



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2009년05월07일  
(11) 등록번호 10-0895917  
(24) 등록일자 2009년04월24일

(51) Int. Cl.

H01S 3/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2007-7006038  
(22) 출원일자 2007년03월15일  
심사청구일자 2007년03월15일  
번역문제출일자 2007년03월15일  
(65) 공개번호 10-2007-0083562  
(43) 공개일자 2007년08월24일  
(86) 국제출원번호 PCT/US2005/008626  
국제출원일자 2005년03월14일  
(87) 국제공개번호 WO 2006/057655  
국제공개일자 2006년06월01일

(30) 우선권주장  
10/992,762 2004년11월22일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

US6556346 B

US5696782 A

KR19937000989 A

전체 청구항 수 : 총 24 항

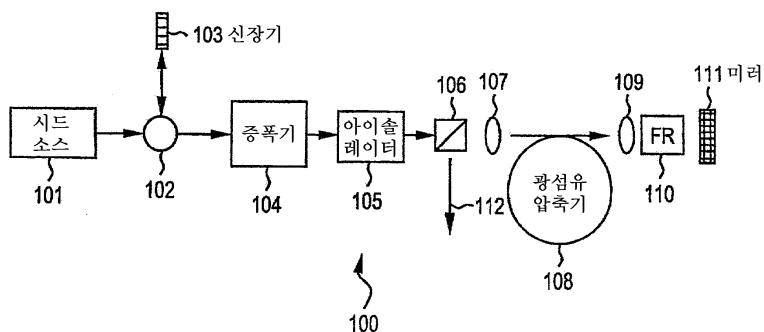
심사관 : 이용배

(54) 광섬유 쳐프된 펠스 증폭 시스템, 광섬유 쳐프된 펠스 증폭시스템으로부터 고품질 펠스를 생성하기 위한 방법, 고전력 도파 쳐프된 펠스 증폭 시스템에서 출력 펠스 품질을 개선하기 위한 방법 및 광섬유 기반 고차 분산 제어시스템

### (57) 요 약

포토닉 결정 광섬유 펠스 압축기에서 색 분산뿐만 아니라 편광 모드 분산을 보상함으로써, 전 광섬유 쳐프된 펠스 증폭 시스템으로부터 고펠스 에너지를 얻을 수 있다. 자기 위상 변조를 통해 광섬유 증폭기에서 3차 분산을 유도함으로써, 벌크 격자 펠스 압축기로부터의 3차 색 분산을 보상할 수 있고, 하이브리드 광섬유/벌크 쳐프된 펠스 증폭 시스템의 펠스 품질을 개선할 수 있다. 끝으로, 음 분산 광섬유 증폭기에서 양으로 쳐프된 펠스를 증폭함으로써, 안티 스토퍼스 주파수 편이를 통해 저잡음 파장 가변 시드 소스를 얻을 수 있다.

### 대 표 도 - 도1



(72) 발명자

조, 규천

미국 48103 미시간주 앤 아버 하버 웨이 365

리우, 젠린

미국 48105 미시간주 앤 아버 크롬웰 로드 3374

하터, 도날드, 제이.

미국 48105 미시간주 앤 아버 설그레이브 플레이스  
3535

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

광섬유 쳐프된(fiber chirped) 펄스 증폭 시스템으로서,  
시드 소스(seed source);  
상기 시드 소스로부터의 펄스를 시간적으로 신장시켜서 신장된 펄스를 생성하기 위한 펄스 신장기;  
큐비콘(cubicon) 펄스 증폭기로서 구성된 비선형 증폭기; 및  
펄스 압축기를 포함하고,  
상기 증폭기에서 증폭된 상기 신장된 펄스에는, 자기 위상 변조가 행해지며,  
상기 자기 위상 변조는 상기 펄스 신장기와 상기 펄스 압축기로부터의 3차 레벨의 분산에 의해 적어도 부분적으로 보상되는 상기 3차 레벨의 분산을 제공하는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 2

50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,  
10 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 제공하는 펄스 시드 소스;  
상기 시드 소스로부터의 상기 펄스를 적어도 10배 큰 폭으로 시간적으로 신장시키도록 구성된 펄스 신장기;  
입력 펄스 스펙트럼을 갖는 펄스를 수신하고 소정의 출력 펄스 스펙트럼을 갖는 증폭된 펄스를 방출하도록 구성된 적어도 하나의 비선형 광섬유 증폭기 - 상기 입력 펄스 스펙트럼은 상기 펄스 시드 소스로부터 얻어지나 반드시 상기 펄스 시드 소스와 동일하지는 않음 - ; 및  
2차, 3차 및 그 이상의 고차 색 분산 레벨을 갖는 펄스 압축기를 포함하고,  
상기 광섬유 증폭기는, 상기 출력 펄스 스펙트럼이 상기 입력 펄스 스펙트럼에 대하여 과장 편이하도록 구성되고,  
상기 광섬유 증폭기는 상기 펄스 신장기와 압축기의 상기 3차 분산을 자기 위상 변조에 의해 적어도 부분적으로 보상하는 50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 3

제2항에 있어서,  
상기 적어도 하나의 증폭기는, 큐비콘 펄스 증폭기로서 구성되는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 4

50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,  
10 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 제공하는 펄스 시드 소스;  
상기 시드 소스로부터의 상기 펄스를 10배 이상만큼 시간적으로 신장시키도록 구성된 펄스 신장기;  
출력 펄스 스펙트럼을 입력 펄스 스펙트럼에 대하여 과장 편이하도록 구성된 적어도 하나의 비선형 광섬유 증폭기; 및  
펄스 압축기를 포함하고,  
상기 광섬유 증폭기는 자기 위상 변조에 의해 상기 펄스 신장기와 압축기의 3차 분산을 적어도 부분적으로 보상하도록 더 구성되는 50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 5

50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,

10 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 제공하는 펄스 시드 소스;

상기 시드 소스로부터의 상기 펄스를 적어도 10배 만큼 시간적으로 신장시켜서 신장된 펄스를 생성하도록 구성된 펄스 신장기(pulse stretcher);

상기 신장된 펄스를 수신하여 증폭된 큐비콘 펄스를 출력하도록 구성된 적어도 하나의 광섬유 증폭기; 및

2차, 3차 및 그 이상의 고차 색 분산 레벨을 갖는 펄스 압축기를 포함하고,

상기 광섬유 증폭기는, 상기 큐비콘 펄스가 상기 펄스 신장기와 상기 펄스 압축기로부터의 상기 3차 분산 레벨에 의해 적어도 부분적으로 보상되는 비선형 펄스 처프를 생성하도록 구성되는 50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 청구항 6

제4항에 있어서,

상기 자기 위상 변조의 레벨은 0.3 내지  $10\pi$ 의 범위에 있는 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 청구항 7

광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템으로서,

시드 소스;

상기 시드 소스로부터의 펄스를 시간적으로 신장시키기 위한 펄스 신장기;

큐비콘 펄스 증폭기로서 구성된 비선형 증폭기; 및

펄스 압축기(pulse compressor)를 포함하고,

상기 증폭기에서 증폭된 상기 펄스에는, 자기 위상 변조가 행해져, 상기 펄스의 출력 스펙트럼에서 입력 스펙트럼에 비해 관찰 가능한 진폭 변조의 증가가 있게 되는 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 청구항 8

50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템으로서,

10 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 제공하는 펄스 시드 소스;

상기 시드 소스로부터의 상기 펄스를 10 피코초보다 큰 폭으로 시간적으로 신장시켜서 신장된 펄스를 생성하도록 구성된 펄스 신장기;

입력 펄스 스펙트럼을 갖는 펄스를 수신하고 소정의 출력 펄스 스펙트럼을 갖는 증폭된 펄스를 방출하도록 구성된 적어도 하나의 광섬유 증폭기 - 상기 입력 펄스 스펙트럼은 상기 펄스 시드 소스로부터 얻어지나 반드시 상기 펄스 시드 소스와 동일하지는 않음 - ; 및

2차, 3차 및 그 이상의 고차 색 분산 레벨을 갖는 펄스 압축기를 포함하고,

상기 광섬유 증폭기는, 상기 출력 펄스 스펙트럼이 상기 입력 펄스 스펙트럼에 대하여 개인 내로잉(gain-narrowing)되도록 구성되고,

상기 광섬유 증폭기는 상기 펄스 신장기와 압축기의 상기 3차 분산을 적어도 부분적으로 보상하도록 더 구성되는 50 피코초 이하의 폭을 갖는 펄스를 위한 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 청구항 9

제8항에 있어서,

상기 증폭기에서 증폭된 상기 신장된 펄스에는 자기 위상 변조가 행해지고,

상기 자기 위상 변조는 상기 펄스 신장기와 펄스 압축기로부터의 3차 레벨의 분산을 적어도 부분적으로 보상하는 상기 3차 레벨의 분산을 제공하는 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 청구항 10

제9항에 있어서,

상기 자기 위상 변조의 레벨은 0.3 내지  $10\pi$ 의 범위에 있는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

#### 청구항 11

제9항에 있어서,

상기 자기 위상 변조의 레벨은 상기 입력 펄스 스펙트럼에 비해 상기 출력 펄스 스펙트럼의 진폭 변조의 증가에서 나타나는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

#### 청구항 12

광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법으로서,

상기 광섬유 증폭기에서 개인 풀링(gain-pulling)이 일어나도록 상기 광섬유 증폭기 내에 주입되는 입력 펄스 스펙트럼을 갖는 신장된 펄스를 선택하는 단계를 포함하고,

상기 개인 풀링은 상기 펄스 스펙트럼의 평균 광 주파수의 스펙트럼 편이에서 나타나고,

상기 자기 위상 변조의 존재하에 압축된 펄스의 품질이 개선되는, 광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법.

#### 청구항 13

광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법으로서,

상기 광섬유 증폭기에서 개인 내로잉이 일어나도록 상기 광섬유 증폭기에 주입되는 입력 펄스 스펙트럼을 갖는 신장된 펄스를 선택하는 단계를 포함하고,

상기 개인 내로잉은 상기 입력 펄스 스펙트럼보다 크지 않은 스펙트럼 폭을 갖는 증폭된 펄스 스펙트럼의 생성에서 나타나고,

상기 자기 위상 변조의 존재하에 압축된 펄스의 품질이 개선되는, 광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법.

#### 청구항 14

광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법으로서,

상기 증폭기에서 개인 풀링뿐만 아니라 개인 내로잉도 일어나도록 상기 광섬유 증폭기에 주입되는 입력 펄스 스펙트럼을 갖는 신장된 펄스를 선택하는 단계를 포함하고,

상기 개인 풀링은 상기 펄스 스펙트럼의 평균 광 주파수의 스펙트럼 편이에서 나타나고,

상기 개인 내로잉은 상기 입력 펄스 스펙트럼보다 크지 않은 스펙트럼 폭을 갖는 증폭된 펄스 스펙트럼의 생성에서 나타나고,

상기 자기 위상 변조의 존재하에 압축된 펄스의 품질이 개선되는, 광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로부터 펄스를 생성하기 위한 방법.

#### 청구항 15

고전력 도파관 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 출력 펄스 품질을 개선하기 위한 방법으로서,

상기 도파관 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 0.3 내지  $10\pi$  레벨의 자기 위상 변조를 일으키도록 펄스 에너지를 설정하는 단계를 포함하고,

상기 펄스 에너지 및 상기 자기 위상 변조는 (a) 펄스 폭의 감소, (b) 상기 펄스의 날개에서의 에너지에 대한 압축된 펄스 폭 전폭 반치(full-width half-maximum; FWHM)의 비율의 상응하는 증가, 및 (c) 상관 신호의 날개

에서의 에너지에 대한 상대적인 상기 상관 신호의 피크, 중 적어도 하나에 의해 특징지을 수 있는 개선된 펄스 품질을 제공하는 고전력 도파 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 출력 펄스 품질을 개선하기 위한 방법.

#### 청구항 16

광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에, 고전력 도파 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 출력 펄스 품질을 개선하기 위한 방법으로서,

상기 광섬유 증폭기에 주입되는 입력 펄스 스펙트럼을 갖는 신장된 펄스를 선택하는 단계 - 상기 입력 펄스 스펙트럼은 시드 소스와 상기 광섬유 증폭기 간에 삽입되는 광 필터와 상기 시드 소스에 의해 조절되고, 상기 시드 소스의 광 대역폭이 상기 광 필터의 광 대역폭보다 큼 -, 및

상기 자기 위상 변조의 존재하에 압축된 펄스의 품질이 개선되도록 상기 필터의 중심 파장과 전송 대역폭뿐만 아니라 상기 시드 소스의 중심 파장과 광 대역폭을 더 선택하는 단계 - 상기 펄스 품질은 (a) 펄스 폭의 감소, (b) 상기 펄스의 날개에서의 에너지에 대한 압축된 펄스 폭 FWHM의 비율의 상승하는 증가, 및 (c) 상관 신호의 날개에서의 에너지에 대한 상대적인 상기 상관 신호의 피크, 중 적어도 하나에 의해 특징지을 수 있음 -

를 포함하는, 광섬유 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에, 고전력 도파 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 출력 펄스 품질을 개선하기 위한 방법.

#### 청구항 17

광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,

펄스 시드 소스;

상기 시드 소스로부터 상기 펄스를 시간적으로(temporally) 신장시키도록 구성된 펄스 신장기;

큐비콘 펄스 증폭기로서 구성된 적어도 하나의 광섬유 증폭기; 및

상기 광섬유 증폭기 내의 자기 위상 변조에 의해 부분적으로 보정된 3차 분산 레벨을 갖는 펄스 압축기를 포함하는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

#### 청구항 18

광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,

펄스 광 소스;

상기 소스로부터 상기 펄스를 시간적으로 신장시키도록 구성된 펄스 신장기;

입력 펄스 스펙트럼을 갖는 펄스를 수신하고 편이된 출력 펄스 스펙트럼을 갖는 증폭된 펄스를 방출하도록 구성된 적어도 하나의 비선형 광섬유 증폭기; 및

3차 색 분산 레벨을 갖는 펄스 압축기를 포함하고,

상기 비선형 광섬유 증폭기는 적어도 상기 압축기의 상기 3차 분산을 적어도 부분적으로 보상하는 타입이고, 0.3 내지  $10\pi$ 의 자기 위상 변조 범위에서 동작 가능한 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

#### 청구항 19

제18항에 있어서,

상기 비선형 증폭기는 비선형 도핑되지 않은 광섬유와 선형 증폭기를 포함하는 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템.

#### 청구항 20

광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템으로서,

신장된 광 펄스를 생성할 수 있는 펄스 광 소스 시스템; 및

상기 신장된 펄스를 입력에서 수신하고, 0.3 내지  $10\pi$ 의 자기 위상 변조 범위에서 동작 가능하며, 진폭 리플이 출력 스펙트럼에서 증가함에 따라 펄스 품질을 개선하는 펄스 출력을 생성하는 전력 증폭기를 포함하는 광섬유

처프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 21

광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템으로서,

신장된 광 펄스를 생성할 수 있는 펄스 광 소스 시스템; 및

상기 신장된 펄스를 입력에서 수신하고, 0.3 내지  $10\pi$ 의 자기 위상 변조 범위에서 동작 가능하며, 펄스 품질을 개선하는 펄스 출력을 생성하는 전력 증폭기를 포함하고, 상기 시스템 내의 펄스 에너지에 따라 상기 전력 증폭기의 고차 분산이 변하는 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 22

광섬유 기반 고차 분산 제어 시스템으로서,

소정 양의 고차 분산을 갖는 신장된 펄스를 생성하는 광 펄스 소스 모듈;

증폭 동안 상기 펄스를 자기 위상 변조시키는 비선형 큐비콘 펄스 증폭기 - 상기 자기 위상 변조는 3차 분산 레벨을 제공함 - ; 및

소정 양의 고차 분산을 갖는 펄스 압축기를 포함하고,

상기 증폭기에서 상기 자기 위상변조가 뒤따르는 비대칭 펄스 진폭 정형(asymmetric pulse amplitude shaping)을 통해, 출력의 분산을 제어할 수 있는 광섬유 기반 고차 분산 제어 시스템.

### 청구항 23

제1항에 있어서,

상기 시드 소스는 별크 고체 모드동기 레이저인 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

### 청구항 24

제1항에 있어서,

상기 시드 소스는 광섬유 모드동기 레이저인 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템.

## 명세서

### 기술 분야

<1> 관련 출원의 상호 참조

<2> 본 출원은 그 전체 개시 내용을 본원에서 참조로써 병합하고 있는 2003년 6월 30일 출원된 미국 특허 출원 일련 번호 10/608,233의 일부 계속 출원이다. 본 출원은 2004년 1월 27일 출원된 가특허 출원 일련 번호 60/539,110의 출원일과 관련된 우선권의 이익을 주장한다. 가특허 출원 일련 번호 60/539,110의 모든 개시 내용은 본원에서 참조로써 병합하고 있다.

<3> 본 발명은 초소형 고에너지 광섬유 펄스 소스의 구성에 관한 것이다

### 배경 기술

<4> 지난 몇 년 동안, 광섬유 레이저와 증폭기는 그 고유한 구성의 간편함 때문에 진보한 산업 응용에서 초고속 펄스 소스의 가장 유망한 후보로서 고려되어 왔다. 일반적으로, 초고속 광 펄스는 50 피코초보다 작은 펄스 폭을 갖는다. 이러한 펄스를 마이크로줄 내지 밀리줄의 에너지 범위로 증폭하는 것을 가능케 하기 위해 처프된 펄스 증폭을 구현한다. 일반적으로, 처프된 펄스 증폭 시스템은 전력 증폭기에서의 증폭 전에 펄스 신장기에서 시간적으로 신장(즉, 처프)되는 거의 대역폭 제한된 펄스 시드 소스를 이용한다. 증폭 후에는, 펄스 압축기를 이용하여 펄스를 대략 대역폭 한계까지 재압축한다.

<5> 상업화가 가능한 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템은 Galvanauskas 등에게 발행된 미국 특허 번호 5,499,134에서 제안되었다. 미국 특허 번호 5,499,134에서 개시된 시스템은 펄스 신장을 위해 처프된 광섬유 브래그 격자

(Bragg grating)에 기초한다. 또한, 쳐프된 광섬유 브래그 격자는 널리 이용 가능한 장치로 개발되었고, 브래그 격자 내의 쳐프는 선형 또는 비선형으로도 설계되어, 펄스 재압축 후에 거의 대역폭 제한된 펄스의 생성을 위해 중요한 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서의 어느 정도의 분산을 보상할 수 있다(Galvanauskas 등에게 발행된 미국 특허 번호 5,847,863 참조)

- <6> 일반적으로, 시스템 콤팩트성과 고에너지 능력 간의 절충물과 같은 시스템에서, 벌크 격자 펄스 압축기(bulk grating pulse compressor)와 함께 쳐프된 광섬유 브래그 격자 펄스 신장기의 이용은 고에너지 광섬유 증폭기 시스템을 위한 적어도 부분적인 통합을 제공하기 때문에 효과적이다. (관련 최신 기술에서 일반적으로 이용되는) 벌크 신장기와 압축기의 이용에 의존하는 다른 구성은 정렬하기가 훨씬 더 어렵고, 그 동작을 위해 훨씬 더 많은 양의 공간을 필요로 하며 실제 산업 응용에서 이용이 제한된다.
- <7> 근래, 미국 특허 출원 번호 10/608,233에서 M. Fermann 등은 광섬유 격자 펄스 신장기와 벌크 격자 펄스 압축기 간의 분산 프로파일에서의 부정합을 최소화함으로써, 쳐프된 광섬유 격자 펄스 신장기의 이용을 상당히 개선하기 위해 애포다이즈(apodize)된 비선형 쳐프된 광섬유 격자의 이용을 제안하였다.
- <8> 더 단순화하기 위해, 미국 특허 출원 번호 10/608,233에서 M. Fermann 등은 벌크 격자 펄스 압축기의 대체로서 분산형 포토닉 결정 광섬유(dispersive photonic crystal fiber)의 이용을 제안하였다. 또한, 분산형 포토닉 결정 광섬유 펄스 압축기의 이용은 콤팩트 광섬유 빔 전달, 즉, 광섬유 전달부로부터 다운스트림으로 특정 타깃 재료 상에서 길이가 연장된 상기 광섬유 전달부에서 전파되는 최적으로 짧은 펄스의 전달을 가능하게 한다.
- <9> 참조를 위해, 포토닉 결정 광섬유는 광섬유 클래딩(cladding)에서 포토닉 밴드갭(bandgap)을 통해 도파(waveguiding)를 가능하게 하는 공기(또는 임의의 다른 기체)로 채워진 중심 홀(central hole)을 갖는 광섬유를 지칭한다. 이와는 달리, 다공성 광섬유는 클래딩에서 공기(또는 임의의 다른 기체)로 채워진 홀에 의해 둘러싸인 중심의 유리질 코어에서의 도파를 이용한다. 통상의 광섬유는 주위의 클래딩보다 높은 굴절률을 갖는 코어에서의 도파를 허용하고, 광섬유 단면 어느 곳에서도 임의의 공기-홀을 이용하지 않는다.
- <10> J.Kafka 등에게 발행된 미국 특허 번호 6,236,779 및 6,389,198은 빔 전달을 위한 저분산 다공성 광섬유의 이용을 제안한다. 그러나, 다공성 광섬유와 달리, 포토닉 결정 광섬유는 사실상 선형 및 고차 분산을 나타낼 수 있다. 따라서, 다공성 광섬유를 포토닉 결정 광섬유로 단순히 대체함으로써 타깃 재료 상에서 최적으로 짧은 광펄스의 전달은 일반적으로 가능하지 않다.
- <11> 또한, Kafka 등에 의한 연구는 빔 전달을 위해 사실상 편광 유지(polarization maintaining) 다공성 광섬유를 이용하는 것으로 가정하였다. 빔 전달을 위해 비편광 유지 광섬유에 적응하기 위한 어떤 준비도 이루어지지 않았고, 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 분산 보상 소자로서 다공성 광섬유를 구현하기 위한 어떤 준비도 이루어지지 않았다.
- <12> I.N. Duling 등에게 발행된 미국 특허 번호 5,303,314는 비편광 유지 광섬유 증폭기로부터 출력되는 단일 편광을 제공하기 위해 패러데이 회전자 미러를 이용하는 것을 제안하였다. 그러나, 미국 특허 번호 5,303,314는 포토닉 결정 광섬유와 함께 패러데이 회전자 미러를 이용하는 것을 제안하지 않았다. 또한, 통상의 비편광 유지 광섬유 증폭기에서 1차 및 2차 편광 모드 분산의 값을 무시할 수 있기 때문에, 미국 특허 번호 5,303,314는 2차 편광 모드 분산의 보상을 위해 패러데이 회전자를 이용하는 것을 고려하지 않았다.
- <13> 일반적으로, M.E.Fermann 등에게 발행된 미국 특허 번호 5,818,630에서 설명된 바와 같이, 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 고에너지 펄스의 생성은 대형 코어 광섬유 증폭기의 이용으로 인해, 특히 대형 코어 회절 제한된 다중모드 증폭기의 이용으로 인해 용이하게 된다. 근래, 미국 특허 출원 번호 09/576,772에서 M.E.Fermann 등은 산업 응용에서 이와 같은 광섬유 레이저 소스의 이용을 더 향상시키는 광범위하게 조정 가능한 모듈러 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템을 개시하였다. 이 모듈러 시스템은 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 고차 분산의 보상을 위한 비선형 전력 증폭기와 함께 증폭기 필터를 이용하는 것을 제안하였다. 그러나, M.E. Fermann 등은 이러한 증폭 필터를 이용하는 2차 및 3차 분산의 어떤 독립적인 제어도 제안하지 않았다. 또한, Fermann 등은 광섬유 증폭기에서 개인 내로잉(gain-narrowing)과 개인 풀링(gain-pulling)의 존재하에서 고차 분산 보상을 위한 비선형 증폭기를 이용하는 것을 제안하지 않았다.
- <14> 미국 특허 공보 번호 2003/0156605에서 David J. Richardson 등은 광섬유 증폭기를 이용하여 패토초 내지 피코초 펄스의 증폭을 목적으로 하는 시스템 구현을 설명하였다. 미국 특허 출원 번호 09/576,722에서와 같이, Richardson 등은 최고 피크 전력 펄스의 생성을 위한 쳐프된 펄스 증폭 시스템을 설명한다. 또한, 미국 특허 출원 번호 09/576,722에서와 같이, Richardson 등은 1 내지 10 마이크로줄의 에너지 범위에 있는 패토초 펄스를

생성하기 위해 광섬유 증폭기에서 포물선 펄스 형성을 이용하는 것을 설명한다. 그러나, Richardson 등은 이와 같은 광섬유 증폭기에서 3차 분산을 제어하는 것을 제안하지 않았다.

<15> 또한, 미국 특허 출원 번호 09/576,722에서 개시된 모듈러 시스템은 Yb 증폭기 체인의 주입 시딩(injection seeding)을 위한 Er 광섬유 레이저와 함께 안티 스토크스(anti-stokes) 주파수 편이 광섬유를 이용하는 것을 제안하였다. 초고속 Yb 광섬유 증폭기의 시딩을 위한 모든 가능한 방법 중에서 1.55 마이크로미터 파장 영역에서 1.05 마이크로미터 파장 영역까지의 초고속 Er 광섬유 레이저의 안티 스토크스 주파수 편이가 가장 매력적인 것으로 생각되고 있다. 그 이유는, 표준 통신 부품으로부터 초고속 Er 레이저를 조립함으로써 이와 같은 시스템의 비용을 상당히 줄일 수 있기 때문이다. 또한, 이와 같은 시드 소스는 980 nm 내지 1150 nm 범위에 미치는 Yb 광섬유의 완전한 스펙트럼 이득 대역에서 펄스 주입을 허용하기 위해 조정 가능한 것이 이상적이다.

<16> 근래, T. Goto 등에게 발행된 미국 특허 번호 6,618,531은 짧은 펄스 레이저 소스의 강도 의존형 주파수 편이에 기초한 다른 조정 가능한 짧은 펄스 소스를 제안하였다. 미국 특허 번호 6,618,531에서 조정 가능한 소스는 입력 강도에 따른 출력 펄스 주파수의 선형 변화에 의존한다. 광섬유에서 선형적인 강도 의존형 주파수 편이에 의존하지 않는 어떤 조정 가능한 짧은 펄스 레이저 소스도 제안되지 않았다. 또한, 미국 특허 번호 6,618,531은 안티 스토크스 주파수 편이된 광섬유 레이저를 위한 안정성 문제를 다루지 않는다. 안티 스토크스 주파수 편이가 소정의 원하는 출력 파장을 생성할 수 있지만, 일반적으로, 이와 같은 소스는 상업적인 레이저 소스의 안정성 요구 사항을 따르지 않는다. 그 이유들 중 하나는 안티 스토크스 주파수 편이가 매우 비선형인 프로세스이기 때문이다. 따라서, 작은 시드 소스 변화도 큰 진폭 변동을 일으킬 수 있다. 특히, 미국 특허 번호 6,618,531에 따라 구현된 안티 스토크스 주파수 편이와 함께 일어날 수 있는 자극된 라マン 산란(stimulated Raman scattering) 프로세스의 존재는 매우 큰 진폭 변동을 일으킬 수 있다.

### 발명의 상세한 설명

<17> 본 발명은 상기 상황을 고려하여 이루어졌고, 종래 기술의 상기 문제 및 한계를 해결하려는 목적을 가지며 fs 내지 ps 폭 범위에 있는 펄스를 위한 초소형 초고전력 광섬유 증폭기 시스템을 설명한다.

<18> 본 발명의 추가 양태 및 이점은 다음 설명에서 일부 개시되어 다음 설명으로부터 일부 명확하게 되거나, 본 발명의 실시를 통해 알 수 있다. 본 발명의 양태 및 이점은 첨부된 청구항에서 특별히 지적되는 수단과 콤비네이션에 의해 실현되고 달성될 수 있다.

<19> 본 발명은 선형 또는 비선형으로 처프된 광섬유 격자 펄스 신장기 및 포토닉 결정 광섬유 펄스 압축기에 기초한 초소형 고에너지 처프된 펄스 증폭 시스템에 관한 것이다. 또한, 다른 방법으로는, 포토닉 결정 광섬유 펄스 신장기 및 포토닉 결정 광섬유 압축기가 구현될 수도 있다. 산업적인 응용을 위해서는, 광섬유 기반 증폭기뿐만 아니라 광섬유 기반 펄스 압축기 및 신장기에도 의존하는 전 광섬유 처프된 펄스 증폭 시스템을 이용하는 것이 바람직하다.

<20> 또한, 이용도가 높은 광섬유 기반 고에너지 처프된 펄스 증폭 시스템은 벌크 격자 압축기뿐만 아니라 통상의 광섬유의 긴 길이에 기초한 펄스 신장기와 같은 통상의 광 부품으로부터 구성될 수도 있다. 이와 같은 '통상의' 처프된 펄스 증폭 시스템의 성능은 비선형 큐비콘(cubicon) 펄스 형성을 이용함으로써, 즉, 증폭기 내부에서 자기 위상(self-phase) 변화의 제어를 통해 고차 분산을 최소화함으로써 상당히 향상될 수 있다.

<21> 결과적으로, Yb 광섬유 기반 처프된 펄스 증폭 시스템을 위한 특히 콤팩트한 시드 소스는 안티 스토크스 주파수 편이된 모드동기(modelocked) Er 광섬유 레이저 증폭기 시스템으로부터 구성될 수 있고, 여기서 안티 스토크스 주파수 편이된 출력을 필터링함으로써 파장 가변 출력을 얻는다. 이와 같은 안티 스토크스 주파수 편이된 소스의 잡음은 음 분산 광섬유 증폭기에서 양으로 처프된 펄스의 증폭에 의해 최소화된다.

<22> 본 발명의 상기 및 다른 양태와 이점은 첨부된 도면을 참조하여 다음 상세한 설명으로부터 명확하게 될 것이다.

### 실시예

<41> 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예의 상세한 설명이 주어진다.

<42> 도 1은 본 발명에 따른 처프된 펄스 증폭 시스템(100)의 예시적인 실시예를 도시한다. 본 발명의 시스템은 짧은 펄스 시드 소스(101)를 포함한다. 일반적으로, 시드 소스(101)는 50 피코초보다 작은 폭을 갖는 펄스를 공급한다. 시드 소스(101)로부터의 펄스는 광 서큘레이터(102; optical circulator)에 주입되고, 광섬유 브래그

격자 신장기(103)는 펄스를 적어도 10배만큼 시간적으로 신장시킨다. 전 광섬유 서클레이터 또는 광 서클레이터의 벌크 광 등가물이 구현될 수 있다. 그 모든 개시 내용을 참조로써 병합하고 있는 미국 특허 출원 번호 10/608,233에서 이와 같은 서클레이터를 설명하므로, 더 이상 설명하지 않는다. 그 다음에, 신장된 펄스는 서클레이터 출력을 통해 광 증폭기 시스템(104)에 전달된다. 광 증폭기 시스템(104)은 광섬유 기반 증폭기 시스템뿐만 아니라 벌크옵틱 멀티패스(bulk-optic multi-pass) 증폭기, 재생(regenerative) 증폭기, 파라메트릭(parametric) 증폭기를 포함할 수 있다. 일반적으로, 광 증폭기 시스템은 복잡한 광학 구성과 별도의 펌프 소스의 이용을 필요로 한다. 그러나, 이러한 유형의 증폭기는 관련 최신 기술에서 널리 공지되어 있으므로 본원에서는 별도로 설명하지 않는다.

<43> 그 다음에, 증폭기(104)로부터의 출력은 아이솔레이터(105), 편광 빔 분리기(106) 및 렌즈(107)를 통해 포토닉 결정 광섬유 압축기(108)에 전달된다. 일반적으로, 포토닉 결정 광섬유는 이와 같은 광섬유의 전력 처리 능력을 최대화하는 중심 도파 공기-홀(central guiding air-hole)을 이용하여 설계된다. 최적 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 경우에는, 고분산 포토닉 결정 광섬유(큰 색 분산(chromatic dispersion) 값을 제공하는 것을 특징으로 함)가 바람직하다. 일반적으로, 이와 같은 고분산 포토닉 결정 광섬유에서는 편광 상태의 제어가 매우 어렵고, 이와 같은 광섬유 내의 밴드캡 구조에서의 작은 혼란도 상당한 1차 및 2차 편광 모드 분산을 일으킬 수 있다. 이와 같은 광섬유 내에서 무작위 분산된 복굴절은 1차 편광 모드 분산을 특징으로 한다. 이와 같은 광섬유 내에서 무작위 분산된 과장 의존형 복굴절은 2차 편광 모드 분산을 특징으로 한다.

<44> 그러나, 패러데이 미러(Faraday mirror)는 광섬유 압축기(108) 내부의 임의의 1차 및 2차 편광 모드 분산을 보상할 수 있다. 패러데이 미러는 시준 렌즈(109; collimating lens), 패러데이 회전자(110) 및 미러(111)를 포함한다. 45° 회전하는 패러데이 회전자(110)를 구현하는 경우, 광섬유 압축기(108)를 통한 더블패스(double-pass)는 광섬유 압축기(108)를 통해 전파되는 역방향 반사된 광이 순방향 전파 광에 비해 정확히 반대 편광 상태에 있는 것을 보장한다. 사실상 과장 독립형 패러데이 회전자의 경우에는, 과장에 관계없이 역방향 전파 방향에서 반대 편광 상태가 얻어진다.

<45> 광섬유 압축기(108)를 통한 순방향 패스 후에 펄스가 압축되지 않기 때문에, 피크 전력이 스텝인덱스(step-index) 광섬유의 손상 임계값 아래에 있는 시스템의 경우에는, 통상의 스텝인덱스 광섬유로 이루어진 짧은 피그테일(pigtail)을 갖는 광섬유 피그테일된 패러데이 회전자 미러(Faraday rotator mirror; FRM)를 시준 렌즈(109), 패러데이 회전자(110) 및 미러(111) 대신에 구현할 수 있다.

<46> 따라서, 광섬유 압축기(108)를 통한 더블패스 후에, 시간적으로 압축된 출력 펄스는 광섬유 압축기(108)에 주입된 펄스의 편광 상태에 직교하는 편광 상태에서 추출될 수 있다. 편광 빔 분리기(106)는 이들 직교 편광된 펄스를 추출하고, 본원에서는 이들 펄스를 화살표(112)로 지시한다.

<47> 포토닉 결정 광섬유 펄스 압축기와 함께 광섬유 브래그 격자 펄스 신장기를 이용하는 것이 매우 콤팩트한 시스템 셋업을 제공하지만, 브래그 격자 펄스 신장기에서의 그룹 지연 리플(group delay ripple)은 제어하기가 어렵고, 압축된 출력 펄스에서 바람직하지 않은 배경잡음(background)를 생성할 수 있다. 이러한 문제는 펄스 재압축뿐만 아니라 펄스 신장을 위한 포토닉 결정 광섬유를 구현함으로써 회피될 수 있다. 이와 같은 시스템(113)의 예시적인 구현은 도 2a에 도시되어 있다. 도 2a에 도시된 시스템은 도 1에 도시된 시스템과 거의 동일하고, 공통 구성요소에 대해 동일 참조 부호가 이용될 것이다. 그러나, 광섬유 브래그 격자 신장기(103)는 패러데이 회전자 미러(115)와 함께 포토닉 결정 광섬유 펄스 신장기(114)로 대체된다. 도 1에 도시된 예에서와 같이, FRM(115)은 포토닉 결정 광섬유 펄스 신장기(114)에서의 편광 모드 분산을 보상하는데 이용된다. 포토닉 결정 광섬유 신장기(114)에 피그테일된 FRM(115)을 직접 스플라이스할 수 있도록 광섬유 피그테일된 FRM(115)을 구현하여, 매우 콤팩트한 셋업을 보장할 수 있다. FRM 피그테일(115)은 통상의 스텝인덱스 광섬유로 이루어질 수 있다.

<48> 펄스 압축뿐만 아니라 펄스 신장을 위한 포토닉 결정 광섬유를 이용하기 위해서는, 서로 다른 설계로 이루어진 2개의 포토닉 밴드캡 광섬유를 이용할 필요가 있는데, 즉, 2개의 포토닉 밴드캡 광섬유의 분산이 대략 반대가 되도록 2개의 광섬유 내의 포토닉 밴드캡의 위치가 서로 달라야 한다. 도 2b를 참조하면, 펄스 신장기는 밴드캡 중심이 압축기 밴드캡 중심에 비해 청색 편이(blue-shift)된다. 본원에서, 신장기-압축기 지정은 반대 구성도 가능하기 때문에 임의적이다.

<49> 특히 콤팩트한 고에너지 펄스 증폭 시스템은 펄스 신장 및 압축 단계에서뿐만 아니라 증폭 단계에서도 광섬유의 결합에 의해 실현될 수 있다. 도 3을 참조하면, 시스템(100)과 아주 유사한 시스템(116)이 도시되어 있고, 동일 참조 부호는 공통 구성요소를 위해 이용될 것이다. 증폭기 시스템(104)은 광섬유 증폭기(117)로 대체된다.

도 3은 하나의 광섬유 증폭기만을 도시하지만, 추가 펄스피킹(pulse-picking) 또는 다운카운팅(down-counting) 광 변조기 또는 아이솔레이터를 이용하여 고에너지 펄스를 생성할 수 있다. 미국 특허 출원 번호 10/608,233은 이와 같은 광섬유 증폭기 체인을 개시한다. 최대 광 강도를 처리하는 광섬유 증폭기는 대형 모드 편광 유지 광섬유로 구성되는 것이 바람직하다.

<50> 도 3에 따른 시스템의 특정 설계 구현은 50 메가헤르쯔의 반복 속도와 1558 나노미터의 파장에서 5 밀리와트의 평균 전력을 갖는 400 펨토초 근방의 대역폭 제한된 펄스를 제공하는 모드동기 Er 광섬유 레이저에 기초한 시드 소스(101)를 이용한다. 소스의 스펙트럼 폭은 7.6 나노미터이었다. Er 레이저로부터의 펄스는 광섬유 펄스 신장기(103)를 통해 100 피코초의 폭으로 신장되었다. 포토닉 결정 광섬유 압축기(108)의 색 분산을 대략 일치시키기 위해,  $26.8 \text{ ps}^2$ 의 2차 (색(chromatic)) 분산 값과  $1.02 \text{ ps}^3$ 의 3차 (색) 분산 값을 갖는 광섬유 격자 펄스 신장기를 설계하였다.

<51> 간명하게 하기 위해, 본 특정 설계 예에서는 단일 Er 광섬유 증폭기(117)만을 이용하였다. Er 광섬유 증폭기는 15568 나노미터의 파장에서 70 밀리와트의 출력 전력을 생성하였다. Er 광섬유 증폭기는 각각의 말단에서 나머지 광 컴포넌트로부터 더 분리되었다. 광섬유 증폭기(117)로의 입력 말단에서 아이솔레이터는 도시되어 있지 않고, 광섬유 증폭기(117)의 출력에서 아이솔레이터는 아이솔레이터(105)이다. 전체 시스템의 색 분산의 미세 제어를 위해, 광섬유 신장기(103)와 광섬유 서클레이터(102) 간에 추가 길이를 갖는 통상의 스텝인덱스 단일모드(single-mode) 광섬유를 삽입하였다.

<52> 본 발명의 광섬유 증폭기(117)에서 생성된 펄스 에너지는 단지 1.4 나노줄인 것에 주목하자. 펄스 에너지를 증가시키기 위해서는, 예를 들어, 미국 특허 출원 번호 10/608,233에서 설명된 바와 같이, 추가 광섬유 증폭기 단계와 펄스 피커를 결합할 필요가 있다.

<53> 포토닉 결정 광섬유 압축기(108)는 9.56 미터의 길이를 갖는다. 중심 공기-홀은 6 마이크로미터의 직경을 갖는다. 포토닉 밴드캡은 중심이 1515 나노미터이었고, 거의 200 나노미터의 스펙트럼 폭을 가졌다. 1560 나노미터에서, 포토닉 결정 광섬유는  $0.2 \text{ dB/m}$ 보다 작은 손실을 가졌고, 즉, 통상의 벌크 격자 압축기의 전송 손실에 비해, 포토닉 결정 광섬유를 통한 더블패스에서는 약 30%의 전송을 달성할 수 있었다. 포토닉 결정 광섬유의 분산은 관련 최신 기술에서 널리 공지되어 있는 표준 기술을 이용하여 개별적으로 측정되었다. 상술한 바와 같이, 포토닉 결정 광섬유의 분산은 광섬유 브래그 격자 펄스 신장기의 설계를 위한 입력 파라미터로서 이용되었다.

<54> 패러데이 회전자 미러(구성 요소(109 내지 111))를 이용하지 않으면, 시스템으로부터의 출력(112)에서 펄스를 압축할 수 없었고, 큰 페디스털(peDESTAL)을 나타냈다. 압축기로의 입력에서 1/4웨이브플레이트(waveplate) 및 1/2웨이브플레이트를 사용하는 광대역 편광 제어를 이용하는 경우에도 이들 페디스털을 제거할 수 없었다. 편파기(polarizer)를 통해 관찰된 바와 같이, 포토닉 밴드캡 광섬유를 통해 전송된 펄스의 스펙트럼은 입력 편광 상태에 의존하는 형상을 갖는 거의 100% 변조를 나타냈다. 이는, 포토닉 결정 광섬유 압축기에서 1차 및 2차 편광 모드 분산을 명확하게 지시한다.

<55> 이와는 달리, 패러데이 회전자 미러를 삽입하는 경우에는, 출력(112)에서 고품질의 압축된 펄스를 얻을 수 있었다. 도 4에는 압축된 펄스의 자기 상관이 도시되어 있다. 이 펄스는 약 800 펨토초의 절반인 시간 폭을 갖고, 대역폭 한계의 2배 내에 있다. 대역폭 한계로부터의 편차는 광섬유 브래그 격자 신장기를 위한 개선된 설계 파라미터를 이용하여 제거될 수 있는 포토닉 결정 압축기(108)와 광섬유 브래그 격자 신장기(103) 간의 소정의 나머지 압축되지 않은 3차 분산 때문이다.

<56> 이전 설명은 고집적 및 초소형 쳐프된 펄스 증폭 시스템에 관한 것이었지만, 몇몇 응용은 통상의 광섬유 신장기, 광섬유 증폭기 및 벌크 격자 압축기의 이용에 의존하는 더 통상의 시스템 개념을 허용할 수 있다. 이와 같은 시스템으로부터 고품질 펄스를 얻기 위해서는, 고차 분산 및 자기 위상 변조의 제어가 중요하다. 도 5에는 2차 및 3차 분산의 독립적인 제어를 허용하는 쳐프된 펄스 증폭 시스템이 도시되어 있다. 예시적인 실시예에서는, 수동적으로 모드동기된 Yb 광섬유 레이저에 기초한 시드 소스(101)를 이용하였다. 이와 같은 수동적으로 모드동기된 Yb 광섬유 레이저는 특허 출원 번호 10/627069에 이미 설명되어 있으므로 본원에서는 더 설명하지 않는다. 시드 소스(101)는 16 밀리와트의 평균 전력을 이용하여 43 메가헤르쯔의 반복 속도에서 16 나노미터의 대역폭을 갖는 양으로 쳐프된 광 펄스를 생성한다. 발진기의 피크 방출 파장은 1053 나노미터이었다. 시드 소스로부터의 펄스를 150 펨토초보다 작은 펄스 폭으로 압축할 수 있었고, 시드 소스로부터의 쳐프가 대략 선형인 것을 나타냈다. 시드 레이저로부터의 출력은 15 나노미터 대역폭을 갖는 가변 밴드패스 필터(119)와 아

이솔레이터(도시안함)를 통과하였다.

- <57> 밴드패스 필터(119) 다음에, 5 밀리와트의 출력 전력을 얻었고, 광섬유 신장기(120)를 이용하여 대략 100 피코초의 폭으로 펄스를 신장시켰다. 신장된 펄스를 생성하는데 채용된 광섬유 신장기는 대략 200 미터의 길이를 가졌고, 통상의 편광 유지 단일모드 스텝인엑스 광섬유에 기초하였다. 도 5에서, 가변 밴드패스 필터(119)는 광섬유 신장기(120) 전에 삽입되는 것으로 도시되어 있지만, 다른 방법으로는, 가변 밴드패스 필터(119)는 광섬유 신장기(120) 다음에 삽입될 수도 있다(시스템 구현을 별도로 도시하지 않음).
- <58> 다음 Yb-기반 편광 유지 전치 증폭기(121)는 신장된 펄스를 500 밀리와트의 평균 전력으로 증폭한다. 음향광(acousto-optic) 변조기에 기초하고 편광 유지 광섬유를 이용하여 피그테일된 펄스 피커(122)는 펄스의 반복 속도를 200 킬로헤르쯔로 감소시키므로, 평균 전력이 1 밀리와트로 된다. 그 다음에, 펄스 피커(122)로부터의 펄스를 대형모드 편광 유지 Yb 광섬유 전력 증폭기(123)에 주입하여, 950 밀리와트의 평균 전력으로 증폭하였다. Yb 전력 증폭기는 3 미터의 길이를 가졌고, Yb 전력 증폭기에서 기본 모드 스폿 크기는 약 25 마이크로미터이었다. 모든 광섬유는 적당한 모드 정합(mode-matching) 옵틱(도시안함)을 이용하여 (그 편광 축이 정렬되는) 서로에 접속되거나 그 정렬되는 편광 축과 함께 스플라이스되었다. 전력 증폭기(123)는 펌프 소스(125)를 이용하여 렌즈(124)를 통해 클래딩 펌프되어, 980 나노미터의 파장에서 약 10 와트의 펌프 전력을 전달하였다. 빔 분리 미러(126)를 구현하여 증폭된 신호 광으로부터 펌프 광을 분리하였다. 전력 증폭기(123)로부터 증폭되어 신장된 펄스는 1200라인/mm의 그루브 밀도(groove density)를 갖고 리트로(Littrow) 각도 근방에서 동작하는 단일 회절 격자에 기초한 통상의 벌크 광 압축기(127)에서 압축되었다. 이와 같은 벌크 광 압축기는 관련 최신 기술에서 널리 공지되어 있으므로 본원에서는 더 설명하지 않는다. 벌크 광 압축기(127) 다음에, 출력(128)은 2.2 마이크로줄의 펄스 에너지에 대응하는 440 밀리와트의 평균 전력과 약 330 펨토초의 전폭 반치(full-width half-maximum; FWHM) 폭을 갖는 펄스를 포함하였다.
- <59> 도 6a에는 전력 증폭기에 주입된 펄스 스펙트럼이 도시되어 있고, 도 6b에는 전력 증폭기 다음에 얻어진 펄스 스펙트럼이 도시되어 있고, 도 6c에는 압축된 출력 펄스의 대응하는 자기상관이 도시되어 있다. 자기상관 추적에서 명확히 알 수 있는 바와 같이, 본 발명의 시스템으로부터 상당히 양호한 펄스 품질을 얻을 수 있다. 또한, 도 6a 및 도 6b의 비교는 전력 증폭기에서 상당한 개인 내로잉이 존재한다는 것을 도시한다. 또한, 개인 풀링 때문에, 스펙트럼의 피크가 입력 스펙트럼과 출력 스펙트럼 간에 약 5 나노미터 정도 청색 편이한다. Yb 증폭기의 피크 이득 때문에 개인 풀링은 약 1030 내지 1040 나노미터이지만, 주입된 펄스 스펙트럼의 중심은 약 1048 나노미터이다. 증폭 프로세스에서 평균 광 주파수의 편이는 개인 풀링의 특징을 더 나타낼 수 있다.
- <60> 개인 풀링은 주입된 펄스 스펙트럼의 청색 스펙트럼 성분을 우선적으로 증폭하여, 자기 위상 변조의 존재하에서 적색 스펙트럼 성분에 비해 청색 스펙트럼 성분에 대한 더 큰 위상 지연을 생성한다. 이러한 스펙트럼 의존 비선형 위상 지연은 신장된 출력 펄스에서의 추가된 음 3차 분산과 같다. 소정의 출력 전력과 소정의 입력 펄스 스펙트럼의 경우, 이에 따라, 광섬유 신장기와 벌크 격자 압축기로부터의 양 3차 분산을 완전히 보상할 수 있다.
- <61> 개인 내로잉 및 개인 풀링에 더하여, 개인 공핍(gain depletion)은 공진 자기 위상 변조뿐만 아니라 공진 분산을 통해 2차 및 3차 분산에 비선형 기여를 더 일으킬 수 있다. 공진 분산은 증폭기에서 상위 이득 레벨과 하위 이득 레벨 간의 모집단(population) 차이와 연관된 광 위상변조 때문에 일어나고, 관련 최신 기술에서 널리 공지되어 있다. 공진 자기 위상 변조는 증폭 프로세스 동안 하나의 단일 위상에 의한 상당한 레벨의 개인 공핍 동안 증폭기에서 상위 이득 레벨과 하위 이득 레벨 간의 모집단 차이에서의 시간의존형(time-dependent) 변화 때문에 일어난다. 공진 자기 위상 변조는 반도체 물리학에서 주로 공지되어 있으나, 또한 광섬유 이득 매체에서도 일어난다. 본 예에서 이들 공진 증폭기 효과가 비선형 분산의 값에 작은 기여만을 제공하지만, 공진 효과를 이용하여 증폭 프로세스 동안 생성된 비선형 분산의 양을 수정하고 최적화할 수 있다.
- <62> 신장된 펄스가 자기 위상 변조, 개인 내로잉, 개인 풀링 및 개인 공핍의 존재하에서 상당한 레벨의 3차 분산을 누적할 수 있기 때문에, 이러한 펄스를 큐비콘(cubicon)으로 치적할 것을 제안한다. 더 일반적으로, 고차 분산 뿐만 아니라 상당한 레벨의 2차 및 3차 분산을 생성하는 분산형 지연 라인에 대해서 적어도 부분적으로 보상될 수 있는, (비선형 위상 지연 > 1에 대응하는) 적어도 상당한 레벨의 자기 위상 변조의 존재하에서 제어 가능한 레벨의 적어도 선형 및 2차 펄스 쳐프를 생성하는 펄스를 큐비콘으로 정의할 수 있다. (선형 펄스 쳐프를 보상하는 경우에는, 2차 분산을 갖는 분산형 지연 라인을 필요로 하지만, 2차 펄스 쳐프를 보상하는 경우에는, 3차 분산을 갖는 분산형 지연 라인을 필요로 하고, 또한 고차 펄스 쳐프의 경우에도 마찬가지이다). 분산형 지연 라인이 가능한 한 고차 분산 뿐만 아니라 상당한 레벨의 2차 및 3차 분산을 생성하기 위해서는, 통상, 신장된

펄스를 30배 이상으로 압축한다. 또한, 개인 공급뿐만 아니라 공진 증폭기 분산, 개인 내로잉, 개인 풀링의 존재 하에서 큐비콘을 형성할 수 있고, 여기서 단일 펄스로 인한 상당한 이득 감소를 이득 공급으로 지칭한다.

<63> 본 특정 예에서는, 신장된 펄스를 약 300배 압축한다. 본 예에서, 2의 압축 인자는 전력 증폭기에서의 개인 내로잉 때문일 수 있고, 큐비콘을 형성하지 않는 경우, 최소 압축된 펄스 폭은 단지 70의 압축 인자에 대응하는 약 600 내지 800 fs로 제한될 것이다. 전력 증폭기에서의 큐비콘 형성은 펄스 압축을 330 fs 아래로 허용한다.

<64> (거의 삼각형의) 상당히 비대칭인 큐비콘의 스펙트럼 형상에 비해, 미국 특허 출원 번호 09/576,772에서 설명된 바와 같이, 포물선 펄스(종종 관련 최신 기술의 당업자에게 similaritons으로도 지칭됨)는 (거의 포물선의) 상당히 대칭인 펄스 스펙트럼을 갖는 것이 바람직하다는 것에 주목하자.

<65> 도 5 및 도 6을 다시 참조하면, 비선형 슈뢰딩거 방정식의 응용에 기초한 시뮬레이션은 약 100 피코초의 폭을 갖는 신장된 펄스의 경우, 시스템에서의 3차 분산의 최적 보상이 약  $\pi$  내지  $2\pi$ 의 비선형 위상 지연에서 얻어진다는 것을 도시한다. 최적 주입 스펙트럼은 약 8 내지 14 나노미터의 스펙트럼 폭을 갖고, 주입된 펄스 스펙트럼의 피크 위치는 Yb 전력 증폭기 이득 프로파일의 피크로부터 약 4 내지 20 나노미터만큼 적색 편이되는 것이 이상적이다. 상술한 바와 같이, 본 발명의 Yb 증폭기는 약 1030 내지 1040 나노미터에서 피크 스펙트럼 이득을 갖는다. 따라서, 이상적으로 주입된 펄스 스펙트럼의 중심은 1035 내지 1060 나노미터 사이에 있고, 1044 내지 1054 나노미터 사이에 있는 것이 바람직하다.

<66> 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 3차 분산의 비선형 보상의 특징은 최종 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재 하에서 펄스 에너지 또는 펌프 에너지가 증가함에 따라 펄스 품질의 개선을 관찰할 수 있다는 것이다. 펄스 품질은 펄스 폭과 구별되어야 한다는 것에 주목하자. 예를 들어, 미국 특허 출원 번호 09/576,722에서 설명된 바와 같이, 일반적으로, similariton 펄스 증폭기에서는, 펄스 에너지 레벨이 증가함에 따라 압축된 펄스 폭이 감소한다. 그러나, 대응하는 펄스 품질에서의 개선은 작다. 예를 들어, 펄스 품질은 (전폭 반치 펄스 폭)/(평균 제곱근 펄스 폭)의 비율로서 정의될 수 있고, 이들 2개의 정의는 관련 최신 기술에서 널리 공지되어 있다. 큐비콘 펄스 증폭기와 달리, 펄스 에너지 레벨이 증가함에 따라 압축된 펄스 폭도 감소하지만, 일반적으로 펄스 품질에서의 개선이 더 크고, 또한, 펄스 신장기와 압축기 간의 부정합된 3차 분산에 의해 유도된 상당한 펄스 날개(pulse wing)를 크게 억제할 수 있다. 이와는 달리, similariton 펄스 증폭기는 펄스 신장기와 압축기 간의 3차 분산의 부정합을 보상할 수 없다. 본 발명을 포함하는 시스템의 특징은 시간적 펄스 품질을 관찰하고, 고차 분산 항을 측정하는 것이다. 펄스 에너지가 높아짐에 따라 고차 분산이 감소한다는 것을 알 것이다. 다른 관찰 가능한 놀라운 사실은 스펙트럼이 자기 위상 변조 때문에 추가 리플을 가질 수 있지만 펄스 품질이 개선된다는 것이다. 펄스 품질 개선은 날개에서 에너지가 작은 더 짧거나 같은 펄스 폭을 의미한다. 통상의 광섬유 광학 시스템에서, 추가 자기 위상 변조 리플은 펄스 품질을 저하하게 된다.

<67> 또한, 통상의 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서, 펄스 품질은 특히, 최종 증폭기에서 자기 위상 변조의 존재하에서 에너지 레벨이 증가함에 따라 저하하는 경향이 있다. 펄스 에너지를 갖는 펄스 품질에서의 개선은 아래에 설명되는 소정의 작은 수정을 갖는 도 5에 도시된 시스템 구성을 이용하여 얻어진 대응하는 펄스 스펙트럼(도 7b)뿐만 아니라 10 및 2 마이크로줄의 펄스 에너지(도 7a)에서 압축된 펄스의 자기상관 추적을 도시한 도 7a 및 도 7b에 더 도시되어 있다.

<68> 얻을 수 있는 펄스 에너지를 10 마이크로줄로 증가시키기 위해, 광섬유 신장기(120)를 500 미터의 길이로 증가시켰고, 압축기(127)를 1500 1/min의 격자 주기를 갖는 별크 압축기 격자를 포함하도록 변경하였다. 또한, 전력 증폭기(23)의 전방에는 별도로 도시되지 않은 제2 전치 증폭기 및 제2 펄스 피커를 삽입하였다. (펄스 압축 후에 500 밀리와트의 출력 전력에 대응하는) 약 1 와트의 평균 출력 전력에서 약 10 마이크로줄까지의 에너지를 갖는 펄스의 생성을 가능하게 하기 위해, 제2 펄스 피커를 이용하여 펄스 반복 속도를 50 킬로헤르츠로 감소시켰지만, 200 킬로헤르츠의 펄스 반복 속도에서 2 마이크로줄 결과를 얻었다.

<69> 500 미터 광섬유 신장기 길이를 갖는 시스템 구성을 이용하면, 도 7a에 도시된 바와 같이 2 마이크로줄의 에너지를 갖는 펄스는 3차 분산 때문에 소정의 별개의 연장된 테일(tail)을 나타냈지만, 도 7b에 도시된 펄스 스펙트럼은 고품질이지만 단지 약하게 변조된다. 펄스 폭은 약 730 펨토초이다. 도 7a에 도시된 바와 같이, 펄스 에너지를 10 마이크로줄로 증가시키면, 연장된 펄스 테일을 크게 억제하고 약 400 펨토초의 펄스 폭을 얻는다. 이와는 달리, 도 7b에 도시된 펄스 스펙트럼에서 증가한 변조로부터 명확하게 알 수 있는 바와 같이, 10 마이크로줄의 경우 스펙트럼 품질이 저하한다. 컴퓨터 시뮬레이션으로부터, 10 마이크로줄의 펄스 에너지의 경우 전력 증폭기(123)에서의 자기 위상 변조 레벨은 약 2 내지  $4\pi$ 임을 알 수 있다. 전력 증폭기에서 신장된 펄스의 피크 전력은 100 내지 200 킬로와트인 것으로 계산될 수 있다. 도 7c에는 펄스 에너지가 10 및 2 마이크로줄인

펄스 스펙트럼을 도시한 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 더 도시되어 있다. 도 7b의 실험 결과와 도 7c의 이론 시뮬레이션 간의 매우 양호한 대응을 명확하게 알 수 있다. 도 7b 및 도 7c에 도시된 것과 같이, 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 광섬유 전력 증폭기를 큰 자기 위상 변조 레벨로 동작시키는 명백한 특징은 펄스 에너지의 증가에 따른 스펙트럼 진폭 리플의 증가이다.

<70> 이를 계산으로부터, 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 광섬유 전력 증폭기에서의 허용 가능한 자기 위상 변조의 양은 펄스 신장에 따라 증가하고, 적어도 최대 달성 가능한 펄스 에너지는 광섬유 신장기 길이에 따라 선형으로 증가할 것이라는 것을 더 나타낼 수 있다. 본 실험 구성에서와 같이, 2000 미터의 광섬유 신장기 길이를 이용하는 경우, 3 내지  $10\pi$ 의 비선형 위상 지연은 광섬유 전력 증폭기 내로 불완전한 시드 펄스가 주입되는 경우에도 허용될 수 있다.

<71> 통상, 자극된 라만 산란은 10 내지  $20\pi$ 의 자기 위상 변조 레벨에 대해 일어난다. 본 실험 구성에 따르면, 100 마이크로줄까지의 펄스 에너지는 2000 미터의 광섬유 신장기 길이와 전력 증폭기 내부의 약 3 내지  $10\pi$ 의 비선형 위상 지연에 대해 가능하다. 이와 같은 고레벨 자기 위상 변조가 허용되는 것을 보장하기 위해서는, 전력 증폭기 내에 주입되는 펄스 스펙트럼의 스펙트럼 진폭 리플 레벨을 더 최소화할 필요가 있다. 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 스펙트럼 리플을 최소화하기 위한 기술은 미국 특허 출원 번호 10/608,233에 이미 설명되어 있으므로 본원에서는 더 설명하지 않는다.

<72> 일반적으로, 최적의 광섬유 쳐프된 펄스 증폭 시스템은 펄스 신장을 위해 간단한 광섬유 신장기를 채용하는 것과 상당한 3차 분산 및 자기 위상 변조가 일어나는 펄스 에너지 레벨에서 펄스 에너지의 증가에 따라 관찰되는 펄스 품질에서의 개선을 나타내는 것을 특징으로 할 수 있다. 이러한 3차 분산은 통상의 벌크 격자 압축기에 의해 주로 제공되어, 1050 나노미터의 파장에서 동작하는 표준 단일모드 광섬유의 3차 분산에 비해 2 내지 10배 큰 3차 분산 레벨을 생성한다. 자기 위상 변조는 충분한 펄스 에너지를 이용하여 펄스를 증폭함으로써 제공된다. 최적의 자기 위상 변조 레벨은 0.3 내지  $10\pi$ 이다. 전력 증폭기에서 상당한 자기 위상 변조의 명백한 특징은 펄스 에너지의 증가에 따른 스펙트럼 변조의 증가이다.

<73> 펄스 품질은 더 짧은 파장으로의 개인 내로잉과 개인 풀링의 존재에 의해 더 개선된다. 증폭된 스펙트럼 폭은 1030 내지 1060 나노미터의 파장 범위에 있는 10 나노미터보다 작아야 하지만, 개인 풀링은 주입된 펄스 스펙트럼과 증폭된 펄스 스펙트럼 간에 약 1 내지 10 나노미터 정도의 스펙트럼 피크에서의 편이를 생성해야 한다. 또한, 자기 위상 변조의 존재하에 펄스 클리닝(pulse cleaning)을 가능케 하는 최적의 주입 스펙트럼의 중심은 1035 내지 1065 나노미터의 파장 범위에 있어야 한다.

<74> 도 8에는 본 발명의 Yb 전력 증폭기에서의 개인 풀링의 효과가 더 도시되어 있다. 전력 증폭기에서 Yb 이득 프로파일은 선(129)으로 도시되어 있다. 전력 증폭기 내에 주입되는 최적의 입력 스펙트럼은 선(130)으로 도시되어 있다. 통상의 개인 내로잉된 출력 스펙트럼은 선(131)으로 도시되어 있다. 단지 일 예로서 포물선 스펙트럼 입력이 도시되어 있지만, 일반적으로, 임의의 스펙트럼 형상을 이용할 수 있고, 개인 풀링의 효과도 여전히 관찰할 수 있다.

<75> 도 5에 도시된 시스템은 자기 위상 변조를 통해 고차 분산 제어를 가능케 하기 위해 임의의(또한 매우 비싼) 진폭 필터를 개시한 종래 기술(미국 특허 출원 번호 09/576,722)에 비해 상당히 단순화된 것이다. 본 발명의 시스템에서 중요한 단순화는 개인 내로잉과 개인 풀링의 효과를 이용하기보다는 어떤 복잡한 진폭 필터도 필요하지 않으므로, 광섬유 이득 매체 자체가 압축된 펄스 품질에서 거의 최적 조건을 생성하기 위해 이미 최적화된 자기최적화(self-optimized) 진폭 필터와 같이 행동한다는 것이다. 도 5에 도시된 시스템에서 다른 중요한 단순화는 가변 밴드패스 필터(119)의 구현이 3차 및 2차 분산의 본질상 독립적인 제어를 허용하므로, 가변 밴드패스 필터(119)를 통해 입력 스펙트럼의 중심 파장을 조정함으로써 시스템의 3차 분산을 단독으로 제어할 수 있다는 것이다. 또한, 가변 밴드패스 필터(119)의 조절이 시스템의 2차 분산에 영향을 주지만, 벌크 격자 압축기(127) 내의 분산형 광 경로를 간단히 조절함으로써 2차 분산을 계속해서 최소화할 수 있다.

<76> 예를 들어, 가변 밴드패스 필터(119)를 위한 특정한 결정적 정렬 방법은 주파수분해 광 격자(frequency-resolved optical gating; FROG)를 통해 압축된 펄스 위상을 측정하는 것을 이용할 수 있다. 이 경우, 우선 FROG 추적은 가변 밴드패스 필터(119)의 조절에 의해 선형화되어, 시스템에서 3차 분산을 최소화한다. 그 다음에, 압축기 내의 분산형 광 경로의 조절에 의해 FROG 추적으로부터 추출된 자기상관 폭을 최소화하여, 가능한 최단 출력 펄스를 생성한다.

<77> 따라서, 광 필터를 이용하여 고차 분산 제어를 가능케 하기 위해서는, 시드 소스의 스펙트럼 대역폭이 광 필터

의 스펙트럼 대역폭보다 커야 한다. 또한, 평탄한 가우스, 포물선 또는 직사각형 형상의 입력 펄스 스펙트럼이 증폭기에 주입되어 자기 위상 변조로 인한 임의의 바람직하지 않은 펄스 왜곡을 최소화하는 것이 바람직하다. 평탄한 가우스, 포물선 또는 직사각형 입력 펄스가 없는 경우에도, 전력 증폭기(123) 내의 강한 스펙트럼 정형(shaping)은 자기 위상 변조를 이용하는 3차 분산 보상의 바람직한 효과를 계속 달성할 수 있다.

<78> 도 5에 도시된 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 3차 분산 제어에 대한 광 필터를 이용하는 다른 방법으로서, 특정 스펙트럼 출력을 갖는 시드 소스(101)를 이용할 수도 있다. 그러나, 3차 분산의 제어가 입력 펄스 스펙트럼에 임계적으로 의존하므로, 필터의 대역폭을 초과하는 시드 소스 대역폭과 광 필터를 갖는 구현을 구현하기가 더 용이하다.

<79> 일반적으로, 자기 위상 변조를 이용하는 3차 분산의 제어 또는 3차 분산의 제어는 압축기(127)의 3차 분산의 절대 크기의 균형을 맞추거나 줄이는 3차 분산의 값을 신장기 광섬유(120)를 통합함으로써 더 용이하게 될 수 있다. 미국 특허 출원 번호 09/576,722에서 개시된 바와 같이, 수정된 3차 분산 값을 갖는 이러한 광섬유는 그 전체 개시내용을 참조로써 병합하고 있는 미국 특허 출원 번호 10/608,233에서 개시된 바와 같은 포토닉 결정 광섬유뿐만 아니라 통상의 스텝인택스 및 다공성 광섬유를 포함할 수 있다. DiGiovanni 등에게 발행된 미국 특허 번호 5,802,236, Fajardo 등에게 발행된 미국 특허 번호 6,445,862, Libori 등에게 발행된 미국 특허 번호 6,792,188 및 Libori 등의 WO 02/12931은 수정된 3차 분산의 값을 갖는 다공성 광섬유의 특정 설계 예를 개시한다.

<80> 도 5b는 이러한 고차 분산 보상기의 다른 실시예이다. 이 고차 분산 보상기는 입력 펄스 신장기와 진폭 필터로 이루어진다. 이들은 광섬유 격자와 같은 동일 구성요소이거나, 필터 및 분산을 이용한 긴 광섬유와 같은 별도의 구성요소일 수 있다. 이는 자기 위상 변조를 일으키는 광섬유 내에 입력되는 입력인 신장된 비대칭 형상의 펄스를 생성한다. 따라서, 위상 편이의 양은 진폭에 의해 결정된다. 이로 인해, 고차 분산의 보정을 허용한다. 당해 시스템의 경우, 이러한 광섬유가 이득을 제공할 수도 있고, 또는 별도의 광섬유가 이득을 제공할 수 있다.

<81> 또한, 본원에서 설명되는 바와 같은 큐비콘 펄스를 이용하여 높은 피크 전력 신장된 펄스를 얻을 수 있고, 그 다음에, 도 1 내지 도 4를 참조하여 설명된 바와 같이 이 신장된 펄스를 포토닉 결정 광섬유에서 압축할 수 있다. 포토닉 결정 광섬유 압축기가 음의 3차 분산 값을 생성하므로, 양의 비선형 3차 분산 값을 생성하는 큐비콘 펄스를 선택하여 효율적인 펄스 압축을 가능케 한다. 예를 들어, 이와 같은 큐비콘 펄스는 스펙트럼 이득 피크의 청색 쪽의 펄스 주입에 의해 생성될 수 있다. 포토닉 광섬유 압축기와 함께 큐비콘 펄스를 이용하는 일구현은 도 1에 도시된 구현과 유사하지만, 여기서는 광섬유 격자 신장기(103)를 한 발의 광섬유 신장기(a length of fiber stretcher)로 대체한다. 이와 같은 구현은 별도로 도시되지 않는다.

<82> 이하, 도 9a를 참조하면, 상업화가 가능한 안티 스토크스 주파수 편이된 Er 광섬유 레이저 시스템(129)이 도시되어 있다. 초고속 Er(또는 Er/Yb) 광섬유 레이저(130)는 시스템의 프런트 엔드(front end)로서 이용된다. 예를 들어, 이와 같은 Er 광섬유 레이저는 미국 특허 출원 번호 10/627069에서 설명되어 있으므로, 본원에서는 더 설명하지 않는다. 초고속 Er 광섬유 레이저의 출력은 아이솔레이터(131)를 통해 전송되고, 한 발의 양 분산 광섬유(132)는 펄스를 시간적으로 신장시킨다. 음 분산 Er 증폭기(133)는 신장된 펄스를 시간적으로 증폭한다. 본원에서, 양 분산 광섬유는 넌솔리톤(non-soliton) 지원 광섬유로서 지칭되고, 음 분산 광섬유는 솔리톤 지원 광섬유로서 지칭된다. Er 광섬유 증폭기(133)는 단일주파수 팝프 레이저(135)를 이용하여 광장 분할 다중화(wavelength division multiplexing; WDM) 커플러(134)를 통해 펌핑된다. Er 광섬유 레이저로부터 펄스를 전송하는 모든 광섬유는 편광 유지이고, 편광 유지 방식으로 함께 스플라이스되어 시스템의 최적 안정도를 보장한다. 음 분산 Er 광섬유 증폭기(133)로부터의 출력은 고비선형 광섬유(135) 내에 주입되고, 이 고비선형 광섬유(135)는 스플라이스(136 및 137)를 통해 나머지 시스템에 접속된다. 그 다음에, 고비선형 광섬유의 출력은 가변 광 필터(138)의 편광 유지 피그테일에 스플라이스된다. 시스템의 출력은 화살표(139)로 지시된다.

<83> 고비선형 광섬유(135)는 분산 평탄화되고  $-1$  내지  $-10 \text{ ps}^2/\text{km}$  범위의 1560 나노미터에서 분산 값을 갖는 것이 바람직하고, 즉, 고비선형 광섬유는 원격통신에서 이용되는 것과 같은 표준 전송 광섬유에 비해 감소한 음 분산 값을 갖고 솔리톤 지원인 것이 바람직하다. 따라서, 고비선형 광섬유에서 4 광장 혼합(four-wave-mixing)은 거의 1050 나노미터와 거의 3000 나노미터의 스펙트럼 출력을 동시에 생성할 수 있다. 본원에서, 1 마이크로미터 광장 영역에서 청색 편이된 출력은 안티 스토크스 출력으로서 지칭된다.

<84> 양 분산 광섬유(132)는 양으로 쳐프된 펄스를 생성하고, 그 다음에, 음 분산 광섬유(133)는 증폭함과 동시에 압축한다. 음으로 쳐프된 광섬유에서 양으로 쳐프된 펄스를 증폭함으로써, 음 분산 광섬유에서 펄스 브레이크업

(break-up)에 대한 임계값을 최소화할 수 있고, 최대 펄스 에너지를 갖는 압축된 펄스를 생성할 수 있다.

<85> 이와 같은 내용은 도 9b에 더 도시되어 있다. 선(140)은 음 분산 광섬유(141)에서 증폭되는 양으로 쳐프된 펄스의 시간 프로파일을 나타낸다. 음 분산 광섬유(141)의 출력에서, 선(142)으로 개략적으로 도시된 시간 프로파일을 갖는 압축되어 증폭된 펄스가 생성된다. 선형 증폭 후에 최적으로 압축된 펄스를 광섬유(141)의 출력에서 연도록 광섬유(141)의 길이와 광섬유(141)에의 입력에서 펄스 쳐프를 선택한다.

<86> 도 9a에 따른 실제 시스템 데모에서, Er 레이저는 5 밀리와트의 평균 전력과 70 메가헤르쯔의 반복 속도에서 12 나노미터의 스펙트럼 대역폭을 갖는 1.5 피코초의 양으로 쳐프된 펄스를 생성하였다. 이와 같이, 광섬유(132)를 제거하였다. 9 마이크로미터의 코어 직경을 갖는 음 분산 광섬유(133)의 1.5 미터 길이에서 100 밀리와트의 전력 레벨로 펄스를 증폭하였다. 12 센티미터 길이의 고비선형 광섬유(135)는 1050 나노미터 파장 범위에서 스펙트럼 생성을 하는데 충분하였다. 도 10에는 필터(138) 없이 측정된 안티 스토크스 주파수 편이된 스펙트럼이 도시되어 있다. 1048 나노미터에 중심을 두고 30 나노미터의 스펙트럼 대역폭을 갖는 안티 스토크스 펄스 스펙트럼을 얻었다. 1000 내지 1100 나노미터 범위로 통합된 평균 전력은 약 3 밀리와트이었다. 10 나노미터 대역 폭을 갖는 스펙트럼 필터(138)를 이용하는 경우에도, 900 마이크로와트보다 큰 평균 출력 전력을 1040 내지 1060 나노미터의 파장 범위에서 얻었다. 이러한 출력 전력은 통상의 와트-레벨 Yb 광섬유 증폭기를 시당하는데 이상적이고, 여기서는 단지 100 내지 300 마이크로와트의 평균 시드 전력을 필요로 한다. 펨프 레이저(135)로부터의 펨프 전력의 변화는 안티 스토크스 주파수 편이된 스펙트럼의 변화를 생성하였지만, 이들 변화는 상대적으로 복잡하였고 펨프 전력에 선형으로 의존하지 않았다는 것에 주목하자. 따라서, 가변 레이저의 경우, 펨프 레이저(135)로부터의 펨프 전력을 고정하고 밴드패스 필터(138)를 조정하는 것이 바람직하다.

<87> 또한, 1.5 미터 길이의 음 분산 Er 증폭기(133)에의 입력에서 거의 대역폭 제한된 600 펜토초 펄스를 이용하는 것에 기초하는 다른 시스템 개념은 1050 나노미터 근방에서 안티 스토크스 주파수 편이된 펄스 스펙트럼을 생성하였다는 것에 주목하자. 그러나, 음 분산 Er 증폭기(133)의 입력에 거의 대역폭 제한된 펄스를 이용하는 경우, 증폭기(133)에서 솔리톤 자기주파수 편이를 방지할 수 있으므로, 증폭기(133)에서 증폭된 펄스 스펙트럼은 라만 편이된(Raman-shifted) 스펙트럼 성분과 편이되지 않은 스펙트럼 성분으로 분해된다. 증폭기(133)에서 펄스 브레이크업으로부터 추가된 잡음뿐만 아니라 라만 편이로부터 추가된 잡음은 안티 스토크스 편이된 출력에서 추가 잡음을 생성하여, 본질상 이용할 수 없는 1050 나노미터 근방에서 출력을 생성한다.

<88> 본 발명의 바람직한 실시예의 상술한 설명은 예시 및 설명하기 위한 목적으로서 제공되었다. 본 발명을 개시된 바로 그 형태로 총망라하거나 한정하려는 의도는 아니고, 상기 교시내용을 고려하여 수정과 변형이 가능하고, 본 발명의 실시로부터 수정과 변형을 달성할 수 있다. 본 발명의 실시예는 고려된 특정 이용에 적합한 여러 수정과 함께 여러 실시예에서 당해 기술분야의 당업자가 본 발명을 이용하는 것을 가능케 하는 그 실제 응용과 본 발명의 원리를 설명하기 위해 선택되고 설명되었다. 따라서, 본원에서 기재된 모든 미국 특허, 공개공보 및 출원은 마치 본원에 포함되는 것처럼 참조로써 병합되고 있다.

<89> 따라서, 본원에서는 본 발명의 소정의 실시예만을 특별히 설명하였지만, 본 발명의 사상 및 범위로부터 일탈함이 없이 여러 수정을 할 수 있다는 것을 명확하게 알 수 있다. 또한, 단지 명세서와 청구항의 가독성을 향상시키기 위해 두문자를 이용하였다. 이들 두문자는 이용된 용어의 일반성을 줄이려는 의도는 아니므로, 본원에서 설명된 실시예에 청구항의 범위를 한정하려는 것으로 해석되지 않아야 한다.

### 도면의 간단한 설명

<23> 본 명세서에 통합되고 그 일부를 구성하는 첨부된 도면은 다음 설명과 함께 본 발명의 실시예를 예시하고, 본 발명의 양태, 이점 및 원리를 설명하는 기능을 한다.

<24> 도 1은 광섬유 격자 펄스 신장기와 비선형 편광 유지 포토닉 결정 펄스 압축기에 기초한 쳐프된 펄스 증폭 시스템에 대한 일반적인 방법의 도면.

<25> 도 2a는 포토닉 결정 펄스 신장기와 비선형 편광 유지 포토닉 결정 펄스 압축기에 기초한 쳐프된 펄스 증폭 시스템에 대한 일반적인 방법의 도면.

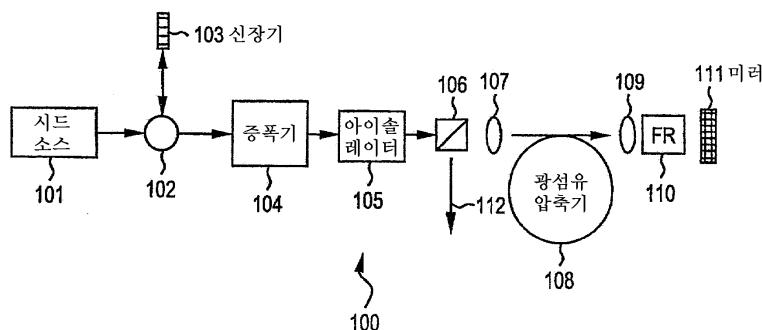
<26> 도 2b는 펄스 신장 및 재압축을 위해 이용될 때 포토닉 결정 광섬유의 포토닉 밴드캡의 대략적인 최적 위치의 도면.

<27> 도 3은 광섬유 격자 펄스 신장기와 비선형 편광 유지 포토닉 결정 펄스 압축기에 기초한 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템에 대한 일반적인 방법의 도면.

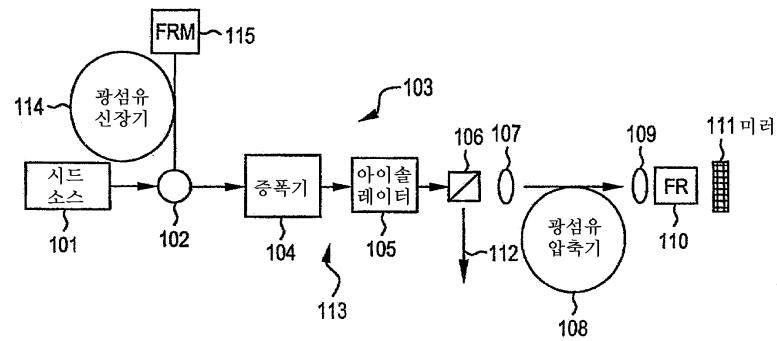
- <28> 도 4는 포토닉 결정 광섬유 압축기에 기초한 특정 Er 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템을 이용하여 얻어진 재압축 펄스의 자기 상관(autocorrelation).
- <29> 도 5a는 비선형 전력 증폭기에서 자기 위상 변조를 통해 3차 분산의 제어를 가능케 하는 광 밴드패스 필터와 함께 광섬유 펄스 신장기와 통상의 벌크 격자 펄스 압축기에 기초한 특정 Yb 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 도면.
- <30> 도 5b는 이러한 고차 분산 압축기의 다른 실시예.
- <31> 도 6a는 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 특정 Yb 전력 증폭기에 주입된 통상의 최적 펄스 스펙트럼의 예시.
- <32> 도 6b는 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 특정 Yb 전력 증폭기의 출력에서 얻어진 통상의 펄스 스펙트럼의 예시.
- <33> 도 6c는 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 특정 Yb 전력 증폭기의 압축된 출력을 이용하여 얻어진 통상의 자기 상관 추적(trace)의 예시.
- <34> 도 7a는 10 및 2 마이크로줄의 펄스 에너지에서 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 특정 Yb 전력 증폭기의 압축된 출력을 이용하여 얻어진 통상의 자기 상관 추적의 예시.
- <35> 도 7b는 10 및 2 마이크로줄의 펄스 에너지에서 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템의 일부인 특정 Yb 전력 증폭기의 출력에서 얻어진 통상의 펄스 스펙트럼의 예시.
- <36> 도 7c는 10 및 2 마이크로줄의 펄스 에너지에서 도 7a 및 도 7b와 같은 광섬유 기반 쳐프된 펄스 증폭 시스템에서 이용되는 Yb 전력 증폭기의 출력에서 얻어진 이론상 계산된 펄스 스펙트럼의 예시.
- <37> 도 8은 비선형 고전력 Yb 증폭기에서 3차 분산의 제어를 위해 이용되는 통상의 Yb 증폭기 이득 스펙트럼에 관한 최적 펄스 스펙트럼의 예시.
- <38> 도 9a는 짧은 펄스 Yb 광섬유 증폭기의 시딩을 위한 안티 스토크스 주파수 편이 광섬유와 함께 이용되는 최적 모드동기 Er 발진기 증폭기 시스템의 도면.
- <39> 도 9b는 안정한 안티 스토크스 주파수 편이를 위한 최적 조건을 예시한 도면.
- <40> 도 10은 안티 스토크스 주파수 편이된 Er 광섬유 레이저를 이용하여 얻어진 광 스펙트럼의 도면.

## 도면

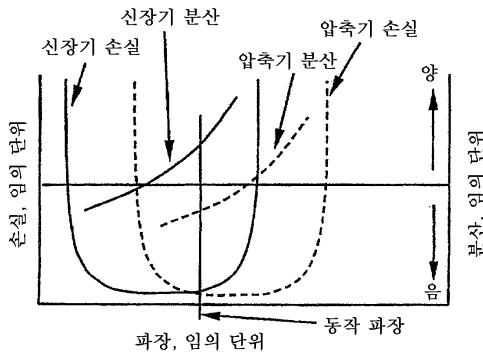
### 도면1



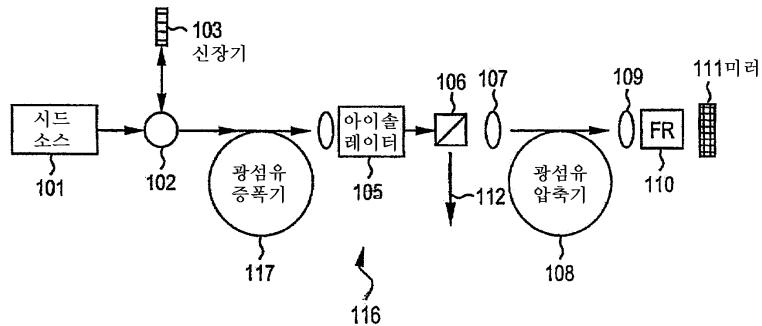
도면2a



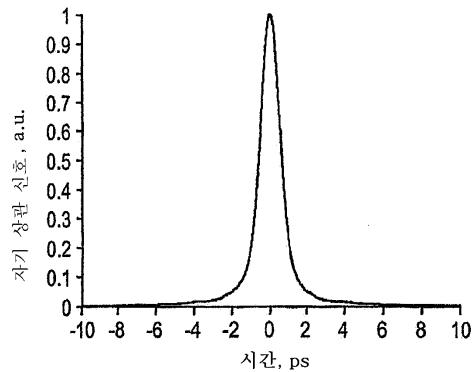
도면2b



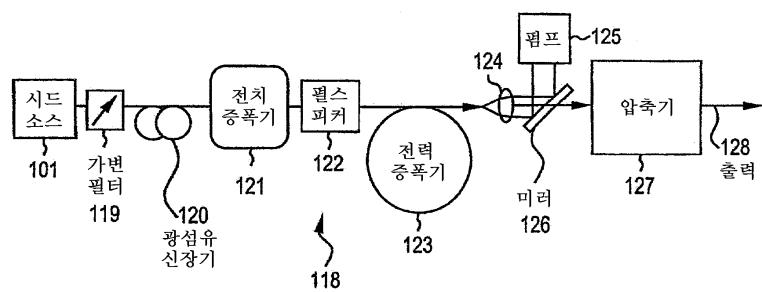
도면3



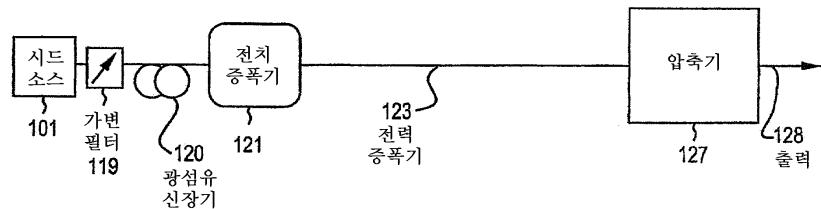
## 도면4



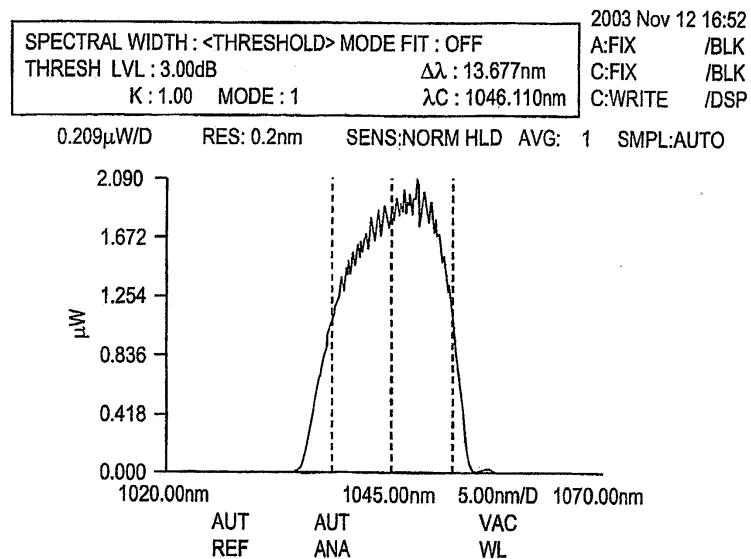
## 도면5a



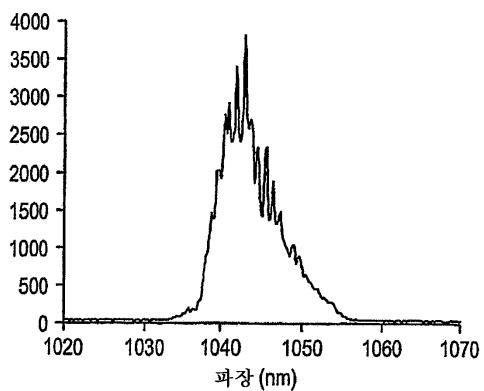
## 도면5b



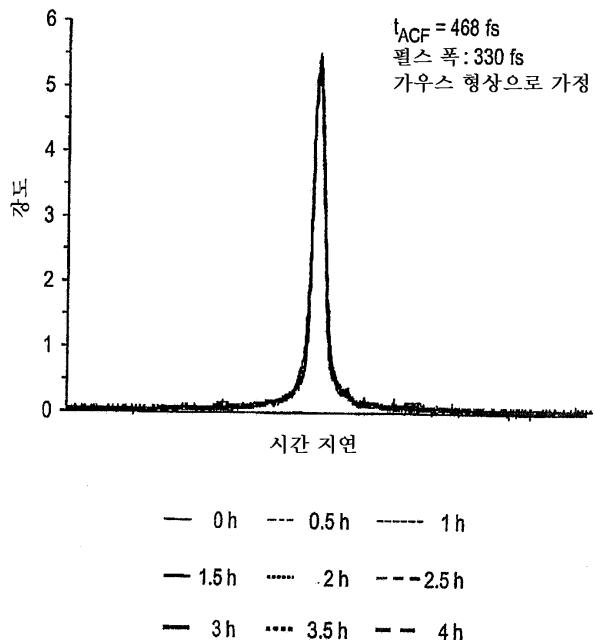
도면6a



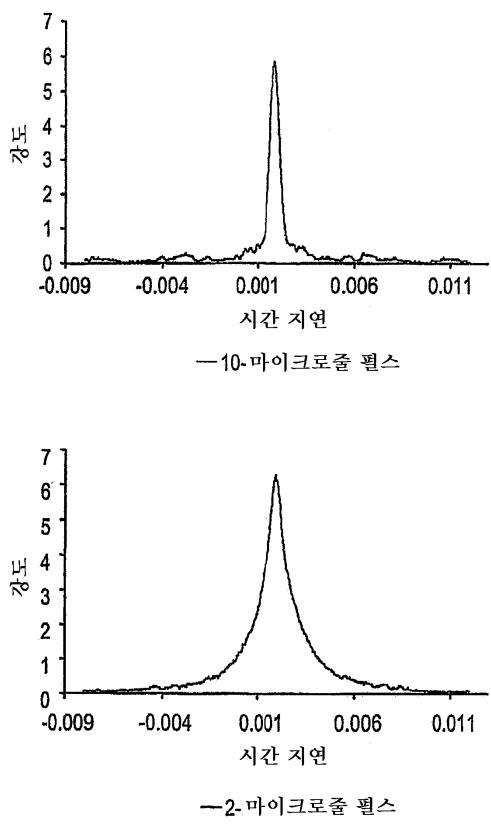
도면6b



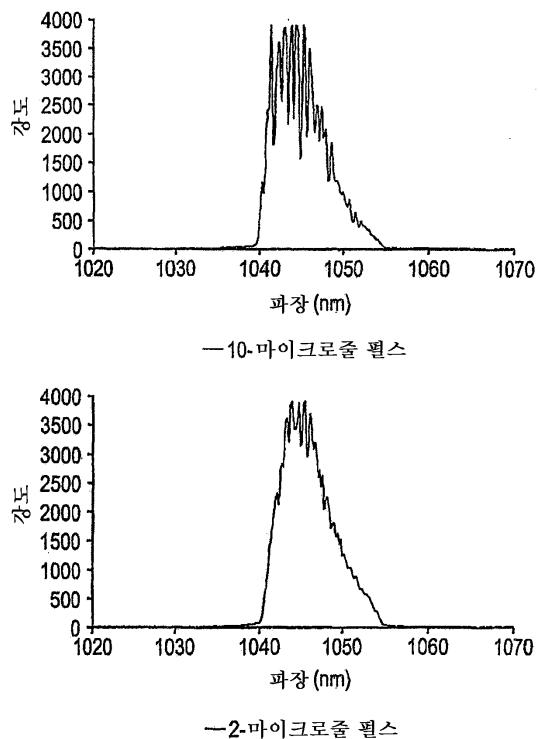
도면6c



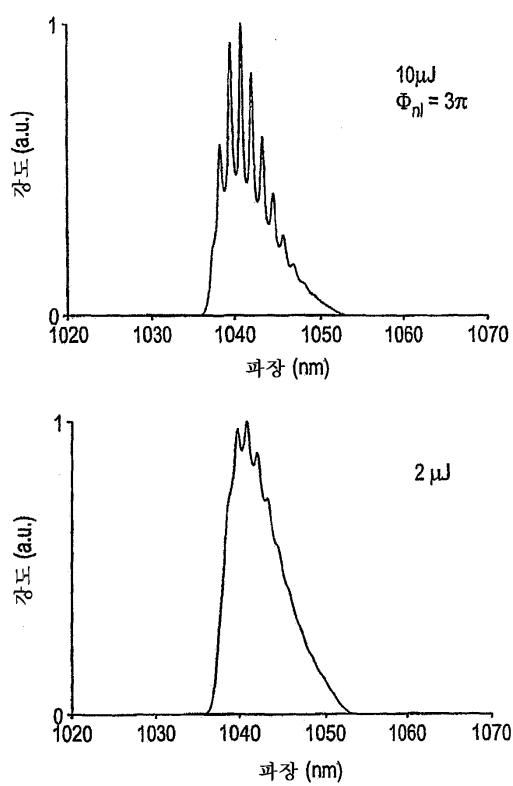
도면7a



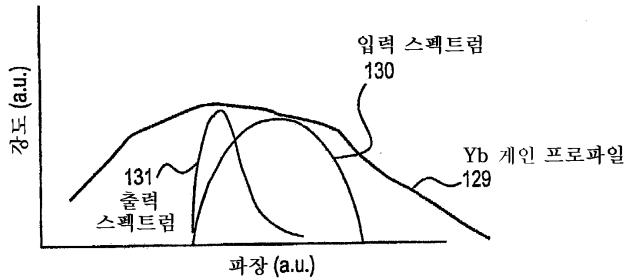
도면7b



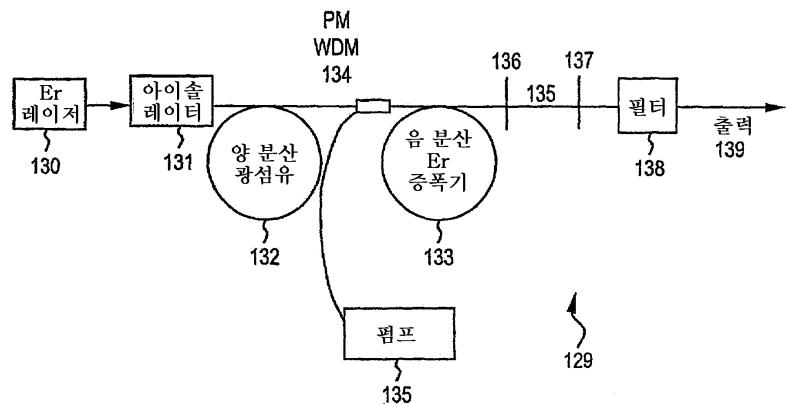
도면7c



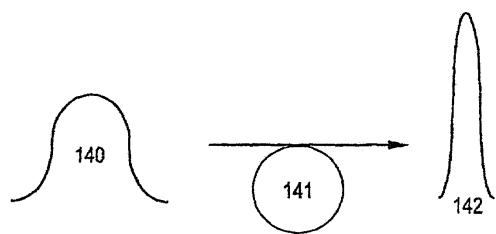
도면8



도면9a



도면9b



도면10

