



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년02월08일
(11) 등록번호 10-1704731
(24) 등록일자 2017년02월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 15/24 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 15/24 (2013.01)
G01R 15/241 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0128748
(22) 출원일자 2015년09월11일
심사청구일자 2015년09월11일
(56) 선행기술조사문헌
JP08278329 A
JP2014025835 A
KR1020110089702 A
KR1020090085804 A

(73) 특허권자
부산대학교 산학협력단
부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2 (장전동, 부산대학교)
(72) 발명자
오민철
부산광역시 해운대구 대천로103번길 61, 116동 402호 (좌동, 엘지아파트)
추우성
부산광역시 부산진구 엄광로238번길 5, 103동 20 2호 (가야동, 가야삼정그린코아)
(74) 대리인
김성현

전체 청구항 수 : 총 5 항

심사관 : 오경환

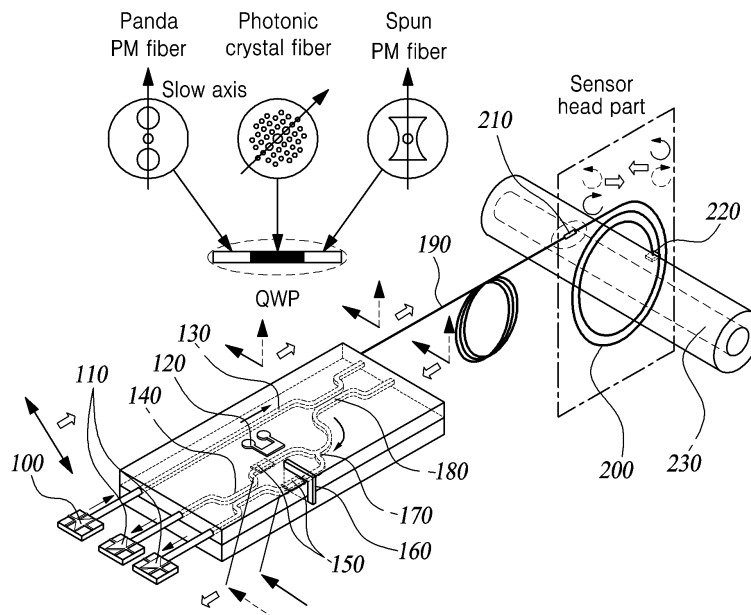
(54) 발명의 명칭 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법

(57) 요약

본 발명은 도선에 흐르는 전류의 세기를 측정하기 위하여 광섬유를 이용하여 자기장에 의하여 발생하는 빛의 위상 차이를 검출하는 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법에 관한 것으로 기판상에 집적화되어 제작된 집적형 광소자인 광집적회로; 및 상기 광집적회로와 연결되어 통과하는 선편광이 센서헤드부의 일측에

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1a



구비되어진 사분의 일 파장판(QWP)을 통해 원편광으로 변환되는 광섬유코일부;를 포함하여, 광전류센서에서 온도의존성을 높게 만드는 두가지 요소인 QWP 부품과 광섬유 센싱 코일부를 개선함으로써 광전류센서의 온도의존성을 해소하여 넓은 온도범위에 걸쳐서 특성이 변하지 않고 동일한 응답특성을 가지는 광전류센서를 구현할 수 있다. 또한, 기본 편광유지 광섬유를 대신하여 광자결정 광섬유를 이용하여 QWP 부품을 제작하고, 일반 광섬유를 어닐링하는 방법대신 광축을 회전시켜 제작된 편광유지 광섬유(spun PM fiber)를 이용하여 센싱코일부를 제작함으로써 센서의 온도의존성을 개선하고 센서의 정확도를 높이며, 제작 시간 단축과 높은 수율로 인해 광전류센서의 적용범위를 넓힐 수 있다.

(52) CPC특허분류

G01R 15/245 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2014051994

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 중견연구자지원

연구과제명 광IC기반 편광회전 반사간섭계 광섬유 센서 연구

기 여 율 1/1

주관기관 부산대학교 산학협력

연구기간 2014.11.01 ~ 2015.10.31

명세서

청구범위

청구항 1

기판상에 집적화되어 제작된 집적형 광소자인 광집적회로; 및

상기 광집적회로와 연결되어 통과하는 선편광이 센서헤드부의 일측에 구비되어진 사분의 일 파장판(QWP)을 통해 원편광으로 변환되는 광섬유코일부;를 포함하여,

상기 선편광을 상기 원편광으로 변화시켜 온도의존성을 낮추는 광자 결정 광섬유를 이용한 것을 특징으로 하는 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 광집적회로는 광 커플러, 위상변조기, 편광변환기, 공간섭기, 광파워 분배기, 편광기로 구성되는 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 사분의 일 파장판은 광자 결정 광섬유의 광축과 편광 유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접하는 것을 특징으로 하는 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서.

청구항 4

광자 결정 광섬유의 광축과 편광유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접하는 접합단계; 와

상기 광자 결정 광섬유의 길이가 사분의 일 파장 만큼 위상의 차이를 일키는 위치에 맞추어 상기 광자 결정 광섬유를 절단하는 절단단계; 및

상기 절단단계 후, 잘려나간 위치에 센싱코일로 이용되는 또다른 광섬유인 광축을 회전시켜 제작된 편광유지 광섬유를 부착하는 부착단계; 를 포함하여,

선편광을 원편광으로 변화시켜 온도의존성을 낮추는 광자 결정 광섬유를 이용한 것을 특징으로 하는 광자 결정 광섬유의 제작방법.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 광자 결정 광섬유의 광축과 상기 편광유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접함으로써 선편광을 원편광으로 변화하는것을 특징으로 하는 광자 결정 광섬유의 제작방법.

발명의 설명

기술분야

본 발명은 온도 의존성을 줄이기 위한 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법에 관한 것으로,

[0001]

좀 더 구체적으로는 도선에 흐르는 전류의 세기를 측정하기 위하여 광섬유를 이용하여 자기장에 의하여 발생하는 빛의 위상 차이를 검출하는 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 광전류센서는 기존에 널리 사용되고 있는 전기식 전류 측정 장치에 비해 다양한 장점들을 가지고 있어 현재 전력 산업에서 매우 큰 관심을 받고 있다. 다양한 장점들로는 넓은 측정 범위와 높은 정확도, DC 및 고주파의 AC 전류 량 측정가능성, 소형 및 경량 주구, 서지 전류(Surge current)로 인한 파손위험이 없는 높은 안전성, 부도체인 광섬유는 별도의 절연이 필요 없으므로 가스 및 절연유를 사용하지 않고 환경 친화적인 점등을 들 수 있다. 광통신의 발전과 함께 폭넓게 개발되어온 광소자 기술들의 진보와 더불어 다양한 광센서에 대한 연구 결과물들도 활발히 나오고 있는 추세이다.

[0003] 제안된 광전류센서의 기본원리는 다음과 같다. 전류가 흐르는 도선 주변으로 광섬유를 감게 되면 전류로 부터 유도된 자기장으로 인해 광섬유에는 미세한 굴절변화가 발생된다. 이러한 현상을 패러데이 효과(Faraday effect)라 하며 자기장 세기에 비례하여 변화된 굴절률 변화는 광섬유에 입사되는 빛의 편광 상태 변화로 확인 된다. 그러나 패러데이 효과로 인해 발생하는 편광 상태 변화는 매우 미약하고 온도 및 진동 등 외부 환경변화에 따라 도선을 감고 있는 광섬유 코일부의 특성변화로 인해 빛의 편광 상태가 쉽게 변화되는 단점을 지닌다.

[0004] 이러한 문제점을 해결하기 위하여 편광유지 광섬유를 사용한 편광회전 반사형 광전류센서가 제안되었다(Fiber-optic current sensor, US 2003/6636321 B2, 2003.10.21.자 공개; Optical fiber electric current sensor and electric current measurement method, US 2010/0253320 A1, 2010.10.07. 공개). 이와 같은 구조는 서로 수직한 두 선 편광을 입사 시키게 되면 광섬유 코일 부에서 두 선 편광은 서로 다른 방향으로 회전하는 두 종류의 원편광 성분으로 변환되고 이 두 원편광은 패러데이 효과로 인해 위상차를 가지게 된다. 따라서 출력부에서 두 편광의 위상차를 측정하여 현재 전류량을 확인 할 수 있다. 두 편광이 광섬유 코일부를 지나 다시 반사되어 동일한 경로를 거치면서 경로상에서 온도나 진동에 대해 발생하는 위상차는 서로 상쇄되어 사라지게 된다. 선 편광을 원 편광으로 변환 시켜주는 편광유지 광섬유 소자로 제작된 광섬유 코일부의 사분의 일 파장판(quarter wave plate: QWP)은 온도 변화에 따른 특성변화로 인해 센서의 정확성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 QWP와 패러데이 효과의 두 온도의존성을 서로 상쇄 시키는 방법을 사용한다(Temperature-stabilized sensor coil and current sensor, US 2005/0088662 A1, 2005.04.28. 공개).

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 따라서, 본 발명은 이와 같은 문제점을 해소하기 위해 제안된 것으로, 사분의 일 파장판(QWP) 제작에 이용되던 PM광섬유를 광자결정 광섬유로 대체하고, 광섬유를 어닐링하여 제작한 센서 코일을 대신하여 광축을 회전시켜져 제작한 편광유지 광섬유 센서 코일을 이용하여 광집적회로를 기반으로한 편광회전 반사형 광전류센서가 지니고 있는 온도의존적인 특성을 해결하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0006] 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 의하면, 기관상에 집적화되어진 집적형 광소자인 광집적회로; 및 상기 광집적회로와 연결되어 통과하는 선편광이 센서헤드부의 일측에 구비되어진 사분의 일 파장판(QWP)을 통해 원편광으로 변환되는 광섬유코일부;를 포함하여, 상기 선편광을 상기 원편광으로 변화시켜 온도의존성을 낮추는 광자 결정 광섬유를 이용할 수 있다.

[0007] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서에서 상기 광집적회로는 광 커플러, 위상변조기, 편광변환기,

공간섭기, 광파워 분배기, 편광기로 구성될 수 있다.

- [0008] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서에서 상기 사분의 일 파장판은 광자 결정 광섬유의 광축과 편광 유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접하도록 할 수 있다.
- [0009] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서에서 상기 사분의 일 파장판(QWP)로 인해 상기 선편광은 좌원편광과 우원편광으로 변환될 수 있다.
- [0010] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서에서 상기 좌원편광 및 상기 우원편광은 상기 광섬유코일부를 통과함으로써 위상지연이 축적되며 상기 센서헤드부의 타측에 구비된 미러에 의해 반사되어져 선편광으로 변환될 수 있다.
- [0011] 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 의하면, 광자 결정 광섬유의 광축과 편광유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접하는 접합단계; 와 상기 광자 결정 광섬유의 길이가 사분의 일 파장 만큼 위상의 차이를 일키는 위치에 맞추어 상기 광자 결정 광섬유를 절단하는 절단단계; 및 상기 절단단계 후, 잘려나간 위치에 센싱 코일로 이용되는 또다른 광섬유인 광축을 회전시켜 제작된 편광유지 광섬유를 부착하는 부착단계; 를 포함하여, 선편광을 원편광으로 변화시켜 온도의존성을 낮추는 광자 결정 광섬유를 이용할 수 있다.
- [0012] 이와 같은 광자 결정 광섬유의 제작방법은 상기 광자 결정 광섬유의 광축과 상기 편광유지 광섬유의 광축이 45° 어긋나도록 접함으로써 선편광을 원편광으로 변화할 수 있다.

발명의 효과

- [0013] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법에 따르면, 광전류센서에서 온도의존성을 높게 만드는 두가지 요소인 QWP 부품과 광섬유 센싱 코일부를 개선함으로써 광전류센서의 온도의존성을 해소하여 넓은 온도범위에 걸쳐서 특성이 변하지 않고 동일한 응답특성을 가지는 광전류센서를 구현할 수 있다.
- [0014] 또한 기본 편광유지 광섬유를 대신하여 광자결정 광섬유를 이용하여 QWP 부품을 제작하고, 일반 광섬유를 어닐링하는 방법대신 광축을 회전시켜 제작된 편광유지 광섬유(spun PM fiber)를 이용하여 센싱코일부를 제작함으로써 센서의 온도의존성을 개선하고 센서의 정확도를 높이며, 제작 시간 단축과 높은 수율을 달성함으로써 광전류센서의 적용범위를 넓힐 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0015] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광섬유코일부와 광신호 처리를 위한 광도파로 소자로 구성된 집적형 광전류센서의 구성도를 도시한 도면;
- 도 2(a)는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서의 온도변화에 따른 사분의 일 파장판의 위상지연 오차로 인해 반사된 두 원편광이 사분의 일 파장판으로 출력될 때의 위상차 변화를 도시한 도면;
- 도 2(b)는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서의 온도변화에 따른 사분의 일 파장판의 위상지연 오차로 인해 광검출기에 의해 검출된 센서 출력 신호 크기 변화를 도시한 도면;
- 도 3은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 편광유지 광섬유를 이용한 사분의 일 파장판 제작공정을 도시한 도면;

도 4는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 사분의 일 파장판 구성을 도시한 도면;

도 5는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 폴리머 광도파로를 기반으로 한 집적형 광소자 제작공정 순서도를 도시한 도면;

도 6은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 포토닉 크리스탈 편광유지 광섬유와 판다 타입 편광유지 광섬유로 제작된 각각의 사분의 일 파장판(210)의 온도 변화에 따른 위상지연 오차로 인한 출력신호 크기를 비교한 도면;

도 7은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 PMF-QWP와 annealed fiber coil과 PCF-QWP와 spun PM fiber로 각각 구성된 집적형 광전류센서의 온도의존성을 비교한 도면;

도 8은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 PCF-QWP와 spun PM fiber를 이용하여 제작된 집적형 광전류센서의 출력 특성을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 첨부된 도 1 내지 도 8에 의거하여 상세히 설명한다. 한편, 각각의 광섬유를 접합하는 관련기술, 광도파로와 광섬유를 연결하는 관련 기술, 온도의존성을 측정하는 프로그램 관련 기술 등 통상 본 발명에 적용되는 분야의 종사자들 및 그들이 관련분야의 종사자들 및 그들이 관련분야의 종사자들을 통해 통상적으로 알 수 있는 부분들의 도시 및 상세한 설명은 생략하고, 본 발명과 관련된 부분들을 중심으로 도시 및 설명 하였다.

[0017] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광섬유코일부와 광신호 처리를 위한 광도파로 소자로 구성된 집적형 광전류센서의 구성도를 도시한 도면이다.

[0018] 도 1을 참조하면, 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서는 광집적회로 및 광섬유코일부로 구성된다.

[0019] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서는 기관상에 집적화되어 제작된 집적형 광소자인 광집적회로를 구비한다. 광집적회로와 연결되어 통과하는 선편광이 센서헤드부의 일측에 구비되어진 사분의 일 파장판(QWP)을 통해 원편광으로 변환되는 광섬유코일부로 구성되어 선편광을 원편광으로 변화시켜 온도의존성을 낮추는 광자 결정 광섬유를 이용하도록 한다.

[0020] 편광회전 반사형 광전류 센서는 두개의 수직한 편광간의 초기 위상차를 보상함으로 외부 교란(온도, 진동)에 대해 안정성을 가진다. 광자 결정 편광유지 광섬유를 적용한 편광회전 반사형 광전류센서의 구조를 도 1에서 도시 하고 있다.

[0021] 광집적회로는 광커플러(180), 위상변조기(120), 편광변환기(160), 광간섭기(140), 광파워 분배기(170), 편광기(150) 등으로 구성된다. 광전류센서의 기본 동작 원리는 다음과 같다. SLED 광원(100)으로 부터 출력되는 45° 각도의 선편광은 집적형 광소자를 통과한 후 PM fiber의 fast와 slow axis 성분으로 나뉘어 입사된다.

[0022] 센서헤드부(Sensor head part)의 일측인 앞부분에는 광축을 45° 회전하여 정렬된 광자 결정 편광유지 광섬유(Photonic Crystal fiber:PCF)로 제작된 사분의 일 파장판(QWP,210)이 위치한다. 사분의 일 파장판(210)으로 인해 두 fast와 slow axis 성분의 선편광은 좌원 편광(Left-Handed Circular Polarization: LHCP)과, 우원 편광(Right-Handed Circular Polarization: RHCP)으로 각각 변환된다. 광섬유코일(200)을 통과하는 두개의 원편광은 패러데이 효과에 의해 위상지연이 축적된다. 미러(220)에 의해 반사된 후 두개의 원편광은 반대 방향으로 광섬유코일(200)과 사분의 일 파장판(210)과 통과하게 되면서 다시 선편광으로 변환된다. 이때 출력되는 fast axis 성분의 선편광은 입력 시 slow axis 성분의 선편광이 변환되어 다시 편광유지 광섬유로 돌아오게 된다.

[0023] 따라서, 광섬유코일부로 입력 될 때 편광 유지 광섬유를 통과하면서 발생한 fast axis 성분과 slow axis 성분의 위상 차는 다시 반대방향으로 상쇄된다. 패러데이 효과에 의해 지연된 위상 정보를 가지고 되돌아온 두 편광은 편광 유지 광섬유를 통해 다시 integrated optic device로 입사된다. 광파워 분배기(170)로 인해 두 선편광은 반반 나뉘진 상태로 upper branch와 lower branch로 입사된다. lower branch로 입력된 두 선 편광은 편광변환기(160)로 인해 TE 성분은 TM 성분으로, TM성분은 TE 성분으로 변환된다. 이렇게 변환된 TE 성분은 광검출기(140)에서 간섭현상이 나타나게 된다. 두 branch를 진행하는 TM 성분들은 금속 박막을 이용한 편광기(150)에서 흡수되어 간섭계에 영향을 미치지 않는다. upper branch에 위치한 위상변조기(120)는 간섭하는 두 TE성분의 초기 위상 차를 보정시킨 후 유지하게 된다. 두 TE 성분은 광결합기(180)에서 간섭현상을 겪은 후 광검출기(110)에 입력된다.

[0024] 도 2(a)는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서의 온도변화에 따른 사분의 일 파장판의 위상지연 오차로 인해 반사된 두 원편광이 사분의 일 파장판으로 출력될 때의 위상차 변화를 도시한 도면이다. 도 2(b)는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서의 온도변화에 따른 사분의 일 파장판의 위상지연 오차로 인해 광검출기에 의해 검출된 센서 출력 신호 크기 변화를 도시한 도면이다.

[0025] 광전류센서가 동작 하는 동안, 집적화된 광소자는 제어되는 환경에 위치하지만 광섬유코일부는 외부환경에 노출되므로 광섬유코일부의 온도의존성 제거는 매우 중요하다. 또한, 광섬유코일부에서 온도에 가장 민감한 부분은 사분의 일 파장판(210)이다. 사분의 일 파장판(210)의 온도 민감도 효과에 따른 광전류센서의 응답을 존스 매트릭스를 이용하여 계산하였다. 반사 신호의 편광은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0026]
$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{out} = M_{QWP}^{-1} \cdot M_{FR}^{-1} \cdot M_R^{-1} \cdot M_{FR} \cdot M_{QWP} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{in} \quad (1)$$

[0027]
$$M_{QWP} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}) & i\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}) \\ i\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}) & \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0028]
$$M_{FR} = \begin{pmatrix} \cos\theta_F & \sin\theta_F \\ -\sin\theta_F & \cos\theta_F \end{pmatrix} \quad (3)$$

[0029] M_{QWP} , M_{FR} 그리고 M_R 는 사분의 일 파장판(210), 패러데이 로테이터, 그리고 리플렉터를 존스 매트릭스로 나타낸 것이다. M_{QWP}^{-1} 와 M_{FR}^{-1} 는 M_{QWP} 와 M_{FR} 의 역행렬이고 역방향에 대해 존스 매트릭스이다.

θ_F 는 전류로 인해 유도된 패러데이 효과에 의해 발생된 위상지연이다. δ 는 사분의 일 파장판(210)의 온도변화에 의해 발생된 지연 에러이다. 45° 회전된 선편광의 입력편광에 대해, 출력편광의 fast and slow axis 성분 간

위상차는 $\Delta\Phi_R$ 로 나타낸다.[참고 문헌: G. Frosio, and R. Dandliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor," Appl. Optics, 33(25), 6111-6122 (1994)]

[0030]

$$\Delta\Phi_R = \arctan [2\cos\delta\sin 4\theta_f / ((1 + \cos^2\delta)\cos 4\theta_f \sin^2\delta)] \quad (4)$$

[0031]

$$\cong 4\theta_f / \cos\delta, \text{ for } \theta_f \ll 1 \quad (5)$$

[0032]

δ 값이 증가하는 것에 대해 $\Delta\Phi_R$ 의 변화는 도2(a)에서 보여진다. 근사화된 출력 위상 지역 값은 δ 값이 커질수록 증가한다. 판다 타입(Panda type)편광 유지 광섬유가 사분의 일 파장판(210)으로 사용될때, $\Delta T=100^\circ\text{C}$ 에 대해 δ 는 9.38° 이고 계산에 사용된 판다 타입 편광유지 광섬유의 온도에 따른 복굴절 변화 값은 $d\Delta n/dT = -1.24 \times 10^{-8}/^\circ\text{C}$ 이다.

[0033]

반면, 광자 결정 광섬유는 $d\Delta n/dT = -1.24 \times 10^{-8}/^\circ\text{C}$ [참고문헌: P. Ma, N. Soung, J. Jin, J. Soung, X. Xu, "Birefringence sensitivity to temperature of polarization maintaining photonic crystal fibers," Optics & Laser Technol., 44(6), 1829?1833 (2012).]를 가지고 $\Delta T=100^\circ\text{C}$ 에 대해 δ 는 0.28° 이다.

[0034]

사분의 일 파장판(210)만의 온도 의존성을 확인하기 위해, 전류센싱 실험에 앞서, 미러(220)는 광섬유코일(200)과 연결되기 전에 사분의 일 파장판(210)의 끝 단에 부착된다. 집적형광소자는 사분의 일 파장판(210)에 연결된다. 이 구성에서 위상변조기(120)를 동작 시켜 사분의 일 파장판(210)의 δ 로 인해 발생하는 간섭신호를 얻을 수 있다.

[0035]

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{out} = \frac{1}{2} M_{Pol} \cdot [M_{PM} + iM_{HWP}] \cdot M_{QWP}^{-1} \cdot M_R \cdot M_{QWP} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}_{in} \quad (7)$$

[0036]

$$M_{PM} = e^{i\theta_{PM}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0037]

$$M_{HWP} = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0038]

$$M_{Pol} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0039]

M_{Pol} , M_{PM} 그리고 M_{HWP} 는 편광기(150), 위상변조기(120) 그리고 반 파장판을 존스 매트릭스로 나타낸 것이다. θ_{PM} 는 위상변조기(120)로 인해 발생하는 위상 변화이다. $E_x = E_y = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 를 가지는 입력신호에 대해, 광전류센서의 최종 출력 신호는 다음과 같다.

$$P_{out} = |E_{out}|^2 = \frac{1}{2} \cos^2 \delta \cos^2 \left(\frac{\theta_{PM}}{2} \right) + \frac{1}{4} \sin^2 \delta \quad (11)$$

[0041] 이 수식에서 $\frac{1}{4} \sin^2 \delta$ 항은 SLED 광원(100)의 제한된 코히어런스로 인해 잡섭현상이 발생하지 않는 성분이다. θ_{PM} 은 최대 출력신호를 만들기 위해 정확히 바이어스 될 때 신호의 크기는 도 2(b)와 같이 δ 값에 의존한다. 따라서 온도에 의존하는 δ 의 변화는 출력 신호의 크기 변화로 부터 확인된다.

[0042] 도 3은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 편광유지 광섬유를 이용한 사분의 일 파장판 제작공정을 도시한 도면이다.

[0043] 온도의존성을 비교하기 위해 판다 타입(Panda type) 편광유지 광섬유(PMF)와 광자 결정 편광유지 광섬유(PCF)를 각각 사용하여 두 종류의 사분의 일 파장판(210)을 제작하였다. 사분의 일 파장판(210)은 도 3과 같이 편광유지 광섬유의 광축과 45°의 각도를 가지고 부착된다. 반 파장 위상 지연이 발생하기 위한 PM fiber의 정확한 길이로 판다 편광유지 광섬유 혹은 광자 결정 편광유지 광섬유는 절단된다. 이후 짧은 길이의 단일모드 광섬유는 광섬유코일(200)을 부착하는 같은 효과를 만들기 위해 부착된다. 복굴절로부터 계산된 사분의 일 파장판(210)의 길이는 PMF-QWP와 PCF-QWP 대해 각각 0.92 mm와 1.00 mm이다. 사분의 일 파장판(210)의 성능은 선형 입력 편광에 대해 출력 광의 편광 소멸 비를 측정하여 평가된다. 아크 접합으로 스트레스가 완화되어 사분의 일 파장판(210)의 길이는 설계로부터 벗어난다. 다른 길이를 가지는 사분의 일 파장판(210) sample들 중에 1.25mm와 0.90mm 길이의 PCF-QWP와 PMF-QWP가 가장 최고의 출력 편광소멸비를 나타낸다. 두 샘플의 위상지연 오차는 단지 2.0 ~ 2.6°이다. PCF-QWP는 설계 값에 가까운 길이를 가지는 이유는 아크에 의해 air-hole 파손을 막기 위해 PMF-QWP에 인가하는 arc 파워의 단지 1/3만 인가하기 때문이다.

[0044] 도 4는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 사분의 일 파장판 구성을 도시한 도면이다.

[0045] 도 4를 참조하면, (a) 판다 타입 (panda type) 편광유지 광섬유(PMF)와 광자 결정 광섬유의 접합과 (b) 광자 결정 광섬유(PCF)와 spun PM fiber의 접합으로 구성된 사분의 일 파장판(210)을 도시하고 있다. 다음으로 사용된 각 광섬유들의 단면도 사진 (c) PMF, (d) PCF, (e) spun PM fiber으로 제작된 PCF-QWP와 PM fiber 간을 접합한 것을 도4에서 보이고 있다.

[0046] 도 5는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 폴리머 광도파로를 기반으로 한 집적형 광소자 제작공정 순서도를 도시한 도면이다.

[0047] 도 5를 참조하면, 집적형 광소자의 공정 순서는 패러데이 효과에 비례하는 간섭신호를 만들기 위해 사용되는 집적형 광소자는 잘 확립된 폴리머 광도파로 기술을 기반으로 제작된다. 케옵틱스 사로부터 공급 받은 불소치환된 저손실 폴리머는 굴절율이 각각 1.440과 1.430인 코어와 클래딩층을 형성하기 위해 사용된다. 광도파로의 코어 사이즈는 $6.0 \times 5.8 \mu\text{m}^2$ 이며 구조는 inverted rib이다. 표면 플라즈몬 흡수를 통해 TM 편광을 흡수하는 TE-pass polarizer를 삽입하기 위해 1.8 μm 의 두께를 가지는 첫 번째 상부 클래딩 위에 길이 9 mm의 Cr-Au 금속 패턴을 제작한다. 두 번째 상부 클래딩 형성 이후 가열 전극은 광학 효과를 이용한 위상변조기로 제작된다. 이후 20 μm 의 두께를 가지는 폴리이미드 반파장판을 삽입하기 위해 groove line은 다이싱 소우를 사용하여 형성한다. 이후 반파장판을 groove line에 삽입하고 UV 경화용 에폭시를 사용하여 고정 시킨다.

- [0048] 도 6은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 포토닉 크리스탈 편광유지 광섬유와 판다 타입 편광유지 광섬유로 제작된 각각의 사분의 일 파장판(210)의 온도 변화에 따른 위상 지연 오차로 인한 출력신호 크기를 비교한 도면이다. 도 7은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 PMF-QWP와 annealed fiber coil과 PCF-QWP와 spun PM fiber로 각각 구성된 집적형 광전류센서의 온도의존성을 비교한 도면이다. 도 8은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 PCF-QWP와 spun PM fiber를 이용하여 제작된 집적형 광전류센서의 출력 특성을 도시한 도면이다.
- [0049] 사분의 일 파장판(210)의 온도의존성을 측정하기 위해 광섬유 미러(220)는 단일모드 광섬유 끝 단에 부착되고 PM fiber는 집적형 광소자에 접합된다. 위에서 설명한 것과 같이 위상변조기(120)에서 변조 신호를 인가함으로써 사분의 일 파장판(210)의 위상 지연 오차를 평가할 수 있다. 미러(220)와 부착된 사분의 일 파장판(210)은 온도 컨트롤되는 오븐 안에 위치되고 출력되는 신호의 크기는 온도를 25 ~ 80° C로 변화 시키는 동안 도 6과 같이 측정된다.
- [0050] PMF-QWP는 1.8%의 출력 신호의 진폭 변화를 나타내었으며 온도에 따른 복굴절 변화가 0.085° /° C로 설계 결과인 0.098° /° C에 가깝게 나온 것 확인하였다. PCF-QWP의 경우 출력신호의 진폭은 PCF의 0.003° /° C로 낮은 온도에 따른 복굴절 변화 때문에 온도 변화 동안 ± 0.3%의 범위 내에서 제한된다.
- [0051] 센서헤드부 조립을 완성하기 위해 두 개의 사분의 일 파장판(210)은 각각의 광섬유코일(200)과 접합되고 다른 끝단에는 미러(220)와 부착된다. PCF-QWP와 HI-BI spun fiber를 접합한 PCF-spun fiber sensor와 PMF-QWP와 annealed fiber coil을 접합한 PMF-annealed fiber sensor, 이 두 가지 타입의 센서들을 사용하여 온도의존성 실험을 진행 하였다. PMF-QWP는 기준 센서로서 열처리된 광섬유 코일과 접합되는 반면 PCF-QWP는 72 mm의 circular beat length (@ 1550 nm)와 4.8 mm의 스핀 간격을 가지는 Hi-Bi spun fiber로 제작된 광섬유 코일과 부착된다.
- [0052] 온도의존성을 확인하기 위해 사용된 광섬유 코일의 직경은 90 mm이며 광섬유를 10.5 턴 감아 제작하였다. 센서 헤드부는 480 Arms 전류가 흐르는 전선을 광섬유 코일에 관통 시킨 채 온도를 컨트롤 하는 오븐 안에 위치시킨다. 70° C 이상의 온도 변화에 대해 센서 신호 진폭은 도 7과 같이 나타난다. PMF-annealed fiber sensor는 7.60%의 출력신호 진폭 변화를 보이며 그 중 0.35%는 Verdet constant 변화로 인해 나타난 효과이다. Verdet constant의 온도의존계수는 $(1/V)dV/dT \approx 0.7 \times 10^{(-4)}/^{\circ}C$ 이다 [참고 문헌: K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor," J. Lightwave Technol. 20(2), 267-276 (2002)]. 의존성의 나머지는 PCF-QWP의 위상 지연 오차와 열처리된 광섬유 코일의 잔여 복굴절에 의해 나타난다. PCF-spun fiber sensor는 78° C 까지 온도를 증가 시키더라도 ±1% 이내에서 신호 변화 나타나는 것을 알 수 있고 이 변화는 PMF-annealed fiber sensor의 1/7정도로 작게 나타남을 볼 수 있다.
- [0053] 대구경의 도체를 둘러싸는 광전류센서를 설치하기 위해 1160 mm의 지름을 가지는 광섬유 코일 (5.5턴)을 사용하여 PCF-spun fiber sensor를 제작하였다. 토로이드 타입의 전류 루프는 자기장을 증폭 시키기 위해 사용하였고 500 Arms ~ 12 kArms 범위의 인가 전류에 따른 센서신호를 도 8과 같이 측정하였다. 검은 색과 빈 점들의 두 포인트들은 인가 전류의 증가와 감소 시 측정된다. 인가 전류에 따른 센서의 출력의 상대 오차는 ±0.1% 이내이고, 이 결과는 0.5 accuracy class (IEC 60044-8)에서 기준으로 제시 조건을 만족한다.
- [0054] 이와 같은 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법에 따르면, 광전류센서에서 온도 의존성을 높게 만드는 두가지 요소인 QWP 부품과 광섬유 센싱 코일부를 개선함으로써 광전류센서의 온도의존성을 해소하여 넓은 온도범위에 걸쳐서 특성이 변하지 않고 동일한 응답특성을 가지는 광전류센서를 구현할 수 있다.

[0055] 또한 기본 편광유지 광섬유를 대신하여 광자결정 광섬유를 이용하여 QWP 부품을 제작하고, 일반 광섬유를 어닐링하는 방법대신 광축을 회전시켜 제작된 편광유지 광섬유(spun PM fiber)를 이용하여 센싱코일부를 제작함으로써 센서의 온도의존성을 개선하고 센서의 정확도를 높이며, 제작 시간 단축과 높은 수율로 인해 관전류센서의 적용범위를 넓힐 수 있다.

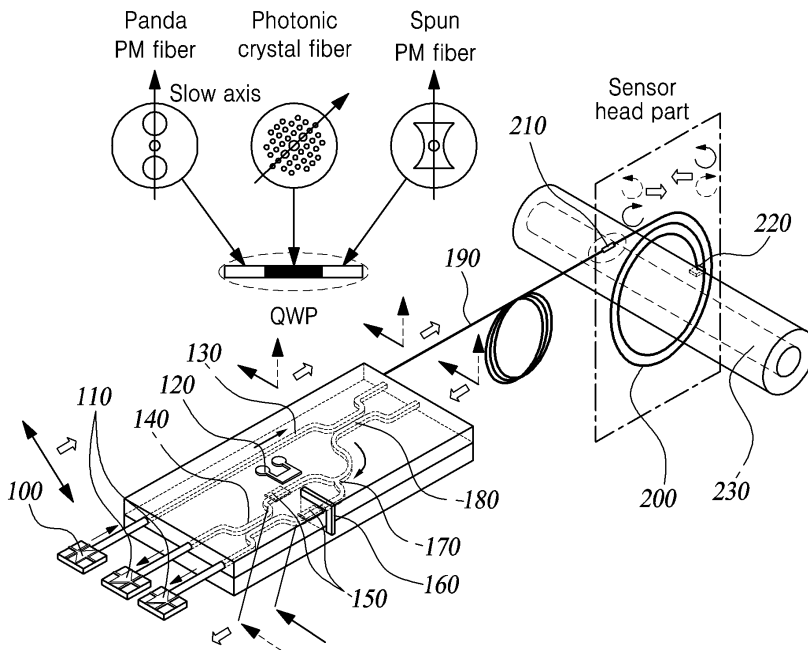
[0056] 상술한 바와 같은, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광자 결정 광섬유를 이용한 광전류센서 및 그의 제작방법을 상기한 설명 및 도면에 따라 도시 하였지만, 이는 예를 들어 설명한 것에 불과하며 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 변화 및 변경 가능하다는 것을 이 분야의 통상적인 기술자들은 잘 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

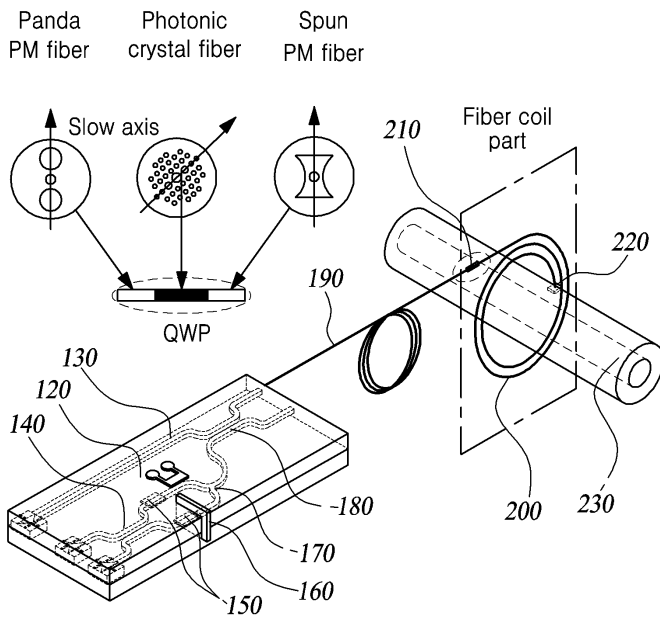
- | | | |
|--------|-------------|----------------|
| [0057] | 100: 광원 | 110: 광검출기 |
| | 120: 위상변조기 | 130: 폴리머광도파로 |
| | 140: 광간섭기 | 150: 편광기 |
| | 160: 편광변환기 | 170: 광파워 분배기 |
| | 180: 광결합기 | 190: 편광유지 광섬유 |
| | 200: 광섬유 코일 | 210: 사분의 일 파장판 |
| | 220: 미러 | 230: 전선 |

도면

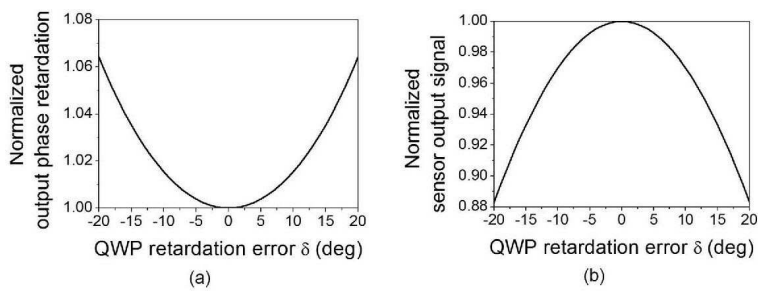
도면1a



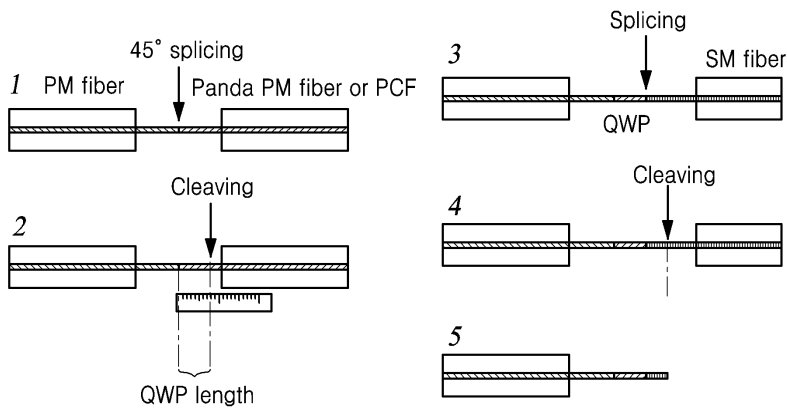
도면1b



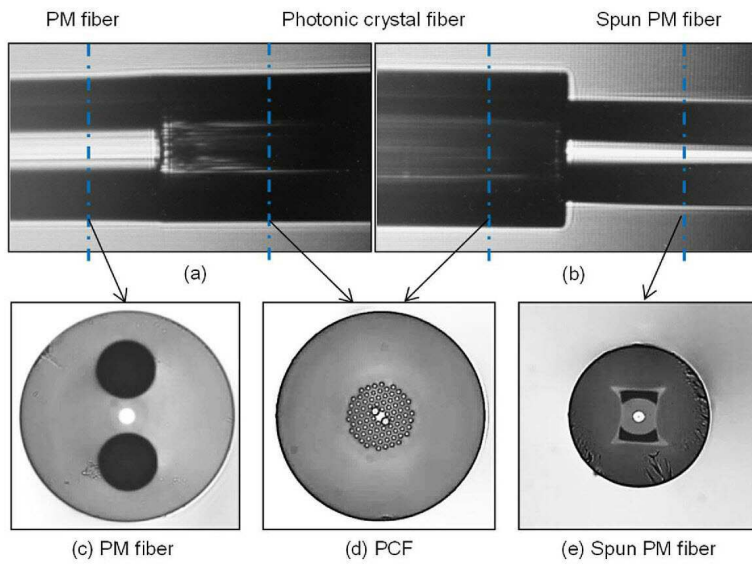
도면2



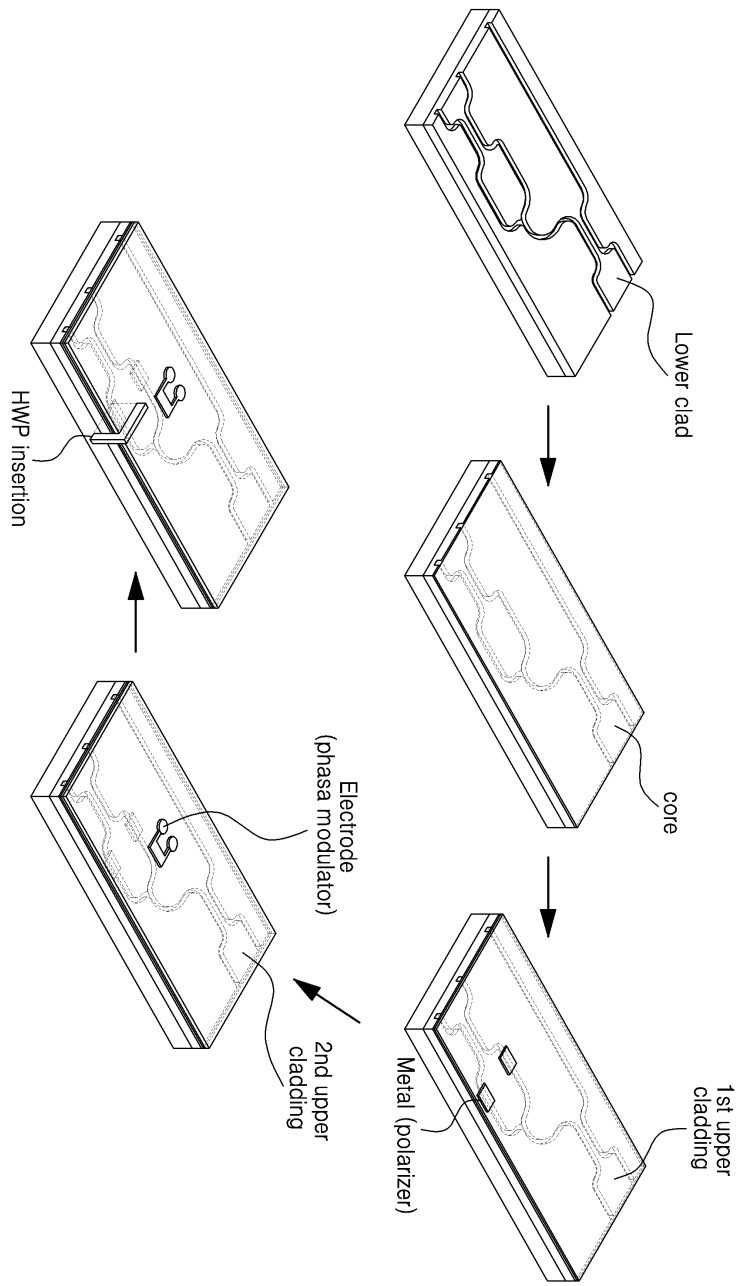
도면3



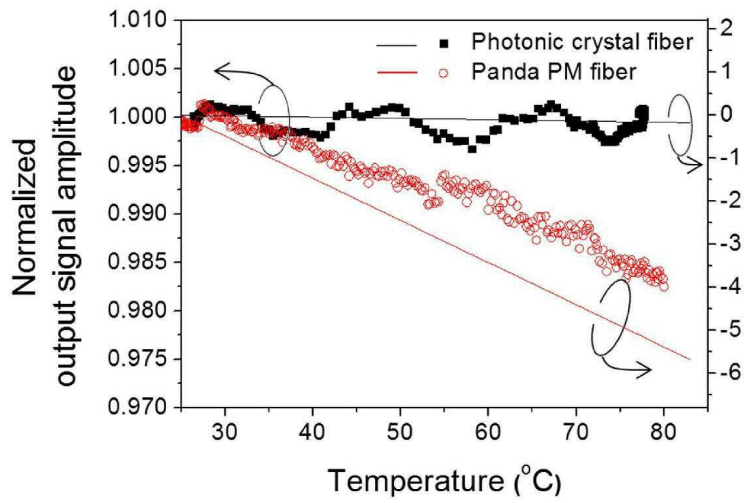
도면4



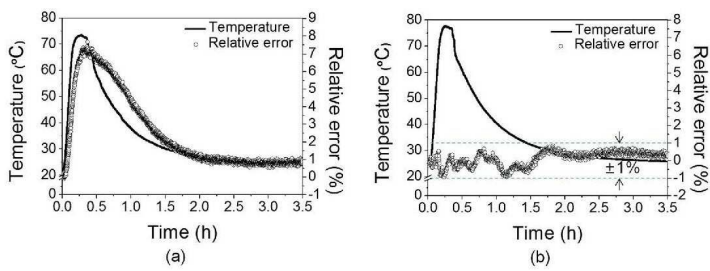
도면5



도면6



도면7



도면8

