



(19)대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl.

G01J 9/02 (2006.01)  
G01J 9/00 (2006.01)  
G01B 9/02 (2006.01)  
A61B 5/00 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2006-0120165  
(43) 공개일자 2006년11월24일

(21) 출원번호 10-2006-7010382

(22) 출원일자 2006년05월26일

심사청구일자 없음

번역문 제출일자 2006년05월26일

(86) 국제출원번호 PCT/US2004/029148

(87) 국제공개번호 WO 2005/047813

국제출원일자 2004년09월08일

국제공개일자 2005년05월26일

(30) 우선권주장 60/514,769 2003년10월27일 미국(US)

(71) 출원인 더 제너럴 하스피탈 코포레이션  
미국, 메사추세츠 02114, 보스톤 프룻트 스트리트 55

(72) 발명자 윤석현  
30 캠브리지 파크 드라이브, 아파트 4128, 캠브리지, 메사추세츠주 02140, 미국  
보우마, 브레트, 유진  
12 몬마우스 스트리트, 윈시, 메사추세츠주 02171, 미국  
티어니, 길레모, 주니어  
12 페어몬트 스트리트, 캠브리지, 메사추세츠주 02139, 미국  
보어, 요한, 피츠제럴드 데  
60 씨 마샬 스트리트, 소머빌, 메사추세츠주 02145, 미국

(74) 대리인 특허법인다래

전체 청구항 수 : 총 93 항

(54) 주파수 영역 간섭법을 이용하여 광 영상화를 수행하는 방법 및 장치

(57) 요약

장치 및 방법이 개시된다. 특히 적어도 하나의 제1 전자기 방사가 하나의 샘플에 제공되며, 또한 적어도 하나의 제2 전자기 방사가 비 반사 기준물에 제공될 수 있다. 제1 및/또는 제2 방사의 주파수는 시간에 따라 변한다. 상기 제1 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭이 검출된다. 또한 제1 전자기 방사 및/또는 제2 전자기 방사는 시간에 따라 변화하는 스펙트럼을 갖는다. 스펙트럼은 특정 시간에 다수의 주파수들을 가질 수 있다. 또한, 제1 편광 상태에서 제3 방사와 제4 방사 사이의 간섭 신호를 검출할 수 있다. 또한, 제1 편광 상태와는 다른

제2 편광 상태에서 제3 방사와 제4 방사 사이의 간섭 신호를 검출하는 것이 바람직하다. 제1 및/또는 제2 전자기 방사는 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 중심 주파수 스펙트럼을 가질 수 있다.

**대표도**

도 3a

**특허청구의 범위**

**청구항 1.**

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하며 또한 비 반사 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 제공되는 방사 주파수는 시간에 따라 변하도록 되어있는 적어도 하나의 제1 장치; 및

상기 적어도 하나의 제1 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 적어도 하나의 제2 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 2.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제3 방사는 상기 샘플로부터 복귀된 방사이며, 또한 상기 적어도 하나의 제4 방사는 상기 기준물로부터 복귀된 방사인 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 3.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제2 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제3 전자기 방사 및 상기 적어도 하나의 제3 전자기 방사중 적어도 하나의 주파수들을 편이시키기 위한 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 4.**

제1항에 있어서,

상기 검출된 간섭에 의거하여 영상을 생성하는 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치

**청구항 5.**

제4항에 있어서,

스캐닝 데이터를 생성하기 위해 상기 샘플의 횡단 위치를 스캔하는 한편 상기 영상을 생성하기 위해 상기 제3 장치에 스캐닝 데이터를 제공하는 프로브(probe)를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 6.

제5항에 있어서,

상기 스캐닝 데이터는 상기 샘플위의 다수의 횡단 위치들에서 획득된 감지 간섭을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 7.

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 광검출기(photodetector)와 상기 적어도 하나의 광검출기에 따르는 적어도 하나의 전기 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 8.

제3항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 광검출기와 상기 적어도 하나의 광검출기에 따르는 적어도 하나의 전기 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 9.

제8항에 있어서,

상기 적어도 하나의 전기 필터는 상기 주파수 편이 장치에 의한 주파수 편이의 크기와 대략 같은 중심 주파수를 갖는 대역 통과 필터인 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 10.

제9항에 있어서,

상기 전기 필터의 전송 프로파일은 실질적으로 그 통과 대역에 걸쳐 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 11.

제5항에 있어서,

상기 프로브는 회전 접합부 및 광섬유 카테터(catheter)를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 12.

제11항에 있어서,

상기 카테터는 초당 30회전 이상의 속도에서 회전되는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 13.**

제1항에 있어서,

적어도 하나의 편광 변조기를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 14.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 상기 제1 및 제2 전자기 방사 중 적어도 하나의 편광 상태를 검출할 수 있는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 15.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 이중 평형 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 16.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 편광 다이버스(diverse) 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 17.**

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 적어도 하나의 편광 다이버스 및 이중 평형 수신기를 구비하는 것으로 하는 장치.

**청구항 18.**

제1항에 있어서,

적어도 하나의 제1 전자기 방사와 적어도 하나의 제2 전자기 방사, 그리고

적어도 하나의 제3 전자기 방사와 적어도 하나의 제4 전자기 방사 중에서

적어도 하나들 사이의 위상 차를 추적하는 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 19.**

제1항에 있어서,

적어도 하나는 그 중심 주파수가 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 스펙트럼을 갖는 제1 및 제2 전자기 방사를 방출하도록 구성된 장치를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 20.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하며 또한 비 반사 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 상기 제1 방사 및 제2 방사중 적어도 하나의 주파수는 시간에 따라 변하도록 되어 있는 단계; 및

상기 적어도 하나의 제1 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 21.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하며 또한 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하는 적어도 하나의 제1 장치를 구비하되, 상기 제1 및 제2의 전자기 방사중 적어도 하나는 시간에 따라 변화하는 스펙트럼을 가지는 한편 이 스펙트럼은 특정 시간에 다수의 주파수들을 포함하는 제1 장치; 및

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 적어도 하나의 제2 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 22.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제3 방사는 상기 샘플로부터 복귀된 방사이며, 또한 상기 적어도 하나의 제4 방사는 상기 기준물로부터 복귀된 방사인 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 23.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제2 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제3 전자기 방사 및 상기 적어도 하나의 제4 전자기 방사중 적어도 하나의 주파수들을 편이시키기 위한 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 24.

제21항에 있어서,

상기 검출된 간섭에 의거하여 영상을 생성하는 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치

### 청구항 25.

제24항에 있어서,

스캐닝 데이터를 생성하기 위해 상기 샘플의 횡단 위치를 스캔하는 한편 상기 영상을 생성하기 위해 상기 제3 장치에 스캐닝 데이터를 제공하는 프로브(probe)를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 26.

제25항에 있어서,

상기 스캐닝 데이터는 상기 샘플위의 다수의 횡단 위치들에서 획득된 감지 간섭을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 27.

제21항에 있어서,

상기 기준물은 비 반사 물인 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 28.

제21항에 있어서,

상기 스펙트럼의 중앙값은 시간에 따라 사실상 선형적으로 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 29.

제28항에 있어서,

상기 스펙트럼 중앙값의 변화율은 적어도 1000nm/msec인 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 30.

제21항에 있어서,

상기 스펙트럼은 적어도 10kHz의 반복율로 반복적으로 시간에 따라 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 31.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 장치는 시간에 따라 상기 스펙트럼을 변화시키기 위한 스펙트럼 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 32.

제31항에 있어서,

상기 스펙트럼 필터는 다면(polygonal) 스캐너, 및 시간에 따라 상기 스펙트럼을 변화시키는 스펙트럼 분리 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 33.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 장치는 전자기 방사의 생성 및 증폭중 적어도 하나를 수행하는 반도체 이득 매체를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 34.

제23항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 광검출기와 상기 적어도 하나의 광검출기에 따르는 적어도 하나의 전기 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 35.

제34항에 있어서,

상기 적어도 하나의 전기 필터는 상기 주파수 편이 장치에 의한 주파수 편이의 크기와 대략 같은 중심 주파수를 갖는 대역 통과 필터인 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 36.

제35항에 있어서,

상기 전기 필터의 전송 프로파일은 실질적으로 그 통과 대역에 걸쳐 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 37.

제25항에 있어서,

상기 프로브는 회전 접합부 및 광섬유 카테터를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 38.

제37항에 있어서,

상기 카테터는 초당 30회전 이상의 속도에서 회전되는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 39.

제21항에 있어서,

적어도 하나의 편광 변조기를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 40.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 상기 제1 및 제2 전자기 방사 중 적어도 하나의 편광 상태를 검출할 수 있는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 41.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 이중 평형 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 42.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 편광 다이버스 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 43.

제21항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 적어도 하나의 편광 다이버스 및 이중 평형 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 44.

제21항에 있어서,

적어도 하나의 제1 전자기 방사와 적어도 하나의 제2 전자기 방사 사이, 및/또는

적어도 하나의 제3 전자기 방사와 적어도 하나의 제4 전자기 방사 사이의 위상 차를 추적하는 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 45.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 상기 제1 및 제2의 전자기 방사중 적어도 하나는 시간에 따라 변화하는 스펙트럼을 가지는 한편 이 스펙트럼은 특정 시간에 다수의 주파수들을 포함하도록 되어 있는 단계; 및

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 46.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 제공된 방사 주파수는 시간에 따라 변화하도록 되어 있는 적어도 하나의 제1 장치;

제1 편광 상태에서 상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 제1 간섭 신호를 검출하는 적어도 하나의 제2 장치; 및

제2 편광 상태에서 제3 및 제4 전자기 방사들 사이의 제2 간섭 신호를 검출하는 적어도 하나의 제3 장치를 구비하며, 또한 상기 제1 및 제2 편광 상태들은 서로 다른 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 47.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제3 방사는 상기 샘플로부터 복귀된 방사이며, 또한 상기 적어도 하나의 제4 방사는 상기 기준물로부터 복귀된 방사인 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 48.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제2 전자기 방사, 상기 적어도 하나의 제3 전자기 방사 및 상기 적어도 하나의 제4 전자기 방사중 적어도 하나의 주파수를 편이시키도록 구성된 적어도 하나의 제4 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 49.

제46항에 있어서,

상기 검출된 간섭에 의거하여 영상을 생성하는 적어도 하나의 제4 장치를 추가로 포함하는 것을 특징으로 하는 장치

#### 청구항 50.

제49항에 있어서,

스캐닝 데이터를 생성하기 위해 상기 샘플의 횡단 위치를 스캔하며 또한 상기 영상을 생성하기 위해 상기 제4 장치에 스캐닝 데이터를 제공하는 프로브를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 51.

제50항에 있어서,

상기 스캐닝 데이터는 상기 샘플위의 다수의 횡단 위치들에서 획득된 검출 간섭을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 52.**

제46항에 있어서,

상기 기준물은 비 반사 물인 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 53.**

제46항에 있어서,

상기 스펙트럼의 중앙값은 시간에 따라 사실상 선형적으로 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 54.**

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 장치는 시간에 따라 스펙트럼을 변화시키는 스펙트럼 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 55.**

제54항에 있어서,

상기 스펙트럼 필터는 다면 스캐너, 및 시간에 따라 상기 스펙트럼을 변화시키는 스펙트럼 분리 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 56.**

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제1 장치는 전자기 방사 생성 및 증폭중 적어도 하나를 수행하는 반도체 이득 매체를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 57.**

제46항에 있어서,

상기 검출된 간섭에 의거하여 영상을 생성하는 적어도 하나의 제4 장치를 추가로 구비하며, 또한 상기 제1 및 제2 편광 상태들은 대략 서로 직교하는 것을 특징으로 하는 장치.

**청구항 58.**

제48항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 광검출기와 상기 적어도 하나의 광검출기에 따르는 적어도 하나의 전기 필터를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 59.

제58항에 있어서,

상기 적어도 하나의 전기 필터는 상기 주파수 편이 장치에 의한 주파수 편이의 크기와 대략 같은 중심 주파수를 갖는 대역 통과 필터인 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 60.

제59항에 있어서,

상기 전기 필터의 전송 프로파일은 실질적으로 그 통과 대역에 걸쳐 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 61.

제50항에 있어서,

상기 프로브는 회전 접합부 및 광섬유 카테터를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 62.

제46항에 있어서,

상기 카테터는 초당 30회전 이상의 속도에서 회전되는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 63.

제46항에 있어서,

적어도 하나의 편광 변조기를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 64.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 상기 제1 및 제2 전자기 방사 중 적어도 하나의 편광 상태를 검출할 수 있는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 65.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 이중 평형 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 66.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 편광 다이버스 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 67.

제46항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제2 장치는 적어도 하나의 적어도 하나의 편광 다이버스 및 이중 평형 수신기를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 68.

제46항에 있어서,

적어도 하나의 제1 전자기 방사와 적어도 하나의 제2 전자기 방사 사이, 및/또는

적어도 하나의 제3 전자기 방사와 적어도 하나의 제4 전자기 방사 사이의 위상 차를 추적하는 적어도 하나의 제3 장치를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

#### 청구항 69.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 상기 제1 방사와 제2 방사중 적어도 하나의 주파수는 시간에 따라 변화하도록 되어 있는 단계;

제1 편광 상태에서 상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 관련된 제3 방사와 상기 적어도 하나의 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 제1 간섭 신호를 검출하는 단계; 및

제2 편광 상태에서 제3 및 제4 전자기 방사들 사이의 제2 간섭 신호를 검출하는 단계를 포함하며, 또한 상기 제1 및 제2 편광 상태들은 서로 다른 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 70.

제69항에 있어서,

상기 적어도 하나의 제3 방사는 상기 샘플로부터 복귀된 방사이며, 또한 상기 적어도 하나의 제4 방사는 상기 기준물로부터 복귀된 방사인 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 71.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 상기 제1 방사과 제2 방사중 적어도 하나는 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 중심 주파수 스펙트럼을 가지도록 되어있는 적어도 하나의 제1 장치; 및

상기 적어도 하나의 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사과 상기 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 적어도 하나의 제2 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 72.

제71항에 있어서,

상기 중심 주파수는 5 킬로 헤르츠 이상의 반복율로 반복적으로 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 73.

제71항에 있어서,

상기 중심 주파수는 10 테라 헤르츠 이상의 범위에 걸쳐 변화하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 74.

제71항에 있어서,

상기 스펙트럼은 100 기가 헤르츠 이하의 순시 선평(line width)을 갖는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 75.

제71항에 있어서,

5m 이하의 왕복(roundtrip) 길이를 갖는 레이저 캐비티를 추가로 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 76.

제73항에 있어서,

상기 스펙트럼의 조정 범위의 중심은 1300nm에 공칭적으로 존재하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 77.

제73항에 있어서,

상기 스펙트럼의 조정 범위의 중심은 850nm에 공칭적으로 존재하는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 78.

제73항에 있어서,

상기 스펙트럼의 조정 범위의 중심은 1700nm에 공칭적으로 존재하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 79.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 상기 제1 방사와 제2 방사중 적어도 하나는 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 중심 주파수 스펙트럼을 가지도록 되어있는 단계; 및

상기 적어도 하나의 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭을 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 80.

하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하고, 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하되, 제공된 방사 주파수는 시간에 따라 변화하도록 되어있는 적어도 하나의 제1 장치;

상기 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 상기 적어도 하나의 제2 전자기 방사의 주파수를 편이시키기 위한 적어도 하나의 제2 장치;

간섭 신호를 생성하기 위해 제1 전자기 방사와 제2 전자기 방사를 간섭하게 하는 간섭계; 및

상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사 사이의 간섭을 검출하기 위한 적어도 하나의 제2 장치를 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

### 청구항 81.

조직의 구조 및 조성중 적어도 하나와 관련된 특정 데이터를 판정하는 시스템으로서,

소정의 기술을 수행할 때,

- a) 하나의 샘플로부터 입수한 적어도 하나의 전자기 방사와 기준물로부터 입수한 적어도 하나의 제2 전자기 방사로 된 간섭 신호와 관련된 정보를 수신하되, 상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사중 적어도 하나는 주파수 편이되게 하고,
- b) 제1 형식으로 샘플화된 데이터를 생성하기 위해 상기 정보를 샘플화하며, 또한
- c) 상기 샘플화된 데이터를 제2 형식의 특정 데이터로 변환하되, 상기 제1 및 제2 형식은 서로 다르게 하도록 되어있는 처리 장치를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템

### 청구항 82.

제81항에 있어서,

상기 제2 형식은 사실상 동일한 전자기 주파수 차이를 나타내는 적어도 2개의 샘플링 간격들을 갖는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 83.**

제82항에 있어서,

상기 샘플링 간격들의 각각은 사실상 동일한 전자기 주파수 차이들을 나타내는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 84.**

제81항에 있어서,

상기 절차(c)는 상기 샘플화된 데이터를 보간하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 85.**

제84항에 있어서,

상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사중 적어도 하나는 특정 주파수만큼 주파수 편이되며, 또한 상기 보간은 상기 샘플화된 데이터의 주파수 영역 배열로의 푸리에 변환(Fourier transforming) 및 상기 특정 주파수에 의거한 상기 배열의 적어도 2개의 주파수 대역들로의 분리를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 86.**

제85항에 있어서,

상기 보간은 상기 샘플화된 데이터의 주파수 영역 배열로의 변환, 이 배열의 크기의 증가, 그리고 상기 배열의 증가 부분의 각 요소에의 소정의 값의 삽입을 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 87.**

제81항에 있어서,

상기 처리 장치는 또한 상기 특정 데이터에 의거하여 상기 조직의 적어도 일 부분에 대한 영상을 생성하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 88.**

제87항에 있어서,

상기 영상은 특정 해상도를 가지고, 상기 샘플화된 데이터와 관련된 전자기 주파수들의 스펙트럼은 상기 특정 해상도와 관련되며, 또한 상기 특정 해상도는 사실상 상기 전자기 주파수들의 스펙트럼의 푸리에 변환 한계에 근접하는 것을 특징으로 하는 시스템.

**청구항 89.**

제85항에 있어서,

상기 제2 형식은 사실상 동일한 전자기 주파수 차이를 나타내는 적어도 2개의 샘플링 간격들을 포함하며, 또한 상기 특정 주파수의 크기는 대략 상기 샘플링 간격들 중 적어도 하나의 역수의 4분의 1 이상인 것을 특징으로 하는 시스템.

### 청구항 90.

제87항에 있어서,

상기 제2 형식은 영상 형식이며, 또한 상기 영상은 상기 변환 샘플화된 데이터에 기반하는 것을 특징으로 하는 시스템.

### 청구항 91.

제84항에 있어서,

상기 제2 형식은 대략 일정한 k-공간에서의 간격들을 포함하는 형식인 것을 특징으로 하는 시스템.

### 청구항 92.

조직의 구조 및 조성중 적어도 하나와 관련된 특정 데이터를 판정하는 방법으로서,

하나의 샘플로부터 입수한 적어도 하나의 전자기 방사와 기준물로부터 입수한 적어도 하나의 제2 전자기 방사로 된 간섭 신호와 관련된 정보를 수신하되, 상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사중 적어도 하나는 주파수 편이되도록 되어 있는 단계;

제1 형식으로 샘플화된 데이터를 생성하기 위해 상기 정보를 샘플화하는 단계; 및

상기 샘플화된 데이터를 제2 형식의 특정 데이터로 변환하는 단계를 포함하며, 또한 상기 제1 및 제2 형식은 서로 다른 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 93.

조직의 구조 및 조성중 적어도 하나와 관련된 특정 데이터를 판정하는 저장 매체로서, 상기 저장 매체는,

처리 장치에 의해 수행될 때,

하나의 샘플로부터 입수한 적어도 하나의 전자기 방사와 기준물로부터 입수한 적어도 하나의 제2 전자기 방사로 된 간섭 신호와 관련된 정보를 수신하되, 상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사중 적어도 하나는 주파수 편이되게 하고;

제1 형식으로 샘플화된 데이터를 생성하기 위해 상기 정보를 샘플화하며; 또한

상기 샘플화된 데이터를 제2 형식의 특정 데이터로 변환하되, 상기 제1 및 제2 형식은 서로 다르게 하는 명령들을 수행하도록 구성된 프로그램을 저장하는 것을 특징으로 하는 저장 매체.

**명세서**

**기술분야**

본 출원은 2003년 10월 23일자의 미국 가 특허출원 제 60/514,769호에 대한 우선권을 주장하며, 그 전체 내용이 본 명세서에서 참조로서 포함된다.

본 발명은 광 영상화(optical imaging)에 관한 것으로, 특히 주파수 영역 간섭법을 이용하여 광 영상화를 수행하는 방법 및 장치에 관한 것이다.

## 배경기술

종래 기술분야에서 알려진 바와 같이, 광 간섭 반사 측정법은 생물학적 샘플 또는 다른 샘플에 대한 비 침습성(non-invasive), 고 해상도( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) 및 단층적 영상화를 수행해서 반사, 흡수, 산란, 감쇠, 복굴절 및 스펙트럼 분석 등의 마이크로 구조적 광 특성들을 시각화할 수 있는 강력한 도구이다. 종래 기술분야에서 알려진 다수의 간섭 영상화 기술들이 있다. 이러한 기술들은 일반적으로 (i) 시간 영역 기법, 및 (ii) 주파수 영역 기법의 2개의 주요한 카테고리로 분류될 수 있다.

저 간섭성(干涉性) 간섭법(low coherence interferometry("LCI"))은 시간 영역 기법중 하나이다. 이러한 기법은 기준 암(reference arm) 길이를 변화시켜서 검출기에서 간섭 신호를 얻기 위해 스캐닝 시스템을 이용한다. 그러면, 프린지 패턴(fringe pattern)이 복조되어 소스 상관 함수의 간섭성 포락선을 얻을 수 있다. 광 간섭성 단층 촬영(optical coherence tomography("OCT"))은 LCI를 이용하여 2 또는 3 차원 영상들을 얻기 위한 기법이다. OCT는 Swanson 등에게 특허된 미국특허 제5,321,501호에 개시되어 있다. OCT 기법의 다수의 변형들이 개시되어 있으나, 신호 대 잡음비("SNR")가 최적화되지 못하므로, 해상도가 최적화되지 못하고, 영상 프레임 율이 낮으며, 또한 침투 깊이가 낮아진다. 전력 사용이 위의 영상화 기법에 작용하는 요인 중 하나이다. 예를 들어, 안과적 사용에 있어서, 열적 손상이 일어날 수 있기 전까지 수 밀리 와트의 전력만을 견딜 수 있다. 따라서 이러한 환경에 있어서 SNR을 증가시키기 위해 전력을 상승시키는 것은 불가능하다. 그렇지만 전력 요건을 크게 증가시키지 않고, 우수한 SNR을 갖는 영상화 방법을 실현하는 것이 바람직하다.

또한 SNR이 불충분하면 OCT를 높은 프레임 율에서 사용할 수 없게 되는데, 이 프레임 율은 모션 아티팩트(motion artifacts)를 방지하며 또한, 예를 들어 생체내의 혈관 영상화를 위한 경우와 같이 활용가능한 짧은 측정 시간 윈도우를 해소하는데 중요하다. 따라서 SNR 및 영상화 속도(예를 들어, 프레임 율)를 개선하는 방법이 필요하다.

스펙트럼 간섭법 또는 스펙트럼 레이더는 주파수 영역 영상화 기법의 하나이다. 스펙트럼 레이더에 있어서, 샘플 및 기준 암 광의 교차 스펙트럼 밀도의 실제 부분이 분광계에 의해 측정된다. 깊이가 프로파일 정보는 교차 스펙트럼 밀도 변조에 의해 부호화된다.

LCI 및 OCT의 SNR을 증가시키도록 스펙트럼 레이더 개념을 사용하는 기법은 이미 공지되어 있다. 이러한 기법은 거의 밀리미터의 스캔 범위에 이르도록 다수의 픽셀들(1000 정도)을 갖는 전자 결합 소자("CCD")를 사용한다. CCD 장치의 고속 판독으로 고속 영상화가 가능하다.

그러나, CCD 장치의 사용에 관련된 여러 가지 단점들이 있다. 첫째, CCD 장치들은 단일 소자 광 수신기에 비해 비교적 고가이다. 둘째, 이미 전술한 방법은 데이터의 획득에 단일 CCD를 사용한다. 전하 저장 용량이 제한되므로, 기준 암 전력을 대략 샘플 암 전력과 같은 레벨로 저하시켜서 샘플 암 광에 대한 자동 상관 노이즈를 제공할 필요가 있다. 또한, 반송파가 생성되지 않으므로,  $1/f$  노이즈가 시스템내의 노이즈를 지배하게 된다. 셋째, 종래의 CCD 기법의 짧은 집적 시간에도 불구하고, 간섭계에서의 위상 불안정성으로 인해 교차 스펙트럼 밀도 변조의 프린지 가시성이 저하하게 된다. 이러한 단점은 상기 기법을 모션 아티팩트들에 대해 취약하게 만든다.

간섭성 주파수 변조 연속파 반사 측정법(coherent frequency-modulated continuous-wave reflectometry; C-FMCW)은 종래 기술분야에서 공지된 다른 주파수 영역 기법이다. Swanson 등의 미국특허 제5,956,355호는 이러한 방법을 사용하는 광 영상화 방법 및 장치를 기술하고 있다. 이미 전술한 영상화 방법은 광원으로서 연속 조정 단일 주파수 레이더를 사용하는 것에 기반을 두고 있다. 조정 파장 범위는 100 마이크로 이하의 범위의 해상도를 달성하도록 수십 나노미터로 될 필요가 있다. 레이저의 순시 선폭(linewidth)은 거의 1.0mm의 검출 범위를 얻도록 대략 0.1mm이하로 되어야 한다. 조정 율은 고속(예를 들어 비디오 율) 영상화를 위해 10kHz 이상이어야 한다. 수십 나노미터에 걸쳐서 모드 홉 프리(mode-hop-free) 단일 주파수 조정을 얻기 위해 외부 캐비티 반도체 레이저가 구성될 수 있지만, 기계적 안정성의 엄격한 요건 때문에 조정 율은 1Hz 이하로 된다. 이러한 속도 문제를 해소하는 방법이 바람직하다.

따라서, 종래의 LCI 및 OCT의 소스 활용성 및 스캔 속도 단점들을 해소할 수 있는 시스템 및 방법을 제공하는 것이 바람직하다.

## 발명의 상세한 설명

본 발명의 예시적 실시예들에 따르면, 예시적 광 주파수 영역 영상화("OFDI") 시스템은 대상의 샘플을 포함하는 간섭계에 광학적으로 결합된 다수의 주파수 모드(또는 다수의 증방향 또는 축방향 모드) 파장 스위프 레이저 소스를 포함한다. 상기 시스템은 또한 샘플로부터 반사된 광과 기준 광 사이에서 직각으로 간섭성 신호들을 제공하도록 구성된 장치와 상기 간섭성 신호들을 수신하도록 배치된 검출기를 추가로 포함한다.

이러한 예시적 특정 장치로서, 종래의 시스템들의 소스 전력에 비해 비교적 낮은 소스 전력으로 동작할 수 있으며, 그리고/또는 종래의 시스템의 획득률에 비해 비교적 높은 획득률로 동작하는 OFDI 시스템이 제공된다. 스위프 소스를 사용함으로써 종래의 시스템에 비해 훨씬 낮은 소스 전력과 훨씬 높은 획득률을 갖는 산탄 잡음 및 다른 형태의 잡음들이 감소된 영상화 시스템을 구현할 수 있다. 이에 따라, 실시간 영상화를 제공하는 능력을 갖는 검출 감도의 증가를 가져올 수 있다. 이러한 영상화 속도는 모션 아티팩트들이 연속적인 문제를 형성하는 위장, 눈, 및 동맥 영상화 분야들에서 개업의들을 지원할 수 있다. 신호 대 잡음비를 유지하거나 개선시키면서 프레임 율을 증가시킴으로써 위의 아티팩트들이 최소화되거나 또는 어떤 경우에는 제거될 수 있다. 본 발명의 예시적 실시예들은 또한 OFDI에 의해 조직들의 큰 부위들을 검사할 수 있도록 하며, 또한 임상의 확실한 검사 프로토콜의 사용을 가능하게 한다.

본 발명의 예시적 실시예에 있어서, 신속 스위프 다수 주파수 모드 출력을 생성하기 위해 레이저 캐비티내에 광 대역 스캐닝 필터를 사용하는 파장 스위프 레이저가 제공될 수 있다. 레이저 캐비티내에 광 대역 스캐닝 필터를 사용함으로써, 레이저 스펙트럼의 동기 조정을 제공하기 위해 레이저 캐비티 길이를 조정할 필요가 없다. 환언하면, 레이저의 중심 파장과 같은 비율에서 레이저의 증방향 캐비티 모드를 조정할 필요가 없다.

본 발명의 다른 예시적 실시예에 있어서, 검출기는 간섭계 신호들을 수용하고 간섭계 신호들에서 상대 강도 노이즈를 억제하도록 배치된 이중 평형 수신기일 수 있다.

본 발명의 일 실시예에 따른 신호 대 잡음비("SNR")에서의 이득은 푸리에 영역에서의 신호 처리의 성능을 통해서 OCT 등과 같은 시간 영역 기법에 비해 유리해진다. SNR의 향상은 인수 N에 의한 공간 해상도에 대한 깊이 범위의 비율이다. 향상 인수 N은 수백에서 수천에 달할 수 있다. 이러한 SNR에서의 증가로 N배 빠른 인수에 의한 영상화가 가능하며, 또한 N배 낮은 전력을 갖는 소스에 의해 동일 속도에서의 영상화가 가능하다. 이 결과, 본 발명의 일 실시예는 종래의 LCI 및 OCT의 2가지 중요한 단점, 예를 들어, 소스 활용성 및 스캔 속도를 해소할 수 있다. 인수 N은 1000 이상일 수 있어서 현재 실시중인 OCT 및 LCI 기법에 비해 3등급의 크기 이상 개선된 OFDI 시스템을 구성할 수 있다.

SNR에서의 이득이 생기는데, 이는 예를 들어 산탄 잡음이 백색 잡음 스펙트럼을 갖기 때문이다. 주파수  $\omega$ (또는 파장  $\lambda$ )에서 검출기에서의 신호 강도는 주파수  $\omega$ 에서의 신호에만 기여하지만, 산탄 잡음은 모든 주파수에서 생성된다. 검출기당 광학 대역 폭을 좁힘으로써 각 주파수에서의 산탄 잡음 기여가 저감될 수 있는 동시에 신호 성분이 동일하게 유지된다.

본 발명에 따른 예시적 실시예들은 OCT에 비해 현재의 데이터 획득 속도 및 소스들에 대한 활용성을 개선한다. 산탄 잡음은 양자화된 또는 분산 전기 전하에 따른 전류의 통계적 변동에 기인한다. 산탄 잡음이 감소하면 소스 전력이 훨씬 저하하거나 획득률이 훨씬 높아진다. 현재의 데이터 획득률(~4프레임/초)에 대한 제한은 활용가능한 소스 전력과 스캐닝 지연을 위한 신속한 메커니즘의 활용에 달려있다. 8개의 인수에 의한 검출 강도에서의 증가로 초당 약 30 프레임의 속도로 실시간 영상화가 가능하다. 약 1000-2000의 인수에 의한 감도의 증가로 인해 생산이 저렴한 용이하게 활용할 수 있는 훨씬 낮은 전력과 훨씬 높은 스펙트럼 대역폭을 갖는 소스들을 사용할 수 있어서 높은 해상도의 OFDI 영상들을 생성할 수 있다.

OFDI의 안과적 적용에 있어서, 효율적인 검출에 의해 바람직하게 획득 속도의 현저한 증가를 가져온다. 안과적 적용에 있어서 있을 수 있는 제한은 ANSI 표준(대략 830nm에서 700 마이크로 와트)에 따라 눈을 입력할 수 있는 전력이다. 안과적 적용에 있어서, 현재의 데이터 획득 속도는 대략 초당 100-500 A-라인이다. 본 발명의 전력의 효율적인 검출 기술에 따라 초당 거의 100,000 A-라인의 A-라인 획득률 또는 영상당 대략 3000 A-라인에서 영상화하는 비디오 율을 얻을 수 있다.

본 발명의 적어도 일부의 목적을 이루기 위해서, 본 발명의 예시적 일 실시예에 따른 장치 및 방법이 제공된다. 특히 적어도 하나의 제1 전자기 방사가 하나의 샘플에 제공되며, 또한 적어도 하나의 제2 전자기 방사가 비 반사 기준물에 제공될 수 있다. 제1 및/또는 제2 방사의 주파수는 시간에 따라 변한다. 상기 제1 방사와 관련된 적어도 하나의 제3 방사와 상기 제2 방사와 관련된 적어도 하나의 제4 방사 사이의 간섭이 검출된다. 또한, 제1 전자기 방사 및/또는 제2 전자기 방사는 시간에 따라 변화하는 스펙트럼을 갖는다. 스펙트럼은 특정 시간에 다수의 주파수들을 가질 수 있다. 또한, 제1 편광 상태에서 제3 방사와 제4 방사 사이의 간섭 신호를 검출할 수 있다. 또한, 제1 편광 상태와는 다른 제2 편광 상태에서 제3 방사와 제4 방사 사이의 간섭 신호를 검출하는 것이 바람직하다. 제1 및/또는 제2 전자기 방사는 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 중심 주파수 스펙트럼을 가질 수 있다.

본 발명의 예시적 실시예에 있어서, 제3 방사는 샘플로부터 복귀된 방사이며, 또한 상기 적어도 하나의 제4 방사는 기준물로부터 복귀된 방사이다. 제1, 제2, 제3 및/또는 제4 방사의 주파수는 편이된다. 검출된 간섭에 의거하여 영상이 생성될 수 있다. 스캐닝 데이터를 생성하도록 샘플의 횡단 위치를 스캔하는 한편 영상을 생성하도록 제3 장치에 스캐닝 데이터를 제공하는 프로브를 사용할 수 있다. 스캐닝 데이터는 샘플의 다수의 횡단 위치에서 검출하여 획득한 간섭을 포함한다. 적어도 하나의 광 검출기와 하나의 광 검출기에 따르는 적어도 하나의 전기 필터가 사용될 수 있는데, 상기 하나의 광 검출기 다음에 전기 필터가 배치된다. 전기 필터는 주파수 편이 장치에 의한 주파수 편이 크기와 대략 같은 중심 주파수를 갖는 대역통과 필터이다. 전기 필터의 전송 프로파일은 실질적으로 그 통과 대역에 걸쳐 변화할 수 있다. 프로브는 회전 접합부와 광 섬유 카테터(catheter)를 구비한다. 카테터는 초당 30 회전 이상의 속도에서 회전될 수 있다. 적어도 하나의 편광 변조기가 설치될 수 있다.

적어도 하나의 편광 분산 수신 및/또는 하나의 편광 분산 및 이중 평형 수신기가 사용될 수 있다. 또한,

제1 전자기 방사와 제2 전자기 방사 사이, 및/또는

제3 전자기 방사와 제4 전자기 방사 사이의 위상차를 추적하는 것도 가능하다.

본 발명의 다른 예시적 실시예에 따르면, 제1 및 제2 전자기 방사가 방출될 수 있는데, 그 중 적어도 하나는 밀리 초당 100 테라 헤르츠 이상의 조정 속도에서 시간에 따라 사실상 연속적으로 변화하는 중심 주파수 스펙트럼을 가질 수 있다.

본 발명의 또 다른 예시적 실시예에 따라 하나의 장치가 제공되는데, 이 장치는 하나의 샘플에 적어도 하나의 제1 전자기 방사를 제공하는 한편 기준물에 적어도 하나의 제2 전자기 방사를 제공하는 적어도 하나의 제1 장치를 구비한다. 이 장치는 또한 상기 제1 전자기 방사와 상기 제2 전자기 방사의 주파수를 편이시키는 적어도 하나의 제2 장치와 간섭 신호를 생성하기 위해 상기 제1 전자기 방사와 제2 전자기 방사를 간섭하게 하는 간섭계를 구비한다. 그리고 상기 장치는 제1 전자기 방사와 제2 전자기 방사 사이의 간섭을 검출하는 적어도 하나의 제2 장치를 구비한다.

또한, 본 발명의 다른 예시적 실시예에 따르면, 조직의 구조 및 조성중 적어도 하나와 관련된 특정 데이터를 판정하기 위한 시스템 것을 특징으로 하는 방법, 소프트웨어 배치, 저장 매체가 제공된다. 특히, 샘플로부터 입수한 적어도 하나의 제1 전자기 방사와 기준물로부터 입수한 적어도 하나의 제2 전자기 방사로 형성되는 전자기 신호와 관련된 정보가 수신된다. 제1 및/또는 제2 전자기 방사는 주파수 편이된다. 제1 형식으로 샘플화된 데이터를 생성하도록 정보가 샘플화된다. 또한 샘플화된 데이터는 제2 형식의 특정 데이터로 변환되며, 또한 상기 제1 및 제2 형식은 서로 다르다.

## 실시예

도 1은 2 × 2 스플리터(14)의 제1 암(14a)에 신호를 제공하는 광대역 소스(12)를 포함하는 예시적 종래 기술 시간 영역 광 간섭성 단층 촬영("OCT")시스템(10)을 도시한다. 상기 스플리터는 포트(14a)에서 그에 제공된 신호를 분할하여 기준 암(16)에 결합된 포트(14b)에서 상기 신호의 제1 부분을 제공한다. 상기 스플리터(14)는 또한 샘플 암(18)에 결합된 포트(14c)에서 상기 신호의 제2 부분을 제공한다.

샘플 암(18)은 샘플 볼륨(19)까지 연장되어 있으며, 또한 상기 샘플 볼륨의 측방 스캔을 제공하는 장치(22)가 샘플 볼륨(19) 앞에 있는 샘플 암(18)에 배치된다. 기준 암(16)은 측방향 스캔을 제공하는 장치(20)까지 연장되어 있다. 또한 장치(20 및 22)는 종래 기술에 공지된 바와 같이 동작한다.

기준 및 샘플 암들(16,18)을 따라서 역으로 수단(20) 및 샘플 볼륨(19)에 의해 반사된 신호들은 각각 스플리터(14)의 각 포트(14b, 14c)에 각각 다시 결합되며, 또한 일반적으로 알려진 바와 같이 측방향 스캔 데이터(26)를 생성하는 검출기(24)에 연결된다. 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 포함된 미국 특허 제6,314,036호는 전술한바 있으며 또한 도 1에 도시된 시스템과 유사한 시스템들을 개시하고 있다.

일반적으로, 기준 암 통로 길이(16)를 스캔할 때, 샘플 볼륨(19) 내의 3개의 구조들(19a,19b,19c)에 대한 간격과 일치하는 간섭 프린지들(fringes)이 형성된다. 간섭 프린지들을 검출하기 위해서 단일 검출기(24)가 이용된다. 프린지 패턴들의 포락 검출에 의해서 소정의 위치에 조직 반사율을 대응시키는 영상(26)이 형성된다.

이하에 기술하는 임의의 실시예들로부터 명확한 바와 같이, 본 발명의 예시적 실시예는, 스펙트럼 레이더 개념(또한 스펙트럼 영역 OCT라 함) 및/또는 종래의 시간 영역 OCT의 현재 상태보다 바람직하게는 더 민감한 스펙트럼 영역과 시간 영역 OCT의 하이브리드 방식에 기반한 검출 원리를 이용해서, 획득 속도 대 해상도 비율에서 실질적인 증가를 가져오는 시스템에 관한 것이다.

시간 영역 OCT내의 신호 대 잡음 비("SNR")의 분석은 관련 공보들에 이미 공지되어 있다. 시간 영역 OCT에서의 간섭 프린지 피크 진폭은 다음과 같다.

$I_{peak} = \sqrt{P_{ref} P_{sample}}$  (1) 이때,  $P_{ref}$  및  $P_{sample}$ 는 각각 기준 암과 샘플 암의 전력(W)이다. 검출기에서의 전기 전력 면에서 단위 [ $A^2$ ]에서의 신호는 다음과 같이 정의된다.

$S = \eta^2 e^2 P_{ref} P_{sample} / E_v^2$  (2) 이때,  $\eta$ 는 양자 효율,  $e$ 는 전하 양자, 또한  $E_v = hc/\lambda$ 는 광자 에너지이다. 기준 암 및 샘플 암은 각각의 반사 스펙트럼 밀도로 주어진다.

$$P_{ref, sample} = \int S_{ref, sample}(\omega) d\omega. \quad (3)$$

기준 및 샘플 스펙트럼 밀도가 소스 스펙트럼 밀도  $S(\omega)$ 와 같다고 하면, 샘플 암 스펙트럼 밀도는 큰 인수만큼 감소되며, 즉,  $S_{ref}(\omega) = S(\omega)$  및  $S_{sample}(\omega) = \alpha S(\omega)$  ( $\alpha \ll 1$ ), 또한 상기 기준 및 샘플 암의 상기 표현을 상기 신호의 정의에 대입하면 다음식이 얻어진다,

$$S = \eta^2 e^2 \alpha \left[ \int S(\omega) d\omega \right]^2 / E_v^2 \quad (4)$$

OCT 신호들에 대한 총 노이즈에는 다음의 3가지, 즉 (i) 열 잡음, (ii) 산탄 잡음(shot noise) 및 (iii) 상대 강도 노이즈가 간여한다. 열 잡음은 제한 레지스터에 의해 생성되고, 산탄 잡음은 전류에 대한 통계적 변동을 초래하는 전하 양자의 유한 성격(finite nature)에 관련되고, 그리고 상대 강도 노이즈는 통상의 광원들의 혼돈 특징으로 인한 순시적 변동에 관련된 다. 단위 [ $A^2/Hz$ ]에서의 이들 노이즈 밀도에 대한 3가지의 기여부분은 다음과 같이 주어진다.

$$N_{noise}(f) = \frac{4kT}{R_{fb}} + \frac{2\eta e^2 P_{ref}}{E_v} + 2 \left( \frac{\eta e P_{ref}}{E_v} \right)^2 \tau_{coh} \quad (5)$$

이때,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 켈빈 온도,  $R_{fb}$ 는

제한 저항의 값, 또한  $\tau_{coh} = \sqrt{2 \ln 2 / \pi \lambda^2} / (c \Delta \lambda)$ 에 의해 가우스 소스의 반치 전 스펙트럼 폭  $\Delta \lambda$ 와 관련된다. 산탄 잡음 한계 검출은 식 (5)의 두번째항이 다른 노이즈 기여부분들보다 우월할 때 얻어진다.

신호 대 잡음 비(SNR)는 다음과 같이 주어진다.

$$SNR = \frac{S}{N_{noise}(f) BW} \quad (6)$$

이때,  $BW$ 는 신호 대역폭이며, 또한 파라미터  $S$ 와  $N_{noise}(f)$ 는 전술한 바와 같다.

**분광계 및 CCD 배열 검출기를 사용한 스펙트럼 영역 OCT**

시간 영역 OCT 시스템들의 최대 신호 대 잡음 성능은 노이즈의 산탄 잡음이 제한될 때 얻어진다. 산탄 잡음은 단일 소자 검출기를 다수 소자 배열 검출기로 대체함으로써 크게 개선될 수 있다. 검출 암 광이 상기 배열 검출기상에서 스펙트럼적으로 분산될 때, 상기 배열의 각각의 소자는 소스의 스펙트럼 폭의 작은 파장 부분을 검출한다. 산탄 잡음은 바람직하게 상기 배열의 소자들 수와 같은 인수만큼 감소된다. 신호 대 잡음 비 개선의 원리는 산탄 잡음의 백색 잡음 특성 및 동일 파장의 전자기 파들만이 간섭 프린지들을 생성한다는 경험적 지식에 기반한다.

산탄 잡음 전력 밀도  $N_{noise}(f)$ (단위 [W/Hz],  $[A^2/Hz]$  또는  $[V^2/Hz]$ )는 검출기에서 생성된 전류(또는 동등하게 양자 효율의 광 전력 배수)에 비례한다. 간섭계로 진입하는 파장  $\lambda_1$ 의 단색 빔의 경우에, 검출기에서의 프린지 주파수 또는 반송파  $f$ 는 미러의 속도, 즉,  $f_1 = 2v/\lambda_1$ 에 의해 결정된다. 산탄 잡음은 파장  $\lambda_1$ 에서의 전력(또는 스펙트럼 밀도  $S(\omega)$ )에 비례한다. 제2 파장  $\lambda_2$ 는 바람직하게 간섭계에 결합된다. 주파수  $f_2 = 2v/\lambda_2$ 에서의 제2 프린지 주파수 또는 반송파는 동시에 존재한다. 이 제2 주파수에서의 산탄 잡음은 바람직하게 파장  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$ 에서의 광 전력에 의해 생성된 산탄 잡음의 합이다. 또한 주파수  $f_1$ 에서의 산탄 잡음은 파장  $\lambda_1$  과  $\lambda_2$ 에서의 광 전력에 의해 생성된 산탄 잡음의 합이다. 따라서, 두 주파수에서 교차하는 산탄 잡음은 검출기에서의 두 파장들이 동시에 존재하는 경우 발생한다. 각 검출기에 각각의 파장을 스펙트럼적으로 분산시킴으로써, 교차 산탄 잡음이 제거될 수 있다. 이러한 방식으로 스펙트럼 영역 OCT는 시간 영역 OCT에 걸쳐 신호 대 잡음 비의 상당한 개선을 가져온다.

OCT 신호는 대부분 공간 영역에서 용이하게 기술된다. 샘플 암내의 단일 오브젝트의 경우에, OCT 신호의 간섭 부분은 소스 스펙트럼  $S(\omega)$ 의 푸리에 변환의 실수 부분에 비례한다.

$$I(\Delta z) \propto Re \int \exp(ik\Delta z)S(k)dk$$

(7)이때,  $\Delta z$ 는 샘플 암과 기준 암 사이의 경로 길이 차이이며, 또한  $k$ 는 파형 벡터이다. 시간의 함수로서 OCT 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$I(t) \propto Re \int \exp(2i\omega rv/c)S(\omega)d\omega$$

(8)이때,  $v$ 는 기준 암 미러 속도이다. 상기 신호의 주파수 스펙트럼은 시간 영역에서의 상기 신호의 푸리에 변환으로 주어지며, 그 결과 복소 함수가 얻어진다. 이 함수의 절대 값은 다음의 스펙트럼 밀도와 같다.

$$|I(f)| = \left| \int I(t)e^{2\pi ift} dt \right| = S(\pi fc/v)$$

(9)이 식은 신호 대역폭이 기준 암 미러 속도, 즉, 영상화 속도와 선형적으로 소스 스펙트럼 폭 및 스케일과 직접적으로 비례하는 것을 나타낸다. 식 (9)는 바람직하게 신호  $S$ (식 (4) 참조)에 대한 주파수 스펙트럼의 절대 값  $|I(f)|$ 에 직접적으로 관련된다. 식 (9)는 또한 광원의 각각의 각 주파수 또는 동등하게 상기 광원의 각각의 파장이 측정된 간섭계 신호에서 그 자신의 주파수로 표현되는 것을 나타낸다. 깊이 프로파일 정보  $I(t)$ 는 푸리에 변환에 의한 복합 교차 스펙트럼 밀도  $|I(f)|$ 로부터 얻을 수 있다.

복합 교차 스펙트럼 밀도는 또한 분산 또는 간섭성 소자를 이용하여 각각의 스펙트럼 대역들에서 신호  $I(t)$ 를 분리함으로써 얻을 수 있다. 각각의 검출기에서 복합 교차 스펙트럼 밀도의 일 부분만이 구해진다. 각 검출기에의 교차 스펙트럼 밀도들을 결합함으로써 신호의 완전 스펙트럼 밀도가 얻어진다. 따라서, 같은 정보가 스펙트럼 성분을 각각의 검출기들에 분리함으로써 얻어질 수 있다. 소프트웨어나 하드웨어로 모든 검출기들의 신호를 결합함으로써 단일 검출기에서 얻어지는 것과 같은 신호가 얻어진다.

검출 암에 있어서, 스펙트럼은 2개의 동일한 절반부들로 분리될 수 있는데, 이때 2개의 검출기 각각은 스펙트럼의 절반부를 검출한다. 식 (9)에 따르면, 1 또는 2개의 검출기에서의 주파수 스펙트럼은 각각 다음과 같이 주어진다.  $f < f_0$ 의 경우에  $|I_1(f)| = S(\pi fc/v)$ ,  $f > f_0$ 의 경우에  $I_1(f) = 0$ , 또한  $f < f_0$ 의 경우에  $I_2(f) = 0$ ,  $f > f_0$ 의 경우에  $|I_2(f)| = S(\pi fc/v)$ 이다. 시

간 영역 OCT에서의 단일 검출기에 의해 획득되는 주파수 스펙트럼은  $I_1(f)$ 와  $I_2(f)$ 의 합;  $I(f)=I_1(f)+I_2(f)$ 으로 주어진다. 따라서, 스펙트럼 결합 이후의 신호 S는 같으며, 그러나  $f > f_0$ 의 경우  $I_1(f)=0$  이고,  $f < f_0$ 의 경우  $I_2(f)=0$ 이며, 또한 검출기 당 대역폭 BW는 2의 인수만큼 감소될 수 있다.

노이즈는 검출기들 1 및 2에서 산탄 잡음 분포들의 합으로 구해진다. 식 (5)와 (6)으로부터 검출기당 산탄 잡음은 그 검출기에 대한 대역폭과 검출기 배수에서의 기준 암 전력에 비례한다. 스펙트럼이 동일한 절반부들로 분리되므로, 검출기들 1 및 2에서의 기준 전력은 각각 다음과 같다.

$$P_{ref}^1 = 0.5P_{ref} \quad P_{ref}^2 = 0.5P_{ref} \quad (10)$$

2개의 검출기들에 대한 산탄 잡음의 합은 다음과 같다.

$$N_{noise}^{SD} \propto P_{ref}^1 \times 0.5BW + P_{ref}^2 \times 0.5BW = 0.5P_{ref} BW \quad (11)$$

(11) 이는 시간 영역 OCT에서의 단일 검출기의 다음의 산탄 잡음과 비교된다.

$$N_{noise}^{TD} \propto P_{ref} BW \quad (12)$$

따라서, 2개의 분리된 검출기에 대해 검출 및 광을 스펙트럼적으로 분산함으로써 신호가 동일하게 되는 한편, 노이즈가 2의 인수만큼 감소되어 2의 인수만큼 순 SNR 이득을 얻게 된다.

위의 분석을 확장하면, 각각의 검출기 소자가 총 기준 전력의 하나의 N 번째를 수신하는 N 검출기 소자들에 대한 산탄 잡음들의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$N_{noise} = \frac{2\eta e^2 P_{ref}}{E_v} \frac{BW}{N} \quad (13)$$

(13) 상기 신호는 시간 영역 OCT에서의 신호와 같으며, 스펙트럼 영역 OCT에 대한 SNR 비는 다음과 같다.

$$\frac{S}{N_{noise}} = \frac{\eta P_{sample} N}{2E_v BW} \quad (14)$$

따라서, 스펙트럼 영역 OCT에 의해 검출기 소자들의 수 N에 따라 백 내지 천 배의 시간 영역 OCT에 걸쳐서 SNR이 개선시킬 수 있다. 제한되지는 않지만 라인 스캔 카메라와 같은 검출기로서 전하 결합 소자 또는 집적 장치를 이용함으로써 비율  $N/BW$ 는 다음과 같은 배열의 집적 시간  $\tau_i$  으로 대체될 수 있으며, 이 결과 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{S}{N_{noise}} = \frac{\eta P_{sample} \tau_i}{2E_v} \quad (15)$$

도 2는 소스 암(104), 샘플 암(106), 기준 암(108), 및 스펙트럼 분리 장치(112), 복수의 검출기들로 이루어진 검출기 배열(114) 및 검출기들과 유사한 복수의 증폭기들(116)을 가진 검출 암(110)을 구비하는 간섭계(102)를 포함하는 예시적 스펙트럼 영역 OCT 시스템(100)을 도시한다. 증폭기들(116)은 선택적인 아날로그 처리 전자장치(도시되지는 않았지만 당업자에게 공지됨) 및 신호들의 변환을 위한 A/D 변환기들(도시되지는 않았지만 당업자에게 공지됨)을 통해, 그리고 디지털 대역통과 필터("BPF")를 통해 처리 및 표시 장치(124)에 접속되어 있다.

처리 및 표시 장치(124)는 데이터 처리 및 표시를 수행하고, 간섭성 신호들의 결합을 위해 그리고 데이터 처리 및 표시 기능을 수행하기 위해서 디지털 고속 푸리에 변환("DFFTs") 뿐만 아니라 디지털 대역통과 필터링("BPF") 장치(122)를 선택적으로 포함할 수 있다. 검출기 배열(114)은 간단한 강도 레인징 및 영상화 및/또는 도플러 감도의 검출을 위해  $1 \times N$ , 이중 평형 검출을 위해  $2 \times N$ , 간단한 강도 레인징 및/또는 편광 및/또는 도플러 감도의 검출을 위해  $2 \times N$ , 또는 혼합 이중 평형 및 편광 및/또는 도플러 감도의 검출을 위해  $4 \times N$ 으로 될 수 있다. 이와는 달리  $M \times N$  배열이 샘플(130)에 대한 횡단 공간 정보의 검출을 위해 임의 수  $M$ 의 검출기(114)용으로 사용될 수 있다.

전자기 방사(예를 들어, 광)가 소스 암(104)을 따라서 소스로부터 분리 장치로 전송되며, 또한 기준 암(108)과 샘플 암(106) 사이에서 분리된다. 광은 샘플 암을 따라 조직 샘플(130)로 전파하며, 또한 기준 암(108)을 통해서 파장 종속 위상 장치로 전파된다. 광은 상기 샘플 및 파장 종속 위상 장치로부터 분리 장치 쪽으로 다시 반사되고, 여기에서 적어도 반사된 광의 부분들이 스펙트럼 분리 장치(112)(예를 들어, 회절 격자로서 제공될 수 있다)쪽으로 지향된다. 검출 암 광은 스펙트럼 분리 장치(112)에 의해 분산되며, 또한 스펙트럼이 검출기 배열(114)상에서 영상화된다. 거리  $L/8$ 에 걸쳐서 기준 암(108) 길이를 측정함으로써, 기준 암(108)과 샘플 암(106) 광의 교차 스펙트럼 밀도가 결정될 수 있다. 처리 및 표시 장치는 그에 공급되는 신호들을 수신해서 깊이 프로파일 정보를 생성하도록 교차 스펙트럼 밀도의 푸리에 변환을 수행한다.

도 3A는 본 발명에 따른 예시적 시스템의 블록도로서 단일 주파수 조정 소스를 이용하는 간섭성 주파수 변조 연속파("C-FMCW") 시스템의 기본 원리를 나타낸다. 주파수 처프(chirped) 레이저로서 동작가능한 단색성 레이저 광(70)은 커플러(72)의 입력(72a)에 광신호를 제공한다. 커플러(72)는 광신호를 기준 미러(82)까지 연장되는 기준 암(80) 및 샘플(86)까지 연장되는 샘플 암(84)으로 분할한다. 광은 패스(80,84)를 따라 하향 전파하며, 또한 커플러(72)를 통해 광 검출기(88)에 의해 검출되는 간섭성 신호들을 제공하도록 기준 미러(82)와 샘플 미러(86)로부터 반사된다.

도 3B-3D의 그래프들에 도시된 바와 같이, 2개의 반사 광 신호들(90(도 3B)과 92(도 3C))사이에 각각 광 지연이 있는 경우, 주파수  $f$ 를 갖는 비트 신호(94;도 3D 참조)가 광 검출기(88)에서 검출될 수 있다. 축을 따라서 샘플에 다수의 반사 포인트들이 있는 경우, 간섭은 샘플내의 반사(산란) 포인트와 기준 미러 사이의 광 지연 차이에 비례하는 주파수들을 갖는 비트 노트들(notes)로 구성된다. 각 비트 주파수 성분의 전력은 산란의 반사율에 비례한다. 따라서 샘플의 영상은 간섭 데이터의 푸리에 변환에 의해 구성될 수 있다.

도 4A-4D를 참조하면, 전술한 한편 도 3A-3D에 도시된 유사한 소자들은 같은 참조 부호를 붙이고 본 발명의 예시적 실시예에 따른 광 주파수 영역 영상화("OFDI") 시스템은 다수의 종방향 모드들로 구성된 레이저 출력 스펙트럼을 커플러(72)의 입력에 제공하는 파장 스위프 레이저 소스(95)(또한 여기서는 주파수 스위프 소스(95)라 함)을 포함한다. 커플러(72)는 제공된 신호를 기준 미러(82)까지 연장되는 기준 암(80) 및 샘플(86)까지 연장되는 샘플 암(84)으로 분할한다. 광 신호들은 커플러(72)를 통해 광 검출기(88)에 의해 검출되는 신호들의 스펙트럼을 제공하도록 기준 미러(82) 및 샘플(86)로부터 반사된다.

신호 스펙트럼의 중심(또는 평균) 파장은 스펙트럼의 선단측에서 새로운 종방향 모드들을 생성하며, 또한 스펙트럼의 후미측에서 상기 모드들을 소멸시킴으로써 시간적으로 조정된다.

도 3A-3D를 참조하여 전술된 원리들이 파장 스위프 레이저 소스(95)를 이용하는 OFDI 기술에도 적용할 수 있다. C-FMCW 시스템(예를 들어, 전술한 도 3A의 시스템)의 경우와 유사하게 비트 신호(94)가 생성될 수 있다. 파장 스위프 레이저 소스를 이용하는 OFDI 시스템의 경우, 상기 기준 및 샘플로부터의 광(96 및 98)의 중심 주파수에서의 차이들에 각각 대응하는 비트 주파수를 갖는 비트 신호(94)가 생성될 수 있다.

종방향 모드들 사이의 주파수 간격은 실질적으로 검출 대역폭보다 커야 한다. 상기 모드 비트 주파수(상대 강도 노이즈 피크들)는 디지털화 이전에 저역 필터 등의 적절한 전자 필터에 의해 제거될 수 있다. 간섭 신호(94)는 광 지연에 비례하는 주파수 성분을 갖는다. 또한 샘플의 영상은 디지털화 데이터의 푸리에 변환으로 생성될 수 있다.

본 발명의 예시적 실시예에 있어서, 신속 스위프 다수 주파수 모드 출력을 생성하도록 레이저 캐비티내에 광 대역(optical band-pass) 스캐닝 필터를 이용하는 파장 스위프 소스(95)가 설치될 수 있다. 본 발명에 따른 예시적 필터들은 도 6 및 도 9A와 관련하여 이하에 기술한다. 레이저 캐비티내에 광 대역 스캐닝 필터를 사용함으로써, 레이저 스펙트럼의 동기 조정을 위해서 레이저 캐비티 길이를 조절할 필요가 없다. 실제로 이러한 장치는 레이저의 중심 파장과 동일한 비율로 레이저의 종방향 캐비티 모드를 조절할 필요가 없다.

OFDI 기술을 이용함으로써, 단일 픽셀의 영상이 푸리에 변환을 통해 하나의 A-스캔의 지속시간 동안 시간의 함수로서 기록되는 신호로부터 생성될 수 있는데, 이는 단일 픽셀이 하나의 A-스캔 내의 짧은 시주기에서 측정된 데이터로부터 얻어지는 TD OCT와는 다르다. 동일한 A-스캔 주기 내에서 동수의 데이터를 얻기 위한 검출 대역폭은 TD와 FD OCT 모두의 경우 대략 동일하다. 그러나 OFDI 기술에 사용되는 푸리에 변환은 전 A-스캔 주기에 걸쳐 입수한 다수의 데이터 포인트들로부터 단일 영상 픽셀을 구성함으로써 TD OCT에 비해 신호 대 잡음비를 효율적으로 개선할 수 있다. 이러한 효과에 따라 실제의 검출 대역폭보다 N 배 이상인 "효율적인" 대역폭 검출을 얻을 수 있다. 따라서 SNR이 N 배 개선될 수 있는데, N 은 푸리에 변환에 있어서 (디지털화된) 데이터 포인트들의 수이다. 산탄 잡음 제한의 경우에 SNR은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{S}{N_{noise}} = \frac{\eta P_{sample} N}{2E \sqrt{BW}} \quad (16)$$

그러나, 파장의 협대역 출력 스펙트럼으로 인해 상대 강도 노이즈(RIN)는 CW 광대역 광원보다 상당히 크게 될 수 있다. 열광(thermal light)의 경우 RIN은  $1/\Delta\nu$ 로 주어지며, 여기서  $\Delta\nu = c \cdot \Delta\lambda/\lambda^2$ 은 (순시) 광 출력의 광 대역폭이다. 레이저 광의 경우, RIN은 다른 통계로부터 파생되므로 열 광과는 다른 값을 갖는다. FD-OCT의 경우, 저 RIN 레벨을 갖는 파장 스위프 소스가 바람직하다. 다수의 중방향 모드들을 갖는 레이저 광은 동일 선폭(linewidth)을 갖는 열 광과 유사한 RIN 레벨을 가질 수 있다. 이 경우, 이중 평형 검출 등의 충분한 SNR를 갖도록 RIN을 억제하는 수단이 필요하다.

스위프 소스를 사용함으로써 감소된 산탄 잡음 및 현재의 시스템보다 훨씬 낮은 소스 전력 또는 훨씬 높은 획득률을 갖는 다른 형태의 잡음을 갖는 시스템을 구현할 수 있다. 검출 감도가 증가됨으로써 실시간 영상화가 가능하다. 이러한 영상화 속도는 위장, 눈 및 동맥 영상화 환경 등에서 모션 아티팩트들(artifact)의 문제를 지원할 수 있다. 신호 대 잡음비를 유지하거나 개선하면서 프레임 율을 증가시킴으로써 아티팩트들이 최소화될 수 있다. 또한, 본 발명에 의해 OFDI 기술을 이용하여 조직들의 큰 부위들을 검사할 수 있어서 이 방법을 이용하여 임상에서 적용가능한 검사 프로토콜을 제공할 수 있다.

OFDI의 안과적 적용에 있어서, 효율적인 검출에 의해 바람직하게 획득 속도에서의 현저한 증가를 이룰 수 있다. 안과적 적용에 있어서 있을 수 있는 제한은 ANSI 표준(대략 830nm에서 700 마이크로와트)에 따라 눈을 입력할 수 있는 전력이다. 안과적 적용에 있어서, 현재의 데이터 획득 속도는 대략 초당 100-500 A-라인들이다. 전력의 효율적인 검출에 따라 초당 거의 100,000 A-라인들의 A-라인 획득률 또는 영상당 대략 3000 A-라인들에서 영상화하는 비디오 율(video rate)을 얻을 수 있다.

산탄 잡음이 백색 잡음 스펙트럼을 가지므로 SNR에서 이득이 얻어진다. 주파수  $\omega$ (또는 파장  $\lambda$ )에서 검출기에서의 신호 강도는 주파수  $\omega$ 에서의 신호에만 기여하지만, 산탄 잡음은 모든 주파수에서 생성된다. 검출기당 광학 대역 폭을 좁힘으로써 각 주파수에서의 산탄 잡음 기여가 저감될 수 있는 동시에 신호 성분이 동일하게 유지된다.

도 5는 주파수 영역 간섭계("OFDI")를 이용하여 광 영상화를 수행하는 시스템(99)의 예시적 실시예를 도시하는데, 간섭계는 중심 파장이 소스의 이득 매체의 대역폭에 걸쳐서 연속적으로 그리고 시간 반복적으로 조정되는 협대역 스펙트럼을 방사하는 주파수 스위프 소스(100)를 구비한다. 순시 방사 스펙트럼은 광원의 복수의 주파수 모드들로 구성된다. 주파수 스위프 소스(100)는 다양하게 다른 형태로 제공되는데, 그 중 일부를 이하에 기술한다. 예를 들어 소스(100)는 각종의 이득 매체, 가변 파장 필터들, 캐비티 구성들로부터 제공될 수 있다. 고상 레이저, 활성 이온 도핑형 도파관 레이저, 및 파이버 레이저 등의 신속 조정 파장 스위프 레이저 소스를 제공하기 위한 장치들과 방법들이 본 기술 분야에서 알려져 있다. 모드 고정 영역에서의 파장 스위프 레이저는 또한 중방향 모드 비트 주파수들의 고조파들 사이의 주파수 영역에서 낮은 상대 강도 노이즈(RIN)의 잠재적 장점을 가지고서 사용될 수 있다. 광 포화 흡수기가 레이저 캐비티 내측에 또는 저 RIN 레벨에 대한 소스의 출력 포트 후방에 채용될 수 있다.

스위프 소스(100)로부터 제공된 광은 광 섬유 커플러(102) 쪽으로 지향되며, 여기에서 커플러에 공급된 광이 기준 암(103)과 샘플 암(104)으로 분할된다. 이 예시적 실시예에 있어서, 커플러(102)는 샘플 암쪽으로 지향되는 전력의 90%를 갖는 90:10 전력 분할비를 갖는다. 그러나, 당업자라면 커플러(102)의 다른 결합 비율이 가능함을 이해할 수 있을 것이다. 임의의 특정 분야에 사용하기 위한 특정 결합 비율은 본 발명에 따른 상기 예의 시스템의 적합한 동작을 허용하는 전력 량이 기준 암 및 샘플 암 모두에 제공되도록 선택될 수 있다.

샘플에 제공된 전력은 서큘레이터(111)를 통과하여 횡단 스캐닝 영상화 프로브를 통해 영상화되는 샘플(136)을 조명한다. 기준 암은 바람직하게 고정 광 지연을 제공한다. 기준 미러(124)로부터 그리고 샘플(136) 내부로부터 반사된 광들은 서큘레이터(110,111)를 통해 광섬유 빔 스플리터(또는 퓨즈형 커플러)(150) 쪽으로 지향되며, 서로 간섭하여 간섭 신호들을 생성한다.

결합 커플러(150)는 소스의 파장 조정 범위에 걸쳐 최소 편광 종속성 및 파장 종속성을 갖는 동일한 분할비를 갖는 것이 바람직하다. 동일 분할로부터의 편차로 인해 이중 평형 검출의 공통 모드 거절비("CNRR")의 감소가 일어난다. 일 실시예에 있어서, 결합 커플러(150)는 바람직하게 벌크(bulk) 광대역 빔 스플리터로서 제공된다. 당업자라면 다른 형태의 커플러들(파장 평형 섬유 퓨즈형 커플러를 포함하지만, 이것으로 제한되지 않음)이 또한 사용될 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

간섭 신호들은 이중 평형 수신기(151)에 의해 수신된다. 수신기(151)의 출력은 연산 장치(예를 들어, 데이터 획득 보드 및 컴퓨터(160))로 제공되어 출력이 상기 컴퓨터 장치에 의해 디지털화되고 처리되어 영상을 생성한다. 데이터 획득, 횡단 스캐닝 및 파장 조정은 동기적으로 제어된다.

도 6은 예를 들어 주파수 스위프 소스(도 5를 참조하여 진술한 주파수 스위프 소스(100) 등)가 렌즈(172) 및 광 통로(174)를 통해 광원/제어기(176)(이후에서는 "광 제어기(176)"라 함)에 결합된 광 섬유(170)로부터 제공될 때 사용될 수 있는 예시적 광원(100')을 도시한다. 광 제어기(176)는 하나 이상의 응용들(178)에 교대로 결합된다. 응용들(178)은 예를 들어 광 영상화 처리 및/또는 영상화 시스템, 레이저 가공 처리 및 시스템, 사진 석판술 및 사진 석판 시스템, 레이저 지형 시스템, 전자통신 처리 및 시스템에 해당할 수 있다. 따라서, 필터(170) 및 광 제어기(176)로부터 제공되는 예시적 광원(100')은 넓은 다양한 다른 응용 분야에 사용될 수 있는데, 그 중 임의의 일반적인 예들을 여기에서 설명한다.

이하 상세히 기술하는 바와 같이, 필터(170)에 의해 광원(100')은 광 제어기(176)의 대역폭에 걸쳐 시간적으로 연속적으로 그리고 반복적으로 조정될 수 있는 중심 주파수 스펙트럼을 방사하는 주파수 스위프 소스로서 동작한다. 따라서, 광원(100')은 광원/제어기(176)의 복수의 주파수 모드들로 이루어진 순시 방사 스펙트럼을 갖는다. 이 실시예에 있어서, 광 파장 필터(170)는 입력 및 출력 포트들이 동일한 반사형 필터로서 구성된다. 따라서 광 통로(174)는 예를 들어 입/출력 광 섬유로서 제공되고, 렌즈(172)는 시준(視準) 렌즈에 대응한다. 도 6의 필터(170)는 광 제어기(176)를 통해 응용들(178) 중 하나 또는 모두에 결합되는 것으로 도시되지만, 하나 이상의 응용들(178)에 필터(170)를 직접적으로 결합할 수 있다. 또한, 광 제어기와는 다른 장치를 통해 하나 이상의 응용들(178)에 필터(170)를 직접적으로 결합할 수 있다.

본 발명에 따른 실시예에 있어서, 광 제어기(176)는 넓은 주파수(f) 스펙트럼을 갖는 광 빔(일 실시예에서 광의 시준 빔)을 전송하는데 특히 적합한 다수의 시스템들을 포함한다. 특히 광 빔은 가시광 스펙트럼(예를 들어, 레드, 블루, 그린)내의 복수의 파장들을 포함할 수 있다. 광 제어기에 의해 제공되는 광 빔은 가시 스펙트럼(예를 들어, 적외선) 외측에 형성되는 복수의 파장들을 포함할 수 있다.

도 7을 참조하여 이하에 보다 상세히 기술하는 바와 같이, 본 발명의 예시적 실시예에 있어서, 광 제어기(176)는 단방향 광 전송 링을 포함할 수 있다. 도 9를 참조하여 상세히 기술하는 다른 예시적 실시예에 있어서, 광 제어기(176)는 선형 공진기 시스템을 포함할 수 있다. 필터(170)는 광 제어기(176)로부터 광 빔을 수신하고, 그 광 빔을 공지의 광 경로를 따라 각각 지향되는 복수의 다른 광 파장들로 분리하는 파장 분산 소자(180)를 구비한다. 파장 분산 소자(180)는 광 제어기(176)로부터 광 빔을 수신하는 한편 그 광 빔을 광 경로를 따라 각각 지향되는 복수의 다른 광 파장들로 분리하는 하나 이상의 소자들을 구비할 수 있다. 파장 분산 소자(180)는 또한 광 축(182)에 대해 복수의 각도 방향들 또는 변위들로 상기 복수의 광 파장들을 지향시키도록 동작할 수 있다. 본 발명의 예시적 실시예에 있어서, 파장 분산 소자(180)는 또한 전송 회절 격자(예를 들어, 디킨슨 형(Dickson type) 홀로그래픽 회절 격자형), 프리즘, 회절 격자, 음향 광학 회절 셀 또는 이들 소자의 하나 이상의 조합들로 될 수 있다.

파장 분산 소자(180)는 광 축(182)에 대해 임의의 각도에 있는 경로들을 따라 각 파장에서 광을 렌즈 시스템(186) 쪽으로 지향시킨다. 각각의 각도는 파장 분산 소자(180)에 의해 결정된다. 렌즈 시스템(186)은 파장 분산 소자(180)로부터의 분리된 광 파장들을 수신해서 빔 편향 장치(188)에 위치한 소정의 위치로 상기 광 파장들을 지향 또는 조종 및/또는 포커싱하는 하나 이상의 광 소자들을 구비할 수 있다. 빔 편향 장치(188)는 하나 이상의 분산 광 파장들을 수신해서 렌즈 시스템(186)을 통해 광 축(182)을 따라 역으로 이 분산 광 파장들을 파장 분산 소자(180) 및 광 제어기(176)로 재지향시키도록 제어될 수 있다. 이후 광 제어기(176)는 수신된 분산 광 파장들을 임의의 하나 이상의 응용들(178)로 선택적으로 지향시킨다. 빔 편향 장치(188)는 여러 가지 방식들로 형성 및/또는 배치될 수 있다. 예를 들어, 빔 편향 장치(188)는 다면 미러, 회전 축상에 배치된 평면형 미러, 검류계 상에 위치한 미러 또는 음향 광학 변조기를 포함하는 소자들로서 제공될 수 있지만, 이들로 제한되지 않는다.

도 6에 도시한 실시예에 있어서, 분산 소자(186)는 회절 격자(184), 렌즈 시스템(186)(망원경(193)을 형성하기 위한 제1 및 제2 렌즈들(190,192) 포함) 및 다면 미러 스캐너(194)로서 도시된 빔 편향 장치(188)를 구비한다. 망원경(193)은 4-f 구성을 갖는 제1 및 제2 렌즈들(190,192)로 제공된다. 망원경(193)의 제1 및 제2 렌즈들(190,192)은 각각 실질적으로 광축(182) 상에 센터링된다. 제1 렌즈(190)는 파장 분산 소자(180)(예를 들어, 회절 격자(184))로부터 제1 거리에 위치하는데, 이는 제1 렌즈(190)의 초점 거리(F1)와 대략 동일하다. 제2 렌즈(192)는 제1 렌즈(190)로부터 제2 거리에 위치하는데, 이는 제1 렌즈(190)의 초점 거리(F1)와 제2 렌즈(192)의 초점 거리(F2)의 합과 대략 동일하다. 이 예시적 장치에 있어서, 제1 렌즈(190)는 파장 분산 소자(180)로부터의 시준된 분산 광 파장들을 수신할 수 있으며, 영상 평면(도 6의 IP 참조) 상에 투영된 동일한 하나 이상의 수렴 빔들을 제공하도록 시준된 하나 이상의 분산 광 파장들 상에서 효과적으로 푸리에 변환을 수행한다. 영상 평면(IP)은 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이에 제1 렌즈로부터 소정의 거리에 위치하는데, 이 소정의 거리는 제1 렌즈의 초점 거리(F1)에 의해 형성된다. 영상 평면(IP)을 통해 전파한 후, 수렴 빔(들)은 동일한 하나 이상의 빔들을 형성하며, 이들은 제2 렌즈로 수신된다. 제2 렌즈는 하나 이상의 분산 빔들을 수신해서 광축(182)에 대해 소정의 각도 변위를 갖는 동수의 시준 빔들을 제공하여 시준된 빔들을 빔 편향 장치(188)의 사전 형성 부분들로 지향 또는 조종하도록 동작한다.

망원경(193)은 전술한 바와 같은 다수의 특징들을 제공하며 또한 회절 격자로부터의 발산하는 각도 분산을 제2 렌즈(192) 이후의 수렴하는 각도 분산으로 변환하도록 동작하는데, 이는 필터(70)의 적절한 동작을 위해 필요하다. 또한, 망원경(193)은 유용한 자유도를 제공하여 조정 범위를 제어하고 빔 클리핑을 방지하도록 다면 미러(194)에서 빔 사이즈를 축소한다.

도 6에 도시한 바와 같이, 다면 미러(194)는 광축에 대해 다면중 전방 미러 면의 각도의 함수로서 바람직하게는 협대역 내의 스펙트럼 성분만을 재반사한다. 반사된 협대역 광은 회절되어 광 섬유(174)에 의해 수신된다.

광축에 대한 입사 빔의 방위 및 다면 미러(194)의 회전 방향(198)에 의해 파장 조정 즉, 파장 업(up)(정) 스캔 또는 다운(down)(부) 스캔의 방향이 결정된다. 도 6의 장치는 정 파장 스위프를 생성한다. 도 6에서는 미러(194)가 12면을 갖는 것으로 도시하였지만 12면보다 적거나 많은 면이 또한 사용될 수 있음을 이해해야 한다. 임의의 응용에 있어서 사용을 위한 특정 수의 면들은 특정 응용을 위한 소정의 스캐닝 율 및 스캐닝 범위에 따른다. 또한 미러의 크기는 제조능력 및 미러(194)의 중량을 포함하는 인수들(이들로 제한되지 않음)을 고려하여 특정 응용의 필요에 따라 선택된다. 렌즈들(190,192)은 다른 초점 거리를 가질 수 있음을 또한 이해해야 한다. 렌즈들(190,192)은 미러(194)의 대략 중심 점(200)에서 초점을 제공하도록 선택되어야 한다.

섬유 시준기(172)로부터 회절 격자에 입사하는 넓은 광 스펙트럼을 갖는 가우스 빔(Gaussian beam)을 고려하자. 공지의 회절 방정식은  $\lambda = p \cdot (\sin\alpha + \sin\beta)$ 로 표현되고, 여기서  $\lambda$ 는 광 파장,  $p$ 는 격자 피치, 또한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각기 격자의 공칭 축(202)에 대한 빔의 입사각과 회절각이다. 필터의 조정 각의 중심 파장은  $\lambda_0 = p \cdot (\sin\alpha + \sin\beta_0)$ 로 표현되는데, 여기서  $\lambda_0$ 는 망원경의 광축(38)과 격자 공칭 축 사이의 각도이다. 필터의 FWAM 대역폭은  $(\delta\lambda)_{FWAM}/\lambda_0 = A \cdot (p/m) \cos \alpha / W$ 로 표현되

는데, 여기서 이중 패스의 경우,  $A = \sqrt{4 \ln 2 / \pi}$ ,  $m$ 은 회절 순서 그리고  $W$ 는 섬유 시준기에서의 가우스 빔의 폭  $I/e^2$ 이

$$z = \frac{\lambda_0^2}{4(\delta\lambda)_{FWHM}}$$

다. 복소 스펙트럼 밀도의 실수 부가 구해진 경우, 레인지 깊이  $z$ 는

필터의 조정 범위는 기본적으로 렌즈 1(20)의 한정 수치 개구로 제한된다. 빔 클리핑이 없는 렌즈 1의 수용 각은  $\Delta\beta = (D_1 - W \cos\beta_0 / \cos\alpha) / F_1$ 으로 주어지는데, 여기서  $D_1$  및  $F_1$ 은 렌즈 1의 직경과 초점거리이다. 조정 범위는  $\Delta\lambda = p \cos\beta_0 \cdot \Delta\beta$ 를 통한 필터 조정 범위와 관련된다. 다면 미러의 다면 특징으로부터 기원하는 필터의 중요한 설계 파라미터는 이하에 기술되는 자유 스펙트럼 범위이다. 렌즈 1(20) 및 렌즈 2(22)를 통해 전파한 후의 스펙트럼 성분은 광축(38)에 대해 각도  $\beta'$ 에서 빔 전파 축을 갖는데,  $\beta' = -(\beta - \beta_0) \cdot (F_1 / F_2)$ 이고, 여기서  $F_1$ 과  $F_2$ 는 렌즈 1과 렌즈 2의 각 초점거리이다. 다면체는  $\theta = 2\pi / N$

$\approx L/R$ 로 주어지는 면 대 면 극선 각도를 가지며, 여기서  $L$ 은 면 폭,  $R$ 은 다면체의 반경 그리고,  $N$ 은 면들의 수이다. 입사 스펙트럼의  $\beta'$ 의 각도가 면 각도 이상인 경우, 즉,  $\Delta\beta' = \Delta\beta \cdot (F_1 / F_2) > 0$ 인 경우, 다면 미러는 소정 시간에서 하나의 스펙트럼 성분 이상을 재반사한다. 재반사된 다수의 스펙트럼 성분들의 간격 또는 자유 스펙트럼 범위는  $(\Delta\lambda)_{FSR} = p \cos\beta_0 \cdot (F_2 / F_1) \cdot \theta$ 로 표현될 수 있다.

내부공동(intracavity) 스캐닝 필터로서의 응용에 있어서, 이득 매체가 동질의 확장을 갖는 경우, 레이저의 조정 각도는 자유 스펙트럼 범위를 초과하지 않는데, 이는 레이저가 가장 큰 이득의 파장을 선택하기 때문이다. 상기 필터에 의한 레이저 조정의 듀티 사이클은 원칙적으로 2개의 필요 조건들이 다음과 같이 만족되는 경우 빔 클리핑으로 인한 초과 손실없이 원칙적으로 100%가 될 수 있다.

$$W < \frac{\cos\alpha F_1}{\cos\beta_0 F_2} L \text{ and } W < \frac{\cos\alpha}{\cos\beta_0} (F_2 - S) \cdot \theta \quad (17)$$

제1식은 렌즈(192) 이후의 빔폭이 면 폭보다 작아져야 하는 조건으로부터 유도된다. 제2식은 각 조정 범위를 갖는 가장 낮은 그리고 가장 높은 파장(204,206)에서의 2 개의 빔들이 렌즈(192)와 다면체의 전방 미러 사이의 거리를 나타내는 식 (1)에서 다면 미러(S)에서 서로 겹치지 않아야 하는 조건으로부터 유도된다.

일 실험에 있어서, 다음의 파라미터를 갖는 광 성분들이 선택된다.  $W=1.9\text{mm}$ ,  $p=1/1200\text{mm}$ ,  $\alpha=1.2\text{rad}$ ,  $\beta_0=0.71\text{rad}$ ,  $m=1$ ,  $D_1=D_2=25\text{mm}$ ,  $F_1=100\text{mm}$ ,  $F_2=45\text{mm}$ ,  $N=24$ ,  $R=25\text{mm}$ ,  $L=6.54$ ,  $S=5\text{mm}$ ,  $\Theta=0.26\text{rad}$ ,  $\lambda_0=1320\text{nm}$ . 위의 파라미터들로부터 필터의 이론적 FWHM 대역폭, 조정 범위 및 자유 스펙트럼 범위가  $(\delta\lambda)_{\text{FWHM}}=0.09\text{nm}$ ,  $\Delta\lambda=126\text{nm}$ , 및  $(\Delta\lambda)_{\text{FSR}}=74\text{nm}$ 로 계산될 수 있다. (1)에서 양 조건은 마진을 갖고 만족된다. 필터의 특성은 반도체 광 증폭기(SOA) 및 광 스펙트럼 분석기로부터의 광대역 증폭기 자연 방사 광을 이용하여 측정된다. 광 스펙트럼 분석기는 다면 미러가 그 최대 속도 15.7kHz에서 회전하는 동안 피크 홀드 모드에서 정상 산출(반사) 스펙트럼을 기록했다. 측정된 조정 범위는 126nm의 이론적인 값보다 사실상 작은 90nm이다. 이러한 불일치는 격자로부터의 빔의 상대적으로 큰 각도 발산과 관련된 망원경의 초기 필드 곡률의 수차 때문에 생긴다. 최적의 렌즈들을 이용하여 수차는 개선될 것으로 예상된다. 이론적인 계산과 일치하도록 자유 스펙트럼 범위는 73.5nm이다. FWHM 대역폭은 0.12nm로 측정되었다. 0.11nm의 이론적 한계와의 불일치는 광학 소자들의 수차 및 결함을 고려하면 당연하다.

도 7은 예를 들어 도 6을 참조하여 기술한 필터(170)와 유사하게 될 수 있는 필터(210)를 포함하는 본 발명의 예시적 실시예에 따른 확장 캐비티 반도체 레이저(208)를 도시한다. 필터(210)는 광 지향 소자(212) 및 광 통로(214)를 통해 파라데이 서큘레이터(216)에 결합된다. 이 실시예에 있어서, 필터(210)는 회절 격자(232) 및 다면 미러(236)를 포함한다. 따라서 필터(210)는 다면 기반 필터에 대응할 수 있다. 모터(234)는 미러를 구동한다.

이 예시적 실시예의 파라데이 서큘레이터(216)는 일 실시예에 있어서 반도체 광 증폭기(예를 들어, SOA, 필립스 CQF 882/e)로 될 수 있는 이득 매체(224)에 편광 제어기들(220,222)를 통해 결합되는데, 상기 광 증폭기는 그에 결합되는 SOA(224)에 주입 전류를 공급하는 전류 소스(226)를 구비한다. 내부공동 소자들은 예를 들어 단일 모드 광 섬유들로 접속되어 있다. 2개의 편광 제어기(220,222)는 내부공동 광의 편광 상태를 정렬하여 회절 격자(232)의 최대 효율과 SOA(224)의 최대 이득을 갖는 축에 정렬할 수 있다.

레이저 출력(228)은 광 섬유 퓨즈형 커플러(230)의 90% 포트를 통해 얻어질 수 있다. 잠재적 응용에 유용한 동기 신호를 생성하기 위해 레이저 출력의 5%가 0.12nm의 대역폭을 갖는 가변 파장 필터(237)를 통해 결합되며, 또한 광 검출기(238)를 향해서 지향된다. 예시적 실시예에 있어서, 필터의 중심 파장은 1290nm로 고정된다. 검출기 신호는 레이저의 출력 파장이 고정 파장 필터의 협대역 통과 대역을 통해 스위프되는 경우 쇼트 펄스를 발생시킨다. 동기 펄스의 타이밍은 필터의 중심 파장을 변경시킴으로써 제어된다.

도 8A는 다면 미러(즉, 도 7의 미러(236))가 15.7kHz에서 회전하는 경우 피크 홀드 모드에서 광 스펙트럼 분석기로 측정된 바와 같이 도 7과 관련하여 기술된 형태의 레이저의 출력 스펙트럼의 그래프(240)를 도시한다. 연부 대 연부의 스위프 범위는 필터의 장 스펙트럼 범위와 같은 73nm 폭에 걸쳐 1282nm에서 1255nm이다. 측정 스펙트럼의 스퀘어 프로파일이나 아닌 가우스 형 프로파일은 필터의 편광 감도와 캐비티내의 복굴절에 의한 편광 종속 캐비티 손실에 기인한다. 최대 스위프 범위 및 출력 전력을 얻도록 편광 제어기들을 조정하는 것이 바람직하다.

도 8B는 시간 영역에서의 레이저 출력의 곡선(242)을 도시한다. 상부 궤적(244)은 고정 파장 필터에서 얻어진 동기 신호에 대응한다. 면에서 면으로의 전력 변화의 진폭은 3.5%이하이다. 피크 및 평균 출력 전력은 각기 9mW와 6mW이다. 광 스펙트럼 분석기는 이 스펙트럼 분석기의 스위프 속도보다 훨씬 빠른 레이저 조정 속도로 인해 시간 평균 스펙트럼을 기록했으므로 곡선(240)의 y축 스케일은 시간 영역 측정으로부터 조정되어야 했음이 언급되어야 한다.

내부공동 레이저 광의 광 스펙트럼내의 주파수 하향 편이는 대역내 4개 파 믹싱 현상의 결과로 광이 SOA 이득 매체(예를 들어, 도 7의 SOA(224))를 통과할 때 발생할 수 있다. 주파 하향 편이에 있어서, 정 파장 스캔에 의해 레이저 스펙트럼의 조정이 용이하게 되어 높은 출력 전력을 생성할 수 있다. 레이저 출력의 피크 전력은 조정 속도의 함수로서 측정될 수 있다. 부 조정 속도는 광축(예를 들어 도 6의 축(182))에 대해 시준기의 위치 및 회절 격자의 방위를 반대로 바꿈으로써 얻어질 수 있다. 두 조정 방향에서 필터의 물리적 파라미터들을 대략 동일하게 하는 것이 바람직하다. 따라서 자기(self) 주파수 편이와 정 조정의 혼합 동작으로 높은 출력이 얻어지고 레이저가 높은 조정 속도로 동작할 수 있다. 그러므로, 정 파장 스캔은 바람직한 동작일 수 있다. 출력 전력은 조정 속도의 증가로 감소할 수 있으므로 출력 전력의 감도를 조정 속도로 감소시키는 데에는 짧은 캐비티 길이가 바람직하다. 이 경우 자유 공간 레이저 캐비티가 바람직하다.

도 9A는 시준 렌즈(256)를 통해 다면 스캐닝 필터(255)에 결합된 기관 칩(254)에서 제조된 반도체 도파관(252)을 포함하는 본 발명의 일 실시예에 따른 자유 공간 확장형 반도체 파장 가변 레이저(250)의 일 실시예를 도시한다. 전면(258)은 비반사 코팅되고, 출력 면(260)은 광 반사율을 갖도록 클리브(cleave)되거나 바람직하게는 코팅된다. 레이저의 출력(262)은 출력 결합 렌즈(264)를 통해 얻어진다. 시준 렌즈들(256,264)은 바람직하게 비 구면 렌즈들로서 제공된다.

필터(255)는 렌즈(256)로부터 그에 지향된 빔을 수신하기 위한 파장 분산 소자(180')를 구비한다. 파장 분산 소자(180')는 도 6과 관련하여 기술한 파장 분산 소자(180)와 유사할 수 있다. 렌즈 시스템(186')은 파장 분산 소자(180')와 빔 편향 장치(188') 사이에 배치된다. 파장 분산 소자(180') 및 빔 편향 장치(188')는 도 6을 참조하여 기술한 파장 분산 소자(180)와 및 빔 편향 장치(188)와 유사하다. 렌즈 시스템(186')은 필드 곡률 및 코마(coma)에서 특히 낮은 수차를 갖는 색 지움 렌즈로서 바람직하게 제공되는 한 쌍의 렌즈들(187a,187b)을 포함한다.

동기 출력은 다면 스캐너(272)로부터 재반사되는 광의 0차 회절 통로상에 위치한 렌즈(266), 핀홀(268) 및 광 검출기(270)를 이용하여 얻어질 수 있다. 검출기는 특정 파장의 광 빔의 초점이 핀홀(268)을 통해 스위프할 때 쇼트 펄스를 생성한다. 제한되지는 않지만 다른 타입의 이득 매체들은 희토 이온 도핑 섬유, Ti:Al2O3 및 Cr4: 포스테라이트(forsterite)를 포함할 수 있다.

도 9B는 회절 격자(284)에 광학적으로 결합된 입력 시준 렌즈(282)에 결합되는 광 섬유(281), 초점 렌즈(286) 및 회전 디스크(288)를 포함하는 본 발명에 따른 파장 가변 필터(280)의 다른 예시적 실시예를 도시한다. 회절 격자(284)는 프리즘 등의 다른 각도 분산 소자로 대체될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 회절 격자(284)는 초점 렌즈(286)가 필요치 않도록 선택된 초점거리를 갖는 오목 만곡을 가질 수 있다.

바람직하게는, 두 개 이상의 반사기(290)가 회전 디스크(288)의 표면(288a)상에 배치될 수 있다. 바람직하게 반사기(290)는 주기적 그리고 반복적으로 패턴화된 좁은 스트라이프들을 포함한다. 반사기들의 재료는 금이 바람직하다. 디스크(288)는 경량 플라스틱 또는 실리콘 기관으로 이루어질 수 있다. 디스크의 상면 상에 배치된 반사기들 대신에 디스크는 일련의 관통 홀들을 구비할 수 있으며, 관통홀 다음에 단일 반사기가 디스크의 후면에 부착된다. 광 섬유(281)로부터 입사하는 다른 파장들을 갖는 빔들이 디스크의 표면에 회절 격자에 의해 회절되고, 렌즈(286)(렌즈(286)를 포함하는 시스템에 있어서)에 의해 포커싱된 후, 한 라인으로 조사된다. 바람직하게 회전 디스크의 반사기들에 닿는 빔만이 재반사되어 광 섬유(281)에 의해 수신된다. 미러(292)는 디스크상에 빔의 접근을 용이하게 하는데 사용될 수 있다.

렌즈(286)에서 디스크(288)의 반사기들까지의 거리는 렌즈의 초점 거리(F)와 같다. 회절 방정식으로부터 필터의 조정 범위는  $\Delta\lambda = p \cos \beta_0 (D/F)$ 로 주어지는데, 여기서 D는 스트라이프들 사이의 간격을 나타낸다. 스트라이프의 폭 w는 디스크의

$$w_s = W \frac{\cos \beta_0}{\cos \alpha} \frac{F/z}{\sqrt{1+(f/z)^2}}$$

표면에서 빔 스폿 크기  $w_s$ 와 사실상 같게 만들어지는 것이 바람직하다. 즉,

여기서  $z = \pi w_s^2 / \lambda$ 이다. 따라서 FWHM 필터 대역폭은  $(\delta\lambda)_{FWHM} / \lambda_0 = A \cdot (p/m) \cos \alpha / W$ 로 주어지고, 여기서

$A = \sqrt{4 \ln 2 / \pi}$ 이다.  $w > w_s$ 의 경우, 필터 대역폭은 커지게 되고,  $w < w_s$ 의 경우, 필터의 효율(반사율)은 빔 클리핑에 의해 감소하게 된다. 렌즈(286)의 광축에 대한 입사 빔(294)의 방위 및 회전 방향(288)에 의해 바람직하게 파장 조정의 각을 정할 수 있다. 정 파장 스캐너가 바람직한데 이는 도 9B에 도시한 바와 같이 시계방향으로 디스크(288)를 회전시킴으로써 얻어진다.

a. 간섭계

도 10A는 주파수 영역 간섭법을 이용하여 광 영상화를 수행하는 본 발명에 따른 OFDI 시스템(300)의 일 실시예를 도시하는데, 이 시스템은 광원의 복수의 주파수 모드들로 구성된 순시 방사 스펙트럼을 갖는 광신호를 방사하는 주파수 스위프 소스(301)를 구비한다. 소스(301)는 예를 들어 도 4A, 5, 6, 7, 9 및 9B를 참조하여 기술한 소스들중 하나로서 제공될 수 있다. 소스(301)로부터의 광은 광 섬유 커플러(302) 쪽으로 지향될 수 있으며 이 커플러는 그에 공급된 광을 기준 암(303)과 샘플 암(304)으로 분할한다.

기준 암(303)은 바람직하게 편광 회로(306) 및 서큘레이터(308)를 구비한다. 따라서, 광은 커플러(302), 편광 회로(306) 및 서큘레이터(308)를 통해 소스(301)로부터 임의의 모션 아티팩트 회로(309)로 전파한다. 임의의 모션 아티팩트 회로(309)는 주파수 시프터(frequency shifter; 311) 쪽으로 광을 지향시키는 렌즈(310), 위상 추적기(312) 및 분산 보상기(314)로서 제공될 수 있다. 광은 상기 임의의 회로(309)를 통과하여 기준 미러(306)에 입사한다. 회로(309)는 모션 아티팩트들을 제거하거나 감소시키는 것을 이해해야 할 것이다. 또한, 회로(309)는 소자(310-314) 모두 및/또는 회로 소자(310-314)중 하나 이상을 포함할 수 있다.

샘플 암(304)은 서큘레이터(318)를 포함할 수 있다. 따라서, 소스(301)로부터 전송된 광 신호는 커플러(302) 및 서큘레이터(308)를 통해서 스캐닝 미러(322) 쪽으로 광을 지향시키는 렌즈(310)를 향해서 전파한다. 스캐닝 미러(322)는 검류계, 압전기 액추에이터 또는 다른 기능적으로 동등한 장치들을 포함하는 다양한 광학 소자들로서 제공될 수 있는데, 이들로 한정되지 않는다. 횡단 스캐너(324)는 스캐닝 미러(322)와 데이터 획득 보드 및 컴퓨터(326)에 결합되어 있다. 데이터 획득 보드 및 컴퓨터(326)는 또한 주파수 스위프 소스(301)에 결합된다.

도 10A에 도시한 OFDI 시스템(300)은 기준 암(303) 및/또는 샘플 암(304)으로부터의 신호들을 수신하도록 구성된 편광 다이버시티 평형 검출("PDBD") 회로(334)를 포함할 수 있다. 특히, 기준 암(303)은 서큘레이터(308) 및 편광 제어 회로(330)를 통해 PDBD 회로(334)의 기준 포트에 접속되어 있다. 유사하게, 샘플 암(304)은 서큘레이터(318) 및 편광 제어 회로(302)를 통해 PDBD 회로(334)를 통해 샘플 포트에 접속되어 있다.

b. 간섭계

샘플 암(304)은 조직 샘플(328)로부터 반사된 광을 수집해서, 간섭 프린지들을 생성하도록 상기 편광 다이버시티 평형 검출(PDBD) 회로(334)에서 기준 암(303)으로부터의 광과 결합한다.

예를 들어, OFDI 기법은 기준 암에서의 광 통로 거리가 시간적으로 스캔되는 것이 필요하다. 따라서, 본 발명의 임의의 실시예에 있어서, 고정 지연 기준 암으로서 기준 암을 제공하는 것이 바람직하다. 이러한 고정 지연 기준 암들은 당업자들에게 공지된 여러 가지 구성을 가질 수 있다.

기준 암(303)은 반사 및/또는 전송 타입으로 될 수 있으며, 미러(316)로부터 광을 다시 복귀시킬 수 있다. 복귀된 광은 서큘레이터(308)를 통해 편광 제어 회로(330) 쪽으로 지향된다. 유사하게 샘플(338)로부터 반사된 광은 서큘레이터(318)를 통해 편광 제어 회로(332) 쪽으로 지향된다. 기준 암은 또한 반사가 없는 전송형이 될 수 있다. 편광 제어 회로(330)는 기준 암의 편광 상태를 샘플 암의 편광 상태와 매칭시키는데 사용될 수 있다. 간섭계에서의 총 복굴절은 파장 종속 복굴절을 갖지않도록 최소화되어야 한다. 편광 제어기는 굴곡 유도 복굴절 또는 스퀴징(squeezing)에 기반한 광 섬유 편광 제어기를 포함하지만, 이에 제한되지 않는다.

바람직하게 색 분산은 실질적으로 기준 암과 샘플 암 사이에서 매칭되어야 한다. 강한 분산 미스매치의 결과 축 방향 해상도에서 손실이 발생한다. 임의의 잔여 분산은 푸리에 변환 이전에 검출기 데이터의 보간에 기반한 비선형 매핑 등의 적절한 신호 처리에 의해 보상될 수 있다. 이러한 매핑은 적어도 부분적으로 파장 스위프 소스의 광 설계를 조정함으로써 수행될 수 있다. 소스(301)가 다면 스캐너 및 망원경을 포함하는 예에 있어서, 다면 스캐너와 망원경 사이의 거리는 푸리에 변환 이전에 파장 공간을 파형 벡터 공간으로 변환함으로써 조정될 수 있다.

c. 샘플 압

임의의 OFDI 응용에 있어서, 샘플 압은 클리브(각이 진, 평평한, 또는 연마된) 광섬유 또는 자유 공간 빔을 포함하는 광 프로브에 의해 종료될 수 있다. 렌즈(336)(비 구면, 경사 지수, 구면, 회절성, 볼, 드럼 등; 그러나, 이에 한정되지 않음)는 샘플 상에서 또는 그 내부에서 빔을 포커싱하는데 사용될 수 있다. 빔 지향 소자들(미러, 프리즘, 회절 광 소자 등; 그러나, 이에 한정되지 않음)은 포커싱된 빔을 샘플 상의 소정의 위치에 지향시키도록 프로브내에 포함될 수 있다. 빔의 위치는 시간의 함수로서 샘플 상에서 변경될 수 있어서 2차원 영상을 재구성할 수 있다. 샘플 위에서 포커싱된 빔 위치 변경은 스캐닝 미러(322)에 의해 행해진다. 스캐닝 미러(322)는 예를 들어 검류계, 압전기 액츄에이터, 전기 광학 액츄에이터 등을 포함하는 다수의 장치들로 구성되는데, 위의 것으로 한정되지 않는다.

샘플 압은 내부 이동 소자를 구비하는 광 섬유 프로브로 될 수 있어서 모션이 프로브의 근접 단부에서 개시되고 모션이 모션 변환 장치(와이어, 도파관, 속도계 케이블, 스프링, 광 섬유 등; 이에 제한되지 않음)에 의해 말단부로 전달된다. 광 섬유 프로브는 상기 프로브 말단부에서 광을 방사하는 광학적으로 투명한 고정 피복(sheath)내에 둘러싸여 진다. 따라서, 광 섬유를 이동시키는 방식으로 스캐닝이 이루어진다. 예를 들어, 광 섬유를 회전시키거나 또는 광 섬유를 선형적으로 이동시키는 방식이다. 도 10B는 내부 케이블(360)(회전하거나 프로브의 광축을 따라 선형적으로 이동할 수 있음), 외부 투명 또는 반투명 피복(362), 광 말단부(364) 및 방사 광(336)(카테터의 축에 대해 임의 각도에 있을 수 있음)을 포함하는 프로브(359)의 일 실시예를 도시한다.

d. 검출

PDBD 회로(334)는 이중 평형 검출을 제공하도록 배치된 복수의 검출기(370)를 포함할 수 있다. 이중 평형 검출은 다음과 같은 이유로 임의의 응용에 있어서 바람직할 수 있다. 첫째, 대부분의 광원은 상대적으로 낮은 주파수들에서 1/f 노이즈( $f$ =주파수)를 생성하고 평형검출은 1/f 노이즈를 제거한다. 둘째, 샘플 압 광 자체(즉, 자동 상관함)의 간섭향이 진 신호향의 상부에 있을 수 있게 되는데, 이는 바람직하게는 샘플 압과 기준 압 사이의 간섭이다. 자동 상관함은 차분 기법에 의해 제거될 수 있으며, 평형 검출은 측정 신호로부터 이러한 자동 상관함을 제거한다. 셋째, RIN이 감소될 수 있다.

검출기(370)는 바람직하게 포토다이오드들(실리콘, InGaAs, 확장 InGaAs 등을 포함하지만 이들로 제한되지 않음)을 포함할 수 있다. 평형 검출은 최대 및 최소 패턴에 대해 정확하게 이상(out of phase)이 되는 다이오드 신호들을 차감함으로써 수행된다. 2개의 검출기 신호들 사이의 차이는 PDBD 회로에 포함된 미분 회로에 의해 구해지며, 트랜스 임피던스 증폭기들("TIA")(360)에 의해 증폭된다. 이중 평형 수신기 다음에 검출 대역폭 이외의 노이즈를 제거하도록 저역 또는 대역통과 필터가 뒤따른다.

본 발명의 본 실시예에 있어서, 이중 평형 검출은 다음과 같이 수행된다. 편광 빔 스플리터(362)는 기준 압 및 샘플 압으로부터 신호들을 수신해서 2개의 출력 신호를 제공한다. 이 2개의 출력 신호는 다시 2개의 비 편광 빔 스플리터들(364a, 364b)에 의해 각각 분리된다. 각각의 빔 스플리터(364a, 364b)로부터의 출력들은 4개의 검출기들(370)로부터 제공되는 이중 평형 수신기에 의해 검출된다. 또한 이중 평형 수신기들의 2개의 출력은 편광 다이버시티를 얻도록 디지털 장치에서 디지털화되고 처리된다.

수신기 출력은 A/D 변환기들을 통해 공급되는 신호들을 획득하여 디지털화하는 한편 추가의 처리를 위해 컴퓨터에서 디지털화된 신호들을 저장하는 회로(326)에 제공된다. TIA의 대역폭은 바람직하게 샘플링 율의 절반과 일치한다. TIA의 대역폭은 바람직하게는 최대 수신기 출력 범위가 A/D 변환기의 전압 범위에 매칭되도록 선택된다.

e. 처리

2 이상의 검출기들이 사용되는 경우, 신호들이 선택적으로 차감될 수 있어서, 복합 스펙트럼 밀도가 얻어진다. 푸리에 변환을 이용하여 복합 교차 스펙트럼 밀도는 조직 내에서 깊이 프로파일로 변환될 수 있다. 깊이 프로파일 정보를 얻기 위해 복합 스펙트럼 밀도 처리하는 몇 가지 방법들이 당업자들에게 알려져 있는데, 기준 압에서  $\pi/2$  위상 편이를 갖는 적어도 2개의 신호들을 획득한 다음 2개의 신호들을 일부 선형 조합하거나 또는 스펙트럼 밀도를 제공하는 것이며, 이것으로 제한되지 않는다.

검출에 이어서 아날로그 프로세싱이 행해지는데 이에에는 트랜스 임피던스 증폭기, 저역(대역통과) 필터 및 신호의 디지털화가 포함된다. 이어서 신호는 푸리에 변환 동작에 의해 깊이의 함수로서 반사율로 변환된다. 디지털 프로세싱에는 주파수 영역 또는 시간 영역에서의 디지털화, 디지털 대역통과 필터링(FIR 또는 IIR 필터) 및 깊이의 함수로서 조직 반사율을 복구하기 위한 역 푸리에 변환이 포함된다.

푸리에 변환 이전에 검출된 비선형 파장 좌표들은 바람직하게 정규적으로 샘플화된 파형 벡터 공간으로 변환된다. 일반적으로 신호의 제로 패딩(zero padding), 푸리에 변환 및 리-샘플링으로써 역 푸리에 변환이 재매핑을 위해 이용될 수 있다. 데이터에 대한 1차, 2차 및 3차 스플라인 보간 등의 종래 기술에 알려진 다른 보간 방법들이 파장 공간을 정규적으로 샘플화된 k 공간으로 변환하는데 사용될 수 있다. 일 예에 있어서, 다면 스캐너와 망원경 사이의 거리는 푸리에 변환 이전에 파장 공간을 파형 벡터 공간으로 변환하도록 조정될 수 있다.

본 발명의 다른 실시예는 영상화의 성능 및 기능성을 더욱 더 향상시키기 위해서 이하에 기술되는 하나 이상의 기술을 이용할 수 있다. 이러한 기술들은 다수의 주파수 모드 조정 소스를 사용하는 OFDI 기술들로 한정되지는 않지만, 단일 주파수 조정 소스를 사용하는 OFDI 기술에 적용될 수 있다.

a. 편광 다이버시티

편광 패딩이 문제가 되는 응용에 있어서, 편광 다이버시티 방안이 사용될 수 있다. 편광 다이버시티를 위한 여러 구성들이 본 분야에서 알려져 있다.

도 10A에 도시된 시스템에 있어서, 편광 다이버시티 회로는 다음과 같이 동작한다. 편광 빔 스플리터(362)는 그들의 편광 상태에 따라 기준 압과 샘플 압 광 신호들을 분리한다. 편광 제어기(330)는 바람직하게는 기준 압 전력이 편광 제어기에 의해 동일한 크기로 분할되도록 조정된다. 샘플 압의 편광 상태는 프로브 또는 샘플 모션으로 인해 무작위로 변화하는 것으로 추정되므로 편광 스플리터에 의한 샘플 압 전력의 분리 비율은 시간적으로 변한다. 그러나, 편광 빔 스플리터(362)의 2개의 출력 포트들에서의 2개의 출력 신호들은 포토 수신기에 의해 검출, 예를 들어, 제곱 및 가산될 수 있다. 이 결과의 신호는 샘플 압 광의 편광 상태에 독립적이다.

b. 반송 주파수 헤테로다인 검출

광 주파수 시프터(311)는 반송 주파수 헤테로다인 검출을 위해 광 주파수를 편이시키도록 기준 압(303)내에 설치될 수 있다. 따라서, 신호 주파수 대역은 주파수 편이의 크기 만큼 편이된다. 이러한 식으로 비교적 큰 1/f 노이즈 (f=주파수) 및 RIN 주위의 DC가 회피될 수 있다. 주파수 시프터는 음향 광학 주파수 시프터로 될 수 있으나 이에 제한되지 않는다. 검출에 있어서, 반송 주파수를 복조시키는데 적절한 전자 기술이 사용되어야 한다.

주파수 시프터(311)를 이용하는 장점 중 하나는 유효 레인징 깊이가 배가된다는 점이다. 이는 도 10C에 도시한 전기 주파수 영역에서 나타날 수 있는데, 이 도면에서 그래프(380)는 소스의 순시 전력 스펙트럼에 의해 제공되는 프린지 가시 곡선을 나타낸다. 가시 곡선은 소스의 순시 스펙트럼이 가우스 스펙트럼일 때 가우스 프로파일을 갖는다. 곡선(390)은 샘플링 주파수의 절반으로서 정의되는 소정의 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency) 용으로 최적화된 전기 필터의 전송 효율 프로파일을 나타낸다. 도 10C의 부분 (a)는 간섭계에 주파수 편이기가 포함되지 않고 전기 필터가 저역 필터인 통상의 경우를 나타낸다. 정 및 부 주파수 대역은 구별이 불가능하므로, 정 및 부 주파수 대역과 각각 관련된 영상들은 중첩된다. 이러한 불명함으로 인해 위의 경우 주파수 범위(제로에서  $f_N$ ) 또는 (제로에서  $-f_N$ )의 절반만을 이용할 수 있다. 그러나, 주파수 편이기를 이용하면 도 10의 (b)에 도시한 바와 같은  $f_{FS}$  만큼의 가시 곡선의 편이가 일어난다. 대역통과 필터(또는 저역 필터)를 사용함으로써  $f_{EF}$ 에 모여진 주파수 대역의 양쪽은 불명함이 없는 영상들을 생성하여 도 10C의 부분 (a)에 비해 두 배 큰 레인징 깊이가 형성된다.

장방형 정부(square-top) 대역통과 필터 대신에 슬로프(slope) 필터를 사용할 수 있다. 도 10C 부분 (c)에 도시된 예에 있어서, 필터(390)의 전송 효율은 그 저주파 대역에서 지수적 상승(하강) 슬로프를 갖는다. 이 필터는 감쇠가 크고 그 결과 신호 세기가 깊이와 함께 감쇠하는 경우에 유용하다. 슬로프 필터는 깊이에서 보다 상대적으로 표면에서의 큰 신호를 효율적으로 감소시킴으로써 검출의 동적 범위를 개선할 수 있다.

c. 기준 압 지연(위상 추적 및 자동 레인징)

전술한 바와 같이, OFDI 기술은 시간적으로 스캔되는 기준 암내에 광 경로 길이를 필요로 하지 않는다. 고정 지연 기준 암은 당업자에게 알려진 여러 가지 구성으로 만들어질 수 있다. 기준 암은 반사형 또는 전송형일 수 있다.

임의의 응용에 있어서, 데이터 획득률을 증가시키거나 광 소스의 순시 선폴을 감소시키지 않고, 큰 레이징 깊이가 바람직한 경우 기준 암에 있어서 광 지연을 변화시키는 능력이 유용할 수 있다. 이러한 능력은 영상화 렌즈 및 샘플 전면으로부터의 거리가 크게 변화할 수 있는 임상 연구에 유용하다. 위의 변화는 프로빙 카테터의 모션 또는 비 제어 위치로부터 초래된다. 예를 들어 혈관 안쪽의 회전 카테터는 단일 A 스캔에 걸쳐서 수 밀리미터만큼의 거리 변화를 가질 수 있다.

기준 암 내의 메커니즘(303)에 의해 기준 암(303)의 군 지연(group delay)을 스캐닝할 수 있다. 이러한 군 지연은 광 섬유 스트레칭, 압전 변환기를 사용한 자유 공간 변환 스캐닝, 또는 회절 격자 기반 펄스 정형 광 지연 라인을 통해 당업자에게 공지된 임의의 다수의 기법으로 생성될 수 있다. 바람직하게는, 지연은 비 기계적 또는 부동(motionless) 장치에 의해 도입될 수 있다. 용어 "비 기계적"이 의미하는 것은 기계적으로 이동하는 부분들이 없다는 것이다. 기계적으로 이동하는 부분들이 없으므로 지연을 도입하는 기계적 장치들의 공지의 결함들을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다. 종래의 LCI 또는 OCT 시스템들과는 달리 본 발명의 일 실시예에 따른 기준 암(303)은 샘플의 전 레이징 깊이에 걸쳐 스캔할 필요가 없으며, 바람직하게 검출기들중 하나(1/N)의 레이징 깊이의 적어도 일 부분에서 스캔할 수 있다. 이러한 스캐닝 특징은 공지의 LCI 또는 OCT 시스템들에서 사용된 종래의 지연 스캐닝 구성과는 다르다. 기준 암은 선택적으로 위상 변조 메커니즘을 포함하며, 이는 반송 주파수 생성을 위한 음향 광학 변조기, 전기 광학 위상 변조기 등이 포함되지만 이들로 한정되지는 않는다.

위상 추적은 간섭계내의 위상 불안정성을 제거하도록 수행되는 것이 바람직하다. 위상 불안정성에 의해 각 간섭계들의 프린지들이 위치적으로 이동할 수 있다. 검출이 플린지들의 이동에 비해 상대적으로 느린 경우, 최종 평균화 결과는 간섭 신호의 처핑(chirping)으로 귀결된다. 10 내지 40kHz의 스캔 비율은 100 내지 25 $\mu$ s의 효과적인 집적 시간으로 귀결된다. 집적 시간보다 짧은 시간 프레임에서 일어나는 위상 불안정성은 보상되어야 한다. 위상 동기 회로가 통상적으로 전자 기술에서 이용되고 레이더와 초음파에서 자주 사용된다. 동적인 위상 추적은 파장의 일 부분에 걸쳐 기준 암내의 전기 광학 위상 변조기에 의해 10MHz에서 간섭계 경로 길이 차이를 변조함으로써 수행될 수 있다. 경로 길이 변조 주파수에서 간섭계의 출력에서 측정된 강도를 복조함으로써 위상 변조기가 프린지 최대 진폭으로 고정되도록 어느 방향으로 이동해야 할지를 나타내는 에러 신호가 생성될 수 있다. 에러 신호에 의해 결정된 위상 변조기에 오프셋을 부가함으로써 위상 추적기가 최대 프린지에 동적으로 고정된다.

위상 변조기는 일부 파장들에서 경로 길이 차이를 변조시킬 수 있다. 처리 장치는 위상 변조기가 그 제한 범위에 도달하여 다른 최대 프린지에서 고정을 유지하도록 동상으로 전파만큼 점프할지를 결정할 수 있다. 이러한 방식은 위상이 모듈로  $2\pi$ 에서만 제어되어야 함을 의미한다. 또한 처리 장치는 수 밀리미터에 걸쳐 위상 변조기/RSOD 조합의 경로 길이 범위를 연장시키도록 느린 성분(예를 들어, 신속 스캐닝 광 지연("RSOD") 라인)을 구동한다. 위상 동기화는 복조 회로내에서 수행되는 혼합 형태에 기반하여 최대, 최소 프린지 또는 제로 크로싱에서 수행될 수 있다.

본 발명의 다른 예시적 실시예는 오토레이징 기술 및 미국 특허 출원 공개 제2002/0198457호에 개시된 처리 기술을 포함하는 기술을 이용할 수 있는데, 상기 미국 출원의 개시 내용 전체가 참조로서 포함된다. 예시적 실시예에 있어서, 오토레이징 메커니즘은 (a) 제1 스캔 라인을 획득하고; 샘플의 표면 위치 "S"를 위치 설정하고; (c) 샘플의 최적의 스캔 범위 "R"를 위치설정하고; (d) 출력을 제공하도록 기준 암 지연 파형을 변경하고; (e) 상기 출력을 기준 암에 출력하고; (f) 영상이 완전한지 여부를 판정하고; 그리고/또는 (g) 영상이 완전하지 않은 경우 다음 스캔 라인으로 이동하거나 영상이 완전한 경우 상기 표면 S 데이터 및 메모리 저장 장치내에 저장된 파형 데이터를 이용하여 영상을 재매핑하는 프로세서 장치를 포함할 수 있다.

샘플로부터 복귀된 광신호가 낮은 진폭을 갖는 경우, 노이즈의 존재로 인해 위상 동기가 불안정할 수 있다. 본 발명의 다른 예시적 실시예에 있어서, 별개의 바람직하게는 단색 광원이 간섭계에 전송될 수 있다. 별개의 광원 파장은 OFDI 소스의 파장 조정 범위내에 있거나 OFDI 소스 스펙트럼과는 다른 파장에서 센터링될 수 있다. 별개의 소스는 바람직하게 고 전력이며, 또한 소스 암(파장 분할, 멀티플렉서, 회절 격자, 프리즘 필터 등을 이용하여)과 결합되어 기준 암 및 샘플 암들로 이동하며 또한 빔 재결합 소자로 다시 복귀할 수 있다. 그러면, 복귀된 별개의 소스 광은 빔 재결합 소자(즉, 빔 스플리터 출력)를 통해 되돌아가는 전송을 따르는 OFDI 광으로부터 분리될 수 있다. 분리 장치는 이색성 미러, 필터, 회절 격자, 프리즘, 파장 분할 멀티플렉서 등의 분산 소자에 의해 스펙트럼 분리를 수행한다. 별개의 소스는 하나 이상의 검출기들을 이용하여 OFDI 광으로부터 개별적으로 분리된다. 이러한 별개의 소스에 의해 제공된 높은 전력에 의해 높은 진폭 간섭 패턴을 갖는 검출이 가능하며 또한 위상 추적기에 개선된 입력을 제공할 수 있으므로, 보다 안정된 위상 추적을 할 수 있다.

도 11을 참조하면, 15.7kHz의 A-라인 스캔율에서 획득한 환자의 손가락끝의 생체내의 영상은 본 발명에 따른 시스템 및 프로세스의 상기 실시예를 이용하여 도시된다. 광 감도는 약 -100dB로 측정될 수 있다. SNR은 동일 A-라인 스캔율의 동등 TD OCT보다 우수하다. 조직의 표면으로부터 강한 미러 유사 반사가 있는 경우, 최적이지 아닌 검출로 인해 수직 라인 노이즈가 발생되지만, 실질적으로 최적의 검출 및/또는 적합한 신호 처리에 의해 제거되는 것이 바람직하다.

도 12는 확장된 위상 동기 범위가 제공되는 본 발명에 따른 위상 추적기의 다른 예시적 실시예를 도시한다. 이는 작은 범위에 걸쳐 경로 길이 차이를 변조하기 위한 고속 소자(602)(예를 들어, 전기 광학(EO) 위상 변조기(602)로 제공될 수 있음) 및 확장된 범위에 걸쳐 경로 길이를 변조하기 위한 저속 소자(예를 들어, 신속 스캐닝 광학 지연(RSOD) 라인(604)으로서 제공될 수 있음)(604)을 결합함으로써 달성된다. 검출기(606) 신호는 믹서(610)에 의해 위상 변조기 변조 주파수(608)와 혼합될 수 있으며, 저역 필터링 되어(필터 미도시) 에러 신호를 생성한다. 처리 장치(612)는 바람직하게 에러 신호를 생성하도록 에러 신호를 처리하며, 또한 변조 신호(608)에 이 오프셋 전압을 부가하여, 그 결과 위상 변조기 드라이버(614)를 위한 출력을 생성한다. 또한, 처리 장치(612)는 RSOD(604)에 신호를 제공하여 수 밀리미터의 거리에 걸쳐 위상의 확장 범위의 추적할 수 있다. 광원(616), 섬유 스플리터(618), 샘플 암(620) 및 기준 암(622)를 여기에서 도시한다.

프린지 패턴의 단일 발진내의 소정 순간의 검출기에서의 강도  $I(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$I(t)=\cos[\phi(t)]$  여기에서 위상  $\phi$ 는 프린지내의 위치를 제공한다.  $\phi = 0$ 의 경우, 신호는 최대 프린지에 있으며, 또한  $\phi=\pi$ 의 경우, 신호는 최소 프린지에 있다. 임의의 순간에 위상  $\phi(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$\phi(t)=\alpha+\beta\sin(\omega t)$  여기서  $\alpha$ 는 프린지 패턴의 단일 발진내의 위치를 나타내고,  $\beta*\sin(\omega t)$ 는 위상 변조에 의해 도입된 위상 변조이고,  $\beta$ 는 위상 변조의 진폭이며, 또한  $\omega$ 는 위상 변조 신호의 주파수이다. 광검출기에서의 강도  $I(t)$ 는 주파수  $\omega$ 와  $2\omega$ 에서 반송파와 혼합될 수 있어서, 혼합 신호  $MixerC(t)$ ,  $MixerS(t)$ ,  $Mixer2\omega C(t)$  및  $Mixer2\omega S(t)$ 로 나타나는데, 이는 다음과 같다.

$$MixerC(t)=\cos(\omega t)*\cos(\alpha+\beta\sin(\omega t));$$

$$MixerS(t)=\sin(\omega t)*\cos(\alpha+\beta\sin(\omega t));$$

$$Mixer2\omega C(t)=\cos(2\omega t)*\cos(\alpha+\beta\sin(\omega t));$$

$$Mixer2\omega S(t)=\sin(2\omega t)*\cos(\alpha+\beta\sin(\omega t)).$$

$Mixer C$ ,  $MixerS$ ,  $Mixer2\omega C$  및  $Mixer2\omega S$ 의 반송 주파수의 단일 발진에 걸치는 평균 시간은 다음과 같다.

$$\overline{MixerC(t)}=0, \overline{MixerS(t)}=\sin(\alpha)*J_1(\beta), \overline{Mixer2\omega C(t)}=\cos(\alpha)*J_2(\beta) \text{ 및 } \overline{Mixer2\omega S(t)}=0, \text{ 여기서 } J_1$$

( $\beta$ ) 및  $J_2(\beta)$ 는 제1 종류 베셀 함수(Bessel functions)이며, 또한 그 값은 위상 변조 진폭  $\beta$ 에 따른다. 따라서, 신호

$\overline{MixerS(t)}$ 와  $\overline{Mixer2\omega C(t)}$ 는, 각기  $\sin(\alpha)$ 와  $\cos(\alpha)$ 에 비례하는데, 여기서  $\alpha$ 는 프린지 패턴의 단일 발진내의 위치이다.

믹서 출력  $\overline{MixerS(t)}$  및  $\overline{Mixer2\omega C(t)}$ 는 위상 변조기를 에러 신호를 최소화시키며, 또한 간섭 출력을 최대 또는 최소 프린지, 또는 제로 크로싱으로 각각 고정하는 새로운 중심 위치로 조정하도록 오프셋 전압을 생성하기 위한 에러 신호로서 사용된다. 복소 스펙트럼 밀도는 2개의 연속 스캔들을 이용하여 구해지는데, 그 하나는 에러 신호  $\sin(\alpha)$ 가 최소화되는 스캔이며 또한 다른 하나는 에러 신호  $\cos(\alpha)$ 가 최소화되는 스캔으로서, 이들에 의해 2개의 간섭 패턴에서 90도의 위상 차이가 나타난다. 이러한 혼합 배치를 이용함으로써 복합 스펙트럼 밀도가 신속하게 그리고 기준 암 광의 위상을 변화시키기 위해 추가적인 기계 장치에 의존함이 없이 얻어질 수 있다.

도 13은 본 발명에 따른 평형 검출을 제공하기 위한 위상 추적기를 포함하는 OFDI 시스템(700)의 다른 실시예를 도시한다. 이 실시예에 있어서, 소스(702)는 광의 일 부분을 샘플 프로브(706)에 그리고 나머지 부분을 신속 스캐닝 광 지연("RSOD") 라인(708)에 전송하는 스플리터(704)를 통과하는 전자기 방식(예를 들어, 광)을 제공한다. 광은 RSOD(708)로부터 위상 변조기(PM;710)로 전송된다. 위상 변조기(PM;710)로부터의 광은 스플리터(712)를 통과한 다음 추가적인 스플리터들(714,716)을 통해 전송되고, 그 출력의 일 부분은 평형 검출 출력으로서 스펙트럼 검출 장치들(도시되지는 않았지만, 본 명세서에서 기술됨)에 전송되며, 또한 출력의 나머지는 위상 추적기 어셈블리(720)에 전송된다. 위상 추적기 어셈

블리(720)에 있어서, 위상 추적기 검출기들( $D_1$  및  $D_2$ , 722, 724)은 한 쌍의 스플리터(714 및 716)의 부분 출력을 수신하며, 또한 이 스플리터들은 에러 신호를 생성하도록 믹서(726)에 신호를 전송한다. 처리 장치(728)는 오프셋 전압의 가산 생성 및 이 가산된 오프셋 전압을 변조 신호(730)에 부가하여 위상 변조기 구동기(732)를 위한 출력을 생성한다. 박스 730으로 도시한 변조 신호는 믹서(726) 및 처리 장치(726)에 전송된다. 또한 프린지 진폭은 위상 추적기 용으로는 너무 작아서 고정할 수 없다. 긴 간섭성 길이를 갖는 제2 소스가 시스템(700)에 제공되어 위상 추적기에 긴 프린지 진폭을 제공한다.

도 14A-14C는 영상화 시스템내에서의 위상 추적을 위한 방법의 예시적 실시예가 샘플 암으로부터 수신된 신호를 측정 한 후 이 신호의 위상을 증가시킴으로써 본 발명에 따른 처리 블록(750 및 752)에서 시작되는 것을 도시한다. 이어서, 이 실시예의 처리는 블록(754)으로 진행하며, 여기에서  $x_1$ 으로서 정의된 제1 신호 부분이 상기 신호의 적어도 하나의 피크에서 측정된다. 결정 블록(756)에서는  $x_1$ 으로서 정의된 신호가 이 신호의 적어도 하나의 피크에서 측정되는지에 대한 판단이 행해진다. 판단 블록(756)에 있어서,  $x_1$ 으로서 정의된 신호가 상기 신호의 적어도 하나의 피크에서 측정된다고 판단된 경우, 처리는 블록(754)로 복귀해서 다시 신호가 측정된다.

한편, 판단 블록(756)에 있어서,  $x_1$ 으로서 정의된 신호가 신호의 적어도 하나의 피크에서 측정되지 않는다고 판단된 경우, 처리는 판단 블록(758)으로 진행하며, 여기에서 신호를 조정할 지에 대한 판단이 행해진다. 조정은 예를 들어 블록들(760 및 762)에 도시된 증분량 만큼 신호의 위상에서의 증가 또는 감소가 될 수 있다. 신호의 위상에서의 증가 또는 감소와 무관하게 처리는 처리 블록(754)으로 복귀하며, 여기에서 신호의 제2 신호 부분이 그 피크에서 측정된다. 이어서, 블록(756-762)이 위의 측정 신호에 대해 반복된다. 블록(750-762)의 기능들은 다른 영상 처리와 병렬 및/또는 직렬로 수행될 수 있다.

위상 " $\Phi$ "의 조정은  $A(x_2-x_1)$ 으로서 정의될 수 있는데, 여기서 "A"는 상수이고, 증분 량 만큼의 신호의 위상의 증가 또는 감소에 대한 판정 프로세스는 (1)  $A(x_2-x_1)$ 가 위상 변조기의 범위내에 있는지를 판단하고; 그리고 (2)  $A(x_2-x_1)$ 가 상기 범위내에 있는 경우  $A(x_2-x_1)$ 와 같은 량 만큼  $\Phi$ 를 변화시키거나,  $A(x_2-x_1)$ 가 상기 범위 밖에 있는 경우  $A(x_2-x_1)-m2\pi$ 와 같은 량 만큼  $\Phi$ 를 변화시키는 부 단계를 포함하는데, 여기서 M은 1 이상의 정수이다. 이 방법은 선택적으로 신호  $x_1$ 을 재측정하는 부단계(3)를 포함할 수 있다.

#### d. 데이터 처리

일반적으로 검출기에 의해 기록된 데이터는 임의의 주파수  $\omega$  또는 파형 수 k의 고정 선형 함수로서 샘플화될 수 없다. 그러나, 푸리에 변환은 z 및 k 공간(또는 t 및  $\omega$ )을 연결할 수 있다. k에서의 비선형 샘플링으로 인해, 획득된 스펙트럼은 k 영역에서 고르게 이격된 샘플들을 생성하도록 보간된다. 또한, 레이저의 조정 슬로프는 광이 k 공간내에서 동일한 간격으로 샘플링되어 보간이 더 이상 필요가 없어지는 방식으로 조정될 수 있다. 또한, 검출 타이밍은 k 영역내에 고르게 확산된 광을 샘플링하도록 설계되어, 상기 보간이 더 이상 필요 없도록 할 수 있다. 바람직하게는, 최적의 포인트 확산 함수를 얻도록 간섭계의 샘플 및 기준 암내의 확산이 균형잡혀야 한다. 확산 불균형은 또한 신호 처리에 의해 정정될 수 있다. 모션들로 유도된 위상 처핑 또한 디지털 처리에 의해 정정될 수 있다. 임의의 아티팩트 정정에 있어서, 샘플의 축방향 이동이 측정되며, 또한 적절한 비선형 매핑이 상기 모션의 속도로부터 계산될 수 있다.

여러 가지 보간 기술들이 당업자들에게 알려져 있다. 이에 는 단일 2 포인트 보간, 2 점 보간에 이어지는 FFT 제로 페이딩, 및 나이퀴스트 정리(Nyquist theorem)로 표현된 동기 함수를 갖는 정밀 보간 등이 있으나, 이들로 한정되지는 않는다.

본 발명의 예시적 실시예는 또한 혈관내의 아테롬성 동맥경화증(atherosclerotic)의 위치를 찾기 위한 프로브를 제공하는데, 이 프로브는 간섭계로부터 수신된 신호를 복수의 광 주파수들로 분리하는 스펙트럼 분리 장치; 및 상기 스펙트럼 분리 장치로부터 수신된 광 주파수들의 적어도 한 부분을 검출할 수 있는 검출기 장치를 구비한다.

#### e. 주파수 편이 기술

고속 OFDI 기술의 경우에, 최대 레인지 깊이가 레이저 출력의 간섭성 함수를 갖는 미세한 폭에 의해 제한될 수 있는바, 이는 간섭 길이가 때로는 높은 조정 속도, 높은 출력 전력 또는 넓은 조정 각을 얻기 위해 조정되기 때문이다. 미세한 간섭 길

이에 의해 간섭 프린지의 가시성이 간섭계의 경로 길이 차이가 증가함에 따라 감소할 수 있다. 이 결과, SNR의 열화가 일어나므로 최대 레인징 깊이를 제한하게 된다. 또한 종래의 간섭계에 있어서 정 및 부 전기 주파수간을 구별할 수 있는 능력이 없으면, 정과 부 깊이들 사이를 구별할 수 없게 된다. 영상 겹침 아티팩트를 방지하기 위해 간섭계의 기준 지면은 영상이 정 또는 부 깊이에서만 나타나도록 조정되어야 한다. 이는 또한 소스의 간섭 길이에 대한 레인징 깊이를 제한한다.

위의 제한을 방지하기 위해 압전기 액추에이터, 복굴절판 또는 3×3 커플러를 이용하여 동작 또는 수동 위상에 기반하여 직각 간섭 신호들이 측정된다. 이러한 기술은 정 및 부 깊이들과 관련된 중첩 영상들을 제공하지만, 안정한 직각 신호들을 생성하기 어려우므로 심각한 잔류 아티팩트를 유도한다. 이 명세서에서 우리는 정과 부 깊이들 사이의 모호함을 효과적으로 제거하는 간단한 기술을 제안 및 개시한다.

본 발명의 일 실시예에 따른 예시적 기술은 검출기 신호의 일정 주파수 편이를 제공하도록 간섭계내의 광 주파수 편이기를 사용한다. 이에 의해 간섭 범위의 양쪽이 누화없이 사용될 수 있으며 레인징 깊이를 배가시킬 수 있다. 58Hz 또는 순환 주파수 편이 루프에서 회전하는 복굴절판을 이용하는 1 차원 광 주파수 영역 반사 측정법에 대하여 동일한 개념을 위에서 기술했다. 이 실시예에 있어서, 음향 광학 주파수 편이기가 사용되고, 그리고 상기 기술이 레인징 속도보다 빠른 몇 등급의 크기를 갖는 고속 OFDI에 적용된다. 또한 본 발명의 다른 실시예에 따른 신호 처리 기술이 주파수 편이 기술의 스위프 소스의 비선형 조정 슬로프에 적합하도록 제공된다.

A. 원리

주파수 편이

도 15는 본 발명에 따른 OFDI 시스템의 하이 레벨 도면을 도시하는데, 파장 스위프 소스(95), 기준 암(80)에서 광 주파수 편이기(311)를 이용하는 단일 모드 섬유 간섭계, 광검출기(88) 및 단일 프로세서(160)를 구비한다. 기준 암에서 Δf의 라운드트립 주파수 편이를 가질 때, 기준 및 샘플 광 사이의 간섭과 관련된 광전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_x(t) = \eta \sqrt{P_r(t)P_s(t)} \int \sqrt{R(r)}G(|z|)\cos\left[\frac{4\pi}{c}v(t)z + \phi(z) + 2\pi\Delta f t\right] dz$$

여기서 η는 검출기의 양자 효율, Pr(t) 및 Ps(t)는 각기 기준 암과 샘플 암 광의 광 전력, R(z)는 샘플의 반사율 프로파일, G(|z|)은 프린지 가시성에 대응하는 간섭 함수, c는 광속, v(t)는 광 주파수, 그리고 φt는 후방 산란 위상이다. 선형 조정의 경우, 즉, v(t)=0-1t의 경우, 검출기 신호의 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_s = \left| v_1 \frac{2z}{c} - \Delta f \right|$$

제로 신호 주파수는 깊이 z=cΔf/(2v1)에 대응한다. 따라서, 스위프 소스의 조정 방향과 같은 주파수 편이의 방향을 선택함으로써, 제로 신호 주파수는 부 깊이에 대한 포인트(point to negative depth)로 만들어질 수 있다. 도 16(a) 및 (b)는 주파수 편이의 효과를 나타낸다. 프린지 가시성 또는 간섭성 함수는 제로 깊이에서 피크 값을 가지며 깊이 증가에 따라 감소한다. 효과적인 레인징 깊이를 거의 틀림없이 SNR 페널티가 6dB 이하인 최대 깊이 범위로서 정의할 수 있다. 예를 들어, 단일 주파수(해치 영역)의 부호 모호성으로 인해 도 16(a)에서 간섭 범위의 한쪽을 사용할 수 있다. 이에 비해, 도 16(b)에 도시한 바와 같이, 적합한 주파수 편이를 이용해서 -zc에서 zc에 이르는 간섭 범위의 양쪽을 부 깊이와 정 깊이간의 누화없이 이용할 수 있다.

비선형 조정

시간에 대한 v(t)내의 비선형성은 일정 깊이에서의 신호의 주파수 처평으로 나타나서 측방향 해상도의 열화를 가져온다. 이 문제에 대한 해결책으로서, 주파수 처평을 보상하는 비선형 시간 간격으로 검출기 신호가 샘플링될 수 있다. 또한 검출기는 일정 시간 간격으로 샘플링될 수 있고 이어서 샘플화된 데이터가 이산 푸리에 변환("DFT")이전에 보간에 의해 균일한 v-공간에 매핑될 수 있다. 이 두 가지 방법은 변환 제한된 측방향 해상도를 산출할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나, 이들 방법은 주파수 편이 기술에 직접적으로 적용할 수는 없다. 비선형 샘플링 및 보간 방법은 주파수 편이의 인공적 처평을 초래할 수 있어 차선의 최적 측방향 해상도에 그친다. 따라서, 전 레인징 깊이에 걸쳐서 거의 변환 제한된 측방향 해상도를 얻는데 변형된 보간 방법이 사용될 수 있다. 그 예를 들면 다음과 같다.

단계 1. 소스의 각 파장 스위프 동안 균일한 시간 간격으로 신호의 N 샘플을 획득.

단계 2. 전기 주파수 영역내에 N 데이터 포인트들의 DFT를 생성.

단계 3. 부 및 정 깊이에 대응하는  $\Delta f$  이하와 이상의 2개의 주파수 대역들을 분리.

단계 4. 제로 깊이가 제어 전기 주파수로 정렬되도록 각 주파수 대역을 편이.

단계 5. 각 주파수 대역에 제로 패딩을 적용해서 각 주파수 대역에 대해 작은 시간 간격을 갖는 시간 영역에서 샘플 수를 증가시킨 배열을 가져오는 역 DFT를 수행.

단계 6 스위프 소스의 비선형성으로 주어진 적절한 매핑 함수를 이용하여 균일한 v 공간에 시간 영역내의 각 배열을 보간.

단계 7. 각 보간 배열의 DFT를 수행.

단계 8. 배열 지수를 이동시킴으로써 두 개의 배열(영상)을 결합.

이 결과, 제로 깊이는 전기 주파수  $\Delta f$ 에 존재한다.

## B. 실험

### OFDI 시스템

도 17은 본 발명의 예시적 실시예에 따른 2개의 음향 광학 주파수 편이기(FS1 800 및 FS2 802, Brimrose Inc. AMF-25-1.3)를 이용하는 예시적 OFDI 시스템의 예시적 구성을 나타낸다. 2개의 주파수 편이기는  $\Delta f = FS2 - FS1$ 의 네트 편이를 생성하도록 전압 제어 발진기들로 구동될 수 있다. 2개의 주파수 편이기는 음향 광학 결정들의 물질 분산의 평형을 이룬다. 섬유 커플링을 포함하는 각 장치의 삽입 손실은 2.5dB 이하로 될 수 있다. 디지털라이저의 샘플링은 10MHz일 수 있다. 스위프 레이저(100)는 1271mm에서 1379mm( $v1=135\text{GHz/us}$ )로 센터링 스위프된 108mm의 조정 범위를 제공하도록 구성될 수 있다. 36kHz로 상승된 반복이 달성되어도 레이저는 7kHz이 감소율로 동작 되었고, 단일 파장 스위프동안 1300 샘플들을 얻었다. 이는 5MHz의 나이퀴스트 주파수에 대응하는 영상내에서 5.8mm의 깊이 범위로 나타났다. 프로브(810)는 검류계 미러를 포함하며, 또한 영상화 렌즈들은 1.1mm의 공초점의 파라미터를 갖는 프로브 빔을 생성하였다. 광 탭(optical tap) 커플러(820)는 전기 회로(836)에서 TTL 신호를 생성하도록 협대역 필터(830)와 광검출기(834)와 더불어 사용될 수 있다. TTL 신호는 아날로그 디지털 변환시 트리거로서 사용될 수 있다.

간섭 신호는 이중 평형 수신기(151)를 이용하여 측정될 수 있다. 검출기 신호는 또한 저역 전기 필터(840)를 이용하여 디지털화 이전에 처리된다. 대역 통과 필터와 슬로프 필터 등의 전기 필터들이 사용된다. 감쇠가 크고 결과의 신호 세기가 깊이에 따라 저하되는 필터가 유용하다. 슬로프 필터는 큰 깊이에서 보다 표면으로부터의 큰 신호를 효과적으로 억제함으로써 검출의 동적 범위를 개선할 수 있다.

스위프 레이저(100)의 간섭 함수의 특징을 나타내기 위해서 시스템의 포인트 확산 함수는 기준 암의 여러 위치들에서 부분 반사기를 사용해서  $\Delta f = 0$  ( $FS1 = -25\text{ MHz}$ ,  $FS2 = -25\text{ MHz}$ )에서 측정될 수 있다. 비교를 위해 각 깊이에서 획득된 샘플화된 데이터가 매핑 프로세스를 통해서 그리고 매핑 프로세스를 거치지 않고 처리되었다. 도 18(a) 및 (b)는 y 축이 제로 주파수에서의 값으로 정규화된 DFT 앰플들의 제곱을 나타내는 예시적 결과들을 도시하는데, 하부 및 상부 x 축들은 신호 주파수와 깊이 z를 각각 나타낸다. 매핑을 하지 않는 경우, 포인트 확산 함수는 깊이가 증가함에 따라 피크 전력의 큰 확산 그리고 큰 열화를 겪게 되는데, 이는 스위프 레이저(도 18(a) 참조)의 비선형성 때문이다. 매핑 프로세스를 할 경우, 레이저 출력의 미세한 간섭 길이는 신호 전력 깊이의 감소를 나타낸다. 5.8mm의 전 깊이 범위에 걸쳐 SNR은 11 dB 이상 감소된다. 초기에 도입된 효과적인 레인지 깊이를 위한 기준에 따르면, 간섭 길이에 대응하는 깊이는 단지 2.9mm, 즉, 영상내 총 깊이의 절반이 될 수 있다.  $\Delta f = -2.5\text{ MHz}$  ( $FS1 = -22.5\text{ MHz}$ ,  $FS2 = -25\text{ MHz}$ )의 비제로 주파수 편이에서 동일한 실험이 시행되었다. 도 18(c) 및 18(d)은 각각 매핑 프로세스를 통해서 그리고 매핑 프로세스를 거치지 않고 측정된 포인트 확산 함수를 나타낸다. 이들 도면에 도시된 바와 같이, 2.5MHz의 주파수에서 제로 깊이에서 발생하는 신호의 피크는 적어도 대략 네트 음향 광학 주파수 편이와 같다. 도 18(d)에서 관측된 거의 변환 제한된 축방향 해상도는 매핑 기술이 효율적임을 나타낸다. 신호 전력의 감소는 5.8mm의 전체 깊이 범위에 걸쳐 5dB이하로서 레인지 깊이의 확장면에서 주파수 편이 기술의 이점을 나타낸다.

## 영상

사람의 폐 조직의 생체 밖의 예시적 영상화가 OFDI 시스템을 사용해서 수행되었다. 도 19는 동일 실험 조건들에서 획득된 2개의 영상들 A와 B를 나타내는데, A의 경우에는  $\Delta f=0$ 일 때, 또한 B의 경우에는  $\Delta f=-2.5\text{MHz}$ 일 경우만이 다르다. 각각의 영상은 전술한 매핑 기술을 이용하여 획득하였다. 조직의 표면은 프로브 빔 축에 대한 각도를 이용해서 배치되었으며, 또한 기준 미러는 신호가 영상의 정 및 부 깊이에서 나타나도록 배치되었다. A에 있어서, 조직 영상은 2.8mm, 즉, 총 깊이 범위의 상부 절반의 유효 레인징 범위내에 포함된다. 그러나, 샘플 위치 내의 비교적 큰 변화에 의해 영상화 결핍 아티팩트가 나타났다. 이와는 대조적으로 B에서 전체 정 및 부 깊이는 주파수 편이 기술에 의해 5.8mm로 증가된 레인징 깊이에 따라 모호함이 없이 표시될 수 있었다.

전술한 내용은 단지 본 발명의 원리를 나타낸다. 기술된 실시예들에 대한 수정과 변경은 전술한 내용을 고려할 때 당업자들에게 자명하다. 따라서, 비록 여기에서 명시적으로 도시되거나 기술되지는 않았지만 본 발명의 원리를 구현하며 따라서 본 발명의 사상과 범위내에 있는 다양한 시스템, 장치 및 방법들을 당업자가 안출할 수 있을 것이라는 사실이 이해될 수 있을 것이다.

## 도면의 간단한 설명

본 발명 및 그 장점들을 더 완전하게 이해하기 위해서, 다음 첨부도면과 연계되어 이루어진 다음의 상세한 설명을 참조하기로 한다.

도 1은 시간 영역 광 간섭성 단층 촬영(optical coherence tomography;"OCT") 시스템의 블록도이다.

도 2는 스펙트럼 레이더 기술을 이용하여 주파수 영역 영상화를 수행하는 시스템의 블록도이다.

도 3A는 본 발명의 일 실시예에 따른 간섭성 단일 주파수 조정 소스를 사용하여 주파수 영역 영상화를 수행하는 시스템의 블록도이다.

도 3B 및 도 3C는 도 3A의 시스템에 의해 생성된 주파수 편이의 발생을 나타내는 파장 대 진폭의 그래프들이다.

도 3D는 도 3A의 시스템에 의해 생성된 비트 신호의 그래프이다.

도 4A는 본 발명의 다른 실시예에 따른 다수의 종방향 모드 파장 스위프 소스(multiple-longitudinal-mode wavelength-swept source)를 이용하여 주파수 영역 영상화를 수행하는 시스템의 블록도이다.

도 4B 및 도 4C는 도 4A의 시스템에 의해 생성된 스펙트럼내의 편이의 발생을 나타내는 파장 스펙트럼의 그래프들이다.

도 4D는 도 4A의 시스템에 의해 생성된 비트 신호의 그래프이다.

도 5는 본 발명의 다른 실시예에 따른 파장 스위프 소스를 이용하여 주파수 영역 영상화를 수행하는 시스템의 블록도이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 파장 가변 필터 장치의 블록도이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 파장 스위프 레이저 장치의 블록도이다.

도 8A는 도 7의 파장 스위프 레이저의 출력에서 측정된 레이저 출력 스펙트럼의 예시적 그래프이다.

도 8B는 도 7의 파장 스위프 레이저의 출력에서 측정된 레이저 출력의 예시적 그래프이다.

도 9A는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 다면경(polygonal mirror)을 구비한 파장 가변 필터 장치의 블록도이다.

도 9B는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 반사 디스크를 구비한 파장 가변 필터 장치의 블록도이다.

도 10A는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 과장 스위프 레이저 및 편향 다이버시티 평형 검출(polarization diversity-balanced detection; "PDBD")회로를 포함하는 광 주파수 영역 영상화(optical frequency domain imaging; "OFDI") 시스템의 블록도이다.

도 10B는 도 10A에 도시된 예시적 프로브 장치의 블록도이다.

도 10C는 도 10A의 시스템을 이용한 반송 주파수 헤테로다인 검출의 예시적 출력들을 나타내는 복수의 그래프들이다.

도 11은 본 발명의 예시적 실시예들을 이용하여 획득한 사람의 손가락 끝(finger tip)의 예시적 생체 영상을 나타낸 도면이다.

도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 위상 추적 장치의 블록도이다.

도 13은 상기 위상 추적기를 구비한 본 발명에 따른 OFDI 시스템의 일 실시예의 블록도이다.

도 14A-14C는 본 발명에 따른 위상 추적기 동작을 위한 예시적 기술을 나타내는 흐름도이다.

도 15는 본 발명의 다른 실시예에 따른 OFDI 시스템의 개략도이다.

도 16(a) 및 도 16(b)은 본 발명에 따른 주파수 편이의 효과에 대한 즉, 깊이 대 신호 주파수의 그래프이다.

도 17은 본 발명의 또 다른 예시적 실시예에 따른 2개의 음향 광학 주파수 편이기들을 이용한 OFDI 시스템의 블록도이다.

도 18(a) 및 도 18(b)은 본 발명에 따른 매핑 처리를 하지 않고 측정된 포인트 확산(point spread) 함수들의 그래프들이다.

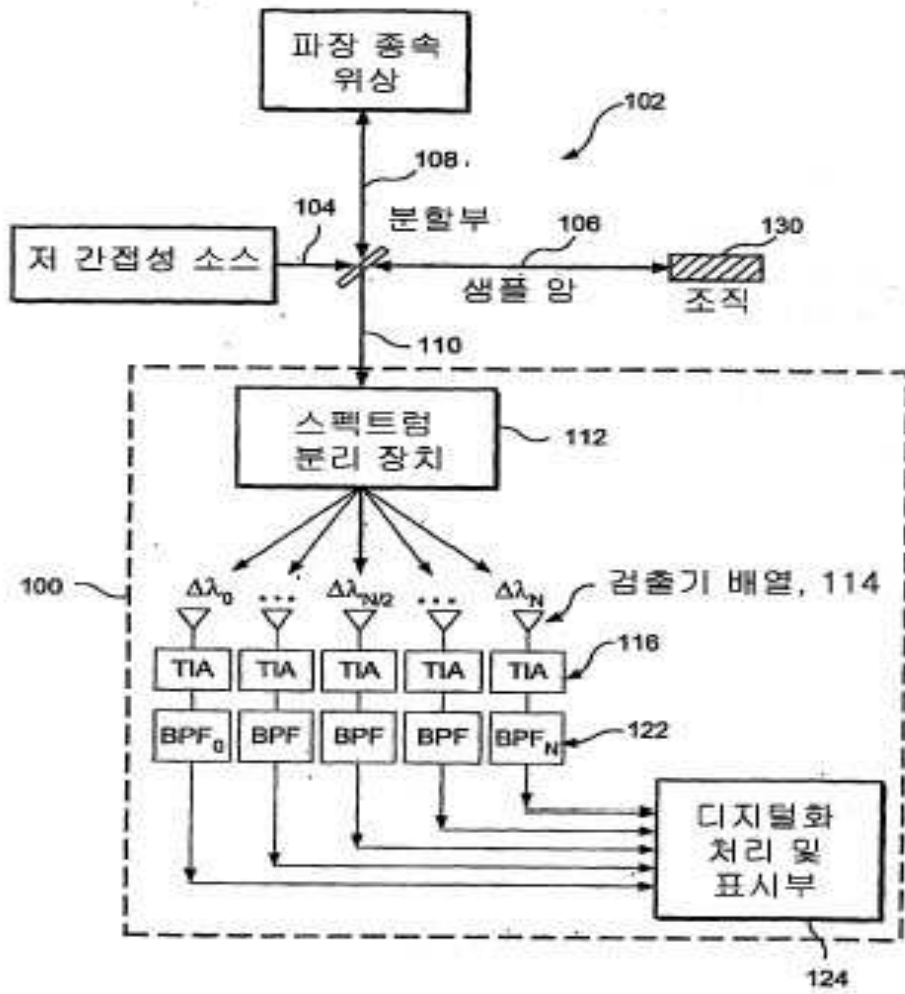
도 18(b) 및 도 18(c)은 본 발명에 따른 매핑 장치로 측정된 포인트 확산 함수들의 그래프들이다.

도면 전체에 걸쳐서 다르게 기술하지 않는 한 같은 번호 및 문자들은 예시한 실시예들의 유사한 특징들, 소자들, 구성요소들 또는 부분들을 나타내는데 사용된다. 또한 본 발명은 이제 본 발명을 도면들을 참조하여 기술하지만, 예시적 실시예들과 관련하여 설명된다.

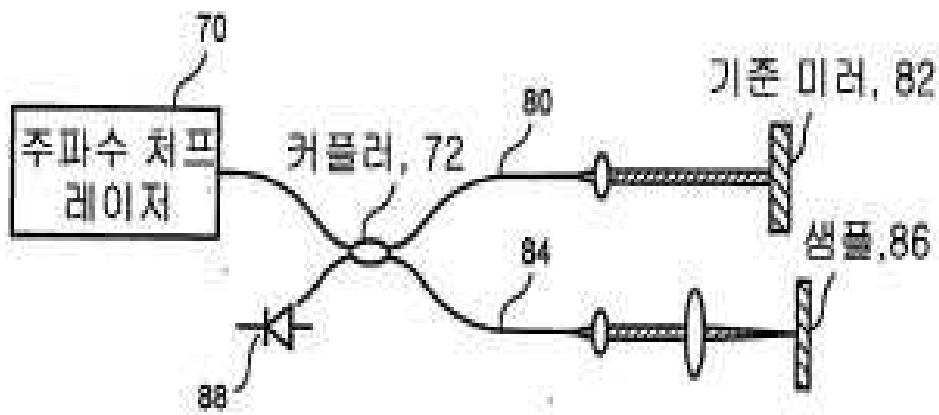
## 도면



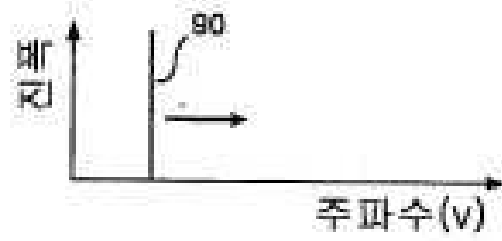
도면2



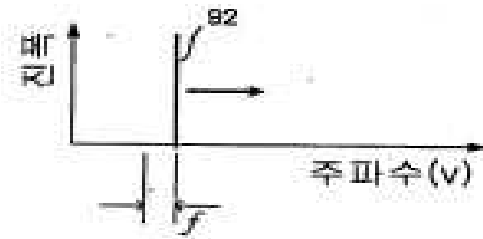
도면3a



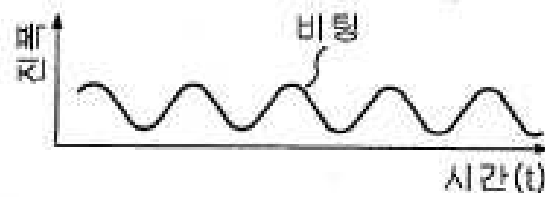
도면3b



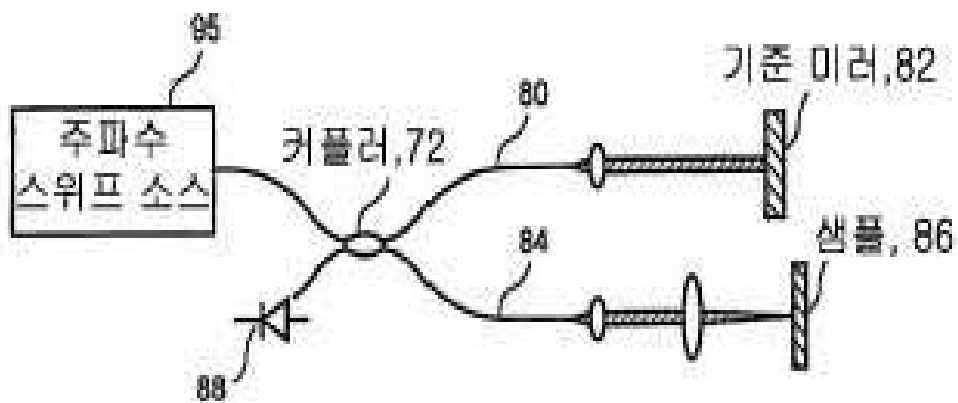
도면3c



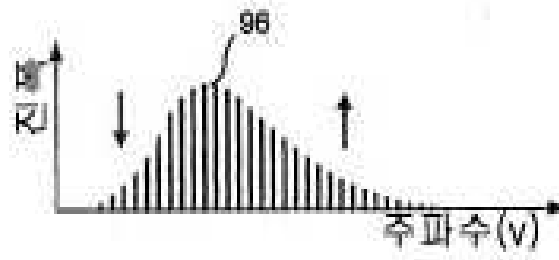
도면3d



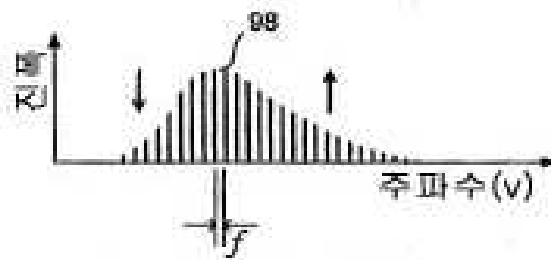
도면4a



도면4b



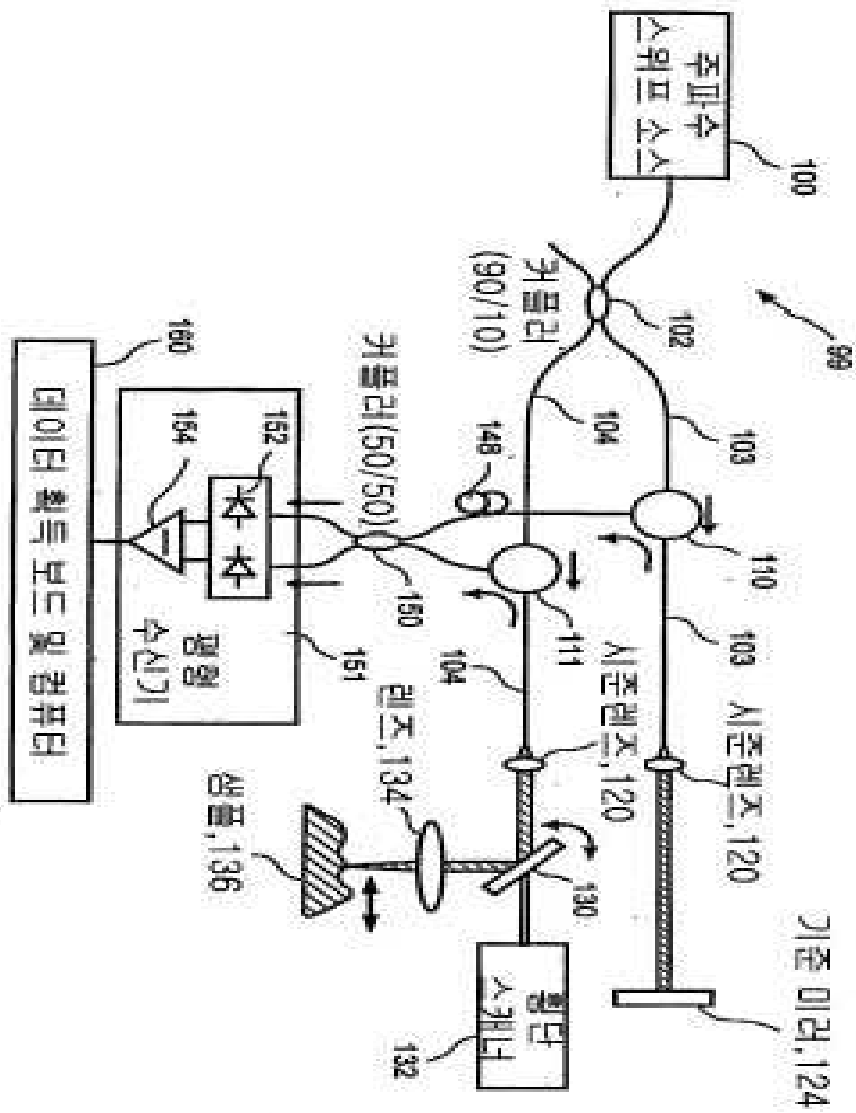
도면4c



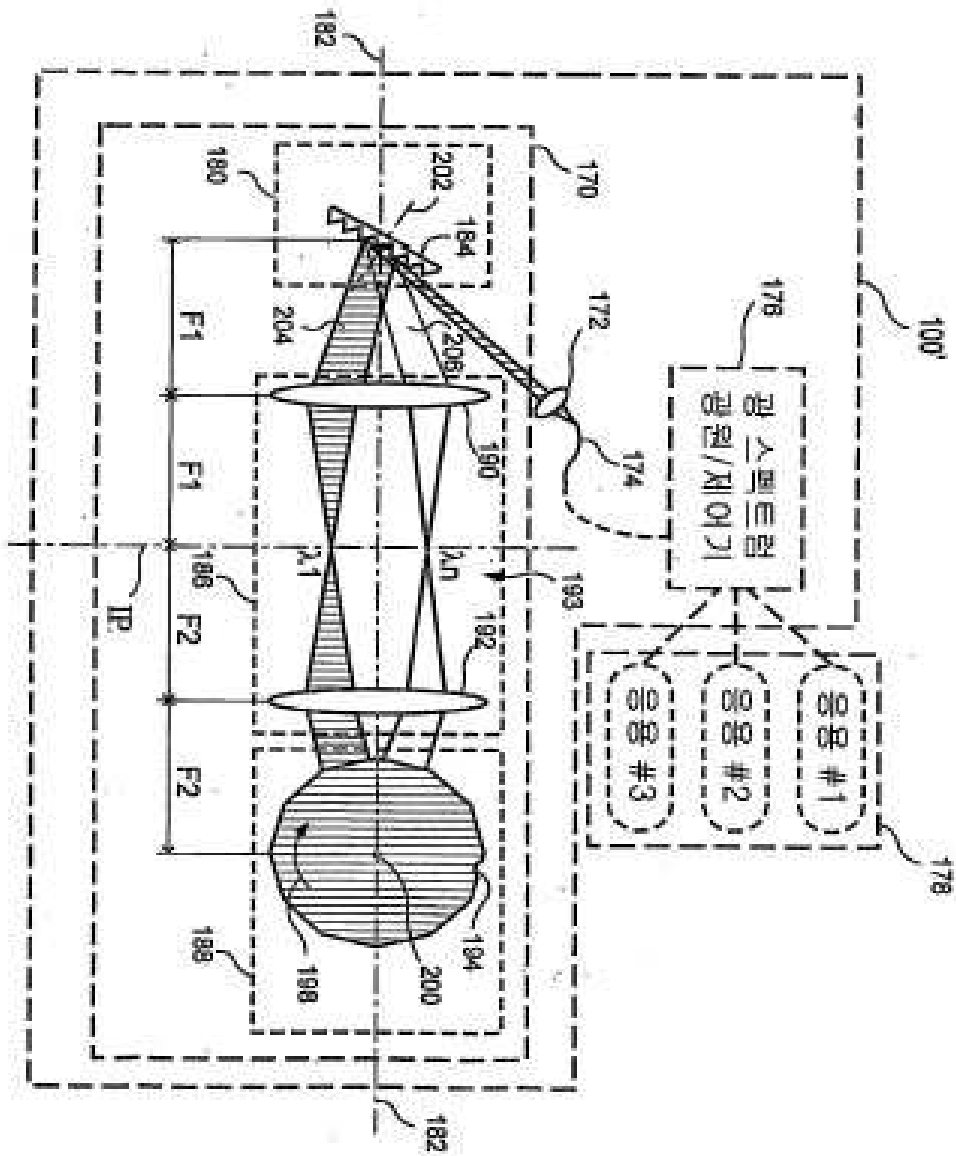
도면4d



도면5

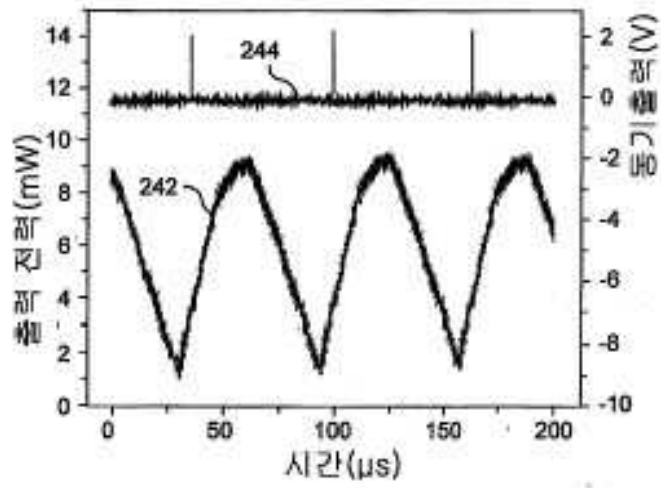


도면6

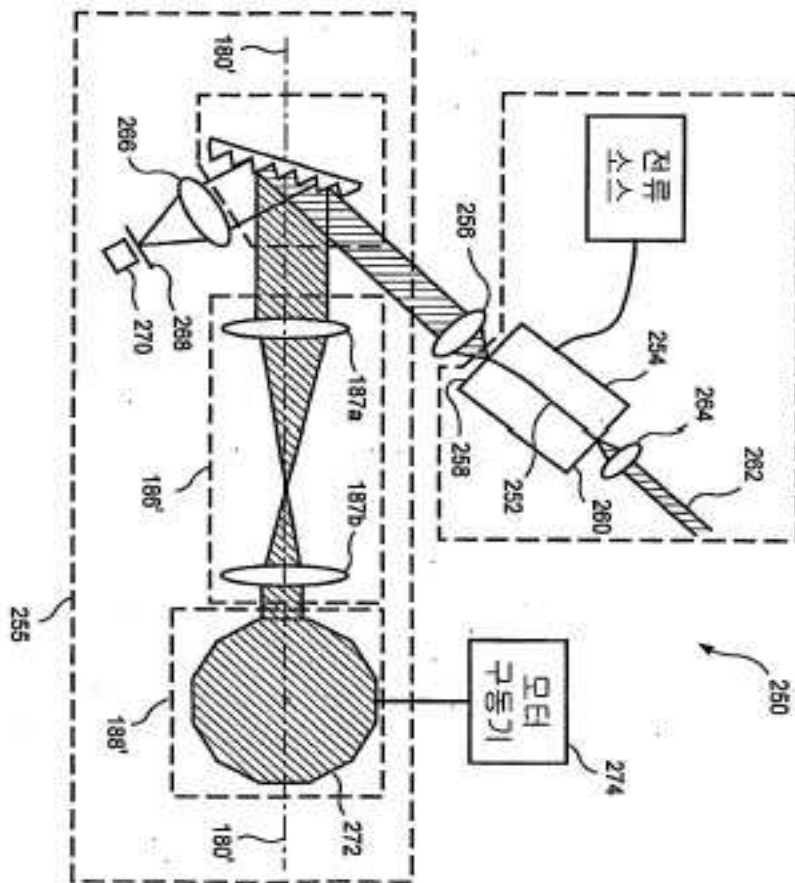




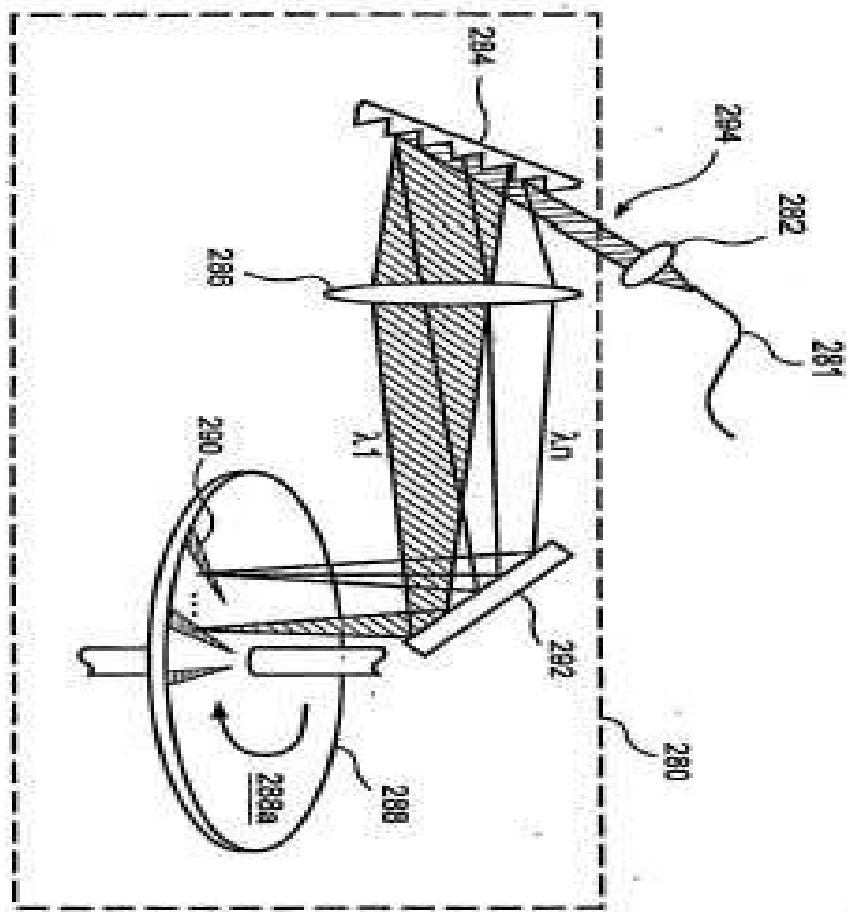
도면8b



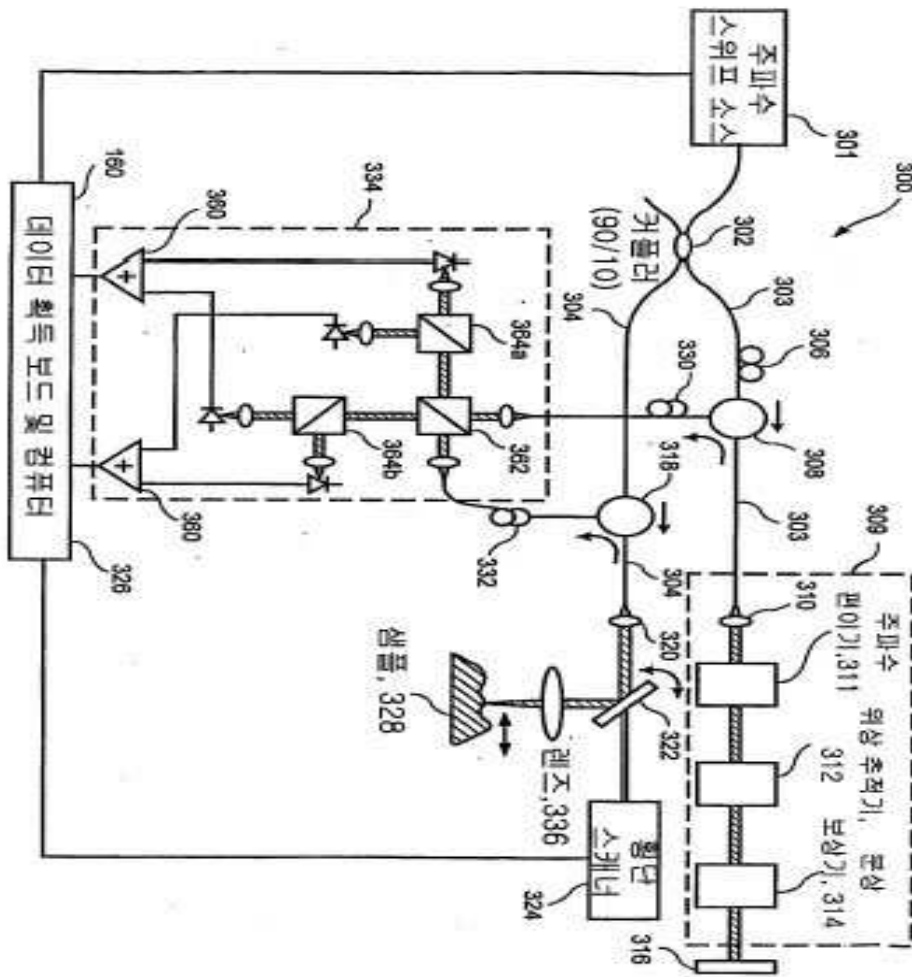
도면9a



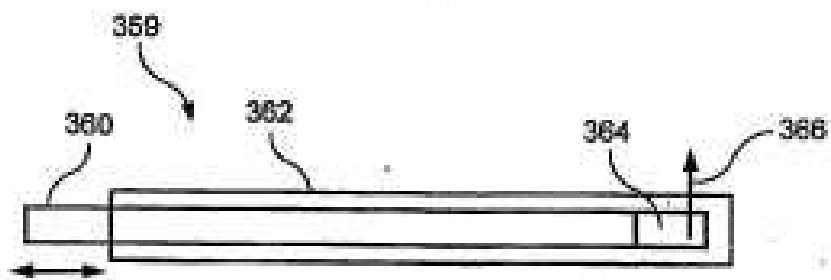
도면9b



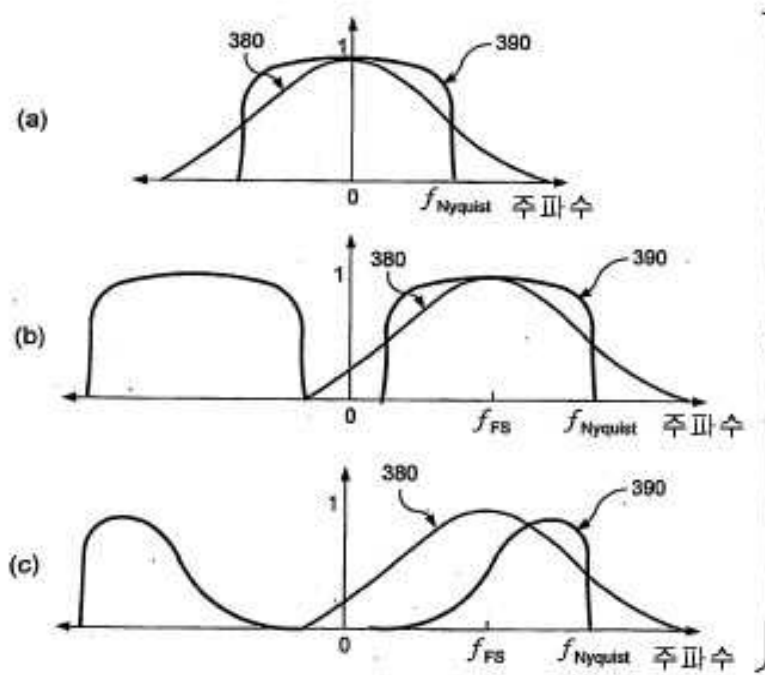
도면10a



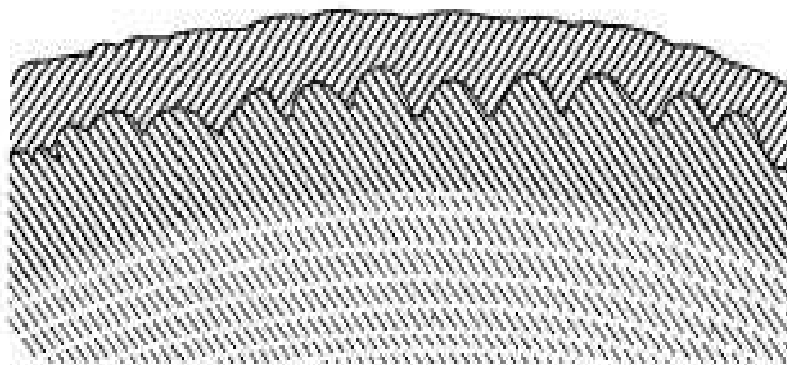
도면10b



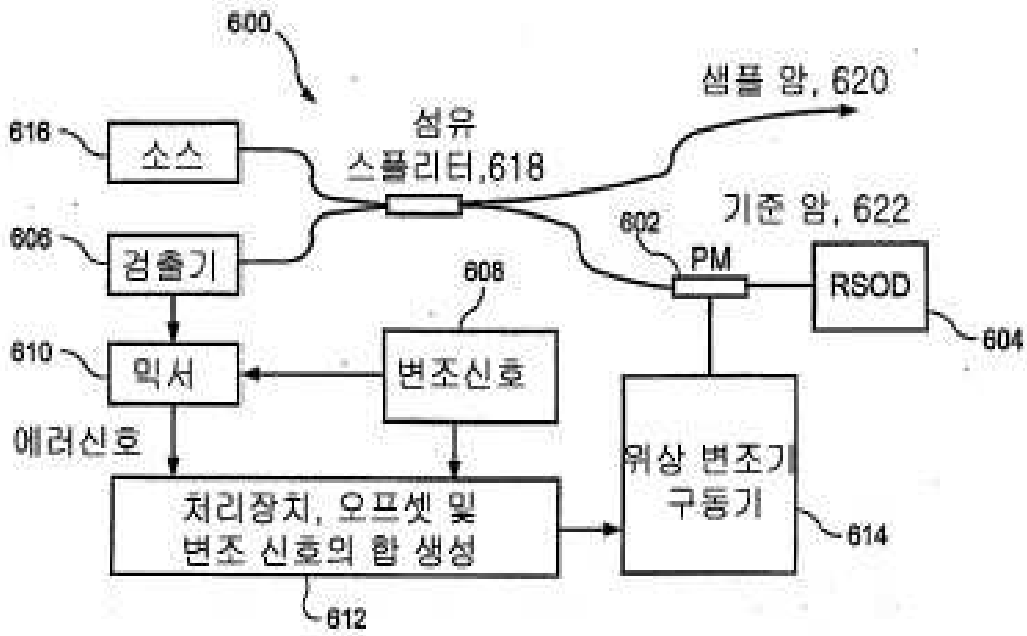
도면10c



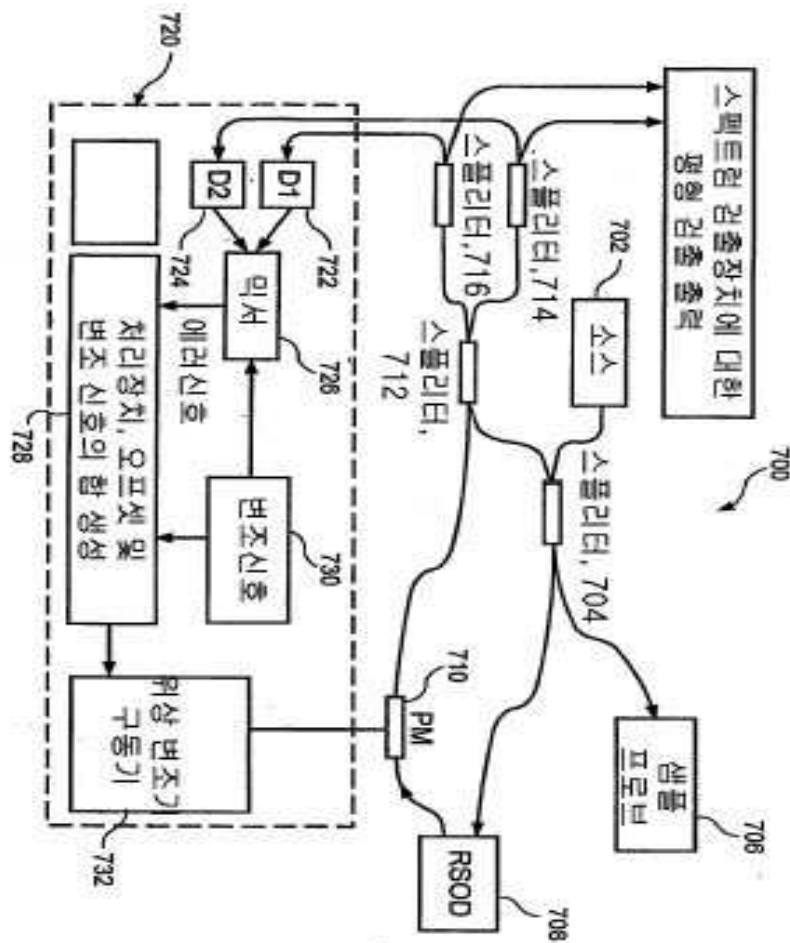
도면11



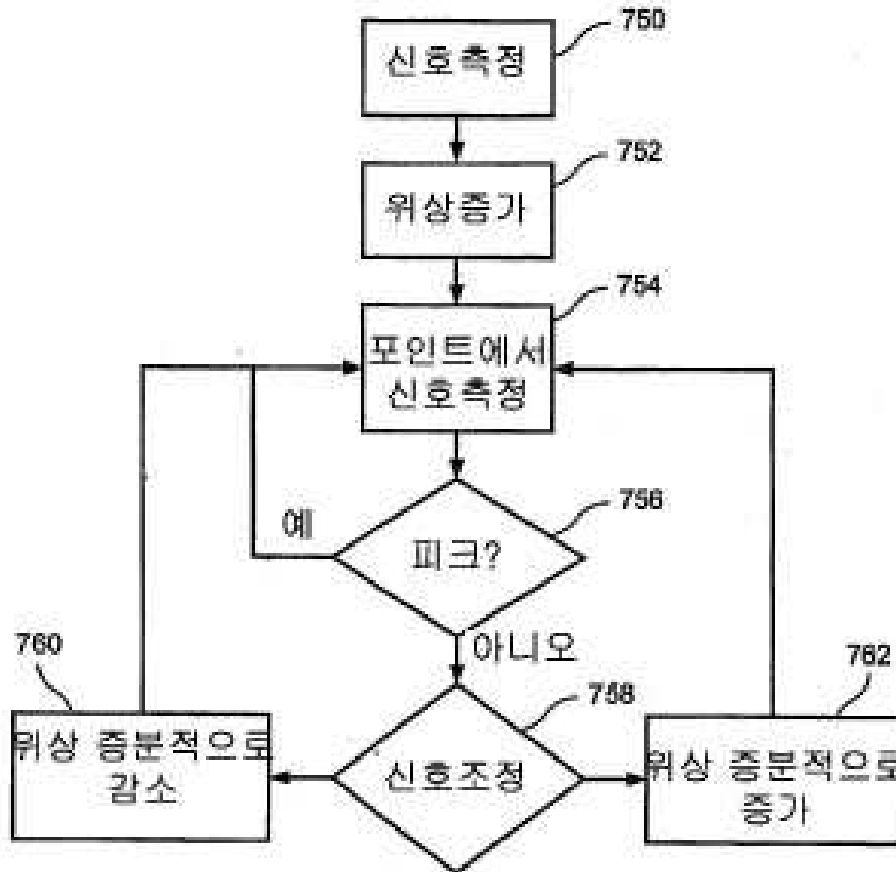
도면12



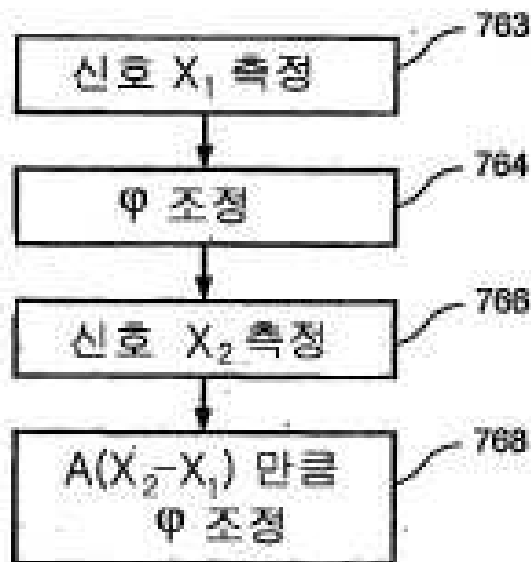
도면13



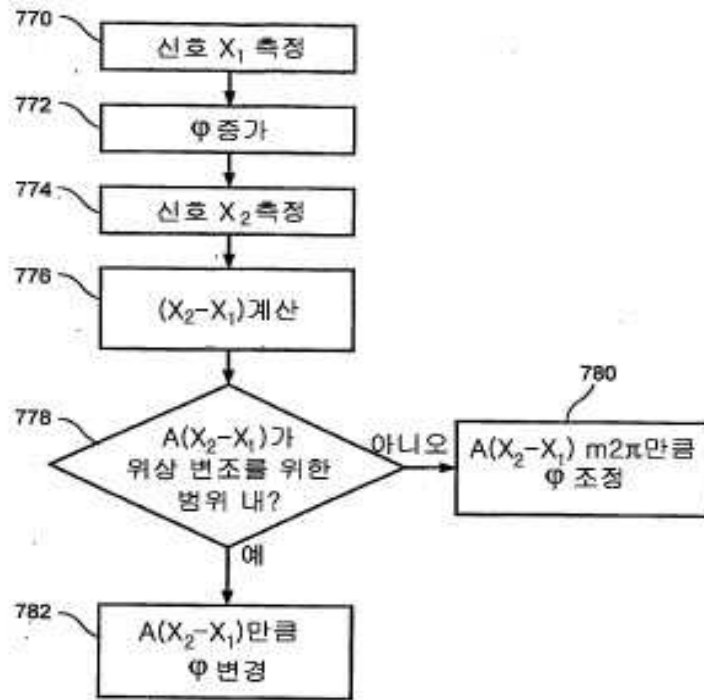
도면14a



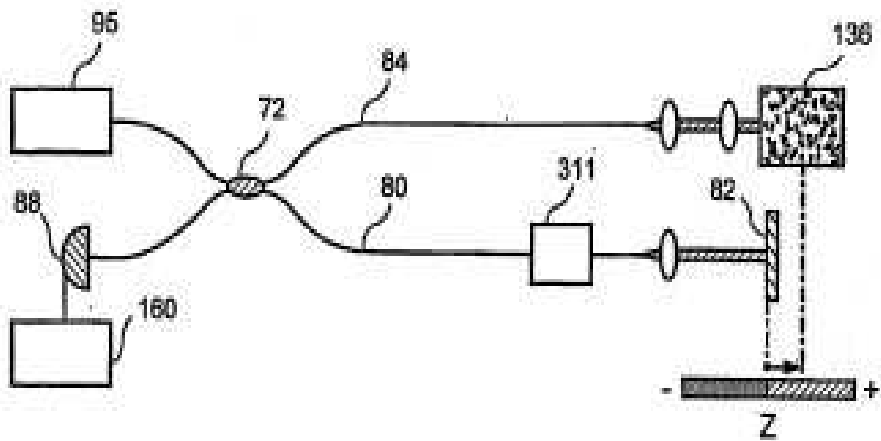
도면14b



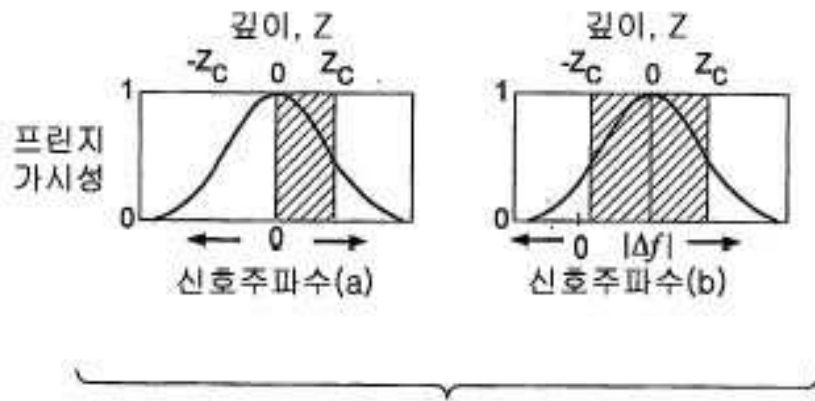
도면14c



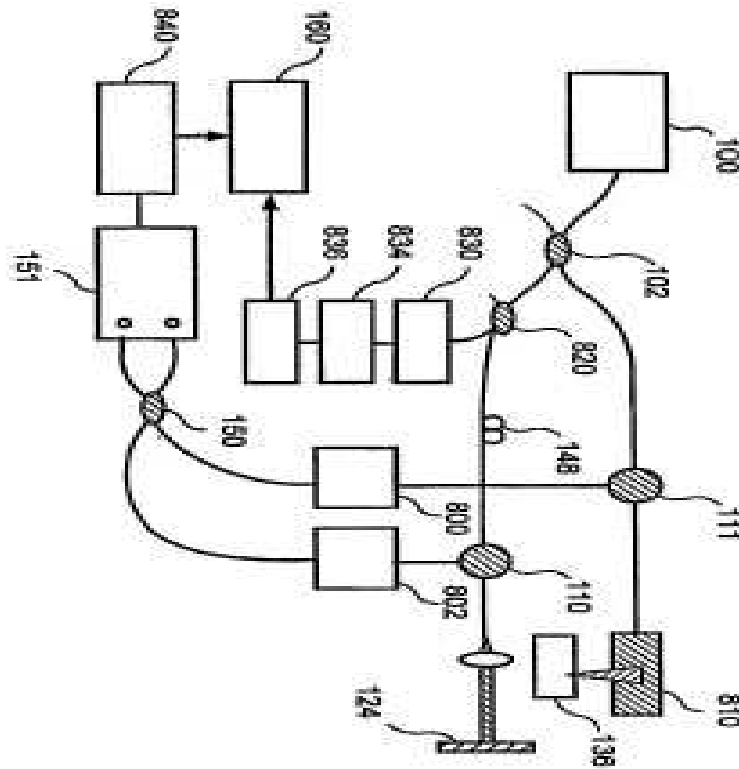
도면15



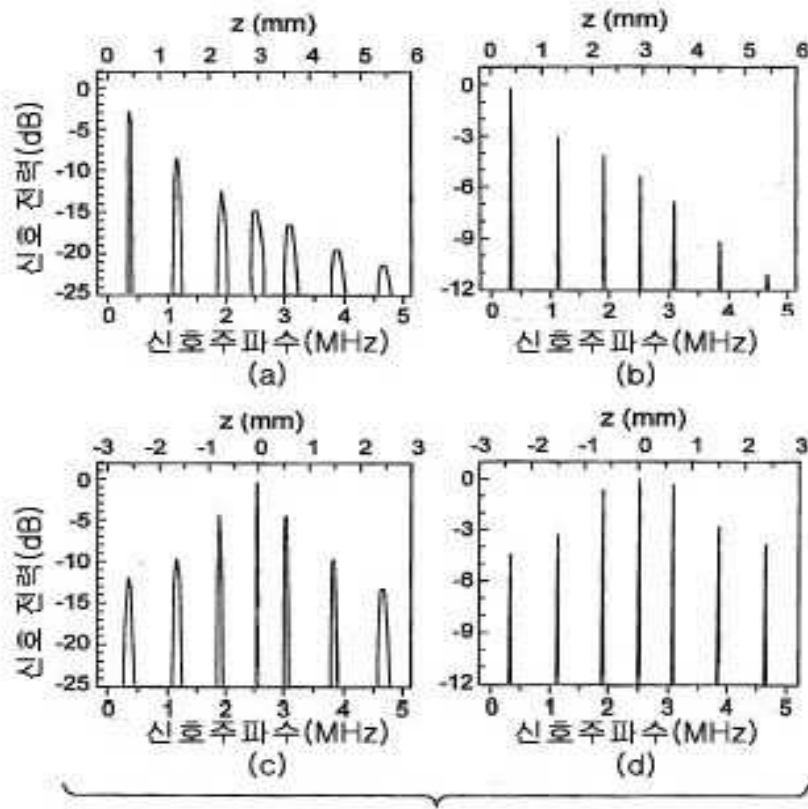
도면16



도면17



도면18



도면19

