



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 공개특허공보(A)**

(11) 공개번호 10-2019-0099318  
(43) 공개일자 2019년08월26일

- |   |   |
|---|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)<br/>H01S 3/109 (2006.01) G01J 11/00 (2006.01)<br/>H01S 3/00 (2019.01) H01S 3/08 (2006.01)<br/>H01S 3/11 (2006.01) H01S 3/16 (2006.01)</p> <p>(52) CPC특허분류<br/>H01S 3/1095 (2013.01)<br/>G01J 11/00 (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2019-7022386</p> <p>(22) 출원일자(국제) 2018년01월05일<br/>심사청구일자 없음</p> <p>(85) 번역문제출일자 2019년07월30일</p> <p>(86) 국제출원번호 PCT/US2018/012559</p> <p>(87) 국제공개번호 WO 2018/129297<br/>국제공개일자 2018년07월12일</p> <p>(30) 우선권주장<br/>62/442,629 2017년01월05일 미국(US)</p> | <p>(71) 출원인<br/>아이피지 포토닉스 코포레이션<br/>미합중국 메사추세츠 01540 옥스포드 올드 웹스터 로드 50</p> <p>(72) 발명자<br/>바실예브 세르게이<br/>미국 01540 메사추세츠주 옥스포드 올드 웹스터 로드 50 아이피지 포토닉스 코포레이션 내</p> <p>(74) 대리인<br/>양영준, 윤정호</p> |
|---|---|

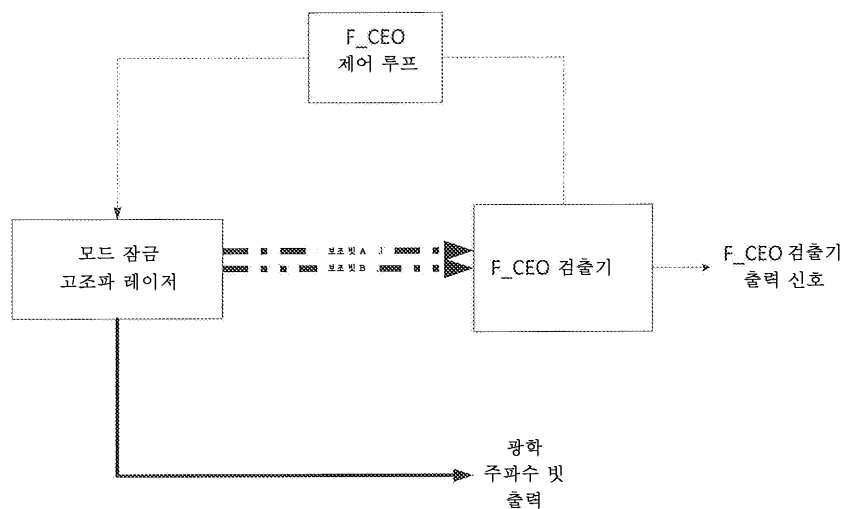
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 **캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출을 동반한 광학 주파수 빔 발생기**

**(57) 요약**

본 발명은 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 검출하기 위해 모드 잠금 레이저에서 자가 생성된 광학 고조파를 동반한 광학 주파수 빔 생성을 위한 시스템 및 방법을 제공한다. 모드 잠금 레이저는 광학 주파수 빔과 고조파 출력을 출력한다. 고조파 출력은 광학 헤테로다인을 제공하여 검출 가능한 비트 노트를 생성한다. 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는 비트 노트를 검출하고 광학 주파수 빔 신호를 생성한다. 이 신호는 광학 주파수 빔 출력을 안정화시키는 데 사용될 수 있다.

**대표도** - 도8



(52) CPC특허분류

*H01S 3/0014* (2013.01)

*H01S 3/0092* (2013.01)

*H01S 3/08086* (2013.01)

*H01S 3/1112* (2013.01)

*H01S 3/1628* (2013.01)

*H01S 3/1685* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

광학 주파수 빔 발생기 시스템이며,

기본 광학 주파수 빔 스펙트럼 내에서 발진하고 광학 주파수 빔 출력 및 헤테로다인 출력을 동시에 발생시키는 모드 잠금 레이저로서, 헤테로다인 출력은 제1 보조 광학 주파수 빔으로부터의 제1 광학 성분 및 제2 보조 광학 주파수 빔으로부터의 제2 스펙트럼 성분을 포함하고, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔 중 적어도 하나는 기본 광학 주파수 빔의 광학 고조파를 포함하고, 광학 주파수 빔 출력은 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 특징으로 하며, 모드 잠금 레이저는 레이저 펌프 소스 및 펨토초(fs) 발진기를 포함하는, 모드 잠금 레이저; 및

제1 및 제2 스펙트럼 성분을 수신하고 검출하도록 구성된 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기로서, 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성하도록 추가로 구성되는, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기를 포함하는, 시스템.

#### 청구항 2

제1항에 있어서, fs 발진기는 비선형 레이저 매체로 구성되고, 모드 잠금 레이저는 광학 주파수 빔 출력을 생성하고, 비선형 레이저 매체에서 적어도 하나의 광학 고조파를 자가 생성하는, 시스템.

#### 청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서, 모드 잠금 레이저는 레이저 출력이 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 비트 노트 주파수를 갖는 광학 헤테로다인을 더 포함하도록 동작하고, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 검출하는, 시스템.

#### 청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔은 부분적으로 스펙트럼적으로 중첩되는, 시스템.

#### 청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔은 기본 및 임의의 다른 고조파 광학 주파수 빔을 포함하는, 시스템.

#### 청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔은 임의의 2개의 별개의 고조파 광학 주파수 빔을 포함하는, 시스템.

#### 청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔이 중첩되도록 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔의 적어도 하나를 확장하도록 동작하는 적어도 하나의 스펙트럼 확장 요소를 더 포함하고, 스펙트럼 확장 요소는 fs 발진기와 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기 사이에 위치되는, 시스템.

#### 청구항 8

제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서, 모드 잠금 레이저는 하나 이상의 광학 고조파에서 증가된 출력을 위해 맞춤형된 공진기 공동을 더 포함하는, 시스템.

#### 청구항 9

제1항 내지 제8항 중 어느 한 항에 있어서, 헤테로다인 출력의 스펙트럼 콘텐츠를 수정하도록 구성된 적어도 하

나의 스펙트럼 필터를 더 포함하는, 시스템.

**청구항 10**

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 제어하고 그에 의해 광학 주파수 빔 출력을 안정화시키는데 사용되는 신호를 제공하도록 구성되는, 시스템.

**청구항 11**

제1항에 있어서, 모드 잠금 레이저는 높은 2차 및 3차 차수 비선형성 및 다결정 구조를 갖는 TM:II-VI 유형 재료로 구성된 커-렌즈 모드 잠금 중간 IR fs 발진기를 더 포함하며, 레이저 발진기는 무작위 준-위상 매칭 프로세스를 통해 3개 파 혼합을 제공하는, 시스템.

**청구항 12**

광학 주파수 빔 출력 및 헤테로다인 출력을 갖는 모드 잠금 레이저 기반 시스템으로서, 광학 주파수 빔 출력은 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 특징으로 하는 시스템에서, 광학 주파수 빔을 제공하는 방법이며,

모드 잠금 레이저로 광학 주파수 빔 출력 및 헤테로다인 출력을 동시에 생성하는 단계;

헤테로다인 출력에서 각각의 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔의 스펙트럼 성분 사이의 비트 노트를 검출하는 단계; 및

검출된 비트 노트에 기초하여 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성하는 단계를 포함하는, 방법.

**청구항 13**

제12항에 있어서, 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 측정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

**청구항 14**

제12항에 있어서, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기로 비트 노트를 검출하는 단계; 및

캐리어 포락선 오프셋 주파수를 안정화시키기 위해 캐리어 포락선 오프셋 주파수 제어 시스템에 캐리어 포락선 오프셋 주파수 신호를 제공하는 단계를 더 포함하는, 방법.

**청구항 15**

자가 생성 고조파 출력을 갖는 커 렌즈 모드 잠금 중간 IR 다결정 Cr:ZnS 발진기 기반 레이저 시스템에서 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 검출하는 방법이며,

Cr:ZnS 재료 내에서 직접적으로 하나 이상의 광학 고조파 및 광학 주파수 빔 출력을 동시에 생성시키는 단계;

하나 이상의 광학 고조파 중 적어도 하나를 포함하는 각각의 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빔의 제1 스펙트럼 성분과 제2 스펙트럼 성분 사이의 헤테로다인 비트 노트를 검출하는 단계; 및

검출된 비트 노트에 기초하여 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성하는 단계를 포함하는, 방법.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 개시내용은 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출을 동반한 신규한 광학 주파수 빔 발생기에 관한 것이다. 특히, 실시예는 높은 비선형 특성을 갖는 다결정 레이저 재료를 사용하여 광학 고조파뿐만 아니라 모드 잠금 레이저 체제에서의 광학 주파수 빔 생성을 동시에 제공할 수 있다. 비선형 주파수 변환 결정이 제거되어 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출이 단순화된다.

**배경 기술**

- [0002] 최근 광학 주파수 빛의 출현은 분광학, 계측학, 시간 관리 분야에 혁명을 일으켰다[예를 들어, T. W. Haensch, "Nobel lecture: Passion for precision"(Rev. Mod. Phys. 78, 1297(2006)) 및 J. L. Hall, "Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies"(Rev. Mod. Phys. 78, 1279 (2006)) 참조]. 현재 광학 주파수 빛의 대부분은 모드 잠금 펄스 레이저를 기반으로 한다. 모드 잠금 펄스 레이저(이하 "fs 발진기") 출력은 짧은 광학 펄스의 주기적 트레인으로 구성된다. 본 개시내용의 목적을 위해, 기본 fs 발진기 출력 주파수는  $f$ , 주파수 2배 출력  $2f$ , 3배  $3f$  등으로 언급될 수 있다.
- [0003] 모드 잠금 펄스 레이저에 의해 방출된 광학 펄스의 트레인을 도시하는 도 1의 (a)에 도시된 바와 같이, 캐리어 광학 파(실선)는 펄스 반복 주파수( $f_{rep}$ )에서 주기적 펄스 포락선(점선)에 의해 변조된다. 또한, 이 예에서  $\Delta\phi_{CE} = \pi/2$ 인 펄스 대 펄스 캐리어 포락선 위상 슬립이 도시되어 있다. 도 1의 (b)를 참조하면, 등가 주파수 도메인 표현(도 1a의 신호의 푸리에 변환)은 빛의 공통 오프셋을 갖는 등간격 스펙트럼 성분의 빛을 나타낸다 ( $f_{CEO} = f_{rep} \times (\Delta\phi_{CE}/2\pi)$ ). fs 발진기의 시간 평균 주파수 도메인 출력은 다음과 같은 간단한 공식으로 설명된다:  $f_n = n \times f_{rep} + f_{CEO}$ , 여기서  $n$ 은 정수 모드 인덱스이다.
- [0004] fs 발진기의 광학 출력은 파라미터( $f_{rep}$  및  $f_{CEO}$ )가 측정되고 제어되면 주파수 빛으로 분류된다.  $f_{rep}$ 의 측정 및 제어 기술은 현재 잘 개발되어 있다. 다른 한편, fs 발진기의  $f_{CEO}$ 의 측정 및 제어를 위한 신뢰할 수 있는 방법이 제안된 것은 겨우 1999년이였다. 일반적으로, 이들 기술은 기본 빛( $f$ )의 그 2차 고조파( $2f$ )( $f-2f$  간섭 측정) 또는 차주파수 생성( $0-f$  간섭 측정)과의 헤테로다이닝 또는 인접한 두 광학 고조파(예를 들어,  $2f-3f$  간섭 측정)의 헤테로다이닝에 기반하기 때문에 비선형 간섭계라고 지칭된다.
- [0005]  $f_{CEO}$ 의 측정을 위한 주요 전제 조건은 (i) 두 빛의 스펙트럼 중첩, (ii) 두 빛의 공간 중첩 및 (iii) 두 빛의 시간 중첩이다. 비선형 간섭계의 일반적인 체계는  $f_{CEO}$  검출을 위한 이러한 전제 조건을 충족한다. 전제 조건 (i)는 넓은 스펙트럼 기본 주파수 빛을 가진 fs 발진기의 사용 또는 기본 주파수 빛의 스펙트럼 확장(SB)을 위한 추가 장치(예를 들어, 특수 설계된 광섬유)의 사용에 의해 충족된다.
- [0006]  $f-2f$  간섭 측정에서의 스펙트럼 중첩은 도 2에 도시된다. 상부 그래프는 스펙트럼 성분( $f_n = f_{CEO} + n f_{rep}$ )과 그 옥타브( $f_{2n} = f_{CEO} + 2n f_{rep}$ )를 포함하는 기본 주파수 빛을 도시한다. 하부 그래프는 스펙트럼 성분( $2f_n = 2f_{CEO} + 2n f_{rep}$ )을 포함하는 주파수 2배 빛을 도시한다. 측정 가능한  $f_{CEO}$ 는 스펙트럼이 중첩하는 전제 조건 (i)를 충족하는 옥타브 주파수와 2배 주파수 사이의 증분으로서 도시되어 있다. 비선형 간섭 측정의 다른 경우에 대해서도 유사한 고려가 이루어진다.
- [0007] 비선형 간섭계가 도 3에 도시되며, 여기서, fs 발진기는 SB를 사용하여 확장될 수 있는 기본 빛을 생성한다. 그 다음, 기본 빛은 빔 스플리터(BS)로 2개의 부분으로 나누어지고 비선형 간섭계의 2개의 다리를 통해 보내진다. 각 다리는 기본 빛( $f$ )을 하나의 다리에서 그  $n$ 차 광학 고조파( $nf$ )로, 다른 다리에서 인접 고조파( $(n-1)f$ )로 비선형 변환하는 장치를 포함할 수 있다.  $f-2f$  간섭 측정의 가장 단순한 경우에, 2차 고조파로의 하나의 비선형 변환기로 충분하다. 간섭계의 2개의 다리는 그 후 제2 빔스플리터(BS)를 사용하여 재조합되고 공간 중첩의 전제 조건 (ii)가 충족된다. 시간적 중첩의 전제 조건 (iii)은 상대적인 광학 경로 길이 차이를 0으로 조절하는 데 필요한 광학 지연(OD)의 사용에 의해 충족된다.
- [0008] 3개의 전제 조건이 충족되면 2개의 빛이 겹쳐지고 2개의 겹쳐진 빛은 적절한 광검출기(PD)로 비트 노트(beat note)로서 검출 가능한 진폭 변조를 초래한다[H. R. Telle, G. Steinmeyer, A. E. Dunlop, J. Stenger, D. H. Sutter, 및 U. Keller, "Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation"(Appl. Phys. B 69, 327 (1999)) 참조]. 선택적 스펙트럼 필터(F)를 사용하여 비트 노트의 품질을 개선시킬 수 있다.
- [0009] 비선형 간섭 측정을 통한  $f_{CEO}$  검출 기술은 현재 잘 확립되어 있다[B. Borchers, "Pushing Frontiers in Carrier-Envelope Phase Stabilization of Ultrashort Laser Pulses"(Ph.D thesis Humboldt-Universitaet zu Berlin (2014)) URL <http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/borchers-bastian-2014-10-17/PDF/borchers.pdf> 및 S. A. Diddams, "The evolving optical frequency comb [Invited]"(J. Opt. Soc. Am. B, 27(11), B51 (2010))]에서 고찰됨].  $f_{CEO}$  검출을 위한 간섭 측정 설정들은 일반적으로 많은 적든 다음과 같은 공통적인 단점을 공유한다: 외부 노이즈에 대한 민감성(간섭계는 공기 줄(air streak), 음향 노이즈, 기계적

진동, 열적 드리프트 등에 대해 차폐되어야 함), 광학 정렬에 대한 민감성(간접계는 유지 보수를 필요로 할 수 있음), 광학 파워 소비(간접계는 fs 발진기의 귀중한 출력의 상당 부분을 소비함), 높은 복잡성, 높은 비용 및 간접 측정 설정의 큰 부피.

[0010] 다중 다리 간접계를 개선하려는 시도에는 비선형 결정으로 인라인 주파수 변환하는 것이 포함되며, 이는 동축 고조파 성분, 차주파수 생성 및 인라인 차주파수 생성을 초래하고, 이 모두는 비선형 결정에서 발생한다. 이러한 모든 구성은 다중 다리 및 인라인 구성 모두 적어도 하나의 여분 공동 비선형 변환 광학 요소를 사용하고, 필요할 경우 주파수 변환 이전에 기본 빛의 스펙트럼 확장을 사용한다.

[0011] 따라서, 광학 주파수 빛의 많은 중요한 변형에는 실험실에 국한되어 있으며, 따라서 실제 응용에서는 제한적으로 사용된다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

**과제의 해결 수단**

[0012] 본 발명은 모드 잠금 레이저 및 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기를 사용한 광학 주파수 빛 생성을 제공한다. 모드 잠금 레이저는 기본 주파수 스펙트럼 내에서 발진하고, 광학 주파수 빛 출력 및 보조 광학 주파수 빛으로부터의 스펙트럼 성분을 포함하는 헤테로다인 출력을 동시에 생성한다. 보조 빛은 기본 광학 주파수 빛의 고조파를 포함한다. 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는 광학 헤테로다인을 검출하고 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성한다.

[0013] 적어도 하나의 실시예에서, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 비트 노트 주파수를 검출하고 광학 주파수 빛 출력을 안정화시키는 신호를 제공한다. 보조 광학 주파수 빛의 스펙트럼 중점은 스펙트럼 확장 요소에 의해 제공될 수 있고, 스펙트럼 필터링은 필터 요소에 의해 제공될 수 있다.

[0014] 적어도 하나의 실시예에서, 모드 잠금 레이저는 펌프 소스 및 펨토초(fs) 발진기를 이용하고, 레이저 매체는 광학 주파수 빛 출력을 생성하는 동시에 적어도 하나의 광학 고조파를 자가 생성하는 비선형 레이저 매체이다. fs 발진기는 높은 2차 및 3차 차수 비선형성 및 다결정 구조를 갖는 TM:II-VI 유형 레이저 재료를 이용하는 중간 IR 커-렌즈(Kerr-lens) 모드 잠금 fs 발진기일 수 있다. TM:II-VI 유형 레이저 재료는 무작위 준-위상-정합 프로세스를 통한 3개 파 혼합을 제공할 수 있다. fs 발진기는 하나 이상의 광학 고조파에서 증가된 출력을 위해 맞춤형된 공진기 공동을 포함할 수 있다.

[0015] 본 발명은 또한 모드 잠금 레이저로 광학 주파수 빛 출력과 헤테로다인 출력을 동시에 발생시키고, 헤테로다인 출력에서 보조 광학 주파수 빛의 스펙트럼 성분 사이의 비트 노트를 검출하고, 검출된 비트 노트에 기초하여 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성하는 것에 의한, 광학 주파수 빛 출력과 헤테로다인 출력을 갖는 모드 잠금 레이저에서의 광학 주파수 빛 방법을 제공한다.

[0016] 본 발명은 또한 기본 광학 주파수 빛 출력과 하나 이상의 광학 고조파를 직접적으로 Cr:ZnS 재료에서 동시에 발생시킴으로써 고조파 출력을 자가 생성하고 - 기본 출력이거나 광학 고조파 출력 중 임의의 것인 이들 출력 중 임의의 하나는 스펙트럼 성분으로서 고려됨 -, 보조 광학 주파수 빛에서 제1 및 제2 스펙트럼 성분 사이의 헤테로다인 비트 노트를 검출하고, 검출된 비트 노트에 기초하여 캐리어 포락선 오프셋 주파수에 대응하는 신호를 생성하는, 커 렌즈 모드 잠금 중간 IR 다결정 Cr:ZnS 발진기 기반 레이저 시스템에서 캐리어 포락선 오프셋 주파수를 검출하는 방법을 추가로 제공한다. 두 출력 중 임의의 것을 선택하는 이유는 신호의 강도는 물론 임의의 이러한 출력에 대한 센서의 가용성을 포함할 수 있다. 따라서, 통상적으로 기본 출력 및 고조파 출력을 선택할 수 있는 데, 2차 고조파는 신호 강도로 인해 바람직하고, 본 기술 분야의 숙련자는 임의의 2개의 별개의 고조파 출력을 선택할 수도 있지만, 제2 및 3차 고조파 출력이 그 신호 강도로 인해 바람직하다.

**도면의 간단한 설명**

[0017] 본 개시내용의 전술한 그리고 다른 양태, 특징 및 이점은 다음의 도면의 도움으로 더욱 쉽게 명백해질 것이다.

- 도 1의 (a)는 모드 잠금 펄스 트레인 시퀀스를 제공한다.
- 도 1의 (b)는 모드 잠금 펄스 트레인 스펙트럼을 제공한다.
- 도 2는 옥타브 및 주파수 2배 스펙트럼의 스펙트럼 중첩을 제공한다.
- 도 3은 비선형 간섭계의 개요를 제공한다.
- 도 4a는 출력 펄스의 자기상관을 제공한다.
- 도 4b는 출력 펄스의 측정된 스펙트럼을 제공한다.
- 도 4c는 이미지 레이저 재료 그래인을 제공한다.
- 도 4d는 레이저 출력의 이미지를 제공한다.
- 도 4e는 측정된 레이저 빔 프로파일을 제공한다.
- 도 5는  $f_{\text{CEO}}$  검출의 개략도를 제공한다.
- 도 6a는 인라인 스펙트럼 확장의 개략도를 제공한다.
- 도 6b는 인라인 스펙트럼 확장의 개략도를 제공한다.
- 도 7은 분할 경로 스펙트럼 확장의 개략도를 제공한다.
- 도 8은 광학 주파수 빔 발생기의 개략도를 제공한다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0018] 이제 본 발명의 실시예가 상세히 참조될 것이다. 가능한 경우, 동일하거나 유사한 부품 또는 단계를 나타내기 위해 도면 및 설명에서 동일 또는 유사한 참조 번호 또는 문자가 사용된다. 도면은 단순화된 형태로 되어 있으며 정확한 축척이 아니다. 단지 편의성 및 명확성을 위해, 도면과 관련하여 방향적(위/아래 등) 또는 운동적(진진/후진 등) 용어가 사용될 수 있다. "결합"이라는 용어 및 유사한 용어는 반드시 직접적이고 즉각적인 연결을 의미하지는 않으며 중간 요소 또는 장치를 통한 연결도 포함한다.
- [0019] 전이 금속 도핑 II-VI 반도체(TM:II-VI)를 기반으로 한 fs 발진기는 중요한 중간 IR 스펙트럼 범위에서 직접적으로 fs 광학 펄스를 얻을 수 있게 하며[S. Mirov, V. Fedorov, D. Martyshekin, I. Moskalev, M. Mirov, S. Vasilyev, "Progress in mid-IR lasers based on Cr and Fe doped II-VI chalcogenides"(IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 21(1), 1601719 (2015)), "MIROV" 및 I. T. Sorokina 및 E. Sorokin, "Femtosecond Cr<sup>2+</sup>-based lasers"(IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 21(1), 1601519 (2015))], 따라서 표준 근 IR fs 발진기의 주파수 하향 변환을 위한 복잡하고 부피가 큰 설정에 대한 필요성을 피한다. 또한, 다결정 Cr<sup>2+</sup>:ZnS 및 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 커-렌즈 모드 잠금 레이저 기술의 매우 최근의 진전은 평균 파워(2W)(MIROV), 펄스 에너지(24 nJ)[S. Vasilyev, M. Mirov, 및 V. Gapontsev, "Mid-IR Kerr-lens mode-locked polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnS laser with 0.5 MW peak power"(in Advanced Solid State Lasers, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper AW4A.3)] 및 펄스 지속기간(≤29 fs)[S. Vasilyev, I. Moskalev, M. Mirov, S. Mirov, 및 V. Gapontsev, "Three optical cycle mid-IR Kerr-lens mode-locked polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnS laser"(submitted to Opt. Lett. (2015))]에 관한 중간 IR fs 발진기의 출력 파라미터의 현저한 개선을 초래하였다.
- [0020] 중간 IR fs 발진기를 기반으로 하는 광학 주파수 빔의 개발은 소위 분자 지문 영역에서의 분광학 및 감지와 관련된 많은 용례에서 매우 중요하다. 중간 IR 주파수 빔은 또한 고자장 물리학 및 비선형 광학장치와 관련된 용례에서 중요하다: 아토-사이언스(atto-science), 고조파 생성, 입자 가속 등.
- [0021] TM:II-VI 재료에 기반한 fs 발진기의 펄스 반복 주파수( $f_{\text{rep}}$ )의 검출 및 제어는 매우 간단하다[예를 들어, MIROV 참조]. 앞서 설명한 바와 같이 TM:II-VI fs 발진기의 캐리어 포락선 오프셋 주파수( $f_{\text{CEO}}$ )의 검출은 비선형 간섭 측정을 통해 구현될 수 있으며, 검출된  $f_{\text{CEO}}$ 는 그 후 예를 들어 위상 잠금 루프(phased lock loop)를 사용하여 광학 주파수 빔을 안정화시키는데 사용될 수 있다. 그러나 특히 더욱 환경적으로 민감하고 복잡한 간섭계 시스템이 조용한 실험실 환경에 제한되어 있다면, 안정성, 수용성 및 소형 크기를 제공하는 단순화되고 개선된 중간



IR 주파수 빛이 광범위한 사용을 위해 바람직하다.

- [0022] 간단하고 안정적인  $f_{\text{CEO}}$  검출을 사용하여, 본 발명의 양태는 모드 잠금 레이저 기반의 광학 주파수 빛, 예를 들어, TM:II-VI fs 발진기의 캐리어 포락선 오프셋 주파수( $f_{\text{CEO}}$ )의 검출을 제공한다. 이  $f_{\text{CEO}}$  검출은 비선형 간섭계 및 수반되는 여분 공동 비선형 주파수 변환의 사용을 피하므로 중간 IR 주파수 빛의 강인성을 크게 개선시킨다.
- [0023] 다결정 TM:II-VI 레이저 매체의 파라미터의 조합[상세한 검토에 대해서는 S. Vasilyev, I. Moskalev, M. Mirov, V. Smolski, S. Mirov, V. Gapontsev, "Mid-IR Kerr-lens mode-locked polycrystalline Cr:ZnS and Cr:ZnSe lasers with intracavity frequency conversion via random quasi-phase-matching"(Proc. SPIE 9731, 97310B (2016)), "VASILYEV" 참조], 즉, 우수한 초고속 레이저 성능, 높은 2차 및 3차 차수 비선형성 및 다결정 구조는 무작위 준-위상-매칭(RQPM) 프로세스를 통한 fs 광학 펄스의 3개 파장 혼합을 가능하게 한다. 결과적으로 다결정 TM:II-VI에 기반한 fs 발진기의 중요한 탁월한 특징은 RQPM 프로세스를 통해 레이저 이득 매체에서 직접 발생하는 광학 고조파 생성이다. 따라서, RQPM을 사용하여  $f_{\text{CEO}}$  검출에 사용하기 위한 광학 고조파를 생성하는 것은 여분 공동 비선형 광학 요소 생성을 사용하는 것과는 대조적으로 레이저는 어떠한 추가적 비선형 광학 요소도 추가하지 않고 레이저 공진기 공동 내부에서 주파수 광학 고조파를 자가 생성할 수 있다.
- [0024] 이제, 도 4a 내지 도 4e를 참조하면,  $f_{\text{rep}} = 84\text{MHz}$  반복률에서의 동작중인 커-렌즈 모드 잠금 다결정 Cr:ZnS 발진기의 다양한 파라미터가 도시되어 있다. 도 4a는 자기 상관을 도시하고, 도 4b는 펄스의 통상적인 스펙트럼을 도시하고, 도 4c는 다결정 이득 요소의 미세 구조를 도시하고, 도 4d는 모드 잠금 레이저의 이득 요소의 사진을 도시하고, 도 4e는 출력 빔 프로파일을 도시한다. 스펙트럼 도 4b는 0.5W 파워를 갖는 기본 중간 IR 대역  $f$ , 0.1W 파워를 갖는 2차 고조파  $2f$ , 3차 고조파  $3f$ , 4차 고조파  $4f$ , fs 중간 IR 펄스와 cw 펌프 방사선 사이의 합주파수 생성 sfg 및 나머지 펌프에 기인한 스펙트럼을 포함하여 로그 스케일로 표시된다. 획득된 2차 고조파 파워는  $f_{\text{rep}} \approx 100\text{ MHz}$  반복률에서 약 0.1-0.3 W이고, 높은  $f_{\text{rep}} \approx 1\text{GHz}$  반복률에서 약 1-10 mW이다. 제3 및 4차 고조파의 광학 파워는 기성 광다이오드[(MIROV), S. Vasilyev, I. Moskalev, M. Mirov, S. Mirov, 및 V. Gapontsev, "Three optical cycle mid-IR Kerr-lens mode-locked polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnS laser"(Opt. Lett. 40(21), 5054-5057 (2015))]에 의한 검출을 위해 충분히 높다. 이러한 예시적인 레이저에서, 4차 고조파 방출은 도 4d에 도시된 가시 스펙트럼에서 명확하게 가시화되도록 충분히 강하다[세부 사항에 대해서는 (VASILYEV) 참조].
- [0025] 도 5는 다결정 TM:II-VI 레이저 이득 재료에 기초한 모드 잠금 레이저에서  $f_{\text{CEO}}$  검출의 양태를 도시한다. 적어도 하나의 실시예에서, 제1 및 제2 보조 광학 주파수 빛은 2차 및 3차 광학 고조파( $2f$ ,  $3f$ )이며, 이는 이득 매체에서 직접 발생되고, 발진기 출력의 일부로서 fs 발진기로부터 결합된 후, 다이크로익 미러(DM)에 의해 기본 주파수 빛( $f$ )으로부터 분리된다. DM을 벗어나는 2개의 출력 광학 경로, 즉, 광학 주파수 빛 출력(예를 들어, 기본 주파수 빛( $f$ )) 및 고조파 출력(예를 들어,  $f_2$  및  $f_3$ )이 존재한다. 고조파 출력에서  $2f$  및  $3f$ 의 부분 스펙트럼 중첩이 있는 경우, 각각의 스펙트럼 성분( $2f_{2n}$  및  $3f_n$ )은 광학 헤테로다인 출력에서 제1 및 제2 파장(A 및 B)을 포함한다. 광학 헤테로다인은 비트 노트를 생성하고 비트 노트 주파수는 캐리어 포락선 오프셋 주파수와 동일하다. 이 비트 노트는 그후 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기에 의해 검출되고, 비트 노트에 응답하여, 캐리어 포락선 오프셋 주파수 검출기는  $f_{\text{CEO}}$ 에 대응하는 신호를 생성한다. 이러한 방식으로, 여분 공동 비선형 요소, 주파수 변환 결정 또는 기존의 비선형 간섭 측정을 사용하지 않고  $f_{\text{CEO}}$ 가 검출된다. 선택적으로, 렌즈, 거울 등의 조합은 광검출기(PD) 상에서의 레이저 빔의 시준, 조중, 집속을 위해 사용될 수 있다.
- [0026] 광학 헤테로다인은 비트 노트를 생성하기 위해 적어도 2개의 레이저 파장(예를 들어, 스펙트럼 성분( $2f_{2n}$  및  $3f_n$ ))을 요구하지만, 본 발명 2개 파장에 한정되는 것은 아님을 이해하여야 한다. 모든 중첩 스펙트럼 성분이 동일한 비트 노트를 발생시키기 때문에, 헤테로다인 출력은  $2f$  및  $3f$ 의 중첩으로부터의 많은 스펙트럼 성분을 포함할 수 있다. 2차 및 3차 광학 고조파가 이 예에서 사용되었지만, 비트 노트를 생성하기에 적절한, 기본 파장을 포함하는 자가 생성 파장의 임의의 조합이 본 발명의 범위 내에 있는 것으로 고려된다.
- [0027] 광학 구성요소는 사용된 광학 고조파에 따라 선택된다. 예를 들어, 광학 헤테로다인을 생성하기 위해 기본 주파수 빛을 2차 광학 고조파와 함께 사용하는 경우, DM은 제거되거나 부분 반사 거울로 대체될 수 있다. 유사하게, fs 발진기의 상이한 구성이 예를 들어, 기본 주파수 빛 출력 및 fs 발진기로부터 직접 하나 이상의 고조파



출력을 생성하기 위해, 다수의 출력 커플러와 함께 사용될 수 있다.

- [0028] 커-렌즈 모드 잠금 다결정 Cr:ZnS 발진기에서 다결정 이득 요소의 미세 구조(예를 들어, 평균 입자 크기)를 제어하면 특정 광학 고조파(예를 들어, 2f)를 선택적으로 개선시킬 것으로 예상된다.
- [0029] fs 발진기의 설계는 헤테로다인 비팅(beat ing)을 개선시키고  $f_{CEO}$  검출을 개선시킬 수 있다. 고조파 성분 사이의 스펙트럼 중첩은 충분히 넓은 광학 스펙트럼을 가진 발진기에서 제공될 수 있다. 스펙트럼 중첩을 제공하기 위해 보조 광학 주파수 빔으로서 2f보다 넓은 스펙트럼을 갖는 보다 높은 주파수의 광학 고조파(예를 들어, 3f, 4f)가 사용될 수 있다.
- [0030] 그러나, 다결정  $Cr^{2+}:ZnS/ZnSe/CdSe$ 에서의 스펙트럼 확장은 스펙트럼 중첩을 위해 선택된 고조파에 대한 충분히 넓은 연속체를 생성하기에 충분하지 않을 수 있다. 스펙트럼 확장은 스펙트럼 중첩을 제공하거나 증가시키고 추가적인 스펙트럼 확장 장치(SB)(비선형 섬유, 비선형 도파로, 벌크 재료 등)를 사용하여 스펙트럼 중첩 요구 사항을 충족시키는 데 사용될 수 있다. SB는 fs 발진기와 PD 사이에 설치되며 스펙트럼적으로 겹쳐진 광학 주파수 빔을 제공한다.
- [0031] SB 장치는 적절한 비선형 광학 특성을 갖는 광결정(PC) 섬유의 길이일 수 있다. PC 재료는 확장되는 고조파 주파수 스펙트럼(또는 스펙트럼들)에 따라 진송 대역폭을 갖도록, 그리고, 바람직하게는 스펙트럼의 중심에 대응하는 제로 분산 파장을 갖도록 선택된다. PC 섬유 재료에는 용융 실리카, ZBLAN, 실리콘 질화물 및 칼코게나이드가 포함된다. US9362707은 초연속체를 생성하기 위해 사용되는 ZBLAN PC 섬유를 설명하고, Ti:사파이어 레이저와 함께 사용하기 위한, 초연속체 키트 Model SCG-800이 캘리포니아주 어바인 소재의 Newport Corporation으로부터 입수 가능하다. 비선형 도파로는 짧은 직선 도파로일 수 있으며, 예를 들어 길이가 10 mm인 실리콘 니트라이드 도파로가 A. Johnson에 의해 Optics Letters(Vol. 41, No. 12/2016년 6월 15일)에서 설명되었다.
- [0032] 기존의 현재 PC 설계 및 비선형 도파로의 파라미터는 COMSOL과 같은 다중 물리학 소프트웨어로 모델링할 수 있으며 모드 잠금 레이저 소스의 하나 이상의 주파수 스펙트럼과 함께 사용하도록 예측 가능하게 적응될 수 있다.
- [0033] 여분 공동 스펙트럼 확장은, 예를 들어 도 6a에 도시된 바와 같이, 충분한 스펙트럼 중첩을 제공하기 위해 보조 주파수 빔을 확장하거나, 또는 도 6b에 도시된 바와 같이, 하나의 보조 주파수 빔을 선택적으로 팽창시켜 충분한 스펙트럼 중첩을 제공할 수 있다.
- [0034] 스펙트럼 확장을 갖는 단일 광학 경로를 이용하는 것이 바람직하지만, 제1 및 제2 보조 주파수 빔은 도 7에 도시된 바와 같이 분리된 광학 경로에서 격리될 수 있고, 비트 노트 검출을 위해 스펙트럼적으로 팽창 및 재조합될 수 있다. 예를 들어, 사용 가능한 스펙트럼 대역폭 또는 SB 분산 제한과 같은 특정 스펙트럼 확장 장치의 한계는 단일 보조 주파수 빔 확장을 필요로 할 수 있다. 이 경우 2개의 고조파를 확장해야 하는 경우 각 고조파에 대해 하나씩 2개의 SB 장치를 사용하여 달성할 수 있다. 단순화된 SB를 갖는 분할 광학 경로의 복잡성은 보다 까다로운 SB 요구 사항을 갖는 단일 경로보다 바람직할 수 있다.
- [0035] 스펙트럼 확장 및 광학 헤테로다인 성능은 증가된 출력 파워에서 바람직한 고조파를 선택적으로 생성함으로써 개선될 수 있다. 예를 들어, fs 발진기 공동 거울은 고조파 생성을 개선시키기 위해 스펙트럼적으로 선택적으로 설계될 수 있다. 마찬가지로, 이용되지 않은 고조파 또는 관심 대상이 아닌 다른 파장은 억제될 수 있다.
- [0036] 따라서,  $f_{CEO}$  검출, 스펙트럼, 공간 및 시간 중첩에 대한 앞서 언급한 필요한 조건은 하나 이상의 광학 고조파에서 충분히 넓은 광학 스펙트럼을 갖는 모드 잠금 레이저로 충족되어 중첩 스펙트럼 영역을 제공한다.
- [0037] 모드 잠금 레이저는 다중 고조파 출력 스펙트럼에 도움이 되고 하나 이상의 광학 고조파의 적어도 일부는 광학 헤테로다인 출력에 추가하여 단일 또는 다중 출력 빔에서 공동 외부로 결합될 수 있음을 알 것이다.
- [0038] 레이저 이득 매체의 색채 분산은 광학 고조파의 상당한 시간적 확장 및 그 (적어도 부분적인) 시간적 중첩을 초래한다. 따라서, 선택적으로, 광학 주파수 빔 발생기는 분산 제어 구성요소(DC)(분산 거울, 프리즘 또는 격자의 조합, 분산 보상 광섬유, 분산 보상 도파로 등의 조합)를 구비할 수 있다. 적어도 하나의 실시예에서, DC는 SB 이전에 설치되고, 그 입력 상에서 2f 및 3f 광학 주파수 빔을 수용하고, 시간적으로 겹쳐진 2f 및 3f 광학 주파수 빔을 제공한다.
- [0039] 선택적으로, 스펙트럼 필터(F)는 특정 스펙트럼 성분을 억제하여 광검출기에서 비트 노트의 품질을 개선시키는 데 사용될 수 있다. 예를 들어, 원하지 않는 고조파, 나머지 기본파, 나머지 펌프 또는 다른 광학 에너지는 헤테로다인 출력의 검출을 개선시키기 위해 필터링될 수 있다.

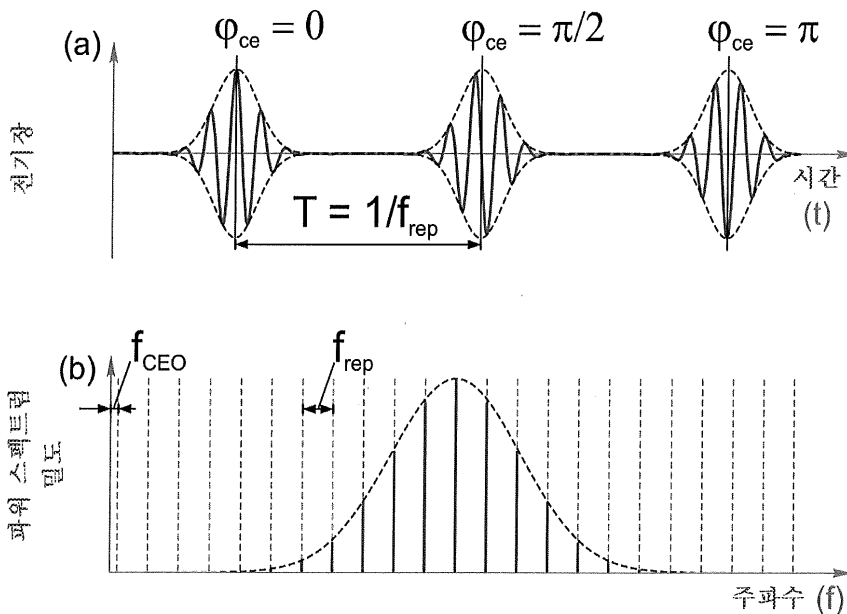
[0040] 중간 IR fs 발진기의 다결정 TM:II-VI 이득 매체에서 직접적으로 검출 가능한 광학 고조파를 생성하는 것은 캐리어 포락선 오프셋 주파수( $f_{CEO}$ )를 검출하기 위해 성가신 비선형 간섭계의 사용을 피하는 단순화된 대안을 제공한다. 도 8을 참조하면, 본 발명의 적어도 하나의 실시예에 따라서, 매우 간단하고 강인한 광학 주파수 빔 발생기는 모드 잠금 레이저, 자가 생성 헤테로다인 기반  $f_{CEO}$  검출 신호 및  $f_{CEO}$  검출기를 사용하여 안정화된 광학 주파수 빔 출력을 생성한다.

[0041]  $f_{CEO}$  검출기는 충분히 민감하고 빠른 광검출기(PD)(사태 광다이오드, 광증폭관 등)를 사용하여 fs 발진기의 이득 매체 내부에서 직접적으로 기본 주파수 빔( $f$ )으로부터 생성된 다른 광학 고조파 스펙트럼 성분 또는  $2f$  및  $3f$  스펙트럼 성분 사이의 비트 노트로서  $f_{CEO}$ 를 검출할 수 있다.  $f_{CEO}$  검출기 신호는 예를 들어 위상 잠금 루프 및 레이저 주파수 제어 장치에서 잘 알려진 바와 같이  $f_{CEO}$ 를 안정화시키는 데 사용될 수 있다. 안정화된  $f_{CEO}$ 는 값으로 설정될 수 있다. 바람직하게는, 펄스 레이저 파워가 레이저 주파수를 제어하는 데 사용된다. 음향-광학 변조 및 전기-광학 변조와 같은 감쇠기 기술은 펄스 레이저 파워 제어 레이저 주파수를 변화시키고  $f_{CEO}$ 를 안정화시킬 수 있다. 다른 공지된  $f_{CEO}$  안정화 기술은 예를 들어 격자 또는 다른 광학 구성요소를 기울임으로써 fs 발진기를 이조(detuning)시키는 것을 포함한다.

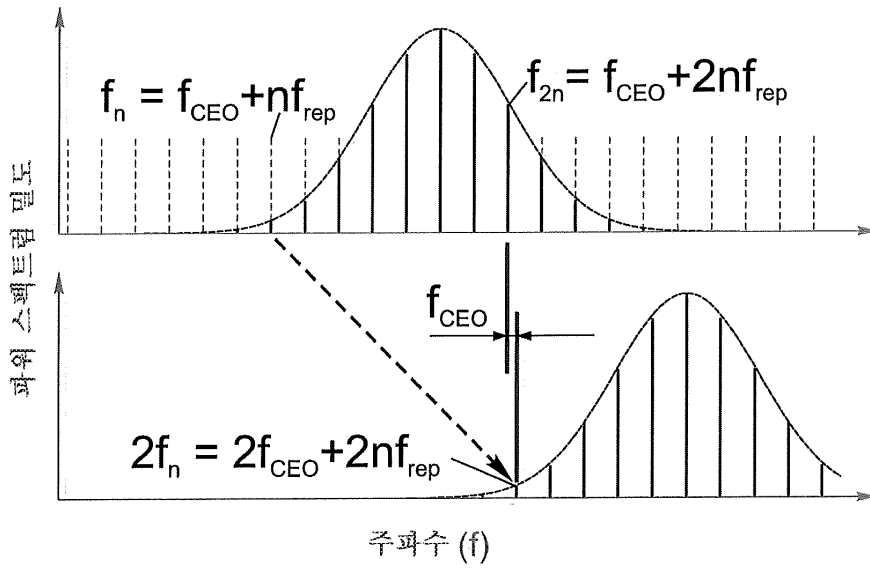
[0042] 본 기술 분야의 숙련자는 본원에 설명된 본 발명의 특정 실시예에 대한 다수의 균등물을 통상적인 실험을 사용하여 인식하거나 확인할 수 있을 것이다. 개시된 개요는 임의의 시스템과 함께 사용될 수 있지만, 현재 개시된 구조에 대한 유인은 광학 주파수 빔 발생기에 있다. 따라서, 앞서 설명한 실시예는 단지 예로서 제시되고, 첨부된 청구범위 및 그 등가물의 범위 내에서, 본 발명은 구체적으로 설명된 것과 다르게 실시될 수 있음을 이해해야 한다. 본 개시내용은 본원에 설명된 각각의 개별적인 특징, 시스템, 재료 및/또는 방법에 관한 것이다. 또한, 이러한 특징, 시스템, 재료 및/또는 방법이 서로 모순되지 않는 경우, 2 이상의 이러한 특징, 시스템, 재료 및/또는 방법의 임의의 조합이 본 발명의 범위 내에 포함된다.

**도면**

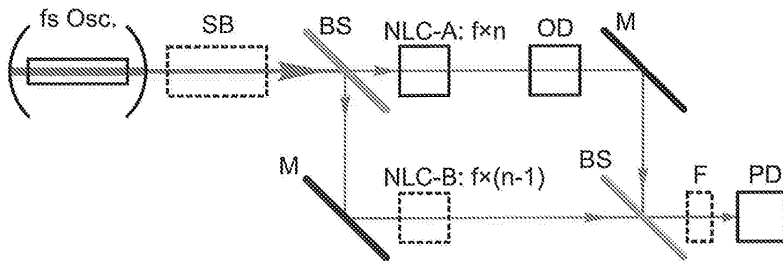
**도면1**



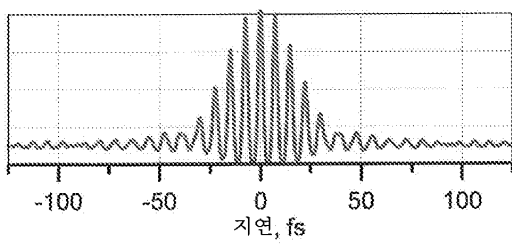
도면2



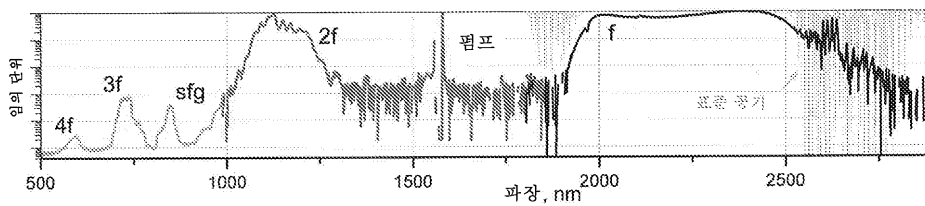
도면3



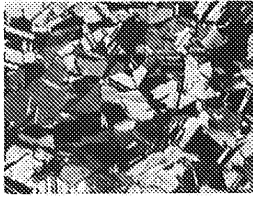
도면4a



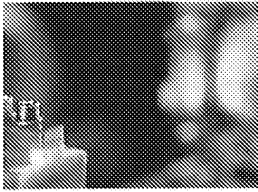
도면4b



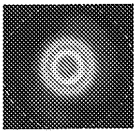
도면4c



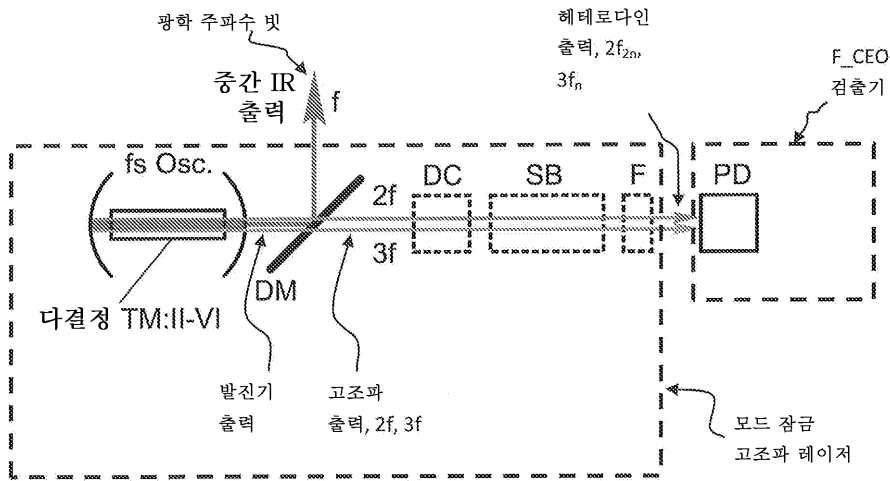
도면4d



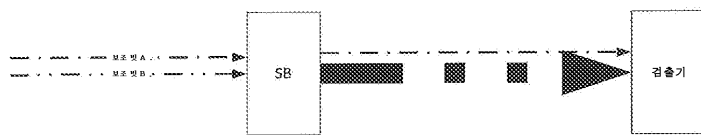
도면4e



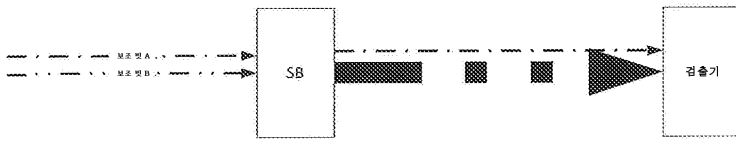
도면5



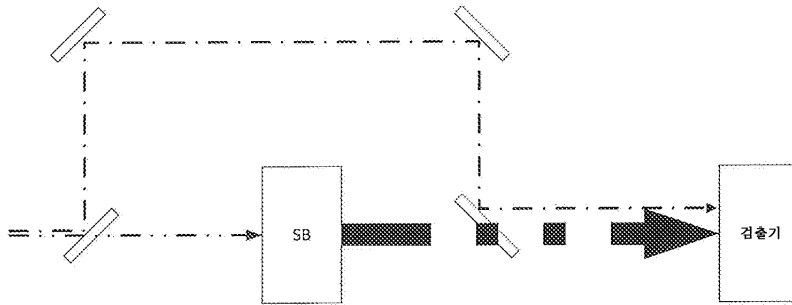
도면6a



도면6b



도면7



도면8

