



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2012년12월27일
(11) 등록번호 10-1216013
(24) 등록일자 2012년12월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01S 3/098 (2006.01) H01S 3/10 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-0053852
(22) 출원일자 2011년06월03일
심사청구일자 2011년06월03일
(65) 공개번호 10-2012-0134726
(43) 공개일자 2012년12월12일
(56) 선행기술조사문헌
KR101027321 B1
JP2002118315 A
KR1020070062194 A
JP09167869 A

(73) 특허권자
고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가 1
(72) 발명자
윤대현
서울특별시 중구 동호로10길 30, 동아 108동 101호 (신당동, 약수하이츠)
(74) 대리인
송경근

전체 청구항 수 : 총 13 항

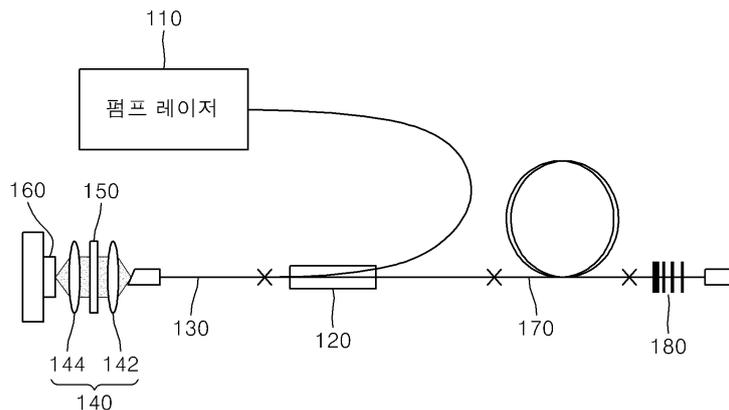
심사관 : 조성찬

(54) 발명의 명칭 에너지 조절이 가능한 단일 편광 단일 펄스 모드 잠금 레이저 발생 장치

(57) 요약

에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치가 개시된다. 본 발명에 따른 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치는 포화 흡수부로 기능하는 SESAM에 레이저 광을 집중시키는 렌즈의 초점 거리, 펌프 레이저 광의 파워 및 출력 결합기의 반사도 중에서 적어도 하나를 조절하여 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도가 포화 흡수부의 반사도가 최대값일 때 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도인 기준 영향도보다 크게 되도록 설정된다. 본 발명에 따르면, 다중 펄스의 형성없이 에너지 조절 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저를 발생할 수 있다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20100015087

부처명 한국연구재단

연구사업명 우주기술개발사업

연구과제명 우주기초물리 실험용 광RF 기준 주파수 동시발생 시스템

주관기관 고려대학교산학협력단

연구기간 2010.04.01 ~ 2011.03.31

특허청구의 범위

청구항 1

사전에 설정된 파장을 갖는 펄프 레이저를 생성하는 펄프 레이저 발생부;

코어에 이득물질이 도핑되어 있는 광섬유로 이루어진 이득 조절부;

상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 일단부로부터 출력되는 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 제1렌즈와 상기 제1렌즈를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시키는 제2렌즈를 포함하는 렌즈부;

상기 제1렌즈와 상기 제2렌즈 사이에 배치된 사분 파장판으로 이루어져, 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 상기 레이저 광의 편광을 조절하는 편광 조절부;

상기 제2렌즈를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시키는 포화 흡수부;

단일 모드 광섬유(single mode fiber : SMF)로 이루어져 공진 길이를 조절하는 공진 조절부;

일단부로부터 타단부 방향으로 브래그 격자가 형성되어 모드 잠금된 레이저 광을 출력하는 출력 결합부; 및

상기 이득 조절부와 상기 공진 조절부 사이에 연결되거나 상기 공진 조절부와 상기 출력 결합부 사이에 연결되어, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 출력된 상기 펄프 레이저를 입력받아 상기 포화 흡수부 쪽으로 제공하거나 상기 모드 잠금된 레이저 광을 상기 출력 결합부로 제공하는 펄프광 결합부;를 포함하며,

상기 제2렌즈의 초점 거리, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 출력되는 펄프 레이저의 파워 및 상기 출력 결합부의 반사도 중에서 적어도 하나를 조절하여 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도가 상기 포화 흡수부의 반사도가 최대값일 때 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도인 기준 영향도보다 크게 되도록 설정되는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 2

사전에 설정된 파장을 갖는 펄프 레이저를 생성하는 펄프 레이저 발생부;

코어에 이득물질이 도핑되어 있는 광섬유로 이루어진 이득 조절부;

상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 일단부로부터 출력되는 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 제1렌즈와 상기 제1렌즈를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시키는 제2렌즈를 포함하는 렌즈부;

상기 제1렌즈와 상기 제2렌즈 사이에 배치된 사분 파장판으로 이루어져, 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 상기 레이저 광의 편광을 조절하는 편광 조절부;

상기 제2렌즈를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시키는 포화 흡수부;

큰모드면적 광섬유(large-mode area fiber : LMA)로 이루어져 공진 길이를 조절하는 공진 조절부;

일단부로부터 타단부 방향으로 큰모드면적 광섬유에 브래그 격자가 형성되어 모드 잠금된 레이저 광을 출력하는 출력 결합부; 및

상기 제 1렌즈와 상기 사분파장판 사이에 배치되어, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 입력된 상기 펄프 레이저를 상기 이득 조절부로 제공하고, 상기 포화 흡수부로부터 상기 이득 조절부로 향하거나 상기 이득조절부로부터 상기 포화 흡수부로 향하는 레이저 광을 통과시키는 펄프광 결합부;를 포함하며,

상기 제2렌즈의 초점 거리, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 출력되는 펄프 레이저의 파워 및 상기 출력 결합부의 반사도 중에서 적어도 하나를 조절하여 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도가 상기 포화 흡수부의 반사도가 최대값일 때 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도인 기준 영향도보다 크게 되도록 설정되는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 3

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 제2렌즈의 초점 거리와 상기 출력 결합부의 반사도를 고정시킨 상태에서 상기 펌프 레이저 발생부로부터 출력되는 레이저 광의 파워를 사전에 설정된 범위 내에서 조절하여 상기 포화 흡수부의 반사도가 음의 기울기를 가지도록 설정되는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 4

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 제2렌즈의 초점 거리와 상기 출력 결합부의 반사도를 고정시킨 상태에서 상기 펌프 레이저 발생부로부터 출력되는 레이저 광의 파워를 사전에 설정된 범위 내에서 조절하여 상기 포화 흡수부의 영향도가 상기 포화 흡수부에 야기된 이광자 흡수(two-photon absorption : TPA) 효과의 역 영향도 기울기의 제1실수 배수로부터 제2 실수 배수 사이의 값을 가지도록 설정되는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유는 단일 모드 편광 유지 광섬유인 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 6

제 2항에 있어서,

상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유는 큰모드면적 단일 모드 편광 유지 광섬유인 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 7

제 5항 또는 제 6항에 있어서,

상기 이득물질은 이테르븀, 에르븀, 토륨, 홀뮴 및 이터과 에르비움의 혼합물 중에서 선택되는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 8

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 편광 조절부는 상기 제1렌즈로부터 상기 제2렌즈에 이르는 광 경로를 회전축으로 하여 회전되어 상기 제1 렌즈로부터 입사되거나 상기 제2렌즈로부터 입사된 광의 편광을 조절하는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 9

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 출력 결합부를 구성하는 광섬유에 형성되는 브래그 격자는 주파수 쉼(Chirp)이 되어 있는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 10

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 포화 흡수부는 반도체 포화 흡수 거울인 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 11

제 1항 또는 제 2항에 있어서,

상기 포화흡수부는 단일벽 탄소나노튜브 또는 나노 다이아몬드 파우더로 코팅된 포화 흡수 반사 거울인 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 12

제 2항에 있어서,

상기 펌프 레이저 발생부로부터 입력되는 상기 펌프 레이저를 상기 펌프광 결합부로 전반사시키는 광로 변경부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

청구항 13

제 2항에 있어서,

상기 제1렌즈는 상기 펌프광 결합부를 통해 입력된 상기 펌프 레이저를 시준과 집속하며, 상기 이득 조절부로부터 입력된 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 비색수차렌즈인 것을 특징으로 하는 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 레이저 발생 장치에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 전력 증폭기(power amplifier)를 사용하지 않고 1~500 MHz 정도의 반복율로 10 ~ 100 nJ의 펄스 에너지를 가진 모드 잠금 광섬유 레이저 발진기는 이광자 현미경, 고침투 광 간섭 X선 단층 촬영기 및 광주파수 빔(optical frequency comb : OFC) 발생기와 같은 다양한 응용에 이용될 수 있다. 에르븀 첨가 광섬유 레이저와 같이 비정상 분산 영역에서 동작하는 모드 잠금 광섬유 레이저에서, 솔리톤 에너지 $E\tau$ (여기서, E는 솔리톤 에너지이고, τ 는 펄스 폭이다)는 커(Kerr) 비선형성 γ 와 내부 공진 소자의 군속도 분산(group velocity dispersion : GVD) D 사이의 균형에 의해 상수를 유지한다. 레이저 공진기마다 해당 공진기의 군속도 분산 D와 비선형성 γ 가 불변하여 생기는 솔리톤 영역의 제약으로 인해, 펄스 에너지는 일반적으로 수 10 pJ로 제한된다. 1.5 μ m에서 동작하는 에르븀/이테르븀 첨가 광섬유 레이저가 하나의 예이다. 10 nJ 이상의 에너지를 가진 솔리톤 펄스를 생성하기 위해서는 증폭기 또는 대형 모드 면적의 다중 필라멘트 코어 광섬유를 가진 레이저 발진기가 필요하다.

[0003] 한편, 선형 철타된 출력 펄스를 가진 소산성의 솔리톤 광섬유 레이저(dissipative soliton fiber laser : DSFL)가 정상 분산 영역에서 에너지 조절 가능성이 실험적 및 이론적으로 입증되었다. 1.03 μ m에서 발진하는 유사 및 전정상 분산 이테르븀 첨가 모드 잠금 광섬유 레이저(Yb-doped mode locked fiber oscillator : YMFO)가 좋은 예이다. 나아가 최근에 전 정상 분산을 가진 상이한 공진기 구조에서 높은 펄스 에너지를 생성할 수 있는 방법을 제공하는 수정된 솔리톤 영역 이론이 개발되었다. 그러나 종래의 YMFO에서 다중 펄스 영역으로의 천이로 인하여 40 nJ 이상의 펄스 에너지를 얻기는 어려운 문제가 있다.

[0004] 지금까지 20 nJ 이상의 펄스 에너지를 가진 것으로 보고된 YMFO는 겨우 몇 개에 불과하다. 예를 들어, 두 개의 펌프 다이오드를 가진 전정상 분산 YMFO, 클래딩 펌프 이중 클래딩 YMFO, 그리고, 이테르븀 첨가 대형 모드 면적 양자 크리스털 광섬유 발진기가 50 % 이하의 펌프 대 출력 파워 변환 효율(pump-to-output-power conversion : POCE)을 보였다. 특히, 수동 모드 잠금을 위해 비선형 편광 회전 기법이 사용된 링 공진기 YMFO는 모드 잠금된 펄스 발생을 위해 분산 스펙트럴 필터를 사용하여야 한다. 이러한 시스템들은 복잡한 구조하에서 다수의 공진 소자를 사용하기 때문에 일반적으로 크기가 크고, 장기간 안정적으로 동작하도록 제작되는 것이 곤란하다. OFC 응용에 있어서, 낮은 위상 잡음을 가지면서 장기간 안정적으로 동작하는 것은 세습 원자 분수 시계에서 9.2 GHz 원자 시계 천이의 실험을 위한 고도로 안정적인 RF 신호의 합성에서 필수적이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는, 단일 펄스 영역에서 동작하면서 높은 펄스 에너지를 가진 레이저를 방

출하는 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0006] 상기의 기술적 과제를 달성하기 위한, 본 발명에 따른 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 제1 실시예는, 사전에 설정된 파장을 갖는 펄프 레이저를 생성하는 펄프 레이저 발생부; 코어에 이득물질이 도핑되어 있는 광섬유로 이루어진 이득 조절부; 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 일단부로부터 출력되는 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 제1렌즈와 상기 제1렌즈를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시키는 제2렌즈를 포함하는 렌즈부; 상기 제1렌즈와 상기 제2렌즈 사이에 배치된 사분 파장판으로 이루어져, 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 상기 레이저 광의 편광을 조절하는 편광 조절부; 상기 제2렌즈부를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시키는 포화 흡수부; 단일 모드 광섬유(single mode fiber : SMF)로 이루어져 공진 길이를 조절하는 공진 조절부; 일단부로부터 타단부 방향으로 브래그 격자가 형성되어 모드 잠금된 레이저 광을 출력하는 출력 결합부; 및 상기 이득 조절부와 상기 공진 조절부 사이에 연결되거나 상기 공진 조절부와 상기 출력 결합부 사이에 연결되어, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 상기 펄프 레이저를 입력받아 상기 포화 흡수부 쪽으로 제공하거나 상기 모드 잠금된 레이저 광을 상기 출력 결합부로 제공하는 펄프광 결합부;를 구비하며, 상기 제2렌즈의 초점 거리, 상기 제2렌즈 상의 레이저 광의 스팟 크기, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 출력되는 펄프 레이저의 파워 및 상기 출력 결합부의 반사도 중에서 적어도 하나를 조절하여 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도(Fluence)가 상기 포화 흡수부의 반사도(Reflectivity)가 최대값일 때 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도인 기준 영향도보다 크게 되도록 설정된다.

[0007] 상기의 기술적 과제를 달성하기 위한, 본 발명에 따른 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 제2 실시예는, 사전에 설정된 파장을 갖는 펄프 레이저를 생성하는 펄프 레이저 발생부; 코어에 이득물질이 도핑되어 있는 광섬유로 이루어진 이득 조절부; 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 일단부로부터 출력되는 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 제1렌즈와 상기 제1렌즈를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시키는 제2렌즈를 포함하는 렌즈부; 상기 제1렌즈와 상기 제2렌즈 사이에 배치된 사분 파장판으로 이루어져, 상기 이득 조절부를 구성하는 광섬유의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 상기 레이저 광의 편광을 조절하는 편광 조절부; 상기 제2렌즈부를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시키는 포화 흡수부; 큰 모드면적 광섬유(large-mode area fiber : LMA)로 이루어져 공진 길이를 조절하는 공진 조절부; 일단부로부터 타단부 방향으로 큰모드면적 광섬유에 브래그 격자가 형성되어 모드 잠금된 레이저 광을 출력하는 출력 결합부; 및 상기 제 1렌즈와 상기 사분파장판 사이에 배치되어, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 입력된 상기 펄프 레이저를 상기 이득 조절부로 제공하고, 상기 포화 흡수부로부터 상기 이득 조절부로 향하거나 상기 이득조절부로부터 상기 포화 흡수부로 향하는 레이저 광을 통과시키는 펄프광 결합부;를 포함하며, 상기 제2렌즈의 초점 거리, 상기 펄프 레이저 발생부로부터 출력되는 펄프 레이저의 파워 및 상기 출력 결합부의 반사도 중에서 적어도 하나를 조절하여 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도가 상기 포화 흡수부의 반사도가 최대값일 때 상기 포화 흡수부에 입사되는 레이저 광의 단위 면적당 에너지 밀도인 기준 영향도보다 크게 되도록 설정된다.

발명의 효과

[0008] 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치에 의하면, 고 에너지 모드 잠금 레이저에서 발생하는 다중 펄스의 형성의 문제를 해결할 수 있으며, 다중 펄스의 형성없이 에너지 조절 가능한 단일 편광 모드 잠금 광섬유 레이저를 발생할 수 있다. 또한 분산 스펙트럴 필터를 사용하지 않고 이 양자 흡수의 우세로 인한 영향 때문에 반사도가 영향도의 함수관계에서 음의 기울기를 가진 영역에서 SESAM을 동작시켜 스스로 안정화되고 에너지 조절 가능한 모드 잠금 펄스를 생성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0009] 도 1은 단일 모드 광섬유를 사용하는 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 실시예를 도시한 도면,

도 2는 큰코어면적 또는 이중 클래딩 광섬유를 사용하는 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 실시예를 도시한 도면,

도 3은 도 1에 도시된 실시예의 FBG를 대체한 부분 반사 출력 결합기의 반사도 ρ 를 0.45로 설정하여 수행한 실

험결과를 도시한 도면,

도 4는 도 1에 도시된 실시예의 FBG를 대체한 부분 반사 출력 결합기의 반사도 ρ 를 0.1로 설정하여 수행한 실험결과를 도시한 도면,

도 5는 도 1에 도시된 실시예의 FBG를 대체한 부분 반사 출력 결합기의 구성을 도시한 도면, 그리고,

도 6은 도 1에 도시된 실시예의 최대 펄스 에너지에서 동작 특성을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0010] 이하에서 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 실시예에 대해 상세하게 설명한다.
- [0011] 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 최소의 공진 소자를 가지고 정상과 구성에서 63 %의 POCE를 가진 일련의 선형 첩된 펄스를 방출한다. 본 발명에 따른 레이저 발생 장치의 실시예에서 공진기는 일반적인 편광 유지(polarization maintaining : PM) 단일 모드 이득 소자, 수동 광섬유 및 펄스 에너지 조절과 수동 모드 잠금을 위해 사용되는 반도체 포화 흡수 거울(semiconductor saturable absorber mirror : SESAM)로 구성된다. 이러한 구성에 의해 분산 스펙트럴 필터를 사용하지 않고 이 양자 흡수의 우세로 인한 영향 때문에 반사도가 음의 기울기를 가진 영역에서 SESAM을 동작시켜 스스로 안정화되고 에너지 조절가능한 펄스를 생성할 수 있다. 그리고 단일 펄스 상태를 모든 펄프광의 세기 범위에서 유지함으로써, 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 585 mW의 펄프 파워로부터 7.72 MHz의 반복율에서 48 nJ의 펄스 에너지와 58 ps의 펄스 폭을 가진 일련의 펄스를 생성하며, 84의 펄스-밴드폭의 곱(time bandwidth product : TBP)을 준다.
- [0012] 도 1은 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 단일 모드 광섬유를 사용한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치에 대한 바람직한 실시예를 도시한 도면이다.
- [0013] 도 1을 참조하면, 본 발명에 따른 광섬유 레이저 발생 장치(100)는 펄프 레이저 발생부(110), 펄프광 결합부(120), 이득 조절부(130), 렌즈부(140), 편광 조절부(150), 포화 흡수부(160), 공진 조절부(170) 및 출력 결합부(180)로 구성된다.
- [0014] 펄프 레이저 발생부(110)는 특정한 파장을 갖는 펄프 레이저를 사용한다. 일례로, 펄프 레이저 발생부(110)는 976 nm의 파장에서 585 mW의 최대 출력 전력을 제공하는 분산 피드백 단일 편광 다이오드 레이저 발생기로 구성될 수 있다. 이러한 펄프 레이저 발생부(110)로부터 출력되는 펄프 레이저는 광섬유와 같은 광전달매체를 통해 펄프광 결합부(120)로 입력된다.
- [0015] 펄프광 결합부(120)는 펄프 레이저 발생부(110)로부터 입력된 펄프 레이저를 능동 이득 물질로 동작하는 이테르븀 첨가 광섬유(Yb-doped fiber : YDF)로 입력된다. 또한 펄프광 결합부(120)는 이득 조절부(130)로부터 입력되는 레이저를 출력 결합부(180) 쪽으로 출력한다. 이러한 펄프광 결합부(120)는 박막 PM 파장분할다중화(wavelength division multiplexing : WDM) 방식의 커플러로 이루어질 수 있다. 한편 펄프광 결합부(120)는 공진 조절부(170)와 출력 결합부(180) 사이에 위치하거나 출력 결합부(180)의 외측(즉, 공진 조절부(170)의 반대쪽)에 위치할 수 있다.
- [0016] 이득 조절부(130)는 이득 물질로서 60 cm 길이의 ~ 250 dB/m의 흡수 계수를 가진 YDF로 이루어진다. 이득 조절부(130)로 기능하는 YDF의 일단은 펄프광 결합부(120)에 연결되며, 타단은 대기 중에 노출되어 렌즈부(140)를 구성하는 두 개의 렌즈 중에서 하나의 렌즈(142)로 레이저를 출사하거나, 해당 렌즈(142)로부터 입사되는 레이저를 펄프광 결합부(120)로 출력한다.
- [0017] 렌즈부(140)는 이득 조절부(130)의 타단으로부터 출력되는 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성하는 제1렌즈(142)와 제1렌즈(142)를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시키는 제2렌즈(144)를 구비한다.
- [0018] 편광 조절부(150)는 렌즈부(140)의 제1렌즈(142)와 제2렌즈(144) 사이에 배치되며, 사분 파장판(quarter-wave plate : QWP)으로 구성된다. 편광 조절부(150)를 구성하는 QWP는 이득 조절부(130)의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 내부 공진 전기장의 편광 상태를 조절한다.
- [0019] 포화 흡수부(160)는 렌즈부(140)의 제2렌즈(144)를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시킨다. 이러한 포화 흡수부(160)는 본 발명에 따른 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치에서 중요한 소자이다. 포화 흡수부(160)로는 펄스 거동을 다중 펄스 임계치 이하, 즉 단일 펄스 상태로 유지하면서 펄스 에너지의 조절을 위해 반도체 포화 흡수 거울(semiconductor saturable absorber mirror : SESAM)이 사용된다. SESAM은 또한 Q 스위칭없이

수동 모드 잠금을 개시하는 데 도움을 준다.

- [0020] 공진 조절부(170)는 연장된 선형 공진기를 형성하기 위한 구성요소로서, 펌프광 결합부(120)에 연결된 단일 모드 광섬유(single mode fiber : SMF)가 사용된다. SMF의 길이는 12.4 m이나, 공진 상태를 조절하기 위해 변경 가능하다.
- [0021] 출력 결합부(output coupler : OC)(180)는 일단이 공진 조절부(170)에 연결되어 타단 쪽으로 레이저 광을 출력한다. 이때 출력 결합부(180)에는 출력되는 레이저 광을 증폭하기 위한 광증폭기가 결합될 수 있다. 이러한 출력 결합부(180)로는 음의 첨된 광섬유 브래그 격자(fiber bragg grating : FBG)가 사용될 수 있다. OC(180)의 피크 반사도는 1030 nm에서 $-0.11 \text{ ps}^2/\text{mm}$ 의 군속도 분산을 가진 10 %이며, 가우시안 대역폭이 1035 nm를 중심으로 55 nm인 PM FBG이다.
- [0022] 이상과 같은 구성요소로 이루어진 공진기의 전체 분산은 $+0.25 \text{ ps}^2$ 이며, 이에 의해 레이저는 정상 분산 영역에서 동작한다. 그리고 펄스 에너지를 48 nJ 이상으로 높이기 위해, 초기에는 수동 광섬유의 길이를 증가시켜 반복율을 7.72 MHz까지 감소시킨다. 또한 본 발명에 따른 광섬유 레이저 발생 장치의 모든 부품은 편광을 유지하며, 능동 이득 물질로 동작하는 이테르븀 첨가된 광섬유(Yb-doped fiber : YDF)와 단일 모드 수동 광섬유(single-mode passive fiber : SMF)는 1030 nm에서의 기본 모드만을 지원한다. 이들은 6 μm 의 코어 직경을 가지며, 0.5 dB 이하의 내부 공진 손실과 35 dB 이상의 편광 소거율로 결합된다.
- [0023] 도 2는 본 발명에 따른 에너지 조절이 가능한 큰모드면적 광섬유를 사용한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 바람직한 실시예를 도시한 도면이다.
- [0024] 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 광섬유 레이저 발생 장치(200)는 펌프 레이저 발생부(210), 광로 변경부(220), 펌프광 결합부(230), 렌즈부(240), 편광 조절부(250), 포화 흡수부(260), 이득 조절부(270), 공진 조절부(280) 및 출력 결합부(290)로 구성된다.
- [0025] 펌프 레이저 발생부(210)는 특정한 파장을 갖는 펌프 레이저를 사용한다. 일례로, 펌프 레이저 발생부(210)는 976 nm의 파장에서 20 W의 최대 출력 전력을 제공하는 큰모드면적 광섬유로 전송되는 파장안정화 단일 편광 다이오드 레이저 발생기로 구성될 수 있다. 이러한 펌프 레이저 발생부(210)로부터 출력되는 펌프 레이저는 광로 변경부(220)와 펌프광 결합부(230)를 통해 큰모드면적 광섬유로 이루어진 이득 조절부(270)로 입력된다. 이때 광로 변경부(220)와 펌프광 결합부(230)는 펌프 레이저 발생부(210)로부터 이득 조절부(260)에 이르는 광섬유와 같은 광전달매체 또는 자유공간에 의해 구성되는 광경로 상에 배치된다. 한편 펌프 레이저 발생부(210)로부터 출력되는 펌프 레이저가 직접 펌프광 결합부(230)로 입사되도록 펌프 레이저 발생부(210)와 펌프광 결합부(230)가 배치될 경우에 광로 변경부(220)는 불필요한 구성요소로서 제거될 수 있다. 광로 변경부(220)는 펌프 레이저 발생부(210)로부터 입사되는 펌프 레이저를 펌프광 결합부(230)로 전반사시키는 반사 거울로 구성될 수 있다.
- [0026] 펌프광 결합부(230)는 렌즈부(240)를 구성하는 두 개의 렌즈(242, 244) 사이에 배치되어, 광로 변경부(220)에 의해 반사되어 입사되는 펌프 레이저를 이득 조절부(270)로 전반사시킨다. 또한 펌프광 결합부(230)는 이득 조절부(270)로부터 포화 흡수부(260)로 향하거나 포화 흡수부(260)로부터 이득 조절부(270)로 향하는 레이저 광을 투과시킨다. 이러한 펌프광 결합부(230)는 이색 거울로 구성될 수 있다.
- [0027] 렌즈부(240)는 펌프광 결합부(230)와 이득 조절부(270) 사이의 광경로 상에 배치되는 제1렌즈(242)와 편광 조절부(250)와 포화 흡수부(260) 사이의 광경로 상에 배치되는 제2렌즈(244)로 구성된다. 제1렌즈(242)는 펌프광 결합부(230)를 통해 입력된 펌프 레이저에 대한 시준과 집속을 하는 역할을 하며, 이득 조절부(270)로부터 입력된 레이저 광의 경로를 변경하여 평행광을 생성한다. 이러한 제1렌즈(242)는 이색시준렌즈로 기능하며, 비색수차렌즈가 사용될 수 있다. 제2렌즈(244)는 제1렌즈(220)를 통과한 평행광의 경로를 변경하여 일정한 영역에 집중시킨다.
- [0028] 편광 조절부(250)는 렌즈부(240)의 제1렌즈(242)와 제2렌즈(244) 사이에 배치되며, 사분 파장판(quarter-wave plate : QWP)으로 구성된다. 편광 조절부(250)를 구성하는 QWP는 이득 조절부(270)의 고속 축 또는 저속 축에 대해 각도조절되어 내부 공진 전기장의 편광 상태를 조절한다.
- [0029] 포화 흡수부(260)는 렌즈부(240)의 제2렌즈(244)를 통과한 레이저 광을 포화흡수하여 반사시킨다. 이러한 포화 흡수부(260)는 본 발명에 따른 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치에서 중요한 소자이다. 포화 흡수부(260)로는 펄스 거동을 다중 펄스 임계치 이하 즉 단일펄스 상태로 유지하면서 펄스 에너지의 조절을 위해 반도체 포

화 흡수 거울(semiconductor saturable absorber mirror : SESAM)이 사용된다.

[0030] 이득 조절부(270)는 이득 물질로서 30 cm 길이의 ~ 1000 dB/m의 흡수 계수를 가진 큰모드영역(large-mode area) YDF로 이루어진다. 큰모드영역 YDF로 이루어진 이득 조절부(270)의 일단은 공진 조절부(280)에 연결되며, 타단은 대기 중에 노출되어 렌즈부(240)의 제1렌즈(242)로 레이저 광을 출사하거나, 제1렌즈(242)를 통과한 레이저 광이 입력된다.

[0031] 공진 조절부(280)는 연장된 선형 공진기를 형성하기 위한 구성요소로서, 이득 조절부(270)에 연결된 큰모드영역 광섬유(large-mode area fiber : LMA)가 사용된다. LMA의 길이는 12.4 m이나, 공진 상태를 조절하기 위해 변경 가능하다.

[0032] 출력 결합부(output coupler : OC)(290)는 일단이 공진 조절부(280)에 연결되어 타단 쪽으로 레이저 광을 출력한다. 이때 출력 결합부(290)에는 출력되는 레이저 광을 증폭하기 위한 광증폭기가 결합될 수 있다. 이러한 출력 결합부(290)로는 음의 첩된 광섬유 브래그 격자(fiber bragg grating : FBG)가 사용될 수 있다. OC(180)의 피크 반사도는 1030 nm에서 $-0.11 \text{ ps}^2/\text{mm}$ 의 군속도 분산을 가진 10 %이며, 가우시안 대역폭이 1035 nm를 중심으로 55 nm인 PM FBG이다.

[0033] 이하에서 도 1에 도시된 레이저 발생 장치를 이용하여 실시된 실험에 대해 설명한다. 이때 비록 실험은 도 1에 도시된 실시예에 대해 수행되었으나, 이로부터 파악되는 레이저 발생 원리 및 실험 결과는 도 2에 도시된 실시예에도 적용될 수 있다. 실험에서 펄스 에너지의 조절을 위해 18.5 %의 큰 변조 깊이와 강한 이양자 흡수(two-photon absorption : TPA) 효과를 가진 바톱사(Batop GmbH)의 SESAM이 사용되었다. SESAM의 반사도(reflectivity) R은 단위 면적당 에너지 밀도로 정의되는 영향도(fluence) F의 함수로서 다음의 수학적식으로 정의된다.

수학적식 1

[0034]
$$R = 1 - \left(\frac{\mu}{1 + F/F_s} + \frac{F}{F_{tp}} + I_{ns} \right)$$

[0035] 여기서, μ 는 변조 깊이, F_s 는 단일 광자 포화 영향도, F_{tp} 는 야기된 TPA 효과의 역 영향도 기울기, 그리고 I_{ns} 는 비포화 손실이다.

[0036] 수학적식 1에서, 조정 변수들의 값은 실험적인 데이터에 기초하여 각각 $\mu=0.185$, $F_s=73.0 \text{ } \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $F_{tp}=42.7 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 그리고 $I_{ns}=0.129$ 로 설정될 수 있다. 도 3의 (a)와 도 4의 (b)의 삽입도 상의 실선은 조정된 반사도 R을

나타낸다. 수학적식 1로부터 반사도 R의 최대값 $R_{\max} = 1 - I_{ns} + \sqrt{F_s/F_{tp}}(\sqrt{F_s/F_{tp}} - 2\sqrt{\mu})$ 는 $F_m = \sqrt{F_s}(\sqrt{\mu F_{tp}} - \sqrt{F_s}) = 68.6 \text{ } \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 TPA 영향으로 인해 0.837의 최대값을 가짐을 알 수 있다. 이때, $F > F_m$ 에 대해 R은 음의 기울기를 가진다.

[0037] SESAM에 대한 영향도 F는 본 발명에서 고 에너지의 펄스 생성을 위한 중요한 제어 인자이다. 가우시안 빔 전파 분석으로부터, 영향도 F는 YMFO 변수 인자들을 사용하여 다음의 수학적식으로 표현될 수 있다.

수학적식 2

[0038]
$$F = \frac{E_{in}}{\pi \omega_0^2} \cong \frac{\pi E_{in} \omega_l^2}{4 \lambda_c^2 f_l^2}$$

[0039] 여기서, E_{in} 는 내부 공진 펄스 에너지, ω_0 는 SESAM 상의 스팟 크기, ω_l 은 도 1에 도시된 초점 렌즈(focal

lense : FL)인 제2렌즈(144)에서 공진 빔 스팟 크기, 제2렌즈(144)의 초점 길이 f_1 , 그리고, λ_c 는 중심 파장이다. 실험에서 사용된 변수값은 $\omega_1=0.43$ mm이고, $\lambda_c=1030$ nm이다.

[0040] 수학적 식 1과 수학적 식 2로부터, 실험적으로 이용가능한 변수들을 사용하여 SESAM 상의 영향도 F를 맞춤으로써 SESAM의 반사도 R을 조절할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들면, 수학적 식 2로부터 내부 공진 펄스 에너지 E_{in} 은 SESAM 상의 영향도 F를 일정하게 유지하면서 제2렌즈(144)의 초점거리 f_1 을 증가시키므로써 임의의 값으로 증가될 수 있다. 영향도 F가 상수로 유지되기 때문에, SESAM은 동일한 반사도를 가지며, 펄스 거동이 변하지 않는다.

[0041] 자기 시작 수동 모드록킹은 포화 흡수부(160)로 채워진 SESAM과 편광 조절부(150)로 채워진 QWP의 결합을 사용하여 얻어진다. 한편 포화흡수부(160)는 단일벽 탄소나노튜브나 다이아몬드 파우더가 코팅된 전반사 거울로 구성될 수 있다. 이러한 포화흡수부(160)는 입사되는 광의 세기에 비례하여 광의 반사율이 증가하는 특성을 가지고 있으며, 바람직하게는 광의 세기에 따라 70 %의 최저 반사율과 95 %의 최대 반사율을 갖는다. 만약 포화흡수부(160)를 구성하는 소자의 최저 반사율이 낮으면, 펄스 레이저의 파워를 높임으로써 레이저 광의 생성이 가능하다.

[0042] 도 1에 도시된 레이저 발생 장치는 $+0.25$ ps²의 전체 공진 분산을 가진 정상 분산 영역에서 동작하지만 어떠한 분산 스펙트럼 필터도 존재하지 않는다. 그리고 $F \gg F_m$ 에 대해 반사도 R의 음의 기울기로 인해 주어진 F에 대해 스스로 안정화되기 때문에 결과적으로 레이저 발생 장치의 공진기 내부의 펄스 에너지 E_{in} 은 상수값을 갖게 된다. 즉, TPA 효과가 보다 높은 펄스 영향도에 대해 보다 높은 손실을 야기하므로, 효과적으로 SESAM의 포화에 대해 상쇄작용을 가하게 된다. 이러한 현상은 종래의 서보 제어기에서의 음 피드백 효과와 유사하다. 실험에서, 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 항상 $F \gg F_m$ 인 영향도 영역에서 동작한다. 이러한 영역에서는 TPA 효과가 우세하여 반사도 R이 $\Delta R \cong -\Delta F/F_m$ 의 관계를 가지고 음의 기울기를 갖는다.

[0043] $F \gg F_m$ 인 영향도 영역과 관련하여 본 발명에 따른 레이저 발생 장치의 펄스 거동을 실험적으로 조사하기 위해, 도 1에 도시된 레이저 발생 장치(100)에서 출력 결합기(180)로 동작하는 FBG 대신에 도 4에 도시된 소자들로 이루어진 출력 결합기를 설치하였다. 그리고 대체된 부분 반사 출력 결합기의 반사도 ρ 를 0.45까지 증가시켜 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)의 임계 내부 공진 펄스 에너지 E_{th} 를 감소시키고, 제2렌즈(144)의 초점 거리 f_1 을 변화시켰다. 실험에서 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)의 최대 펄스 파워 P_{max} 는 고정시켰다. 도 3의 (a)에는 $E_{th}=5.8$ nJ일 때 제2렌즈(144)의 초점 거리 f_1 의 함수로서, 수학적 식 2에 의해 계산된 영향도 F가 실선으로 표시되어 있으며, 네 개의 실험적인 데이터 A, B, C 및 D가 채워진 사각형으로 표시되어 있다. 이러한 점들에서 SESAM의 반사도 R은 도 3의 (a)의 삽입도에 도시되어 있다.

[0044] 수학적 식 2로부터 고정된 E_{in} 에 대해 SESAM 상의 영향도 F는 제2렌즈(144)의 초점 거리 f_1 이 증가함에 따라 2차식으로 감소한다. 제2렌즈(144)의 초점거리 f_1 이 18.4 mm인 점 A에서, 영향도 F는 0.98 mJ/cm² $\cong 13.7 F_m$ 이다. 이러한 영향도는 지나치게 낮아서 $E_{th}=5.8$ nJ을 가지고 자기 구동 모드 잠금을 시작할 수 없다. 점 B, C 및 D에서, 본 발명에 따른 광섬유 레이저 발생 장치(100)는 단일 펄스 상태에서 5.8 nJ의 동일한 E_{th} 를 가진다.

[0045] 18.4 mm보다 작은 고정된 제2렌즈(144)의 초점 거리 f_1 에 대해, 펄스 파워 P_p 를 증가시키기에 따라 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)는 단일 펄스 상태에서 다중 펄스 상태로 천이한다. 그러나 펄스 파워 P_p 를 원래대로 감소시키면, 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)는 히스테리시스 특성을 나타낸다. 유사하게, 고정된 펄스 파워(예를 들면, 펄스 파워 $P_p=437$ mW)에 대해 제2렌즈(144)의 초점거리 f_1 을 각각 11.0 mm, 7.5 mm 및 3.3 mm로 감소시키기에 따라, 119 ns의 공진 주회 주기 내에서 이에 대응하여 단일 펄스(도 3의 (b)), 두 개의 펄스(도 3의 (c)) 및 열 개의 펄스(도 3의 (d))가 관찰된다. 도 3의 (b)를 참조하면, 일 예로 7.5 mm의 초점 거리 f_1 에 대해 펄스 파워 P_p 에 대한 평균 출력 전력 P_a 의 종속성이 나타난다.

[0046] 한편 수동 모드 잠금은 펄스 파워 P_p 가 203 mW인 점 S에서 발생하며, 이때 평균 출력 전력 P_a 는 27 mW이고 펄스 당 출력 펄스 에너지 E_{out} 은 3.2 nJ이다. 단일 펄스 상태는 펄스 파워 P_p 가 333 mW인 점 T까지 유지되며, 이때

본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)는 평균 출력 전력 P_a 가 50 mW이고 펄스당 출력 펄스 에너지 E_{out} 이 3.0 nJ인 두 개의 펄스 상태에서 진동을 시작한다. 두 개의 펄스 상태는 최대 이용가능한 펌프 파워 P_{max} 인 점 P까지 유지되며, 이때 펄스당 출력 펄스 에너지 E_{out} 은 4.1 nJ이고, POCE는 15 %이다. 펌프 파워 P_p 가 점 P로부터 감소될 때, 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)는 333 mW의 펌프 파워 P_p 에서 두 개의 펄스 상태가 단일 펄스 상태로 복귀하며, 펌프 파워 P_p 가 150 mW가 될 때까지 단일 펄스 상태가 유지되어 히스테리시스 특성을 나타낸다.

[0047] 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)가 다중 펄스 상태에 있을 때, 펄스 열은 배음적인(harmonically) 모드 잠금 특성을 나타낸다. 반복율 f_r 은 기본 반복율 f_{rep} 의 정수 배(즉, $f_r = n f_{rep}$, $n=2,3,4,\dots$)로 증가한다. 도 3의 (c)를 참조하면, 초점 거리 f_1 이 3.3 mm이고, 펌프 파워 P_p 가 437 mW일 때 시간 도메인에서 인 열 개의 펄스 상태에서 동작하는 본 발명에 따른 레이저 발생 장치의 펄스열이 도시되어 있으며, 결과적인 펄스당 출력 펄스 에너지 E_{out} 은 0.86 nJ이다. 그리고 펄스 간격은 $T/10=11.9$ ns로 감소됨을 알 수 있다. 도 3의 (d)에 도시된 대응되는 RF 스펙트럼은 반복율 f_r 이 $10f_{rep}=84$ MHz이다. $n f_r(n=1,2,\dots)$ 에서 비트 노트 크기는 기준 반복율 f_{rep} 및 그의 하모닉 주파수의 비트 노트 크기보다 큰 약 20 dB이다. 이와 같은 20 dB의 하모닉 억압률은 명백하게 하모닉 모드 잠금 상태가 안정화되었음을 나타낸다. 따라서, $T=119$ ns의 펄스 주회 시간 동안 공진기 내부에서 등거리의 n 개의 펄스가 존재한다.

[0048] 도 3을 참조하여 살펴본 바와 같이, SESAM에 대한 영향도 F의 함수로 펄스 에너지를 제어할 수 있으며, 영향도 F는 펌프 파워 P_p , 공진 빔 스팟 크기 ω_1 , 초점 길이 f_1 및 출력 결합기의 반사도 ρ 에 의해 독립적으로 조절될 수 있다. 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)는 단일 펄스 상태에서 대부분의 응용에서 요구되는 가장 높은 펄스 에너지를 방출하며, 단일 펄스 상태는 $P_p \leq P_{max}$ 에 대해 다중 펄스 상태로 천이시키지 않고 출력 결합기의 반사도 ρ 를 감소시키고 초점 길이 f_1 과 펌프 파워 P_p 를 증가시켜 본 발명에 따른 레이저 발생 장치(100)에서 용이하게 구현될 수 있다.

[0049] $P_p \leq P_{max}$ 에 대해 다중 펄스 거동을 보이지 않는 광섬유 레이저 발생 장치를 보여 주는 논리 증명 실험에서, 낮은 결합 손실을 가지는 SMF(170)에 직접적으로 결합된 FBG OC(180)를 사용하여 출력 결합기의 반사도 ρ 를 0.1 만큼 감소시켰다. 그리고 레이저 발생 장치가 최대의 펌프 파워 $P_p=P_{max}=585$ mW에서도 단일 펄스 상태에서 동작하도록 초점 거리를 15.3 mm로 설정하였다. 최종적인 공진기 구조에서, 기본 반복율 f_{rep} 는 공진 길이의 변경으로 인해 7.72 MHz로 약간 조정되었다. 도 4의 (a)를 참조하면, 펌프 파워 P_p 에 대한 평균 출력 전력 P_a 의 종속성이 나타나 있으며, 최대 펌프 파워에서(즉, $P_p=P_{max}$) 단일 펄스 상태를 보인다. 수동 모드 잠금은 증가된 출력 결합율 $1-\rho=0.9$ 로 인해 489 mW의 증가된 펌프 파워를 가지는 점 A에서 발생한다. 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 점 B에서 가장 높은 펄스 에너지를 방출하며, 이때 585 mW의 펌프 파워에서 48 nJ의 평균 출력 에너지를 가진다. 그리고 현재까지 모드 잠금 광섬유 레이저 발생 장치에 대해 보고된 가장 높은 63.3 %의 POCE를 나타낸다. 펌프 파워 P_p 가 점 B로부터 감소하면, 레이저 발생 장치는 다시 히스테리 특성을 나타낸다. 그리고 레이저 발생 장치는 평균 출력 펄스 에너지가 19 nJ인 280 mW(이는 펌프 파워의 상측 임계값 489 mW보다 훨씬 작다)의 훨씬 낮은 펌프 파워를 가지는 점 C에 도달할 때까지 여전히 단일 펄스 상태에서 동작한다.

[0050] 도 4의 (a)에 도시된 중요점들인 A, B 및 C는 도 4의 (b)에 도시된 영향도 F의 함수로 SESAM의 반사율 곡선상에 도시되어 있다. 점 A에서 수동 모드 잠금이 시작되고, 이때 10.1 mJ/cm²($\gg F_m$)의 영향도 F에 대해 반사도 R은 0.63이다. 점 B에서 반사도 R은 12.5 mJ/cm²의 증가된 영향도 F를 가진 SESAM에서의 TPA 효과로 인해 0.58로 감소된다. 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 히스테리시스 특성을 나타내는 점 C로 복귀할 때 훨씬 넓은 단일 펄스 영역을 나타내며, 이때 반사도 R은 0.75이고, 영향도 F는 4.9 mJ/cm²이다. 따라서 출력 결합기의 반사도 ρ 와 초점 거리 f_1 을 고정시키고, 단순히 펌프 파워 P_p 를 변화시켜 19 nJ로부터 48 nJ까지 연속적인 단일 펄스 에너지를 얻을 수 있다. F_{tp} 로 표현하면, 본 발명에 따른 레이저 발생 장치는 $0.11F_{tp} \leq F \leq 0.29F_{tp}$ 의 영향도 범위 내에서(여기서, $\Delta R \cong -\Delta F/F_{tp}$) 단일 펄스 상태로 동작한다.

[0051] 도 6에는 최대 펄스 에너지에서 본 발명에 따른 레이저 발생 장치의 동작 특성이 도시되어 있다. 도 6의 (a)에서 채워진 사각형으로 도시된 광학 스펙트럼은 $\Delta \lambda=5.1$ nm의 반치전폭(full-width at half-maximum : FWHM)을

갖는다. 도 6의 (a)에서, 측정된 전력 스펙트럼 밀도는 좌측 부분의 라만 피크를 제외하면 다음의 수학식으로 표현되는 광학 주파수 도메인에서 철펠 가우시안 펄스 $E(t)$ 에 대한 가우시안 강도 포락선 함수(실선)에 적절하게 일치한다.

수학식 3

$$E(t) = \sqrt{P(t)} \exp \left[-2 \ln(2) \left(1 + i b_0(t) \right) \frac{t^2}{\tau^2} \right]$$

[0052]

여기서, $P(t)$ 는 피크 파워, $b_0(t)$ 는 단위없는 철펠 변수, 그리고 τ 는 펄스의 반치전폭이다.

[0053]

도 6의 (b)와 (c)에는 각각 주파수 도메인에서 펄스열의 RF 스펙트럼과 시간 도메인에서 이들의 궤적이 도시되어 있다. 7.72 MHz에서 기본 RF 비트 노트는 70 dB 이상의 신호대잡음비를 가지며, 도 6의 (b)에 삽입된 그림을 참조하면, 기본 RF 비트 노트는 200 kHz의 대역폭을 갖는 백색 위상 잡음 스펙트럼을 가진다. 높은 반복율 구조의 위상 잡음 스펙트럼과 비교할 때 상대적으로 넓은 위상 잡음 스펙트럼은 상대적으로 긴 광섬유 공진기 내부에서 0.83 kW의 피크 전력을 갖는 레이저 펄스에 의해 얻어지는 다양한 비선형 효과를 야기할 수 있다. 마지막으로, 도 6의 (d)에는 전형적인 간섭측정의 자기상관 신호와 수학식 3에 의한 중첩된 철펠 가우시안 적용 신호가 도시되어 있다. 이들은 0.031 THz/ps의 양 주파수 철펠에 대응하는 58.2 ps의 반치전폭과 478.5의 선형 양 철펠 변수를 보여준다. 펄스열의 TBP는 84 만큼 크며, 전송 격자 쌍을 이용하여 외부적으로 디철펠(dechirp)될 수 있다.

[0054]

[0055]

이상에서 살펴본 바와 같이 본 발명에 따른 에너지 조절가능한 단일 편광 모드 잠금 레이저 발생 장치의 내부 공진 펄스 에너지는 이광자 흡수 효과로 인한 음의 기울기를 가진 SESAM의 반사도에 종속적인 영향도로부터 얻어지는 음의 피드백 구조에 의해 자체적으로 안정화될 수 있다. 또한 펄스 거동을 이용가능한 펄스 파워의 전체 범위 내에서 단일 펄스 상태로 유지함으로써, POCE가 63 %까지 증가될 수 있다. 또한 본 발명에 따른 레이저 발생 장치에 보다 큰 펌프 파워를 적용하면, 증폭기 없이 ~ 500 MHz의 반복율을 가진 OFC 또는 수 MHz의 반복율에서 ~ 0.1 mJ의 펄스 에너지를 갖는 소형의 펄스초 광섬유 레이저 발생 장치를 제조할 수 있을 것으로 예상된다.

[0056]

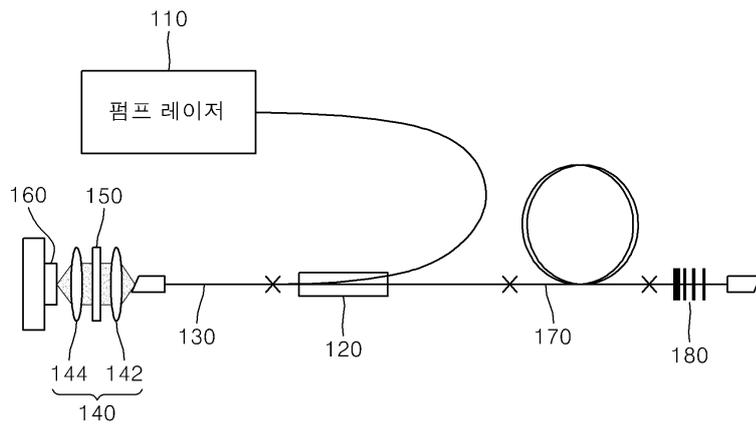
이상의 설명에서 이득물질로서 이테르븀이 도핑된 광섬유를 사용한 레이저 발생 장치의 경우에 광섬유에 도핑되는 이득 물질은 이테르븀(Yb), 에르븀(Er), 토륨(Tm), 홀륨(Ho) 및 이들의 혼합물 중 어느 하나가 될 수 있다. 아울러 본 발명에 따른 레이저 발생 장치에 적용된 새로운 공진 구조는 이테르븀 철펠 광섬유 레이저 발생 장치에만 한정되지 않으며, 이테르븀 철펠 박막 디스크 레이저와 같은 다른 고 에너지 모드 잠금 레이저 발생 장치에도 적용될 수 있다.

[0057]

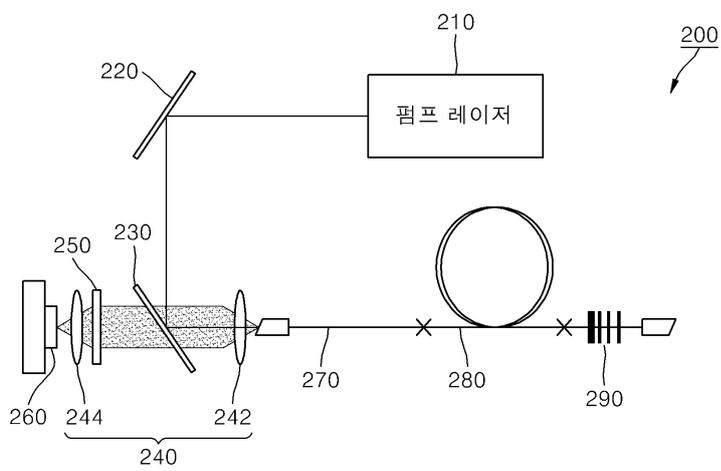
이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대해 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 상술한 특징의 바람직한 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이고, 그와 같은 변경은 청구범위 기재의 범위 내에 있게 된다.

도면

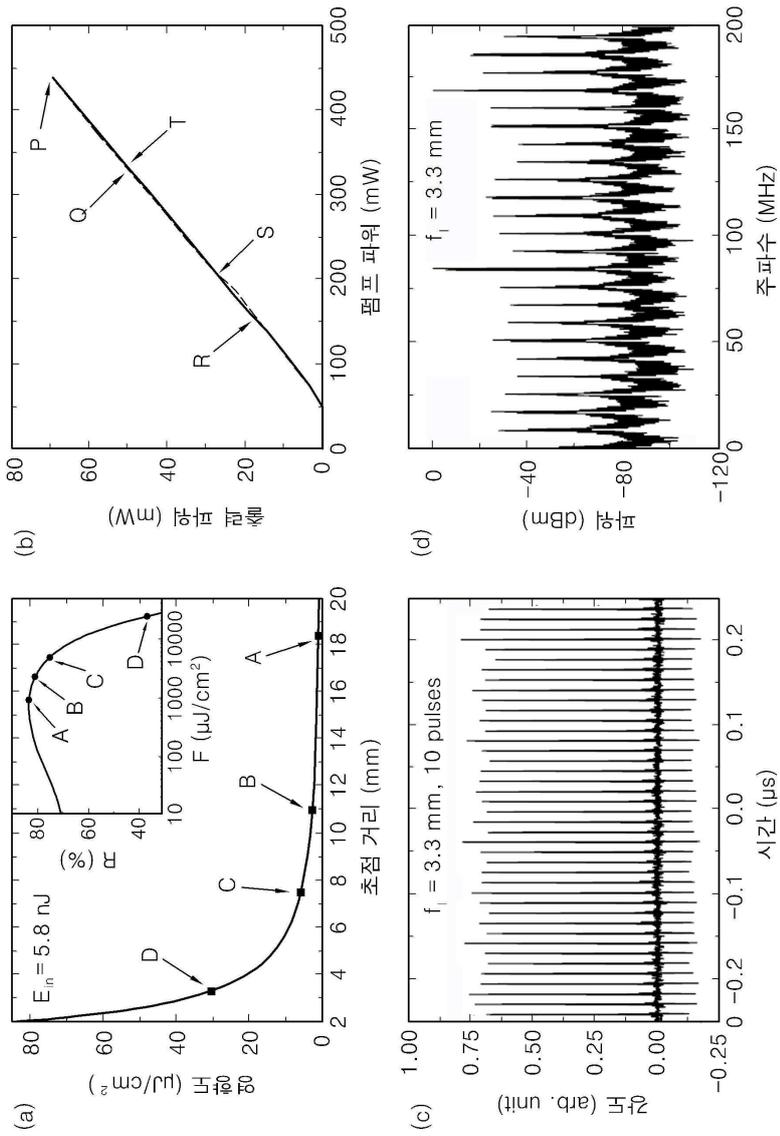
도면1



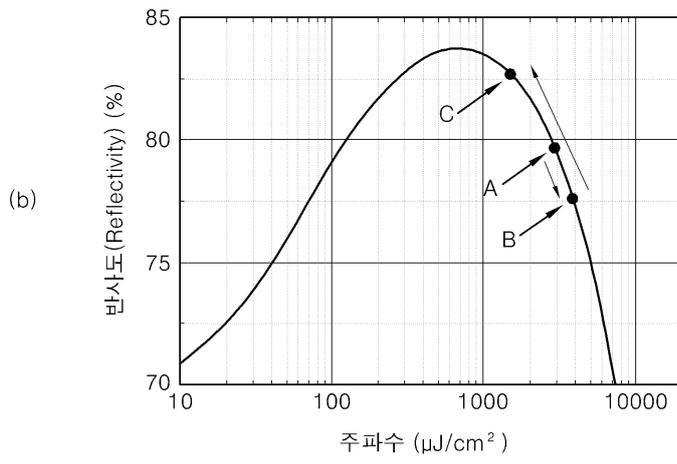
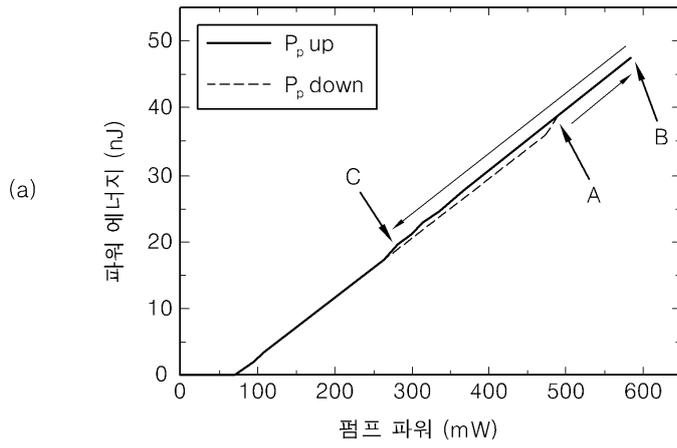
도면2



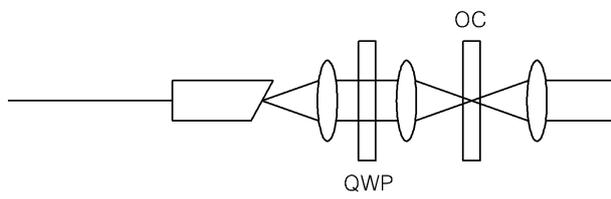
도면3



도면4



도면5



도면6

