 것은 매우 효율적인 광증폭이 되고 있음을 의미한다.

세슘 원자 증기 셀의 온도는 세슘 원자의 밀도와 직접 관련이 있고 버퍼 가스와의 충돌 횟수에도 영향을 주기 때문에 광증폭 효과에 중요한 영향을 준다. 그림 4는 세슘 원자 증기 셀의 온도에 따른 A의 변화를 조사하기 위해서 셀의 온도를 60°C에서 115°C까지 변화시키면서 A를 조사한 것을 나타낸 것이다. 이 때, 펌프광과 신호광의 세기는 각각 200 mW와 0.1 mW이다. 증기 셀의 온도가 증가함에 따라서 세슘 원자의 밀도가 증가하여 115°C에서는 A가 56까지 지수함수 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 온도에 따라서 지속적으로 A가 증가하지는 않는다. 그 이유는 세슘 원자의 밀도가 증가하면서 펌프광의 흡수율이 높아지면서 펌프광이 원자 증기 셀 전체에서 흡수가 되지 않는 현상과 광증폭된 신호가 재흡수되는 현상이 발생되면서 A가 떨어지게 된다. A를 올리기 위해서 증기 셀의 온도를 지속적으로 올릴 수 없는데, 중요한 이유는 일정 온도 이상에서는 세슘과 에탄이 화학적인 반응할 수 있는 확률이 높아지기 때문이다[14].

세슘 증기 셀에서 이득매질을 따라 이득 계수(G)가 일정하다고 했을 때, 이득 계수는 식 (1)로 표현될 수 있다.

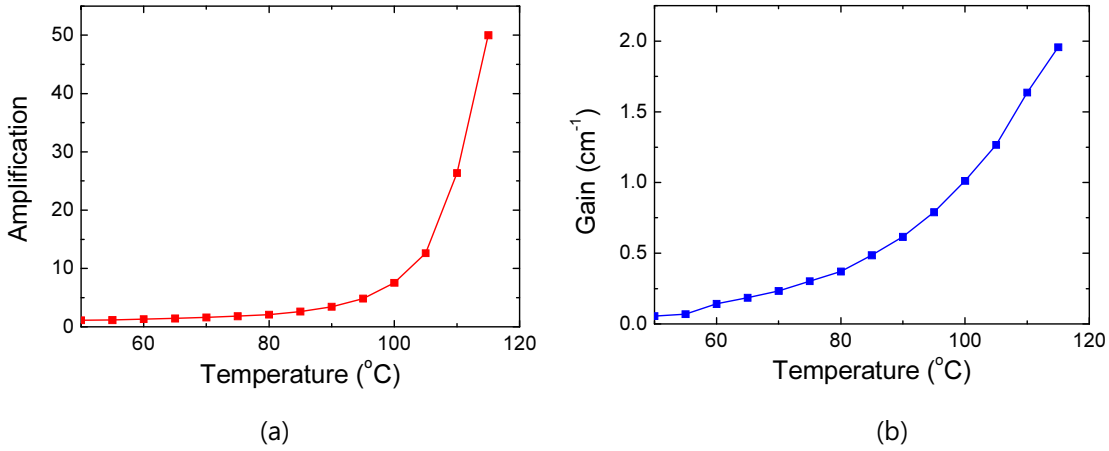

Fig. 4. Temperature dependence of (a) amplification coefficient and (b) gain coefficient under the condition of input signal of 0.1 mW and pump of 200 mW.

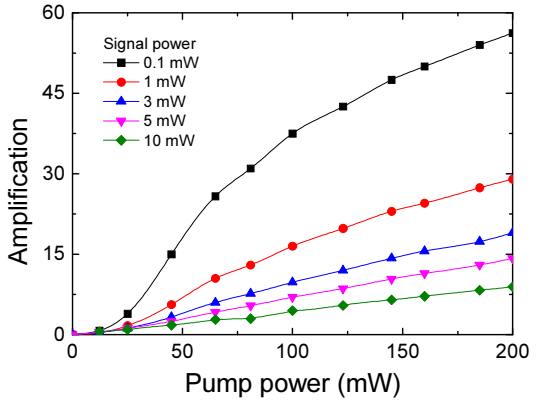

Fig. 5. Cs amplifier small signal amplification factor vs pump power according to the input signal power (0.1 mW, 1 mW, 3 mW, 5 mW, and 10 mW) at the cell temperature of 115°C.

$$G = \frac{\ln A}{L} \tag{1}$$

여기서 A는 증폭인자이고 L은 증폭매질의 길이로서 셀 윈도우의 두께를 제외한 증기 셀 내부에 실제 증폭 길이는 약 2 cm이다. 그림 4(a)에서 셀 온도에 따른 A를 측정하고 그 결과로부터 그림 4(b)와 같이 G를 계산하였다. 그림 4(b)는 온도가 증가하면서 세슘의 밀도의 증가로 인하여 온도에 따른 G가 증가하는 결과를 확인할 수 있다.

펌프광의 출력에 따른 A의 증가하는 특성은 신호광의 출력에 따라서 달라질 수 있다. 그림 5는 세슘 증기 셀의 온도가 115°C인 조건에서 신호광의 광증폭 정도를 펌프광의 세기에 따라서 다른 신호광의 세기(0.1 mW, 1 mW, 3 mW, 5 mW, 10 mW)인 조건에서 측정한 것이다. 신호광의 세기가 증가하면서 200 mW 펌프 출력에서 A가 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 신호광의 세기가 0.1 mW와 10 mW인 경우에 A를 비교하면 각각 56과 8.9로 큰 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 신호광의 세기 조건에 따라서 펌프광의 세기에 따른 A가 증가하는 형태도 다른 것을 확인할 수 있다. 신호광의 세기가 0.1 mW인 약한 조건에서 펌프광의 세기에 따른 A의 변화 특성은 로그 형태로 증가하면서 이득포화 특성을 보이지만, 신호광의 출력이 10 mW인 경우는 A의 증가하는 특성은 거의 선형적으로 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 신호광의 세기가 작은 경우에 낮은 펌프 출력에서도 증폭 매질의 증폭률이 빨리 포화되는 현상이 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 신호광의 세기가 클수록 펌프광의 세기를 높여서 증폭이 가능할 것으로 예상된다. 특히 신호광의 세기가 10 mW인 조건에서 펌프광에 대한 A의 증가율이 44.5/W로 추정되며, 이 결과는 같은 신호광 세기 조건에서 선행 연구된 연구결과와 비교하면 5배 이상 높은 결과이다. 앞서서 언급한 것처럼 이러한 결과로부터 본 연구의 광증폭 구도는 매우 효율적인 것이라는 것을 보여주는 것이다.

우리는 신호광의 세기에 따라서 A의 변화를 조사하기 위해서 세슘 증기 셀의 온도가 115°C 그리고 펌프광의 출력이 200 mW인 조건에서 그림 6(a)의 결과를 얻었다. 신호광의 세기가 증가함에 따라서 A가 지수함수 형태로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 높은 출력 신호에서 높은 증폭률을 얻기 위해서는 강한 펌프광이 필요하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서 실험으로 구현한 약한 신호광 조건과 약한 펌프광 조건에서도 강한 펌핑광 조건에서 수행된 선행 연구와 증폭 매질의 특성이 유사한 경향성을 보이는 것을 알 수 있었다.

그림 6(a)과 같은 조건에서 신호광의 세기에 따른 실제 증폭된 신호광의 출력을 그림 6(b)에서 나타냈다. 신호광의 세기에 따라서 세슘 증기 매질에서의 증폭률을 급격히 감소하지만, 증폭된 출력광의 세기는 신호광의 세기가 증가하면서 최종 출력은 신호광의 출력이 로그형태로 증가하는 것을 알 수 있다. 신호광의 출력이 10 mW일 때, 증폭된 출력은 90 mW로 입력된 펌프광의 45%가 증폭으로 변환된 것을 알 수 있다.

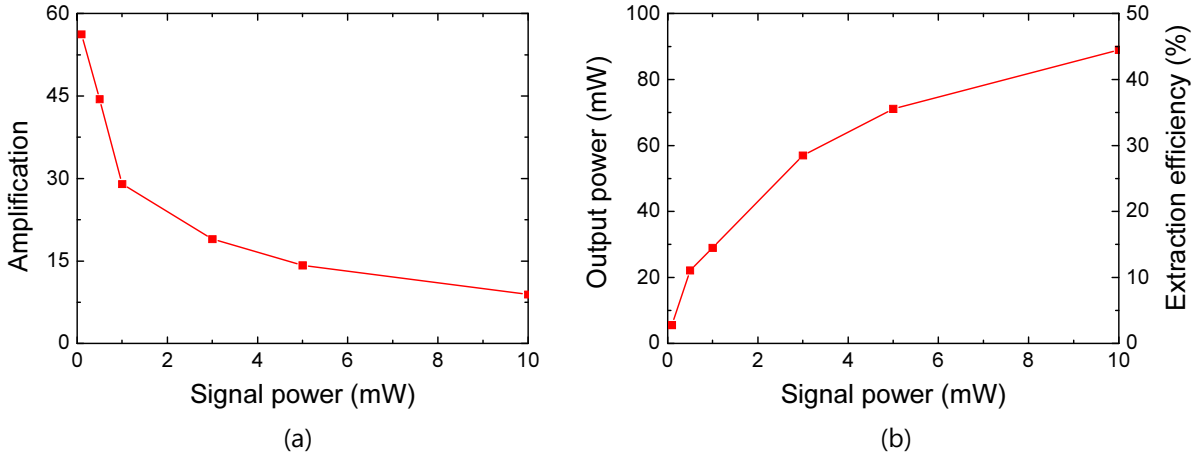

Fig. 6. Input signal power dependence of (a) amplification coefficient and (b) gain extraction efficiency relative to the pump power under the condition of pump of 200 mW at the cell temperature of 115°C.

IV. 결 론

우리는 에탄(ethane) 가스가 포함된 Cs 원자 증기 셀을 이용하여 고효율 OPAA를 실험적으로 구현하고 증폭 특성을 조사하였다. 본 연구에서는 펌핑광과 신호광을 단일 모드 광섬유에 결합시켜서 두 빔의 공간 모드를 Cs 원자 증기 셀에서 완전히 일치시킴으로써 고효율 증폭효과를 얻을 수 있었다. OPAA의 효율에 가장 큰 영향을 주는 원자 증기 셀의 온도, 펌프광의 세기, 그리고 신호광의 세기에 따라서 OPAA의 증폭 특성을 조사하였고, 약한 신호광 조건에서 56배의 증폭을 얻었고, 10 mW의 신호광 조건에서 45%의 추출 효율을 얻었다. 특히, 본 연구에서는 펌핑광과 신호광을 단일 모드 광섬유에 결합시켜서 두 빔의 공간 모드를 일치시킴으로써 펌프광에 따른 증폭 증가율이 선행연구 결과와 비교하여 매우 높은 것을 확인하였다. 본 연구 결과로부터 고효율 OPAA에서 사용되는 광증폭 매질의 특성을 이해함으로써 고출력 DAPL 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 고효율 레이저 특화연구실 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(No. UD160069BD).

References

1. A. Sharma, N. D. Bhaskar, Y. Q. Lu, and W. Happer, “Continuous-wave mirrorless lasing in optically pumped atomic Cs and Rb vapors,” Appl. Phys. Lett. **39**, 209-211 (1981).
2. 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).
3. W. F. Krupke, R. J. Beach, V. K. Kanz, and S. A. Payne, “DPAL: A new class of CW, near-infrared highpower diode pumped alkali (vapor) lasers,” Proc. SPIE **5334**, 156-167 (2004).
4. R. J. Beach, W. F. Krupke, V. K. Kanz, and S. A. Payne, “End-pumped continous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling,” J. Opt. Soc. Am. B **21**, 2151-2163 (2004).
5. T. Ehrenreich, B. Zhdanov, T. Takekoshi, S. P. Phipps, and R. J. Knize, “Highly efficient optically pumped Cs vapor laser,” Opt. Commun. **260**, 696-698 (2006).
6. R. H. Page, R. J. Beach, V. K. Kanz, and W. F. Krupke, “Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser,” Opt. Lett. **31**, 353-355 (2006).
7. Y. Wang, T. Kasamatsu, Y. Zheng, H. Miyajima, H. Fukuoka, S. Matsuoka, M. Niigaki, H. Kubomura, and H. Kan, “Cesium vapor laser pumped by a volume-bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser diode array,” Appl. Phys. Lett. **88**, 141112 (2006).
8. Y. Wang, M. Niigaki, H. Fukuoka, Y. Zheng, H. Miyajima, S. Matsuoka, H. Kubomura, T. Hiruma, and H. Kan, “Approaches of output improvement for cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array,” Phys. Lett. A **360**, 659-663 (2007).
9. T. A. Perschbacher, D. A. Hostutler, and T. M. Shay, “High-efficiency diode-pumped rubidium laser: experimental results,” Proc. SPIE **6346**, 634607 (2007).
10. B. V. Zhdanov and R. J. Knize, “Diode pumped 10 Watts continous wave cesium laser,” Opt. Lett. **32**, 2167-2169 (2007).
11. B. V. Zhdanov, A. Stooke, G. Boyadjian, A. Voci, and R. J. Knize, “Laser diode array pumped continuous wave Rubidium vapor laser,” Opt. Express **16**, 748-751 (2008).
12. B. V. Zhdanov, A. Stooke, G. Boyadjian, A. Voci, and R. J. Knize, “Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays,” Opt. Lett. **33**, 414-415 (2008).
13. S. Wu, T. Soules, R. Page, S. Mitchell, C. Scott, V. Kanz, and R. Beach, “Hydrocarbon-free resonance transition 795-nm rubidium laser,” Opt. Lett. **32**, 2423-2425 (2007).
14. B. V. Zhdanov and R. J. Knize, “Efficient diode pumped cesium vapor amplifier,” Opt. Commun. **281**, 4068-4070 (2008).
15. 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).