



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년01월10일
(11) 등록번호 10-1805139
(24) 등록일자 2017년11월29일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01S 3/10 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-7024991
(22) 출원일자(국제) 2011년02월24일
 심사청구일자 2016년02월18일
(85) 번역문제출일자 2012년09월24일
(65) 공개번호 10-2013-0003000
(43) 공개일자 2013년01월08일
(86) 국제출원번호 PCT/US2011/026031
(87) 국제공개번호 WO 2011/106498
 국제공개일자 2011년09월01일
(30) 우선권주장
 12/712,051 2010년02월24일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

US20060221449 A1*

(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 39 항

심사관 : 조성찬

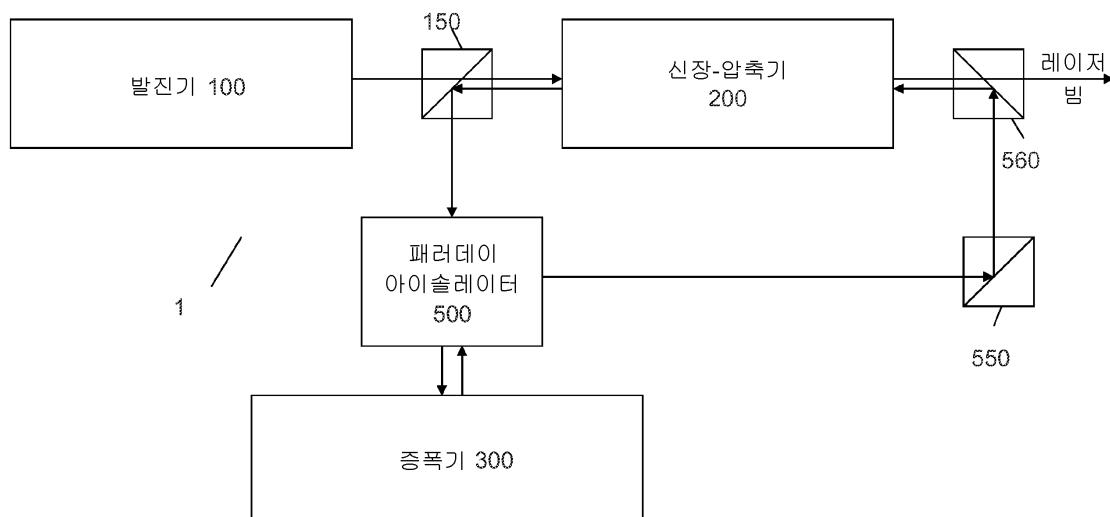
(54) 발명의 명칭 조정가능한 반복률을 갖는 고 전력 펠토초 레이저

(57) 요 약

펠토초 펄스 레이저들을 구성하고 동작시키기 위한 설계들 및 기술들이 제공된다. 레이저 엔진의 일례는, 펠토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기, 상기 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기(stretcher-compressor), 및 증폭기를 포함하고, 상기 증폭기는, 상기 신장된 시드 펄스들을 수신하고, 증폭된

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



신장된 펠스들을 생성하기 위해서 선택된 신장된 시드 펠스들의 진폭을 증폭시키며, 다시 상기 신장-압축기로 증폭된 신장된 펠스들의 레이저 빔을 출력하며, 상기 신장-압축기는, 증폭된 신장된 펠스들의 지속시간을 압축하며, 펜토초 펠스들의 레이저 빔을 출력한다. 증폭기는 상기 증폭된 신장된 펠스들의 분산을 보상하는 분산 제어기를 포함하고, 레이저의 반복률을 절차들 사이에서 또는 스캐닝의 속도에 따라 조정가능하도록 한다. 레이저 엔진은 500 미터 미만의 총 광 경로를 갖도록 소형일 수 있고, 적은 수의 광학 엘리먼트들, 예를 들면 50 개의 광학 엘리먼트들을 가질 수 있다.

(56) 선행기술조사문헌

JP08171104 A*

US06081543 A*

JP2007527731 A*

US05847863 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명세서

청구범위

청구항 1

조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진으로서,

펨토초 시드 펄스(femtosecond seed pulse)들의 빔을 생성하고 출력하는 발진기;

상기 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는(stretch) 신장-압축기(stretcher-compressor); 및
증폭기

를 포함하고,

상기 증폭기는,

상기 신장-압축기로부터 상기 신장된 시드 펄스들을 수신하고,

증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해서 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭시키며,

증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 출력하고,

상기 신장-압축기는,

상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 수신하고,

상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하며, 그리고

1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간을 갖는 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하고,

상기 증폭기는, 50 kHz 내지 1 MHz의 범위의 반복률에서 동작하도록 구성되는 전자-광학적 스위칭가능한 편광판 및 상기 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 야기되는 상기 증폭된 신장된 펄스들의 분산을 감소시키는 분산 보상기를 포함하고,

상기 레이저 엔진은 0.1W보다 큰 출력 전력을 갖는 레이저 빔을 출력하는,

레이저 엔진.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 발진기는 다이오드 펌핑 섬유 발진기(diode pumped fiber oscillator)인, 레이저 엔진.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 발진기는 변환-제한된(transform-limited) 시드 펄스들을 출력하는, 레이저 엔진.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 발진기는 1,000 펨토초 미만의 시드-펄스-지속시간으로 상기 빔을 생성하는, 레이저 엔진.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 발진기는 10 내지 100 MHz의 범위의 시드 펄스 반복률로 상기 빔을 출력하는, 레이저 엔진.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 신장-압축기는 쳐프형 볼륨 브래그 격자(chirped volume Bragg grating)를 포함하는, 레이저 엔진.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 신장-압축기는 광열 굴절형 유리(photothermal refractive glass)를 포함하는, 레이저 엔진.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 신장-압축기는 10배 초과 만큼 상기 펨토초 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는, 레이저 엔진.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 신장-압축기는 상기 펨토초 시드 펄스들의 지속시간을 1,000 내지 200,000 펨토초의 신장된 지속시간으로 신장시키는, 레이저 엔진.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은 튜닝가능한 신장-압축기를 포함하지 않는, 레이저 엔진.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 발진기와 상기 신장-압축기 사이에, 상기 증폭기를 향해 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 재지향(redirect)시키는 $\lambda/4$ 플레이트 및 편광판(polarizer)을 포함하는, 레이저 엔진.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은 패러데이 아이솔레이터(Faraday isolator)를 포함하고,

상기 패러데이 아이솔레이터는,

상기 신장-압축기로부터 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 수신하고,

상기 증폭기를 향해 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 출력하고,

상기 증폭기로부터 상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 수신하고,

상기 신장-압축기의 압축기 포트를 향해 상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 출력하며,

상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔으로부터 상기 발진기를 격리시키는, 레이저 엔진.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 분산 보상기는 상기 증폭기의 광학 엘리먼트에 의해 도입되는 분산에 대해 부호가 반대인 분산을 도입하는, 레이저 엔진.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 분산 보상기에 의해 도입되는 분산은, 상기 분산 보상기 이외에 상기 증폭기의 상기 광학 엘리먼트들에 의해 1회 왕복(roundtrip) 내에서 도입되는 분산과 크기가 동일하고 부호는 반대인, 레이저 엔진.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 분산 보상기는:

처프형 미러, 처프형 섬유, 처프형 격자, 프리즘, 또는 처프형 투파성 광학 엘리먼트 중 적어도 하나를 포함하는, 레이저 엔진.

청구항 16

제1항에 있어서,

상기 증폭기는:

상기 선택된 신장된 시드 펄스들의 상기 진폭을 증폭하는 이득 재료(gain material);

공진 캐비티를 규정하는 2개의 엔드-미러(end-mirror)들; 및

상기 증폭기 내에서 공진 광 경로를 폴딩(fold)하는 2개의 폴딩 미러들

을 포함하고,

상기 2개의 엔드-미러들 및 상기 2개의 폴딩-미러들 중 적어도 하나는 처프형 미러(chirped mirror)인, 레이저 엔진.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 처프형 미러는 상기 증폭된 신장된 펄스들에 음의 분산을 도입하는, 레이저 엔진.

청구항 18

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은,

제1 반복률로, 그리고

이후, 상기 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 동일한 정렬을 이용하여 상이한 제2 반복률로

상기 레이저 빔을 출력하도록 구성되는, 레이저 엔진.

청구항 19

제18항에 있어서,

상기 제1 반복률 및 상기 제2 반복률은 50 kHz 내지 1 MHz의 범위 내에 있는, 레이저 엔진.

청구항 20

제1항에 있어서,

상기 증폭기는, 상기 증폭기의 광학적 셋업을 변경하지 않고 유지하면서 반복률이 변경되는 경우 상기 증폭기에서 상기 증폭된 신장된 펄스들의 왕복들의 횟수를 변경하도록 구성되는, 레이저 엔진.

청구항 21

제1항에 있어서,

상기 증폭기는 1미터 미만의 엔드-미러 대 엔드-미러 폴딩된 광 경로를 갖는, 레이저 엔진.

청구항 22

제1항에 있어서,

상기 증폭기는:

캐비티 덤프형 재생 증폭기(cavity dumped regenerative amplifier), 쳐프형 펄스 증폭기 또는 Q-스위치(Q-switched) 증폭기

중 하나인,

레이저 엔진.

청구항 23

제1항에 있어서,

상기 전자-광학적 스위칭가능한 편광판이 엔드-미러들 사이의 광 경로에 위치되고,

상기 전자-광학적 스위칭가능한 편광판은,

상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 편광-조정 상태; 및

상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 상기 편광을 조정하지 않는 편광-비조정 상태

사이에서 스위칭함으로써 신장된 펄스들을 선택하도록 구성되는, 레이저 엔진.

청구항 24

제23항에 있어서,

5 나노초 미만의 상승 시간으로 상기 편광-비조정 상태로부터 상기 편광-조정 상태로 스위칭하도록 상기 스위칭 가능한 편광판을 제어하는 고전압 전력-스위치를 포함하는, 레이저 엔진.

청구항 25

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은, 1 내지 120초 내에서 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔의 제1 반복률을 제2 반복률로 변경하는, 레이저 엔진.

청구항 26

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은 $1\mu s$ 내지 1초 범위의 변경 시간 내에서 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔의 제1 반복률을 제2 반복률로 변경하는, 레이저 엔진.

청구항 27

제1항에 있어서,

상기 레이저 빔의 펨토초 펄스들은 1 내지 $100 \mu J$ /펄스의 범위의 에너지를 갖는, 레이저 엔진.

청구항 28

제1항에 있어서,

상기 레이저 엔진은 안과 수술 시스템의 일부인, 레이저 엔진.

청구항 29

제1항에 있어서,

상기 분산 보상기는 5,000 내지 20,000 fs^2 의 범위 내에서 그룹 지연 분산을 보상하도록 구성되는, 레이저 엔진.

청구항 30

제1항에 있어서,

상기 조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진은 10% 만큼 더 큰, 레이트-변화-프로토콜(rate-variation-protocol)에 따라 상기 반복률을 조정하도록 구성되는, 레이저 엔진.

청구항 31

조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법으로서,

발진기를 이용하여 1,000 펨토초 미만의 지속시간을 갖는 시드 펄스들의 빔을 생성하는 단계;

펄스 신장기를 이용하여 상기 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 단계;

증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해서 증폭기를 이용하여 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하는 단계;

펄스 압축기를 이용하여 상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 1,000 펨토초 미만으로 압축하는 단계;

50 kHz 내지 1 MHz 범위의 제1 반복률로, 그리고 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 전자-광학적 스위칭 가능한 편광판을 이용하여 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하는 단계;

상기 레이저 엔진의 광학 셋업을 변경하지 않고 상기 반복률을 상기 제1 반복률로부터 50 kHz 내지 1 MHz 범위의 제2 반복률로 변경하는 단계; 및

상기 제2 반복률로, 그리고 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔을 출력하는 단계

를 포함하고,

상기 증폭하는 단계는:

상기 증폭기의 광학 엘리먼트에 의해 야기되는 상기 증폭된 신장된 펄스들의 분산을 감소시키기 위하여 상기 증폭기 내의 분산 보상기를 이용하는 단계를 포함하고,

상기 레이저 엔진은 0.1 W 보다 더 큰 출력 전력을 갖는 레이저 빔을 출력하는,

레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 32

제31항에 있어서,

상기 분산을 감소시키는 단계는:

상기 증폭기 내의 적어도 하나의 쳐프형 미러에 의해 보상 분산을 도입하는 단계

를 포함하고,

상기 보상 분산은 상기 분산 보상기 이외에 상기 증폭기의 모든 광학 엘리먼트들에 의해 왕복마다(per roundtrip) 도입되는 분산과 크기가 동일하고 부호는 반대인, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 33

제31항에 있어서,

상기 반복률을 변경하는 단계는:

상기 증폭기에서의 왕복들의 횟수를 변경하는 단계

를 포함하는, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 34

제31항에 있어서,

상기 신장하는 단계 및 상기 압축하는 단계는 동일한 신장-압축기에 의해 수행되는, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 35

제31항에 있어서,

상기 제1 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하는 단계를 완료한 후에 1 내지 120초 내에서 상기 제2 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하는 단계를 포함하는, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 36

제31항에 있어서,

1 μ s 내지 1초 범위의 변경 시간 내에서 상기 반복률을 상기 제1 반복률로부터 상기 제2 반복률로 변경하는 단계를 포함하는, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법.

청구항 37

조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진으로서,

1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펄스형 광 빔을 생성하는 발진기;

상기 광 빔의 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기; 및

증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해서 상기 신장된 광 펄스들의 진폭을 증폭하고, 증폭기의 광학적 엘리먼트들에 의해 도입되는 분산을 적어도 부분적으로 보상하는 분산 보상기를 포함하는 증폭기

를 포함하고,

상기 신장-압축기는,

상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하고,

레이저 펄스들의 빔을 출력하며,

상기 레이저 엔진은,

50 kHz 내지 1 MHz 범위의 제1 반복률로, 그리고

이후, 상기 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 동일한 정렬을 이용하여, 50 kHz 내지 1 MHz 범위의 제2 반복률로

전자-광학적 스위칭가능한 편광판을 이용하여 상기 레이저 펄스들의 빔을 출력하도록 동작가능하고,

상기 출력되는 레이저 펄스들의 지속시간은 상기 제1 반복률 및 제2 반복률에 대해 1,000 펨토초 미만이고,

상기 레이저 엔진은 0.1W보다 큰 출력 전력을 갖는 레이저 빔을 출력하는,

조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진.

청구항 38

제37항에 있어서,

상기 증폭기는:

상기 증폭기의 엔드-미러들 사이에 스위칭가능한 편광판을 포함하고,

상기 스위칭가능한 편광판은 5 나노초 미만의 상승 시간으로,

상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 상태; 및

상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하지 않는 상태

사이에서 스위칭하는, 조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진.

청구항 39

제37항에 있어서,

상기 레이저 엔진은 60 초 미만의 시간 내에 상기 제1 반복률과 상기 제2 반복률 사이에서 스위칭하는, 조정가능한 반복률을 갖는 레이저 엔진.

청구항 40

삭제

청구항 41

삭제

청구항 42

삭제

청구항 43

삭제

청구항 44

삭제

청구항 45

삭제

청구항 46

삭제

청구항 47

삭제

청구항 48

삭제

청구항 49

삭제

청구항 50

삭제

청구항 51

삭제

청구항 52

삭제

청구항 53

삭제

청구항 54

삭제

청구항 55

삭제

청구항 56

삭제

청구항 57

삭제

청구항 58

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 특허 문헌은 조정가능한 반복률의 고 전력 펨토초 레이저들을 포함하는 펨토초 레이저들에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 오늘날의 점점 더 도전적인 수많은 레이저 응용들에 있어서, 필스당 높은 에너지를 전달하는 보다 짧은 필스들에 대해 계속해서 탐색이 이루어지고 있다. 이러한 특징들은 레이저 응용들을 위해 보다 양호한 제어와 보다 큰 동작 속도를 보장한다. 당해 기술분야에의 진보에 있어서 주목할만한 단계는, 펨토초 레이저 필스들을 출력하는 레이저 시스템들의 출현과 발전이다. 이러한 펨토초 레이저들은 여러 상이한 유형의 안과 수술들을 포함하여 다양한 응용들을 위해 이용될 수 있고, 안과 수술들에서는 이러한 초단 필스들이 양호하게 제어되는 조직변형을 제공할 수 있다.

발명의 내용

[0003] 본 문헌에서는, 펨토초 필스 레이저들을 구성하고 동작하기 위한 설계들 및 기술들이 제공되고, 여기에는 쳐프형(chirped) 필스 증폭을 이용하는 레이저 시스템들의 예들 및 구현들이 포함되며, 이들 중 일부는 적은 수의 광학 엘리먼트들을 갖고, 일부는 고장 빈도가 낮으며, 다른 일부는 적절히 작은 물리적 치수를 갖지만, 다른 일부는 시스템의 실질적인 재조정들 없이 반복률들의 변경을 허용할 수 있고, 몇몇은 열적 렌징(thermal lensing)을 위해 감소된 감도를 갖는다.

[0004] 예를 들어, 레이저 엔진의 몇몇 예들은, 펨토초 시드 필스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기, 상기 시드 필스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기(stretcher-compressor), 및 증폭기를 포함하고, 상기 증폭기는, 상기 신장-압축기로부터 상기 신장된 시드 필스들을 수신하고, 증폭된 신장된 필스들을 생성하기 위해서 선택된 신장된 시드 필스들의 진폭을 증폭시키며, 증폭된 신장된 필스들의 레이저 빔을 출력하고, 상기 신장-압축기는, 상기 증폭된 신장된 필스들의 레이저 빔을 수신하고, 상기 증폭된 신장된 필스들의 지속시간을 압축하며, 1,000 펨토초 미만의 필스 지속시간을 갖는 펨토초 필스들의 레이저 빔을 출력하고, 상기 증폭기는 상기 증폭된 신장된 필스들의 분산을 감소시키는 분산 보상기를 포함한다.

[0005] 몇몇 예들에서, 상기 발진기는 다이오드 펨핑 섬유 발진기이고, 변환-제한된 시드 필스들을 출력한다.

[0006] 몇몇 예들에서, 상기 발진기는 1,000 펨토초 미만의 시드-필스-지속시간으로 상기 빔을 생성한다.

- [0007] 몇몇 구현예들에서, 상기 발진기는 10 내지 100 MHz 및 20 내지 50 MHz 중 하나의 범위의 시드 펄스 반복률로 상기 빔을 출력한다.
- [0008] 몇몇 구현예들에서, 상기 신장-압축기는 쳐프형 볼륨 브래그 격자를 포함한다.
- [0009] 몇몇 구현예들에서, 상기 신장-압축기는 광열 굴절형 유리를 포함한다.
- [0010] 몇몇 구현예들에서, 상기 신장-압축기는 10배 초과 만큼 상기 펨토초 시드 펄스들의 지속시간을 신장시킨다.
- [0011] 몇몇 구현들에서, 상기 신장-압축기는 상기 펨토초 시드 펄스들의 지속시간을 1,000 내지 200,000 펨토초의 신장된 지속시간으로 신장시킨다.
- [0012] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 튜닝가능한 신장-압축기를 불포함한다.
- [0013] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 상기 발진기와 상기 신장-압축기 사이에, 상기 증폭기를 향해 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 재지향시키는 편광판 및 $\lambda/4$ 플레이트를 포함한다.
- [0014] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 패러데이 아이솔레이터를 포함하고, 상기 패러데이 아이솔레이터는, 상기 신장-압축기로부터 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 수신하고, 상기 증폭기를 향해 상기 신장된 시드 펄스들의 빔을 출력하며, 상기 증폭기로부터 상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 수신하고, 상기 신장-압축기의 압축기 포트를 향해 상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 출력하며, 상기 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔으로부터 상기 발진기를 격리시킨다.
- [0015] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는 광학 엘리먼트들을 포함하고, 상기 분산 보상기는 상기 증폭기의 광학 엘리먼트에 의해 도입되는 분산에 대해 부호가 반대인 분산을 도입한다.
- [0016] 몇몇 구현들에서, 상기 분산 보상기에 의해 도입되는 분산은, 상기 분산 보상기 이외에 상기 증폭기의 상기 광학 엘리먼트들에 의해 1회 왕복(roundtrip) 내에서 도입되는 분산과 크기가 본질적으로 동일하고 부호는 반대이다.
- [0017] 몇몇 구현들에서, 상기 분산 보상기는 쳐프형 미러, 쳐프형 섬유, 쳐프형 격자, 프리즘, 또는 쳐프형 투과성 광학 엘리먼트 중 적어도 하나를 포함한다.
- [0018] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 상기 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하는 이득 재료(gain material), 공진 캐비티를 규정하는 2개의 엔드-미러들, 및 상기 증폭기 내에서 공진 광 경로를 폴딩(folding) 하는 2개의 폴딩 미러들을 포함하고, 상기 2개의 엔드-미러들 및 상기 2개의 폴딩-미러들 중 적어도 하나는 쳐프형 미러이다.
- [0019] 몇몇 구현들에서, 상기 쳐프형 미러는 상기 증폭된 신장된 펄스들에 음의 분산을 도입한다.
- [0020] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은, 제1 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하고, 이후, 상기 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업을 이용하여 상이한 제2 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하도록 구성된다.
- [0021] 몇몇 구현들에서, 상기 제1 반복률 및 상기 제2 반복률은 10 kHz 내지 2 MHz, 50 kHz 내지 1 MHz, 또는 100 kHz 내지 500 kHz의 범위들 중 하나의 범위 내에 있다.
- [0022] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은, 수정되지 않은 상기 레이저 엔진이 상기 제1 반복률 및 제2 반복률에 대해 상기 광학 엘리먼트들의 상이한 셋업을 이용하는 경우, 상기 제1 반복률과 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업을 이용하여 상기 제2 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하도록 수정될 수 있다.
- [0023] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 상기 증폭기의 광학적 셋업을 변경하지 않고 유지하면서 반복률이 변경되는 경우 상기 증폭기에서 상기 증폭된 신장된 펄스들의 왕복들의 횟수를 변경하도록 구성된다.
- [0024] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는 1미터 미만의 엔드-미러 대 엔드-미러 폴딩된 광 경로를 갖는다.
- [0025] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 캐비티 덤프형 재생 증폭기(cavity dumped regenerative amplifier), 쳐프형 펄스 증폭기 또는 Q-스위치(Q-switched) 증폭기 중 하나이다.
- [0026] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는 엔드-미러들 사이의 광 경로에 스위칭가능한 편광판을 포함하고, 상기 스위칭 가능한 편광판은, 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 편광-조정 상태, 및 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 본질적으로 조정하지 않는 편광-비조정 상

태 사이에서 스위칭함으로써 신장된 펄스들을 선택할 수 있다.

[0027] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 5 나노초, 4 나노초 또는 3 나노초 중 하나보다 작은 상승 시간으로 상기 편광-비조정 상태로부터 상기 편광-조정 상태로 스위칭하도록 상기 스위칭가능한 편광판을 제어하는 고전압 전력-스 위치를 포함한다.

[0028] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은, 1 내지 120초, 10 내지 60초, 그리고 20 내지 50초 중 하나의 범위 내에서 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔의 제1 반복률을 제2 반복률로 변경한다.

[0029] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 $1\mu\text{s}$ 내지 1초 범위의 변경 시간 내에서 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔의 제1 반복률을 제2 반복률로 변경한다.

[0030] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 적어도 하나의 포커싱 미러, 및 상기 포커싱 미러의 초점에 근접하게 배치되는 레이저 크리스탈을 포함한다.

[0031] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은, 상기 레이저 엔진의 반복률이 10 kHz 내지 2 MHz 범위 내의 제1 값으로부터 10 kHz 내지 2 MHz 범위 내의 제2 값으로 변경되는 경우, 상기 출력되는 레이저 빔의 지름이 10% 및 20% 중 하나보다 작은 비율만큼 변경되거나, 또는 상기 출력되는 레이저 빔의 중심이 상기 빔의 20% 및 40% 중 하나보다 작은 비율만큼 이동하도록 구성된다.

[0032] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 빔의 펨토초 펄스들은 1 내지 100 $\mu\text{J}/펄스$, 10 내지 50 $\mu\text{J}/펄스$, 또는 20 내지 30 $\mu\text{J}/펄스$ 중 하나의 범위의 에너지를 갖는다.

[0033] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 0.1 W, 1 W 또는 10 W 중 하나보다 큰 전력으로 레이저 빔을 출력한다.

[0034] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 안과 수술 시스템의 일부이다.

[0035] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진을 이용하여 레이저 빔을 생성하는 방법은, 발진기를 이용하여 1,000 펨토초 미만의 지속시간을 갖는 시드 펄스들의 빔을 생성하는 단계, 펄스 신장기를 이용하여 상기 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 단계, 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해서 증폭기를 이용하여 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하는 단계, 펄스 압축기를 이용하여 상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 1,000 펨토초 미만으로 압축하는 단계, 10 kHz 내지 2 MHz 범위의 제1 반복률로, 그리고 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하는 단계, 상기 레이저 엔진의 광학 셋업을 본질적으로 변경하지 않고 반복률을 상기 제1 반복률로부터 10 kHz 내지 2 MHz 범위의 제2 반복률로 변경하는 단계, 및 상기 제2 반복률로, 그리고 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펨토초 펄스들의 상기 레이저 빔을 출력하는 단계를 포함한다.

[0036] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭하는 단계는, 상기 증폭기 내의 분산 보상기를 이용하여 상기 증폭기의 광학 엘리먼트에 의해 야기되는 상기 증폭된 신장된 펄스들의 분산을 감소시키는 단계를 포함한다.

[0037] 몇몇 구현들에서, 상기 분산을 감소시키는 단계는, 상기 증폭기 내의 적어도 하나의 쳐프형 미러에 의해 보상 분산을 도입하는 단계를 포함하고, 상기 보상 분산은 상기 분산 보상기 이외에 상기 증폭기의 모든 광학 엘리먼트들에 의해 왕복마다(per roundtrip) 도입되는 분산과 크기가 본질적으로 동일하고 부호는 반대이다.

[0038] 몇몇 구현들에서, 상기 반복률을 변경하는 단계는 상기 증폭기에서 왕복들의 횟수를 변경하는 단계를 포함한다.

[0039] 몇몇 구현들에서, 상기 신장하는 단계 및 상기 압축하는 단계는 동일한 신장-압축기에 의해 수행된다.

[0040] 몇몇 구현들에서, 상기 제1 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하는 단계를 완료한 후에 1 내지 120초, 10 내지 60초, 또는 20 내지 50초 중 하나의 범위 내에서 상기 제2 반복률로 상기 레이저 빔을 출력하는 단계를 포함한다.

[0041] 몇몇 구현들에서, $1\mu\text{s}$ 내지 1초 범위의 변경 시간 내에서 반복률을 상기 제1 반복률로부터 상기 제2 반복률로 변경하는 단계를 포함한다.

[0042] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은, 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펄스형 광 빔을 생성하는 발진기, 상기 광 빔의 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기, 및 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해서 상기 신장된 광 펄스들의 진폭을 증폭하는 증폭기를 포함하고, 상기 신장-압축기는, 상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하고, 레이저 펄스들의 빔을 출력하며, 상기 레이저 엔진은, 10 kHz 내지 2 MHz 범위의 제1 반복률로, 그리고 이후, 상기 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업을 이용하여, 10 kHz 내지 2 MHz 범위의 제2 반복률로 상기 레이저 펄스들의 빔을 출력하도록 동작가능하고, 상기 출력되는 레이저 펄스들의 지속시간은 상기 제1 반복률 및 제2 반복률에 대해 1,000 펨토초 미만이다.

- [0043] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는 상기 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 도입되는 분산을 적어도 부분적으로 보상하는 분산 보상기를 포함한다.
- [0044] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 상기 증폭기의 엔드-미러들 사이에 스위칭가능한 편광판을 포함하고, 상기 스위칭가능한 편광판은 5 나노초, 4 나노초, 및 3 나노초 중 하나보다 작은 상승 시간으로, 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 상태, 및 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하지 않는 상태 사이에서 스위칭한다.
- [0045] 몇몇 구현들에서, 상기 증폭기는, 적어도 하나의 포커싱 미러, 및 상기 포커싱 미러의 초점 근방에 위치하는 이득 크리스탈을 포함한다.
- [0046] 몇몇 구현들에서, 상기 레이저 엔진은 60 초, 1 초 및 10 μ s 중 하나보다 작은 시간 내에 상기 제1 반복률과 상기 제2 반복률 사이에서 스위칭한다.
- [0047] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은, 펜토초 시드 펄스들을 출력하는 발진기, 상기 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장기, 상기 신장된 시드 펄스들을 증폭된 신장된 펄스들로 증폭시키는 증폭기로서, 상기 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 도입되는 상기 증폭된 신장된 펄스들의 분산을 보상하기 위한 분산 보상기를 포함하는 증폭기, 및 상기 증폭된 신장된 펄스들을 수신하고, 상기 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하며, 펜토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하는 압축기를 포함한다.
- [0048] 몇몇 구현들에서, 가변 반복률 레이저 엔진은 Q-스위치 캐비티 덤프형 재생 증폭기를 포함하고, 이러한 증폭기는 2개의 엔드-미러들을 포함하며, 레이저 엔진은 펜토초 레이저 펄스들을 출력하고, 엔드-미러들 사이의 광 경로의 길이는 2 미터 미만이다.
- [0049] 몇몇 구현들에서, 엔드-미러들 사이의 광 경로의 길이는 1 미터 미만이다.
- [0050] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 증폭기로 송신되는 시드 펄스들을 생성하는 발진기를 포함하고, 시드 펄스들의 광자들이 발진기에서 생성되는 지점에서 레이저 엔진이 레이저 펄스들을 출력하는 지점까지의 전체 자유 공간 광 경로 길이는 500 미터, 300 미터, 및 150 미터 중 하나보다 작다.
- [0051] 몇몇 구현들에서, 증폭기의 캐비티의 모든 에지 크기들은 1 미터 또는 0.5 미터 중 하나보다 작고, 증폭기의 캐비티는 증폭기의 모든 광학 엘리먼트들을 하우징한다.
- [0052] 몇몇 구현들에서, 증폭기의 풋프린트는 1m² 또는 0.5m² 중 하나보다 작다.
- [0053] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 쳐프형 볼륨 브래그 격자를 포함하는 신장-압축기를 포함한다.
- [0054] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 증폭기의 광학 엘리먼트에 의해 도입되는 분산을 보상하는 분산 보상기를 포함한다.
- [0055] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 레이징 펄스들의 진폭을 증폭하는 레이저 크리스탈; 및 증폭기 내부의 공진 광 경로를 폴딩하는 2개의 폴딩 미러들을 포함하고, 2개의 엔드-미러들 및 2개의 폴딩 미러들 중 적어도 하나는 쳐프형 미러이다.
- [0056] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 반복률 범위 내의 제1 반복률로 레이저 빔을 출력하고; 이후 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업으로 반복률 범위 내의 제2 반복률로 레이저 빔을 출력하도록 구성된다.
- [0057] 몇몇 구현들에서, 상기 제1 반복률 및 상기 제2 반복률은 10 kHz 내지 2 MHz, 50 kHz 내지 1 MHz, 또는 100 kHz 내지 500 kHz의 범위들 중 하나의 범위 내에 있다.
- [0058] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 60 초, 1 초 및 1 μ s 중 하나보다 작은 시간 내에 제1 반복률이 제2 반복률로 변경될 수 있도록 구성된다.
- [0059] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 엔드-미러들 사이에 스위칭가능한 편광판을 포함하고, 상기 스위칭가능한 편광판은, 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 편광-조정 상태; 및 상기 스위칭가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 본질적으로 조정하지 않는 편광-비조정 상태 사이에서 5 ns, 4 ns, 또는 3 ns 중 하나보다 작은 시간 내에 스위칭한다.
- [0060] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 적어도 하나의 포커싱 엔드-미러; 및 포커싱 미러의 초점에 근접하여 위치하는 레이저 크리스탈을 포함한다.

- [0061] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 펨토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기; 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기; 및 신장-압축기로부터 신장된 시드 펄스들을 수신하고, 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하며; 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 출력하는 증폭기를 포함하며, 신장-압축기는 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 수신하고, 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하며, 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하고, 시드 펄스들의 광자들이 발진기에서 생성되는 지점에서 레이저 엔진이 레이저 펄스들을 출력하는 지점까지의 광 경로 길이는 500 미터보다 작다.
- [0062] 몇몇 구현들에서, 광 경로의 길이는 300 미터 미만이다.
- [0063] 몇몇 구현들에서, 가변 반복률 레이저 엔진은 펨토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기; 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기; 및 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해 선택된 신장된 시드 펄스들의 증폭을 증폭하는 증폭기를 포함하고, 증폭기는 5 ns 미만의 스위칭 시간을 갖는 스위칭 가능한 편광판을 포함하며, 신장-압축기는 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 펨토초 값들로 압축하고, 레이저 엔진은 1m² 미만의 영역을 점유한다.
- [0064] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 수술 레이저 시스템 중 일부이고, 수술 레이저 시스템은 수술 레이저 시스템의 상부 데크 상에 레이저 엔진 및 이미징 시스템을 구비한다.
- [0065] 몇몇 구현들에서, 가변 반복률 레이저 엔진은 펨토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기; 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 통합된 신장-압축기; 및 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하는 Q-스위치 캐비티 덤프형 재생 증폭기를 포함하고, 신장-압축기는 펨토초 레이저 펄스들을 출력하기 위해 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하고, 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 75개 미만이다.
- [0066] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 50개 미만이다.
- [0067] 몇몇 구현들에서, 발진기 이외의 부분들에서 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 50개 미만이다.
- [0068] 몇몇 구현들에서, 발진기 이외의 부분들에서 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 35개 미만이다.
- [0069] 몇몇 구현들에서, 광학 엘리먼트는: 미러, 렌즈, 평행판, 편광판, 아이솔레이터, 임의의 스위칭 가능한 광학 엘리먼트, 굴절형 엘리먼트, 투과형 엘리먼트, 또는 반사형 엘리먼트 중 하나이다.
- [0070] 몇몇 구현들에서, 광학 엘리먼트는 공기로부터 진입하고 공기로 나가는 광을 갖는다.
- [0071] 몇몇 구현들에서, 통합된 신장-압축기는 쳐프형 볼륨 브래그 격자를 포함한다.
- [0072] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 도입되는 분산을 보상하는 분산 보상기를 포함한다.
- [0073] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 공진 캐비티를 규정하는 2개의 엔드-미러들; 및 상기 증폭기 내에서 공진 광 경로를 폴딩하는 2개의 폴딩 미러들을 포함하고, 상기 2개의 엔드-미러들 및 상기 2개의 폴딩-미러들 중 적어도 하나는 쳐프형 미러이다.
- [0074] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 반복률 범위 내의 제1 반복률로 레이저 빔을 출력하고; 이후 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업으로 반복률 범위 내의 제2 반복률로 레이저 빔을 출력하도록 구성되며, 제1 반복률 및 제2 반복률은 10 kHz 내지 2 MHz, 50 kHz 내지 1 MHz, 또는 100 kHz 내지 500 kHz의 범위를 중 하나의 범위 내에 있다.
- [0075] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 1초 미만의 변경 시간 내에 제1 반복률이 제2 반복률로 변경될 수 있도록 구성된다.
- [0076] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 엔드-미러들 사이에 스위칭 가능한 편광판을 포함하고, 상기 스위칭 가능한 편광판은, 상기 스위칭 가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 조정하는 편광-조정 상태; 및 상기 스위칭 가능한 편광판이 상기 증폭된 신장된 펄스들의 편광을 본질적으로 조정하지 않는 편광-비조정 상태 사이에서 5 ns, 4 ns, 또는 3 ns 중 하나보다 작은 시간 내에 스위칭할 수 있다.
- [0077] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 적어도 하나의 포커싱 엔드-미러; 및 포커싱 미러의 초점에 근접하여 위치하는 레이저 크리스탈을 포함한다.

- [0078] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은 펨토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기; 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키는 신장-압축기; 및 신장-압축기로부터 신장된 시드 펄스들을 수신하고, 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하며, 증폭된 신장된 펄스들을 출력하는 증폭기를 포함하며, 신장-압축기는 증폭된 신장된 펄스들을 수신하고, 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하며, 1,000 펨토초 미만의 펄스 지속시간으로 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하고, 발진기 이외의 부분들에서 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 50개 미만이다.
- [0079] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 수는 75개 미만이다.
- [0080] 몇몇 구현들에서, 레이저 시스템을 이용하여 스캐닝하는 방법은, 레이저 엔진을 이용하여 가변 반복률을 갖는 레이저 펄스들을 생성하는 단계; 스캐닝 레이저 전달 시스템을 이용하여 타겟 영역내의 초점 스팟으로 레이저 펄스들을 포커싱하는 단계; 스캐닝 레이저 전달 시스템을 이용하여 타겟 영역 내에서 스캐닝 속도로 초점 스팟을 스캐닝하는 단계; 스캐닝 속도를 변경하는 단계; 및 반복률 제어기를 이용하여 반복률을 변경된 스캐닝 속도에 따라 조정하는 단계를 포함한다.
- [0081] 몇몇 구현들에서, 상기 생성 단계는 발진기에 의해 펨토초 시드 펄스들을 생성하는 단계; 신장-압축기에 의해 시드 펄스들을 신장시키는 단계; 증폭기에 의해 선택된 신장된 시드 펄스들을 증폭된 신장된 펄스들로 증폭하는 단계; 및 신장-압축기에 의해 증폭된 신장된 펄스들을 펨토초 레이저 펄스들로 압축하는 단계를 포함한다.
- [0082] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 타겟 영역 내에서 레이저 생성된 베블들의 밀도를 선택된 값 근방에서 대략적으로 유지하도록 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0083] 몇몇 구현들에서, 베블들의 밀도는 선 밀도, 면적 밀도 또는 부피 밀도 중 하나이다.
- [0084] 몇몇 구현들에서, 반복률을 조정하는 단계는 반복률을 스캐닝 속도에 비례하게 조정하는 단계를 포함한다.
- [0085] 몇몇 구현들에서, 반복률을 조정하는 단계는 1 μ s 내지 1 초 범위의 시간 내에 반복률을 제1 값에서 제2 값으로 조정하는 단계를 포함한다.
- [0086] 몇몇 구현들에서, 초점 스팟을 스캐닝하는 단계는 최소 가속 경로를 따라 초점 스팟을 스캐닝하는 단계를 포함한다.
- [0087] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 스위치백 경로를 따라 초점 스팟을 XY 스캐닝하는 단계; 및 경로의 스위치백 부분에 접근할 때 반복률을 낮추는 단계를 포함한다.
- [0088] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 나선형을 따라 레이저 빔을 스캐닝하는 단계; 및 스캐닝이 나선형의 중심에 접근할 때 반복률을 낮추는 단계를 포함한다.
- [0089] 몇몇 구현들에서, 반복률을 조정하는 단계는, 변화하는 속도를 감지하는 것, 프로세서 또는 메모리로부터 변화하는 스캐닝 속도에 관한 전자 정보를 획득하는 것 중에서 하나에 의해 변화된 스캐닝 속도에 관한 정보를 반복률 제어기에 의해 수신하는 단계 및 변화된 스캐닝 속도에 관한 수신된 정보에 따라 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0090] 몇몇 구현들에서, 가변 반복률 레이저 스캐닝 시스템은 펨토초 시드 펄스들의 빔을 생성 및 출력하는 발진기; 시드 펄스들의 지속시간을 신장시키고 증폭기로부터 증폭된 신장된 펄스들을 수신하며, 증폭된 신장된 펄스들의 지속시간을 압축하고, 반복률로 펨토초 펄스들의 레이저 빔을 출력하는 신장-압축기; 신장-압축기로부터 신장된 시드 펄스들을 수신하고, 증폭된 신장된 펄스들을 생성하기 위해 선택된 신장된 시드 펄스들의 진폭을 증폭하며, 신장-압축기를 향해 증폭된 신장된 펄스들을 출력하는 증폭기; 및 광파괴(photon disruption)의 스팟들을 생성하기 위해서 가변의 스캐닝 속도로 타겟 영역에 레이저 빔의 초점 스팟을 스캐닝하는 스캐닝 광학기기를 포함하며, 레이저 스캐닝 시스템은 미리결정된 밀도 프로파일로 광파괴의 스팟들을 생성하기 위해서 반복률을 변경한다.
- [0091] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 증폭된 신장된 펄스들의 분산을 감소시키는 분산 보상기를 포함한다.
- [0092] 몇몇 구현들에서, 증폭기는 증폭기에서 신장된 펄스들의 편광 평면을 회전시키는 스위칭가능한 편광판을 포함하고, 상기 스위칭가능한 편광판의 상승 시간은 5 ns, 4 ns, 및 3 ns 중 하나보다 작다.
- [0093] 몇몇 구현들에서, 레이저 스캐닝 시스템은 5 ns, 4 ns, 및 3 ns 중 하나보다 작은 상승 시간으로 스위칭가능한 편광판을 스위칭하도록 하는 제어 신호들을 스위칭가능한 편광판에 적용하는 제어 전자기기를 포함한다.

- [0094] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진을 스캐닝하는 방법은 반복률로 펨토초 레이저 펄스들을 생성하는 단계; 광파괴의 스팟들을 생성하기 위해서 타겟 영역 내의 초점 스팟에 레이저 펄스들을 포커싱하는 단계; 스캐닝 속도로 타겟 영역 내의 초점 스팟을 스캐닝하는 단계 및 밀도 프로파일로 광파괴의 스팟들을 생성하기 위해 스캐닝 중에 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0095] 몇몇 구현들에서, 상기 조정하는 단계는 타겟 영역에서 본질적으로 균일하게 유지되는 선 스팟 밀도, 면적 스팟 밀도 및 부피 스팟 밀도 중 하나로 광파괴의 스팟들을 생성하는 단계를 포함한다.
- [0096] 몇몇 구현들에서, 상기 조정하는 단계는 스캐닝 속도의 변화에 따라 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0097] 몇몇 구현들에서, 상기 조정하는 단계는 스캐닝 속도에 비례하여 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0098] 몇몇 구현들에서, 반복률을 조정하는 단계는 1 μ s 내지 1 초 범위의 시간 내에 반복률을 제1 값에서 제1 값으로 조정하는 단계를 포함한다.
- [0099] 몇몇 구현들에서, 상기 생성하는 단계를 발진기에 의해 펨토초 시드 펄스들을 생성하는 단계; 신장-압축기에 의해 시드 펄스들을 신장시키는 단계; 선택된 신장된 시드 펄스들을 증폭기에 의해 증폭된 신장된 펄스들로 증폭하는 단계; 및 신장-압축기에 의해 증폭된 신장된 펄스들을 펨토초 레이저 펄스들로 압축하는 단계를 포함한다.
- [0100] 몇몇 구현들에서, 상기 초점 스팟을 스캐닝하는 단계는 최소 가속 경로를 따라 초점 스팟을 스캐닝하는 단계를 포함한다.
- [0101] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 스위치백 경로를 따라 초점 스팟을 스캐닝하는 단계; 및 경로의 스위치백 부분에 접근할 때 반복률을 낮추는 단계를 포함한다.
- [0102] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 나선형을 따라 레이저 빔을 스캐닝하는 단계; 및 스캐닝이 나선형의 중심에 접근할 때 반복률을 낮추는 단계를 포함한다.
- [0103] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 라인의 끝과 라인의 코너 중 하나를 따라 레이저 빔을 스캐닝하는 단계; 및 라인의 끝과 라인의 코너 중 하나에 스캐닝이 접근함에 따라 반복률을 낮추는 단계를 포함한다.
- [0104] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 스캐닝 속도에 대한 저장된 정보 또는 감지된 정보를 수신하는 단계, 및 스캐닝 속도에 관한 수신된 정보에 따라 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0105] 몇몇 구현들에서, 상기 방법은 타겟 영역에 대한 감지된 정보 또는 이미징된 정보를 수신하는 단계, 및 타겟 영역에 관한 수신된 정보에 따라 반복률을 조정하는 단계를 포함한다.
- [0106] 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진은, 펨토초 시드 광학 펄스들을 출력하는 발진기 및 증폭된 광학 펄스들을 생성하기 위해 시드 광학 펄스들을 증폭하는 증폭기를 포함할 수 있다. 상기 증폭기는, 상기 시드 광학 펄스들을 수신하고 순환(circulate)하도록 커플링되는 광학 캐비티, 및 상기 수신된 시드 광학 펄스들의 광을 상기 광학 캐비티 내로 커플링하는 것을 제어하고, 상기 광학 캐비티 내부의 광을 상기 증폭기의 출력 광으로서 외부로 커플링하는 것을 제어하도록 상기 광학 캐비티에 커플링되는 광학 스위치 디바이스를 포함한다. 상기 광학 스위치 디바이스는 상기 증폭기에 의해 생성되는 상기 증폭된 광학 펄스들의 펄스 반복률을 제어 및 조정하기 위해 상기 광학 캐비티 내부에서 커플링되는 광의 왕복들의 횟수를 제어 및 조정하도록 구성된다. 상기 증폭기는 또한 상기 시드 광학 펄스들을 증폭된 광학 펄스들로 증폭하기 위한, 상기 광학 캐비티 내부의 광학 이득 매체, 및 상기 증폭기에 의해 유도되는 상기 증폭된 광학 펄스들의 분산을 보상하기 위한, 상기 광학 캐비티 내부의 분산 보상기를 포함한다. 상기 레이저 엔진은 상기 증폭된 광학 펄스들을 생성하기 위해, 각각의 시드 광학 펄스가 상기 증폭기 내로 커플링되기 전에 상기 시드 광학 펄스들의 지속시간을 신장시키고, 상기 증폭기에 의해 출력되는 상기 증폭된 광학 펄스들의 지속시간을 압축하기 위한, 상기 증폭기 외부의 하나 또는 그 초과의 광학 엘리먼트들을 포함한다. 상기 레이저 엔진은 상기 증폭기에 유도되는 상기 증폭된 광학 펄스들의 분산을 보상하기 위해 제공되는, 상기 증폭기 외부의 분산 보상 디바이스가 없도록 구성될 수 있다.
- [0107] 또 다른 구현들에서, 펨토초 광학 펄스들을 생성하기 위해 레이저 엔진을 작동시키기 위한 방법은, 각각의 펄스에서 감소된 광 파워를 갖고 신장된 시드 광학 펄스들을 생성하기 위해 펨토초 시드 광학 펄스들을 신장시키는 단계; 및 증폭된 신장된 광학 펄스들을 생성하기 위해 각각의 신장된 시드 광학 펄스의 광 파워를 증폭하도록 광학 증폭기의 광학 캐비티 내로 상기 신장된 시드 광학 펄스들을 커플링하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 광학 증폭기 내에서, 각각의 광학 펄스에 분산 보상을 제공하기 위해 광학 보상기를 이용하고, 상기 광학 보상기는 상기 분산 보상기에 의해 야기되는 분산은 제외하고, 상기 증폭기의 상기 광학 캐비티 내부에서 광의 1회 왕

복 내에서 상기 증폭기에 의해 유도되는 분산과 부호가 반대이고 크기는 실질적으로 동일한 분산을 도입하도록 구성된다. 상기 방법은, 상기 신장된 시드 광학 펠스들의 광을 상기 광학 캐비티 내로 커플링하는 것과 상기 증폭된 신장된 광학 펠스들의 광을 상기 광학 캐비티 외부로 커플링하는 것을 제어하도록 상기 광학 캐비티에 커플링되는 광학 스위치 디바이스를 동작시키는 단계; 상기 레이저 엔진의 출력으로서 압축된 증폭된 광학 펠스들을 생성하도록 상기 광학 캐비티로부터의 상기 증폭된 신장된 광학 펠스들의 펠스 지속시간을 압축하는 단계; 및 상기 증폭기에 의해 유도되는 분산을 보상하기 위해, 상기 증폭기 외부에 위치하는 분산 보상 디바이스를 이용하지 않고, 상기 압축된 증폭된 광학 펠스들의 펠스 반복률을 제어 및 조정하기 위해 상기 광학 캐비티 내의 광의 왕복들의 횟수를 제어 및 조정하도록 상기 광학 스위치 디바이스를 동작시키는 단계를 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0108]

도 1a 및 1b는 고 전력 펨토초 레이저 엔진(1)의 두 가지 실시예들을 도시한다.

도 2는 고 전력 펨토초 레이저 엔진(1)의 실시예를 보다 상세하게 도시한다.

도 3a은 레이저 펠스의 처핑의 개념을 도시한다.

도 3b는 신장기(200') 및 압축기(400)의 일례를 도시한다.

도 3c는 통합된 신장-압축기의 실시예를 도시한다.

도 4는 증폭기(300)의 실시예를 도시한다.

도 5a 및 5b는 레이저 캐비티의 펌핑-이득-덤프 사이클을 도시한다.

도 6a 내지 6d는 일정한 반복률 및 가변의 반복률로 수술 패턴들을 스캐닝하는 것을 도시한다.

도 7a 및 7b는 증폭기(300)에 있어서 레이저 크리스탈(310)의 2가지 상이한 온도들에서 열적 렌징과 관련된 설계 과제들을 도시한다.

도 7c 및 7d는 감소된 열적 렌징을 갖는 증폭기(300)의 2가지 구현들을 도시한다.

도 8은 동작 온도의 함수로서의 빔 광 파워의 의존을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0109]

이전의 펨토초 레이저들에서는, 극단적으로 짧은 펠스 길이가 이러한 펠스들에서 극단적으로 고 전력을 유발한다. 그러나, 이러한 고 전력은 레이저들의 이득 매체를 손상시키는 위협이 되고 있다. 해결책은 처프형 펠스 증폭(CPA)의 형태에 이르렀다. 이러한 기술에서는 펨토초 시드 펠스들이 생성되고, 그 다음에 시드 펠스들의 길이가 피코초 범위까지 10 내지 1000 배만큼 신장되어, 펠스 내의 전력을 극적으로 감소시킨다. 이러한 신장된 펠스들은 손상을 유발하지 않고 이득 매체로 안전하게 증폭될 수 있다. 이러한 증폭 이후 압축이 뒤따르고 증폭된 펠스들의 길이를 펨토초로 다시 압축한다. 이러한 CPA 접근법은 오늘날 수많은 응용예들에 도입된다.

[0110]

그러나, CPA 레이저들은 또한 단점들을 가진다. 전형적으로, 이러한 레이저들은 많은 수의 광학 엘리먼트들을 갖고 이에 대응하여 매우 복잡하다. 이러한 인자들은 오동작의 빈도를 매우 높이고 레이저들이 확실하게 스위칭 온 및 오프될 수 있는 횟수를 줄이게 된다. 또한, CPA 레이저들의 비정상적으로 큰 사이즈는 의료 디바이스들에 이들의 통합되는 것을 점점 어렵게 만드는데, 이러한 의료 디바이스들은 통상 수술 세트들 또는 수술실들의 한정된 공간들 내에서 사용되기 때문이다. 나아가, 상이한 수술들이 펠스들의 반복률의 변경을 요구하는 경우, 이러한 변경은 많은 수의 광학 엘리먼트들의 시간 소모적인 재조정들을 수행할 것을 요구한다. 부가적으로, 열적 렌징은 대부분의 CPA 레이저들의 광학 성능에 실질적으로 영향을 미치고, 이러한 레이저들을 레이저의 동작 전력에 매우 민감하게 만든다. 이러한 민감성은 반복률 변경들에 대해 추가적인 장애물이다.

[0111]

본 문헌에서 기술되는 펨토초 펠스 레이저들을 구성하고 동작시키기 위한 레이저 설계들 및 기술들은 또한, 다른 펨토초 펠스 레이저들에서의 다양한 기술적 이슈들을 다루도록 구현될 수 있다.

[0112]

도 1a는 처프형 펠스 증폭(CPA), 또는 캐비티 덤프형 재생 증폭기(CDRA) 레이저 엔진(1)을 도시하고, 이러한 레이저 엔진(1)은 발진기(100), 신장-압축기(200), 및 광학 증폭기(300)를 포함한다.

[0113]

발진기(100)는 펨토초 시드 펠스들의 빔을 생성 및 출력할 수 있다. 신장-압축기(200)는 이러한 시드 펠스들의 지속시간을 신장시킬 수 있다. 증폭기(300)는 신장-압축기(200)로부터 신장된 시드 펠스들을 수신할 수 있고,

신장된 펠스들의 진폭을 증폭하며, 증폭된 신장된 펠스들의 레이저 빔을 출력할 수 있다. 이러한 증폭된 신장된 펠스들은 신장-압축기(200) 내로 다시 광학적 커플링될 수 있고, 이러한 신장-압축기(200)는 증폭된 신장된 펠스들의 지속시간을 압축하고 펨토초 펠스들의 레이저 빔을 출력할 수 있다.

[0114] 도 1b는 또 다른 CPA 레이저 엔진(1')의 일례를 도시하고, 여기서는 광학 발진기(100') 및 광학 펠스 신장기(200')의 하류측의 광학 증폭기(300')가 별개의 압축기(400) 내로 증폭된 신장된 펠스들을 광학적 커플링 시킬 수 있고, 압축기(400)는 증폭된 신장된 펠스들을 압축하고 펨토초 펠스들의 레이저 빔을 출력할 수 있다.

[0115] 레이저 엔진(1 및 1')에 대한 설명은 많은 제어 기능들 및 방법 단계들을 포함한다. 이러한 기능들 및 단계들은 하나 또는 그 초파의 제어기들, 프로세서들 및 다른 컴퓨터-제어기들에 의해 제어될 수 있다. 이러한 제어기들, 프로세서들 및 컴퓨터-제어기들은 진보된 소프트웨어를 활용하여 서로 상호작용할 수 있다. 설명의 단순화를 위해, 이러한 프로세서들, 제어기들 및 이들의 대응하는 소프트웨어는 본 특허 문헌의 도면들에서 도시되지 않지만, 몇몇 구현들에서는 레이저 엔진들(1 및 1')에 대한 설명의 일부라고 의도된다.

[0116] 본 출원의 예들 중 몇몇은 안과 응용들, 예를 들어 백내장 수술, 피막절개술 또는 각막 수술의 측면에서 기술될 것이지만, 레이저 엔진(1)의 구현들은 매우 다양한 범위의 응용들에서 이용될 수 있고, 여기에는 매우 다양한 안과 수술들, 예를 들어 망막 및 각막 수술뿐만 아니라, 피부과 및 치과 응용들, 상이한 수술 응용들, 및 다양한 재료 기계 응용들이 포함되고, 이러한 재료 기계 응용들은 레이저 광파괴 또는 어떤 다른 레이저 이용 프로세스로 재료의 조각을 성형한다.

[0117] 위에서 기술된 것처럼, 몇몇 쳐프형 펠스 증폭(CPA/CDRA) 레이저 엔진들의 다양한 단점들이 존재한다. 레이저 엔진(1)의 실시예들은 다른 설계 고려사항들뿐만 아니라 다음의 설계 원리들 중 일부 또는 모두를 채용함으로써 이러한 문제들에 대한 해결책들을 제공하도록 구성될 수 있다:

[0118] (1) 많은 레이저들은 많은 수의 광학 엘리먼트들, 예를 들어 1백 이상의 광학 엘리먼트들을 갖고, 이는 이들의 설계를 복잡하고 비용이 많이 들게 한다. 이러한 맥락에서, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 전체적으로 겨우 50개의 광학 엘리먼트들을 가질 수 있고, 발진기(100) 외부에 35개 이하의 광학 엘리먼트들을 가질 수 있다.

[0119] (2) 많은 수의 광학 엘리먼트들 및 이에 대응하는 복잡성을 갖는 레이저들은 오동작의 빈도가 높을 수 있다. 몇몇 CPA/CDRA 레이저들에서, 오동작의 확률은, 레이저가 "사이클링," 즉 30 내지 40회 스위칭 온 및 오프된 후 매우 높아질 수 있다. 이러한 시스템들은, 레이저의 통상적인 동작 중에 실제 오동작이 발생하는 것을 미연에 방지하고자, 30 내지 40회의 스위칭 사이클들 이후 또는 보다 자주 예방적 유지보수를 필요로 할 수 있다.

[0120] 이러한 문맥에서, 상당히 감소된 수의 광학 엘리먼트들 및 새로운 분산 제어 해결책들 때문에, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 통상적인 동작의 기대를 갖고 100, 120 또는 그 이상의 횟수로 사이클링될 수 있어, 요구되는 서비스의 빈도를 크게 줄이고 전체적인 신뢰성을 높일 수 있다.

[0121] (3) 몇몇 CPA/CDRA 레이저들의 큰 물리적 규모 및 이에 대응하는 왕복(roundtrip)들의 긴 지속시간은 이하 기술되는 것처럼 긴 충전 시간으로 이어지고, 따라서 공간 제한된 수술 디바이스들에 이용될 유용성뿐만 아니라 반복률을 제한하게 된다.

[0122] 이러한 문맥에서, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 소형의 공진 캐비티를 가질 수 있고, 이러한 소형의 공진 캐비티는 몇몇 실시예들에서 1 미터보다 짧은 엔드-미러 대 엔드-미러 광 경로를 가질 수 있고, 다른 실시예들에서는 2 미터이다. 이러한 소형화는 또한 레이저 엔진(1)의 높은 반복률에 기여하는 인자이고, 이러한 반복률은 300, 500, 또는 1,000 kHz 까지 될 수 있다.

[0123] 상기 소형화는, 이러한 레이저들의 높은 반복률에도 불구하고, 캐비티 내의 모든 왕복들을 포함하여 광자의 생성 지점에서부터 배출 지점까지 측정된 전체 광 경로가 150 미터만큼이나 낮게 되도록 할 수 있다.

[0124] (4) 몇몇 CPA/CDRA 레이저들은 특정 반복률에서 동작하도록 미세하게 튜닝된다. 이러한 튜닝은 압축기(200/400)에 의한 특정 반복률에서 신장기(200) 및 증폭기(300)의 분산의 보상을 수반한다. 그러나, 응용이 반복률의 변경을 요구하는 경우, 신장기 및 증폭기는 이러한 새로운 반복률에서 상이한 분산을 유발하고, CPA/CDRA 레이저의 미세하게 튜닝된 분산 보상을 틀어지게 한다. 이러한 변경된 분산을 보상하기 위해서, 통상적으로 신장기(200) 및 압축기(200/400)의 광학 엘리먼트들은 시간 소모적인 과정으로 재조정될 필요가 있다. 이러한 재조정은, 안과 수술 절차의 시간 스케일에서, 이러한 CPA/CDRA 레이저들의 반복률을 변경하는 것을 기술적으로 번거롭게 한다. 그러므로, 대부분의 상업적인 안과 CPA 레이저들은 가변의 반복률의 기능을 제공하지 않고, 수술 절차 동안 변경가능한 반복률을 제공하지 않는다.

- [0125] 이러한 문맥에서, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 증폭기(300)에 의해 유발된 레이저 빔의 분산을 줄이고 최소화 할 수 있는 분산 제어기 또는 분산 보상기를 포함할 수 있다. 분산의 이러한 최소화는 레이저 엔진(1)의 광학 엘리먼트들의 시간 소모적인 재조정 없이 반복률의 변경을 허용한다. 그러므로, 분산 제어기를 포함시킴으로써, 시간 민감한 수술 절차 동안 반복률을 변경하는 것이 가능해진다. 예를 들어, 백내장 수술에 대해 제1 반복률을 이용하고 피막절개 또는 망막 수술에 대해서는 제2 반복률을 이용하는 등이다. 잘 알려진 것처럼, 이러한 수술들에서는 시간 엘리먼트가 매우 중요하다.
- [0126] (5) 몇몇 경우들에서, 수술 절차 내에서, 레이저 빔이 반복률을 고정한 경우 불균일한 밀도로 레이저 스팟들을 위치하기 위해 절개-패턴들이 이용될 수 있다. 예를 들면, 스캐닝 패턴 또는 래스터의 전환점 주위에서, 또는 좁아지거나 넓어지는 나선형으로 스캐닝 속도를 낮추는 것이 포함된다.
- [0127] 이러한 문맥에서, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 본질적으로 연속적으로 조정가능한 반복률을 갖고 스캐닝 속도의 변화들을 보상하기 위해 변화하는 스캐닝 속도와 거의 동기화하여 반복률을 조정하도록 구성될 수 있고, 이에 의해 거의 일정한 밀도 또는 미리결정된 밀도 프로파일로 레이저 스팟들의 형성을 허용한다.
- [0128] (6) 부가적으로, 열적 렌징은 몇몇 CPA/CDRA 레이저들의 광학 성능에 악 영향을 미치고, 이에 의해 바람직하지 않게 이러한 레이저들이 레이저 빔의 반복률 및 전력의 변화들에 민감하게 된다. 이러한 문맥에서, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 열적 렌징 보상 기술들을 이용할 수 있고, 이에 의해 이러한 실시예들은 응용된 레이저 빔의 반복률 및 전력의 변화에 매우 둔감하게 된다.
- [0129] 도 2는 레이저 엔진(1)의 특정 구현을 상세하게 도시한다. 발진기(100)는 레이저 엔진(1)에 대한 시드 펄스들을 생성 및 출력할 수 있는 다양한 광원들일 수 있다. 예를 들면, 다이오드 펌핑(pumped) 섬유 발진기들이다. 발진기는 단일 다이오드, 예를 들면 808 nm 파장에서 동작하는 GaAs 다이오드, 또는 매우 다양한 다른 다이오드들을 포함할 수 있다.
- [0130] 섬유 발진기들은 자유 공간 빔 전파에 기초한 발진기들보다 훨씬 작다. 수술 응용들에서, 수술실의 혼잡함이 압박하는 제약인 경우, 레이저 엔진의 공간 규모를 줄이는 것은 매우 소중한 설계 특징이다.
- [0131] 몇몇 예들에서, 발진기는 고 품질의 시드 펄스들을 출력한다. 몇몇 엘리먼트들이 이하 상세하게 기술되는 것처럼 높은 펄스 품질에 기여할 수 있다.
- [0132] (i) 몇몇 실시예들에서, 다이오드는 주파수 안정화 바, 예를 들어 다이오드 내부의 볼륨 브래그 격자를 포함할 수 있다. 이러한 격자들은 낮은 노이즈 및 높은 펄스-대-펄스 안정성을 갖는 펄스들을 제공할 수 있다. 섬유는 Nd 또는 Yb에 의해 도핑된 유리로 형성될 수 있다.
- [0133] (ii) 발진기(100)는 반도체 포화 흡수체 미러 또는 SESAM을 포함할 수 있다. 하나 또는 그 초과의 SESAM들을 이용하면, 생성된 펄스들 내에서 모드들의 가간섭성을 개선하게 되고, 본질적으로 모드-고정 동작에 이르게 된다.
- [0134] 상기 설계 원리들을 갖는 발진기들은 본질적으로 변환-제한된 시드 펄스들을, 예를 들어 가우스 형상(Gaussian shape)으로, 출력할 수 있다. 몇몇 예들에서, 플랫-톱 펄스들도 생성될 수 있다. 펄스-지속시간은 1,000 펌토초(fs) 미만일 수 있다. 몇몇 구현들에서, 펄스 지속시간은 50 내지 1,000 펌토초 범위일 수 있고, 몇몇 다른 실시예들에서는 100 내지 500 펌토초 범위일 수 있다. 시드 펄스 주파수, 또는 반복률은 10 내지 100 MHz의 범위일 수 있고, 다른 실시예들에서는 20 내지 50 MHz 범위일 수 있다. 그렇지만 시드 펄스 주파수를 10 또는 20 MHz 이하로 감소시키는 것은 일련의 설계 도전과제들을 발생시킨다. 이러한 이유 때문에, 대부분의 발진기들은 20 MHz가 넘는 주파수로 동작한다.
- [0135] 시드 펄스들의 빔의 전력은 10 내지 1000 mW의 범위일 수 있고, 다른 실시예들에서는 100 내지 200 mW의 범위일 수 있다.
- [0136] 많은 타이밍 고려사항들에 대해, 발진기(100)가 마스터 클록으로 이용될 수 있다.
- [0137] 신장-압축기(200)는 펄스의 상이한 주파수-성분들에 대해 상이한 지역 시간들을 도입함으로써 시드 펄스들을 신장시킬 수 있다. 다시 말해서, 신장-압축기는 분산 또는 쳐프를 도입할 수 있다.
- [0138] 도 3a는 이러한 쳐프를 상세하게 도시한다. 신장-압축기(200)는 짧은 펄스를 수신할 수 있고, 이러한 펄스의 주파수 콘텐츠, 또는 스펙트럼은 펄스의 대부분의 지속시간에 걸쳐 대략적으로 균일하거나, "백색"이다. 달리 말하면, 펄스의 시간 시에 상이한 주파수 성분들의 진폭은 대략적으로 균일하고 펄스의 지속시간 동안 균일한

채 남아 있다. 신장-압축기(200)는 이러한 "백색" 펄스들의 적색, 녹색 및 청색 성분들에 대해 상이한 지연 시간들을 도입함으로써 펄스 길이를 신장시킬 수 있다. 그러므로, 신장-압축기(200)에 의해 출력된 펄스의 주파수 컨텐츠, 또는 스펙트럼은 시간 의존적이 될 수 있다. 통상적인 관례에 따라서, 선단부에는 적색 주파수들이 지배적이고 후미부는 청색 주파수들이 지배적인 펄스들은 양의 분산 또는 쳐프를 갖는다고 지칭된다.

[0139] 본 상세한 설명은 시간 도메인에서 쳐프를 언급하고, 즉 높은 주파수 성분 및 낮은 주파수 성분의 상대적인 지연을 언급한다. 공간적인 쳐프, 즉 빔 내에서 공간적으로 높은 주파수 성분과 낮은 주파수 성분의 분리는 다양한 추가적인 설계 도전과제들을 발생시키고, 신장기(200') 또는 신장-압축기(200)의 요구되는 기능들에 있지 않다.

[0140] 신장-압축기(200) 또는 신장기(200')는 펄스의 선단부에 적색 컨텐츠를 높이고 펄스의 후미부에 청색 컨텐츠를 높임으로써 최초 백색인 시드 펄스들에 양의 쳐프를 도입할 수 있다. 유사하게도, 비-백색 펄스들 또한 신장-압축기(200) 또는 신장기(200')에 의해 쳐프될 수 있다.

[0141] 신장-압축기(200)는 웨토초 시드 펄스들의 지속시간을 50 내지 1,000 웨토초에서 1,000 내지 200,000 웨토초의 신장된 지속시간, 또는 1 내지 200 피코초 또는 500 피코초까지 신장시킬 수 있다. 신장-압축기(200)는 웨토초 시드 펄스들의 지속시간을 10을 초과하는 비율만큼 신장시킬 수 있다. 몇몇 경우들에서, 신장 비율은 10^2 , 10^3 , 10^4 또는 10^5 보다 클 수 있다. 이러한 각각의 신장 비율은 증폭기(300)에 대해 상이한 설계 기준들을 도입한다.

[0142] 도 3b는 도 1b에 도시된 유형의 레이저 엔진들(1')이 신장기(200') 및 별개의 압축기(400)를 이용할 수 있음을 도시한다. 신장기(200')는 제1 격자(201), 렌즈(202), 제2 격자(203), 및 미러(204)를 포함할 수 있다. 짧은 펄스(211)가 신장기(200')에 진입하는 경우, 제1 격자(201)는 상이한 주파수 성분들을 상이한 방향으로 굴절시킬 수 있다. 제1 격자(201)를 벗어날 때, 발산하는 광선들은 렌즈(202)로 전파될 수 있고, 제2 격자(203)로 재지향될 수 있다. 몇몇 실시예들은 렌즈(202) 대신에 2개의 렌즈들을 이용할 수 있다. 제2 격자(203)는 제1 격자(201)와 일정 각도를 이루고 상이한 주파수 광선들이 발산하는 방향으로 전파되기 때문에, 상이한 주파수 성분들은 상이한 거리를 이동하고, 이렇게 이동하기 위해 상이한 시간을 요하게 된다.

[0143] 예를 들어, 도 3b의 신장기(200')에서, 스펙트럼의 청색 영역의 주파수를 갖는 성분들은 적색 영역의 성분들보다 더 긴 거리를 이동하고, 입사되는 짧은 펄스의 적색 성분에 비해 지연을 획득한다. 본 명세서에서는 "청색" 및 "적색"이라는 용어는 예시적이고 상대적인 방식으로 사용된다. 이러한 용어들은 각각 더 짧은 파장 및 더 긴 파장을 갖는 펄스 스펙트럼의 성분들을 지칭한다. 특정 구현들에서, 레이저 평균 파장은 1000 내지 1100 nm 내에 있고, 펄스의 대역폭은 2 내지 50 nm의 범위일 수 있으며, 몇몇 경우들에서는 5 내지 20 nm의 범위일 수 있다. 이러한 예에서, 펄스 전체의 스펙트럼이 적외선 영역에 있다. 이러한 예에서, "청색" 및 "적색"이라는 용어는 각각 펄스의 대역폭 내에서 더 짧은 파장 및 더 긴 파장을 갖는 적외선 스펙트럼의 부분들을 지칭한다.

[0144] 제2 격자(203)의 기능들은 쳐프의 부분적인 제어, 즉 미러(204)에 의한 반사에 적합하게 되도록 빔을 본질적으로 평행한 빔으로 복구하는 것뿐만 아니라 적색 성분에 대한 청색 성분의 지연의 제어를 포함한다. 미러(204)는 주파수-분리된 평행 광선들을 반사하고, 이러한 광선은 그 후 제2 격자(203), 렌즈(202) 및 제1 격자(201)를 통해 광 경로를 되돌아간다. 펄스가 제1 격자(201)를 떠날 때까지는, 펄스의 청색 성분이 상당히 더 긴 거리를 나아가고 따라서 적색 성분보다 뒤쳐진다.

[0145] 이러한 지연은 출력된 펄스에 적어도 3가지 영향을 미친다: (i) 펄스 길이가 상당히 더 길어지고, (ii) 상이한 주파수 성분들의 진폭들이 시간상으로 서로에 대하여 시프트되어, 적색 성분들을 펄스의 선단 에지로 시프트시키고, 청색 성분들을 후미 에지로 시프트시키거나, 또는 그 역으로 시프트하고, (iii) 펄스의 전체 에너지가 더 긴 펄스 길이에 걸쳐 분산되어, 출력된 펄스의 광 파워를 감소시킨다. 몇몇 경우들에서, 펄스 지속시간은 100 배, 1000배 또는 그 이상으로 신장될 수 있고, 이에 대응하여 파워도 100배, 1000배 또는 그 이상으로 감소될 수 있다. 요약하면, 신장-압축기(200) 또는 신장기(200')는 펄스를 신장시키고, 양의 쳐프를 도입하며, 이에 의해 펄스의 파워를 실질적으로 감소시킬 수 있다.

[0146] 위에서 기술된 것처럼, 펄스의 피크 파워를 감소시키는 것은, 이후의 증폭기(300)의 캐비티 광학기기가 극도로 높은 파워를 갖는 펄스들에 노출되지 않아 빔에 의해 손상되는 것을 피하기 때문에, CPA/CDRA 레이저들의 유리한 양상이다.

[0147] 도 3b는 또한 압축기(400)의 예를 도시하고, 압축기(400)는 제3 격자(205), 제4 격자(207) 및 미러(208)를 포함할 수 있다. 몇몇 예들은 이러한 격자들 사이에 어떠한 렌즈도 갖지 않지만, 다른 예들을 하나 또는 두 개의

렌즈들을 가질 수 있다. 제3 격자(205)는 또한 신장기(200')의 제1 격자(201)와 유사하게 펠스 스펙트럼의 상이한 성분들을 상이한 방향들로 지향시킨다. 제4 격자(207)는 또한 제2 격자(203)와 유사하게, 이의 배향을 통해 청색 성분 및 적색 성분의 상대적인 지연들을 부분적으로 제어한다. 그러나, 제4 격자(207)는 이제 제2 격자(203)와 반대로 배향되어 있기 때문에, 청색 성분들의 광 경로는 이제 더 짧아, 음의 쳔프를 발생시킨다. 이러한 음의 분산은 신장된 펠스의 청색 성분이 적색 성분들을 따라잡을 수 있게 하고, 증폭된 신장된 펠스들의 전체 지속시간을 수백 피코초에서 수백 펨토초로 단축한다. 별개의 신장기(200') 및 압축기(400)를 이용하는 설계들은 도 1b의 레이저 엔진(1')의 실시예들이다.

[0148] 도 3b는 또한, 별개의 신장기(200') 및 압축기(400)를 갖는, 도 1b의 설계들의 두 가지 민감한 양상들을 도시한다.

[0149] (i) 첫째로, 신장기(200'), 증폭기(300) 및 압축기(400)는 서로 미세하게 튜닝되어, 압축기(400)가 신장기(200')에 의해 유발된 신장 및 증폭기(300)에 의해 유발된 이후의 분산을 고도의 정확도로 원상복귀시킬 수 있게 될 필요가 있다. 그러므로, 렌즈(202)의 위치 및 제1 내지 제4 격자(201-207)의 배향을 설정하는 것은, 증폭된 신장된 펠스들의 분산을 보상하고 이러한 펠스들을 다시 펨토초 펠스들로 압축하기 위해 고도의 정확성을 요할 수 있다. 그리고 물론, 고도의 정확도 조정들은 섭동들에 상당히 민감하다: 온도, 왕복들의 수 및 기계적인 응력의 작은 변화들도 정확도 조정을 약화시킬 수 있고, 도 1b의 아키텍처를 갖는 레이저 엔진(1')의 유지보수 및 재-교정을 요할 수 있다.

[0150] (ii) 몇몇 복잡하거나 다중-단계 절차들에 있어서, 반복률의 변경이 바람직할 수 있다. 그러나, 반복률의 이러한 변화는 통상 출력된 펠스들을 최적화하기 위해서 왕복들의 수의 변경이 수반된다. 차례로, 왕복들의 수의 변경은 종종 증폭기(300)에 의해 야기되는 합성된 분산뿐만 아니라 열적 렌즈의 변화를 유발한다. 그러므로, 반복률 및 왕복들의 수의 변경은 신장, 분산 및 압축의 주의 깊게 교정된 밸런스를 틀어지게 할 수 있다.

[0151] 이러한 변경들에 대응하기 위해서, 도 3b의 화살표들로 표시된 것처럼, 레이저 엔진(1')의 몇몇 구현들은 렌즈(202)의 위치, 격자들(201, 203, 205, 및 207) 중 몇몇의 위치 또는 배향, 미러들(204 및 208)의 위치, 또는 하나 또는 그 초파의 미러들을 이동시킴으로써 빔이 렌즈(202)와 충돌하는 위치를 변경시킴으로써 재교정될 수 있을 것이다. 말할 필요도 없이, 이러한 변경들은 통상적으로, 신증하고 종종 반복적인 기계적 조정들 및 정확도 교정을 요하며, 이를 모두는 시간 소모적인 간섭들이다.

[0152] 느린 재교정은 펠스 반복률의 시의적절한 변경이 필요한 응용들에서 문제를 발생시킬 수 있다. 이는 시간이 중요한 요인인 응용들, 예를 들어 안구 운동들을 제어하는 환자의 능력이 90초까지 멀어질 수 있는 안과 수술 응용들 중에, 특히 허용되지 않을 수 있다. 이러한 모든 이유들 때문에, 대부분의 레이저 엔진들은 변경가능한 반복률의 기능을 제공하지 않는다.

[0153] 부가적으로, 레이저 엔진(1')에서 신장기(200')는 압축기(400)와 별개이고, 이들 모두는 다수의 격자들 및 렌즈들을 포함하기 때문에, 도 1b의 유형의 레이저 엔진(1')의 신장기 및 압축기의 공간적 범위는 통상 공간적으로 상당히 넓다.

[0154] 교정 시간을 줄일 뿐만 아니라, 신장기(200') 및 압축기(400)의 공간적인 풋프린트를 감소시키기 위해, 레이저 엔진(1')의 몇몇 구현들에서, 신장기(200') 및 압축기(400)는 하나 또는 그 초파의 광학 엘리먼트들을 공유할 수 있다. 몇몇 경우들에서, 이들은 격자를 공유할 수 있고, 예를 들면 제1 격자(201) 및 제3 격자(205)가 동일해 질 수 있다.

[0155] 몇몇 다중 폴딩된 예들에서, 신장기(200')의 2개의 격자들은 동일한 물리적 격자이고, 렌즈들 및 미러들은 상이한 통과들 동안 상이한 방향들로부터 동일한 격자 상으로 빔을 지향시킨다. 몇몇 다중 폴딩된 예들에서, 신장기(200)의 2개의 격자들 및 압축기(400)의 2개의 격자들의 모든 기능들은 하나의 공유된 격자에 의해 수행될 수 있다.

[0156] 도 3c는 도 1a의 실시예의 신장-압축기(200)의 예를 도시하고, 이는 이러한 도전과제들에 대한 확고한 해결책을 제공한다. 도 3c의 신장-압축기(200)는 신장 및 압축 기능들을 통합하고, 따라서 도 1a의 레이저 엔진(1)의 실시예에서 채용될 수 있다. 도 3c의 예에서 구현된 것과 같은 이러한 신장-압축기(200)는 쳔프형 볼륨 브래그 격자(CVBG)이다. 이러한 CVBG는 층들의 스택, 예를 들어 광열 굴절(PTR) 유리에서 층들의 위치에 따라 변화하는 격자 주기 및 적합한 굴절률을 갖는 층들의 스택일 수 있다. 이러한 설계에서, 브래그 공진 조건은 펠스의 상이한 스펙트럼 성분들에 대해 상이한 위치들에서 발생한다. 따라서, 상이한 스펙트럼 성분들은 상이한 위치들에서 반사되고, 펠스 내에서 상이한 시간 지연들을 획득한다.

- [0157] 도 3c의 예에 도시된 것처럼, 짧은 "백색" 펄스(211)가 신장-압축기(200)에 진입할 때, 적색 주파수 성분들은 보다 넓은 충 간격들 또는 격자 주기들을 갖는 가까운 영역들로부터 굴절되는데, 이는 이들의 파장이 더 길어서 이러한 가까운 영역들에서 브래그 반사 조건들을 충족하기 때문이다. 대조적으로, 더 짧은 파장을 갖는 청색 주파수 성분들은 격자의 보다 먼 영역들로부터 복귀한다. 청색 성분들이 보다 긴 광 경로를 진행하기 때문에, 이들은 적색 성분들에 비해 지연을 획득한다. 따라서, 입력된 짧은 백색 펄스(211)는 이러한 CVBG 신장-압축기(200)에 의해 더 길게 신장된 펄스(212)로 신장된다. 이러한 특정한 예에서, 청색 성분들이 적색 성분들에 비해 지연되기 때문에, 신장된 펄스(212)는 양의 쳐프를 발생시킨다. 다른 구현들은 음의 쳐프를 생성하는 CVGB를 가질 수 있고, 이는 청색 성분들에 비해 적색 스펙트럼 성분들을 지연시킨다.
- [0158] 이러한 CVBG 신장-압축기(200)는 또한 어떠한 귀찮은 미세 튜닝 없이도 높은 정확도로 증폭된 신장된 펄스들(213)을 압축할 수 있는데, 이는 증폭기(200)에 의한 증폭 이후에, 신장된 펄스들이 반대쪽 단부, 또는 압축기 포트로부터 동일한 CVBG 신장-압축기(200)로 주입되기 때문이다. 신장된 펄스가 반대쪽 단부로부터 CVBG 신장-압축기(200)에 진입할 때, 이의 적색 성분들은 청색 성분들이 신장 단계 중에 지연된 것과 동일한 정도로 지연되어, 원래 짧은 길이의 펄스를 복원하게 된다. 그러므로, 이러한 신장-압축기(200)는 신장 동안 도입된 분산을 매우 효율적으로 보상하고 적절하게 압축된 증폭된 펄스(214)를 출력할 수 있다.
- [0159] 분리된 신장기(200') 및 압축기(400)를 갖는 레이저 엔진들(1')의 특정 양상들에 비하여, 레이저 엔진(1)은 이동하는 광학 엘리먼트를 가지지 않기 때문에 이동하는 광학 엘리먼트들의 정확한 정렬에 고도로 민감하지는 않고, 따라서 동작 온도의 변화들 또는 기계적인 섭동들에 대하여 현저한 강건함을 보여주고, (ii) 증폭기(300)의 신규한 설계가 식 (1) 및 (2), 그리고 도 5a 및 5b와 관련하여 더 설명하는 것처럼 왕복들의 수와 관련하여 부가적인 분산을 유도하지 않기 때문에, 레이저 엔진(1)은 반복률이 변경될 때 광학 엘리먼트들 및 셋업의 민감한 재교정 및 재정렬들을 요하지 않는다. 이러한 속성들은 반복률의 신속한 변경 또는 시의적절한 변경이 중요한 응용들에서 레이저 엔진(1)의 이용을 가능하게 한다.
- [0160] 위에서 기술된 것과 상이한 다른 설계들에서, 증폭기(300)는 부가적인 분산을 도입할 수 있다. 이러한 설계들에서, 신장-압축기(200)의 통합된 아키텍처는, 압축기가 신장기의 분산뿐만 아니라 증폭기(300)의 추가적인 분산까지 압축하기 때문에, 재조정 기능이 보충될 수 있다. 이러한 부가된 태스크는 압축기 기능과 관련하여 튜닝 가능한 블록을 구현하는 것을 요할 수 있다.
- [0161] 도 2로 복귀하면, 레이저 엔진(1)은 효율적인 편광 빔 스플리터(150)를 더 포함할 수 있다. 빔 스플리터(150)는 발진기(100)와 신장-압축기(200) 사이에 편광판 및 $\lambda/4$ 플레이트를 포함할 수 있다. 다른 실시예들에서, 빔 스플리터(150)는 박막 편광기일 수 있다. 이러한 조합(150)은 시드 펄스들을 발진기(100)로부터 신장-압축기(200)로 통과하게 할 수 있지만, 신장-압축기(200)로부터 되돌아오는 신장된 펄스들을 증폭기(300)를 향해 재지향시키는데, 이는 두 번째 통과(double passing)할 때 $\lambda/4$ 플레이트가 90도 만큼 펄스들의 빔의 편광 평면을 회전시키기 때문이다. 편광판은 시드 펄스들의 편광 방향에 투과성이 있지만, 펄스들이 두 번째로 $\lambda/4$ 플레이트를 가로지른 후, 신장된 펄스들의 90도 회전된 편광 평면에 대해 반사성이 있다.
- [0162] 몇몇 실시예들에서, 레이저 엔진(1)은 빔 스플리터(150)와 증폭기(300) 사이의 광 경로에 패러데이 아이솔레이터(500)를 포함할 수 있다. 패러데이 아이솔레이터(500)의 기능들은, 레이저 빔의 높은 파워에 의한 발진기(100)의 손상을 방지하도록 증폭된 빔으로부터 발진기(100)의 격리를 포함할 수 있다. 이러한 패러데이 아이솔레이터(500)는 빔 스플리터(150)로부터 신장된 시드 펄스들을 수신하고, 증폭기(300)를 향해 신장된 시드 펄스들을 송신하며, 증폭기(300)로부터 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 수신하고, 편광판들(550 및 560)을 통해 신장-압축기(200)를 향해 증폭된 신장된 펄스들의 레이저 빔을 출력할 수 있다.
- [0163] 패러데이 아이솔레이터(500)는 증폭기(300)가 펄스들을 수신한 것과 동일한 광 경로를 통해 증폭된 펄스들을 출력하는 실시예들에서 유용할 수 있는데, 이는 증폭된 펄스들이 시드 펄스들보다 수 배 또는 수 천배 더 큰 파워 또는 세기를 종종 갖기 때문에 단순한 재지향 광학 기기는 격리 기능을 위해 상당히 부적합할 수 있기 때문이다. 단순한 재지향 광학 기기가 이러한 증폭된 펄스들 중 단지 일부만을 통과시키더라도, 송신된 펄스들은 여전히 발진기(100)를 손상시킬 만큼 충분히 강력하다.
- [0164] 몇몇 구현들에서, 패러데이 아이솔레이터(500)는 증폭기(300)로부터의 레이저 빔 중 1/10,000보다 작은 부분을 발진기(100)를 향해 통과시키도록 구성될 수 있다. 동일한 격리 기능이 감쇠의 측면에서 포착될 수 있다: 패러데이 아이솔레이터는 증폭된 레이저 빔을, 예컨대 40 dB 또는 몇몇 구현들에서 50 dB만큼 감쇠시킬 수 있다.
- [0165] 패러데이 아이솔레이터, 또는 편광 의존 아이솔레이터는 3개의 부분들을 포함할 수 있다: 수직으로 편광된 입력

편광판, 패러데이 회전자, 및 45도로 편광된 출력 편광판 또는 분석기.

[0166] 순방향으로 진행하는 빛은, 아직 그 방향으로 편광되지 않은 경우, 예를 들어 입력 편광판에 의해 수직으로 편광될 수 있다. (여기서, 편광 평면은 전기장 벡터가 놓여 있는 평면을 지칭한다. 나아가, "수직"은 단지 관례 또는 기준 평면을 설정한다. 다양한 실시예들에서 실제 편광 평면은 다른 특정 방향들로 배향될 수 있다.) 패러데이 회전자는 빔의 편광 평면을 약 45도 만큼 회전시키고, 이러한 평면을 분석기의 편광 평면과 정렬시키며, 그 다음에 이러한 분석기는 편광 평면의 추가적인 회전 없이 빛을 송신하게 된다.

[0167] 증폭기(300)로부터 복귀하는 증폭된 펄스들과 같이 역방향으로 진행하는 빛은 분석기를 벗어난 후 기준 수직 평면에 대하여 45도로 편향된다. 패러데이 회전자는 다시, 약 45도 만큼 편광을 회전시킨다. 그러므로, 입력 편광판을 향해 패러데이 회전자에 의해 출력되는 빛은 수평으로 편광된다. 입력 편광판이 수직으로 편광되어 있으므로, 수평으로 편광된 빛은 발진기(100)까지 전송되는 대신, 거의 완전하게 입력 편광판에 의해 반사될 것이다. 따라서, 패러데이 아이솔레이터(500)는 높은 효율로 고 에너지 증폭된 레이저 펄스들로부터 발진기(100)를 보호할 수 있다.

[0168] 패러데이 회전자는 통상적으로, 광축 방향으로 향하는 자기장을 생성함으로써 그 기능을 달성한다. 패러데이 회전자들은 이러한 기능을 달성하기 위해 영구 자석들을 포함한다.

[0169] 패러데이 회전자들에 이용되는 광학 재료들은 통상적으로, 높은 베르데 상수, 낮은 흡수 계수, 낮은 비선형 굴절률 및 높은 손상 임계값을 갖는다. 또한, 셀프-포커싱 및 다른 열 관련 영향들을 방지하기 위해서, 광 경로는 통상 짧다. 700 내지 1100 나노미터 범위에 대해 가장 흔히 사용되는 2가지 재료들은 테르븀 도핑된 붕규산 염 유리 및 테르븀 갈륨 가넷 결정(TGG)이다.

[0170] 증폭된 펄스들이 진입한 것과 동일한 광 경로를 통해 증폭기(300)가 증폭된 펄스들을 출력하지 않는 레이저 엔진(1 또는 1')의 실시예들은, 패러데이 아이솔레이터(500)를 채용할 필요가 없을 수도 있다.

[0171] 도 2 및 4는 패러데이 아이솔레이터(500)로부터 전송된 빛이 증폭기(300)로 진입할 수 있음을 도시한다. 증폭기(300)는 엔드-미러들(321 및 322) 사이에서 왕복하는 신장된 시드 펄스들을 증폭하기 위해 레이저 크리스탈, 또는 이득 매체(310)를 포함할 수 있다. 몇몇 증폭기들(300)은 폴딩된 광 경로(또는 "z-캐비티")를 포함할 수 있고, 이는 공진 캐비티의 공간적 범위를 줄이기 위해 폴딩된 미러들로 레이저 빔을 재지향시킨다. 도 4에서 증폭기(300)는 4개의 미러들을 가진다: 공진 캐비티를 규정하는 2개의 엔드-미러들(321 및 322) 그리고 2개의 폴딩 미러들(323 및 324). 몇몇 예들에서, 광 경로는 그 자체로 폴딩되어 교차하는 패턴으로 보일 수 있다. 보다 많은 폴딩 미러들을 이용하면, 광 경로를 보다 소형의 공간으로 폴딩함으로써 증폭기(300)의 크기를 훨씬 더 줄일 수 있지만, 부가적인 미러들은 오정렬의 가능성 및 가격을 높인다.

[0172] 레이저 크리스탈(310) 및 미러들(321-324)에 부가하여, 증폭기(300)는 스위칭가능한 편광판(330)을 포함할 수 있고, 이러한 스위칭가능한 편광판(330)은 캐비티 내에서 펄스들에 대한 입력/출력 포트로서 기능하는 박막 편광기(340) 뿐만 아니라, 증폭기(300)의 품질 계수(Q), 따라서 증폭 기능을 제어한다. 박막 편광판(340)은 제1의 미리결정된 편광을 갖는 빛을 반사시키지만, 제1의 미리결정된 편광에 직각인 제2 편광을 갖는 빛은 투과시키는 편광-선택적 디바이스의 특정 예시이다. 스위칭가능한 편광판(330)은 이를 통과하는 빛의 편광을 회전시키지 않는 제1 동작 상태와, 부가된 제어 신호에 응하여 빛의 편광을 회전시키는 제2 동작 상태 사이에서 스위칭하는 편광 디바이스일 수 있다. 박막 편광판(340) 및 스위칭가능한 편광판(330)의 조합은, 이하 설명하는 것처럼, 패러데이 회전자(500)가 언제 증폭기(300)로 커플링되는지, 그리고 증폭기(300) 내에서 증폭된 펄스들이 언제 증폭기로부터 커플링 해제되는지를 제어하기 위해 이용될 수 있다.

[0173] 도 4의 박막 편광판(340)과 스위칭가능한 편광판(330)의 이러한 조합은, 증폭기(300)의 공진 캐비티에 대한 광학 스위치의 일례이다. 다른 설계들 또한 이러한 광학 스위치를 위해 이용될 수 있다.

[0174] 증폭기(300)의 동작 및 구조는 이하 추가로 상세하게 기술된다. 특히, 반복률의 변경은 종종, 증폭된 펄스가 엔드-미러들(321 및 322) 사이에서 하는 왕복들의 수를 변경하는 것을 수반함을 알 수 있다. 바로 기술된 광학 스위치의 기능은 펄스들이 공진 캐비티로 언제 커플링되는지 이로부터 언제 커플링 해제되는지를 제어함으로써 이러한 왕복들의 수를 제어하는 것이다.

[0175] 증폭기(300) 내의 광학 엘리먼트들은 이러한 각각의 왕복들 동안 특정 양의 분산을 도입할 수 있다. 따라서, 반복률의 변경과 관련하여 증폭기(300)에서 왕복들의 수를 변경하는 것은, 증폭기(300)에 의해 출력되는 증폭된 펄스들의 누적 분산을 변경하게 된다. 압축기(400)가 특정 수의 왕복들에 대해 분산을 보상하도록 조정되더라도, 왕복들의 수의 변경으로부터 기인하는 분산의 변화는 도 1b의 레이저 엔진(1')의 신장기(200'), 증폭기

(300) 및 압축기(400)의 신장, 분산성 증폭 및 압축의 미묘한 균형을 틀어지게 하고, 따라서 기나긴 재교정을 요하게 된다. 도 1a의 통합된 신장-압축기(200)를 갖는 레이저 엔진(10)의 보다 창의적인 아키텍처도, 왕복들의 수가 변경되는 경우 보상 엘리먼트의 이용이 조정되어야 할 수 있다. 이러한 양상은 이러한 레이저 엔진들의 유용성을 제한한다.

[0176] 이들의 유용성을 넓히기 위해서, 몇몇 레이저 엔진들은 증폭기(300)의 일부로서 분산 제어기 또는 보상기를 포함할 수 있다. 분산 제어기의 기능은 왕복 동안 증폭기(300)의 광학 엘리먼트들에 의해 도입된 분산과 반대이지만 본질적으로 동일한 분산을 도입하는 것이다. 이러한 분산 보상 또는 제어의 결과로서, 펄스들은 증폭기(300)의 공진 캐비티 내에서의 왕복들 동안 분산을 거의 획득하지 않거나 전혀 획득하지 않는다. 따라서, 왕복들의 수의 변경은 증폭된 펄스들의 분산을 최소한으로만 변경하거나 또는 전혀 변경하지 않는다.

[0177] 그러므로, 보상하기 위해 왕복 중에 어떠한 분산도 누적되지 않기 때문에, 레이저 펄스들의 반복률은 본질적으로 압축기(400) 또는 신장-압축기(200)의 광학적 셋업의 어떠한 조정, 재정렬 또는 교정 없이도 변화될 수 있다. 따라서, 분산-제어형 증폭기(300)가 도 1b의 레이저 엔진에서 구현되어, 반복률이 변경되는 경우, 압축기(400)를 시간 소모적인 재정렬의 태스크로부터 벗어나게 해준다. 나아가, 이러한 보상-제어형 증폭기(300)는 조정 가능한 보상 기능 없이도, 도 1a의 레이저 엔진(1)에서 통합된 신장-압축기(200)의 이용을 가능하게 한다.

[0178] 예를 들어, 레이저 크리스탈(310)이 공진 캐비티 내에서 레이징 펄스의 왕복 중에 양의 분산을 도입하는 경우, 레이징 펄스의 분산을 억제, 최소화, 또는 제거하기 위해서 분산 제어기는 증폭된 신장된 펄스들에 동일한 양의 음의 분산을 도입할 수 있다.

[0179] 분산을 정량화하기 위한 유용한 수단은 종종 다음과 같이 정의되는 "그룹 지연 분산" 또는 GDD이다:

$$GDD = \frac{\lambda^3}{c^2} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} L \quad (1)$$

[0180] 여기서, λ 는 빛의 파장이고, c 는 빛의 속도이며, $n(\lambda)$ 는 파장에 따른 굴절률이고, L 은 캐비티 내에서 광 경로의 길이이다. 광학 엘리먼트들(310, 330 및 340), 미러들(321-324) 및 증폭기(300)에 존재할 수 있는 임의의 다른 광학 엘리먼트의 GDD는 예를 들어 측정에 의해 또는 설계로부터 추정하여 결정될 수 있다. GDD에 대한 지식을 갖추게 되면, 분산 제어기는 증폭기(300)의 광학 엘리먼트들의 결정된 GDD와 대략 동일하지만 반대의 값을 가지는 GDD를 갖고 캐비티 내에서 구현될 수 있다. 이렇게 설계된 캐비티는 펄스들의 왕복 동안 분산을 거의 발생시키지 않거나 전혀 발생시키지 않아, 상기 문제점을 해소하고 레이저 엔진들(1 또는 1')의 유용성을 넓히게 된다.

[0182] 예시적인 실시예로서, 통상적인 CPA 레이저 엔진(1')에서, 500 펨토초 시드 펄스가 신장기(200')에 의해 신장된 펄스 길이 200.5 ps로 200 피코초 만큼 신장될 수 있다. 대응하는 압축기(400)는 신장된 펄스를 다시 200 ps만큼 압축하도록 조정 및 교정되어, 이상적으로 약 500 fs의 압축된 펄스 길이가 될 수 있다. 불완전함을 설명하자면, 실제 경우들에서는 압축된 펄스 길이는 500 내지 800 fs 범위 내에 있을 수 있다.

[0183] 그러나, 증폭기(300)의 공진 캐비티에서 신장된 펄스들의 왕복 중에, 신장된 펄스들의 길이는 캐비티의 GDD에 의해 표현된, 증폭기(300)의 다양한 광학 엘리먼트들의 분산에 의해 향상될 수 있다. GDD의 통상적인 값들은 수백 fs^2 에서 수십만 fs^2 까지 변할 수 있다. 몇몇 경우들에서, GDD는 $5,000 fs^2$ 내지 $20,000 fs^2$ 범위 내에 있을 수 있다. 통상적으로 신장기(200) 및 압축기(400)는 펄스 길이에 대한 서로의 영향을 상쇄하기 때문에, 레이저 엔진(1)에 의해 출력되는 펄스의 길이 $\Delta t(out)$ 은, 다음의 식을 통해, 발진기(100)에 의해 생성되는 시드 펄스의 길이 $\Delta t(seed)$, 및 GDD와 관련된다:

$$\Delta t(out) = \frac{\sqrt{\Delta t(seed)^4 + (4 \ln 2 N \times GDD)^2}}{\Delta t(seed)} = \Delta t(seed) \sqrt{1 + 7.69 N^2 \times \left(\frac{GDD}{\Delta t(seed)^2} \right)^2} \quad (2)$$

[0184] 여기서, N 은 캐비티 내에서의 왕복들의 횟수이다.

[0186] 따라서, 예를 들어 길이 $\Delta t(seed) = 200 fs$ 의 시드 펄스는 $7,000 fs^2$ 의 GDD를 갖는 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 단일 왕복 중에 22 fs 만큼이나 작게 증가되어 $\Delta t(out) = 222 fs$ 가 될 수 있다. 그러나, 이러한 절보기로 작은 분산은 반복된 왕복 중에 합성될 수 있다. $N = 10$ 회 왕복 이후, 출력된 펄스의 길이는 약 790 fs 만큼 증가하여 $\Delta t(out) = 990 fs$ 가 되고, $N = 30$ 회 왕복 이후, 약 $2,700 fs = 2.7 ps$ 만큼 증가하여 Δ

$t(\text{out}) = 2,920 \text{ fs} = 2.9 \text{ ps}$ 가 되며, $N = 100$ 회 왕복 이후, 약 9.5 ps 만큼 증가하여 $\Delta t(\text{out}) = 9.1 \text{ ps}$ 가 된다. 분명히, 분산 제어형 증폭기(300)가 없다면, 약 50 배 이하만큼의 펄스 길이의 이러한 실질적인 열화는 레이저를 펨토초 레이저에서 피코초 레이저로 변형시킨다.

[0187] 또한, 압축기(200 또는 400)가 특정 횟수의 왕복에 의해 야기되는 추가적인 분산(예를 들어 $N = 100$ 회의 왕복에 대응하는 9.5 ps 분산)을 보상하도록 교정되는 경우에도, 응용예가 왕복들의 횟수를 $N = 100$ 에서 예컨대 $N = 110$ 으로 변경하도록 요구할 때, 또 다른 1 ps 분산이 증폭기에 의해 도입되어, 다시 펨토초 대신에 피코초의 압축된 펄스 길이가 된다.

[0188] 대조적으로, 레이저 엔진(1 또는 1')의 실시예들은 공진 캐비티의 광학 엘리먼트들에 의해 야기되는 GDD를 보상하기 위해 증폭기(300) 내에 분산 제어기를 가질 수 있다. 이러한 분산 제어기는 증폭기 내의 광학 엘리먼트들에 의해 유도되는 왕복 당 몇 fs의 분산을 보상할 수 있다. 따라서, 증폭기(300)는 증폭기가 동작하는 왕복들의 횟수와는 거의 독립적으로, 예를 들어 이러한 횟수가 50, 100, 200 또는 500인 경우에 무관하게, 200 ps 펄스 길이를 갖는 신장된 펄스들을 수신하여 본질적으로 동일한 200 ps 펄스 길이를 갖는 증폭된 펄스들을 방출할 수 있다. 그러므로, 레이저 엔진(1)의 신장-압축기(200), 또는 레이저 엔진(1')의 압축기(400)는, 증폭기(300) 내에 현재 분산 제어 또는 보상이 없는 다른 레이저 시스템들의 시간 소모적인 재조정 및 교정을 필요로 하지 않고, 넓은 범위의 왕복들의 횟수 N 에 대하여, 따라서 넓은 범위의 반복률에 대하여, 펄스 길이를 다시 펨토초 범위로 압축할 수 있다. 증폭기(300) 내부의 분산 제어기는 증폭기(300)의 내부 광 경로 상에 있고, 따라서 광학 증폭기(300) 외부의 광학 엘리먼트들의 재조정을 필요로 하지 않고 GDD/분산을 자동적으로 보상한다. 증폭기(300) 내부의 분산 제어기의 적절한 설계를 이용하면, 광학 증폭기 외부의 조정 가능한 분산 엘리먼트들, 예를 들어 도 3b에서 분산 보상 격자들이 펄스 반복률을 변경하기 위해 재조정될 필요성이 제거될 수 있다.

[0189] 상기 설계 고려사항들에 의해 가능해지는 레이저 엔진들(1 또는 1')은, 발진기(100) 이외에 레이저 엔진의 모든 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업으로, 10 kHz 내지 2 MHz 범위 내의 반복률로 1000 펨토초 미만의 펄스 지속시간을 갖는 레이저 빔을 생성할 수 있다. 다른 실시예들은 50 kHz 내지 1 MHz 범위, 또 다른 실시예들은 100 kHz 내지 500 kHz 범위 내의 반복률로 동작할 수 있다.

[0190] 그러므로 이러한 레이저 엔진들에서, 반복률은 발진기(100) 이외에 레이저 엔진의 광학 엘리먼트들의 셋업을 변경하지 않고 제1 값으로부터 제2 값으로 변화될 수 있다.

[0191] 반복률이 제1 값에서 제2 값으로 변경되는 것이 광학 엘리먼트들의 셋업의 변경을 수반하는 레이저 엔진들이 있을 수 있다. 그러나, 이러한 레이저 엔진들 중 몇몇은 증폭기 내부의 분산 보상 또는 제어에 기초하여 수정 가능할 수 있고, 따라서 수정된 레이저 엔진들은 또한 수정되지 않은 셋업으로 제2 반복률로 레이저 빔을 출력하도록 작동될 수 있다.

[0192] 레이저 엔진(1)의 다양한 구현들에서, 반복률은 제1 값에서 제2 값으로 변화될 수 있고, 여기서 제2 반복률은 제1 반복률과 적어도 10%, 50%, 100% 또는 200% 차이가 난다.

[0193] 공진 캐비티가 광섬유들을 채용하는 몇몇 설계들에서, 반복률의 조정은 또한 이후의 압축기(400)를 재튜닝 및 조정하지 않고도 가능할 수 있다. 그러나, 이러한 섬유 레이저들은, (i) 펄스들의 에너지에 관한 심각한 제한들을 가지고, (ii) 종종 분산 제어기들을 갖지 않는다. 이들은 통상적으로, 섬유 캐비티의 손상 위험을 피하기 위해 펄스 당 10 micro J (μJ) 미만의 에너지를 갖는 펄스들만을 생성한다. 이하 설명하는 것처럼, 안과 및 수술 응용들에 대해서, 이러한 펄스 당 에너지는 불충분할 수 있는데, 이러한 응용들은 타겟 상에 20 $\mu\text{J}/\text{펄스}$ 미만(다양한 손실들을 감안할 때 레이저에 의해 출력되는 30 $\mu\text{J}/\text{펄스}$ 미만으로 변환)을 요할 수 있기 때문이다.

[0194] 또 다른 차이점은, 섬유 레이저들에서, 열 부하의 변화 때문에 레이저의 반복률이 변화하는 경우 빔의 발산이 불가피하게 변화한다는 점이다.

[0195] 대조적으로, 증폭기(300)는 통상적으로 분산 제어기 또는 보상기를 포함하고, 빛은 자유 공간에서 전파되어, 레이저 엔진(1 또는 1')의 몇몇 예들은 1 내지 100 $\mu\text{J}/\text{펄스}$ 범위의 에너지로, 다른 예에서는 10 내지 50 $\mu\text{J}/\text{펄스}$ 범위의 에너지로, 또 다른 예에서는 20 내지 30 $\mu\text{J}/\text{펄스}$ 범위의 에너지로 레이저 빔을 출력하도록 작동될 수 있다.

[0196] 몇몇 레이저 엔진들(1 또는 1')은, 반복률의 변경에 레이저 엔진(1)의 광학 엘리먼트의 조정이 수반되도록 구성될 수 있다. 그러나, 이러한 실시예들에서도, 분산 보상기의 존재 때문에, 레이저 엔진(1 또는 1')은 반복률이 변경되는 경우 광학 엘리먼트들의 본질적으로 동일한 셋업을 이용하도록 수정 가능할 수 있다.

- [0197] 상기 예들은 수많은 상이한 방식으로 구현될 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 광학 증폭기 내부의 분산 제어기 또는 보상기는 하나 또는 그 초파의 쳐프형 미러들, 쳐프형 섬유들, 다양한 쳐프형 격자들, 쳐프형 투파성 광학 엘리먼트들, 프리즘들, 그리고 입사하는 빛의 분산을 변경할 수 있는 다른 광학 엘리먼트들을 포함할 수 있다.
- [0198] 일반적으로, 쳐프형 광학 엘리먼트들은 변조된 광학 특성을 갖는 다수의 층들을 가질 수 있다. 예를 들어, 층들의 두께 및 이들의 굴절률의 변화는 상이한 파장을 갖는 빛을 상이하게 제어하도록 설계될 수 있다. 예를 들어, 쳐프형 볼륨 브래그 격자(CVBG)가 신장-압축기(200)와 관련하여 이미 기술된 바 있다. 쳐프형 미러들과 같은 다른 예들은, 유전체 재료들의 층들을 포함할 수 있고, 각각의 단일 유전체 층, 또는 층들의 짧은 스택은 특정 파장의 협소한 근방만을 반사시킬 수 있다. 쳐프형 미러는 제1 파장 근방의 파장을 갖는 빛을 반사시키기에 적합한 두께를 갖는 5 내지 10개의 유전체 층들의 제1 스택을 형성함으로써 구성될 수 있다. 그 다음에, 제2 파장 근방의 파장을 갖는 빛을 반사시키기 위해 상이한 두께 및/또는 굴절률로 제1 스택 위에 5 내지 10개의 유전체 층들의 제2 스택이 형성될 수 있는 등이다. 적합한 수의 스택들에 충분한 수의 층들로 형성되는 경우, 쳐프형 미러는 선택된 파장 대역 내의 파장 성분들을 갖는 빛을 반사시키고 다른 파장들을 갖는 빛을 투과시킬 수 있다.
- [0199] 증폭기 내의 분산 제어 기능은 미러들(321-324) 중 하나 또는 둘 이상을 쳐프형으로 만드는 것에 의해 수행될 수 있다. 도 4에서는 모든 4개의 미러들이 쳐프형이다. 다른 설계들은 미러를 중 단지 하나 또는 두 개만이 쳐프형일 수 있다. 또 다른 설계들은 하나 또는 그 초파의 쳐프형 광학 엘리먼트를 채용할 수 있다. 분산 제어기의 가능한 실현들로서, 이러한 하나 또는 그 초파의 쳐프형 미러들은, 증폭기(300)의 공진 캐비티 내부에서 증폭된 신장된 레이저 펄스들의 왕복 중에 광학 엘리먼트들(310, 330 및 340) 및 미러들(321-324)에 의해 유도되는 분산을 제어, 보상, 최소화 또는 제어할 수도 있다.
- [0200] 레이저 크리스탈(310)은 Nd 또는 Yb 계일 수 있다. 예를 들면, Nd:YAG 및 Yb:YAG 결정들이 포함된다. 다른 구현들은 Nd 또는 Yb 도핑된 유리를 이용할 수 있다. 또 다른 예들은 Yb:X(WO₄)₂ 형태의 Yb:텅스텐산염 또는 Yb:X₂O₃ 형태의 Yb:이삼산화물이다. 이러한 경우들에서, X는 Y, Lu, Gd 또는 다른 적합한 원소들일 수 있다. Nd 또는 Yb 도핑 레벨은 0.1 내지 100% 범위일 수 있다.
- [0201] 레이저 크리스탈의 공간 도핑 프로파일은 높은 품질의 단일 모드 레이저 펄스들의 방출을 보장하도록 선택될 수 있다. 몇몇 도핑 프로파일들이, 펌핑된 빛의 통상적인 M² 보다 큰 인자로 표현되는 제한된 초점가능성(focusability)을 갖는 펌핑 광원과 호환될 수 있다. 펌핑 광원은 측-펌핑 또는 단부-펌핑 배열일 수 있다. 펌핑 광원은 다수의 섬유-커플링 다이오드들, 예를 들어 2 내지 10개의 다이오드들을 포함할 수 있고, 각각의 다이오드는 1 내지 10 W 파워로 방출한다. 펌핑 다이오드들은 본질적으로 지속파(CW) 동작 모드로, 또는 유사한 고 주파수 펄스 모드로 동작할 수 있다. 이들은 상이한 공간 어레이들, 바(bar)들 또는 다른 형태들로 배열될 수 있다. 다이오드들로부터의 빛은 공유된 격자를 통해 가이드될 수 있고, 이러한 공유된 격자는 이러한 빛 중 매우 작은 비율만을 다이오드들로 복귀시켜, 빛을 위상 고정(phase lock)한다.
- [0202] 도 4와 함께, 도 5a-5b는 캐비티 덤프형 재생 증폭기(CDRA; 300)의 동작을 도시한다. 동작의 원리는 종종 "Q-스위칭"이라 지칭되고, 공진 캐비티의 품질 계수(Q)의 스위칭을 지칭한다.
- [0203] "충전" 또는 "펌프" 위상에서, 박막 편광판(340)은 입사하는 광을 스위칭가능한 편광판(300)을 통해 반사시킨다. 스위칭가능한 편광판(300)은 셔터, 초퍼 휠, 스피닝 프리즘 또는 미러, 음향-광학 디바이스, 전자-광학 디바이스, 예를 들면, 포케尔斯(Pockels) 셀 또는 커(Kerr) 셀, 또는 스위칭가능한 λ/4 파-플레이트일 수 있다. 바이어스되지 않거나 저전압 상태에서, 스위칭가능한 편광판(330)은, 펄스들이 엔드-미러(322)로 그리고 엔드-미러(322)로부터 두 번 통과할 때, 90도 만큼 편광 평면을 회전시킬 수 있다.
- [0204] 충전 또는 펌프 기간 중에, 패러데이 아이솔레이터(500)는 박막 편광판(340) 상으로 펄스들을 전송하고, 이러한 박막 편광판(340)은 스위칭가능한 편광판(330)을 통해 이러한 펄스들을 재지향시킨다. 엔드-미러(322)로부터 복귀하는 펄스들은 두 번째로 스위칭가능한 편광판(330)을 가로지른다. 그 후, 이러한 펄스들은 캐비티 내에서 1회 왕복을 수행하고, 엔드-미러(322)로 그리고 엔드-미러(322)로부터의 경로 상에서, 두 번 더 스위칭가능한 편광판(330)을 통과한다. 1회의 왕복 후에, 스위칭가능한 편광판(330)을 통하는 이러한 4번의 통과는 펄스들의 편광 평면을 180도 만큼 회전시킨다. 따라서, 이러한 펄스들은 본질적으로 증폭되지 않고 박막 편광판(340)에 의해 캐비티로부터 밖으로 반사된다.
- [0205] 이러한 동일한 충전 또는 펌프 기간 중에, 증폭기(300)는 또한 캐비티 내에서 펌핑 다이오드들에 의해 생성되는

빛의 레이징 동작을 억제하는데, 스위칭가능한 편광판(330)에 의한 편광 평면의 90도 이중 통과 회전이 공진 캐비티의 품질 계수(Q)를 낮게 하여, 캐비티를 레이징 동작에 부적합하게 하기 때문이다.

[0206] 도 5a는, 이러한 충전/펌프 위상에서, 레이저 크리스탈(310)이 측-펌핑 또는 단부-펌핑 배열의 상기 펌프 다이오드들, 또는 펌프 레이저 다이오드들로부터 빛을 흡수하고 있음을 보여준다. 이러한 펌핑은 레이징 원자들 또는 집합체(complex)의 여기된 에너지 레벨의 밀도(population)를 증가시켜 밀도-반전을 유발하고, 본질적으로 펌핑 에너지 또는 "이득"을 흡수 및 저장한다.

[0207] 도 5b는 이러한 충전/펌프 위상에서, 증폭기(300)에서 어떠한 증폭된 레이저 펄스들도 발생되지 않고, 증폭기(300)에 의해 어떠한 증폭된 레이저 펄스들도 방출되지 않음을 도시한다. 물론, 거부된(rejected) 미증폭 펄스들은 증폭기(300)에 의해 방출된다.

[0208] 도 5a-5b는, 펌프/충전 위상이 미리결정된 타이밍 동작에 따라 종료되거나 레이저 크리스탈(310)의 에너지 저장을 추적하는 감지 전자기기에 의해 촉진될 수 있음을 도시한다. 어느 경우이든, 시간 t(충전) 이후에, 제어 및 구동 전자기기가 스위칭가능한 편광판(330)에 높은 전압을 인가하여 편광 평면의 90도 회전을 중단할 수 있다. 다른 유형의 스위칭가능한 편광판(330)은 상이한 수단에 의해 스위칭될 수 있다. 이러한 변경은 캐비티의 품질 계수(Q)를 충분히 높은 값으로 스위칭하여 캐비티가 레이징 동작에 적합하도록 한다.

[0209] 증폭기(300)의 단일 펄스 실시예들은, 단일 펄스가 캐비티 내에서 왕복을 수행하는 동안 스위칭가능한 편광판(300)을 스위칭할 수 있다. 왕복의 마지막에서, 스위칭 후 단일 펄스가 스위칭가능한 편광판(300)으로 복귀할 때, 펄스의 편광 평면은 더 이상 회전되지 않고 따라서 펄스는 박막 편광판(340)에 의해 캐비티로부터 반사되지 않는다. 펌프 위상 중에 거부되는 대신에, 펄스는 길이 t(이득)의 이득 기간 동안 여러번 더 왕복 중에 캐비티 내에 포획(trap)될 수 있다. 도 5b에서는 명확화를 위해 t(이득)의 시간 스케일이 확대되었다.

[0210] 도 5a-5b는, 이득 기간 내에, 캐비티에서 펌핑되고 저장된 에너지(또는 이득)가, 레이징 동작을 시작하기 위한 유도된 방출이라 지칭되는 프로세스를 통해, 레이저 크리스탈(310)으로부터 왕복을 수행하는 펄스로 전달됨을 도시한다. 따라서, 도 5a에 도시된 것처럼, 캐비티 내의 에너지가 감소되는 반면, 도 5b에 도시된 것처럼, 레이징 펄스 내의 에너지는 이득 프로세스에서 증가한다. 도 5b에서, t(이득) 인터벌에서 피크들은, 펄스가 캐비티 내의 특정 지점을 통과할 때 레이징 펄스의 에너지를 나타내는 반면, 실선으로 상승하는 곡선은 슬라이딩 왕복 기간에 걸쳐 평균화된 에너지 이득을 나타내는 포락선이다.

[0211] 캐비티 내에 단일 입사 펄스를 포획하는 구현들은, 대략 레이저 크리스탈(310)에 저장된 모든 에너지를 왕복 중에 단일 레이징 펄스로 전달할 수 있음에 주목해야 한다. 대조적으로, 몇몇 구현들은 다수의 펄스들을 캐비티 내로 허용할 수 있다. 그러나 이러한 예들에서는, 결과적인 레이저 빔이 펄스당 더 낮은 에너지를 가질 수 있어, 펄스당 에너지를 관련된 유형의 광파괴를 위해 통상적이고 유익한 레벨 이하로 감소시킬 수 있다.

[0212] 캐비티 내로 펌핑된 에너지가 충분한 횟수의 왕복들 동안 높은 효율로 레이징 펄스에 전달된 후, 제어기-구동기 전자기기는 스위칭가능한 편광판(330)에 높은 전압을 인가하는 것을 중단하고, 레이징 펄스의 편광 평면을 회전시키는 것을 재개하도록 할 수 있다. 편광 회전의 재시작 때문에, 증폭된 레이저 펄스는 그 후, 다음 왕복의 끝부분에서, t(덤프)로 표기된 시간에서, 박막 편광판(340)에 의해 캐비티로부터 밖으로 반사된다.

[0213] 증폭된 레이저 펄스들의 덤프는 상이한 방식들로 제어될 수 있다. 몇몇 경우들에서, 덤프가 수행되기 전의 왕복들의 횟수를 설정하기 위해 설계 계산들 및 컴퓨터 방법들에 의존할 수 있다. 다른 경우들에서, 왕복들의 횟수를 설정하기 위해 종전의 교정이 이용될 수 있다. 또 다른 경우들에서, 다양한 센서들이 공진 캐비티의 광경로 내로 커플링될 수 있다. 이러한 센서 또는 센서들은 증폭된 레이징 펄스들의 에너지가 미리결정된 값에 언제 도달하는지를 감지하고 이에 따라 캐비티를 덤프하기 위한 제어 신호를 제어기에 전송할 수 있다.

[0214] 캐비티로부터 밖으로 증폭된 레이저 펄스를 반사시키고 압축기(400)를 향해 이러한 펄스를 전송하는 것으로 펌프-이득-덤프 사이클이 완성된다. 일단 펄스-덤프가 완료되고 나면, 캐비티는 낮은 Q 상태로 복귀하여, 펌프-이득-덤프 사이클을 다시 시작한다. 몇몇 설계들에서, 펄스-주입 포트 및 펄스-덤프 포트는 상이할 수 있다. 도 4에서, 이러한 양자 모두의 포트들이 박막 편광판(340)에 구현된다.

[0215] 몇몇 구현들에서, 레이징 펄스들은 캐비티 내에서 50 내지 500회의 왕복들을 수행하고, 다른 예들에서는 100 내지 200회의 왕복들을 수행하여, 레이저 크리스탈(310)의 펌핑된 상태로부터 레이징 펄스로의 에너지 전달을 가능하게 한다. 이전에 논의된 것처럼, 발진기(100)는 10 내지 200 MHz 범위의 주파수로, 몇몇 경우들에서는 20 내지 50 MHz 범위의 주파수로, 시드 펄스 트레인을 생성할 수 있다. 몇몇 구현들에서, 레이저 엔진(1 또는 1')은 10 kHz 내지 2 MHz, 또는 50 kHz 내지 1 MHz, 또는 100 kHz 내지 500 kHz 범위의 주파수로 시드 펄스 트

레인을 생성할 수 있다. 따라서, 스위칭가능한 편광판(330)은 증폭을 위해 단지 매 5번째 내지 20,000번째 시드 펄스를 포획함으로써 입사하는 시드 펄스 트레인을 데시메이트한다. 이러한 포획 시퀀스들의 타이밍은 발진기(100)를 마스터-클록으로 사용함으로써 제어될 수 있다.

[0216] 반복률은 레이저 엔진의 중심적인 특성이다. (1) 반복률이 일정 범위의 주파수들 내에서 변경될 수 있고, (2) 이러한 범위의 상한이 높은 경우, 더 다양한 기능들이 달성될 수 있다. 예를 들면, 백내장 수술이 제1 반복률로 최적 수행될 수 있지만, 각막 수술에는 제2 반복률이 더 좋을 수 있다. 레이저 엔진이 제1 반복률과 제2 반복률 모두에서 동작하도록 조정될 수 있다면 단일 레이저 엔진이 이러한 두 가지 기능들 모두를 위해 이용될 수 있다. 그러므로, 레이저 엔진들(1 및 1')에서 반복률이 변경될 수 있게 하고 범위의 상한이 높게 되도록 할 수 있는 다양한 설계 고려사항들이 이후 검토될 것이다.

[0217] 도 3b 내지 3c 및 도 4와 관련하여 기술되는 것처럼, 미러들(321-324) 중 임의의 것에 대한 처프형 미러와 같은, 증폭기(300) 내에서 분산 제어기를 이용하면, 캐비티 내에서 왕복 중에 증폭기의 광학 엘리먼트들에 의해 야기되는 레이징 펄스의 분산을 보상할 수 있다. 이러한 설계 특징은, 격자들(201, 203, 205, 및 207), 렌즈(202) 및 미러들(204 및 208)과 같은, 신장기(200) 및 압축기(200/400)의 광학 엘리먼트들의 교정, 정렬 또는 셋업을 변경하지 않고도 레이저 엔진(1 또는 1')의 반복률을 변경하는 것을 가능하게 한다.

[0218] 광학적 셋업을 수정하는 대신에, 반복률 변경은 레이저 엔진(1)의 타이밍 및 동작을 수정하기 위한 전기 제어 신호들을 인가함으로써 달성될 수 있다. 예를 들어, 반복률은 반복 시간 $t(\text{rep})=t(\text{충전}/\text{펌프})+t(\text{이득})$ 을 줄이기 위한 제어 신호들을 인가함으로써 증가될 수 있다.

[0219] 통상적으로, $t(\text{rep})$ 의 감소는 $t(\text{펌프})$ 및 $t(\text{이득})$ 양자 모두를 감소시킴으로써 달성된다. 펌핑 시간 $t(\text{펌프})$ 는 예를 들어, 펌핑 다이오드들/레이저들의 펌핑 세기를 증가시킴으로써 단축될 수 있다. 이득 시간 $t(\text{이득})$ 은 예를 들어, 레이징 펄스의 왕복 횟수들을 줄임으로써 단축될 수 있다.

[0220] 레이저 펄스의 에너지는 예를 들어, 왕복당 에너지 이득을 늘림으로써 보다 적은 왕복들에도 불구하고 보존될 수 있다. 도 5b는, 레이징 펄스가 왕복마다 캐비티 내의 선택된 기준점을 통과할 때 이득 기간 중에 레이징 펄스의 에너지가 증가되는 것을 도시한다. 이후의 통과들에서 에너지들의 비율은 종종, ("작은 신호") 이득 인자(g)에 특징이 있다. 이러한 이득 인자(g)는 레이저 크리스탈(310)의 여기 또는 펌핑된 레벨에서 저장된 전체 에너지에 민감하다. 보다 많은 에너지가 저장될수록, g 인자가 높아진다. 그러므로, 이득 매체(310)의 펌핑된 레벨에서 저장된 에너지를 증가시키기 위한 제어 신호들을 인가하면, 더 적은 왕복들 내에 레이징 펄스가 동일한 에너지에 도달하고, 따라서 반복률을 증가시키게 된다.

[0221] 반복률 범위의 상한은 또한 다양한 방식들로 증가될 수 있다. 더 큰 이득 인자(g)를 갖는 실시예들에서, 동일한 증폭을 달성하기 위해서 더 적은 왕복들이 필요하다. 따라서, 몇몇 구현들은 더 높은 이득 인자(g)를 갖는 레이저 크리스탈(310)을 채용함으로써 반복률의 높은 상한을 달성한다.

[0222] 또한, 이득 인자(g)가 레이저 크리스탈(310)의 여기 또는 펌핑된 레벨에서 저장된 전체 에너지에 민감하기 때문에, 보다 높은 에너지로 여기된 레벨을 펌핑하는 것은 더 짧은 $t(\text{이득})$, 따라서 보다 높은 반복률을 달성하기 위한 또 다른 방법이다.

[0223] 반복률을 제어하는 또 다른 인자는 1회의 반복이 필요로 하는 시간이다. 레이징 펄스는 시간 간격들 $2L/c$ 로 기준점을 통과하고, 여기서 L 은 캐비티 내의 광 경로의 길이이며 c 는 빛의 속도이다. 따라서 몇몇 실시예들에서, 광 경로의 길이(L)는 왕복 횟수를 줄이도록 감소될 수 있다. 이러한 구현들에서, 동일한 횟수의 왕복들, 따라서 동일한 양의 에너지의 전달에는 더 짧은 시간 $t(\text{이득})$ 이 소요되고, 또 다른 방식으로 반복률을 높이게 된다.

[0224] 상기 설계 원리들 중 하나 또는 둘 이상을 구현하는, 레이저 엔진(1 또는 1')의 실시예는 500 kHz 이하, 1MHz 이하, 또는 몇몇 경우들에서 2MHz 이하의 반복률로 동작할 수 있다.

[0225] 부가적으로, 이러한 구현들에서 $t(\text{이득})$ 의 감소는 펌프 및 덤프 사이클 동안 더 바람직한 드uty(duty)를 지원하기 위해서 총 반복률 $t(\text{rep})$ 중 더 많은 부분을 이용할 수 있게 한다.

[0226] 드uty에 대해 종종 사용되는 정의는, 낮은 Q 기간의 길이를 총 기간의 길이로 나눈 값이다. 이러한 정의를 이용하면, 예를 들어 400 kHz 반복률을 이용하는 구현에서, $t(\text{이득})$ 를 $1 \mu\text{s}$ 에서 $0.5 \mu\text{s}$ 로 줄이는 것은 드uty를 0.6에서 0.75로 증가시켜, 25%의 상당한 증가량을 보인다.

[0227] 광 경로의 길이(L)를 줄이는 설계 원리로 복귀하면, L 은 특히 스위칭가능한 편광판(330)이 캐비티 내에 펄스를 포획하기 위해 얼마나 빨리 스위칭할 수 있는지에 의해 제어된다는 점에 주목한다. 1 미터 광 경로 캐비티 내

에서, 왕복 시간은 $2L/c = 6.6 \text{ ns}$ 이다. 또한 펄스의 유한한 공간 범위 때문에, 단일 펄스 구현들은 5 ns 미만, 4 ns 미만, 또는 3 ns 미만의 스위칭 시간을 갖는 스위칭가능한 편광판(330)을 갖게 된다.

[0228] 몇몇 증폭기들에서, 스위칭가능한 편광판(330)은 포켈스 셀일 수 있다. 포켈스 셀은 종종 입사하는 광 빔들의 편광을 회전시키기 위해 강한 전기장을 인가한다. 편광의 회전은 전기장의 제1 파워에 비례하고 따라서 상당히 강할 수 있다. 반전 대칭이 없는 결정들, 예를 들어 리튬 닉오브산염 또는 갈륨 비소화물 및 다른 비중심-대칭 재료들에서 포켈스 효과가 발생한다.

[0229] 종종 킬로볼트의 전압을 인가함으로써, 포켈스 셀들은 매우 짧은 상승 시간으로 편광-회전 상태에서 편광-비회전 상태로 스위칭될 수 있다. 상승 시간의 한 가지 척도는 "5-95 시간", 즉 편광 평면의 회전이 최대/포화 값의 5%에서 95%까지 상승하는데 소요되는 시간이다. 몇몇 구현들에서, 이러한 상승 시간은 5 ns 미만, 다른 구현들에서는 4 ns 미만, 또 다른 구현들에서는 3 ns 미만일 수 있다. 실제로, 몇몇 구현들에서, 상승 시간은 포켈스 셀의 동역학에 의해 제한되지 않고, 오히려 스위칭 전자기기의 동역학에 의해 제한된다. 몇몇 구현들은 혁신적인 제어 및 구동 회로를 이용하여 이러한 신속한 파워 스위칭 프로세스를 가능하게 할 수 있다.

[0230] 위에서 기술된 것처럼, 포켈스 셀의 스위칭 시간의 단축은 t (이득)을 줄여 더 빠른 반복률을 가능하게 하는 효과적인 방법이다. 나아가, 이러한 더 빠른 포켈스 셀들은 또한 광 경로의 길이, 따라서 캐비티의 크기의 감소를 가능하게 한다.

[0231] 나아가, 레이저 엔진(1)의 구현들은 몇몇의 기존 레이저들보다 적은 광학 엘리먼트들을 갖도록 이루어질 수 있다. 이는 부분적으로, 통합된 신장-압축기 아키텍처(200)뿐만 아니라, 압축기에서 조정가능한 광학 엘리먼트들의 필요성을 완화하는 분산 제어기 또는 보상기의 적용에 기인한다.

[0232] 몇몇 레이저들은 100개 이상의 광학 엘리먼트들을 포함할 수 있지만, 레이저 엔진(1)의 몇몇 구현들에서는 광학 엘리먼트들의 수가 75개 미만일 수 있다. 다른 구현들에서는, 50개 미만일 수 있다.

[0233] 몇몇 구현들에서는, 발진기 이외의 부분들에서 광학 엘리먼트들의 수는 50개 미만일 수 있다. 다른 구현들에서는 35개 미만일 수 있다.

[0234] 여기서 "광학 엘리먼트"라는 용어는 광 빔의 광학적 특성에 영향을 미치는 임의의 엘리먼트를 지칭한다. 예를 들어 다음의 것들이 포함된다: 미러, 렌즈, 평행 플레이트, 편광판, 아이솔레이터, 임의의 스위칭가능한 광학 엘리먼트, 굴절형 엘리먼트, 투과형 엘리먼트, 및 반사형 엘리먼트.

[0235] 광학 엘리먼트들은 빛이 공기로부터 진입되고 공기로 나가는 표면들에 의해 규정된다. 그러므로, 대물렌즈와 같은 기능 블록은, 그것이 몇몇 렌즈들을 포함한다면, 대물렌즈가 이동 중일 때 렌즈들이 견고하게 함께 이동하더라도, 하나의 "광학 엘리먼트"가 아니다. 이는, 대물렌즈의 렌즈들 사이에서, 아무리 간격이 짧다고 하더라도, 광이 빛으로 전파되기 때문이다. 2개의 렌즈들이 그들의 중심에서 공극 없이 서로 접촉하고 있더라도, 중심을 벗어난 빔은 하나의 렌즈를 떠나 다른 렌즈에 진입하기 전에 여전히 공기로 빠져나간다. 레이저들에 대한 개략적인 설명들은 레이저의 실제 기능을 위해 필수적인 것보다 더 적은 광학 엘리먼트들을 보여준다는 점에 주목한다. 통상적으로, 단일 렌즈가 도시되는 경우, 이러한 렌즈의 기능들은 실제로 단일 렌즈에 의해 수행될 수 없고, 단지 주의 깊게 설계된 렌즈-어셈블리에 의해 수행될 수 있다. 따라서, 이러한 개략적인 설명들은 단지 예시로서 통상 의도된 것이고, 문자 그대로 구현하는 경우 동작하지 않을 수도 있다.

[0236] 신속한 포켈스 셀들, 신속한 스위칭 전자기기 및 적은 수의 광학 엘리먼트들을 갖는 레이저 엔진(1)의 구현들은 캐비티 내부의 광 경로가 2 미터보다 짧거나, 다른 구현들에서는 1 미터보다 짧을 수 있다. 이에 대응하여, 증폭기(300)의 캐비티 내에서의 모든 왕복들을 포함하여, 발진기(100)에서 광자들의 생성으로부터 레이저 엔진의 총 광 경로는 500 미터 미만, 또는 300 미터 미만, 또는 150 미터 미만일 수 있다.

[0237] 기존 펨토초 레이저들은 500 미터 이상의 총 광 경로를 가지고, 3 내지 4 미터 이상의 캐비티 엔드-미러 대 엔드-미러 거리를 갖는데, 이는 본원에서 기술되는 혁신적인 해결책 없이는 광 경로를 이러한 값들보다 낮게 단축하기가 매우 어렵기 때문이다.

[0238] 레이저 엔진(1)의 크기를 줄이는데 기여할 수 있는 혁신적인 서브시스템들 및 특징들의 목록은 다음을 포함한다: (i) 자유 공간 발진기 대신에 섬유-기반 발진기(100); (ii) 반복률이 변경되는 경우 광학 엘리먼트들이 조정될 필요가 없는, 가능하다면 단일 쳐프형 볼륨 브래그 격자에 기초한, 통합된 신장-압축기(200); (iii) 반복률이 변경될 때 신장-압축기(200)에서 조정가능한 광학 엘리먼트들에 대한 필요성을 제거하는 분산-보상형 증폭기(300); (iv) 이례적으로 신속하게 스위칭되는 포켈스 셀; (v) 킬로볼트 범위를 포함하는 포켈스 셀의 높

은 전압에서 빠른 상승 시간으로 동작할 수 있는 이례적으로 신속한 제어 전자기기; 및 (vi) 수용하기 위해 더 작은 공간을 필요로 하는 적은 수의 광학 엘리먼트들.

[0239] 이러한 특징들의 조합 또는 이들 모두를 구현하는 레이저 엔진들은 500 미터 미만, 몇몇 구현들에서는 300 미터 미만, 다른 구현들에서는 150 미터 미만의 전체 자유 공간 광 경로 길이를 지원할 수 있다.

[0240] 또한, 상기 관련 특징들 중 일부 또는 모두를 갖는 증폭기(300)는 2 미터 미만, 몇몇 경우들에서는 1 미터 미만의 엔드-미러 대 엔드-미러 광 경로 길이를 가질 수 있다.

[0241] 많은 구현들에서, 광 경로는 다중 폴딩되고, 따라서, 공진 캐비티의 물리적 크기는 경로 길이보다 상당히 짧을 수 있다. 짧고 폴딩된 광 경로들은 증폭기(300)의 작은 전체 크기로 바뀔 수 있다. 몇몇 경우들에서는, 증폭기(300)의 에지 크기들 중 어느 것도 1 미터, 다른 경우들에서는 0.5 미터를 넘지 못한다.

[0242] 따라서, 전체 레이저 엔진(1)의 풋프린트, 즉 레이저 시스템의 데크 상에서 커버하는 영역은 1 m^2 미만, 다른 예에서는 0.5 m^2 미만, 또 다른 예에서는 0.25 m^2 미만, 가능하다면 0.1 m^2 미만일 수 있다. 이러한 영역들 또는 풋프린트들 각각은 분명히 새로운 장점을 낳을 수 있다.

[0243] 증폭기(300) 및 레이저 엔진(1)은, 상기 설계 원리들 및 엘리먼트들 중 하나 또는 둘 이상을 이용하고 있기 때문에 이러한 이례적으로 작은 공간적 치수를 가질 수 있다. 이와 같이, 이러한 공간적 치수에 의해, 증폭기(300) 및 레이저 엔진(1)은 이러한 설계 원리들 및 엘리먼트들을 채용하지 않는 다른 레이저들과 정당하게 구별될 수 있다.

[0244] 또한 다른 고려사항이 언급될 필요가 있다: 레이저 시스템의 상부 데크 상에 있어 레이저 시스템의 새시로부터 시스템 블록들을 안팎으로 이동시키지 않고 단순히 커버를 제거함으로써 액세스 가능한 서브시스템들을 서비스하는 것은 임계적으로 더 단순하다. 이렇게 함으로써, 고객 환경(예를 들어, 병원)에서 시스템 블록들의 민감한 정렬들을 위태롭게 할 수 있고, 이러한 환경에서는 통상적으로 정렬을 복원하기 위한 정밀 장비를 이용할 수 없다. 따라서, 수술 레이저 시스템의 다양한 컴포넌트들을 차곡차곡 적층하는 것이 풋프린트를 감소시키는 또 다른 방법인 것처럼 보일 수 있지만, 그렇게 하면 레이저 시스템의 서비스에 거대한 도전과제들을 도입할 수 있다.

[0245] 그러므로, 레이저 엔진(1)의 치수를 줄이는 것은, 유지보수를 위해 액세스를 또한 요하는 레이저 시스템의 상부 데크 상에 다른 서브시스템들의 배치를 가능하게 한다. 이러한 추가적인 서브시스템들은 질적으로 새로운 기능들을 도입할 수 있고, 따라서 전체 레이저 시스템의 유용성을 임계적으로 향상시킨다. 이러한 추가적인 서브시스템들은 안과 수술을 가이드하기 위한 이미징 시스템을 포함할 수 있다.

[0246] 요약하면, 상기 특징들은, 독립적으로 또는 조합하여, 물리적으로 소형인 레이저 시스템들을 구성하도록 구현될 수 있다. 이러한 작은 공간적 치수는 적어도 다음의 이유에서 귀중한 자산이 될 수 있다: (i) 안과 수술 레이저 시스템들은 종종 매우 혼잡한 수술실에 배치되고, 여기서는 공간 및 액세스가 높은 프리미엄으로 작은 풋프린트를 갖는 레이저 시스템들에 호의를 보인다; (ii) 레이저 엔진의 내구성은, 이의 모든 광학 컴포넌트들 중 대부분 또는 이들 모두가 레이저 시스템의 새시의 상부 데크 상에 들어맞는 경우 질적으로 더 낫다; (iii) 소형 레이저 엔진들은 상부 데크 상에 추가적인 시스템들을 배치하는 것을 허용하고, 안과 수술을 가이드하기 위한 이미징 시스템들과 같이, 전체 레이저 시스템에 중요한 새로운 기능들을 부가한다.

[0247] 증폭된 신장된 레이저 펄스들의 경로를 추적하는 것으로 복귀할 때, 도 2는 증폭된 펄스가 증폭기(300)에 의해 일단 방출되면 패러데이 아이솔레이터(500)로 다시 전달될 수 있음을 도시한다. 패러데이 아이솔레이터(500)의 기능들 중 하나는, 거의 100%의 효율로 증폭된 펄스들을 발진기로부터 멀어지도록 재지향시켜, 증폭된 펄스에 의해 발진기(100)가 손상되는 것을 방지하는 것일 수 있다.

[0248] 몇몇 경우들에서, 증폭된 펄스들은 편광판들(550 및 560)을 통해 신장-압축기(200)의 압축 포트로 지향된다. 위에서 논의한 것처럼, 신장-압축기(200)는 증폭된 펄스들을 재압축하고 펨토초 펄스들을 갖는 펄스형 레이저 범을 방출할 수 있다.

[0249] 상기 다양한 해결책들을 활용하는 레이저 엔진(1)의 구현들은 1 내지 1000 펨토초(fs) 범위, 몇몇 경우들에서는 50 내지 500 fs 범위, 다른 경우들에서는 100 내지 300 fs 범위의 펄스 지속시간을 갖는 레이저 범을 출력할 수 있다. 이러한 펨토초 펄스들은 매우 높은 에너지들, 예를 들면 1 내지 100 μJ /펄스 범위, 다른 예들에서는 10 내지 50 μJ /펄스 범위, 또 다른 예들에서는 20 내지 30 μJ /펄스 범위의 에너지에 도달할 수 있다.

[0250] 이러한 펄스 에너지들은, 임계 동작을 나타내는 여러 상이한 레이저-조직 상호작용들이 눈에 존재하기 때문에,

펄스 에너지가 1, 10, 또는 20 μJ /펄스 미만인 레이저들의 경우에 액세스할 수 없는 유용한 응용들을 가능하게 할 수 있다. 1 μJ /펄스 에너지 미만의 레이저 펄스들이 외과적으로 필요한 조직 변형을 유발하지 않는 수술 절차들이 있다. 다른 수술 절차들에서는 이러한 임계값이 10, 또는 20 μJ /펄스 일 수 있다.

[0251] 예를 들어, 백내장 수술은 표적 조직에 레이저를 깊이, 예를 들면 10 mm의 깊이까지 지향시킬 것을 요한다. 이러한 요건은 개구수를 제한하고, 따라서 광파괴를 생성하기 위해 펄스 당 더 높은 에너지 값들을 요구한다. 몇몇 경우들에서는, 10 내지 15 μJ /펄스 에너지들이 충분할 수 있다. 최대 에너지 값들로 동작하는 것을 피하기 위해서, 20 μJ /펄스 를 갖는 디바이스들이 바람직할 수 있다. 이러한 수들은 정확한 에너지들이기 때문에, 광경로를 따른 손실들을 보상하기 위해서는, 레이저 시스템은 25 내지 30 μJ /펄스 를 출력하는 레이저들을 포함할 수 있다.

[0252] 예를 들어, 백내장 수술 응용에서는, 경도 1, 2, 3 또는 4의 백내장들을 절개하는 것은 대응하는 임계값들을 넘는 레이저 펄스 에너지들을 필요로 할 수 있다. 예를 들어 몇몇 상황들에서, 10 내지 15 μJ /펄스 보다 큰 펄스 에너지들을 갖는 레이저들은 경도 1의 백내장들을 절개할 수 있고, 10 내지 20 μJ /펄스 보다 큰 펄스 에너지들을 갖는 레이저들은 경도 2의 백내장들을 절개할 수 있으며, 20 μJ /펄스 보다 큰 펄스 에너지들을 갖는 레이저들은 경도 3의 백내장들을 절개할 수 있고, 30 내지 50 μJ /펄스 보다 큰 펄스 에너지들을 갖는 레이저들은 경도 4의 백내장들을 절개할 수 있다. 이러한 임계 에너지들은 펄스 길이, 반복률, 전체 타겟 영역 내에서의 레이저 스팟의 위치, 및 환자의 연령을 포함하는 여러 요인들에 의해 영향을 받을 수 있다.

[0253] 레이저 펄스들의 영향은 넓은 부류의 표적 조직들에서 파라미터들의 고도로 비선형의 함수이다. 그러므로, 동일한 에너지/펄스 를 갖지만 상이한 펄스 지속시간을 갖는 레이저들은 외과적 표적들에 있어서 상이한 결과들에 이를 수 있다. 예를 들면, 특정 에너지/펄스 를 갖는 피코초 펄스들은 안과 조직들에 제어불가능하게 팽창하는 버블들을 생성할 수 있는 반면, 유사한 에너지/펄스 를 갖는 펨토초 펄스들은 제어된 채로 유지되는 버블들을 생성할 수 있다. 따라서, 상기 에너지/펄스 값들은 펨토초 펄스들, 피코초 보다 짧은 길이를 갖는 펄스들을 방출하는 레이저 엔진들에 의해 생성될 수 있다.

[0254] 레이저 빔의 세기 또한 파워로 정량화될 수 있다. 예를 들어, 50 kHz 반복률을 갖는 20 μJ /펄스 레이저는 1 W 파워를 전달한다. 파워의 측면으로 표현하면, 상기 임계 값들은 대응하는 반복률에서 0.1 W, 1 W, 및 10 W로 변환될 수 있다. 따라서, 이러한 임계값들을 넘어서는 파워로 레이저 빔들을 방출할 수 있는 레이저 엔진들은 상이한 기능들을 제공한다.

[0255] 예를 들어, FDA는 의료용 레이저들을 이들의 파워로 분류한다. 레이저 분류 3B는 그 효과들이 널리 연구되었으므로 종종 안과 수술 용도로 이용된다. 0.5 W 미만의 파워를 갖는 빔들을 출력하는 레이저들이 분류 3B에 속한다. 그러므로, 0.5 W 미만의 파워를 갖는 레이저들은 이보다 높은 파워를 갖는 레이저들과는 실질적으로 상이한 응용들을 제공한다.

[0256] 도 6a-6d는 높은 속도로 반복률을 반복할 수 있는 능력을 이용하는 레이저 엔진(1)의 기능을 도시한다. 다양한 응용들에서, 수술용 레이저 빔은 초점에서 광파괴를 발생시키고, 파괴된 영역은 결국 버블로 팽창한다. 초점 스팟이 스캐닝 속도로 레이저 시스템의 스캐닝 광학기기에 의해 스캐닝됨에 따라, 일련의 버블들이 생성된다. 이러한 버블들의 열들은 제어가능한 방식으로 라인들 또는 표면들을 형성할 수 있다. 많은 수의 버블들은 이러한 라인들 또는 표면들을 따라서 표적 조직의 기계적 무결성을 감소시키고, 라인들 또는 표면들을 따라 표적 조직을 손쉽게 분리하는 것이 가능해진다. 실제로, 스캐닝된 레이저 빔은 이러한 라인들 또는 표면들을 따라 표적 조직을 "절개한다".

[0257] 몇몇 대표적인 경우들에서, 이러한 버블들은 지름이 수 마이크론(μ)일 수 있고, 약 10 - 50 μ 이상의 거리만큼 분리되어 있다. 수술 레이저 시스템은 통상적으로, 반복률의 역수인 매 반복 시간마다 한 번씩 버블을 생성한다. 그러므로, 이러한 버블들은 레이저 시스템의 스캐닝 속도가 일정한 한 본질적으로 균등하게 이격되어 있다.

[0258] 버블들은 레이저 펄스에 의해 생성된 후 팽창한다. 다양한 상황들 하에서, 이러한 팽창은 제어되지 않을 수 있다. 이러한 제어되지 않는 버블 팽창은 표적 영역에서 이후의 레이저 펄스들을 강하게 산란시킬 수 있어, 안과 수술의 정확도 및 제어를 약화시킨다. 서로 너무 가까이 버블들을 형성하는 것은, 버블들이 큰 덩어리로 합쳐지게 될 수 있으므로, 이러한 제어되지 않는 팽창의 계기를 중 하나가 된다. 다른 가능한 프로세스들에 수반되는 것으로서, 버블의 팽창이 이후 형성된 버블들의 형성과 간섭할 수 있어, 이를 사이에 크로스-토크가 발생하고, 다시 한번 버블들의 제어되지 않는 팽창이 유발될 수 있다. 그러므로, 스캐닝 중에 미리결정된 버블 간격

을 유지하는 것은, 안과 수술 레이저 시스템들을 위한 베블 팽창에 대한 제어를 유지하기 위해 높은 우선순위를 가질 수 있다.

[0259] 그러나, 초점 스팟의 스캐닝은 통상적으로 미러들 및 갈바노미터들과 같은 이동하는 부분들을 수반한다. 극도로 짧은 반복 시간들이 주어진 경우, 이러한 이동하는 부분들의 최소한의 관성과 기계적인 지연은 베블 밀도들에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 몇몇 수술 패턴들에 따라 스캐닝하는 경우, 스캐닝 속도는 전환 점들과 모서리들에서 느려질 수 있고, 가능하게는 레이저 스팟들 및 베블들의 밀도가 증가될 수 있다. 다른 경우들에서, 수술 패턴의 기하구조는 단순히, 선형의 베블 밀도가 일정하게 유지되더라도 베블들의 면적 밀도를 개선한다.

[0260] 도 6a는 고정된 반복률 레이저가, 표적 조직에서 분리 시트를 생성하기 위해서 스위치백 외과 스캐닝 패턴을 통해 스캐닝하는 경우를 도시한다. 그러나, 반환 또는 스위치백 지점들에 가까워지면, 스캐너는 느려지지만, 도시된 것처럼 반복률은 일정하게 유지되고 따라서 증가된 선형 및 면적 베블 밀도를 생성한다. 이러한 증가된 베블 밀도는 위에서 설명한 것처럼 심각한 제어 문제들을 야기할 수 있다.

[0261] 이러한 기술적 이슈는, 높은 베블 밀도 영역들의 형성을 방지하기 위해 이러한 전환점들에 가까워질 때 레이저 빔을 방해하는 빔 차단기(beam blocker)와 같은 추가적인 엘리먼트들을 포함함으로써 몇몇 기존 레이저 시스템들에서 다루어진다. 그러나, 이러한 빔 차단기들을 포함하는 것은, 레이저 시스템에 추가적인 엘리먼트들을 부가하는 것을 의미하고, 이의 동작은 제어되고 스캐닝과 동기화되어야 한다. 이러한 부가를 모두는, 추가적인 도전과제들을 낳게 되고 더 복잡해짐을 의미한다.

[0262] 스캐닝이 단순히 스캐닝 패턴에서 라인의 끝에 도달할 때에도 유사한 문제들이 발생하여, 다시 스캐닝 속도를 줄이고 선형 베블 밀도가 증가하게 된다.

[0263] 도 6b는 "가속-최소화" 스캐닝 패턴들을 따름으로써 이러한 첨예한 반환 지점들을 피할 수 있음을 보여준다. 가속-최소화 패턴의 예는 어떠한 첨예한 스위치백들도 갖지 않는 나선형이다. 그러나, 나선형 패턴조차도 가속을 줄일 뿐 가속을 없애진 못한다. 그러므로, 이러한 시스템들에서 스캐닝 속도는 여전히 변화하고, 따라서 베블 밀도가 패턴의 최저 속도 부분들에서도 임계값을 넘어 증가하지 않도록 고정된 반복률이 여전히 선택되어야 한다. 그러나 이러한 설계 원리는, 대부분의 패턴에 대해서, 스캐닝 속도가 절개 또는 분리 기능을 달성하기 위해 필요한 베블 밀도를 달성하기 위해 시스템이 지원할 수 있는 것보다 낮음을 의미한다. 동등하게, 보다 높은 스캐닝 속도가 이용되는 경우, 베블들의 간격은 더 작아질 수 있고, 형성되는 베블들 사이에 간섭 또는 크로스-토크가 발생할 수 있다. 이러한 모든 영향들은 제어불가능하거나 비결정적인 베블 팽창의 위험을 증가시킨다.

[0264] 레이저 엔진(1)의 구현들은 이러한 맥락에서 유용한 기능을 제공하도록 설계될 수 있다. 일반적으로 고유한 설계 및 특별하게는 증폭기(300)의 분산 제어기에 의해, 변경되는 스캐닝 속도와 본질적으로 동기화하여 반복률을 변경하는 것이 가능해진다. 몇몇 레이저 엔진들에서, 반복률은 $10 \mu\text{s}$ 내지 1 s 범위, 몇몇 특별한 경우들에서 $1 \mu\text{s}$ 내지 1 s 범위 내의 변경 시간으로 변경될 수 있다. 그러므로 몇몇 구현들은, 표적 영역에서 거의 일정한 베블 밀도를 유지하기 위해 수술 패턴에 따라 스캐닝 속도의 설계 또는 측정된 감소에 따라 레이저 엔진(1)의 반복률을 낮추기 위한 제어 전자기기를 포함할 수 있다. 이러한 거의 일정한 베블 밀도는, 예를 들어 변화하는 스캐닝 속도에 비례하여 반복률을 변경함으로써 달성될 수 있다. 이러한 기능을 이용하면, 레이저 엔진들(1 또는 1')은 거의 균일한 선형 또는 면적 베블 밀도 또는 간격으로 베블들을 형성할 수 있게 되고 따라서 제어되지 않는 베블 팽창을 방지 또는 대응할 수 있다.

[0265] 도 6c는 도 6a의 경우와 동일한 스위치백들을 갖는 스캐닝 수술 패턴을 도시하고, 여기서는 스캔이 스위치백 주변으로 이동함에 따라 반복률이 감소되어, 베블들 사이에 본질적으로 균일한 선형 간격으로 절개가 이루어진다.

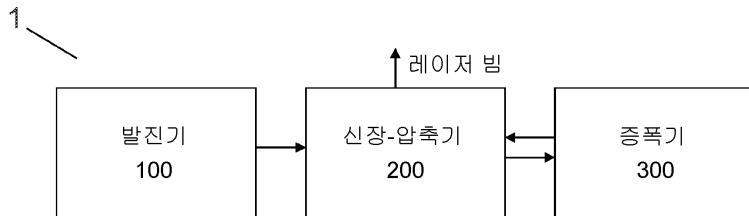
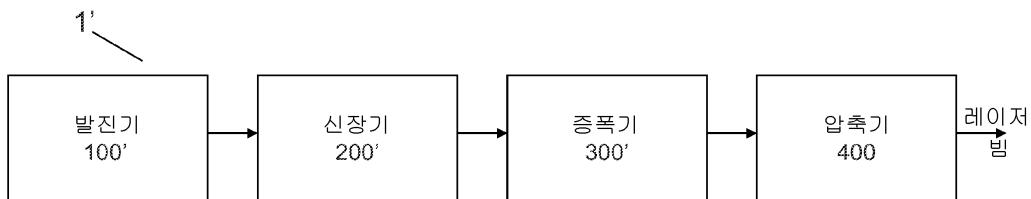
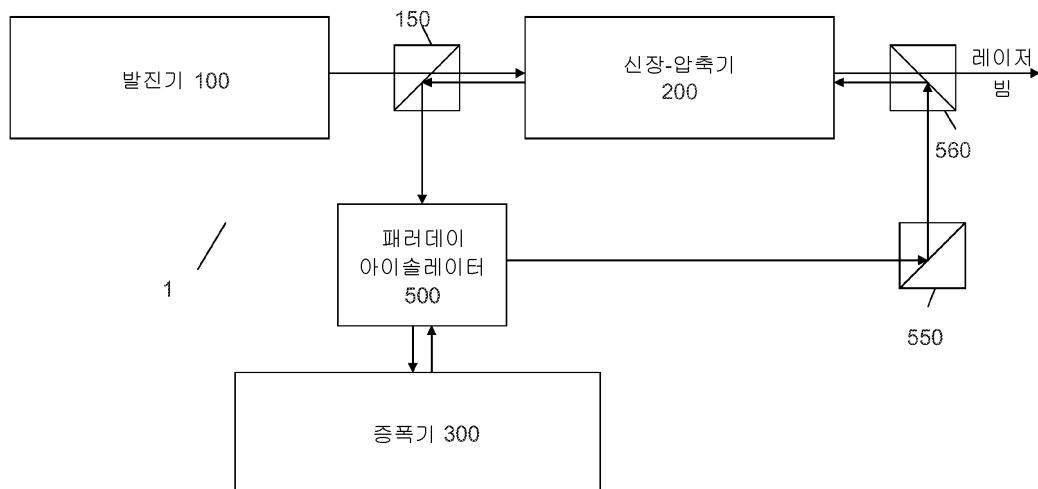
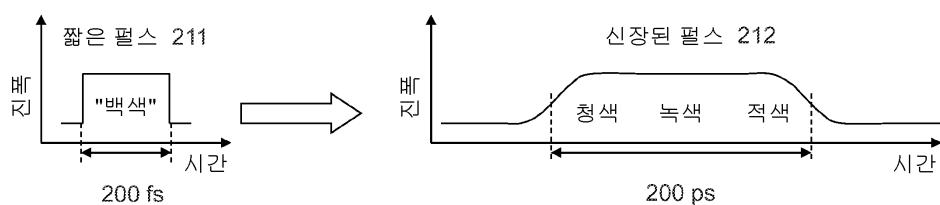
[0266] 도 6d는 나선형이 중심으로 수렴함에 따라 감소된 반복률을 갖는 나선형 수술 패턴을 도시하고, 여기서는 베블들이 이러한 감소가 없다면 서로 너무 근접하게 되었을 것이다. 따라서 이러한 실시예는 다시 본질적으로 균일한 면적 베블 밀도를 생성할 수 있다.

[0267] 물론, 반복률의 신속한 변화는 또한, 일정한 밀도뿐만 아니라 미리결정된 밀도 패턴으로 베블들의 생성을 가능하게 한다. 예를 들어, 눈의 핵(nucleus)은 중심으로 갈수록 더 단단해진다. 그러므로, 몇몇 구현들에서, 베블 밀도는 스캔이 핵의 중심을 가로지를 때 증가될 수 있고, 이후 중심을 통과한 후 감소된다. 많은 수의 상이한 밀도 프로파일들이 상이한 의학적 장점들 및 이점들을 가질 수 있다. 밀도 프로파일은 또한 미리결정된 방식으로 조정되지 않고 표적 영역의 이미징 또는 감지에 응하여 조정될 수도 있다.

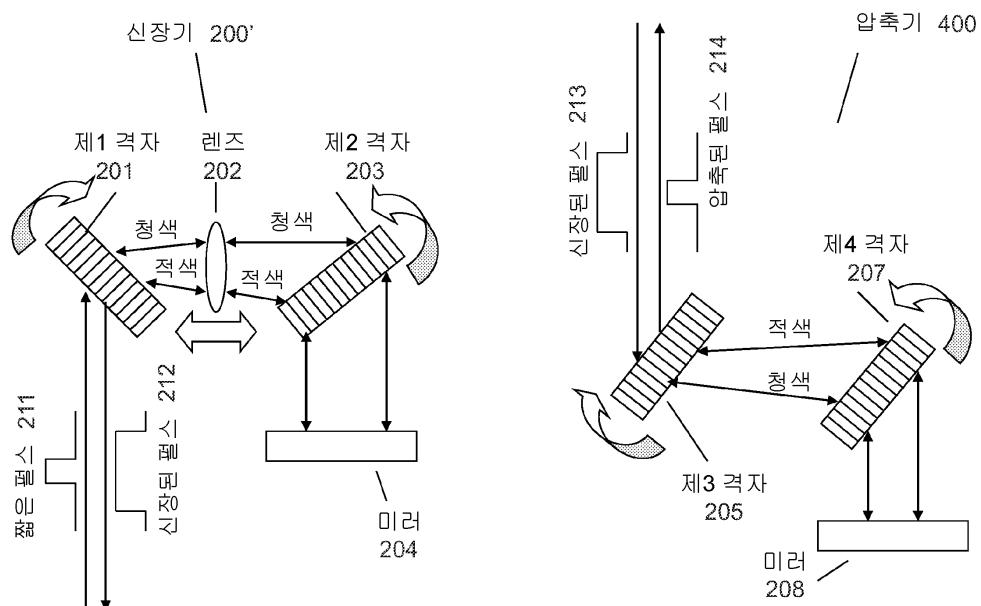
- [0268] 도 7a-7d는 레이저 엔진들이 스캐닝과 본질적으로 동기화하여 반복률을 변경하거나, 적어도 안과 수술의 시간 스케일 내에서, 예를 들면 60-120 초 내에서 반복률을 변경하는데 도움이 되는 또 다른 설계 특징을 도시한다.
- [0269] 도 7a-7b는 열적 렌징이라 불리는 현상과 레이저 설계에 대한 이의 영향을 보여준다. 레이저 크리스탈(310)이 펨프 다이오드들에 의해 펨핑되고 그 후 레이저 펄스를 증폭함으로써 이의 에너지를 전달하는 경우, 온도(T)가 상승한다. 온도(T)는 종종 불균일하게 상승한다: 통상적으로 온도는 펨핑된 중심 영역에서 가장 높고, 가능하게는 광축에서 또는 광축 주변에서 피크를 이루며, 반경방향 거리가 증가함에 따라 감소한다.
- [0270] 이러한 불균일한 온도 상승에는 적어도 2가지 영향들이 있다: (i) 굴절률(n)이 온도와 함께 증가하기 때문에: $n=n(T)$, 굴절률은 레이저 크리스탈(310)의 중심 영역에서 최대값을 나타내고; (ii) 증가하는 온도에 의해 레이저 크리스탈(310)이 주변 영역보다 열적으로 더 광범위하게 팽창하게 되고 따라서 돌출(bulge)하여, 더 차가운 외측 영역에 의해 홀딩된다. 이러한 양자의 효과들은 입사하는 평행 광선들을 포커싱하는 경향이 있다. 이러한 현상은 열적 렌징이라 지칭된다. 이러한 열적 렌징은 레이저 크리스탈을 렌즈(310')로 상정화하는 것에 의해 지칭된다. 열적 렌즈는 약간의 디옵터만큼 굴절을 나타내고 따라서 레이저 엔진의 성능을 실질적으로 변화시킬 수 있다.
- [0271] 도 7a의 도시에 따르면, 레이저 엔진의 설계는 통상적으로, 동작 반복률 및 빔 파워에 의해 결정되는, 동작 온도 T=Top에서 레이저 크리스탈에 의한 열적 렌징의 굴절 효과들을 결정하는 것과 레이저 엔진의 다른 광학 엘리먼트들을 통해 열정 렌징에 대한 굴절 보상을 도입하는 것을 수반한다. 예를 들면, 열적 렌즈(310')에 의해 포커싱된 후 수렴하는 빔을 평행 빔으로 복원할 수 있는 추가적인 렌즈(312)를 도입하는 것이다.
- [0272] 도 7b는 이러한 굴절 보상이 특정 동작 온도 T=Top, 따라서 특정 반복률 및 빔 파워에만 적합하다는 점을 보여준다. 실제로, 응용이 반복률 또는 파워의 변경을 요구하는 경우, 변경된 반복률 및/또는 변경된 파워는 레이저 크리스탈(310)의 온도(T)를 T=Top에서 T=Top'으로 변경시킨다. 이러한 온도 변화는 열적 렌즈에 의한 포커싱을 변화시키고(점선들로 표현된 수렴하는 빔으로부터 실선으로 표시된 빔으로), T=Top에서 평행했던 빔을 변환하여 T=Top'에서 발산하도록 하며, 따라서 더 좋지 못한 수렴 특성들을 가진다.
- [0273] 도 7b는 또한, 수렴 특성들이 굴절 보상을 조정하는 것에 의해 복원될 수 있음을 도시한다. 굴절 보상의 변경은 통상, 레이저 엔진의 하나 또는 그 초과의 광학 엘리먼트를 조정하는 것, 예를 들어 렌즈를 이동시키거나, 격자를 회전시키거나, 광축에 대해 빔을 이동시키는 것을 요구한다. 도 7b는 화살표로 표시된 것처럼, 광축을 따른 보상 렌즈(312)의 조정을 보여준다. 이전의 분산 보상의 경우와 유사하게, 기계적 조정들을 통한 이러한 굴절 보상은 또한 느리고, 미세한 튜닝과 교정을 요한다. 그러므로, 대부분의 레이저들은 이러한 과정을 전적으로 회피하고, 반복률의 변경을 허용하지 않는다. 변경가능한 반복률을 제공하는 레이저들의 경우에도, 이러한 반복률은 레이저 엔진들의 스캐닝과 거의 동시에 변경될 수 없고, 안과 수술 시간 내에서도 변경될 수 없는 데, 이는 보상 광학 엘리먼트들의 조정이 느리기 때문이다.
- [0274] 도 7c-7d는 열적 렌징의 효과를 최소화하기 위해 다양한 설계 원리들을 채용하는 레이저 엔진(1)의 구현들을 도시한다. 열적 렌즈(310')에 의한 굴절은, 대부분의 광선들 또는 모든 광선들이 열적 렌즈(310')의 중심을 통해 전파되거나 이러한 중심에 매우 근접하여 전파되는 경우 상당한 정도로 감소될 수 있는데, 이는 렌즈의 중심을 가로지르는 광선들이 기하학적 광학 근사의 레벨에서 볼 때 굴절되지 않기 때문이다. 파동 광학의 레벨에서 볼 때, 그리고 렌즈의 유한한 크기를 포함하는 경우, 이러한 중심 광선들은 굴절되지만, 단지 최소한의 정도로 굴절된다.
- [0275] 도 7c의 도시에 의하면, 예를 들어 (i) 포커싱 효과를 갖는 엔드-미러(322)의 실시예를 이용하고; (ii) 포커싱 엔드-미러(322)로부터의 대부분의 광선들이 열적 렌징 레이저 크리스탈(310/310')의 중심에 충돌하도록 열적 렌징 레이저 크리스탈(310/310')을 포커싱 엔드-미러(322)의 초점에 매우 근접하게 배치함으로써; (iii) 발산되는 것 대신에 빔이 다시 반사되도록 나머지 엔드-미러(321) 또한 포커싱 엔드-미러(322)의 초점, 따라서 렌징 결정(310)에 매우 근접하게 배치함으로써, 광선들은 렌즈의 중심에 충돌하도록 압축될 수 있다. 이러한 설계들에서는, 반복률 또는 빔의 파워가 변경되어 레이저 크리스탈(310)의 온도가 T=Top에서 T=Top'으로 변경될 때, 레이저 크리스탈(1)의 임의의 기계적 또는 광학 엘리먼트를 재조정할 필요가 없게 되고, 이는 레이저 크리스탈(310)의 굴절 효과가 최소화되기 때문이다. 따라서, 반복률 또는 빔의 파워는 굴절 보상기의 어떠한 대응하는 조정 없이도 변경될 수 있다.
- [0276] 도 4를 참조하면, 다양한 실시예들에서 엔드-미러들 및 폴딩-미러들(321-324) 중 하나 또는 둘 이상이 상기 포커싱 효과를 가질 수 있다.

- [0277] d1, 엔드-미러(321)와 렌징 결정(310)의 거리, 렌징 결정(310)과 포커싱 엔드-미러(322)의 거리, 및 다른 파라미터들, 예를 들어 개구부들, 렌징 결정(310)의 두께, 및 포커싱 엔드-미러(322)의 반지름을 포함하여, 이러한 실시예의 설계 파라미터들은 상기 감소된 열적 렌징을 추가로 최소화하기 위해 최적화될 수 있다.
- [0278] 도 7d는 관련된 설계를 도시한다. 이러한 실시예에서는 엔드-미러(321 및 322) 모두가 포커싱 유형이다. 이러한 예의 경우, 레이저 크리스탈(310)이 2개의 엔드-미러들의 공유된 초점 내에 보다 정밀하게 배치될 수 있으므로 열적 렌징을 더 감소시킨다. 나머지 파라미터들도 추가적인 설계 최적화의 대상이 될 수 있다.
- [0279] 도 8은 레이저 엔진(1)에서 열적 렌징 억제의 정량적인 특징을 보여준다. 수평 축은 주변 온도 Tambient에 대한 결정의 중심의 동작 온도 Toperating=Top의 비율을 보여준다. 수직 축은 레이저 엔진(1)에 의해 방출되는 레이저 빔의 광 파워를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있는 것처럼, 렌징 동작이 레이저 엔진을 주변 온도보다 10 내지 50% 가열하더라도, 광 파워는 단지 몇 %만큼만 변화하여, Toperating/Tambient=150%에서 약 10%에 도달한다. 레이저 크리스탈(310)의 광 파워는 넓은 범위의 동작 온도에 걸쳐 매우 작게 변화하는데, 이는 레이저 크리스탈(310)의 열적 렌징의 굴절 효과가 도 7c 및 7d의 설계들에 의해 효율적으로 최소화되기 때문이다.
- [0280] 상기 상세한 설명은 발진기(100) 외부의 광학 엘리먼트들을 조정할 필요 없이 반복률을 변경하는 기능을 달성하기 위해 이용될 수 있는 설계 원리들 및 예들을 제공하며, 이는 상기 다른 설계 고려사항들 뿐만 아니라, (i) 증폭기(300) 내부에서 분산 보상을 이용하는 것; (ii) 통합된 신장-압축기(200)를 이용하는 것; 및 (iii) 열적 렌징을 최소화하는 캐비티 아키텍처들을 이용하는 것을 포함한다. 상기 설계 특징들 중 하나 또는 둘 이상 또는 이와 유사한 것들을 이용하는 레이저 엔진들은 변경 시간 내의 반복률 범위 내에서 반복률의 변경을 가능하게 할 수 있어, 단지 제한된 레이저 빔 설정을 일으키게 된다.
- [0281] 여기서 반복률 범위는 10 kHz 내지 2 MHz, 또는 50 kHz 내지 1 MHz, 또는 100 kHz 내지 500 kHz일 수 있고, 이러한 범위들 각각은 특정 기능들을 제공한다.
- [0282] 변경 시간은 다중 단계 안과 수술의 시간 스케일, 예를 들어 수술의 유형에 따라 1 내지 120 초, 또는 10 내지 60 초 또는 20 내지 50 초의 범위일 수 있다. 이러한 범위의 변경 시간을 갖는 레이저 엔진들은 제1 수술 절차를 위해 필요한 반복률에서 제2 수술 절차를 위해 필요한 반복률로 스위칭하도록 반복률의 변경을 지원할 수 있다.
- [0283] 도 6a 내지 6d와 관련하여 기술된 실시예들과 같은 다른 경우들에서, 변경 시간은 레이저 시스템의 스캐닝 속도에 의해 설정된 시간 스케일, 예를 들어 다수의 변경 시간들(여기서, 다수는 1 내지 10,000, 또는 100 내지 1,000의 범위일 수 있음)일 수 있다. 반복 시간이 10 kHz에서 약 100 마이크로초(100 μ s)이고 1 MHz에서 1 μ s 이므로, 이러한 "스캐닝-변경 시간들" 또는 "스캐닝-동기식 변경 시간들"은 1 μ s 내지 1 초 범위 내일 수 있다.
- [0284] 몇몇 구현들에서 버블들의 선형 밀도는, 스캐닝 속도와 반복률의 비율이 본질적으로 일정하게 유지되도록 스캐닝 속도의 변경에 응하여 반복률을 변경함으로써 보존된다.
- [0285] 레이저 빔은 반복률 변경에 의해 제한된 정도로 수정될 수 있다. 이러한 수정은 다양한 방식들로 캡쳐될 수 있는데, 여기에는: (i) 빔 지름이 10% 또는 20% 미만만큼 변경되거나; 또는 (ii) 빔의 중심이 빔 지름의 20% 또는 40% 미만만큼 이동하는 것이 포함된다. 여기서 빔 지름은 다양한 방식들로 정의될 수 있는데, 예를 들면 빔의 세기가 빔의 중심에서의 세기의 50%로 줄어드는 지름이다. 다른 정의들도 이용될 수 있다.
- [0286] 일례로서, 100 kHz의 반복률과 3 미크론의 초점 스팟에서의 빔 지름으로 레이저 빔을 방출할 수 있는 레이저 엔진(1)이 있는데, 여기서 레이저 빔의 반복률은 15초의 변경 시간 내에 발진기(100)만을 조정함으로써 150 kHz로 변경될 수 있고, 이러한 상당한 변경에도 불구하고, 빔은 단지 제한된 정도로만 수정된다: 초점 스팟 지름은 단지 15%만큼 3.45 미크론으로 변경되고, 이의 중심은 단지 빔 지름의 30%만큼, 즉 0.9 미크론만큼 광축에 대해 이동한다. 이러한 레이저 엔진은 100 kHz 반복률로 백내장 수술을 수행하는데 이용될 수 있고, 반복률을 15초 내에 150 kHz로 변경하여, 150 kHz 반복률로 이후 각각 수술을 수행하는데 다시 이용될 수 있고, 전체 수술은 불과 100 또는 120 초가 소요되는 한편, 매우 양호한 빔 품질을 유지하게 된다.
- [0287] 다른 예에서, 레이저 엔진(1)은 100 kHz 반복률과 4 미크론의 빔 지름으로 레이저 빔을 방출할 수 있다. 스캐닝 속도가 통상적인 스캐닝 속도의 절반으로 감소하는 수술 패턴의 첨예한 스위치백에 스캐닝이 접근할 때, 이에 따라 생성된 버블들 또는 스팟들의 거의 일정한 선형 밀도를 유지하도록 반복률도 그 값의 절반으로, 즉 100 kHz에서 50 kHz로 점진적으로 감소될 수 있다. 이러한 감소가 예를 들어 100 kHz 반복률의 10회 반복 내에 수행되는 경우, 반복률 변경의 전체 시간은 약 100 μ s이다.

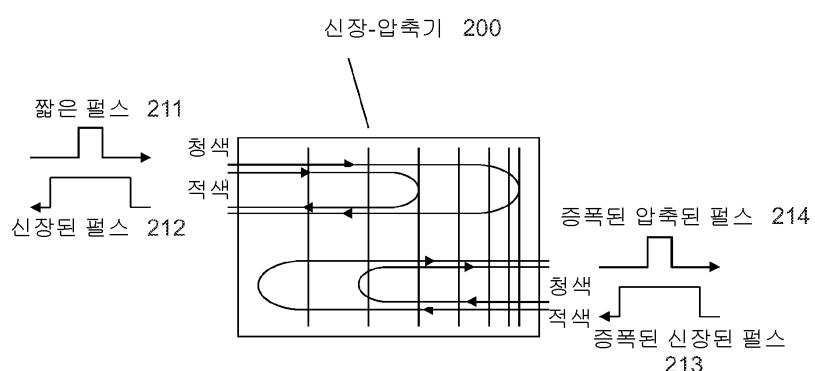
- [0288] 반복률은 여러 단계들로 또는 점진적으로 변경될 수 있고, 최종적인 결과는 반복률이 레이저 범의 스캐닝 시간 스케일의 변경과 거의 동시에, 약 100 μ s 내에 100 kHz에서 50 kHz로 변경되는 것이다. 레이저 엔진(1)의 설계는 높은 레이저 범 품질을 유지하면서 이러한 현저히 신속한 시간으로 반복률을 변경할 수 있게 한다. 예를 들면, 레이저 범 지름은 100 kHz에서 4 미크론일 수 있고, 반복률이 50 kHz로 감소함에 따라 범 지름은 단지 10% 만큼 3.6 미크론으로 변경되며, 레이저 범의 중심은 범 지름의 단지 20% 만큼, 즉 0.8 미크론 만큼 광축으로부터 멀어지도록 이동한다.
- [0289] 레이저 엔진(1)이 어떻게 반복률을 변경하면서 높은 범 품질을 유지할 수 있는지를 보여주는 또 하나의 방법은, 공지된 g1 - g2 안정성 평면과 관련된다. 레이저 엔진(1)의 구현들은 넓은 범위의 반복률들, 예를 들면 10 kHz 내지 2 MHz, 또는 10 kHz 내지 500 kHz, 또는 50 kHz 내지 200 kHz 범위에서, 범 파라미터들 g1 및 g2를 쌍곡선 안정성 영역 내에서 유지할 수 있다.
- [0290] 적은 수의 광학 엘리먼트들은 또 다른 유리한 입장에서 레이저 엔진(1)의 구현들의 주요한 구별되는 특징일 수 있다. 일반적으로 펨토초 레이저들은 최첨단 디바이스들로서, 주변의 영향들, 사용설명과 다른 용법, 및 간단한 마모, 예를 들면 자체-가열 효과에 매우 민감하고 이에 의해 손쉽게 오정렬된다. 그러므로, 펨토초 레이저들의 광학 엘리먼트들은 통상적으로 짧은 시간 간격으로 미세한 튜닝, 재조정 및 유지보수를 요할 수 있다. 통상적인 펨토초 레이저들은 100개 이상의 광학 엘리먼트들을 포함할 수 있고, 이러한 광학 엘리먼트들 중 임의의 것의 오작동은 전체 레이저의 오작동을 유발할 수 있다.
- [0291] 몇몇 전형적인 레이저들은 30 내지 60 "사이클링", 즉 레이저 엔진의 파워의 스위칭 온 및 스위칭 오프마다 자주 오작동할 수 있다. 동작 시에 오작동들이 발생하는 것을 방지하기 위해서, 몇몇 레이저 시스템들의 오퍼레이터들은 정규적이고 비용이 드는 유지보수 방문들을 계획해야 하고, 이는 모두 부대 비용들 및 정지 시간들을 갖게 되고, 과격적인 결과들을 갖는 인-시튜 오작동을 하게 될 위험이 여전히 높을 수 있다.
- [0292] 대조적으로, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 레이저 엔진(1)의 어떠한 광학 엘리먼트도 재조정할 필요 없이 파워를 스위칭 온 및 오프함으로써 120회를 넘게 사이클링될 수 있다. 몇몇 실시예들에 대해, 사이클들의 수는 180 또는 240회를 초과할 수 있다.
- [0293] 외과 수술들에서, 레이저 크리스탈(310)의 가열 및 냉각과 연관된 문제들을 최소화하기 위해서, 종종 레이저는 아침에 한번 스위칭되고 단지 저녁에 스위치 오프되며, 즉 수술 레이저들은 하루에 한번 사이클링된다. 단순히 추산하면, 레이저들이 일주일에 5회, 대략적으로 한 달에 20회 사용되는 경우, 30 사이클링은 1.5 개월 이후 높은 오작동의 확률에 해당할 수 있고, 60 사이클링은 3 개월에 해당할 수 있다.
- [0294] 대조적으로, 레이저 엔진(1)의 몇몇 구현들은, 120 회가 넘게 사이클링될 수 있고, 이는 6개월 동안 낮은 오작동 확률에 해당한다. 다른 구현들은 180 또는 240회 사이클링될 수 있으며, 이는 1년 동안 낮은 오작동 확률에 해당한다. 그러므로, 레이저 엔진(1)의 실시예들은 사용자 및 서비스 제공자에게 본질적으로 부담을 덜 주는 예방적인 유지보수 스케줄에 의해 작동될 수 있다. 또한, 이러한 낮은 빈도의 유지보수 스케줄은 상이한 유형의 유지보수, 예를 들면 레이저 시스템의 전체 부분들의 교체를 가능하게 한다. 몇몇 경우들에서, 전체 레이저 엔진(1)은 현장에서 방금 유지보수된 것으로 단순하게 교체될 수 있고, 레이저 엔진(1)의 유지보수는 외과 수술 수행자의 보다 낮은 기술적 환경 대신에, 서비스 제공자 기반의 높은 기술적 환경에서 이루어질 수 있다.
- [0295] 본 문헌은 많은 세부사항들을 포함하고 있지만, 이러한 것들은 발명 또는 청구될 수 있는 것의 범위를 제한하는 것으로 해석되어서는 안 되고, 오히려 본 발명의 특정 실시예들에 특정된 특징들에 대한 설명으로 해석되어야 한다. 별개의 실시예들의 문맥에서 본 문헌에서 설명되는 몇몇 특징들은 또한 단일한 실시예에서 조합하여 구현될 수 있다. 역으로, 단일한 실시예의 문맥에서 기술된 다양한 특징들은 또한 다수의 실시예들에서 별개로 또는 임의의 적합한 서브조합으로 구현될 수 있다. 나아가, 특징들은 위에서 특정 조합들로 작용하는 것으로 기술될 수 있고 이처럼 최초 청구될 수 있지만, 청구된 조합으로부터의 하나 또는 그 초과의 특징들은 몇몇 경우들에서 조합으로부터 배제될 수 있고, 청구된 조합은 서브조합 또는 서브조합의 변형물로 지향될 수 있다.
- [0296] 이미징-가이드 레이저 수술 기술들, 장치 및 시스템들의 다수의 구현들이 개시되었다. 그러나, 설명한 것에 기초하여 개시된 구현들 및 다른 구현들의 변형들 및 개선들이 이루어질 수 있다.

도면**도면1a****도면1b****도면2****도면3a**

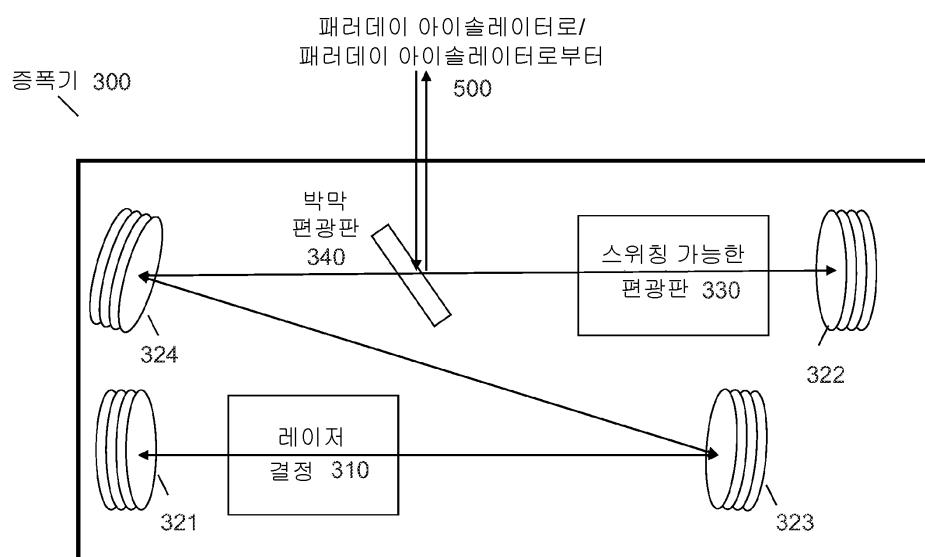
도면3b



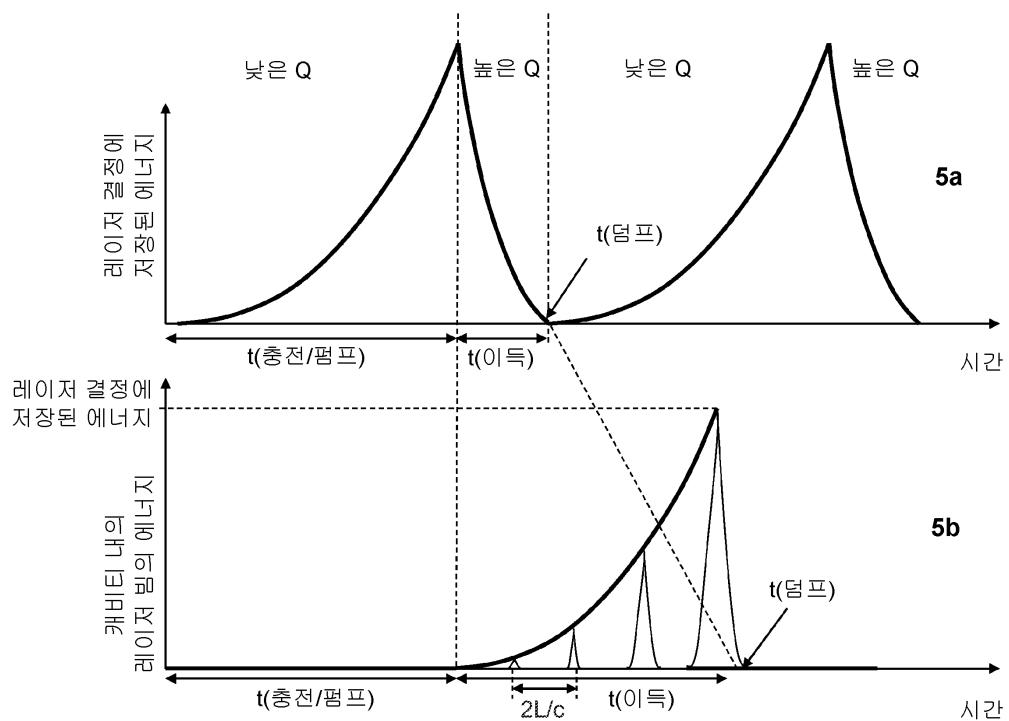
도면3c



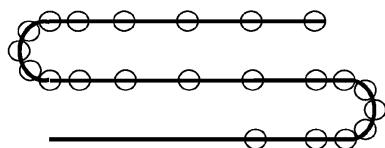
도면4



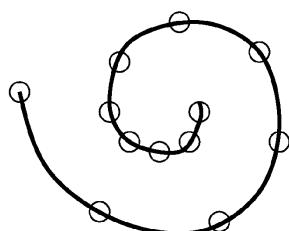
도면5



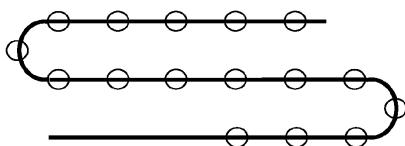
도면6a



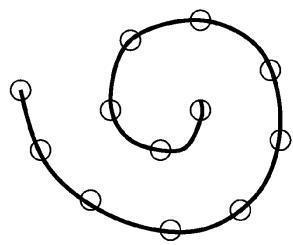
도면6b



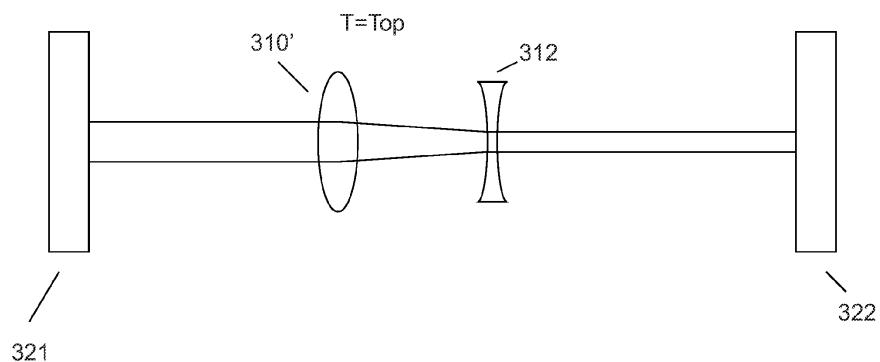
도면6c



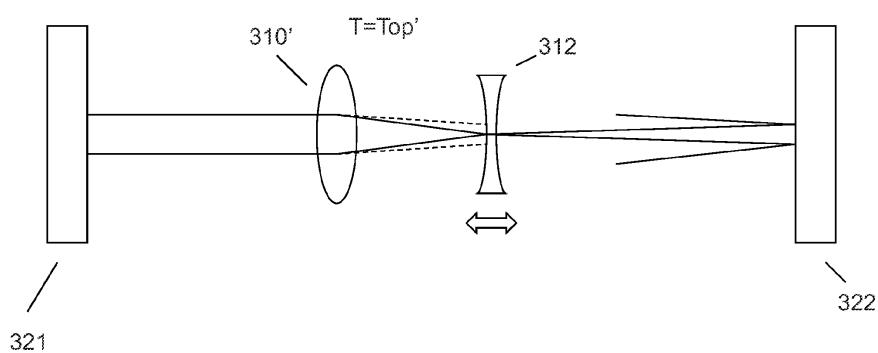
도면6d



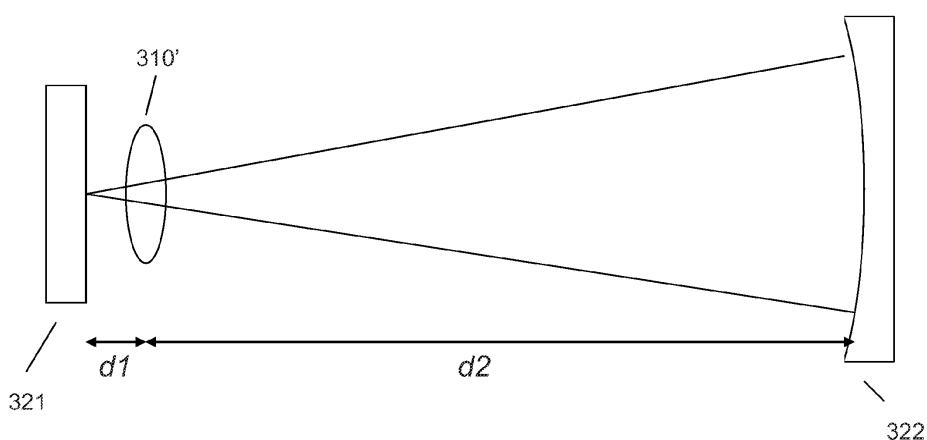
도면7a



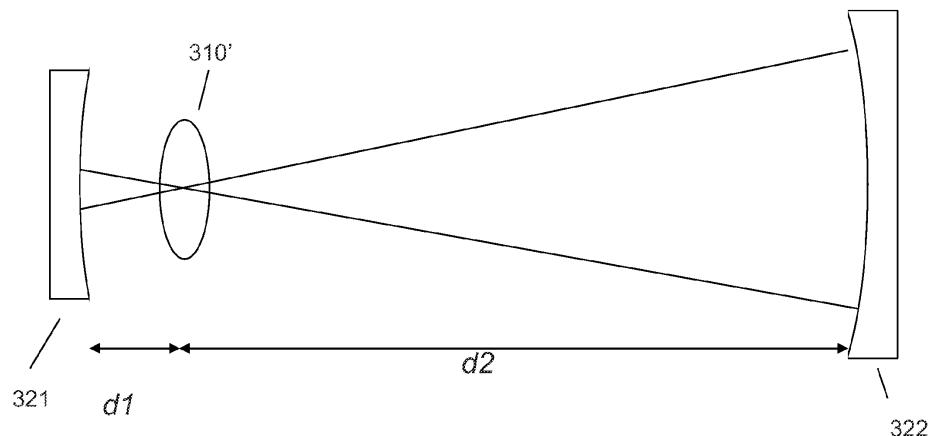
도면7b



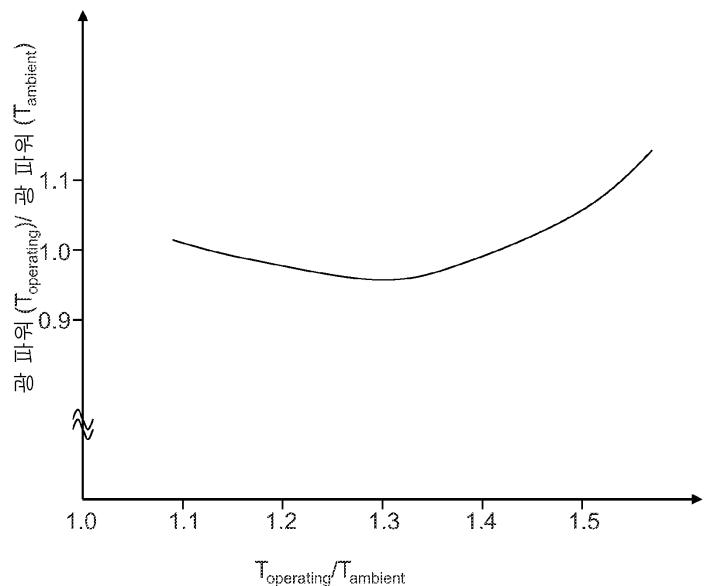
도면7c



도면7d



도면8



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 37

【변경전】

상기 전자-광학적 스위칭가능한 편광판을

【변경후】

전자-광학적 스위칭가능한 편광판을