《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 10, Number 2, April 1999
(Journal of the Optical Society of Korea - Korean Edition)

좁은 선폭을 갖는 파장가변 연속파 레이저의 펄스형 증폭을 위한 사중경로 색소 레이저 증폭기

이재용 · 이해웅
한국과학기술원 물리학과

유용심 · 한재원
한국표준과학연구원 고온광계측 그룹

(1998년 10월 29일 받음, 1999년 3월 4일 수정본 받음)

본 연구에서는 개념적으로 기생 발진을 비롯한 증폭기의 오동작 가능성을 최소화하고 좁은 선폭의 연속파 레이저를 펄스 증폭하기 위한 목적으로 새로운 구조를 갖는 사중경로 색소 레이저 증폭기를 제안하고 실험적으로 구현하였다. 펌핑 레이저의 펄스 에너지가 5.6 mJ이고 연속파 레이저의 입력 강도가 100 mW일 때, 사중경로 증폭기는 약 130 MHz (FWHM)의 선폭과 1.5 mJ의 에너지를 갖는 레이저 펄스를 출력하였으며, 이는 약 2×10^6 이상의 높은 증폭 이득과 27%의 에너지 효율에 해당하는 것이다. 사중경로 증폭기 내에 회절격자를 사용하면, 파장 선택 소자가 없는 보통의 증폭기와 비교할 때 총 출력 에너지가 4% 정도 증가됨과 동시에 ASE가 차지하는 비율이 10배 이상 감소하여, 총 출력 빔에 대해 ASE 에너지가 1.5% 이하로 억제된다.

I. 서 론

고분해능의 비선형 레이저 분광학에 사용되는 광원은 넓은 파장 가변성과 높은 광 강도, 그리고 좁은 선폭이 필수적으로 요구된다.[1,2] 좁은 선폭을 갖는 펄스형 색소 레이저는 이러한 필요조건을 만족시키는 광원으로서, 실제 구현에 관한 많은 연구가 오랜 동안 진행되어 왔다.

펄스형 색소 레이저가 개발된 직후 초기의 연구에서는, 패브리-페로 에탈론 또는 회절 격자와 같은 분산 소자를 공진기 내에 삽입하여 단일 종모드 레이저 발진을 시키고자 하는 시도가 있었으나,[3-5] 생성되는 펄스의 시간폭이 너무 짧아서 안정적인 단일 모드 형성이 대부분 불가능하였고, 결과적으로 넓은 주파수 영역에 걸쳐 흔들림이 심한 다중 종모드 발진을 초래하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 펄스 레이저 공진기를 외부의 주파수-안정화된 연속파 색소 레이저로 주입-잠금(injection-lock)하는 방식이 개발되어,[6-9] 높은 출력을 내는 펄스 레이저의 장점과 연속파 레이저의 좋은 분광학적 특성을 동시에 갖는 방법이 가능하게 되었다. 그러나 이 방법은 복잡한 제어과정을 통해 주입 레이저의 안정화된 주파수에 펄스 레이저 공진기의 주파수를 항상 동조시켜야 하는 난점을 내포하고 있다.

최근에는 구현이 원리적으로 매우 간단하고 주파수-주사(frequency scan)를 하는 동안 우수한 단일모드 동작 안정성을 제공하는 방법으로서, 좁은 선폭의 연속파 색소 레이저를 직접 펄스 증폭하는 형태의 레이저 증폭기 시스템이 많이 연구되고 있다.[10-13] 평균 광 강도가 작은 연속파 레이저로부터 높은 에너지의 펄스 출력을 얻기 위해서는 매우 큰 이득의 레이저 증폭이 요구되므로, 다단(multistage) 또는 다경로(multipass) 증폭기 시스템이 사용되는데, 특히 다경로 증폭기는 하나의 이득매질에서 레이저 펄스가 여러 번 왕복하도록 함으로써 증폭기에 축적된 에너지의 추출 효율을 극대화하여 단일(single-stage) 증폭기만으로도 높은 증폭 이득을 내는 동시에 필요한 증폭단의 개수를 줄임으로써 간단한 구조의 소형 시스템으로 구현할 수 있는 장점이 있다.[12,13] 레이저 펄스가 이득매질을 왕복하는 방식에 따라서 재생 증폭기(regenerative amplifier), 각다중화 다경로 증폭기(angle multiplexing multipass amplifier) 및 다중경로(degenerate multipass) 증폭기 등으로 나눌 수 있으며, 특징은 다음과 같다. 재생 증폭기는 능동형 전기광학 소자를 사용하여 레이저 펄스를 증폭용 공진기 내로 주입해 저이득 매질을 수십 번 왕복하는 동안 충분히 증폭시킨 후 증폭 펄스를 공진기 밖으로 빼낸다. 이 방법은 고가의 전기광학 소자 및 동기화된 구동이 필요하다는 단점이 있으며, 공진기 길이가 레이저 펄스폭과 전기광학 소자의 개폐시간(switching time)에 비해 길어야 하므로, 레이저 여기 준위의 수명이 짧은 색소 레이저 증폭에는 적합하지 못하다. 이에 반해, 다경로 증폭기는 소형으로 제작 가능하고 수동소자로만 구성되어 사용이 편리하고 동작 신뢰성이 좋은 장점이 있으며, 이득매질의 소신호 증폭률(small-signal gain)이 높은 경우 수 회의 왕복만으로도 큰 에너지를 갖는 레이저 펄스를 얻을 수 있다. 레이저 빔이 여러 각도의 다른 경로상에서 이득매질을 왕복하도록 원하는 개수의 거울을 배열한 각다중화(angle multiplexing) 방식과 레이저 빔의 방향과 편광상태를 조절하여 이득매질 내의 중첩된 동일 경로를 왕복하게 하는 다중경로(degenerate multipass) 방식이

있는데, 다중경로 증폭기는 각다중화 방식에 비해 구조가 간단하고, 이득매질 내에 레이저 빔이 집속되는 점이 없어서 광 손상의 위험이 적으며, 비교적 큰 구경의 레이저 빔을 사용할 수 있다.

본 연구에서는 기존에 사용되었던 방식과 달리 연속파 색소 레이저를 펄스 증폭하기 위한 목적으로 새로운 구조의 사중경로 색소 레이저 증폭기를 제안하고, 실험적으로 구현된 증폭 시스템으로부터 출력된 레이저 펄스의 에너지, 스펙트럼 및 시간적 특성을 조사하였으며, 증폭자발방출(Amplified Spontaneous Emission: ASE)의 영향 및 억제 방법이 연구되었다.

II. 사중경로 증폭기의 구조 및 동작 원리

사중경로 레이저 증폭기(degenerate four-pass laser amplifier)는 레이저 빔이 이득매질의 중첩된 경로를 4회 왕복하도록 설계된 증폭기로서, 수동형 광학소자로만 구성되어 구조가 간단하고 크기가 작으면서도 단일경로 증폭기에 비해 월등히 높은 증폭 이득을 낼 수 있으며, 이득매질에서의 빔 집속이 없어서 광 손상 위험이 작고, 증폭된 빔의 공간적 특성이 좋은 장점이 있다. 다중경로 증폭기에서 가능한 최대 왕복 회수는 4회이며, 이는 1차원의 중첩된 경로상에서 빛이 가질 수 있는 직교(orthogonal)한 두 편광 상태와 두 진행 방향의 조합이 4개이기 때문이다.

사중경로 증폭기는 1994년 Andreyev와 Matveyev에 의해 최초로 제안되었으며,[14] 고체 레이저 시스템에서의 레이저 펄스 증폭에 사용되었다. 이후 많은 고체 레이저 시스템에서 Fig. 1(a)와 같은 형태의 사중경로 증폭기가 이용되었으며, 레이저 봉에 유도된 열복굴절(thermal birefringence)에 의해 발생한 레이저의 편광 왜곡(depolarization)을 효과적으로 보상하는 구조임이 실험 및 이론적으로 연구되었다.[15] 증폭기는 기본적으로 레이저 증폭을 위한 이득매질과 레이저 빔의 편광 조절과 선택을 위한 편광 회전자(polarization rotator), 편광 분할기(polarization beam splitter), 그리고 2개의 거울로 이루어져 있다. 입력 레이저 빔은 비가역성(non-reciprocal)의 45°

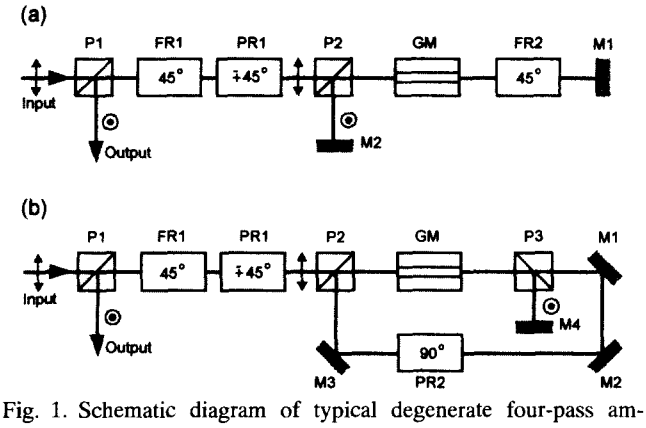

Fig. 1. Schematic diagram of typical degenerate four-pass amplifiers: (a) a conventional arrangement, and (b) a new scheme proposed in this Letter. P's, polarizing beam splitters; FR's, Faraday rotators; PR's, reciprocal polarization rotators; M's, mirrors; GM, gain medium.

패러데이 회전자(Faraday rotator) FR1과 가역적(reciprocal)인 ±45° 편광 회전자 PR1(예를 들어 쌍 프레넬 능면체(Fresnel rhomb pair), 결정 편광 회전자(crystal polarization rotator), 파장판(wave plate)), 그리고 편광분할기 P1과 P2로 이루어진 광 고립기(optical isolator)를 통해 증폭기로 들어가는데, 이는 사중경로 증폭 후 증폭기를 빠져 나온 레이저 빔이 입사한 방향으로 되돌아 가지 않고 진행 방향을 바꾸도록 하기 위함이다. 입사한 레이저 빔은 편광 분할기 P2를 지날 때 수평 선편광 상태이며, 거울 M1에 의해서 이득매질과 패러데이 회전자 FR2를 왕복하게 된다. 이 때 패러데이 회전자 FR2에 의해 수직 선편광된 레이저 빔은 편광 분할기 P2에 도달한 후 거울 M2로 반사되었다가, 다시 레이저 이득매질과 패러데이 회전자 FR2를 왕복하게 된다. 레이저 빔은 이 왕복경로에서 다시 수평 선편광 상태가 되므로 광분할기 P2를 통과하여 증폭기 밖으로 나가게 된다.

사중경로 증폭기에서는 레이저 빔의 경로가 선편광 상태 조절에 의해 결정되기 때문에, 열복굴절에 의한 편광 왜곡은 증폭기의 정상적인 레이저 빔 주입(injection)과 추출(extraction)에 나쁜 영향을 미친다. Figure 1(a)의 증폭기에서 편광 왜곡된 레이저 빔은 이득매질을 통해 2회만 증폭되고도 증폭기 밖으로 출력될 수 있으며, 또한 4회 증폭된 빔도 증폭기로부터 완전히 출력되지 않고 편광 왜곡된 일부 성분이 증폭기로 되먹임되어 반복적으로 재증폭된다. 결과적으로 주 증폭 펄스 이외에 선펄스(pre-pulse) 및 일련의 후펄스(post-pulse)들이 출력되거나 기생 발진(parasitic oscillation)이 일어나는 등의 심각한 오동작을 초래하며, 이러한 비정상적인 양상은 레이저 빔의 편광 왜곡 정도와 증폭기의 이득이 클수록 더욱 두드러지게 나타난다.[16]

사중경로 증폭기의 이득매질과 후방 거울 M1 사이에 설치된 45° 패러데이 회전자는 왕복 경로 상에서 레이저 빔의 선편광 성분을 90° 회전시켜서 수직한 두 복굴절축 성분 간의 위상 지연을 상쇄하므로, 원리적으로는 열복굴절에 의한 편광 왜곡을 효과적으로 보상한다. 그러나 실제로는 후방 거울로부터 반사된 레이저 빔이 본래의 입사 빔이 지나온 경로를 따라 정확히 되돌아가야 편광 왜곡을 보상할 수 있으므로, 정확한 광학적 정렬과 이득매질의 열적 렌즈 효과(thermal lensing) 등을 제거할 수 있는 보조 광학계가 요구된다.[17]

본 연구에서는 색소 용액을 이득매질로 하는 증폭기에 적합한 새로운 형태의 사중경로 증폭기를 제안하고자 한다. 액상 이득매질에서 편광 왜곡이 일어나는 원인은 주로 매질의 비등방성 이득과 손실 분포에 기인하는 것으로[18,19] 앞서 언급된 편광 왜곡 보상 방법이 이 경우에는 적용될 수 없으므로, 레이저 빔에 발생한 편광 왜곡의 영향을 최소화할 수 있는 증폭기 구조가 요구된다. 이러한 목적을 위해 개선된 형태의 사중경로 증폭기는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같은 구조를 가지며 동작 원리는 다음과 같다.

입력 레이저 빔은 광 고립기를 구성하는 편광 분할기 P1, 패러데이 회전자 FR1, 가역적 편광 회전자 PR1(쌍 프레넬 능면체), 그리고 편광 분할기 P2를 통해 수평 편광 상태로 증폭기에 입사한다. 레이저 빔은 색소 이득매질 GM에서 첫번째

증폭된 후 편광 분할기 P3를 그대로 통과하고, 거울 M1과 M2에 반사되어 편광 회전자 PR2(쌍 프레넬 능면체)를 지나면서 수직 편광 상태로 변한다. 수직 편광은 편광 분할기에서 반사되므로, 레이저 빔은 거울 M3와 편광 분할기 P2를 거쳐 두번째로 이득매질 GM을 통과한 후 편광 분할기 P3에서 반사되어 거울 M4로 향한다. 거울 M4에서 반사한 레이저 빔은 지금까지의 경로를 그대로 되돌아 가면서 세번째 증폭을 경험하게 되고, 편광 회전자 PR2에 의해 편광 상태가 수평으로 복원되어, 네번째로 이득매질 GM을 지난 이후에는 편광 분할기 P2를 통과하게 된다. 광 고립기를 역으로 진행하는 증폭된 레이저 빔은 편광 상태가 수평에서 수직으로 바뀌기 때문에, 편광 분할기 P1에 의해서 증폭기 밖으로 분리된다.

매회의 경로마다 편광 왜곡된 레이저 빔의 성분들은, 정상적으로 이득매질을 4회 통과하게 되는 주 레이저 빔과는 다른 경로를 택하게 되며, 최종적으로 증폭기를 빠져 나오는 시점과 출력 강도가 각기 다르다. 이들 중에서 증폭 펄스의 출력 강도와 시간적 모양의 왜곡에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 4번째의 증폭에서 편광 왜곡되어 증폭기를 빠져 나가지 못하고 되먹임이 일어난 높은 강도의 레이저 펄스로서, 증폭기의 잔여 이득(residual gain)에 의해 재증폭되어 출력되며, 이 과정에서도 편광 왜곡이 계속 존재하므로 되먹임, 재증폭, 출력의 과정이 반복된다.

증폭기가 4회 증폭 후 가지는 잔여 이득이 g_i(i: 4회 증폭 후 레이저 빔이 이득매질을 지난 회수, 1,2, ⋯)이고, 매 경로당 발생하는 레이저 빔의 편광 왜곡도가 η_{dep}(<<1)이라 하면, 주 증폭 펄스 뒤에 이어지는 후펄스의 에너지는 근사적으로 주 펄스에 비해 $\eta_{dep}g_1$배가 되고, 마찬가지로 n번째 후펄스는 n-1번째 후펄스에 대해 $\eta_{dep}g_n$배가 된다. 즉 $\eta_{dep}g_i$<<1이면, 후펄스에 의한 영향을 무시할 수 있지만, $\eta_{dep}g_i \approx 1$인 경우 일련의 후펄스가 긴 시간에 걸쳐 이어지게 된다. 만일 $\eta_{dep}g_i$>1이 된다면 주펄스보다 에너지가 크고 점차로 증가하는 후펄스 들이 발생하며, 더욱 심각한 문제로서 증폭할 레이저 빔의 입력 없이도 이득매질로부터의 ASE가 급속히 성장하여 증폭기 내에서 자발 발진(self-oscillation)을 일으킬 수 있다. 하지만 본 연구에서 새롭게 제안된 증폭기는 기존의 사중경로 증폭기 구조와 비교해 볼 때, 높은 이득 상태에서도 후펄스 생성 및 자발 발진(self-oscillation)을 효과적으로 억제하는 구조임을 알 수 있다. 이것은 기존의 증폭기가 편광 왜곡된 4경로 증폭 빔을 이득매질에 2번 더 통과시켜 증폭함으로써 매번의 후펄스가 $2\eta_{dep}g_{2i-1}g_{2i}$의 이득을 갖는 반면, 본 연구에서 제안된 증폭기 구조에서는 편광 왜곡되어 되먹임한 증폭 빔이 한 번만 이득매질을 통과한 후 출력되므로 상대적으로 작은 후펄스 이득 $\eta_{dep}g_i$이 허용되기 때문이다.

고이득의 색소 레이저 증폭기가 갖는 전형적인 단점 중의 하나는, 증폭 과정에서 매우 큰 비율의 ASE가 발생하여 증폭기의 에너지 효율을 현저히 떨어뜨리고 색소 고유의 이득 영역에 걸쳐 있는 넓은 ASE 스펙트럼 성분이 좁은 선폭의 증폭 레이저 빔에 포함되는 것이다. 이는 고분해능 분광학 실험에 있어서 치명적인 분해능 저하 및 배경 잡음의 주원인이 되므로, 증폭 과정에서 ASE를 효과적으로 감소시키는 것이 반드시 필요하다. 다만 증폭 시스템에서는 ASE를 제거하기 위하여 증폭단 사이에 공간 주파수 여과기(spatial filter)를 설치하는 방법이 많이 사용되고 있지만, 소형의 사중경로 색소 레이저 증폭기에서는 공간 주파수 여과기를 경로 상에 삽입하는 것이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는ASE를 줄이기 위하여 회절격자를 거울 M4 대신 설치하거나 필터 유리를 경로 상에 삽입하는 방법을 택하였다.

III. 증폭 시스템의 구성 및 출력 특성

3.1. 증폭 시스템의 구성

본 연구에서 제안된 방식의 사중경로 레이저 증폭기 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되며, 증폭된 출력 빔의 ASE 억제를 위하여 필터 유리 또는 회절격자가 증폭기 내에 추가될 수 있다. 펄스 증폭을 위한 파장가변 연속파 레이저 광원으로는 1 MHz 이내의 선폭 및 주파수 안정성을 제공하는 상용의 고리형 색소 레이저 시스템(Coherent 899)이 사용되었으며, 단일 모드 6 W 출력의 연속파 Ar^+ 레이저(Spectra Physics 2080A-12)로 펌핑하여 565 - 605 nm 파장대에서 100~300 mW의 레이저 빔을 얻을 수 있다.

사중경로 증폭기의 이득매질은 메탄올을 용매로 하는 1×10^{-4} M 농도의 Rhodamine 6G 색소이며, Bethune[20]이 고안한 프리즘형 색소 셀에 담겨 순환한다. 길이 30 mm와 내경 1.5 mm의 크기를 갖는 색소 셀은 2차 조화파(532 nm) Nd:YAG 레이저(Quantel YG661-10)에 의해 10-Hz 반복률로 횡 방향 펄스 펌핑된다. 펌핑 펄스 모양의 시간적 요동으로 인해 색소 레이저의 선폭이 확대되는 것을 피하기 위해서, 펌핑용 레이저를 주입-잠금하여 단일 모드로 동작시킴으로써 종모드들의 맥놀이 때문에 생기는 요동을 제거한 부드러운 모양의 레이저 펄스를 만들었다. 또한 본래의 시간폭이 8 ns인 펌핑 펄스를 빔 분할기(3 : 7)로 분리한 후 강한 쪽의 빔을 약 5 ns 지연시켰다가 다시 합쳐서, 마치 펌핑 레이저가 12 ns의 시간폭을

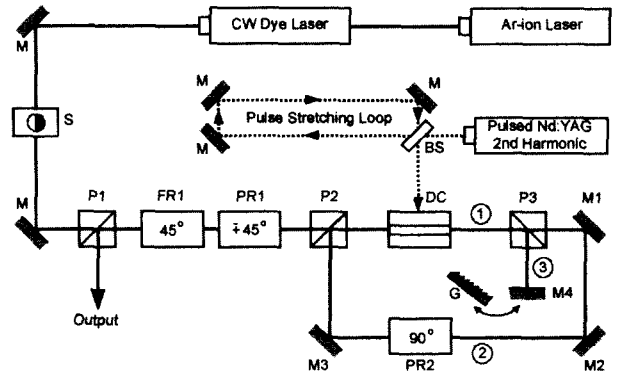

Fig. 2. Four-pass dye laser amplifier for pulsed amplification of a tunable narrow-bandwidth continuous-wave dye laser. S, mechanical shutter; P's, polarizing beam splitters; FR's, Faraday rotators; PR's, reciprocal polarization rotators; DC, dye cell; BS, beam splitter with 30%-reflectivity; M's, mirrors; G, diffraction grating; circled 1, 2 and 3, positions of the filter glass insertion.

갖는 효과를 내도록 하였다. 이는 색소 셀 안에서의 펌핑 레이저 첨두 출력을 낮춤과 동시에 출력되는 레이저 펄스의 시간폭을 늘려서 결과적으로 펄스 레이저의 선폭을 감소시키기 위함이다.[21] 증폭기 직전에 설치된 기계적 셔터(mechanical shutter)는 입사하는 연속파 레이저 빔을 약 1 ms의 개방 시간으로 반복 개폐하여, 펌핑 펄스가 없는 대부분의 시간에는 증폭기 안에 머물지 못하게 함으로써 색소 이득매질이 불균일하게 열화되는 현상을 최소화하였다.

3.2. 출력 특성

사중경로 증폭기의 출력 특성을 얻기 위해 pyroelectric joulemeter(Molectron J4-05)를 사용하여 펄스 에너지를 측정하였으며, 반응 시간이 1 ns 이하인 광다이오드로 레이저 펄스의 시간적 모양을 관찰하였다. 증폭기는 5.6 mJ의 펌핑 레이저 펄스가 가해지고 연속파 100 mW 출력의 573 nm 색소 레이저 입력이 있는 경우, 에너지가 1.5 mJ인 증폭 레이저 펄스를 출력하며, 이는 약 2×10^6의 증폭 이득과 27%의 효율에 해당한다. 펌핑 펄스 에너지에 따른 증폭기의 출력 에너지 변화를 측정한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 출력 펄스의 모양은 증폭기의 동작 조건에 따라 다소의 변동이 있으나, 평균 7 ns (FWHM) 정도의 시간폭을 갖는 것으로 측정되었다. 이 때, 실험 결과를 바탕으로 증폭기의 구조상 장점인 후펄스 생성 및 자발 발진의 억제 효과를 명확히 직접적으로 검증할 수는 없었다. 이유는 연속파 형태의 레이저 빔 입력으로 인해 펌핑 시간폭 정도의 긴 시간폭을 갖는 증폭 레이저 펄스가 출력되므로, 이에 비해 짧은 시간 간격으로 발생할 수 있는 후펄스를 가시적으로 확인하기 어렵기 때문이다. 본 증폭기에서 사중 경로 길이는 빛이 진행하는 시간으로 약 6 ns에 해당하며, 되먹임된 펄스의 증폭 루프 길이는 후펄스 발생 시간 간격 2 ns에 해당한다. 더욱이 색소 매질의 레이저 상준위 수명시간이 수 ns에 불과하여 펌핑 펄스의 시간폭과 견줄 정도로 짧기 때문에, 후펄스의 생성 및 자발 발진의 지속이 근본적으로 어려운 요인도 있다.

높은 강도의 증폭된 레이저 펄스 중 일부가 연속파 레이저 광원으로 되돌아가면 레이저 광원의 주파수 및 출력의 불안

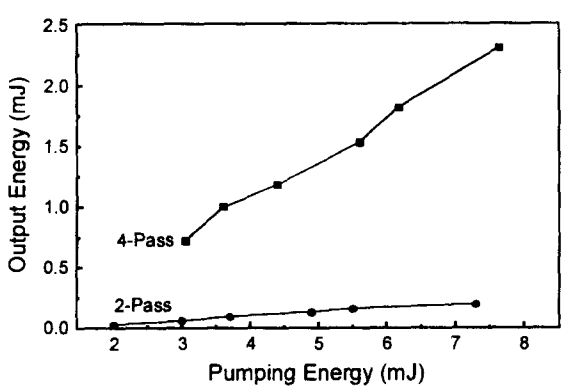

Fig. 3. Output pulse energy of the four-pass amplifier as a function of pumping energy. The solid rectangles represent the results from four-pass amplification and solid circles, from two-pass amplification.

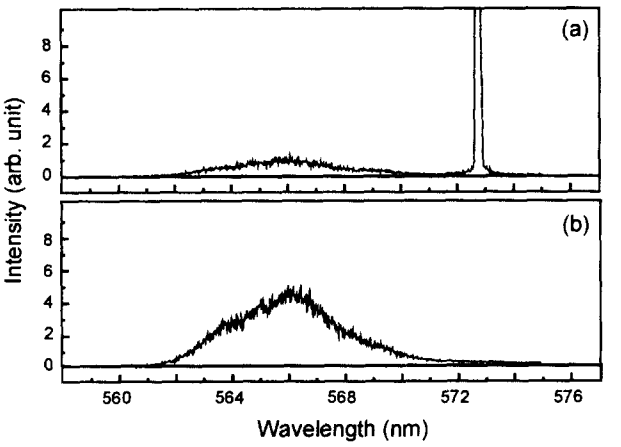

Fig. 4. Spectra of the output from the four-pass amplifier (a) with and (b) without the CW laser beam input.

정을 일으킬 수 있는데, 사중경로 증폭기는 입출력 위치에 자체적으로 광 고립기 구조를 포함하고 있기 때문에 별도의 광 고립기가 필요하지 않으며 측정 결과 약 30 dB 이상의 고립비가 얻어졌다.

좁은 선폭의 연속파 레이저 빔이 제대로 증폭되는지 확인하기 위해서, 출력 레이저 빔의 스펙트럼을 분해능 0.05 nm의 단일-회절격자 단색화 장치(Jobin-Yvon THR 1000 monochromator)로 측정하였다. Figure 4에 나타낸 결과를 살펴 보면, 연속파 레이저 빔의 입력이 없는 경우 ASE로 인하여 560 nm~572 nm의 넓은 파장 영역에 걸쳐 출력 스펙트럼이 분포하지만, (Fig. 4(b) 참조) 파장 573 nm의 연속파 레이저 빔이 증폭기에 입력될 때에는 이 파장에서의 효과적인 레이저 펄스 증폭으로 인해 ASE 성분이 전체적으로 약 4.5배 감소하고 대신 좁은 선폭의 강한 레이저 스펙트럼이 두드러지게 나타난다. (Fig. 4(a) 참조) ASE는 연속파 레이저 빔의 강도가 높아질수록 줄어드는 것이 관찰되었으며, 증폭기 내에 분산 소자 또는 파장선택 소자가 없는 경우에도 전체 출력 펄스에서의 ASE 에너지 비율을 15% 이하까지 낮출 수 있었다. 또한 레이저 파장을 색소 이득매질의 ASE 중심 파장대인 566 nm근처로 옮겨 갈수록, 출력 레이저 빔에 포함된 ASE 비율이 감소함을 실험적으로 확인하였다.

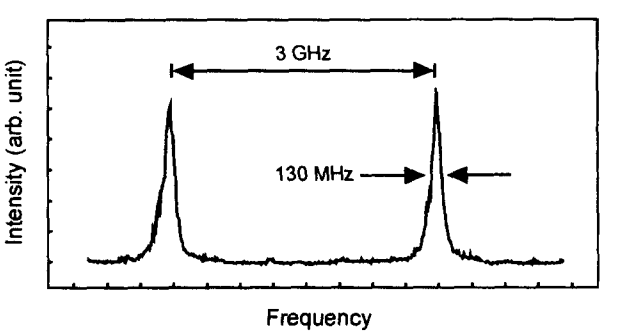

Fig. 5. Fabry-Perot etalon fringe of the pulse laser output obtained for the bandwidth measurement. A scanning Fabry-Perot interferometer with the free-spectral range of 3 GHz and the finesse of 125, has been used.

증폭된 레이저 펄스의 선폭을 측정하기 위하여 finesse가 125이고 3-GHz free spectral range를 갖는 주사형 공초점 패브리-페로 간섭계(Burleigh사 제품)를 사용하였으며, Fig. 5에서 보는 바와 같이 선폭은 130 MHz (FWHM)로 측정되었다. 532 nm 펌핑 레이저 펄스의 시간폭이 증폭 레이저 펄스의 선폭에 미치는 영향을 보기 위해서, 펌핑 펄스의 시간폭을 늘리지 않고 본래의 8 ns 펄스로 증폭기를 펌핑하여 증폭 펄스의 스펙트럼을 측정한 결과 180 MHz (FWHM)의 선폭을 얻었다. 따라서 펌핑 레이저 펄스의 시간폭을 적절히 늘리는 것이 좁은 선폭의 증폭 펄스를 얻는 데 유리하다는 것을 실험적으로 알 수 있었다.

3.3. 증폭 자발 방출(Amplified Spontaneous Emission)의 억제

사중경로 증폭기의 출력 레이저 빔에서 ASE 에너지의 비율을 줄이기 위한 목적으로 두 가지 실험적 시도에 대해 유용성을 조사하였다. 첫번째 방법은 거울 M4 대신에 Littrow형 회절격자(1300 grooves/mm)를 설치하여 ASE 파장 성분이 분산에 의해서 원하는 파장의 레이저 빔 경로로부터 벗어나게 하는 것이다.[12,21] 두번째는 필터 유리(Oriel filter glass 51310)를 증폭기 경로상의 특정한 위치에 삽입해서 ASE 파장 성분의 빛이 레이저 빔에 비해서 더 큰 흡수에 의한 손실을 겪도록 하는 방법이다. 사용된 필터 유리는 장파장 투과형으로서 550 nm부터 600 nm에 이르는 파장 영역에서 경사 투과도를 가지며, ASE의 중심파장(566 nm)과 연속파 레이저 파장(572 nm)에서 각각 약 15%와 30%의 투과도를 보인다.

전체 증폭 빔으로부터 ASE가 차지하는 비율을 측정하기 위해서, 증폭기로부터 출력된 펄스 빔을 중성 흡수 필터(neutral density filter : 2.0-4.0 optical density)를 통해 감쇠시킨 후 홀로그래픽 회절격자(1200 grooves/mm)를 이용해 파장 성분에 따라 회절시켰다. 회절 빔은 초점거리가 1 m인 볼록 렌즈에 의해 0.6 mm/nm의 분산값을 갖는 제1차 회절상을 초점면 위에 맺게 되며 Fig. 4(a)와 같이 전형적인 스펙트럼 강도 분포를 보인다. 이 때 회절상 전체에 포함된 펄스 에너지와 칼날(knife edge)로 좁은 선폭의 레이저 빔 성분을 막은 다음 측정한 펄스 에너지를 비교함으로써 ASE 비율을 결정하였다. 실험에서 에너지 측정의 절대치를 얻는 데에는 pyroelectric joulemeter (Molectron J4-05)가 사용되었으나, 상대적인 에너지 측정만을 위해서는 넓은 dynamic range (~10^5)에서 선형성이 우수한 실리콘 광다이오드가 이용되었다. 짧은 레이저 펄스(~7 ns)의 입력에 대해 비교적 느린 광다이오드의 첨두 신호는 광 펄스 강도의 적분에 비례하므로, 짧은 초점거리의 볼록 렌즈(f = 10 cm)로 회절상을 광다이오드 수광면에 집속한 후 첨두 신호 크기를 측정하여 펄스 에너지의 상대적인 값을 결정하였다.

Figure 6는 사중경로 증폭기에 가하는 펌핑 에너지를 변화시키면서 측정한 증폭기의 총 출력 에너지에 대한 ASE 에너지의 비율을 나타내고 있다. 이 때 펌핑 에너지가 증가함에 따라 총 출력 에너지는 Fig. 3에서 보듯이 거의 선형적으로 증가하며, 1 mJ ~ 5 mJ의 펌핑 영역에서 20% 정도의 효율을

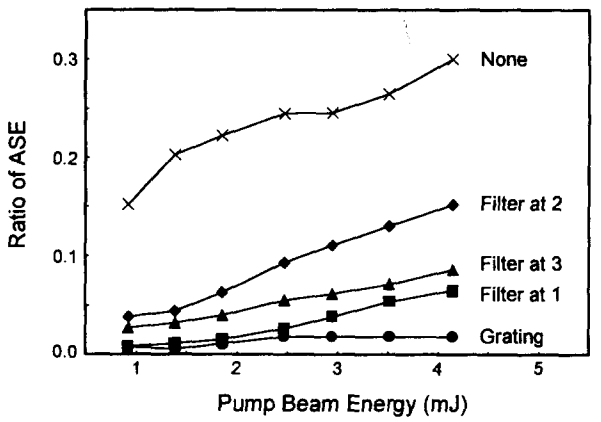

Fig. 6. Ratio of ASE portion in the total output energy from the four-pass amplifier. The legends specify the frequency-selective element inserted in the amplifier and the numbers indicate the position of the filter glass insertion.

나타내고 있는 상황이다.

파장선택소자가 아무것도 없는 보통의 사중경로 증폭기에서는 펌핑 에너지가 4.2 mJ인 경우 ASE 에너지의 비율이 약 30%에 이른다. 하지만 필터 유리를 증폭기에 삽입하면 ASE 에너지의 비율이 상당량 감소하게 되는데, 필터 유리의 위치에 따라서 매우 큰 차이를 보인다. 필터 유리가 위치 1에 있는 경우 ASE의 비율이 가장 작으며 필터 유리가 없는 상태와 비교할 때 약 1/4 수준으로 떨어진다. 경우마다 ASE의 비율이 차이가 나는 이유는 ASE 빔이 레이저 빔과 함께 증폭되는 과정에서 필터 유리를 통과하는 회수와 시점이 다르기 때문이며, ASE가 필터 유리의 흡수에 의해 더 많이 제거될수록 레이저 파장 성분의 증폭 이득이 상대적으로 높아지게 된다. 또한 필터 유리의 흡수도가 원하는 레이저 파장을 벗어나면서 급하게 증가한다면, 좁은 선폭의 레이저 빔에 대한 증폭 이득이 ASE에 비해 훨씬 커지고 증폭기 출력의 스펙트럼이 비대칭적으로 변화될 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

색소 셀로부터 나오는 ASE는 진행 방향 및 편광이 사중경로 증폭되는 레이저 빔과 같은 성분을 포함하여, 증폭 경로를 시계 또는 반시계 방향으로 도는 방향 성분과 수평 또는 수직 편광 성분의 조합으로 이루어지는데, 이러한 조합은 ASE가 색소 셀에 의해 증폭되는 회수를 각각 1회, 2회, 3회, 그리고 4회로 허용한다. 수평 편광 및 시계 방향으로 진행하여 색소 셀에서 4회 증폭되는 ASE 빔은, 필터 유리가 위치 1에 있는 경우 증폭과정에서 필터 유리를 4회 통과하는 반면 위치 2와 위치3의 경우는 2회 밖에 지나지 않는다. 또 수직 편광 및 시계 방향으로 발생하여 3회 증폭되는 ASE 빔은, 위치 1의 필터 유리를 3회 통과하며 위치 2와 위치3의 경우에는 각각 1회와 2회 통과만을 허용한다. 수직 편광 및 반시계 방향으로 진행하면서 2회 증폭되는 ASE 빔 역시 필터 유리의 위치에 따라 통과 회수가 다르지만, 증폭 회수가 적어서 이득매질로부터 추출해내는 에너지가 작으므로 큰 영향을 주지 못한다. 수평 편광 및 반시계 방향으로 발생한 ASE는 단 1회의 증폭에 그치며, 필터 유리의 위치에 상관없이 한번도 통과하지 않는다. 따라서 Fig. 6의 결과에서도 확인할 수 있듯이 위치 1에

있는 필터 유리가 ASE를 가장 효과적으로 제거하고, 위치 3의 경우가 위치2의 경우에 비해 비교적 유리함을 알 수 있다. 위치 3이 위치 2에 비해 ASE 비율이 작은 원인은, 3회 증폭되는 ASE빔에 대해 필터 유리를 통과하는 회수의 차이가 날 뿐만 아니라 4회 증폭되는 ASE 빔이 필터 유리를 지나는 시점에서도 찾을 수 있다. 위치 3의 경우, ASE 빔은 2회의 증폭 후 필터를 2회 연속으로 통과하면서 에너지가 크게 감쇄되어, 2회 증폭된 높은 에너지의 레이저 빔이 나머지 2회의 증폭에서 포화 이득에 의해 큰 에너지를 얻어내는 동안, 상대적으로 매우 작은 에너지 밖에 추출해내지 못한다. 반면 위치 2의 경우, ASE 빔은 매우 높은 이득을 내는 1회의 소신호 증폭 후 필터 유리를 1회만 통과하여 에너지 감쇄가 심하지 않으므로, 연속되는 2회의 증폭에서 이미 포화 이득 영역의 증폭을 경험하면서 이득매질로부터 많은 에너지를 얻게 된다.

회절격자를 사용하면 ASE의 비율이 획기적으로 감소되어, 펌핑 에너지가 증가해도 그에 비해 많이 증가하지 않으며 최고 펌핑 에너지(4.2 mJ) 상태에서도 1.5% 미만으로 억제된다. 레이저 빔이 사중경로 증폭 과정 중 회절격자에 의해 단 한번만 회절됨에도 불구하고 ASE가 효과적으로 감소되는 이유는 M4의 위치에서 회절된 ASE 빔의 진행 방향이 좁은 선폭의 레이저 빔에 기준하여 정렬된 증폭기의 광 경로와 맞지 않아서 정상적인 사중경로 증폭을 이루지 못하기 때문이다. 이로 인해 ASE 빔이 효율적으로 증폭될 수 있는 회수가 최대 2회로 제한되며, 4회 증폭되는 레이저 빔에 비해 매우 증폭 이득이 낮다. 즉 진행 방향 및 편광이 사중경로 증폭되는 레이저 빔과 같아서 4회 증폭되는 ASE 빔 성분은 연속된 3번째와 4번째 증폭 과정에서 큰 회절 손실을 경험하게 된다. 또한 색소 셀에서 수직 편광 및 시계 방향으로 발생한 ASE 빔은 총 3회의 증폭 과정 중에서 연속된 2번째와 3번째의 증폭에서 회절 손실이 있다. 레이저와 ASE의 증폭은 증폭기 내에 파장선택소자가 없을 때, 증폭 회수가 많아지면서(1회→4회) 이득 포화로 인해 증폭률이 떨어지지만(Fig. 3의 결과 참조), 증폭되는 빔의 에너지가 점차로 커지기 때문에 에너지 추출량은 커지게 된다. 따라서 에너지 증대가 크게 일어날 수 있는 증폭 회수가 큰 (3-4) 증폭 과정에서, ASE 빔이 회절격자에 의한 회절 손실로 인하여 효과적으로 제거되면 대신 레이저 빔에 의한 에너지 추출은 오히려 크게 일어나게 된다.

파장선택소자로 증폭기에 삽입한 필터 유리나 회절격자의 광 손실은 일반적으로 증폭기의 총 출력을 감소시키는데, Fig. 7은 앞에서 언급한 여러 경우에 대해 증폭기의 출력 변화를 측정해 나타낸 것이다. 각 경우의 출력 에너지는 펌핑 에너지를 변화해 가며 얻었으며, 파장선택소자가 없는 보통의 사중경로 증폭기를 기준으로 규격화되어 있다. 필터 유리가 위치1에 있을 때에는 ASE의 비율을 현저히 낮출 수 있지만, 4회에 걸친 필터 유리의 흡수로 인해 레이저 빔의 손실도 함께 가장 커지기 때문에 출력 에너지가 상대적으로 가장 낮다. 위치 2의 경우 사중경로 증폭 과정 중 레이저 빔이 필터 유리를 지나는 회수가 2번으로 줄지만, 결과적으로 위치 1의 경우에 비해서 에너지가 약 5% 밖에는 증가하지 않는다. 위치 3에서는 출력 에너지가 보통의 사중경로 증폭기에 대해 94%

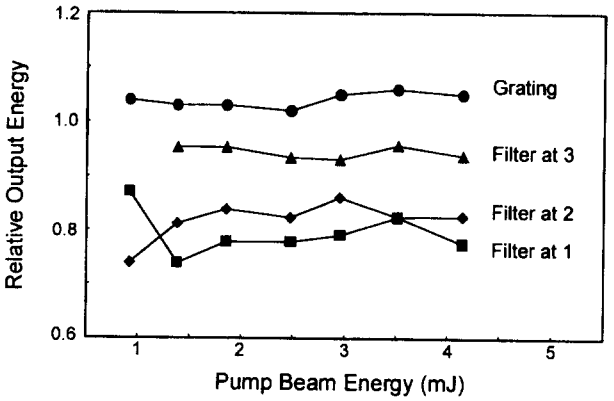

Fig. 7. Relative output energy of the four-pass amplifier with frequency-selective element. The legends specify the frequency-selective element inserted in the amplifier and the numbers indicate the position of the filter glass insertion.

수준에 이르지만, Fig. 6에서 알 수 있듯이 ASE의 비율도 동시에 비교적 크다. 주목할 만한 사실은 회절격자를 설치한 경우에 보통의 사중경로 증폭기의 경우보다 오히려 출력 에너지가 평균 4% 정도 증가를 보이는 것이다. 회절격자의 광 손실에도 불구하고 출력 에너지가 증가하는 것은, 효과적인 ASE 제거로 인해 ASE에 의한 증폭기 이득 소모가 매우 작아져서 레이저 파장에서의 이득이 대신 월등히 크게 유지되기 때문으로 해석할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 좁은 선폭의 연속파 레이저를 펄스 증폭하기 위한 목적으로 새로운 구조를 갖는 사중경로 색소 레이저 증폭기를 제안하고 실험적으로 구현하였다. 펌핑 레이저의 펄스 에너지가 5.6 mJ이고 연속파 레이저의 입력 강도가 100 mW일 때, 사중경로 증폭기는 약 130 MHz (FWHM)의 선폭과 1.5 mJ의 에너지를 갖는 레이저 펄스를 출력하였으며, 이는 약 2×10^6 이상의 높은 증폭 이득과 27%의 에너지 효율에 해당하는 것이다. 사중경로 증폭기 내에 회절격자를 사용하면, 파장 선택 소자가 없는 보통의 증폭기와 비교할 때 총 출력 에너지가 약 4% 정도 증가됨과 동시에 ASE가 차지하는 비율이 10배 이상 감소하여, 총 출력 빔에 대해 ASE 에너지가 1.5% 이하로 억제되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국제공동연구과제 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] G. J. Rosasco, L. A. Rahn, W. S. Hurst, R. E. Parlmer, J. P. Looney, and J. W. Hahn, Proc SPIE **912**, 171 (1988).
[2] M. S. Brown, L. A. Rahn, and T. Dreier, Opt. Lett. **17**, 76 (1992).

[3] R. L. Farrow, R. P. Lucht, G. L. Clark, and R. E. Palmer, Appl. Opt. **24**, 2241 (1985).
[4] R. L. Farrow, R. Trebino, and R. E. Palmer, Appl. Opt. **26**, 331 (1987).
[5] R. P. Lucht, R. L. Farrow, and D. J. Rakestraw, J. Opt. Soc. Am. B **10**, 1508 (1993).
[6] B. Couillaud, A. Ducasse, and E. Freysz, IEEE J. Quantum Electron. **QE-20**, 310 (1984).
[7] L. A. Rahn, Appl. Opt. **24**, 940 (1985).
[8] J. P. Boquilon, Y. Ouazzany, and R. Chaux, J. Appl. Phys. **62**, 23 (1987).
[9] F. Trehin, F. Biraben B. Cagnac, and G. Grynberg, Opt, Commun. **31**, 76 (1979).
[10] E. Cromwell, T. Trickl, Y. T. Lee, and A. H. Kung, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2888 (1989).
[11] S. Lavi, G. Bialolanker, M. Amit, D. Belker, G. Erez, and E. Miron, Opt. Commun. **60**, 309 (1986).
[12] P. Ewart and D. R. Meacher, Opt. Commun. **71**, 197 (1989).
[13] J. F. Black and J. J. Valentini, Appl. Opt. **33**, 3861 (1994).
[14] N. F. Andreyev and A. Z. Matveyev, IEEE J. Quantum Electron. **30**, 305 (1994).
[15] K. G. Han and H. J. Kong, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, 994 (1995).
[16] J. Y. Lee, H. S. Kim, K. Y. Um, J. R. Park, and H. J. Kong, OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers **1**, 216 (1996)
[17] J. R. Park, J. Y. Lee, H. S. Kim, K. Y. Um, and H. J. Kong, Optical Review **4**(1B), 170 (1997).
[18] K. C. Reyzer and L. W. Casperson, J. Appl. Phys. **51**, 6075 (1980).
[19] K. C. Reyzer and L. W. Casperson, J. Appl. Phys. **51**, 6083 (1980).
[20] D. S. Bethune, Appl. Opt. **20**, 1897 (1981).
[21] P. Kumar and R. S. Bondurant, Appl. Opt. **22**, 1284 (1983).
[22] J. W. Hahn and S. S. Lee, J. Appl. Phys. **58**, 3926 (1985).

Four-pass dye laser amplifier for the direct pulsed amplification of a tunable narrow-bandwidth continuous-wave laser

Jae Yong Lee and Hai-Woong Lee
Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology
Taejon 305-701, Korea

Yong-Shim Yoo and Jae Won Hahn
Optical High Temperature Measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science,
Taejon 305-600, Korea

(Received October 29, 1998, Revised manuscript received March 4, 1999)

A new design of four-pass dye laser amplifier affording a narrow-bandwidth pulsed output is demonstrated to suppress the amplified spontaneous emission(ASE) carried by the amplifier output and reduce the possibility of parasitic oscillation in the amplifier. By the direct pulsed amplification of a cw 100 mW dye laser under a Q-switched doubled Nd:YAG laser pumping with energy of 5.6 mJ/pulse, high-peak-power pulsed output with 1.5-mJ energy in 130-MHz bandwidth is obtained corresponding to a power gain greater than 2×10^6 and an energy efficiency of 27%. The ASE ratio in the four-pass amplifier output is dramatically reduced by using a diffraction grating in the amplifier. Compared with the results obtained from the normal operation of the amplifier with no frequency-selective device, the ASE ratio is reduced by a factor in excess of 10 to remain under 1.5% of the amplifier output whereas the total output energy is slightly increased by ~4%.