



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **334515**

(13) **B1**

**NORGE**

(51) Int Cl.  
*G01D 5/353 (2006.01)*

### Patentstyret

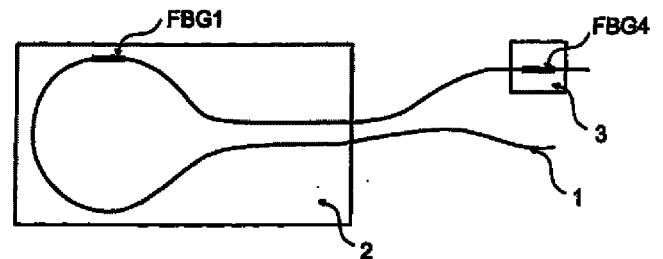
---

(21)	Søknadsnr	20021257	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr
(22)	Inng.dag	2002.03.13	(85)	Videreføringsdag
(24)	Løpedag	2002.03.13	(30)	Prioritet
(41)	Alm.tilgj	2003.09.15		
(45)	Meddelt	2014.03.31		
(73)	Innehaver	Light Structures AS, Fyrstikkbakken 7, 0667 OSLO, Norge		
(72)	Oppfinner	Geir Sagvolden, Bølerskogen 15, 0691 OSLO, Norge Gunnar Wang, Staverhagan 5 B, 1341 SLEPENDEN, Norge Karianne Pran, Gyldenløves gate 28A, 0260 OSLO, Norge		
(74)	Fullmektig	Protector Intellectual Property Consultants AS, Oscarsgate 20, 0352 OSLO, Norge		

---

(54)	Benevnelse	<b>Fiberoptisk sensorpakke</b>
(56)	Anførte publikasjoner	US 5726744 A WO 00/28294 A1 US 6125216 A NO 303470 B1
(57)	Sammendrag	

En fiberoptisk strekksensor for måling av strekk langs minst én akse, samt sensorpakke og systemer inneholdende denne, omfattende en optisk fiber med minst ett Bragg-gitter, hvilket Bragg-gitter utgjør et sensorelement som er følsomt for mekanisk strekk, der Bragg-gitteret (-ene) er festet til en polymerfilm med en definert retning i forhold til minst ett ytre element på strekksensoren, f eks en ytterkant på filmen, der den optiske fiberen danner en i det vesentlige sirkulær løkke på filmen i hvilken løkke Bragg-gitteret(-ene) er plassert i en lineær del av løkken.



Oppfinnelsen er knyttet til fagfeltet tøyningsmåling på overflater slik som angitt i de selvstendige kravenes ingress. Nærmere bestemt er den knyttet til en fiberoptisk Bragg-gitter tøyningsensor for måling av tøying langs minst én akse, f.eks på store strukturer som skip, broer og oljeborings- og produksjonsplattformer.

5

#### BAKGRUNN FOR OPPFINNELSEN

I mange tøynings- og stressovervåkningsanvendelser har fiberoptiske tøyningsensorer fordelaktige egenskaper fremfor elektriske strekkklapper. Men den optiske fiberen er sårbar overfor mekaniske påvirkninger, og må pakkes for å sikre lang levetid i praktisk  
10 anvendelse. Den gjeldende oppfinnelsen angir metoder for å pakke en fiberoptisk tøyningsensor for å beskytte den følsomme delen av sensoren og for å kunne utstyre sensoren med en solid signalkabel.

I systemer for tøyningsmåling er det avgjørende å kjenne den nøyaktige orienteringen  
15 av tøyningssensoren i forhold til strukturen som overvåkes, og det er nyttig om sensorene er pakket på en slik måte at installasjonen i felt forenkles ved at pakken har kanter å sikte langs som er vel definerte i forhold til sensorens orientering i pakken. I en del tilfeller tilsier anvendelsen en én-akset tøyningsmåling, i hvilke tilfeller en enkel tøyningsensor benyttes. I andre tilfeller er det nødvendig med en mer omfattende  
20 karakterisering av den plane tøyningen i overflaten, hvilket gjør det nødvendig å måle tøying langs to eller tre akser. Ved multiaksielle tøyningsmålinger er det nødvendig å kunne orientere de ulike tøyningssensorene i velkjente orienteringer i forhold til hverandre.

25 Flerakset tøyningsmåling har konvensjonelt sett vært gjort med en rosett av elektriske strekkklapper med måleretning i en vinkelavstand på 45 eller 60 grader. Et eksempel på en utførelse av en slik elektrisk strekkapprosett er vist i US 5.726.744, WO 00/28294 og US 6.125.216.

30 Fiberoptiske rosetter med ulike geometriske egenskaper har vært foreslått. En kjent utførelse er vist i WO 00/28294 i hvilken tre fiberoptiske Bragg-gitter er inkorporert i en fiber som er ordnet i et sløyfemønster. Utførelsen har den ulempe at fiberen krysser

over seg selv. Det er velkjent i fagfeltet at slike krysninger utgjør svake punkter der fiberen med sannsynlighet kommer til å knekke hvis den utsettes for trykk. Et tilsvarende problem oppstår i løsningen beskrevet i EP 1148324, der fiberen er forbundet med en film eller folie. I området der fiberen forlater filmen er den ekstra utsatt for spenninger og bøyninger som kan skade fiberen.

En alternativ geometri er foreslått i US 6.125.216 i hvilken fiberen er ordnet i et trekantmønster med Bragg-gitrene plassert langs de rette kantene i trekanten. Denne utførelsen er anbrakt nær en fiberende, hvilket hindrer seriekobling av den foreslåtte rosetten med andre sensorer. Det er videre velkjent i fagfeltet at skarpe svinger på optisk fiber fører til optiske tap i tillegg til redusert levetid som følge av oppsprekking i glasset som over tid kan utvikles til fullstendige brudd i fiberen. Dermed er det ønskelig å unngå svinger med radius under 1-2cm.

En strategi som tillater skarpe svinger er utviklet i WO 00/28294. Her foreslår oppfinnerne å benytte et liknende trekantmønster som nevnt over, men som benytter fiber som har fått redusert diameter mellom Bragg-gitrene. Mens dette løser problemet med optiske tap, etterlates fiberen ytterligere mekanisk svekket ved avsmalningene.

En strategi som unngår skarpe svinger er beskrevet i US 5.726.744, i hvilken oppfinnerne foreslår å anordne fiberen langs en sirkulær bane. Imidlertid kan vi demonstrere at det å bøye et tøyningssensitivt Bragg-gitter vil føre til kryss-følsomhet i den forstand at deler av den følsomme gitterlengden vil plukke opp tøyning langs den ortogonale retningen av den tiltenkte måleretningen. Denne kryssfølsomheten kan beregnes på følgende måte for et uapodisert gitter med lengde  $2b$  som følger en bue med radius  $R$ . I ethvert punkt langs gitteret er det lokale bidraget til tøyningsresponsen i  $x$ -retning  $\cos\theta$ , mens den kryssfølsomme responsen er  $\sin\theta$ . Ved å integrere disse uttrykkene over lengden av gitteret finner vi

$$i_x = 2 \varepsilon_x \int_0^{b/2} \cos \theta \, d\theta = 2 \varepsilon_x \sin \frac{b}{R}$$

$$i_y = 2 \varepsilon_y \int_0^{b/2} \sin \theta \, d\theta = 2 \varepsilon_y \left( 1 - \cos \frac{b}{R} \right)$$

der vi har integrert langs buen fra  $\theta = 0$  til  $\theta = b/R$  for å finne bidraget fra en halvdel av gitterets lengde og multiplisert med to for å finne et totale bidraget antatt symmetri. Den målte verdien vil være summen av de to bidragene. Vi kan finne et enkelt uttrykk for effekten av bøyning dersom vi dividerer  $i_y/i_x$ , substituerer  $b/R=2\phi$  og videre substituerer

5  $1 - \cos 2\phi = 2 \sin^2 \phi$  og  $\sin 2\phi = 2 \sin \phi \cos \phi$ . Da er

$$\frac{i_y}{i_x} = \frac{2 \epsilon_r (1 - \cos 2\phi)}{2 \epsilon_r \sin 2\phi} = \frac{\epsilon_r \sin^2 \phi}{\epsilon_r \sin \phi \cos \phi} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r} \tan \frac{b}{2R}.$$

Ved å sette inn vanlige verdier for gitterlengde og bøyeradier finner vi at denne effekten vil ha potensielt store konsekvenser for måling av små tøyninger dersom det er store  
10 perpendikulære tøyninger tilstede. Det er derfor viktig for ytelsen til Bragg-gitter tøyningssensorer at gitrene er montert langs rette linjer.

Som følge av den termiske egenresponsen til sensoren og den termiske utvidelsen av strukturen på hvilken sensorene er montert, er det vanligvis ønskelig å måle tempera-  
15 turen, eller i det minste finne et mål på sensorens iboende termiske respons, for derigjennom å muliggjøre termisk kompenserte tøyningsverdier. Dette gjøres konvensjonelt med et tøyningssolert Bragg-gitter multiplekset på samme fiber som tøyningssensoren(e). Teknikker for å tøyningssisolere gitter anbrakt nær en ende av en optisk  
20 fiber er beskrevet av Haran et al i US 6.125.216. For å kunne multiplekse flere rosetter på en enkeltfiber er det nødvendig å kunne danne en i-linjen temperatur-sensor, dvs en tøyningssisolierende pakke fra hvilken begge fiberender er tilgjengelige for skjøting.

Formålet med den herværende oppfinnelsen er å fremstille er pakke for fiberoptiske Bragg-gitter tøyningssensorer som letter installasjon i relativt røffe omgivelser, som  
25 enkelt kan opplinjeres mot akser i strukturen og som kan kobles til en utlesningsenhet via en solid fiberoptisk kabel. Videre har pakken egenskaper som tillater pre-orientering av de tøyningssfølsomme Bragg-gitrene i en rosett med en vinkelavstand på f.eks 45 eller 60 grader uten å introdusere skarpe svinger eller krysning av fiberen, hvilket ville redusere levetiden til sensorene, samtidig som metoden unngår å introdusere  
30 kryssfølsomhet gjennom bøyning av Bragg-gitteret. En typisk anvendelse for slike

sensorer er strukturovervåkning av store strukturer som skip, broer samt oljeborings- og produksjonsplattformer.

#### SAMMENDRAG AV OPPFINNELSEN

- 5 I følge den herværende oppfinnelsen beskrives en fiberoptisk tøyningssensor med ett eller flere tøyningfølsomme Bragg-gitre inkorporert i en enkel optisk fiber, hvilken fiber er montert på en polymerfilm i en i det vesentlige sirkulær bane, hvilken bane avviker fra en sirkel langs Bragg-gitterets lengde, hvilket gitter er montert i en rett linje. Oppfinnelsen er kjennetegnet slik som angitt i det uavhengige patentkravet.
- 10 Ifølge en foretrukket utførelse av oppfinnelsen er den optiske fiberen utstyrt med et tøyningisolert Bragg-gitter for måling av temperatur, for derigjennom å fremskaffe informasjon nødvendig for å kompensere tøyningverdiene målt av det/de tøyningfølsomme Bragg-gitter for termiske effekter.
- 15 I en utførelse er tøyningisoleringen dannet ved å montere det temperaturfølsomme Bragg-gitteret i en løkke på fiberen, hvilken løkke er plassert i en fure mellom to stive plater. Utgangene fra furen bør forsegles.
- 20 Ifølge et videre aspekt ved oppfinnelsen beskrives en sensorpakke for fiberoptiske tøyningssensorer egnet for relativt barske omgivelser i hvilken den optiske fiberen er skjøtt til en solid kabel, og hvor enden av kabelen, skjøtene, tøyningisolasjonspakken og en ende av polymerfilmen med påmontert Bragg-gitter er inkorporert i en strekkavlastert støpt i en fleksibel polymer. Strekkavlasteren har fortrinnsvis en plan underside
- 25 for å lette fiksering til overflaten av en struktur.
- Strekkavlasteren kan videre ha en tykkelsesprofil som tillater innlegging av polymerfilmen med tøyningssensor(er) og strekkavlasteren under et lag av fiberforsterket polymer for ytterligere mekanisk beskyttelse.
- 30 I praktisk anvendelse av sensorpakken ville den være festet til overflaten av en struktur. En ende av den optiske fiberen i kabelen ville være koblet til et system for belysning og

signalavlesning. Signalene fra Bragg-gitrene kunne tolkes ved hjelp av en rekke metoder slik som tids- eller koherensmultipleksing, men den foretrukne utførelsen benytter bølglengdemultipleksing av Bragg-gitrene på fiberen. Den andre enden av den optiske fiberen kunne være skjøtt til en andre sensorpakke med Bragg-gitre ved

5 kompatible bølglengder.

Avlesningssystemet ville måtte kunne tolke signalene fra tøyings- og temperatur-sensorene, og ut fra denne informasjonen kompensere tøyingsverdiene for den iboende temperaturresponsen til Bragg-gitrene og muligens den termiske utvidelsen av

10 strukturen.

#### KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

- Figur 1A Optisk fiber 1 med Bragg-gitter FBG1 montert på en polymerfilm 2, hvilket Bragg-gitter er montert langs en rett linje, og med et andre Bragg-gitter FBG4 isolert fra tøyning i en pakke
- 15
- Figur 1B Optisk fiber 1 med Bragg-gitre FBG1-FBG3 dannende en rosett montert på en polymerfilm 2, hvilke Bragg-gitre er montert langs rette linjer, og med et fjerde Bragg-gitter FBG4 isolert fra tøyning i en pakke
- Figur 2A Tøyningsisolert Bragg-gitter i en løkke
- 20
- Figur 2B Tøyningsisolert Bragg-gitter på en avstiver
- Figur 3 Film med tøyingsfølsomme Bragg-gitre delvis inkorporert i en støpt strekkavlaster, fra hvilken kommer ut en solid fiberoptisk kabel
- Figur 4 Diagrammatisk oversikt over et sensorsystem med en rekke sensorpakker koblet til en lyskilde og en datamaskin-styrt avlesningsenhet

25

#### DETALJERT BESKRIVELSE AV OPPFINNELSEN

Figur 1A viser en optisk fiber 1 inkorporerende et Bragg-gitter FBG1 følsomt for tøyning, hvilket gitter er montert på en polymerfilm 2, f.eks. laget av polyimid. Den optiske fiberen følger en sirkulær bane unntatt ved Bragg-gitterets posisjon, hvilket

30 gitter er festet til filmen i en rett linje for å unngå variasjoner i gitterresponsen langs gitterets lengde. Som nevnt over bør minimum bøyingsradius for fiberen ikke overstige 1-2cm, selv om man kan tenke seg korttidsanvendelser der radien kan tillates

å være mindre. På samme fiber er valgfritt et andre Bragg-gitter FBG4 inkorporert, hvilket gitter er plassert i en pakke 3 som virker til å isolere gitteret fra tøyning med det formål å fremskaffe en temperaturmåling som kan benyttes til å kompensere for det termiske signal målt av det tøyningfølsomme gitteret.

5

Figur 1B viser en andre utførelse av oppfinnelsen hvori en optisk fiber 1 inkorporerende tre Bragg-gittere FBG1-FBG3 følsomme for tøyning er montert på en polymerfilm 2. Den optiske fiberen følger en sirkulær bane unntatt ved Bragg-gitrenes posisjoner, hvilke gitre er festet til filmen i en rett linje og med en definert vinkelavstand.

10 Derigjennom danner de tre gitrene en rosett anvendelig til å måle tøyningstilstanden i en flate. På samme fiber er inkorporert et fjerde gitter FBG4 montert i en pakke som virker til å isolere gitteret fra tøyning og hvilket gitter fremskaffer en temperaturmåling som kan benyttes til å kompensere for det termiske bidraget til signalet fra FBG1-FBG3.

15 I tillegg til utførelsene vist i figurene 1A og 1B er en utførelse mulig med to sensorer, f.eks. med en vinkelavstand på 45 eller 60 grader eller med perpendikulær orientering, for måling av tøyning langs to akser.

Figur 2A viser en utførelse av en tøyningisolerende pakke hvori en løkke av den optiske fiberen 1 inkorporerende et Bragg-gitter FBG4 er plassert i en sirkulær fure 6 i en sirkulær polymerplate 4, den optiske fiberen passerende inn og ut av furen 6 via v-spor 7 tangentielle til furen 6. Furen er forseglet ved å plassere et sirkulært lokk over platen 4, og lukke v-sporene 7 med en passende forsegling.

25 Figur 2B viser en andre utførelse av en tøyningisolerende pakke utformet for å fremskaffe en måling av en referansetemperatur. Bragg-gitteret FBG4 inkorporert i den optiske fiberen 1 er plassert på en bit av et materiale med høy elastisk modulus, en avstiver 8, hvilket gitter er festet til avstiveren med lim med høy elastisk modulus. Avstiveren med høy elastisk modulus er fortrinnsvis laget av et materiale med samme termisk utvidelse som den optiske fiberen, og med fordel av ikke-krystallinsk kvarts.

30 Avstiveren kan anta mange former, men kan for eksempel være formet som en stav med et v-spor, eller som en U-profil. Den optiske fiberen og avstiveren er videre innkapslet i

en polymer med lavere elastisk modulus 10, hvilken virker til å redusere tøyningsskonsentrasjoner i den optiske fiberen ved hver ende av avstiveren.

Figur 3 viser en sammenstilling av en sensorpakke som er egnet for praktiske anvendelser hvori en optisk fiber 1 med Bragg-gitre FBG1-FBG3 er montert i et rosettmønster mellom to polymerfilmer 2, fiberen videre inkorporerende et fjerde Bragg-gitter FBG4 i en tøyningssisolerende pakke, hvilken fibers to ender er skjøtt til en solid kabel 12. En ende av filmen 2 og kablen 12 er innkapslet i en støpt strekkavlaster i polymer 11, hvilken videre innkapsler den tøyningssisolerende pakken 3. Strekkavlasteren 11 er fortrinnsvis støpt i en fleksibel og motstandsdyktig polymer som polyuretan. Strekkavlasteren har en plan flate som muliggjør godt feste til en overflate når den monteres med et passende lim, og en lav profil som gjør den egnet for overflateinnlegging under et beskyttende lag av fiberforsterket polymer.

Sensorpakken er tenkt brukt i multipleksede sensorsystemer som skjematisk vist i Figur 4. En rekke sensorpakker P1-P3 er montert på en struktur ved bruk av et passende limstoff med den hensikt å karakterisere tøyningen i strukturen. P1-P3 er skjøtt ved sammensmelting eller på annen måte optisk koblet til hverandre, dannende en optisk bane i den optiske fiberen 1 fra en lyskilde 13 via en optisk kobler 16 til hvert av sensorgitrene inkorporert i sensorpakkene. Lyset reflektert fra gitrene ledes via den optiske kobleren 16 til en mottaker 14 som detekterer lyset og konverterer råsignalet til elektriske signaler som representerer målingene gjort av Bragg-gitrene. En fagperson vil vite at dette kan gjøres på en rekke måter, som ved bruk av et skannende Fabry-Perotfilter, et Mach-Zehnder interferometer eller en optisk spektrumsanalysator. Det elektriske signalet sendes videre til en signalbehandlingsenhet 15 via en egnet elektrisk forbindelse 17. Signalbehandlingsenheten er hensiktsmessig en digital datamaskin.

Sensorpakkene i figur 4 er orientert med en kjent orientering i forhold til hverandre og/eller en referanseramme for maksimal presisjon i målingene. For å oppnå dette kan filmen eller strekkavlasteren være utstyrt med minst en kant som indikerer orienteringen av minst en sensor, f.eks. ved at ett Bragg-gitter/en måleretning er parallell med en referansekant av den støpte strekkavlasteren. For det tilfelle at hver sensorløkke



inneholder kun en sensor, kan orienteringen av sensorene endres periodisk eller ifølge forutsette stress-retninger som skal måles. Ved å sammenligne stresset målt av et antall sensorer i ulike posisjoner over et større område, som skroget til et skip, kan man kartlegge lastsituasjonen i hele området.

5

Sensorene, optiske kilder og detektorer er i likhet med resten av utstyret tilpasset operasjon i et valgt bølgelengdeintervall, og er i og for seg kjent for en fagmann på området. Typisk vil man velge bølgelengder i 1550nm-området, og muligens i 1300nm-området, siden disse bølgelengdeområdene er i vanlig bruk innen telekommunikasjon og det derfor finnes et stort utvalg av rimelig og kommersielt tilgjengelig utstyr.

10

Bølgelengdeområdet til systemet kan også tilpasses til utlesningsteknikken. Som nevnt over kan signalene fra Bragg-gitterne tolkes vha tids- og koherensmultipleksing, men den foretrukne utførelsen inkluderer bølgelengdemultipleksing av Bragg-gitrene på fiberen, og systemet dekker et tilstrekkelig stort bølgelengdeområde til at hver Bragg-  
15 sensor har en unik Bragg-bølgelengde slik at den kan skilles fra andre sensorer.

15

I tillegg til utlesningssystemet 13, 14, 15, 16, 17 illustrert i figur 4, kan et tilsvarende system plasseres i andre enden av sensorpakkene, for slik å måle fra begge ender og på den måten gjøre det mulig å fortsette overvåkingen av sensorpakkene selv om fiberen  
20 skulle knekke noe sted. Alternativt kan begge ender av den optiske fiberen kobles til det samme utlesningssystemet som dermed er i stand til å overvåke systemet i begge retninger.

20

Ulike modifikasjoner av de presenterte utførelsene er mulig innenfor kravenes omfang.

25

P a t e n t k r a v

1. En sensorpakke omfattende en fiberoptisk strekksensor for måling av strekk langs minst én akse, hvilken strekksensor omfatter en optisk fiber med minst ett Bragg-gitter, hvilket Bragg-gitter utgjør et sensorelement som er følsomt for mekanisk strekk, der den optiske fiberen danner en i det vesentlige sirkulær løkke
- 5 k a r a k t e r i s e r t v e d a t hvert av nevnte minst ett Bragg-gitter er plassert i en lineær del av løkken,
- at løkken er festet på en polymerfilm med en definert retning, for eksempel i forhold til polymerfilmens ytterkant,
- 10 og at der sensorpakken er forsynt med en støpt strekkavlastning i et fleksibelt polymermateriale ved den kanten av filmen som omfatter den optiske fiberens utgang slik at fiberen strekker seg fra filmen og i det minste gjennom en del av strekkavlasteren.
- 15 2. En sensorpakke ifølge krav 1 der polymerfilmen er laget av polyimid.
3. En sensorpakke ifølge krav 1 omfattende tre Bragg-gitter plassert i et plan med 45 grader vinkel i forhold til hverandre, der hvert Bragg-gitter er plassert på en i det vesentlige lineær del av løkken.
- 20 4. En sensorpakke ifølge krav 1 omfattende en temperatur-referanse omfattende et strekk-isolert fiberoptisk Bragg-gitter.
5. En sensorpakke ifølge krav 4 der det strekk-isolerte fiberoptiske Bragg-gitteret er plassert i en løkke i den optiske fiberen, hvilken løkke er plassert i en sirkulær fure mellom to plater og der utgangene fra furen er forsynt med en forsegling.
- 25 6. En sensorpakke ifølge krav 4, der det strekk-isolerte Bragg-gitteret er festet til et materiale med høy elastisk modulus, der det strekk-isolerte Bragg-gitteret og materialet med høy elastisk modulus er innkapslet i et materiale med lav elastisk modulus som dekker hele gitterets lengde og tilleggsfiber på begge sider.
- 30

7. En sensorpakke ifølge krav 1, der en temperatur-referanse omfattende et strekk-isolert fiberoptisk Bragg-gitter er plassert i strekkavlastningen.
8. En sensorpakke ifølge krav 7 der kabelens strekkavlastning er støpt i polyuretan.
9. En sensorpakke ifølge krav 7 der minst ett Bragg-gitter og dennes følsomhetsretning er parallell med en referansekan på strekkavlastningen.
- 10 10. En sensorpakke ifølge krav 7 der den videre er mekanisk beskyttet ved montering på en struktur ved laminering av pakken med film og andre deler av strekkavlastningen under et fiberforsterket polymerlag.
11. Et sensorsystem omfattende minst en sensorpakke ifølge et av kravene 1-15 10, omfattende en optisk utlesningsenhet som er plassert ved minst én av endene på den optiske fiberen.
12. Et sensorsystem omfattende minst en sensorpakke ifølge et av kravene 1-20 10 der strekksensoren eller sensorpakken er festet på en struktursoverflate og er koblet til en optisk utlesningsenhet som videresender bølgelengdeinformasjon til et dataprogram for konvertering av bølgelengdene til belastnings- og eventuelt temperaturinformasjon.

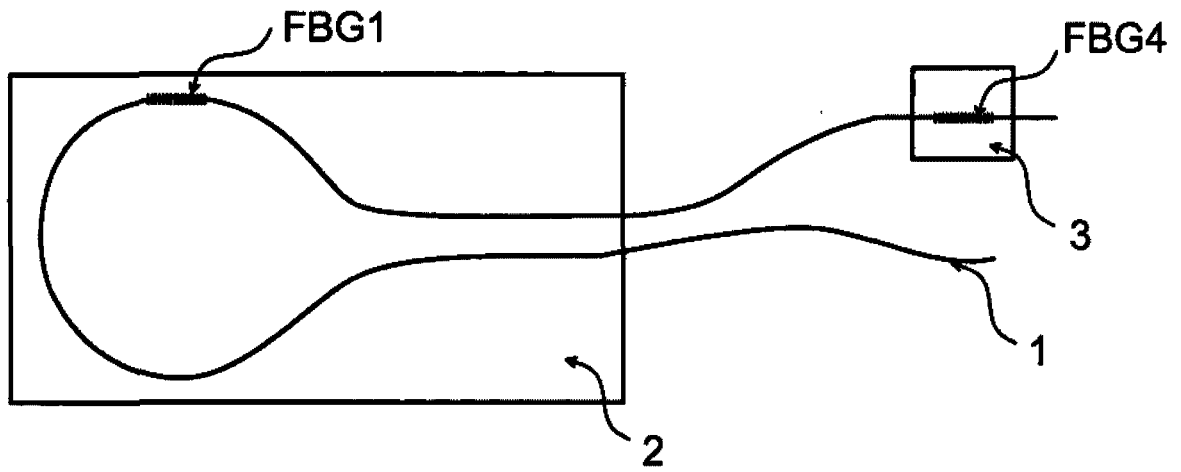


FIG. 1A