



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

(11) 공개번호 10-2014-0026522  
 (43) 공개일자 2014년03월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
 H01S 3/30 (2006.01) H01S 3/067 (2006.01)  
 (21) 출원번호 10-2013-7031044  
 (22) 출원일자(국제) 2012년04월25일  
 심사청구일자 없음  
 (85) 번역문제출일자 2013년11월22일  
 (86) 국제출원번호 PCT/US2012/035065  
 (87) 국제공개번호 WO 2012/149068  
 국제공개일자 2012년11월01일  
 (30) 우선권주장  
 61/478,677 2011년04월25일 미국(US)

(71) 출원인  
 오에프에스 피텔 엘엘씨  
 미국, 조지아 30071, 노크로스, 노스이스트 익스  
 프레스웨이 2000  
 (72) 발명자  
 아베딘 카지 에스.  
 미국 뉴저지 07920 베스킹 리지 어빙 플레이스  
 234  
 크렘프 트리스탄  
 미국 뉴저지 08873 서머셋 지포드 로드 9  
 (뒷면에 계속)  
 (74) 대리인  
 장훈

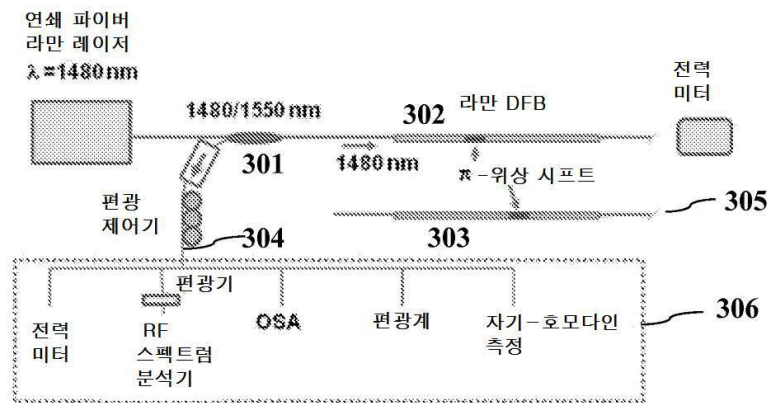
전체 청구항 수 : 총 28 항

(54) 발명의 명칭 **라만 분산 피드백 파이버 레이저 및 이를 사용한 고 출력 레이저 시스템**

**(57) 요약**

라만 분포 피드백(DFB) 파이버 레이저가 개시된다. 이는 펌프 소스 및 격자의 중심에서 단지 10% 벗어난 곳에 위치된 이산 위상 구조를 가진 분산 피드백(DFB) 격자를 포함한 20cm보다 작은 길이의 라만 이득 파이버를 포함하며, 여기에서 상기 라만 DFB 파이버 레이저는 1 기가헤르츠(GHz) 미만의 절반의 최대 광 강도(여기에서 최대 강도 주파수는 펌프 레이저의 주파수와 상이하다)에서 광 대역폭을 갖는, 광 스펙트럼을 가진 레이저 신호를 발생시킨다. 상기 라만 레이저는 광학 필드의 흡수로부터 기인한 열 효과 및 커 효과로 인한 비선형 위상 변화에 대한 보상을 포함하며, 그에 의해 변환 효율을 향상시킨다.

**대표도 - 도3**



(72) 발명자

**폴크 제롬 씨.**

미국 뉴저지 08807 브리지워터 메이플 스트리트  
181

**니콜슨 제프리 더블유.**

미국 뉴저지 07960 모리스 타운 태프트 레인 13

**웨스트브룩 폴 에스.**

미국 뉴저지 08807 브리지워터 웨우드 로드 874

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

라만 레이저에 있어서,

펌프 소스로부터 방사를 수신할 수 있는 광 입력; 및

광 출력 상에 라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자(Bragg grating)를 포함한, 길이가 20cm 미만인 라만 이득 파이버를 포함하는, 라만 레이저.

### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 적어도 하나의 브래그 격자는 위상을 시프트시키는, 라만 레이저.

### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 적어도 하나의 브래그 격자는 굴절률 변조에서 길이 방향으로 세기가 비균일 프로파일을 갖는, 라만 레이저.

### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 적어도 하나의 브래그 격자는 위상에서 길이 방향으로 비균일 프로파일을 갖는, 라만 레이저.

### 청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 라만 레이저는 약 1 기가헤르츠(GHz) 또는 그보다 작은 반 최대 광 강도에서의 광 대역폭을 가진 광 스펙트럼을 갖는 라만 방사를 상기 광 출력 상에 발생시키는, 라만 레이저.

### 청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 광 대역폭은 약 100MHz 또는 그보다 작은, 라만 레이저.

### 청구항 7

제 5 항에 있어서,

상기 광 대역폭은 약 6MHz과 10MHz 사이에 있는, 라만 레이저.

### 청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 라만 레이저는 0.08W 내지 10W의 범위 내에서의 임계 전력을 갖는, 라만 레이저.

### 청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 라만 레이저는 1.28W 내지 4.4W의 범위 내에서의 임계 전력을 갖는, 라만 레이저.

### 청구항 10

제 1 항에 있어서,

적어도 하나의 외부 라만 이득 파이버를 더 포함하며, 상기 외부 이득 파이버는 상기 라만 방사 출력을 증폭시키기 위해 흡수되지 않은 펌프 방사를 이용하는, 라만 레이저.

**청구항 11**

제 10 항에 있어서,

상기 적어도 하나의 브래그 격자와 상기 적어도 하나의 라만 이득 파이버 사이에서의 분리 소자를 더 포함하는, 라만 레이저.

**청구항 12**

제 1 항에 있어서,

상기 라만 레이저는 레이저 공진기 내에 위치되며 입력 방사는 상기 레이저 공진기의 공진 필드에 의해 발생되는, 라만 레이저.

**청구항 13**

제 1 항에 있어서,

제 1 항의 상기 라만 레이저와 직렬로 위치되는 제 1 항에 청구된 바와 같은 상기 라만 레이저의 적어도 하나의 추가적인 인스턴스를 더 포함하는, 라만 레이저.

**청구항 14**

제 13 항에 있어서,

상기 펌프 소스는 직렬로 위치한 상기 라만 레이저들에 공통인, 라만 레이저.

**청구항 15**

제 2 항에 있어서,

상기 브래그 격자는 상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 브래그 파장 편위를 야기하도록 처핑되며, 연관된 광학 필드의 강도는 상기 브래그 격자의 상기 길이의 상이한 부분과 비교하여 크고, 최대 음의 브래그 파장 편위의 위치는 상기 적어도 하나의 브래그 격자의 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 라만 레이저.

**청구항 16**

제 2 항에 있어서,

상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 온도 편위를 제어하기 위한 온도 제어 요소를 더 포함하며, 연관된 광학 필드의 강도가 상기 브래그 격자의 상기 길이의 상이한 부분과 비교하여 크고, 최대 온도 편위의 위치가 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 라만 레이저.

**청구항 17**

제 2 항에 있어서,

상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 변형 편위를 제어하기 위한 변형 제어 요소를 더 포함하며, 연관된 광학 필드에 대한 변화들의 강도가 상기 브래그 격자의 상기 길이의 상이한 부분과 비교하여 크고, 최대 변형 편위의 위치가 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 라만 레이저.

**청구항 18**

파이버 라만 레이저 공동에 있어서,

펌프 레이저;

상기 펌프 레이저로부터 방사를 수신할 수 있는 광 입력;

라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함한 라만 이득 파이버;

위상을 시프트시키는 상기 파이버 브래그 격자로서, 상기 브래그 격자는 상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 브래그 파장 편위를 야기하도록 처핑되며, 연관된 광학 필드의 강도가 상기 브래그 격자의 상기 길이의 상이한 부분과 비교하여 크고, 최대 음의 브래그 파장 편위의 위치가 상기 적어도 하나의 브래그 격자의 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 상기 파이버 브래그 격자; 및

라만 방사를 제공하기 위한 출력을 포함하는, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 19**

제 18 항에 있어서,

상기 위상 시프트는 약  $\pi$  라디안인, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 20**

제 18 항에 있어서,

상기 파장 편위는 연관된 광학 필드의 강도에 대략 비례하는, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 21**

파이버 라만 레이저 공동에 있어서,

펌프 레이저;

상기 펌프 레이저로부터 방사를 수신할 수 있는 광 입력;

라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함한 라만 이득 파이버;

상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 온도 편위를 제어하기 위한 온도 제어 요소로서, 연관된 광학 필드의 강도가 상기 브래그 격자의 길이의 상이한 부분과 비교하여 크며, 최대 온도 편위의 위치가 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 상기 온도 제어 요소; 및

라만 방사를 제공하기 위한 출력을 포함하는, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 22**

제 21 항에 있어서,

상기 온도 제어 요소는 가열 디바이스인, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 23**

제 21 항에 있어서,

상기 온도 제어 요소는 냉각 디바이스인, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 24**

제 21 항에 있어서,

상기 위상 시프트는 약  $\pi$  라디안인, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 25**

제 21 항에 있어서,

상기 브래그 격자는 상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 브래그 파장 편위를 야기하도록 처핑되며, 연관된 광학 필드의 강도는 상기 브래그 격자의 상기 길이의 상이한 부분과 비교하여 크고, 최대 음의 브래그 파장 편위의 위치가 상기 적어도 하나의 브래그 격자의 상기 위상-시프트의 위치와 일치하는, 파이버 라만 레이저 공동.

**청구항 26**

라만 레이저에 있어서,

펌프 레이저로부터 방사를 수신할 수 있는 광 입력; 및

상기 광 입력에 연결된 길이가 20cm 미만이고 제 1 광 출력 상에 라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는 제 1 라만 이득 파이버;

상기 제 1 라만 이득 파이버와 직렬로 상기 제 1 광 출력에 연결된 길이가 20cm 미만인 제 2 라만 이득 파이버로서, 제 2 광 출력 상에 라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는, 상기 제 2 라만 이득 파이버를 포함하며,

상기 제 2 라만 이득 파이버는 상기 펌프 레이저로부터의 흡수되지 않은 출력에 의해 증폭되는, 라만 레이저.

**청구항 27**

제 26 항에 있어서,

각각 길이가 20cm 미만이고, 상기 제 2 광 출력에 직렬로 연결되는 하나 이상의 부가적인 라만 이득 파이버들을 더 포함하며, 상기 부가적인 라만 이득 파이버들의 각각은 라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는, 라만 레이저.

**청구항 28**

레이저에 있어서,

레이저 펌프;

상기 레이저 펌프에 연결된 레이저 공진기로서, 상기 레이저 펌프에 의해 펌핑되는, 상기 레이저 공진기;

상기 레이저 공진기 내에 위치한 라만 이득 파이버로서, 길이가 20cm 미만이며, 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는, 상기 라만 이득 파이버를 포함하는, 레이저.

**명세서**

**기술분야**

[0001] 상호 참조

[0002] 본 출원은 참조로서 여기에 통합되는, 2011년 4월 25일에 출원된 미국 가출원 번호 제61/478,677호의 이득을 주장한다. 다음의 참고 문헌들이 참조로서 여기에 통합된다: (1) V. E. Perlin 및 H. G. Winful의 "분산 피드백 파이버 라만 레이저(Distributed Feedback Fiber Raman Laser)"(양자 전자 공학의 IEEE 저널 37 38, (2001)); (2) Y. Hu 및 N. G. R. Broderick의 "DFB 라만 파이버 레이저의 개선된 설계(Improved design of a DFB Raman fibre laser)"(광학 통신. 282 3356 (2009)); (3) J. Shi 및 M. Ibsen의 " $\pi$  위상-시프트 DFB 라만 파이버 레이저들 상에서의 위상 및 진폭 잡음의 효과들(Effects of phase and amplitude noise on  $\pi$  phase-shifted DFB Raman fibre lasers)"(브래그 격자 폴링 및 감광성, JThA30 (2010)); 및 (4) Agrawal, 비선형 섬유 광학, 제 3 판(Academic Press 2001, Eq.(2.3.34), 47페이지).

[0003] 본 발명은 라만 분산 피드백 파이버 레이저 및 이를 사용한 고 출력 레이저 시스템에 관한 것이다.

**배경기술**

[0004] 예를 들면, 이테르븀(1 마이크로론), 에르븀(1.55 마이크로론), 및 툴륨(~2 마이크로론)과 같은, 기존의 희토류 이온들(REI들)의 이득 대역폭을 넘어 연장되는 파장을 갖는, 고 출력 협 선폭 레이저 소스들에 대한 상당한 요구가 존재한다.

[0005] 광섬유에서의 라만 산란은 펌프 파장의 적절한 선택으로 파이버의 투명창 내에서의 임의의 파장으로 이득을 얻는데 유용하며, 모든-파이버 라만 레이저 공진기들이 브래그 반사기들뿐만 아니라 도 1에 예시된 바와 같으며 송신 스펙트럼이 도 2에 예시되는 다른 유형들의 공진 공동들을 사용하여 설명되지만, ~ 1GHz보다 좁은 선폭을 가진 발진(oscillation)을 달성하는 것은 아직 가능하지 않다. 라만 분포 피드백(Raman distributed feedback;

DFB) 레이저들은 이론적으로 단일 주파수 발생을 생성하도록 제안되었지만, 이것은 이하에 설명되는 바와 같이 심각한 설계 결함들 및 실제 한계들로 인해 지금까지 입증되지 않고 있다.

- [0006] 실제로, 다수의 문제들이 DFB 레이저 구조들에서 단일 주파수 또는 좁은 선폭 라만 레이징을 달성하는 것을 어렵게 만들어왔다. 이것들은 다음을 포함한다:
- [0007] (1) 격자 기록 동안 UV 노출로 인한 손실,
- [0008] (2) 높은 균일성을 갖고 긴 격자들을 제조할 때 어려움,
- [0009] (3) 커-비선형성 유도 브래그-파장 변화,
- [0010] (4) 예를 들면, 굴절률 변화들을 야기하는, 격자를 따라, 그리고 파이버 내에서의 비-균일 열 분포로 인한 변화들, 및
- [0011] (5) 높은 요구 펌프 전력들.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0012] 일반적으로, REI 이득 대역폭들로부터 떨어진 파장들에서 협대역 신호들을 발생시키기 위한 파이버 라만 이득의 사용은 파이버 브래그 격자들을 사용하여 설계된 종래의 레이저 공동들에서의 이용가능한 펌프들을 사용하여 높은 전력을 통해 달성되지 않는다.
- [0013] 중대한 세부사항들을 주의하여, 상기 입증된 실제 성능은 (1) 레이징(lasing)을 위한 큰 전력 임계치, (2) 작은 출력 전력, 및 (3) 단일 주파수 또는 적절하게 좁은 선폭 신호로의 펌프 전력의 비효율적인 변환을 야기한다.
- [0014] 이 문서의 대부분은 파이버 도파관들을 논의하지만, 본 발명의 개념은 또한 평면 도파관들 등과 같이, 다른 형태들의 도파관들에 적용가능하다는 것을 주의하자. 더욱이, 레이징은 높은 광 강도들을 고려해볼 때 이득 가이드 또는 열 렌징과 같은 메커니즘들을 사용하여 형성된 도파관들 없이 달성될 수 있음이 가능하다.

**과제의 해결 수단**

- [0015] 본 발명의 일 양태는 펌프 레이저로부터의 방사를 수신할 수 있는 광 입력을 가진 라만 레이저, 및 20cm 길이 미만의 라만 이득 파이버를 제공하며, 여기에서 상기 라만 이득 파이버는 광 출력 상에서, 라만 방사로서 또한 알려진, 라만 산란으로부터 발생한 레이저 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함한다.
- [0016] 본 발명의 추가 양태들에 따르면, 상기 적어도 하나의 브래그 격자는 위상 시프트를 가진다. 부가적으로, 상기 격자는 굴절률 변조 세기에서 길이 방향으로 비균일 프로파일을 가질 수 있다. 또한, 상기 격자는 위상에서 길이 방향으로 비균일 프로파일을 가질 수 있다.
- [0017] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 라만 레이저는 약 1 기가헤르츠(GHz) 또는 그보다 작은 반 최대 광 강도에서 광 대역폭을 가진 광 스펙트럼을 갖고 광 출력 상에서 라만 방사를 일으킨다. 본 발명의 추가 양태에 따르면, 상기 광 대역폭은 약 100MHz 또는 그보다 작다. 본 발명의 추가 양태에 따르면, 광 대역폭은 약 10MHz 또는 그보다 작다.
- [0018] 본 발명의 일 양태에 따르면, 라만 레이저의 임계 전력은 0.08W 내지 10W의 범위에 있다. 본 발명의 또 다른 양태에서, 라만 레이저의 임계 전력은 1 내지 5W의 범위에 있다. 본 발명의 추가 양태에 따르면, 라만 레이저의 임계 전력은 1.28W 내지 4.4W의 범위에 있다.
- [0019] 본 발명의 추가 양태에 따르면, 라만 레이저로부터의 라만 방사 출력은 흡수되지 않은 펌프 방사를 이용함으로써 하나 이상의 외부 라만 이득 파이버들에 의해 증폭된다.
- [0020] 부가적으로, 본 발명의 또 다른 실시예에서, 상기 라만 레이저는 레이저 공진기 내에 위치될 수 있으며 상기 레이저 공진기의 공진 필드에 의해 펌핑될 수 있다. 레이저 공진기에서의 신호에 대한 펌프-유도 이득은 라만-기반이거나 또는 회로류 기반일 수 있다.
- [0021] 본 발명의 또 다른 실시예에 따르면, 적어도 하나의 부가적인 라만 레이저가 제공된다. 각각의 부가적인 라만 레이저는 라만 레이저와 연쇄적으로(또는 직렬로) 위치된다. 상기 펌프 레이저는 연쇄적으로 위치된 라만 레이

저들에 공통적이다.

- [0022] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 라만 레이저에서의 브래그 격자는 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 브래그 파장 편위를 야기하기 위해 브래그 파장에 대하여 처핑(chirp)되고, 커 효과, 또는 흡수-유도 가열로 인한 광학 필드 및 연관된 인텍스 변화의 강도가 브래그 격자의 상이한 부분과 비교하여 크다. 더욱이, 가장 큰 음의 브래그 파장 편위의 위치는 브래그 격자의 위상-시프트의 위치와 일치한다. 펌프 강도가 상당한 종단 기울기(예로서, 강한 펌프, 펌프의 강한 소모 또는 강한 선형 흡수)를 갖는 경우, 펌프-유도 열 효과는 중요할 수 있으며 이러한 "광학 필드"에 의해 포함되어야 한다. 여기에 사용된 바와 같이, "편위(excursion)"는 공칭 값으로부터의 편차로서 정의된다.
- [0023] 본 발명의 추가 양태에 따르면, 라만 레이저에 상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 온도 편위를 제어하기 위해 온도 제어 요소가 제공되고, 커 효과 또는 흡수-유도 가열로 인한 광학 필드 및 연관된 인텍스 변화의 강도는 브래그 격자의 상이한 부분과 비교하여 크다. 더욱이, 최대 온도 편위의 위치는 브래그 격자의 위상-시프트의 위치와 일치한다.
- [0024] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 라만 레이저에는 상기 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 변형 편위를 제어하기 위해 변형 제어 요소를 제공되고, 커 효과 또는 흡수-유도 가열로 인한 광학 필드 및 연관된 인텍스 변화의 강도가 브래그 격자의 상이한 부분과 비교하여 크다. 가장 큰 변형의 위치는 브래그 격자의 위상-시프트의 위치와 일치한다.
- [0025] 본 발명의 이들 이전에 설명된 양태들 및 실시예들의 각각은 길이가 20cm 미만의 라만 이득 파이버를 가진 라만 레이저를 제공받는다.
- [0026] 본 발명의 많은 양태들은 다음의 단락들에 설명된 바와 같이, 이득 파이버의 길이에 상관없이 라만 레이저들에 적용가능하다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예에서, 파이버 라만 레이저 공동은: 펌프 레이저, 위상 시프트를 가진 파이버 브래그 격자로서, 상기 브래그 격자는 상기 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 브래그 파장 편위를 야기하기 위해 브래그 파장에 관하여 처핑되며, 커 효과 또는 흡수-유도 가열로 인한 광학 필드 및 인텍스 변화가 상기 격자의 상이한 부분과 비교하여 크고, 또한 최대 음의 브래그 파장 편위의 위치가 위상 시프트의 위치와 일치하는, 상기 파이버 브래그 격자; 및 라만 방사를 제공하기 위한 상기 파이버 라만 레이저 공동의 출력을 포함한다.
- [0028] 본 발명의 일 실시예에서, 상기 위상 시프트는 약  $\pi$  라디안일 수 있다. 부가적으로, 상기 브래그 파장 편위는 상기 공동에서의 광학 필드의 강도에 대략 비례할 수 있다.
- [0029] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 파이버 라만 레이저 공동은: 펌프 레이저; 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 온도 편위를 제어하기 위한 온도 제어 요소로서, 커 효과 또는 흡수-유도 가열로 인한 상기 광학 필드 및 인텍스 변화가 상기 브래그 격자의 상이한 부분과 비교하여 크고, 또한 최대 온도 편위의 위치가 위상-시프트의 위치와 일치하는, 상기 온도 제어 요소; 및 라만 방사를 제공하기 위한 상기 파이버 라만 레이저 공동의 출력을 포함한다.
- [0030] 이러한 실시예에서, 상기 온도 제어 요소는 가열 디바이스 또는 냉각 디바이스와 같은 온도 제어 디바이스일 수 있다. 상기 위상 시프트는 약  $\pi$  라디안이다.
- [0031] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 라만 레이저는: 펌프 레이저로부터 방사를 수신할 수 있는 광 입력; 제 1 광 출력 상에서 라만 방사를 제공할 수 있는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는 상기 광 입력에 연결된 제 1 라만 이득 파이버; 및 상기 제 1 라만 이득 파이버와 직렬로 상기 제 1 광 출력에 연결된 제 2 라만 이득 파이버로서, 상기 제 2 라만 이득 파이버는 제 2 광 출력 상에서 라만 방사를 제공할 수 있게 하는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함하는, 상기 제 2 라만 이득 파이버를 포함한다. 상기 제 2 라만 이득 파이버는 펌프 레이저로부터의 흡수되지 않은 출력에 의해 증폭된다. 대안적으로, 상기 제 2 라만 이득 파이버는 제 1 라만 이득 파이버 후 도입된 제 2 펌프 소스에 의해 펌핑될 수 있다. 또한, 하나 이상의 부가적인 라만 이득 파이버들은 제 2 광 출력에 직렬로 연결될 수 있으며, 부가적인 라만 이득 파이버들의 각각은 라만 방사를 제공할 수 있게 하는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함한다.
- [0032] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 레이저는 레이저 펌프, 상기 레이저 펌프에 연결된 레이저 공진기로서, 상기 레이저 공진기는 상기 레이저 펌프에 의해 펌핑되는, 상기 레이저 공진기, 및 상기 레이저 공진기 내에 위치되는 적어도 하나의 브래그 격자를 포함한 라만 이득 파이버를 포함한다.



**발명의 효과**

[0033] 본 발명에 따른 라만 레이저는 광학 필드의 흡수로부터 기인한 열 효과 및 커 효과로 인한 비선형 위상 변화에 대한 보상을 포함하며, 그에 의해 변환 효율을 향상시킨다.

**도면의 간단한 설명**

- [0034] 도 1은 종래 기술에 따른, 연쇄 라만 공진기들에 기초한 파장 변환 디바이스들의 다이어그램을 도시한 도면.  
 도 2는 종래 기술에 따른, 라만 DFB 파이버 브래그 격자의 격자 송신 스펙트럼을 도시한 도면.  
 도 3은 본 발명의 일 양태에 따른 라만 DFB 레이저에서 단일 주파수 동작을 설명하기 위해 사용된 셋업을 도시한 도면.  
 도 4a 및 도 4b는 본 발명의 일 양태에 따라, 위상-시프트가 각각 안쪽으로 및 바깥쪽으로 향하는, 레이저의 출력 스펙트럼(WDM 및 아이솔레이터를 통해 측정된)을 도시한 도면.  
 도 5는 본 발명의 일 양태에 따른 역방향 신호 전력 대 펌프 전력을 도시한 도면.  
 도 6은 본 발명의 다수의 양태들에 따라 임계치 가까이에 있으며 최대 펌프 전력 가까이에 있는 펌프 전력들에서의 지연된 자기-호모다인(self-homodyne) 간섭계를 사용하여 측정된 선폭을 도시한 도면.  
 도 7은 본 발명의 일 양태에 따라, 제 2 레이징 모드의 존재를 표시하는, 100MHz에서의 맥놀이 주파수를 도시한다.  
 도 8a 및 도 8b는 본 발명의 일 양태에 따라, 마스터 발진기 및 전력 증폭기(MOPA) 방식으로 라만 DFB 레이저의 개략도들을 도시하며, 도 8b는 레이저로부터의 증폭기를 분리시키고 원치않는 반사들을 억제하기 위해 아이솔레이터를 포함한다.  
 도 9는 본 발명의 일 양태에 따른 고-전력 협 선폭(<math><1\text{GHz}</math>) 레이저 방사를 생성하기 위해 연쇄 라만 레이저에 의해 펌핑된 외부 DFB를 사용한 구성을 도시한 도면.  
 도 10은 본 발명의 일 양태에 따른 펌프 전력의 재순환을 통해 펌프 전력의 효율적인 활용을 허용하는 연쇄 라만 레이저 시스템의 최내 공진기에 위치한 라만 DFB 레이저를 도시한 도면.  
 도 11은 본 발명의 일 양태에 따른 단일 펌프 소스를 이용하여, 다수의 라만 DFB 레이저들 및 라만 이득 파이버들로 이루어진 고 전력 레이저/증폭기 시스템을 도시한 도면.  
 도 12는 본 발명의 일 양태에 따라 광이 역방향으로 전파하는 것을 방지하기 위해 대역 소거 필터들을 통합한 도 11의 구성을 도시한 도면.  
 도 13은 본 발명의 일 양태에 따라 파장의 제 2 고조파를 생성하기 위해 주파수 배가 비선형 결정에 의해 종료되는 도 12의 구성을 도시한 도면.  
 도 14는 본 발명의 일 양태에 따라, 라만 DFB 레이저가 REI-도핑 파이버 레이저 공동 내부에 위치되며 DFB 격자가 바람직하게는 하나의 스토크스 시프트에 의해 오프셋된 파장을 갖는 구성을 도시한 도면.  
 도 15는 본 발명의 일 양태에 따른 희토류 파이버 레이저 내부에서 MOPA로서 동작하도록 통합된 라만 이득 파이버를 도시한 도면.  
 도 16은 본 발명의 일 양태에 따라, 라만 DFB 레이저에서 전파하는 순방향 및 역방향들에서의 공동-내 신호의 시뮬레이션을 도시한 도면.  
 도 17은 본 발명의 일 양태에 따라, 라만 DFB 레이저에서 브래그 격자를 따르는 비-선형 위상 시프트를 도시한 도면.  
 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따라, 브래그 격자 파장에서의 프리-치프를 가진 라만 DFB 레이저를 도시한 도면.  
 도 19는 본 발명의 일 양태에 따라, 70 와트 입력 전력, 58% 길이에서의 비연속 파이-시프트, 1 dB/m의 선형 손실들, 무시해도 될 정도의 비선형 손실 및 무한 열 전도율의 제약들 하에서 최대 출력 전력을 위해 최적화된 브래그 격자의 위상을 도시한 도면.

도 20은 본 발명의 일 양태에 따라, 라만 DFB 레이저의 출력 전력상에서의 프리-처프의 영향을 도시한 도면.

도 21은 본 발명의 일 양태에 따라 라만 DFB 레이저의 길이를 따른 온도 분포를 제어하기 위한 제 1 방식을 도시한 개략도.

도 22는 본 발명의 일 양태에 따라 라만 DFB 레이저의 길이를 따른 온도 분포를 제어하기 위한 제 2 방식을 도시한 개략도.

도 23은 균일한 브래그 격자의 굴절률 변화 진폭을 도시한 도면.

도 24는 아포다이즈 격자(apodized grating)의 굴절률 변화 진폭을 도시한 도면.

도 25는 위상 시프트에서 아포다이즈되는 격자의 굴절률 변화 진폭을 도시한 도면.

도 26은 상수 모듈러스( $|q| = \frac{\pi}{2n\Lambda} \Delta n_{ac}$ ) 및  $z=L_1$ 에서  $\pi$ -위상 시프트를 가지며 처프가 없는 길이(L)의 격자를 도시한 도면.

도 27은 본 발명의 일 실시예에 따라 라만 DFB 레이저의 커 효과 및 흡수-유도 국소 가열로 인한 단위 미터당 비선형 위상 시프트를 도시한 도면.

도 28은 도 27에 도시된 커 효과 및 흡수-유도 국소 가열로부터의 비선형 위상 시프트를 보상하기 위해 요구되는 브래그 파장에서의 프리-처프를 도시한 도면.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0035] 단일 주파수 및 좁은 선폭 조정가능한 레이저들은 원격 감지, 레이저 레이더(LIDAR), 분광학, 광 코히어런트 단층 촬영 등과 같이, 매우 다양한 애플리케이션들에서 사용될 가능성이 있다.

[0036] 그것이 레이저 방사를 획득할 수 있는 많은 방식들이 있으며, 이것은 외부 공동 레이저들, 반도체들, 및 파이버 분포 피드백(fiber distributed feedback; DFB) 레이저들을 포함한다. DFB 레이저들은 능동형 파이버 도파관의 코어에 식각된 파이버 브래그 격자들을 갖고 생성될 수 있으며, 적절한 파장으로 펌핑될 때 협대역 레이저 방사를 생성할 수 있다. 반도체 DFB 레이저들과 비교할 때, 파이버 DFB 레이저들은 낮은 잡음 및 보다 좁은 선폭을 포함한 그것들의 우수한 광학 특성들 때문에 매력적이다. 또한, 이러한 파이버 DFB 레이저들의 인-파이버(in-fiber) 설계는 파이버 증폭기들 및 다른 파이버 구성요소들에 대한 효율적인 결합을 허용한다. "펌프" 또는 "펌핑"에 대한 참조는 통상적으로 DFB 공동에서 라만 산란과 같은 몇몇 비선형 효과에 의해 레이저 신호 (출력) 에너지로 변환되는 에너지 소스의 제공을 나타낸다. 펌프 및 신호 필드들의 합계는 여기에서 광학 필드라고 불린다.

[0037] 파이버 격자에서, 모드 유효 굴절률( $n_{grating}(z)$ )은 상기 파이버의 길이를 따른 길이 방향 좌표( $z$ ), 평균 (유효) 인덱스( $n$ ), dc-인덱스 변화( $\Delta n_{dc}(z)$ ), 인덱스 변화의 변조 진폭( $\Delta n_{ac}(z)$ )("격자 강도"), 격자의 위상( $\varphi(z)$ ),

및 격자 주기( $\Lambda$ )를 갖는,  $n_{grating}(z) = n + \Delta n_{dc}(z) + \Delta n_{ac}(z) \cos(2\pi z / \Lambda + \varphi(z))$ 에 따라 준주기적으로 변조된다. 이러한 격자는 상기 파이버의 상이한 모드들, 즉 상이한 모드들 사이에서의 전달 에너지를 결합하기 위해 사용될 수 있다. 상이한 공동전파 모드들(동일한 방향으로 이동하는)이 결합되어야 한다면, 상기 격자의 요구된 공간 주파수( $1/\Lambda$ )는 공동전파 모드들의 공간 주파수들 사이의 차이가 작기 때문에 비교적 작다. 통상적으로 범위가 수십에서 수백 마이크로미터들에 이르는, 이러한 큰  $\Lambda$ 로 인해, 이러한 격자는 또한 장주기 격자라 불리운다.

[0038] 반대로, 파장( $\lambda$ )의 반전파 모드들(counterpropagating modes)이 결합되어야 한다면, 상기 격자의 공간 주파수( $1/\Lambda$ )는 반전파 모드들의 공간 주파수들의 큰 차이( $n/\lambda - (-n/\lambda) = 2n/\lambda$ )와 동일해야 한다. 격자 주기( $\Lambda = \lambda / (2n)$ )는 대략 단지 수백 나노미터들(통상적으로  $n \approx 1.45$ 를 가진 실리카 섬유에서  $\lambda = 1550\text{nm}$ 에 대해  $\Lambda \approx 535\text{nm}$ )이기 때문에, 이러한 격자들은 단주기 또는 브래그 격자들로 불리우며, 상기 조건( $\Lambda = 2n\lambda$ )은 브래그 조건이다.

[0039]  $n(z)$ 는 격자 주기( $\Lambda$ )의 규모에 대해 변화하는 반면, 양들( $\Delta n_{ac}(z)$ ,  $\Delta n_{dc}(z)$  및  $\varphi(z)$ )은 일정하거나 또는 단지

훨씬 더 긴 규모(통상적으로 수십의 마이크로미터 내지 센티미터들)에 걸쳐 변화하며 그러므로 느리게 변화하는 양들로서 불리운다.

[0040] 격자 위상의 1차 도함수가  $d\phi/dz = a$  를 만족하는 경우, 몇몇 상수  $a$ (즉, 0이 되는 2차 도함수  $d^2\phi/dz^2 = 0$ )에 대해, 브래그 파장은  $\lambda = 2n\Lambda/[1+a\Lambda/(2\pi)]$  이다. 그러므로, 양의 상수  $d\phi/dz = a > 0$  는 스펙트럼을 보다 짧은 파장으로 시프트한다. 그렇지 않다면, 즉, 비제로 2차 도함수  $d^2\phi/dz^2 \neq 0$  일 경우에, 격자는 처핑된 것으로 불린다. 처핑 격자의 일 예는 도 19에 도시된다.

[0041] 소위  $\pi$ -시프트 DFB 격자에서, 위상( $\phi(z)$ )은 통상적으로 수 밀리미터 미만의 짧은 거리에 걸쳐  $\pi$  라디안의 양만큼 그것의 값을 변경한다. 수학적으로, 이것은 종종 몇몇 위치( $z=z_0$ )에서  $\phi(z)$ 의 비연속적인 점프에 의해 모델링된다. 그러나, 물리적 격자는 연속적인 굴절률을 가지며, 즉  $\cos(\phi(z))$ 는 실제로는 항상 연속 함수이다. 일반적으로, 위상( $\phi(z)$ )은 유용한 특성들(예로서, 레이저 공동의 높은 Q)을 가진 격자를 제공하는 임의의 적절한 함수일 수 있으며, 예로서 도 18 및 도 19를 참조하자. 도 18 및 도 19는 본 발명의 상이한 실시예들을 예시한다. 이는 주의된다. 유사하게는, 변조 진폭( $\Delta n_{ac}(z)$ )은 가장 보편적인 형태들(일정하거나 또는 아포다이즈된, 예로서 가우시안 또는 상승-코사인, 예를 들면 도 23 및 도 24를 참조하자)에 제한되지 않지만, 또한 임의의 적절한 함수일 수 있다. 특히,  $\Delta n_{ac}(z)$ 는 도 25에 예시된 바와 같이, 상기 격자의 특정한 부분에 걸쳐 항상(또는 대략) 제로일 수 있으며 상기 격자의 다른 부분들에서 비제로이다. 그러므로, "DFB 격자"에 대한 우리의 개념은 또한 둘 이상의 공간적으로 분리된 격자들의 경우를 포함하며, 이것은 또한 DBR(분산된 브래그 반사기) 격자 구조로서 해석될 수 있다. 비균일한 dc-인덱스( $\Delta n_{dc}(z)$ )는 통상적으로 격자 식각으로부터 기인하며 DFB 공동의 기능을 위해 필요하지 않다.

[0042] 여기에 사용된 바와 같이 "위상-시프트 격자" 또는 "위상 시프트를 가진 격자" 또는 "위상 시프트"는 이러한 적절한 위상( $\phi(z)$ )을 가진 격자를 의미하도록 의도된다.

[0043] 여기에 사용된 바와 같은 " $\pi$ -시프트 격자", " $\pi$ -시프트를 가진 격자" 등은 상기 위상( $\phi(z)$ )의 값이 상기 격자의 관련 부분에서 길이 방향 좌표( $z$ )를 따라  $\pi$  라디안만큼 값에서 변화한다는 것을 의미한다. 이러한 변화는 연속적이거나 또는 비연속적일 수 있다. 위상은 삼각 함수의 인수로서 오며, 삼각 함수들은  $2\pi$  라디안들의 주기를 갖고 주기적이기 때문에,  $\pi$ 의 위상 시프트는  $(2n+1)\pi$ 의 위상 시프트와 동일하며, 여기에서  $n$ 은 임의의 정수(양, 음, 또는 제로)이다. 그러므로, 일반성의 손실 없이, 우리는 기호법의 간편함을 위해,  $n=0$ , 즉  $\pi$ -시프트를 선택한다.

[0044]  $\pi$  라디안의 요구된 위상-시프트 또는  $\pi$ -시프트는 또한  $\pi$ 에 가까운, 즉  $\pi$ 의 0.1% 내에 있는 위상 시프트일 수 있다는 것이 주의된다. 이러한 허용 오차는 또한 결과적인 광학 공동이 레이징을 허용하기에 충분히 높은 Q 팩터를 갖도록  $\pi$ 에 충분히 가까운 위상 시프트를 포함한다.

[0045] 일정하지 않은 dc-인덱스( $\Delta n_{dc}(z)$ )는 통상적으로 격자 식각으로부터 기인하며 DFB 공동의 기능을 위해 필수적이

지 않다. 그럼에도 불구하고,  $\Delta n_{dc}(z)$ 는  $\frac{d\phi}{dz} = \frac{2\pi}{n\Lambda} \Delta n_{dc}(z)$  을 만족하는 격자 위상( $\phi(z)$ )과 모드 결합에 대

$$q(z) = \frac{\pi}{i2n\Lambda} \Delta n_{ac}(z) e^{i \left( \int \frac{2\pi}{n\Lambda} \Delta n_{ac}(z) dz - \phi(z) \right)}$$

이기 때문이다. 다시 말해서, 미분 가능한 격자

위상( $\phi(z)$ )(예로서, 느리게 변화하는 처프 또는 프리처프)은 이론적으로 dc-인덱스( $\Delta n_{dc}(z) = \frac{n\Lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dz}$ )로 대체될 수 있다.

[0046] 레이징을 개시하기에 충분히 높은 펌프 전력은 여기에서 임계 전력( $P_{th}$ )이라고 불린다. 그것은 공동의 임계 이득

( $g_{th}$ )( $m^{-1}$ 의 단위) 및 파이버의 라만 이득 효율성( $e_R(W^{-1}m^{-1}$ 의 단위))의 몫과 동일하며, 즉  $P_{th}=g_{th}/e_R$ 이다. 임계치에서, 신호 전력 및 모든 신호-유도 비선형성들은 무시해도 될 정도이다. 따라서, 임계치에서, 격자에서의 신호 필드는 알려진 선형 결합 모드 방정식들에 의해 모델링될 수 있다. 격자의 양쪽 단부들에서의 0이 되는 입사 신호 필드들의 경계 상태들은 임계치에서의 신호 필드의 복소수 전파 상수에 대한 대수 방정식을 야기한다. 이러한 전파 상수의 실수부는 신호 주파수를 제공하며, 허수부는 임계 이득을 제공한다.

[0047] 그러나, 이러한 대수 방정식은 전파 상수에 대하여 비선형이기 때문에, 그것은 무한수의 상이한 해법들을 가질 수 있다. 최소 허수부(최저 손실)를 가진 전파 상수에 대응하는 신호 필드는 공동의 기본적인 길이 방향 모드이며, 이것은 임계 이득( $g_{th}$ )에서 레이징한다(lase). 그러나, 펌프 전력이 추가로 증가된다면, 공동의 (라만) 이득은 몇몇 포인트에서 상기 대수 방정식의 또 다른 해법의 허수부를 초과할 것이며, 즉 레이저는 길이 방향으로 다중 모드화될 것이며 하나보다 많은 주파수에서 레이징할 것이다. 이것은 진동 출력 전력에 의해 관찰될 수 있다.

[0048] 상수 모듈러스( $|q| = \frac{\pi}{2n\Lambda} \Delta n_{ac}$ ) 및  $z=L_1$ (예로서,  $L_1=0.58L$ )에서의  $\pi$ -위상 시프트를 가지며 어떤 처프(도 26을 참조)도 갖지 않는 길이(L)의 격자에 대해, 임계 이득은,  $r = \cosh((2L_1 - L)|q|)/\cosh(L|q|)$  및 (전력) 손실 상수( $\alpha$ )(단위들  $m^{-1}$ 에서)를 갖고,  $g_{th} \approx \alpha + 2|q|r(1+r)$ 에 따라 근사될 수 있다. 격자에서의 전력 손실이  $x$  dB/m이면,  $\alpha = x \ln(10)/(10m) = x \cdot 0.2303/m$ 이다. 일 예로서,  $\alpha = 6.4/km$  ( $0.028dB/m$ ),  $L = 12.4cm$ ,  $L_1 = 7.192cm$ ,  $|q| = 90/m$  및  $e_R = 5/(Wkm)$ 를 가진 HNLF 실리카 섬유에서, 임계 이득( $g_{th} = 0.022/m$ ) 및 임계 전력( $P_{th} = g_{th}/e_R = 4.4W$ )을 획득한다. 격자 세기가 증가하면, 이 경우에 이론적으로 달성될 수 있는 최소 임계 전력은  $P_{th,min} = \alpha/e_R = 1.28W$ 이다.

[0049] 본 발명의 실시예들은 0.08W 내지 5W의 범위에 있는 임계 전력을 가진 라만 이득 매체에서 20 cm 미만의 길이를 가진 DFB 격자를 갖는 라만 레이저를 포함한다. 다른 실시예들은 1.28W 내지 4.4W의 범위, 0.24W 내지 1 W의 범위, 또는 0.08W 내지 0.24 W의 범위에 있는 임계 전력을 가진 라만 이득 매체에서 20 cm 미만의 길이를 가진 DFB 격자를 갖는 라만 레이저를 포함한다. 본 발명의 다른 실시예들은 2 W 미만, 1 W 미만, 또는 0.1 W 미만의 임계 전력을 가진 라만 이득 매체에서 20 cm 미만의 길이를 가진 DFB 격자를 갖는 라만 레이저를 설명한다. 이들 실시예들의 일 양태에 따르면, DFB 격자는 14 cm 미만의 길이일 수 있다.

[0050]  $\alpha = 0.23/m(1dB/m)$  및  $e_R = 0.95/(Wm)$ 을 가진 DFB 격자를 위해  $As_2Se_3$  칼코지나이드 섬유를 사용하는 것은  $P_{th,min} = 0.24W$ 를 제공한다.  $\alpha = 0.0046/m$  ( $0.02dB/m$ ) 및  $e_R = 0.055/(Wm)$ 을 가진 DFB 격자를 위해 텔루라이트 섬유를 사용하는 것은  $P_{th,min} = 0.08W$ 를 제공한다.

[0051] 본 발명의 일 실시예에서,  $As_2Se_3$ 와 같은 칼코지나이드 섬유에서의 라만 파이버 레이저에는 바람직하게는 0.24W 내지 1W의 범위에 있는 임계 전력을 갖고 20 cm 미만의 길이를 가진 DFB 격자가 제공된다. 본 발명의 다른 실시예에서, DFB 격자는 14 cm 미만의 길이를 가진다. 본 발명의 또 다른 실시예에서, 텔루라이트 섬유에서의 라만 파이버 레이저에는 바람직하게는 0.08W 내지 0.24W의 범위에 있는 임계 전력을 갖고 20 cm 미만의 길이를 갖는 DFB 격자가 제공된다. 이 실시예의 일 양태에 따르면, DFB 격자는 14 cm 미만의 길이일 수 있다.

[0052] 펌프 전력이 임계 전력( $P_{th}$ )을 넘어 증가되는 경우, 공동의 (라만) 이득은 몇몇 포인트에서 상기 대수 방정식의 또 다른 해의 허수부를 초과할 것이며 상기 레이저는 길이 방향으로 다중모드화될 것이고, 즉 그것은 하나보다 많은 주파수에서 레이징할 것이다. 이것은 시간적으로 발전하는 출력 전력에 의해 관찰될 수 있다.

[0053] 회도류 파이버 DFB 레이저들의 레이징 파장들은 이득(예로서, 에르븀에 대해 1.55mm, 이테르븀에 대해 1.05 마이크로, 툴륨에 대해 2 마이크로)을 제공하는 회도류 원소의 이득 대역폭 내에서 제한된다. 회도류 원소들의 이득 대역폭을 넘는 다른 파장 영역들에 대해, 하나는 비선형 광학 결정들( $\chi^2$ )에서의 제 2 고조파 발생(second harmonic generation; SHG) 및 광학 파라메트릭 발진(optical parametric oscillation; OPO)과 같은 비선형 프로세스들,  $\chi^3$  비선형성들을 가진 재료들(실리카와 같은)에서의 자극된 라만 산란(stimulated Raman scattering; SRS)을 사용한 파장 변환에 의존할 수 있다.

- [0054] SRS에 기초한 파장 변환은 광범위한 조정 가능성, 많은 파장 변환, 높은 (양자) 효율성, 및 REI 도핑의 설계 및 제조 제약들로부터의 자유도와 같은, 여러 개의 이점들을 가진다. 연쇄 라만 공진기들에 기초한 알려진 파장 변환 디바이스의 개략도가 도 1에 도시된다. 여기에서, 펌프 레이저로부터의 레이저 방사는 파이버에서 라만 이득을 유도하며, 스토크스의 파동에서의 레이징은 한 쌍의 파이버 브래그 격자들(FBG들)을 사용하여 생성될 수 있는 바와 같이, 자발적 방출로부터 또는 레이징 공동으로부터 확립된다. 상기 스토크스 파동은 일단 레이징하면, 유사하게 또 다른 쌍의 FBG들을 사용하여 2차 스토크스를 레이징하기 위해 사용될 수 있다. 이러한 프로세스는 원하는 파장이 획득될 때까지 계속될 수 있다.
- [0055] 라만 이득은 통상적으로 REI 이득보다 훨씬 더 작기 때문에, 보다 높은 펌프 전력을 및 보다 긴 길이들이 레이징 임계치를 능가하도록 요구된다. 긴 길이들(통상적으로 >100m) 때문에, 라만 레이저는 다수의 길이 방향 모드들 상에서 동작하며, 따라서 이러한 소스들은 단일 주파수 또는 좁은 선폭 출력 라만 방사를 생성하기에 적절하게 발견되지 않는다.
- [0056] 최근에, 격자 내부에서의 라만 이득에 의존하는 라만 DFB 레이저들이 단일 주파수 또는 좁은 선폭 레이저 발진을 달성하기 위해 제안되어 왔다. 예를 들면, V. E. Perlin 및 H. G Winful의 "분산 피드백 파이버 라만 레이저(Distributed Feedback Fiber Raman Laser)"(양자 전자 공학의 IEEE 저널 37 38, (2001)); Y. Hu 및 N. G. R. Broderick의 "DFB 라만 파이버 레이저의 개선된 설계(Improved design of a DFB Raman fibre laser)"(광 통신. 282 3356 (2009))를 참조하자. 단위 길이당 라만 이득이 작다(<math>\sim 0.01\text{dB/m/W}</math>)는 사실에도 불구하고, 공동의 높은-Q 때문에, 공동에서의 신호의 강도는 펌프 전력의 상당한 감소 및 그에 따른 펌프의 효과적인 사용을 야기하기에 충분히 강한 것으로 예상된다.
- [0057]  $\pi$  위상 시프트 없이 균일한 1 미터 길이의 파이버 브래그 격자가 고려된다. 예를 들면, V. E. Perlin 및 H. G Winful의 "분산 피드백 파이버 라만 레이저"(양자 전자 공학의 IEEE 저널 37 38, (2001))를 참조하자. 선형 분석을 사용할 때, 임계치가 1W 이하일 수 있다는 것이 입증될 수 있다. Y. Hu 및 N. G. R. Broderick의 "DFB 라만 파이버 레이저의 개선된 설계"(광학 통신 282 3356 (2009))에서 격자의 물리적 중심으로부터  $\pi$  위상 시프트 오프셋을 가진 균일한 20 cm 공동은 1W에 가까운 임계치 및 80%의 기울기 효율성을 갖고 동작될 수 있다는 것이 이론적으로 보여진다.
- [0058] 이들 예측들은 매력적인 성능을 제공하지만, 1 미터 및 심지어 20 cm의 매우 긴 격자들은 제조시 심각한 문제들을 드러내며 온도 변화들, 구부러짐-유도 응력들, 진동 등과 같은, 패키징 제약들로 인해 약화된 성능을 야기할 것이다. 격자에서의 위상 시프트 및 20 cm 미만의 DFB 길이를 가진 실제 DFB 라만 파이버 레이저들은 지금까지 입증되거나 또는 실현되지 않고 있다. 또한, 이러한 작은 길이(20 cm 미만)의 DFB를 가진 라만 방사의 발생은 상당히 뜻밖이다.
- [0059] 라만 DFB 레이저들은 SBS 후방산란을 회피하기에 충분히 짧은 길이에서 큰 변환 효율성을 갖고 광대역 방사를 단일 주파수 방사로 변환할 가능성을 가진다.
- [0060] 연구들은 이러한 레이저들이 격자 프로파일 상에 부여된 백색 위상 및 진폭 잡음에 강력해야 함을 보여주는, 레이징 특성들에 대한 특정한 격자 불완전들의 효과를 고려하고 있다. J. Shi 및 M. Ibsen의 " $\pi$  위상-시프트 DFB 라만 파이버 레이저들 상에서의 위상 및 진폭 잡음의 효과들"(브래그 격자들 폴링 및 감광성, JThA30 (2010))을 참조하자. 통상적인 격자 불완전들은 랜덤하지 않지만, 종종 기록 장치에 특정한 소스들로부터 비롯되며 그러므로 백색 잡음으로서 잘 특성화되지 않는다.
- [0061] 실제로, DFB 구조들을 사용하여 단일 주파수 라만 레이징을 달성하는 것을 어렵게 만드는 다수의 문제점들이 있다. 이것들은 1) 예로서, 격자 기록 동안 UV 노출로 인한 파이버 손실, 2) 긴 격자들을 제조할 때 어려움, 3) 디바이스를 따른 브래그 파장에서의 비-균일성들, 4) 커-비선형 유도 브래그-파장 변화, 5) 높은 펌프 전력들의 요건, 6) 펌프 흡수로 인한 격자를 따르는 열적 변화들, 7) 격자의 이득 매체(예로서, 코어) 및 인덱스 변조를 가진 신호 필드 및 광학 펌프의 공간적 중첩, 및 8) 펌프 및 DFB 격자의 스펙트럼 중첩을 포함한다. 이들 팩터들은 펌프 전력의 레이징, 작은 출력 전력, 및 비효율적인 사용을 위해 큰 임계치를 야기한다. 이하에 설명되는 바와 같이, 실험적인 결과들은 매우 양호한 이득 파이버(저 손실, 높은 라만 이득 계수), 고 품질 레이저 어셈블리(낮은 스플라이스 손실) 및 우수한 브래그 격자 설계 및 제조(깨끗한 스펙트럼, 정확한 위상 시프트, 좁은 선폭)를 가진 본 발명의 양태들에 따라 개발되었지만, 성능은 레이징 성능을 방해하는 부가적인 메커니즘들이 존재할 수 있음을 제한하는, 상기-언급된 종래 기술의 시뮬레이션들에서 예측된 것과 상당히 다르다.
- [0062] 라만 파이버 DFB들의 이전 시뮬레이션들의 모두는 성공적인 동작을 위해 20cm 이상의 격자들을 요구했다. 그러

나, 격자들이 그 길이가 더 짧아질 수 있는 경우, 유리할 것이다. 예를 들면, 파이버 격자들은 위상 마스크들을 갖고 제조될 수 있다. 현재 기술은 위상 마스크들이 20cm의 길이들에서 제조되도록 허용하지 않는다. 그러므로, 20cm 길이에서의 이러한 격자는 제조하기가 어렵다.

- [0063] 라만 파이버 DFB 설계 공간을 20cm 미만의 격자들로 연장하는 방법을 발견하였으며 여기에 교시한다. 20cm보다 더 짧은 격자들이 라만 파이버 DFB 협 선폭 소스들로서 동작하게 할 수 있음을 발견하였다.
- [0064] 20cm보다 더 짧은 공동은 현재 기술들을 사용하여 제조하기 위해 비교적 용이하지만, 이것은 약 5W로의 임계 펌프 전력들에서의 몇 배 증가를 야기하지만, 이것은 흔히 이용가능한 고 전력 희토류 또는 라만 파이버 레이저들에 의해 쉽게 달성될 수 있다. 큰 라만 이득 계수 및 낮은 고유 손실들(~ 0.02dB/m)을 가진 파이버들의 사용은 또한 상당히 낮은 펌프 전력(5W 미만)을 가진 짧은 라만 DFB 레이저들을 만드는 것을 지지한다.
- [0065] 본 발명은 라만 DFB 레이저 및 다른 라만 레이저 구성들의 동작, 그것들의 개선된 설계, 뿐만 아니라 이를 사용한 고 전력 레이저 시스템들을 개시한다. 보다 일반적으로, 종래의 펌프 소스들을 사용하고 3차 커 비선형성과 같은 순시적 비선형성의 가변 레벨들 및 라만 이득을 이용한 협대역 광의 발생 및 변조가 여기에 설명된다.
- [0066] 또한, REI 도핑에 의해 액세스 가능하지 않은 파장들에서의 고 전력 신호들, 좁은 선폭의 발생이 설명된다. 또한, 그 이득 및 감광성이 라만 파이버 DFB 레이저의 최적의 성능을 허용하는 최적화된 광 파이버들이 묘사된다.
- [0067] 본 발명의 일 양태는 순방향, 역방향, 또는 양쪽 모두에서 착수된 펌프 방사에 의해 개시된 이득을 사용하는 DFB 파이버 격자 구조를 사용하는 것이다. DFB 격자 구조는 중심에 위치되거나 또는 중심으로부터 약간 오프셋된 적어도 하나의 이산 위상 구조( $\pi$ -위상 시프트)를 가진다. 레이저 방사는 예로서, WDM 커플러를 사용하여 순방향 또는 역방향들(펌프에 대하여), 또는 양쪽 모두에서 추출된다. 분리는 레이저 공동으로의 원치 않는 신호 피드백을 방지하기 위해 레이저 출력에서 제공될 수 있다. 이러한 광학 분리는 레이저 성능 및 안전성을 개선하기 위해 흔히 알려진 기술이다.
- [0068] 단일 주파수 또는 좁은 선폭 라만 레이징 및 DFB 격자를 빠져나오는 잔여 펌프 파동은 라만 (스토크스) 신호를 추가로 증폭시키기 위해 MOPA(마스터 증폭기 전력 증폭기) 방식으로 부가적인 이득을 생성하기 위해 파이버의 길이를 통해 추가로 전파될 수 있다.
- [0069] 본 발명의 일 실시예에서, 라만 DFB 레이저는 DFB 레이저의 출력으로부터 하나의 스토크스 차수만큼 다운시프트된 광을 생성하는, 연쇄 라만 공진기의 공진기 내부에 위치된다. 이 아키텍처에서, 라만 공진기는 펌프 파동을 보다 효율적으로 이용하고 광대역 펌프의 단일 주파수 또는 좁은 선폭 스토크스 파동으로의 변환을 증가시키기 위해 펌프 광을 상기 DFB 레이저에 제공한다.
- [0070] 본 발명의 또 다른 실시예에서, 펌프 파동은 다수의 단일 또는 좁은 주파수 레이징 출력들을 생성하기 위해 라만 이득 스펙트럼 내에 상이한 브래그 파장들을 갖는 일련의 라만 DFB 구조들을 통해 전파하도록 허용된다.
- [0071] 본 발명의 일 실시예에서, 고도로 비선형, 복굴절 또는 편광 유지 파이버(예로서, PANDA) 파이버가 키잉된 편광 상태를 가진 라만 발진을 획득하기 위해 라만 이득 매체로서 사용된다.
- [0072] 본 발명의 다른 실시예에서, 라만 DFB 레이저는 공동-내 파장 변환을 허용하기 위해 희토류(예로서, 예르븀, Yb) 파이버 레이저 공동, (비선형, 링 또는 페브리-페롯(Fabry-Perot)) 내부에 위치된다.
- [0073] 본 발명의 일 실시예에서, (길이를 따라) 비-균일한 분포의 브래그 파장을 가진 DFB 파이버 격자들이 사용된다. 이러한 프리-치프는 강력한 순방향 및 역방향 전파 공동-내 필드로 인해 자기/교차 위상 변조 또는 열 가열의 효과를 널 아웃(null out)하도록 돕는다.
- [0074] 본 발명의 다른 실시예에서, DFB 공동은 브릴루앙 시프트(Brillouin shift)만큼 분리된 두 개의 파장들에서 동작하도록 설계된다. 라만 펌핑은 그 후 양쪽 파장들 모두에서 레이징을 야기할 것이다. 그러나, 일단 레이징되면, 자극된 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering; SBS)은 보다 높은 파장으로 에너지를 전달하며, 그에 따라 이러한 모드의 전력을 증가시킬 것이다.
- [0075] 본 발명의 다른 실시예에서, 파이버 DFB 레이저 및/또는 상기 증폭기들 중 임의의 것 또는 그것 모두는 높은(수 와트들보다 큰) SBS 임계치를 가진 파이버를 사용한다. 높은 SBS 임계치는 기능적인 광 도파관을 유지하면서, 변형 및 온도 분할과 같은 잘 알려진 방법들을 사용하여 또는 역도파 음향 도파관을 야기하는 도펀트 프로파일을 통해 달성될 수 있다.
- [0076] 본 발명의 일 실시예에서, 파이버 DFB 공동은 매우 낮은 온도 민감성을 갖도록 설계된 파이버에 식각되어 도파

관의 유효 굴절률이 온도에 따라 최소로 변한다. 예를 들면, 이러한 낮은 민감성은 붕소(B) 및 게르마늄(Ge) 도핑으로 달성될 수 있다. B-Ge 도핑은 B 도핑에 의해 도입된 재료 굴절률의 음의 온도 계수로 인해 유효 굴절률에서의 보다 낮은 열 변화를 갖는 유리를 생성한다. 이러한 도핑은 파장 및 위상 잡음을 포함하여, 다양한 레이저 파라미터들에 대한 매우 낮은 온도 민감성을 달성한다. 이러한 도핑은 온도 변화 및 잡음을 감소시키기 위해 라만 이득 또는 REI 이득을 갖고 사용될 수 있다는 것을 주의하자.

[0077] 일반적으로, 굴절률 온도 의존성은 도파관을 제조하기 위해 사용된 도펀트들의 함수로서 변화할 것이다. 이러한 도펀트들은 예를 들면, Ge, B, P, F, Al, La, Ta, 및 다수의 희토류 이온들, 및 이것들의 조합들을 포함한다. 일반적으로, 다양한 도펀트 레벨들을 갖고 주어진 도파관 설계를 달성하는 것이 가능하다. 이들 도펀트 레벨들은 온도에 대하여 모달 인덱스의 최저 변화를 생성하기 위해 조정될 때, 이러한 도파관을 통합한 레이저는 최저 잡음 특성들을 갖는 것으로 예측될 것이다. 이것은 임의의 파이버 레이저에서 사용될 수 있으며, 이득은 각각의 경우에 보다 낮은 잡음일 것임을 주의하자.

[0078] 이제 본 발명의 원리 및 예를 보다 상세히 설명한다. 먼저 브래그 파장의 온도 의존성을 기본적인 열 주파수 잡음에 연관시킨다. 그 후 기본적인 열 주파수 잡음이 도펀트들의 적절한 선택을 통해 감소될 수 있다는 것을 보여준다.

[0079] 파이버 브래그 격자의 브래그 파장은 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0080] 
$$\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda_{grating}$$

[0081] 여기에서,  $\lambda_{Bragg}$ 는 브래그 파장이고,  $n$ 은 격자를 갖고 공진하는 모드의 유효 굴절률이며,  $\Lambda_{grating}$ 은 격자 주기이다. 격자 브래그 파장의 온도 도함수는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0082] 
$$\frac{d\lambda_{Bragg}}{dT} = 2n\Lambda_{grating} \left[ \frac{dn}{n dT} + \frac{1}{\Lambda_{grating}} \frac{d\Lambda_{grating}}{dT} \right] = \lambda_{Bragg} \left[ \frac{dn}{n dT} + \frac{d\epsilon}{dT} \right]$$

[0083] 괄호들에서 제 1 항은 열-광학 계수이며 제 2 항은 파이버의 열 팽창 계수이다. 통상적으로, 제 1 항은 실리카 광 섬유들에서 훨씬 더 크다. 파이버 환경에서의 열 유도 변화로 인한 작은 추가적인 변화는 이 공식에서 무시된다.

[0084] 온도에 따른 브래그 파장의 변화는 공동으로서 상기 격자를 사용한 DFB 레이저가 가질 기본적인 열 주파수 잡음의 양과 관련될 수 있다. 정상 상태에서, 주파수 잡음은 레이저 E-필드( $\psi(t)$ )의 위상의 시간 도함수에 관련된다. 따라서, 주파수 잡음은 파이버 볼륨에 대한 적분에 비례한다:

[0085] 
$$\psi(t) \propto \int \left[ \frac{dn}{n dT} + \frac{d\epsilon}{dT} \right] \Delta T(t, r) |e(r)|^2 d^3r$$

[0086] 여기에서  $e(r)$ 은 E-필드의 방사상 의존성이고,  $\Delta T$ 는 공간 및 시간에 대한 온도 변동이며, 괄호들에서의 항은 온도에 따른 브래그 파장의 변화에 대한 공식에서처럼, 열-광학 및 열 팽창 계수들의 합이다. 따라서, 온도에 따른 브래그 파장의 변화에서의 감소는 감소된 열 잡음을 제공할 것으로 예상된다.

[0087] B-Ge 도핑 코어를 가진 파이버안에 식각된 파이버 격자의 브래그 공진 파장의 온도 민감성은 Ge 단독 또는 Ge 및 Er을 통해 도핑된 코어의 것보다 작다는 것이 알려져 있다. B-Ge 도핑 파이버 브래그 격자들에서의 브래그 파장의 온도 의존성은 10.69pm/C인 반면, Ge-Er 파이버 브래그 격자들에서, 브래그 파장 온도 의존성은 14.45pm/C인 것이 도시된다. 그러므로, B-Ge 도핑 파이버에서의 열 변동은 상기 파이버에서의 격자의 브래그 파장에 작은 변화를 야기할 것이다. 상기 주장들로부터, 이러한 감소된 온도 의존성은 이러한 격자를 사용하는 레이저에서의 기본 잡음을 감소시킬 것이다. 이러한 예는 B-Ge와 Ge-Er 도핑을 갖는 파이버들을 비교하지만, 예를 들면, B-Ge-Er 도핑 파이버들이 또한 Ge-Er 도핑을 가진 파이버들보다 온도에 따른 브래그 파장의 더 낮은 변화를 가질 것이라고 여겨진다. 따라서, 이러한 파이버 격자를 통합한 B-Ge-Er 도핑 파이버 레이저는 Ge-Er 도핑 파이버를 사용한 동일한 파이버 레이저보다 낮은 위상 잡음을 가질 것이다. 도펀트 예들의 다른 조합들이 또한 가능하다. 게다가, B-Ge 도핑 파이버를 사용한 라만 파이버 DFB 레이저는 Er-Ge 도핑 파이버에서의 Er 이득에 의존하는 유사한 레이저보다 낮은 기본 열 잡음을 가질 것이다. 여기에 설명된 도핑은 본 발명의 양태들에 따라, 여기에 설명된 브래그 격자들 중 임의의 것에서 사용될 수 있다.

[0088] 본 발명의 일 실시예에서, 라만 레이저는 라만 이득 매체에서의 격자 구조를 사용함으로써 제공된다. 본 발명의

다른 실시예에서, 라만 레이저는, 능동 매체가 라만 이득 매체이며 DFB 파이버 격자가 20cm 미만인 길이를 갖는 DFB 파이버 격자를 사용하여 제공된다. 본 발명의 다른 실시예는 DFB 파이버 격자를 사용한 라만 레이저를 묘사하며, 여기에서 능동 매체는 라만 이득 매체이고 DFB 파이버 격자는 19.5cm 미만의 길이를 가진다. 부가적인 실시예들은 18cm 미만의, 15cm 미만의, 또는 14cm 미만의 길이를 가진 DFB 격자를 포함한다. 추가 실시예들은 약 14cm의 길이 또는 약 12cm의 길이를 가진 DFB 파이버 격자들을 포함한다.

[0089] 본 발명을 연구하기 위해 사용된 실험적 셋업이 이제 설명된다. DFB 파이버 격자 구조는  $NA=0.22$ , 유효 면적  $18.7\mu\text{m}^2$  (1550nm에서), 컷오프 파장  $< 1050\text{nm}$ , 및  $2.5/\text{W/km}$ 의 편광되지 않은 광에 대한 라만 이득 효율성을 가진 라만 파이버(뉴저지 08873, 섬머셋, 스쿨하우스 로드 25에 사무실을 가진, OFS Fitel, LLC에 의해 제조된)에 기록된다. 파이버는 그것의 감광성을 증가시키기 위해 듀테륨이 로딩되었다.  $\Lambda_{\text{grating}}=547.30\text{ nm}$ 의 피치를 가진 124mm 길이의 격자는 CW 244 nm 식각 파장을 가진 직접 기록 시스템을 사용하여 식각되었다. 라만 이득 파이버의 길이는 14cm이고 상기 격자의 한쪽 측면 상에서 대략 21cm의 단일 모드 파이버를 갖는다. 결과적인 브래그 파장은 1583nm이다. 격자 프로파일은 균일하며  $\pi$  위상 시프트(또는 동등하게,  $\Lambda_{\text{grating}}/2$ )는 71.92mm에서의 중심으로부터 8% 벗어나 위치된다.

[0090] 격자 송신 스펙트럼이 도 2에 도시된다. 균일한 124mm 위상 시프트 격자로의 격자 스펙트럼의 시각적 피트(송신 폭 및 깊이)는  $\sim 3.5 \times 10^{-5}$ 의 굴절률 변조를 제공한다. 대응하는 격자 결합 상수는  $\kappa=69(1/\text{m})$ 이었다.

[0091] 라만 DFB 레이저에서의 단일 주파수 동작의 동작을 설명하기 위해 사용된 셋업이 도 3에 도시된다. 사용된 펌프 레이저는 1480nm에서 81 W의 최대치를 생성하는 고 전력 연속 라만 파이버 레이저였다. SSMF(표준 단일 모드 파이버) 펌프 출력은 1480/1550 WDM 301로 스플라이싱되며, 이것은 그 후 DFB 파이버(302)로 스플라이싱된다. 광 경로에서의 아이솔레이터는 역방향으로부터 DFB 공동으로의 낮은 피드백을 보장하는 반면, 순방향에서 DFB 파이버 피그테일(DFB fiber pigtail)은 각도 클리빙된다.

[0092] 격자는 금속 바에 위치되며 열 변화들을 감소시키기 위해 열 전도성 페이스트에 의해 둘러싸여진다. 상기 격자는, 위상 시프트가 1) 302에서 (펌프를 향해) 안쪽으로 및 2) 303에서 (펌프로부터 멀어지는) 바깥쪽으로 향하도록 테스트된다. 레이저의 역방향 광 출력(304)은 도 3에 도시된 바와 같이 여러 개의 측정치들(306) 중 하나에 결합된다. 이들 측정치들은 전력, 스펙트럼(OSA), 선폭(지연된 자기-호모다인 간섭계 + RF 스펙트럼 분석기), 편광기 및 RF 스펙트럼 분석기, 및 편광계이다. 동작 동안, 매우 작은 펌프 전력이 흡수되어, 레이저의 출력에서의 펌프 전력이 레이저 신호 출력과 비교하여 매우 크게 된다. 본 발명의 추가 실시예에서, DFB 라만 레이저는 바깥쪽 광 출력(305)을 가진 바깥쪽으로 향하는 위상 시프트 파이버(303)로 동작한다.

[0093] 실험적 결과들

[0094] WDM 및 아이솔레이터를 통해 측정된 레이저의 출력 스펙트럼들은 도 4a 및 도 4b에 도시되며, 여기에서 위상-시프트는 각각 안쪽 및 바깥쪽으로 향한다. 1584nm의 동일한 파장에서의 발진은 양쪽 배향들 모두에 대해 관찰된다.

[0095] 후방 신호 전력 대 펌프 전력은 도 5a에 도시되며, 여기에서 위상 시프트는 안쪽(펌프를 향해)으로 향한다. 임계 펌프 전력은 38.7W이며 최대 출력 전력은 65mW이다. 작은 히스테리시스가 임계치 근처에서 관찰된다. 레이저는 38.7W의 펌프 전력에서 턴 온되며 36.3W의 전력에서 턴 오프된다. 신호 전력 대 펌프 전력 커브는 비선형적이다. 기울기 효율은 0.3%에서 0.07%로 변한다. 도 5a는 또한 송신된 펌프 전력을 도시한다. 최대 펌프 전력에서, 송신된 펌프는 레이저의 입력 및 출력으로서 검출기들을 비교함으로써 측정된 바와 같이 4W 미만만큼 감소된다. 손실은 DFB가 식각되는 라만 파이버 및 SMF 파이버 사이의 스플라이스 손실, 뿐만 아니라 UV 식각 프로세스로부터 비롯된 격자에서의 UV 유도 손실로부터 대부분 기인한다.

[0096] 도 5b는 위상-시프트가 바깥쪽으로 향할 때 역방향 신호 전력 대 펌프 전력을 도시한다. 약 50mW의 출력 전력은 80W의 최대 펌프에 대해 획득된다. 도 5a 및 도 5b를 비교함으로써, 보다 큰 전력은  $\pi$  위상-시프트의 오프셋의 방향으로부터 획득될 수 있다는 것이 명백하다.

[0097] 도 6은 임계치에 가깝고 최대 펌프 전력에 가까운 펌프 전력들에서의 지연된 자기-호모다인 간섭계를 사용하여 측정된 선폭을 도시한다. 양쪽 경우들 모두에서, 광 대역폭의 반 최대에서의 전-폭은 RF 스펙트럼의 3dB 폭으로부터 6MHz가 되는 것으로 추정되었다. 편광 분석기를 사용한 편광의 정도(DOP)가 측정되었고, 거의 선형 편광, 즉  $DOP \approx 100\%$ 인 것이 발견되었다.



- [0098] RF 스펙트럼은 보다 큰 규모로 측정되었다. 도 7은 100MHz에서의 맥놀이 주파수를 도시하며, 이것은 이중 편광에서의 레이징으로 인해 가장 가능성 높은 제 2 레이징 모드의 존재를 표시한다. 파이버 DFB들은 두 개의 편광들 상에서 레이징하도록 도시된다. 맥놀이 주파수가 부가적인 편광 모드로 인한 것임을 증명하기 위해, 우리는 RF 스펙트럼 분석기의 앞에 있는 편광기에 앞서 한 세트의 패들(paddle)들을 위치시킨다. 도 7은 상기 맥놀이 주파수가 상기 패들들을 조정함으로써 0이 될 수 있음을 도시한다. 출력의 DOP가 또한 측정되며 100%에 가까운 것이 발견되었다. 이들 측정들은 레이저가 단일 길이 방향 모드의 두 개의 편광들 상에서 동작하는 것을 강하게 나타낸다.
- [0099] 본 발명의 일 양태에 따르면, DFB 레이저에 의해 발생된 라만 방사의 대역폭은 약 6 MHz이다. 대역폭은 광 출력이 그것의 피크 전력의 50% (3dB)인 주파수들에서 정의된다. 본 발명의 일 양태에 따르면, DFB 레이저에 의해 발생된 라만 방사의 대역폭은 6MHz 이상이지만 100MHz보다 작다. 본 발명의 일 양태에 따르면, DFB 레이저에 의해 발생된 라만 방사의 대역폭은 약 1GHz이거나 또는 그보다 작지만 100MHz보다 크다.
- [0100] 이전에 논의된 바와 같이, 여기에서의 라만 방사는 라만 산란으로부터 발생하는 방사로서 정의된다. 라만 이득으로부터 발생하는 방사를 포함하여, 이 기술분야의 숙련자에게 알려진 바와 같이 라만 방사를 특성화하는 다른 방식들이 있다. 다음으로, 라만 DFB를 사용하는 상이한 고 전력 레이저 시스템들이 도시된다.
- [0101] 도 8a는 협대역 라만 방사를 제공하는 광 출력(802)을 가진 마스터 발진기 및 전력 증폭기 방식의 라만 DFB 레이저의 개략도를 도시한다. DFB 격자를 통해 송신된 다량의 잔여 펌프 전력은 광 출력(802)을 가진 협대역 라만 방사를 위한 증폭기를 만들기 위해 부가적인 라만 파이버에 결합될 수 있다. 따라서, 레이저의 총 효율성은 DFB 레이저 기술이 효율이 표시하는 것보다 상당히 더 높을 수 있다. 증폭기 파이버는 증가된 SBS 임계치를 갖도록 설계될 수 있다. 이것은 안티-가이딩 음향 코어의 설계, 파이버를 따른 열 또는 변형을 구배들의 사용, 상이한 SBS 주파수 응답을 가진 파이버들의 연속의 사용, 또는 다른 알려진 방법들과 같은 알려진 방법들을 사용하여 행해질 수 있다.
- [0102] 임의의 역방향 전파 신호 광으로부터 DFB 격자를 분리하기 위해, 도 8b에 도시된 바와 같이 DFB 격자 후 광학 분리의 수단을 위치시키는 것이 또한 일반적인 관례이다. 이러한 광학 분리는 펌프가 증폭 파이버를 통과하도록 허용할 것이다. 이것은 펌프가 보다 협대역 아이솔레이터를 바이패스하도록 허용하기 위해 광대역 아이솔레이터를 사용하여, 또는 파장 분할 다중화기들(WDM들)을 사용하여 확립될 수 있다. 본 발명의 MOPA 방식들의 모두에서, 이러한 분리는 적절한 레이저 동작을 보장하기 위해 필요하다면 존재하는 것으로 가정될 수 있다.
- [0103] 일반적으로, 도 8a 및 도 8B에 도시된 펌프와 같이, 본 발명의 실시예들에 사용된 펌프는 Q-스위칭과 같이, 연속-파 또는 펄싱될 수 있다. 펄싱된다면, 펄스 지속 기간은  $2nL/c$ 보다 커야 하며, 여기에서 n은 굴절률이고, c는 광의 속도이며, L은 Q 인자에 의해 강화된, 공동의 유효 길이이다.
- [0104] 일반적으로, 예를 들면, 변조된 시드 소스의 라만 증폭을 사용하여 펌프를 구성함으로써와 같이, 펌프 전력을 변조하는 것이 가능하다. 커 비선형성이 충분히 큰 경우, 전력 변화들은 파장 및 위상 변화들로 변환될 것이다. 따라서, 라만 DFB는 펌프 전력을 통해 변조된 위상일 수 있다. 다른 파라미터들 중에서도, 격자 공동, 라만 이득, 펌프 레벨, 및 펌프 변조 레벨은 출력 전력 변화들을 감소시키기 위해 조정되어야 할 것이다. 대안적으로, 커 효과가 충분히 작은 경우, 펌프 전력 변조는 신호의 진폭 변조를 제공할 수 있다.
- [0105] 일반적으로, 라만 DFB 레이저는 출력 전력 및 편광 특성들 모두에서 상당한 히스테리시스를 보일 수 있다. 이러한 히스테리시스를 극복하기 위해, 보다 낮은 전력 CW 펌프에 앞서, 큰 초기 펌프 펄스가 사용될 수 있다. 보다 낮은 전력 펌프가 그 후 보다 낮은 출력 전력들을 액세스할 수 있다.
- [0106] 히스테리시스는 또한 열, 변형, 전기, 또는 비-펌프 방사와 같은 다른 초기 섭동들을 갖고 극복될 수 있다. 이러한 개시 섭동들은 상기 레이저로 하여금 원하는 레이징 상태를 달성하게 할 것이다. 이들 초기 섭동들은 그 후 제거될 수 있으며 상기 레이저는 원하는 대로 레이징을 계속할 것이다. 라만 DFB의 비선형 특성 때문에, 주어진 입력 펌프 전력 및 펌프 시간 의존성에 대한 하나보다 많은 정상 상태 레이징 해법이 있을 수 있다. 열, 변형, 전기, 또는 비-펌프 방사와, 및 펌프 변화들을 포함한 다양한 섭동들이 상기 레이저로 하여금 하나의 상태에서 또 다른 상태로 전이하도록 허용할 수 있다.
- [0107] 레이저의 최저 잡음 동작 상태는 위상 및 진폭 사이에서의 최소 결합을 가진 상태일 것이다. 이것은 레이저가 최저 전력에서 동작할 때 및 공동 내부에서의 전력이 여전히 레이징을 허용하기 위해 가능한 한 낮을 때 달성된다. 이상적으로, 격자 프로파일의 커 유도 왜곡들은 최소화될 것이다. 이러한 경우에, 펌프 또는 신호 전력 변동들은 레이저 위상 잡음에 대한 최소 영향을 가질 것이다. 이것은 레이저의 준 선형 동작일 것이다. 그것은 임

계치보다 약간 위에서 발생할 것이다. 일반적으로, 이러한 상태는 보다 높은 펌프 전력 펄스를 갖고 상기 레이저를 시작하고, 그 후 보다 낮은 신호 전력 상태를 달성하기 위해 펌프 전력을 낮춤으로써 액세스될 수 있다.

- [0108] 라만 DFB 레이저는 단일 및 이중 편광 레이징 사이에서 스위칭하도록 만들어질 수 있다. 이러한 소스는 감지 애플리케이션들에 유용할 수 있다. 충분한 비선형 편광 회전 및 선형 복굴절은 적절한 편광 특성들, 히스테리시스, 및 역학을 보장할 것이다.
- [0109] 펌프 방사는 또한 WDM 커플러를 통해 라만 이득 파이버의 다른 측면으로부터 인가될 수 있다. 이것은 원하는 스토크스 파의 전력을 추가로 강화시킬 것이다.
- [0110] 라만 레이징의 파장은 격자를 따라 금속성 코팅을 도포하고 전기 전류를 상기 코팅에 인가함으로써와 같이, 파이버의 온도를 변경함으로써 변경될 수 있다. 파장을 제어하기 위한 다른 수단은 라만 DFB 공동에 적용될 수 있다. 예를 들면, 공동은 히터 또는 냉각기에 위치될 수 있다. 이는 그것의 길이를 따라 가변 또는 비-균일 온도 분포에 종속될 수 있다. 이는 변형, 연장 또는 압축 중 하나, 또는 구부러짐 하에 놓여질 수 있다. 특히, 공동은 V 홈에 위치될 수 있고 기판에 접합될 수 있어서, 기판이 구부러질 때, 파장이 변한다.
- [0111] 또한, 공동의 증폭기 섹션에서 자극된 브릴루앙 산란을 억제하기 위해, 여러 개의 측정들이 취해질 수 있다. 하나는 수십 MHz의 반복률로 라만 DFB 레이저에 인가되는 펌프 파의 위상 디더링(변조)을 사용할 수 있다. 라만 이득 파이버의 길이를 따라 분포된 변형 또는 온도 변화를 적용하는 것이 가능하고, 라만 이득 파이버는 길이를 따라 브릴루앙 시프트를 변경할 것이고, 그에 따라 브릴루앙 임계치를 증가시킬 것이다.
- [0112] 일반적으로, 라만 DFB 레이저는 연쇄 라만 레이저 공동 내에 위치될 수 있다. 연쇄 라만 레이저는 통상적으로 서로로부터 하나의 라만 차수인 주파수에서 공진하는 하나 이상의 파이버 레이저 공동들 및 펌프 레이저를 포함한다. 연쇄 라만 파이버 레이저의 일 예는 참조로서 여기에 통합되는, G. Grubb 등의 "게르마노실리케이트 파이버들에서의 1.3  $\mu\text{m}$  연쇄 라만 증폭기(1.3  $\mu\text{m}$  Cascaded Raman Amplifier in Germanosilicate Fibers)"(광학 증폭기들 및 그것들의 응용들 컨퍼런스, PD3 1994)에 주어진다. 연쇄 라만 파이버 레이저에서의 파이버 DFB 격자를 배치하는 방법의 여러 예들이 예를 들면 도 9 내지 도 13에서 주어진다. 하나 이상의 라만 DFB 레이저들을 연쇄시키는 것이 또한 가능하다는 것을 주의하자.
- [0113] 도 9는 고-전력 협 선폭(1<GHz) 레이저 방사를 생성하기 위해 외부 DFB 격자 및 MOPA를 사용하는 구성을 도시한다. 여기에서, HR1, HR2, 및 HR3은 각각 파장들 1, 2, 3(예를 들면, 1175nm, 1239nm, 및 1310nm)에서 높은 반사를 제공하는 파이버 브래그 격자들이며, OC1은 파장 1에서의 약한 출력 커플러이다. 파이버 DFB 격자의 파장은 모든 다른 파장들보다 크며 예를 들면 약 1390nm인 파이버에서의 스토크스 시프트와 공칭적으로 동일한 양(예로서, 통상적으로 실리카 파이버에서 13.2 THz)만큼 더 크다. BR4는 제 4 파장에서의 대역 소거 필터이다. 이것은 DFB로부터의 후방 산란 방사의 효과를 완화시키기 위해 포함될 수 있다. 보다 많은 파장들이 연쇄에 부가될 수 있다. 라만 방사는 광 출력(902) 상에 제공된다.
- [0114] 도 10에서, 라만 DFB 레이저는 펌프의 재순환을 통해 펌프의 효율적인 이용을 허용하는 연쇄 라만 레이저 시스템의 최고 내부의 공진기(2개의 HR2. FBG들로 이루어진)에 위치된다. 여기에서, 파장들( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ )은 바람직하게는 라만 시프트에 의해 오프셋된 DFB 격자의 파장( $\lambda_3$ )보다 작다. 보다 많은 파장들이 연쇄에 부가될 수 있다. 단지 두 개가 명료함을 위해 도시된다. 라만 방사는 광 출력(1002) 상에 제공된다.
- [0115] 도 11은 단일 펌프 소스에 의해 펌핑되는 라만 이득 파이버들 및 다수의 DFB 격자들로 이루어진 고 전력 레이저/증폭기 시스템을 도시한다. 일 실시예에서, DFB들의 파장들은 펌프 파의 라만 이득 스펙트럼 내에 있다. 시스템의 출력은 다수의 단일-주파수 고-전력 레이저 발진들로 이루어질 것이다. 여기에서의 각각의 DFB 격자는 라만 파이버 레이저의 인스턴스라 불릴 수 있다. 각각의 인스턴스는 라만 이득 파이버의 길이를 포함할 수 있다. 이러한 실시예에서, 이득 파이버 길이들은 각각의 파장에 대해 상이한 전력을 제공하기 위해 짧거나 또는 길 수 있지만, 20cm 미만이다. 이 실시예의 다른 버전에서, 상기 격자들 중 하나 또는 모두는 파이버의 동일한 길이에 기록된다. 상기 격자들은 또한 동일한 길이의 파이버에서 겹쳐질 수 있다. 이 경우에, 단지 먼 오른쪽까지의 라만 이득 파이버의 마지막 길이만이 요구될 것이다. 라만 방사는 광 출력(1102) 상에 제공된다.
- [0116] 제 2 실시예에서, 각각의 DFB는 주파수에서 대략 하나의 라만 차수가 낮게 놓이고, 즉  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 이고, 여기에서  $\lambda_1$ 는 DFB1의 브래그 파장이고,  $\lambda_2$ 는 DFB2의 브래그 파장이며,  $\lambda_3$ 은 DFB3의 브래그 파장이다. 가장 큰 전력은  $\lambda_3$ 에 있을 것이다. 또한, 실질적으로 모든 전력은  $\lambda_3$ 에 있을 것이며 펌프 소스는 상기 차수들 모두의 저 잡

음 펌핑으로부터 유용할 것이다. 이러한 소스는 파장 민첩형인 것 외에 저 잡음 및 좁은 선폭을 가질 것이다.

[0117] 도 12에 도시된 시스템에서, 대역 소거 필터들(BR1, BR2, BR3 등)은 광이 역방향으로 전파되는 것을 방지하기 위해 통합될 수 있다. 이것은 다중-파장 레이저 및 저 잡음 고 전력 단일 주파수 레이저 둘 모두에 적용될 수 있다. 라만 방사는 광 출력(1202) 상에 제공된다.

[0118] 본 발명의 일 양태는 DFB3의 파장( $\lambda_3$ )의 제 2 고조파를 생성하기 위해 주파수 배가 결정(frequency doubling crystal; FDX)에 의해 도 12에 도시된 구성을 종료하는 것을 포함한다. 이것은 도 13에 묘사된다. 비선형 결정들(벌크 또는 주기적으로-폴링된), 파라메트릭 증폭기들, 고차 고조파 발생기들, 합계/차이 주파수 발생기들 등과 같은 다른 비선형 광학 구성요소들이 또한 이러한 레이저의 출력을 넘어 위치될 수 있다. 이러한 디바이스들은 이러한 비선형 광학 시스템들로 결합된 높은 전력을 가진 협-대역 민첩형 파장의 강화된 능력들을 포함할 것이다. 이러한 시스템들의 출력은 고차 고조파들, 합계 주파수들, THz 방사, 및 다른 비선형적으로 발생된 방사일 수 있다. 라만 방사는 광 출력(1302) 상에 제공된다.

[0119] 2차 비선형성(또는 몇몇 다른 차수 비선형성)이 충분히 큰 경우, DFB 격자는 공동 내 고차 고조파 발생을 통해 고조파 출력을 생성할 수 있다는 것이 가능하다. 예를 들면, 파이버 도파관이 예를 들면 열 또는 UV 폴링을 통해 유도된 2차 비선형성을 갖는 경우, 그것은 상기 공동 내에 제 2 고조파를 발생시킬 수 있다. 위상 매칭이 가능하지 않다면, DFB 격자 또는 부가적인 격자가 고차 고조파 광의 발생을 허용하기 위해 충분한 위상 매칭을 제공할 수 있다. 비선형 결정들에서의 준 위상 매칭은 또한 위상 매칭을 통해 효율적인 파장 변환을 달성하기 위해 사용될 수 있다. 본 발명의 실시예들은 또한 PPLN, PPLT, 또는 PPKTP와 같은 준-위상 매칭을 허용하기 위해 2차 비선형성 및 주기적으로-폴링된 구조들을 갖고 비선형적 결정들 상에 식각된 도파관들을 사용하는 것을 포함한다.

[0120] 이러한 레이저 실시예들은 펌프 아래에 하나의 스토크스 시프트를 레이징하는 것을 요구하지만, 충분한 펌프 전력을 갖고 반 스토크스 라인 상에 레이징하고 파이버 도파관으로 광학 포논 방사를 도입하는 것이 가능하다. 이러한 효과를 강화하기 위해, 광 손실은 스토크스 파장 범위에서 클 것이며 SRS 구축을 부진하게 한다. 이것은 필터 파이버들의 설계, 또는 이산 필터들 또는 흡수기들과 같은 다른 손실 메커니즘들의 통합을 통해 달성될 수 있다. SRS로부터 발생된 광학 포논들은 그 후 반-스토크스 파장 범위에서 이용될 수 있다. 충분히 높은 Q를 가진 이러한 범위에서의 DFB는 반-스토크스 광을 캡처하고 레이징할 것이다.

[0121] 도 14는 라만 DFB가 REI-도핑 파이버 레이저 공동(예로서, Er, Yb 또는 Er/Yb) 내부에 위치되며 DFB가 바람직하게는 하나의 스토크스 시프트만큼 오프셋된 파장을 가진 구성을 도시한다. 상기 REI 섹션은 커플러를 통해 펌프 레이저에 의해 펌핑된다. 라만 방사는 광 출력(1402) 상에 제공된다.

[0122] 레이저 내부에서의 공동-내 신호가 출력 신호보다 높을 수 있기 때문에, 파장 변환의 더 높은 효율성이 예상된다. 도 14의 실시예는 FBG2, FBG3 등을 포함함으로써 다수의 라만 차수들로 확장될 수 있다.

[0123] 도 15에 도시된 구성에서, 라만 이득 파이버는 또한 희토류 파이버 레이저 내부에서의 MOPA로서 동작하도록 통합될 수 있다. 라만 방사는 광 출력(1502) 상에 제공된다. 라만 DFB를 빠져나오는 라만 방사는 라만 DFB를 따르는 라만 이득 파이버에서 증폭된다. 라만 DFB 및 라만 파이버 둘 모두는 희토류(RE) 파이버 및 파이버 브래그 격자들(두 개의 FBG1들)로부터 발생하는 공진 레이징 필드에 의해 펌핑된다.

[0124] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 라만 DFB 레이저는 디바이스를 따라 균일한 브래그 격자를 가질 수 있다. 순방향 및 역방향들에서의 공동-내 신호의 시뮬레이션이 도 16에 도시된다. 시뮬레이션은 라만 이득 및 커 비선형성을 가진 알려진 비선형 결합 모드 방정식들을 사용한다. 큰 강도의 공동-내 신호는 상당한 자기/교차 위상 변조를 야기할 수 있으며, 이것은 라만 DFB의 기술기 효율을 감소시키는 역 효과를 가진다.

[0125] 각각, 순방향 및 역방향 전파 스토크스 파들 및 펌프 파의 커 비선형 계수( $\gamma$ ) 및 전력들( $P_f$ ,  $P_b$ ,  $P_p$ )에 대해, 순방향 전파 스토크스 신호에 대한 단위 미터당 비선형 위상 시프트가 다음과 같이 근사될 수 있다:

[0126] 
$$\phi_{\text{nonlinear,forward}}(z) = \gamma(P_f(z) + 2P_b(z) + 2P_p(z))$$

[0127] 역방향 파에 대해, 비선형 위상 변화는 다음과 같이 기록될 수 있다.

[0128] 
$$\phi_{\text{nonlinear,backward}}(z) = \gamma(2P_f(z) + P_b(z) + 2P_p(z))$$

[0129] 강도가 큰 영역에서, 순방향 및 역방향 필드에 대한 비선형 위상 변화는, 격자 중심으로부터의 이산 위상 시프트에서의 위치에 오프셋이 존재할 때조차, 거의 동일하다. 도 16의 DFB 공동을 따르는 커 비선형성으로 인한 비선형 위상 시프트가 도 17에 도시된다. 이러한 비선형 위상 시프트는 디바이스를 따라 프리-처프를 적용함으로써 보상될 수 있다. 유효 굴절률( $n$ )에 대해, 브래그 파장에서의 필요한 프리-처프는 다음과 같이 제 1 차수로 표현될 수 있다:

[0130] 
$$\Delta\lambda_{\text{Bragg, nonlinear}} = \lambda_{\text{Bragg, nonlinear}}(z) - \lambda_{\text{Bragg}} = -\phi_{\text{nonlinear}}(z) \frac{\lambda_{\text{Bragg}}^2}{2\pi n}$$

[0131] 비선형 효과들을 보상하기 위해 도 16의 공동에 적용될 수 있는 프리-처프의 통상적인 프로파일은 도 18에 도시된다.

[0132] 격자 위상(상기 정의된 바와 같이 복소값 모드 결합 계수( $q(z)$ )의 위상)에서의 대응하는 요구 프리-처프는:

[0133] 
$$\phi_{\text{grating, nonlinear}}(z) = -2 \int_0^z \phi_{\text{nonlinear}}(z') dz'$$

이다. 피적분 함수에서 커-유도 위상은 예를 들면, 비선형 결합 모드 방정식들을 풀이함으로써 발견될 수 있다.

[0134] 라만 DFB 레이저의 효율적인 동작에 유해한 또 다른 효과는 공동 내부에서의 펌프 파 및 스토크스 파들의 흡수로 인한 DFB 공동의 길이를 따른 온도 변화이다. 단지 수십 내지 수백 마이크로미터에서의 매우 작은 적용 가능한 광 섬유들의 반경으로 인해, 방사 온도 기울기는 우세하며, 길이 방향 열 흐름은 무시할 수 있다. 그러므로, 각각 스토크스 및 펌프 파장에서의 흡수 계수들( $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$ )을 갖고, 단위 미터당 가열-유도 위상 변화는 다음과 같이 근사될 수 있다:

[0135] 
$$\phi_{\text{heating}}(z) = c_{\text{heating}} (\alpha_s P_f(z) + \alpha_s P_b(z) + \alpha_p P_p(z))$$

[0136] 계수( $c_{\text{heating}}$ )는 열 방정식을 품으로써 산출될 수 있다. 그것은 파이버 및 그 주변의 지오메트리 및 열 전도성에

및 파이버 내부에서의 가이딩 모드의 횡단 구조에 의존한다. 명백하게,  $\phi_{\text{heating}}$ 은 이전 방정식으로부터의  $\phi_{\text{nonlinear}}$  과 동일한 구조를 가진다(양쪽 경우들 모두에서, 우리는 단순한 표기법을 갖도록 파장에서의  $y$  및  $c_{\text{heating}}$ 의 작은 의존성을 무시한다). 도 27은 다시 70W의 펌프 전력에 대해(그러나 도 5로부터의 측정된 격자와 유사하게, 약간 증가된 세기( $|q|=69/\text{m}$ )를 갖는), 도 16 내지 도 18의 디바이스에 대한  $\phi_{\text{heating}}$  및  $\phi_{\text{nonlinear}}$ 을 도시한다. 명백하게, 이미 단지 0.01dB/m의 낮은 가정된 손실들에 대해, 상기  $\phi_{\text{heating}}$  (파선)은  $\phi_{\text{nonlinear}}$  (실선)에 대해 우세하다. 양쪽 모두는 동일한 형태를 가지며, 이는 강도가 큰(도 16을 참조) pi-위상 시프트에 가까운 영역에서, 순방향 및 역방향 스토크스 강도들이 대략 동일하며 펌프 강도에 대해 우세하기 때문이다. 각각, 브래그 파장 및 격자 위상에 의하여 표현된, 필요한 프리-처프는,

[0137] 
$$\Delta\lambda_{\text{Bragg, heating}} = \lambda_{\text{Bragg, heating}}(z) - \lambda_{\text{Bragg}} = -\phi_{\text{heating}}(z) \frac{\lambda_{\text{Bragg}}^2}{2\pi n}$$
 및

[0138] 
$$\phi_{\text{grating, heating}}(z) = -2 \int_0^z \phi_{\text{heating}}(z') dz'$$
 이다.

[0139] 도 27의 경우에 대해, 이러한 프리-처프는 도 28에 도시된다.

[0140] 이 실시예에서, 상기 격자(즉, 공간 의존적인 복소값 모드-결합 함수)는 비선형 위상 변화를 보상하기 위해 이러한 위상으로 프리-처핑된다.

[0141] 본 발명의 다른 실시예에서, 수치 알고리즘이 고정된 입력 펌프 전력에 대한 출력 전력을 최대화하는 격자를 찾기 위해 이용된다. 몇몇 가능한 예들은 비선형 결합-모드 방정식들에 적용된, 격자 세기, 또는 단순한 시행착오 방식을 제한하기 위해 적절한 벌점 함수들을 가진, 알려진 서브-기울기, 절단면, 근위점 또는 번들 방법들이다.

그에 의해, 모든 관련 효과들(예로서, 커 효과, 라만 효과, 펌프 감소, 선형 손실, 비선형 손실(2-광자 흡수))이 포함될 수 있다.

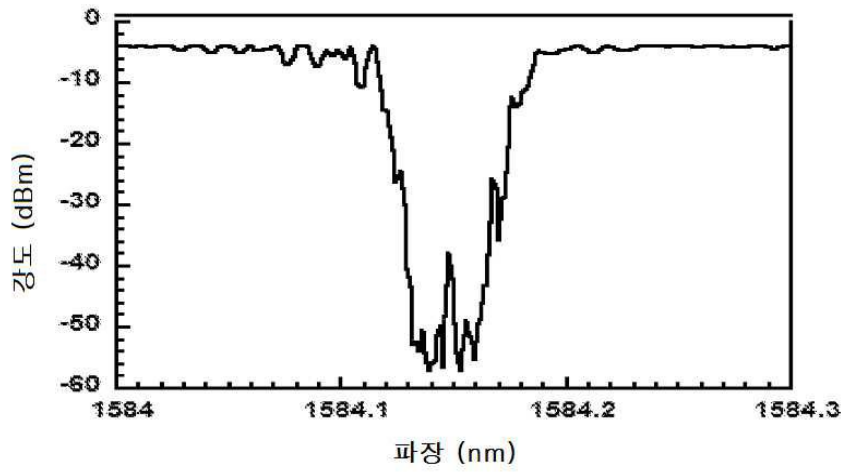
- [0142] 일 예로서, 도 19는 70 와트 입력 전력, 71.92mm(58% 길이)에서의 비연속적 파이-시프트, 1dB/m의 선형 손실들, 무시해도 될 정도의 비선형 손실 및 무한 열 전도성의 제약들 하에서 최대 출력 전력에 대해 최적화되는 124mm의 길이의 격자의 위상을 도시한다. 도 20에 보여질 수 있는 바와 같이, 이러한 프리-처프(검은색으로 둘러싸인 데이터 점)는 비-프리-처핑된 균일한 격자(가장 오른쪽 데이터 점)보다 상당히 더 높은 출력 전력을 초래한다. 이러한 유형의 알고리즘은 고정된 펌프 전력 및 최대 격자 인덱스 변화와 같은 제약들을 겪게 하는 최대 출력 전력을 획득하기 위해 사용될 수 있다. 도 20은 비교적 단순한 최적화 절차를 도시하지만, 일반적으로, 격자를 정의하는 다수의 파라미터들의 다중-파라미터 공간에 적용되는, 임의의 적절한 수치적 또는 분석적 방법이 최대 출력 전력을 획득하기 위해 수행될 수 있다.
- [0143] 비선형 결합 모드 방정식들에서의 두 개의 광자 흡수, 파이버가 결합되는 열 배스를 따르는 위치의 함수로서 파이버의 열 전도성 프로파일, 라만 이득에 대한 커 및 TPA 둘 모두의 성능 지수, 파이버의 유효 면적, 및 Ge 집중으로 인한 높은 UV(또는 다른 화학선) 유도 선형 손실 및/또는 손실이 접근법의 다른 새로운 양태들 중에 포함된다. 라만 파이버 DFB들의 지난 시뮬레이션들은 이러한 효과들을 포함하지 않는다.
- [0144] (무차원) 비선형 성능 지수의 표준 정의는  $FOM = n_2 / (\beta \lambda)$ 이며, 여기에서  $n_2$ 는 비선형 굴절률이고,  $\beta$ 는 TPA 계수이며  $\lambda$ 는 파장이다. 여기에 설명된 본 발명의 격자 설계들은 국소적 브래그 상태에 대한 비선형성의 효과를 완화시킬 수 있다.
- [0145] 임계 펌프 전력을 감소시키기 위해, 다음의 특성들을 가진 파이버가 요구된다: 저 손실(격자의 식각 이전 및 이후, 즉 특별히, 낮은 UV-유도 손실), 작은 유효 면적, 및 높은 라만 이득 계수. 커 비선형성의 영향을 감소시키기 위해, 비선형 편광에 대한 지연된 라만 응답의 분획 기여( $f_R$ )는 가능한 한 커야 한다. 다른 한편으로, 펄스 동작 및 광학 스위칭을 가능하게 하기 위해, 비교적 작은  $f_R$ 을 갖는 것을 사용하는 것이 유리할 것이다.
- [0146] 공동에서의 손실을 감소시키기 위한 하나의 접근법은 위상 시프트 영역이 화학선(UV, IR 펄스초 등) 빔에 노출되는 것을 방지하거나, 또는 적어도 이러한 영역에서의 노출을 최소화하는 것이다. 따라서, DFB 격자는 위상 시프트에서의 노출되지 않은(또는 약간 노출된) 영역 및 위상 시프트를 갖고(또는 그것 없이) 제조될 수 있다. 원한다면, 이러한 노출되지 않은(또는 약간 노출된) 영역은 이득을 증가시키기 위해 길이가 증가될 수 있다. 몇몇 길이에서, 레이저는 더 이상 단일 모드화되지 않을 것이며, 따라서 길이는 최소 선폭을 보장하기 위해 이러한 컷오프 아래로 유지되어야 한다. UV 노출의 정확한 교정은 노출되지 않은 영역이 위상 시프트를 구성할 것임을 보장할 수 있으며, 이것은 이러한 영역에서의 유효 굴절률에서의 작은 변화가 유효 위상 시프트를 야기할 것이기 때문이다. 이러한 위상 시프트는 단순히 노출되지 않은(또는 약간 노출된) 영역에 대한 굴절률 차이의 적분에 비례한다.
- [0147] 대안적으로, 이러한 영역은 알짜 제로 위상 시프트를 갖도록 설계될 수 있으며, 위상 시프트는 그 후 격자 프린트들의 배치에 의해 결정될 수 있다. 이러한 노출되지 않은 영역은 매우 좁은 기록 빔을 갖고 최상으로 제조될 것이다. 일 예로서, 파이버를 따른 15 마이크로미터 빔 치수는 노출되지 않은 영역으로부터 발생한 위상 시프트에 대한 정확한 제어를 허용할 것이다.
- [0148] UV 유도 손실을 감소시키기 위한 다른 양태들은 금속 또는 유전체 막들과 같은 다른 반사기들을 갖고 파이버 격자의 일부 또는 모두를 대체하는 것을 포함할 것이다. 대안적인 실시예들은 UV 또는 다른 화학선 방사의 최소 레벨로 격자를 식각함으로써 UV(또는 다른 화학선) 손실을 감소시키는 것을 포함한다. 따라서, 직접 기록 식각을 위해, 상기 빔의 매우 효율적인 변조는 가장 양호할 것이다. 이러한 빔은 상기 파이버에서의 최소 DC 평균 배경 노출을 가질 것이다. 알려진 UV 유도 손실을 감소시키는 임의의 다른 수단이 또한 사용될 수 있다. 이것은 기록 파장을 최적의 파장으로 변경하는 것을 포함한다. 최종적으로, UV 유도 손실은 코어에서의 도펀트 레벨들을 감소시킴으로써 및 보다 고순도 유리를 사용함으로써 감소될 수 있다.
- [0149] 손실의 감소는 또한 스토크스 필드와 연관된 2 광자 흡수(TPA)를 감소시킬 것이다. 일반적으로, TPA를 감소시키기 위해, 높은 TPA 성능 지수를 가진 재료가 요구된다. 따라서, 라만 파이버 레이저들에 대한 최상의 재료들은 높은 TPA 성능 지수 및 높은 라만 분획( $f_R$ ) 양쪽 모두를 가질 것이다.
- [0150] 또 다른 실시예에서, 본 발명의 일 실시예에 따른 공동은 브릴루앙 시프트만큼 분리된 2개의 파장들에서 동작하도록 설계된다. 라만 펌핑은 그 후 동작 파장들 모두가 레이징하게 할 수 있다. 그러나, 일단 레이징하면, 자극

된 브릴루앙 산란(SBS)은 에너지를 보다 높은 파장에 전달할 것이며, 따라서 이러한 모드의 전력을 증가시킨다. 또 다른 실시예에서, 높은 SBS 임계치를 가진 파이버가 사용된다.

- [0151] 본 발명은 개선된 라만 DFB 레이저들을 제공하기 위해 다른 실시예들을 고려한다.
- [0152] 비선형 위상 시프트를 널 아웃하기 위해 DFB 격자에서의 요구된 프리-처프는 미리-결정된 함수(r(z))를 따라 길이를 따라 변화하는 반경을 가진 저항적 금속성 구조 내부에 격자를 배치하며, 그것을 통해 전류를 흐르게 함으로써 제공될 수 있다. 단위 길이당 저항은  $R=\rho/(\pi r^2)$ 이며, 여기에서  $\rho$ 는 단위 옴/미터(ohm/meter)의 저항성이다. 저항적 가열 및 온도는  $I^2 * R(z)$ 에 비례할 것이다. 대표적인 개략도가 도 21에 도시된다. 하나는 출력을 최대화하기 위해 0에서 몇몇 적절한 값으로 전류를 서서히 변경할 수 있다.
- [0153] 이전에 논의된 바와 같이, 온도 제어 요소는 브래그 격자의 길이의 적어도 일 부분을 따라 온도 편위를 제어하기 위해 제공되며, 커 효과 및 흡수-유도 굴절률 변화로 인한 광학 필드 및 연관된 인덱스 변화의 강도가 브래그 격자의 상이한 부분과 비교하여 크고, 가장 큰 온도 편위의 위치는 위상-시프트의 위치와 일치한다. 온도 제어 요소는 상기 언급된 바와 같은 히터 또는 나중에 설명되는 바와 같은 펠티에 소자(Peltier element)와 같은 냉각 장치일 수 있다.
- [0154] DFB 격자를 따라 파장 또는 온도 또는 변형 편위를 적용하는 목적은 커-효과 유도 또는 흡수-유도 굴절률 변화들을 보상하는 것이다. 상기 보상은 커 효과 또는 흡수-유도 가열로 인한 광학 필드 및 연관된 굴절률 변화들의 강도가 가장 큰 격자를 따른 위치들을 포함해야 한다. 바람직하게는, 하나는 공동-내 광 출력에 비례하거나 또는 거의 비례하는 음의(또는 보상하는) 브래그 파장 편위를 생성한다. 공동-내 광 출력은 입력 전력에 의존한다.
- [0155] 따라서, 일 실시예에서, 위상-시프팅 요소의 위치와 일치하는 최대 음의 브래그 파장 편위의 위치를 가진 브래그 파장 편위가 제공된다. 이러한 음의 편위와 연관된 양은 공동-내 또는 입력 광 전력에 대략 비례할 수 있다. 본 발명의 다양한 실시예들에서, 용어 "대략"은 10%, 25% 또는 45% 마진 중 하나 내 있는 것을 의미한다. 본 발명의 추가 실시예에서, 브래그 파장 편위는 동작 상태에 의존하여, 즉 상이한 펄스 전력에서 임의로 제어될 수 있다. 본 발명의 추가 실시예들은 파장보다는 온도 또는 변형률을 이용할 수 있다.
- [0156] 상기 언급된 수단은 라만 DFB 레이저들에 관련되어 설명되지만, 희토류 또는 브릴루앙과 같은, 높은 전력들에서 동작하는 다른 유형들의 DFB 레이저들이 이러한 수단들을 통합함으로써 또한 유리할 수 있다.
- [0157] 본 발명의 다수의 실시예들에서, 용어들("일치하다" 및 "일치하는")은 최대 또는 최고 편위가 위상 시프트의 일부인 것으로 정의되는 영역에서의 어딘가에 발생하도록 중첩을 의미한다.
- [0158] 비선형 위상 시프트의 효과를 널 아웃하기 위해 프리-처프(실온에서)를 갖도록 설계될 DFB 구조들은 원하는 정상 상태 강도 분포에 도달하기 위해 요구된 충분한 레이징을 가진 문제점을 가질 수 있다. 도 22에 도시된 바와 같은 구조는 프리-처프를 취소하도록 라만 DFB 레이저에 온도 분포를 적용하기 위해 사용될 수 있다. 출력을 최대화하기 위해 0 또는 몇몇 적절한 값으로 전류를 서서히 변경할 수 있다.
- [0159] 도 21은 예시들에서의 것과 비교하여 라만 파이버의 중심에서 브래그 파장을 증가시키는데 유용한 반면, 예시들에서의 브래그 파장의 증가는 도 22에 도시된 구조에 대해 일어날 것이다.
- [0160] 격자의 길이를 따라 분포된 가열을 적용하는 것과 유사하게, 예를 들면 다수의 펠티에 냉각기들을 사용하여 또는 상기 DFB를 파이버 및 표면 사이에서의 거리가 길이를 따라 변하도록 곡선으로 이루어진 냉각된 표면, 예를 들면, 금속 표면에 매우 근접하게 하여 분포된 냉각을 사용할 수 있다. 상기 표면을 적절하게 곡선을 이루게 함으로써, 원하는 온도 분포가 달성될 수 있다. 곡선 표면의 곡률은 온도 분포 프로파일을 조정하기 위해 구부러질 수 있다.
- [0161] 도 16 및 도 17에 보여지는 바와 같이, 공동-내 필드 및 그에 따라 비선형 효과는 길이 방향 위치의 함수로서 매우 강하게 쇠퇴한다. 공동-내 필드는, 공동 길이의 약 25%인 영역에서, 그것의 최대 값의 10%보다 크다. 따라서, 상기 공동의 길이의 약 1/4 이상의 영역에서의 DFB 격자의 온도를 제어함으로써, 보다 큰 출력을 생성시 도움이 되어야 한다.
- [0162] 도 21 및 도 22에 도시된 구조들에서, 상기 DFB 격자는 예를 들면, 도전 재료를 갖고 코팅되거나 또는 코팅되지 않을 수 있다. 도시된 바와 같이, 전류(I)는 온도 기울기를 생성하도록 보조하기 위해 금속성 구조에 인가될 수 있다. 제 2 전류(I2)(도시되지 않음)는 전도성 코팅에 인가될 수 있으며, 이것은 전체 격자의 온도를 증가시키

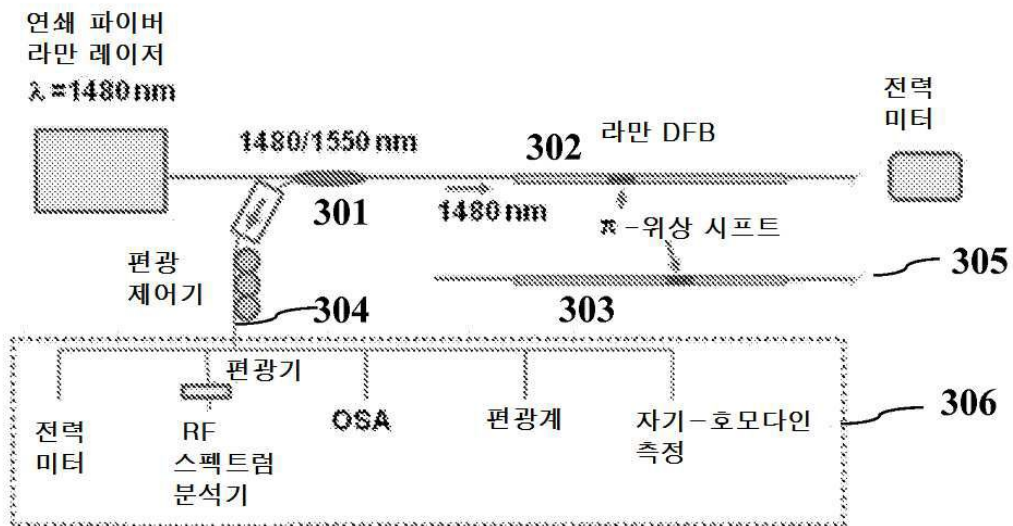


도면2



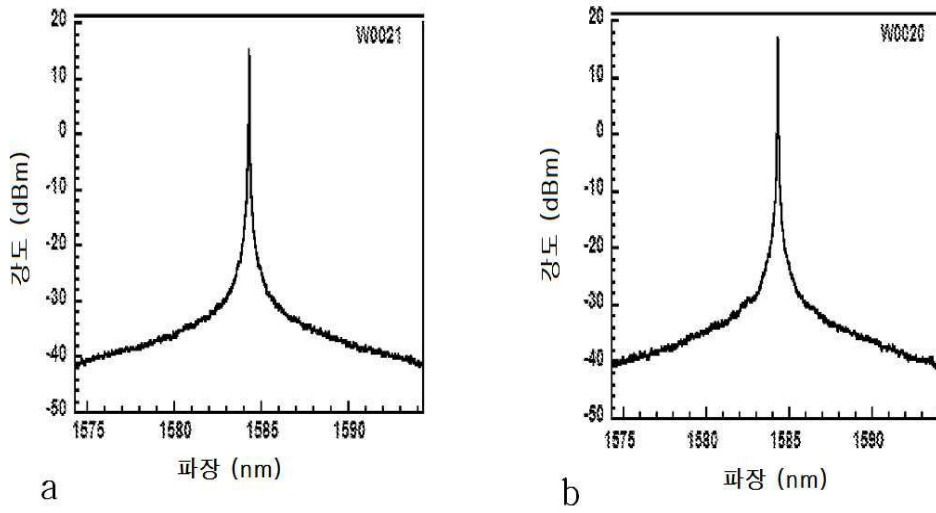
(종래 기술)

도면3

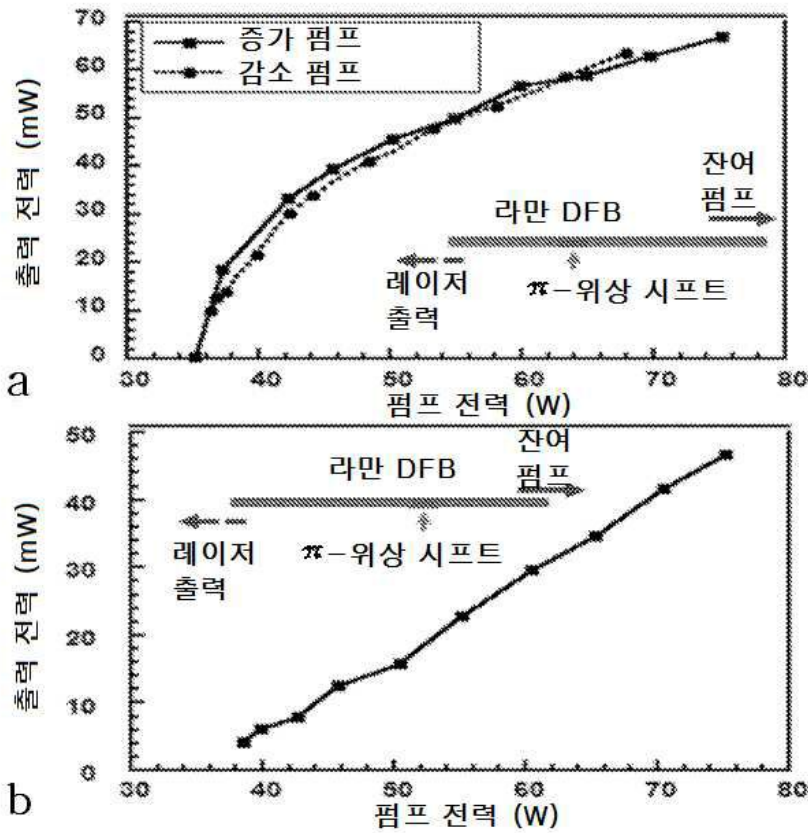




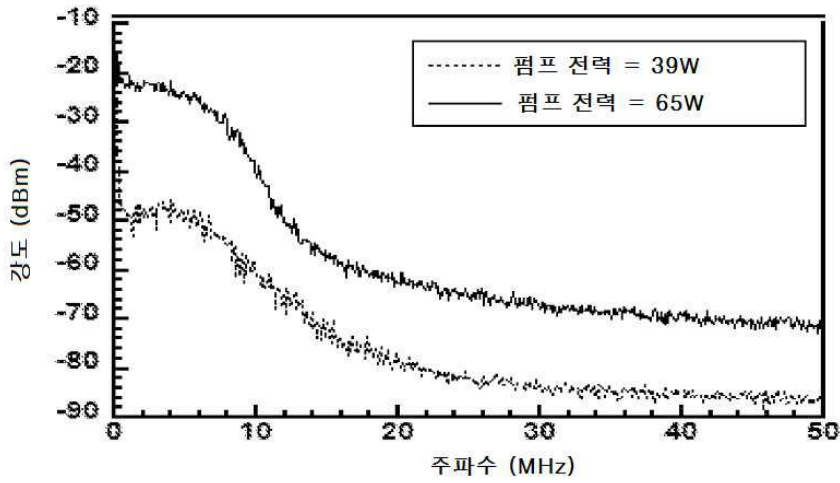
도면4



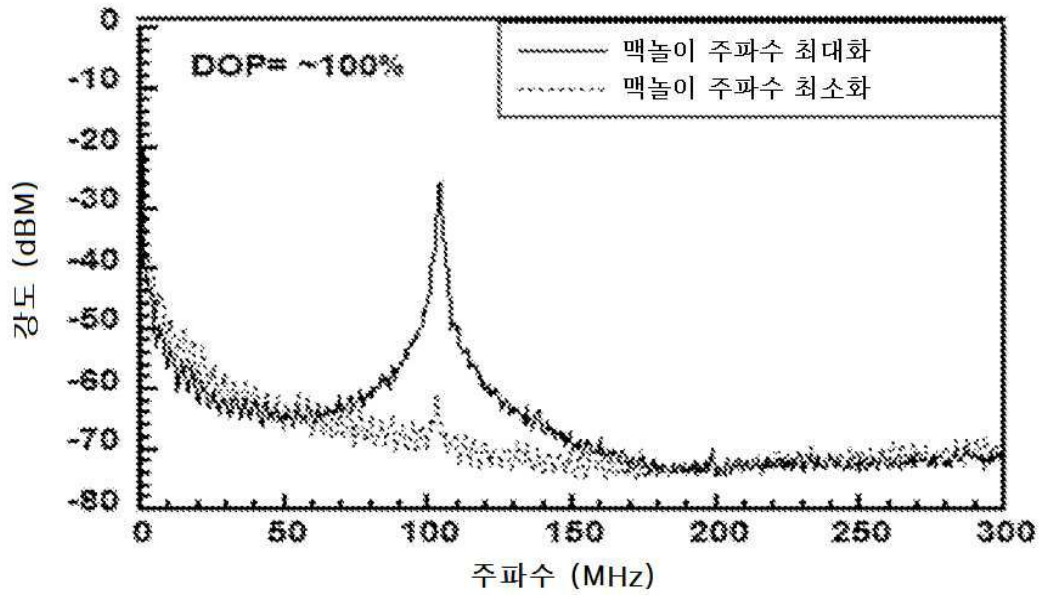
도면5



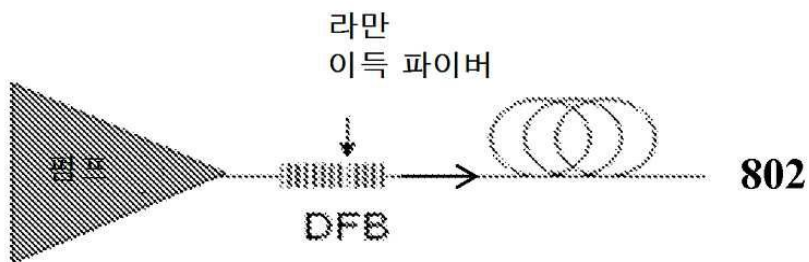
도면6



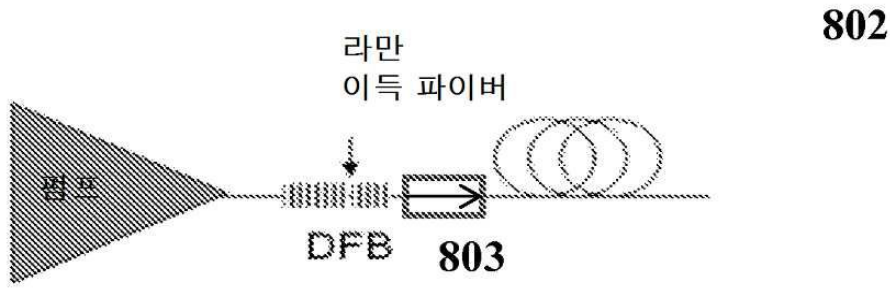
도면7



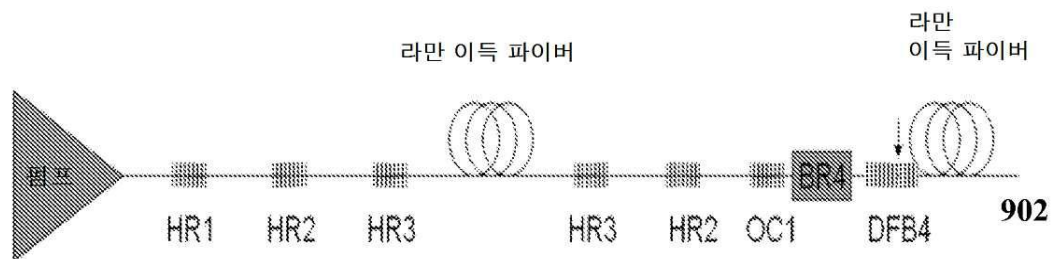
도면8a



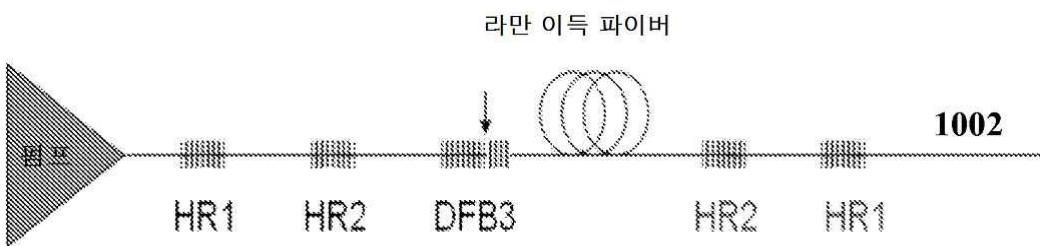
도면8b



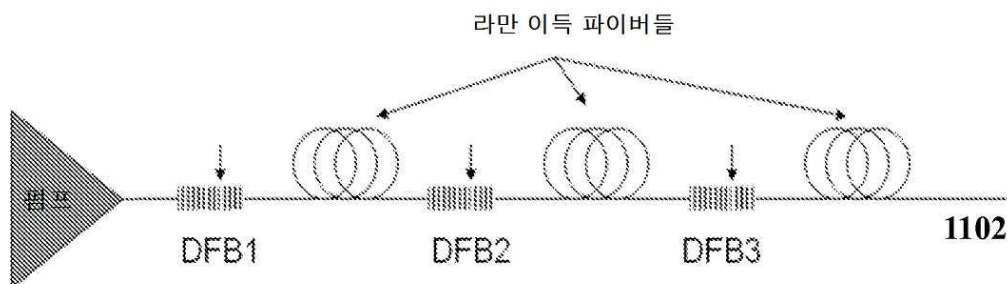
도면9



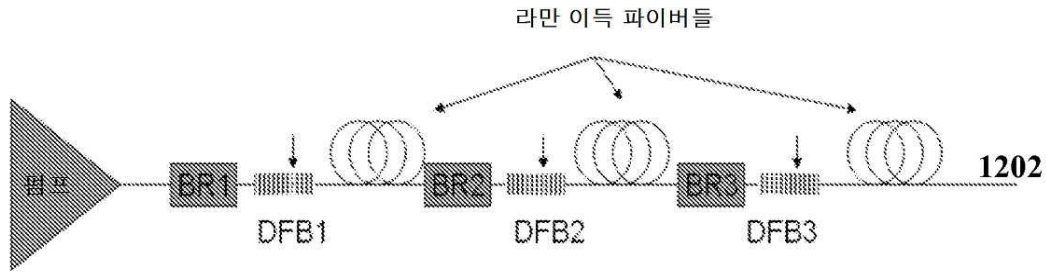
도면10



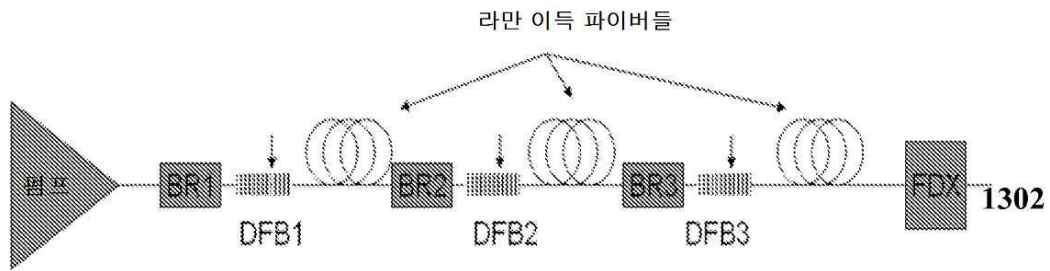
도면11



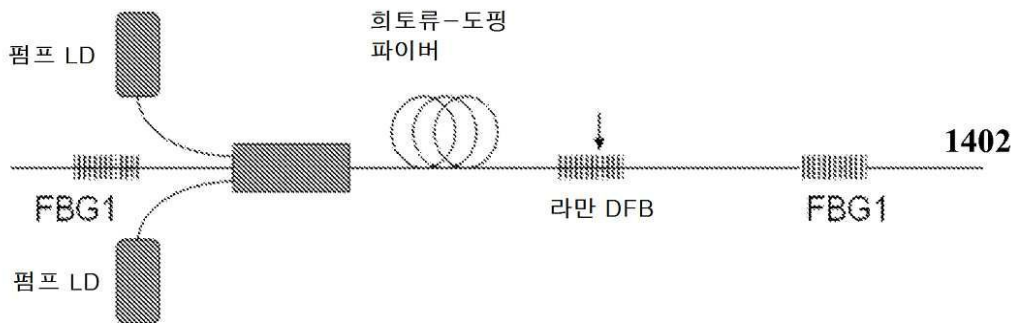
도면12



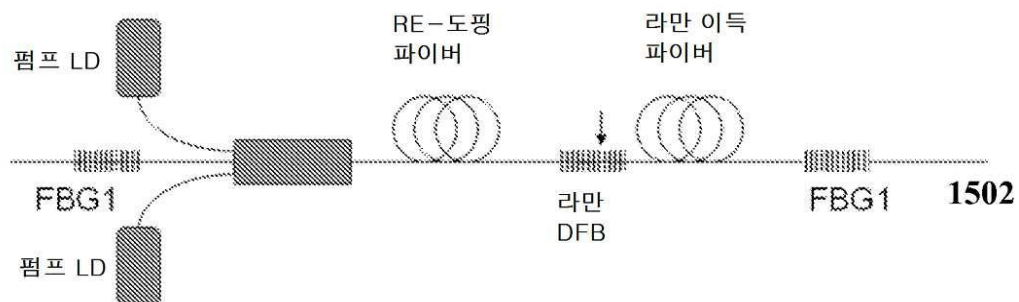
도면13



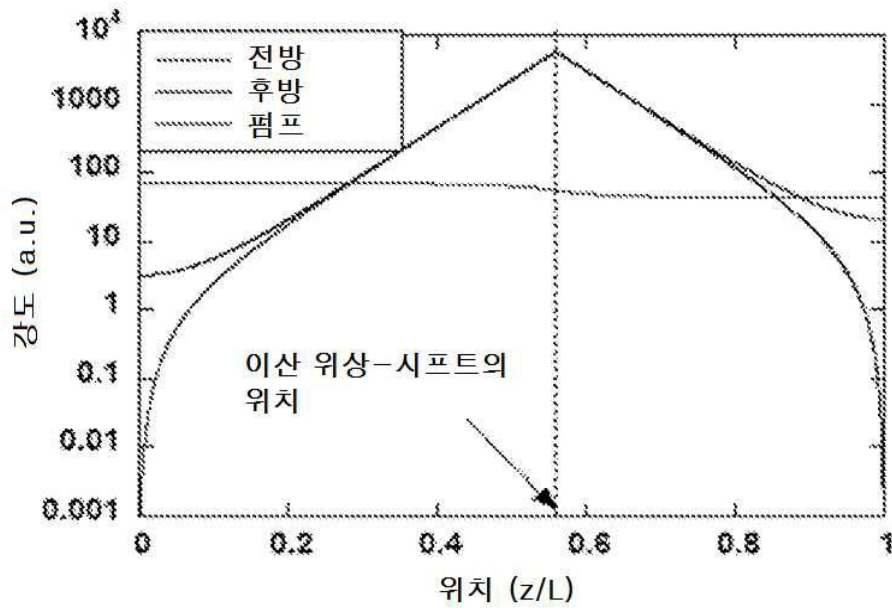
도면14



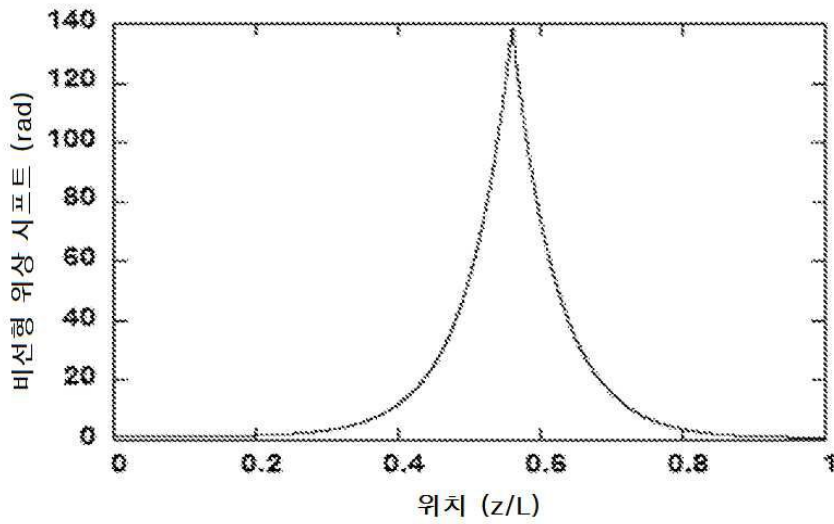
도면15



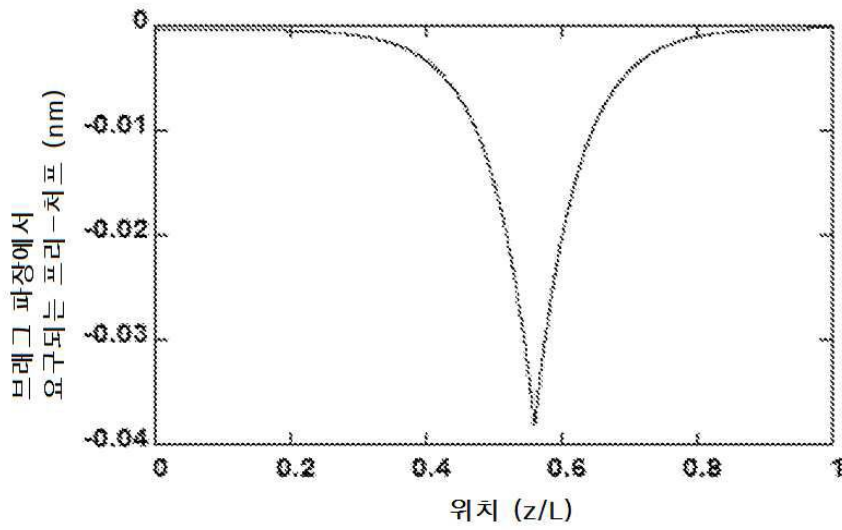
도면16



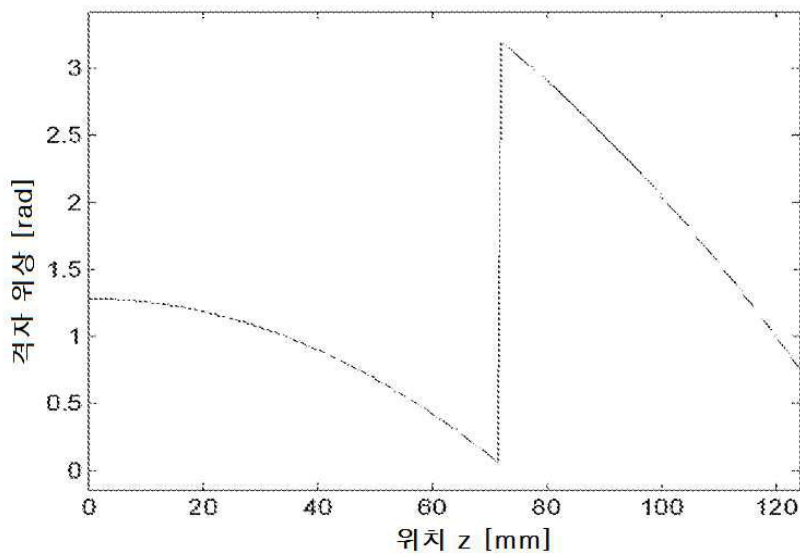
도면17



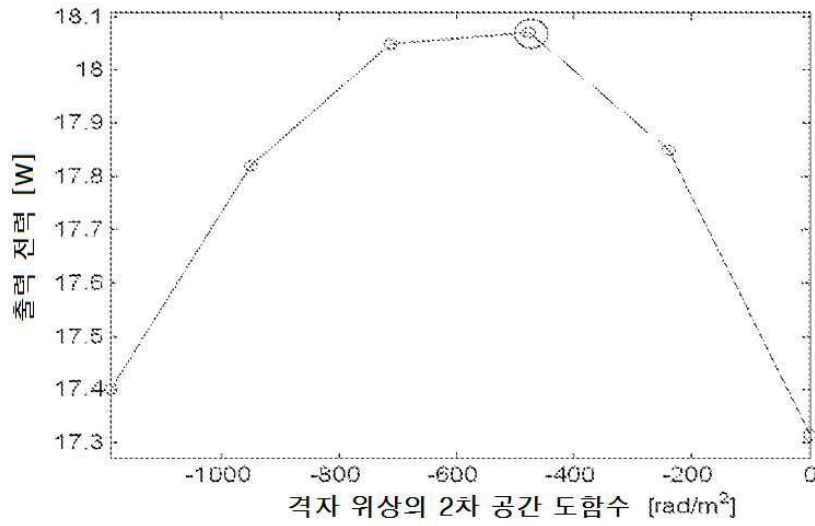
도면18



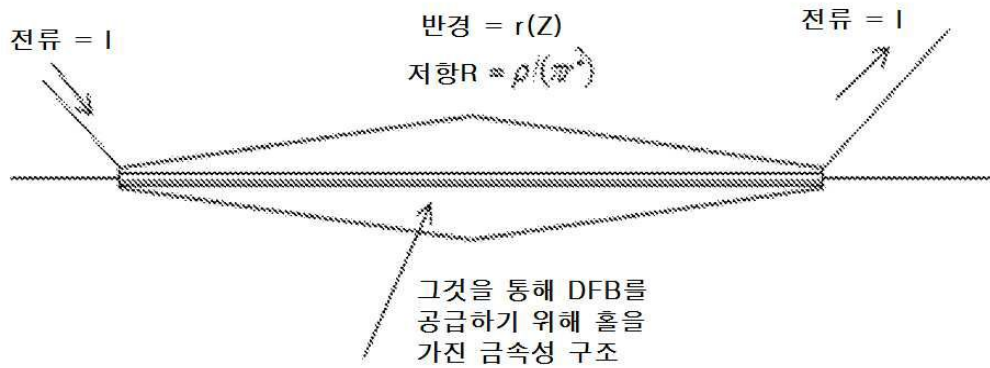
도면19



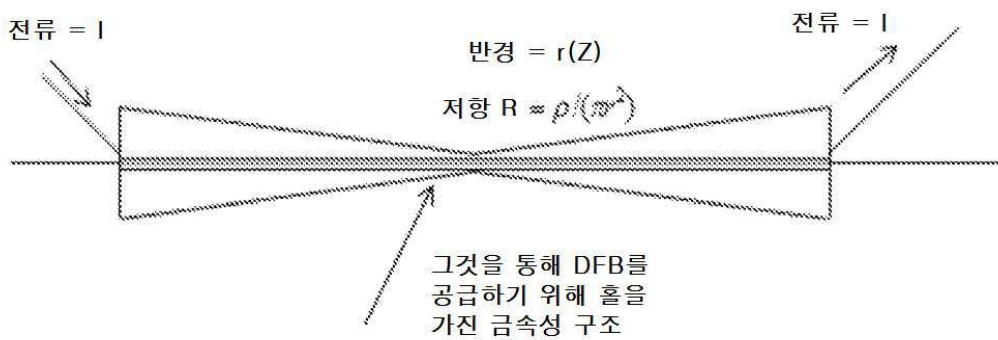
도면20



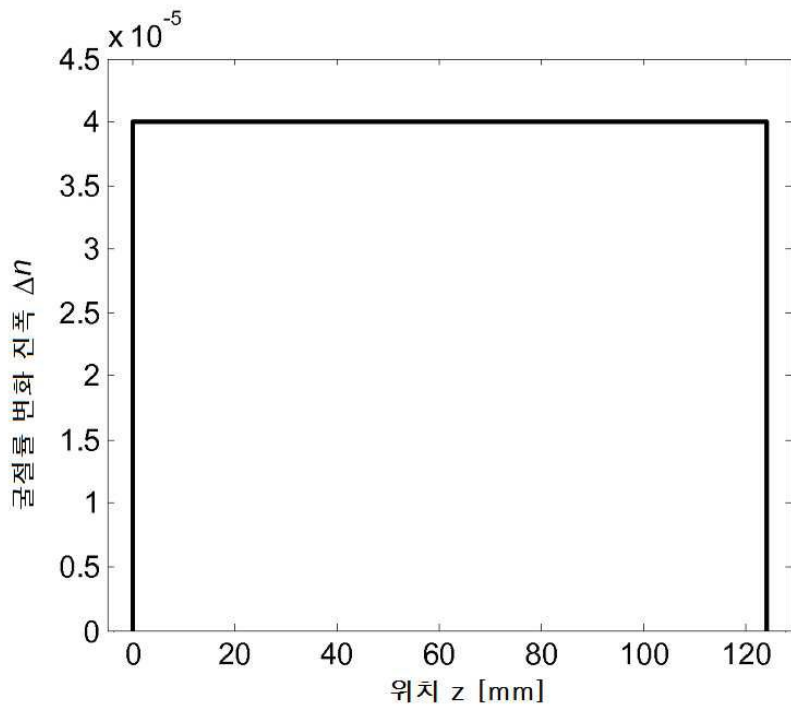
도면21



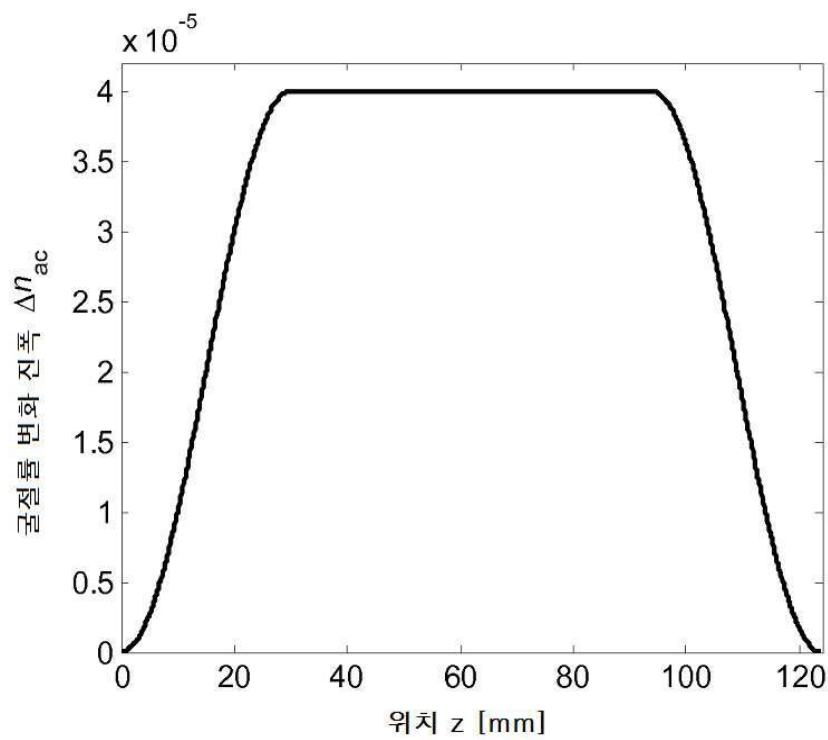
도면22



도면23

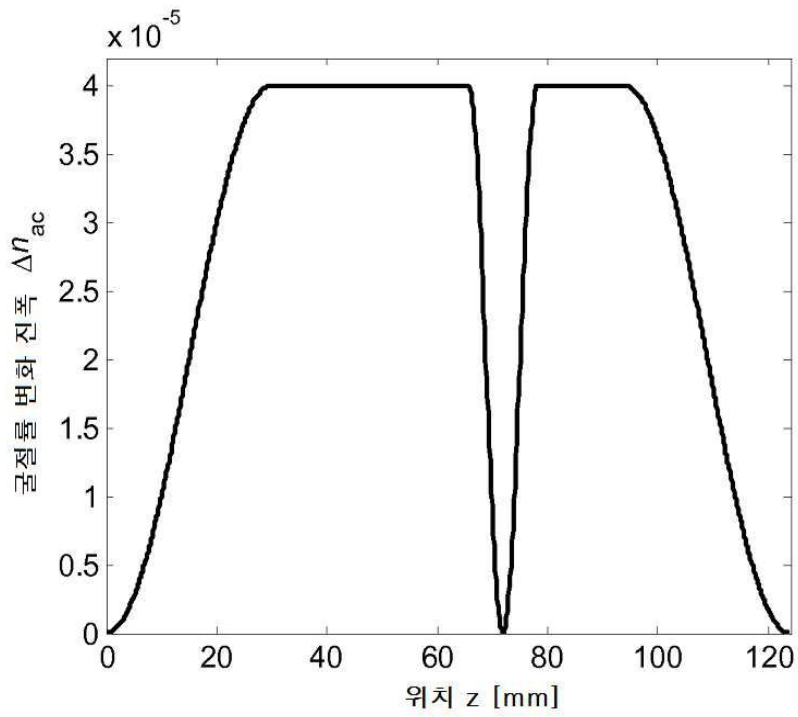


도면24

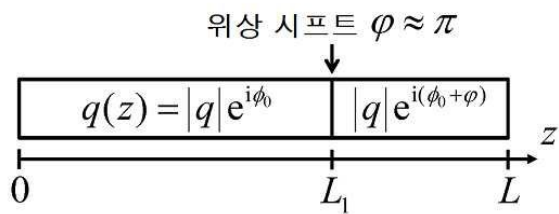




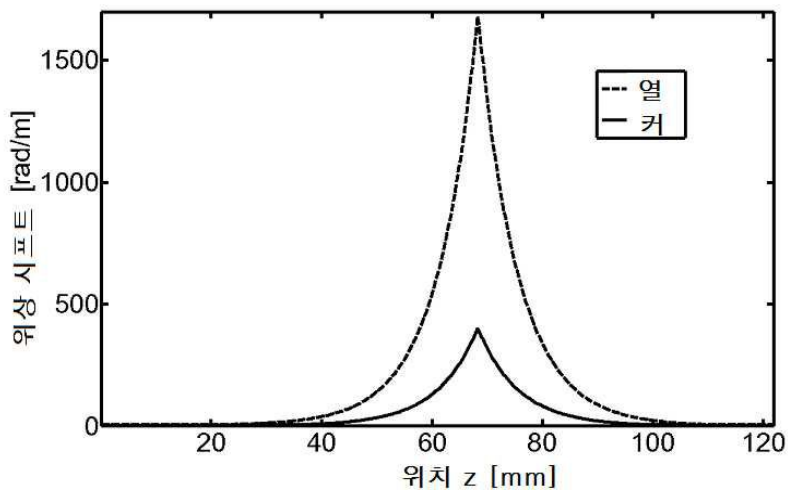
도면25



도면26



도면27



도면28

