

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102022000026169
Data Deposito	21/12/2022
Data Pubblicazione	21/06/2024

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	J	3	45

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	F	1	21

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	D	5	353

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	J	3	12

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	N	21	63

Titolo

Filtro ottico per spettroscopia

Filtro ottico per spettroscopia

CAMPO TECNICO

La presente invenzione si riferisce ad un filtro ottico, in particolare un interferometro di Mach-Zehnder, per sopprimere o attenuare la componente elastica di Rayleigh di una luce diffusa o riflessa. Detto filtro ottico è integrabile in almeno un circuito fotonico. Inoltre, la presente invenzione si riferisce ad uno spettrometro che comprende detto filtro e un apparato per la spettroscopia, microscopia o endoscopia di Brillouin comprendente detto spettrometro.

STATO DELL'ARTE

La spettroscopia di Brillouin è una tecnica nota per misurare otticamente le proprietà meccaniche della materia. La diffusione luminosa di Brillouin è un processo di diffusione inelastico derivante dall'interazione della luce con onde acustiche spontanee della materia (fononi acustici). La luce diffusa elasticamente (Rayleigh) da un sistema biologico presenta la medesima frequenza del fascio di illuminazione. Tuttavia, lo spettro mostra due bande laterali aggiuntive, solitamente definite come picchi di Brillouin Stokes (SB) e picchi di Brillouin Anti-Stokes (ASB), leggermente spostate di 1-20 GHz dalla frequenza di Rayleigh.

La frequenza e la larghezza di riga dei picchi di Brillouin sono indicative delle proprietà viscoelastiche di un campione. In particolare, noti la densità e l'indice di rifrazione di un materiale, lo spostamento in frequenza e la larghezza di riga Brillouin offrono informazioni sui moduli elastici

caratterizzanti il materiale illuminato.

Metodi standard per misurare le proprietà meccaniche di un materiale richiedono un contatto fisico con il campione, rendendo pertanto queste tecniche invasive e limitate alla superficie topografica. Al contrario, la microscopia o l'endoscopia di Brillouin utilizza la luce come sonda in modo da evitare qualsiasi forma di contatto. La spettroscopia di Brillouin sonda le proprietà meccaniche con una risoluzione ottica sotto al micron (micrometro) e, applicata alla microscopia, può realizzare un'analisi tridimensionale del volume dei sistemi biologici (ad esempio cellule e tessuti).

Poiché le proprietà biomeccaniche sono coinvolte criticamente in varie forme di patologie come ad esempio l'aterosclerosi, il cancro e il glaucoma, la spettroscopia di Brillouin ha grandi potenzialità di diventare un nuovo strumento diagnostico per il settore biomedico.

Il componente principale di una spettroscopia, microscopia o endoscopia di Brillouin è lo spettrometro che richiede sia una risoluzione spettrale inferiore al GHz che un alto contrasto spettrale. Un contrasto spettrale elevato è per esempio richiesto per misurare campioni biologici opachi, dove la luce diffusa elasticamente e le riflessioni sono vari ordini di grandezza superiori al debole segnale di luce di Brillouin. Quando la quantità di luce di background elastica supera il contrasto degli spettrometri, emergono segnali parassiti di crosstalk lungo l'asse di dispersione, i quali oscurano i picchi di Brillouin che sono meno intensi. Come descritto da S. M. Lindsay et al. *J.Phys. E* 10, 150 (1977), nella spettroscopia di Brillouin il campione è illuminato da una sorgente laser e la luce diffusa è analizzata

spetttralmente utilizzando interferometri multipli di Fabry-Perot (FP) posizionati in tandem. Sebbene gli interferometri FP e gli "etalon" abbiano un contrasto e una risoluzione spettrale notevoli, questi solitamente richiedono un tempo di integrazione (dwell time) lungo (> 1 sec) che determina una spettroscopia di Brillouin limitata a misure di singolo punto, non consentendo quindi l'estensione ad una tecnica di imaging.

Negli ultimi decenni, è stato introdotto un nuovo tipo di interferometro FP etalon, noto come VIPA (Virtual Imaged Phased Array). L'impiego di spettrometri VIPA nella spettroscopia di Brillouin ha fatto scendere il tempo di acquisizione dei dati da decine di secondi fino a circa 100 msec utilizzando sorgenti a bassa potenza ottica (< 10 mW), garantendo allo stesso tempo l'impiego di una spettroscopia di Brillouin in una modalità di imaging tridimensionale senza contatto per mappare le proprietà viscoelastiche nel volume di sistemi biologici. Sebbene molto efficienti, gli spettrometri VIPA convenzionali sono intrinsecamente limitati da un contrasto spettrale di circa 30 dB. Per aumentare il contrasto spettrale nella microscopia di Brillouin, attualmente esistono metodi che utilizzano diversi etalon VIPA (multi-stage VIPA) posizionati in cascata tra loro [G. Scarcelli et al. *Opt. Express* 19, 10913 (2011)]. Tuttavia, ciò comporta un'efficienza ridotta a circa il 25% con associato un aumento del tempo di acquisizione dell'immagine. Inoltre, spettrometri VIPA in cascata necessitano di un alto numero di componenti ottiche che rendono questi sistemi costosi e difficili da allineare.

In aggiunta, l'attenzione dovuta alla tolleranza di fabbricazione relativa al parallelismo e all'uniformità delle superfici ottiche (tipicamente superiori a 100λ) impone alti

costi di produzione. Sebbene siano considerevoli gli sforzi per l'impiego di spettrometri di Brillouin, questi sono ancora privi di un sufficiente contrasto spettrale per misurare campioni altamente eterogenei e opachi come ad esempio i tessuti umani. Per superare questi svantaggi, negli ultimi anni sono stati proposti molti metodi di filtraggio con l'obiettivo di sopprimere la luce elastica di fondo. Tuttavia, le soluzioni attualmente presenti si basano ancora su componenti ingombranti e su interferometri larghi che sono particolarmente sensibili alla temperatura e allo spostamento in frequenza del laser rendendo pertanto necessario un continuo riallineamento e ricalibrazione. Recentemente, sono stati effettuati progressi nell'ambito dello scattering di Brillouin stimolato al fine di velocizzare l'acquisizione dei dati. Tuttavia, questo approccio richiede l'uso di laser ad alta potenza che non sono pratici in un contesto di misure *in-vivo* e di applicazioni cliniche.

È scopo della presente invenzione superare in parte o *in toto* gli inconvenienti sopra menzionati dei sistemi noti e di fornire dispositivi ottici, come ad esempio filtri ottici oppure spettrometri comprendenti detti filtri ottici, che migliorino la soppressione della componente elastica della luce diffusa, che riducano la dipendenza delle prestazioni dalle dimensioni della struttura realizzata e che possano adattare automaticamente ed in tempo reale il punto di lavoro alle variazioni ambientali o di segnale. In particolare, è scopo della presente invenzione quello di fornire dispositivi ottici che siano in grado di effettuare misure su materiali biologici (ed eventualmente su materiali non biologici) con una spettroscopia, microscopia o endoscopia di Brillouin, da cui è possibile ricavare proprietà meccaniche o strutturali sui campioni analizzati.

DESCRIZIONE DELL'INVENZIONE

Si presenta qui un filtro ottico, uno spettrometro comprendente detto filtro ottico ed un apparato comprendente lo spettrometro secondo le rivendicazioni indipendenti. Forme di realizzazione del filtro e dello spettrometro sono descritte nelle corrispondenti rivendicazioni dipendenti.

In un primo aspetto dell'invenzione, è fornito un filtro ottico per sopprimere o attenuare la componente elastica di Rayleigh di una luce diffusa o riflessa. Il filtro ottico è posizionabile tra una sorgente di luce diffusa ed un analizzatore spettrale. Il filtro ottico è integrabile in un circuito fotonico attivo e/o passivo.

Il filtro ottico comprende:

almeno un ingresso per ricevere la luce diffusa o riflessa;
almeno un elemento partitore per dividere la luce diffusa in un primo fascio di luce che viaggia lungo un primo percorso ed in un secondo fascio di luce, separato dal primo fascio di luce, che viaggia lungo un secondo percorso, in cui la differenza tra il primo percorso ed il secondo percorso, definita come la differenza di percorso, è diversa da zero;
almeno un modulatore di fase posizionato in corrispondenza del primo e/o del secondo percorso;
un sistema di controllo a circuito chiuso accoppiato al modulatore di fase;
un elemento combinatore per combinare il primo fascio di luce in uscita dal primo percorso con il secondo fascio di luce in uscita dal secondo percorso, ed
una prima uscita ed una seconda uscita accoppiate all'elemento combinatore,

in cui la prima uscita è configurata per propagare un primo segnale di uscita dove la componente elastica di Rayleigh dello spettro di luce è attenuata o soppressa a seguito di un'interferenza distruttiva di detta componente elastica di Rayleigh tra il primo fascio di luce ed il secondo fascio di luce.

Il filtro ottico può essere un interferometro di Mach-Zehnder (MZI). In particolare, il filtro può essere costituito da un singolo MZI o da una pluralità di MZI collegati tra loro, ad esempio in serie.

L'impiego di un filtro ottico costituito da almeno un MZI migliora le caratteristiche di un sistema ottico di cui può far parte. Infatti, il filtro ottico aumenta il grado di soppressione della componente elastica e rende la fabbricazione del sistema di cui fa parte meno complessa e meno costosa. In altre parole, questo filtro ottico permette l'impiego di un analizzatore spettrale di dimensioni ridotte, aumentando così la compattezza del sistema ottico totale.

Un filtro ottico che impiega almeno un MZI arriva tipicamente a prestazioni maggiori di 10 volte superiori in termini di estinzione rispetto ad un filtro ottico differente, che impiega ad esempio risonatori ottici ad anello, grazie alla possibilità di un bilanciamento 50%-50% dell'ampiezza della luce in ingresso sui due precorsi del filtro. Per come è strutturalmente configurato, un risonatore ad anello che funziona da filtro ha di default un margine d'errore elevatissimo a causa dell'andamento esponenziale del grado di estinzione in funzione della separazione tra la guida d'onda di entrata ed il risonatore ad anello. Questo si riflette su una minore estinzione rispetto al filtro ottico che impiega un

MZI. Inoltre, un filtro ottico costituito da almeno un MZI è più facilmente riproducibile rispetto invece ad un filtro con risonatore ad anello dato che quest'ultimo è soggetto ad una minore riproducibilità di fabbricazione a causa della limitata risoluzione del processo di litografia.

Il filtro MZI offre inoltre la possibilità di essere utilizzato come filtro dinamico adattativo a "circuitto chiuso" (closed loop), ovvero permette di tarare automaticamente ed in maniera continua il picco di soppressione alla lunghezza d'onda di Rayleigh.

In particolare, le due uscite del filtro ottico permettono l'impiego di corrispondenti segnali di uscita utilizzabili per il controllo a circuito chiuso, risolvendo il problema tecnico di allineare e mantenere la larghezza di banda di soppressione del filtro alla frequenza della sorgente luminosa che produce la luce diffusa (ad es. la sorgente laser). Ciò conduce ai seguenti vantaggi:

- riduzione del rumore dovuto alla luce diffusa di Rayleigh e riflessioni speculari e quindi un segnale-rumore dei picchi Brillouin più alto;
- riduzione degli errori regolando automaticamente gli input del sistema potendo così contenere l'overshooting;
- miglioramento della stabilità di un sistema instabile a causa dei drift in frequenza del laser oppure delle variazioni termiche dell'ambiente circostante;
- variazione della sensitività del sistema;
- aumento della robustezza rispetto a disturbi esterni al sistema; e
- una prestazione affidabile e riproducibile.

Poiché la differenza di percorso è diversa da zero, all'interno di questo filtro è possibile creare una differenza di cammino ottico tra i due fasci di luce che viaggiano al suo interno. All'aumentare della differenza di cammino ottico, diminuisce il cosiddetto free spectral range (FSR) dell'apparato ottico. Ciò è particolarmente vantaggioso nel caso della spettroscopia di Brillouin i cui valori tipici di FSR variano tra 10 e 50 GHz. Per questo motivo, la differenza tra il primo percorso ed il secondo percorso, ossia la differenza di percorso, di questo filtro ottico è vantaggiosamente compresa tra 5 mm e 30 mm. Naturalmente, possono essere utilizzati anche altri valori, al di fuori di questo intervallo, per la differenza di percorso.

Utilizzando almeno un modulatore di fase all'interno di almeno uno dei due percorsi, è possibile modulare o regolare la posizione della interferenza agendo sulla tensione applicata al modulatore. Uno spostamento di π è sufficiente per garantire un intervallo di regolazione equivalente ad un singolo FSR.

Pertanto, questo filtro ottico è particolarmente vantaggioso per essere impiegato per una spettroscopia di Brillouin e per sopprimere in modo efficace la componente elastica di Rayleigh.

Come menzionato precedentemente, il filtro ottico è integrabile all'interno di un circuito fotonico attivo e/o passivo, ad esempio nanometrico. Il circuito fotonico può essere combinato anche con un circuito elettronico.

In una forma di realizzazione, il filtro ottico può essere completamente integrato all'interno di detto circuito fotonico attivo e/o passivo. In un esempio, il circuito può essere caratterizzato da guide d'onda il cui indice di rifrazione del

materiale interno "core" (Si_3N_4 -nitruro di silicio) è maggiore rispetto a quello del materiale di rivestimento "cladding" (SiO_2 -ossido di silicio). Tutte le caratteristiche descritte di seguito relative al filtro ottico che è integrabile all'interno del circuito fotonico valgono anche per il filtro ottico direttamente integrato in detto circuito.

In un secondo aspetto dell'invenzione, è fornito uno spettrometro per analizzare lo spettro di una luce diffusa.

Lo spettrometro comprende:

un ingresso principale per ricevere la luce diffusa;

almeno un filtro ottico per sopprimere o attenuare la componente elastica di Rayleigh della luce diffusa o riflessa secondo il primo aspetto dell'invenzione, in cui detto filtro è accoppiato all'ingresso principale dello spettrometro; e

un analizzatore spettrale per selezionare e separare determinate componenti in frequenza multiple della luce diffusa, per misurare l'intensità delle diverse componenti in frequenza e ricostruire il profilo dello spettro della luce diffusa, in cui detto analizzatore spettrale è accoppiato alla prima uscita del filtro,

in cui almeno il filtro è costituito da un circuito integrato fotonico.

Utilizzando il filtro ottico secondo la presente invenzione all'interno di uno spettrometro, è possibile sopprimere la componente elastica di Rayleigh della luce diffusa in modo più efficace e senza la necessità di componenti ottiche. In particolare, è possibile accoppiare il filtro ad un analizzatore spettrale aumentando il rapporto segnale-rumore dei picchi Brillouin.

In un terzo aspetto dell'invenzione, è fornito un apparato o apparecchiatura comprendente lo spettrometro secondo il secondo aspetto dell'invenzione.

In particolare, tale apparato è adatto per una spettroscopia, microscopia o endoscopia di Brillouin. L'apparato pertanto può comprendere inoltre una sorgente luminosa come ad esempio un laser nel campo del visibile (ad esempio un laser a 400-650 nm) o nel vicino infrarosso (ad esempio un laser a 650-1500 nm) e un bersaglio (target) di materiale biologico. La luce diffusa dall'interazione tra laser e target viene così condotta nello spettrometro passando per il filtro ottico e viene raccolta dall'analizzatore spettrale. L'apparato può inoltre comprendere uno o più calcolatori elettronici connessi all'analizzatore spettrale e/o al filtro ottico per gestire l'analisi spettrale, acquisire i dati rilevati, analizzarli e visualizzare i risultati contenuti le informazioni sullo spettro di luce.

In un aspetto ulteriore dell'invenzione, è fornito l'uso di un circuito integrato ottico comprendente almeno un filtro secondo il primo aspetto per sopprimere o attenuare la componente elastica di Rayleigh di una luce diffusa o riflessa, in particolare per l'analisi spettrale di campioni opachi o semi-trasparenti, oppure uso di un circuito integrato ottico comprendente uno spettrometro secondo il secondo aspetto, o un apparato secondo il terzo aspetto, per analizzare lo spettro di una luce diffusa, in particolare per l'analisi spettrale di campioni opachi o semi-trasparenti.

Questi ed altri aspetti della presente invenzione risulteranno maggiormente chiari alla luce della seguente descrizione di alcune forme di realizzazione preferite di seguito descritte.

- Fig. 1 mostra una rappresentazione schematica dell'apparato comprendente lo spettrometro ed il filtro ottico secondo un esempio.
- Fig. 2 mostra una rappresentazione schematica del filtro ottico secondo un esempio.
- Fig. 3a-b mostrano una rappresentazione schematica di due filtri ottici secondo un esempio.
- Fig. 4a-b mostrano il principio operativo di un interferometro di Mach-Zehnder.
- Fig. 5 mostra una rappresentazione schematica di un filtro ottico secondo un esempio.
- Fig. 6 mostra una rappresentazione schematica di un filtro ottico con un controllore MIMO secondo un esempio.
- Fig. 7a-b mostrano una rappresentazione schematica di un analizzatore spettrale e del suo funzionamento secondo un esempio.
- Fig. 8 mostra una rappresentazione schematica di un analizzatore spettrale secondo un esempio.
- Fig. 9 mostra una rappresentazione schematica di un analizzatore spettrale secondo un altro esempio.

La figura 1 mostra un disegno schematico di un apparato 37 di spettroscopia. L'apparato 37 può ad esempio essere un apparato di spettroscopia, di microscopia o di endoscopia di Brillouin o tecnica simile. L'apparato 37 può comprendere una sorgente luminosa, ad esempio un laser 38 a modo singolo longitudinale a banda stretta (<100 MHz) diretto verso un campione 40 (materiale bersaglio) attraverso un'ottica di illuminazione 39. Il campione 40 può essere un materiale biologico. La luce del fascio laser che interagisce con i fononi acustici e scambia energia determinando un segnale luminoso diffuso che

presenta uno scostamento minimo dalla frequenza del laser (5-30 GHz). A seguito dell'interazione tra il fascio laser ed il campione 40, il campione diventa pertanto una sorgente di luce diffusa 2. La luce diffusa dal campione 40 viene raccolta da un'ottica di raccolta 41 e, tramite un accoppiatore ottico a fibra 42 e una fibra ottica a singolo modo 43, viene indirizzata verso uno spettrometro 20. Lo spettrometro 20 riceve la luce diffusa attraverso un ingresso principale 21 in corrispondenza del quale sono presenti mezzi di accoppiamento 44 per stabilire un accoppiamento con l'accoppiatore ottico a fibra 42 e la fibra ottica a singolo modo 43. Lo spettrometro 20 comprende un filtro ottico 1 per sopprimere o eliminare alcune componenti della luce diffusa (ad esempio la componente elastica di Rayleigh) e un analizzatore spettrale 3 per ricostruire e analizzare lo spettro di luce diffusa. L'analizzatore spettrale 3 può vantaggiosamente avere una risoluzione sotto il GHz (sub-GHz). Tramite un sistema calcolatore 51, accoppiato ad esempio allo spettrometro 20, i dati acquisiti possono essere analizzati e opportunamente visualizzati. Si nota che lo spettrometro 20 comprendente il filtro ottico 1 e l'analizzatore 3 può essere completamente integrato in un chip fotonico ad esempio in silicio. Ad esempio, il segnale luminoso che viene analizzato spettralmente può viaggiare attraverso guide d'onda con dimensioni nanometriche ed un alto contrasto di indice di rifrazione tra il materiale di "core" ed il materiale di "cladding" della guida d'onda per consentire piccoli raggi di curvatura, ad esempio compresi tra 0,1 mm e 2 mm. Il segnale di luce da analizzare può essere accoppiato nel chip fotonico tramite una fibra ottica singolo modo a mantenimento di polarizzazione ed un convertitore di dimensione del fascio (spot-size converter) come ad esempio una microlente, un reticolo o un restringitore ottico (inverted taper). Il chip

fotonico può essere montato e collegato tramite circuiti esterni ad un circuito stampato per facilitare la regolazione elettrica del modulatore di fase 13.

La figura 2 mostra in dettaglio gli elementi del filtro ottico 1 posizionato tra la sorgente di luce diffusa 2 e l'analizzatore spettrale 3. Il filtro può vantaggiosamente essere integrato in un circuito fotonico nanometrico. Il filtro 1 comprende un ingresso 4 per ricevere la luce diffusa dalla sorgente di luce diffusa 2 e due uscite 11, 12. Una prima uscita 11 configurata per propagare un primo segnale di uscita 15 ed una seconda uscita 12 configurata per propagare un secondo segnale di uscita 16.

Il filtro 1 comprende inoltre un elemento partitore 5 per dividere la luce diffusa in un primo fascio di luce 6 che viaggia lungo un primo percorso 7 ed in un secondo fascio di luce 8 che viaggia lungo un secondo percorso 9. Il primo fascio di luce 6 è quindi separato dal secondo fascio di luce 8. I due fasci di luce si ricongiungono in corrispondenza di un elemento combinatorio 10. I due percorsi 7, 9 hanno lunghezza differente cosicché il cammino ottico del primo fascio di luce 6 è diverso da quello del secondo fascio di luce 8. Secondo la figura 2, il primo percorso 7 ha una lunghezza maggiore del secondo percorso 9. Nello specifico, la differenza tra la lunghezza dei due percorsi è tale che il FSR, definito come $c/n_g\Delta L$ dove n_g è l'indice di gruppo della guida d'onda, è compreso tra 10 GHz e 50 GHz in modo da massimizzare la trasmissione dei picchi di Brillouin sopprimendo la luce di fondo elastica di Rayleigh. La differenza tra il primo percorso 7 ed il secondo percorso 9 può essere definita come la differenza di percorso ΔL .

A seconda dell'elemento partitore 5 utilizzato, l'intensità del primo fascio di luce 6 può essere uguale o differente rispetto all'intensità del secondo fascio di luce 8.

In un esempio, l'intensità del primo fascio di luce 6 è maggiore dell'intensità del secondo fascio di luce 8 e, come mostrato in figura 2, il primo percorso 7 in cui viaggia il primo fascio di luce 6 è più lungo del secondo percorso 9 in cui viaggia il secondo fascio di luce 8, ossia la differenza di percorso ΔL è maggiore di zero. Ciò serve a bilanciare la differenza tra le perdite in propagazione lungo i due percorsi. Naturalmente, in una configurazione alternativa, l'intensità del primo fascio di luce 6 può essere inferiore dell'intensità del secondo fascio di luce 8 ed il primo percorso 7 può essere più corto del secondo percorso 9 (la differenza di percorso ΔL è minore di zero).

In un altro esempio, l'intensità del primo fascio di luce 6 può essere uguale all'intensità del secondo fascio di luce 8 essendo le perdite di propagazione lungo le due guide d'onda prossime allo zero. In questo caso, la differenza di percorso (ΔL) è diversa da zero.

Il primo ed il secondo fascio di luce 6, 8 sono combinati in corrispondenza di un elemento combinatorio 10 che è accoppiato alla prima e alla seconda uscita 11, 12 per propagare i due segnali di uscita 15, 16. L'elemento combinatorio 10 ricombina il primo fascio di luce 6 ed il secondo fascio di luce 8 per generare interferenza. L'elemento combinatorio, così come l'elemento partitore, possono essere costituiti, ad esempio, da un interferometro multimodale (MMI) o da un directional coupler. Il primo ed il secondo segnale di uscita 15, 16 possono essere denominati rispettivamente segnale di uscita ad

un primo canale, o canale di "bar", e segnale di uscita ad un secondo canale, o canale di "cross", in cui il canale di "bar" è accoppiato all'analizzatore spettrale 3.

Il filtro 1 comprende inoltre almeno un modulatore di fase 13 ed un sistema di controllo a circuito chiuso 14 accoppiato al modulatore di fase 13. Il modulatore di fase 13 è posizionato in corrispondenza del secondo percorso 9. Tuttavia, il modulatore di fase 13 può essere posizionato in aggiunta, o in alternativa, in corrispondenza del primo percorso 7. Il modulatore di fase 13 serve a regolare il filtro 1 e ad indurre un'interferenza distruttiva alla lunghezza d'onda del segnale elastico di Rayleigh.

Attraverso il sistema di controllo a circuito chiuso, è possibile massimizzare la soppressione del segnale di Rayleigh. In particolare, il controllo è stabilito acquisendo e processando un segnale di feedback fornito da uno dei due segnali di uscita 15, 16, ad esempio il secondo segnale di uscita 16 in corrispondenza del canale di "cross", e regolando l'interferenza tramite il modulatore di fase 13. Questo meccanismo permette un processo continuo di massimizzazione del segnale di fondo elastico di Rayleigh in corrispondenza di uno dei due segnali di uscita 15, 16, ad esempio il secondo segnale di uscita 16 in corrispondenza del canale di "cross", ed una rimozione simultanea di tale segnale di fondo dalla luce diffusa propagata in corrispondenza dell'altro dei due segnali di uscita 15, 16, ad esempio il primo segnale di uscita 15 in corrispondenza del canale di "bar".

La prima uscita 11 è configurata per propagare il primo segnale di uscita 15 dove la componente elastica di Rayleigh della luce diffusa è attenuata o soppressa a seguito di

un'interferenza distruttiva di detta componente elastica di Rayleigh tra il primo fascio di luce 6 ed il secondo fascio di luce 8.

Una possibile configurazione del filtro ottico 1 è mostrata nelle figure 3A e 3B. Si nota che il filtro ottico 1 si basa su un principio di interferenza tra segnali luminosi che percorrono un diverso cammino ottico. Pertanto, il filtro 1 può essere costituito da, o si comporta come, un interferometro di Mach-Zehnder per la soppressione della componente elastica di Rayleigh.

Come mostrato in figura 3A, il filtro 1 comprende un ingresso di filtro 4 per ricevere la luce diffusa dal campione 40. La luce diffusa viene divisa dall'elemento partitore 5 in due fasci di luce 6, 8 che viaggiano rispettivamente in due percorsi 7, 9 distinti. L'elemento partitore 5 può essere un interferometro multimodo (MMI) oppure un accoppiatore direzionale. La differenza in lunghezza tra il primo ed il secondo percorso 7, 9, ossia la differenza di percorso ΔL , determina il FSR, ossia la distanza in frequenza tra due ordini di interferenza adiacenti del filtro 1 inteso come interferometro di Mach-Zehnder, tramite la relazione $FSR=c/n_g\Delta L$, definita in precedenza. L'interferenza tra il primo ed il secondo fascio di luce 6, 8 avviene in corrispondenza dell'elemento combinatorio 10. Nello specifico, un primo segnale di uscita 15 presso la prima uscita 11 è il risultato di una interferenza distruttiva della componente elastica di Rayleigh. Questo primo segnale di uscita 15, all'uscita del canale di "bar", rappresenta un segnale di Brillouin privo del rumore di fondo elastico.

In un esempio, la seconda uscita 12 è configurata per propagare un secondo segnale di uscita 16, in cui il secondo segnale di uscita 16 è utilizzato dal sistema di controllo a circuito chiuso 14 per regolare l'interferenza tra il primo fascio di luce 6 ed il secondo fascio di luce 8 tramite il modulatore di fase 13 e minimizzare la componente elastica di Rayleigh del primo segnale di uscita 15. In particolare, il filtro può comprendere un rilevatore ottico 19, in particolare un fotorilevatore, posizionato in corrispondenza della seconda uscita 12 per misurare l'intensità del secondo segnale di uscita 16 che viene utilizzato dal sistema di controllo ad anello chiuso 14.

Il meccanismo a circuito chiuso è quindi stabilito connettendo il secondo segnale di uscita 16 in corrispondenza del canale di canale di "cross" al rilevatore ottico 19. Nello specifico, la funzionalità di controllo a circuito chiuso $C_1(s)$ ha l'obiettivo di massimizzare il segnale s propagato in modo da minimizzare la componente di Rayleigh in corrispondenza del canale di "bar". Il segnale s , che può corrispondere al segnale 16 di figura 3A, è definito come la somma del segnale elastico di Rayleigh S_R e del segnale di Brillouin S_B , $s = S_R + S_B$. Pertanto, con l'assunzione di $S_R \gg S_B$, $s = S_R + S_B \approx S_R$. La funzione $C_1(s)$ può essere impiegata secondo una varietà di modi basati sull'elettronica implicando una conversione analogico-digitale (AD) e funzioni di controllo basate sulla combinazione di modelli di controllo proporzionale-integrale-derivativo (PID) così come funzioni di controllo non lineari o input-output basate su modelli analitici o di apprendimento automatico (machine learning). In altri esempi, la funzione $C_1(s)$ può essere impiegata anche attraverso un'elaborazione dei dati di diversa natura, es. ottici, micromeccanici, ecc.

Secondo un esempio, il filtro 1 comprende inoltre un modulo ad isteresi 18 accoppiato al sistema di controllo a circuito chiuso 14 per aumentare la stabilità e l'efficacia del controllo. In particolare, l'isteresi può essere utilizzata con le stesse modalità di $C_1(s_R)$.

La figura 3B mostra la stessa configurazione del filtro 1 di figura 3A con l'unica differenza relativa al controllo a circuito chiuso.

Secondo un esempio, il filtro 1 comprende inoltre un mezzo di assorbimento 17 posizionato in corrispondenza della prima uscita 11 per prelevare una porzione del primo segnale di uscita 15 che è utilizzato dal sistema di controllo a circuito chiuso 14 per regolare l'interferenza tra il primo fascio di luce 6 ed il secondo fascio di luce 8 tramite il modulatore di fase 13 e minimizzare il primo segnale di uscita 15 in modo tale da filtrare la componente elastica di Rayleigh dal primo segnale di uscita 15. Si nota che la posizione tra la prima e la seconda uscita 11, 12 in figura 3B è invertita rispetto alla posizione delle medesime uscite in figura 3A.

In questo esempio, il controllo a circuito chiuso è basato su una funzionalità $C_2(s)$. Il controllo è effettuato in corrispondenza del canale di "bar" per assorbire parzialmente una piccola porzione del segnale luminoso s . In questo caso, il segnale s può corrispondere al segnale 15. La funzione $C_2(s)$ è impiegata per minimizzare il segnale s in corrispondenza del canale di "bar" così da filtrare la componente di Rayleigh dal segnale di Brillouin propagato. Il controllo è realizzato posizionando il mezzo di assorbimento 17 in prossimità della guida d'onda, in cui la distanza e la lunghezza del mezzo rispetto alla guida d'onda determinano la quantità di luce assorbita e convertita in un segnale elettrico per mezzo ad

esempio di elettrodi. Si nota che questa configurazione risulta essere meno efficiente rispetto a quella di figura 3A dato che il controllo implica una parziale attenuazione del segnale luminoso di Brillouin e una minore accuratezza nella lettura del segnale elastico di Rayleigh.

Le figure 4A e 4B mostrano il principio operativo del filtro 1, nello specifico il principio operativo dell'interferometro di Mach-Zehnder. La funzione di trasferimento del filtro 1 (variazione dell'intensità in funzione della frequenza) è caratterizzata da un profilo sinusoidale, in cui il FSR- che corrisponde al periodo della funzione seno - è (idealmente) tale da avere una finestra di trasmissione centrata lungo l'intervallo spettrale previsto dei picchi di Brillouin B e B' che tipicamente sono spostati di 5-30 GHz dal picco di Rayleigh R. La funzione di trasferimento al canale di "cross" (fig. 4A) è tuttavia opposta a quella del canale di "bar" (fig. 4B) in modo che la massimizzazione del segnale di Rayleigh in corrispondenza del canale di "cross" risulti a sua volta in una minimizzazione della luce di fondo in corrispondenza del canale di "bar" dove sono quindi trasmessi soltanto i picchi di Brillouin. Grazie al modulatore di fase è possibile regolare (tuning) la funzione di trasmissione in frequenza in modo tale da massimizzare il grado di estinzione.

Come menzionato precedentemente, uno spettrometro 20 comprende un componente di analisi spettrale adibito all'analisi dello spettro di Brillouin e un componente filtrante posizionato tra il componente di analisi spettrale e una sorgente di luce diffusa che serve essenzialmente a filtrare la componente elastica di Rayleigh. Il componente filtrante può comprendere un singolo filtro ottico 1 come descritto in precedenza oppure una pluralità di filtri ottici 1 in modo da aumentare

l'efficacia dell'effetto filtrante. Poiché il filtro ottico è integrabile/integrato in circuiti ottici nanometrici, è possibile integrare più filtri ottici senza che ciò comporti un aumento sostanziale delle dimensioni del dispositivo.

In un esempio, lo spettrometro 20 comprende una pluralità di filtri $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ connessi tra loro in serie a formare un modulo filtrante 22 avente un ingresso di modulo 23 per ricevere la luce diffusa, una prima uscita di modulo 24 ed una seconda uscita di modulo 25, la prima uscita di modulo 24 essendo accoppiata all'analizzatore spettrale 3, in cui la prima uscita 11_1 di un primo filtro 1_1 della pluralità di filtri $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ è accoppiata all'ingresso 4_2 di un secondo filtro 1_2 successivo. Ciò è mostrato in figura 5.

Ogni filtro ottico $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ può essere un interferometro di Mach-Zehnder. Secondo la figura 5, ogni filtro ottico $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ è connesso ad un foto rilevatore $19_1, 19_2, \dots, 19_n$, ad un controllore a circuito chiuso 14 e opzionalmente ad un modulo ad isteresi (non mostrato in figura) per processare i dati e inviare la tensione di ingresso (V) appropriata al corrispondente modulatore di fase $13_1, 13_2, \dots, 13_n$. Poiché valori realistici del rapporto di estinzione di un singolo filtro ottico inteso come interferometro di Mach-Zehnder non supera approssimativamente i 20 dB, posizionare una pluralità N di filtri ottici (MZI) a cascata ha il vantaggio di aumentare il rapporto di estinzione totale di un fattore N senza tuttavia influenzare eccessivamente le dimensioni del sistema ottico. Inoltre, poiché la fase di ogni filtro ottico (MZI) è controllabile indipendentemente in modo da minimizzare la propagazione della componente elastica di Rayleigh, il segnale di Brillouin risultante che entra nell'analizzatore spettrale 3 risulta essere privo di luce di fondo spuria.

Le funzionalità di controllo a circuito chiuso descritte nelle figure 3A e 3B possono essere applicate in modo efficiente alla configurazione comprendente un modulo di filtro 22 avente una pluralità di filtri ottici $1_1, 1_2, \dots, 1_n$. In un esempio, il sistema di controllo a circuito chiuso 14 comprende un sistema di controllo a ingresso singolo e uscita singola, SISO. In questo caso, ogni filtro ottico (MZI) $1_1, 1_2, \dots, 1_n$ e ogni segnale associato s_i è trattato individualmente dalla funzione $C_i(s_i)$.

In un altro esempio, il sistema di controllo a circuito chiuso 14 comprende un sistema di controllo a ingresso multiplo e uscita multipla, MIMO. Come mostrato in figura 6, una o più variabili manipolate possono influenzare le interazioni di variabili controllate in un circuito specifico o tutti gli altri circuiti di controllo. Rispetto al sistema SISO di figura 5, il sistema MIMO processa i segnali di ingresso con una singola funzione $C_M(s_i)$ garantendo un controllo più preciso ed efficace del filtro ottico a scapito tuttavia di una maggiore complessità. Questo tipo di sistema di controllo permette di incorporare sistemi dinamici, considerare i costi delle singole azioni di controllo, analizzare gli effetti di possibili disturbi a livello di sistema e di superare la limitata sensibilità del foto rilevatore 19. Anche in questo caso, è possibile inserire opzionalmente un modulo ad isteresi (non mostrato in figura) associato al sistema di controllo 14 per ogni modulatore di fase $13_1, 13_2, \dots, 13_n$.

L'analizzatore spettrale 3 all'interno dello spettrometro 20 può essere di diverse tipologie. Ad esempio, le figure 7A, 7B, e 8 mostrano un analizzatore spettrale 3 costituito da almeno un risonatore ottico ad anello mentre la figura 9 mostra un

analizzatore spettrale 3 che comprende un elemento VIPA (virtual imaged phased array).

In un esempio, l'analizzatore spettrale 3 comprende almeno un risonatore ottico ad anello 26 comprendente una guida d'onda d'ingresso 28 per ricevere la luce dalla prima uscita 11 del filtro 1, una guida d'onda chiusa ad anello 29, avente un indice di rifrazione effettivo n_{eff} e accoppiata alla guida d'onda d'ingresso 28 per selezionare almeno una determinata frequenza ν_{res} della luce diffusa, una guida d'onda di uscita 30 accoppiata alla guida d'onda chiusa ad anello 29 per l'uscita delle frequenze selezionate e una guida d'onda di passaggio 31 accoppiata alla guida d'onda d'ingresso 28 e alla guida d'onda chiusa ad anello 29 per l'uscita delle frequenze non selezionate, ed in cui l'analizzatore spettrale 3 comprende inoltre un elemento modulatore 27 accoppiato al risonatore ottico ad anello 26 per modulare l'indice di rifrazione effettivo n_{eff} e per scansionare le differenti componenti in frequenza multiple attraverso la variazione del cammino ottico della guida d'onda chiusa ad anello 29. Ciò è mostrato in figura 7A. In questo caso, il segnale di Brillouin privo del segnale di fondo di Rayleigh che deriva dal filtro ottico 1 o dal modulo di filtro 22 è accoppiato parzialmente tramite la guida d'onda d'ingresso 28 (BUS) alla guida d'onda ad anello 29 per mezzo ad esempio di un accoppiatore direzionale. La quantità di accoppiamento è tale da massimizzare il fattore Q dell'anello e allo stesso tempo di evitare sostanziali perdite di trasmissione di segnale. Per aumentare la forza di accoppiamento, l'anello può avere una forma oblunga (configurazione a "racetrack") in cui la regione di accoppiamento è allungata per superare la risoluzione litografica limitata. La risonanza dell'anello può essere regolata velocemente dall'elemento modulatore 27 (ad esempio

un elemento riscaldante o un mezzo opto-elettrico) e la luce trasmessa in corrispondenza della guida d'onda di uscita 30 (DROP) può essere acquisita da un foto rilevatore 45. Effettuando una scansione su almeno un valore di $FSR = \lambda^2/n_g L$, è possibile acquisire l'intero spettro di Brillouin, in cui L che è la lunghezza di viaggio nell'anello deve essere selezionata tale che $FSR > 15$ GHz. Il valore dell'intensità del segnale in frequenza sulla base della variazione in tensione applicata all'elemento modulatore 27 è mostrato in figura 7B.

La figura 8 mostra l'esempio di uno spettrometro 20 in cui l'analizzatore spettrale 3 comprende una pluralità di risonatori ottici ad anello $26_1, 26_2, \dots, 26_n$ disposti a cascata, in cui la guida d'onda chiusa ad anello 29_1 di un primo risonatore ottico 26_1 è accoppiata con la guida d'onda ad anello 29_2 di un secondo risonatore ottico successivo 26_2 .

La configurazione di figura 8 serve nel momento in cui un singolo risonatore ad anello 26 non è sufficiente ad ottenere una risoluzione sotto il GHz (sub-GHz) a causa delle perdite (curvatura e propagazione) all'interno del singolo anello. Vantaggiosamente, l'analizzatore spettrale 3 comprende inoltre almeno due elementi modulatori $27_A, 27_B$ accoppiati ad ogni risonatore ottico ad anello $26_1, 26_2, \dots, 26_n$. Un modulatore di fase 27_{An} serve a portare gli anelli alla stessa lunghezza d'onda di risonanza regolando accuratamente la tensione applicata V_{Rn1} . Raggiunta questa condizione, uno spettro di Brillouin può essere acquisito effettuando una scansione rapida della risonanza di tutti gli anelli in modo simultaneo regolando la tensione V_{RN2} del secondo modulatore di fase 27_{Bn} .

In un esempio, l'analizzatore spettrale 3 comprende un unico elemento ottico angolare dispersivo (VIPA) 49 per disperdere un segnale elettromagnetico lungo la direzione trasversale

rispetto alla direzione di propagazione del segnale di uscita 15. Si nota che l'impiego di un dispositivo dispersivo ottico come la VIPA permette di analizzare lo spettro di Brillouin senza dover effettuare una scansione dello spettro. Tuttavia, a causa del dominante segnale dovuto alla luce elastica di Rayleigh, è solitamente necessario impiegare una pluralità di elementi VIPA in modo da aumentare il contrasto spettrale al fine di misurare i picchi Brillouin altrimenti coperti dalla luce di Rayleigh. Utilizzando il filtro ottico 1 come descritto in precedenza è possibile invece impiegare soltanto un unico elemento ottico angolare dispersivo (VIPA) 49 rendendo pertanto il sistema complessivo più compatto. In altre parole, data l'efficienza filtrante della componente elastica di Rayleigh da parte del filtro ottico 1 (o modulo di filtro 22) come descritto precedentemente, è possibile realizzare un analizzatore spettrale 3, e di conseguenza uno spettrometro 20, che sia compatto e che abbia ottime prestazioni per la spettroscopia di Brillouin.

Come mostrato in figura 9, l'analizzatore spettrale 3 è accoppiato al filtro ottico 1 oppure al modulo di filtro 22 tramite una fibra ottica di ingresso 46 per ricevere il segnale di uscita del filtro in cui la componente elastica di Rayleigh è soppressa o attenuata. Ad esempio, la fibra ottica d'ingresso 46 riceve il primo segnale di uscita 15. L'analizzatore spettrale 3 comprende inoltre una prima lente 47 (lente collimante) per ricevere e collimare il segnale di uscita 15 da analizzare ed una seconda lente 48 (lente focalizzante) per focalizzare il segnale di uscita 15 collimato.

L'analizzatore spettrale 3 comprende inoltre un elemento ottico angolare dispersivo (VIPA) 49 accoppiato alla prima e

alla seconda lente 47, 48 per disperdere un segnale elettromagnetico lungo la direzione trasversale rispetto alla direzione di propagazione del segnale di uscita 15 ed una terza lente 50 (lente di Fourier) per convertire il segnale elettromagnetico disperso dall'elemento ottico angolare dispersivo 49 in una pluralità di picchi spettrali per misurare lo spettro della luce diffusa attraverso una pluralità di rilevatori ottici, ad esempio una telecamera CCD 51. Sebbene il vantaggio di utilizzare il filtro ottico 1 o il modulo di filtro 22 è quello di poter impiegare un unico dispositivo VIPA, è anche immaginabile considerare un analizzatore spettrale 3 che abbia in alternativa una pluralità di questi dispositivi ottici VIPA.

Il filtro ottico 1 (e il modulo di filtro 22) così come lo spettrometro 20 e l'apparato 37 sopra descritti hanno notevoli potenzialità nel campo biomedico. Infatti, questi dispositivi ottici possono essere un'ottima soluzione per integrare la microscopia di Brillouin nell'analisi di proprietà meccaniche di sistemi biologici. La microscopia di Brillouin è una tecnica relativamente nuova con un interesse crescente nel settore della ricerca e dell'industria biomedica. Utilizzando il filtro ottico 1 come descritto, è possibile quindi ottenere un dispositivo spettrale ultracompatto, con un alto contrasto, con una risoluzione al di sotto del GHz (sub-GHz) e con un'alta efficienza di trasmissione da poter impiegare in microscopi di Brillouin per la diagnosi di malattie e l'analisi di processi biomeccanici. Inoltre, poiché il filtro ottico è integrabile/integrato in circuiti fotonici nanometrici, il dispositivo finale avrà una maggiore facilità d'uso rispetto ai convenzionali filtri basati sull'ottica in spazio libero (free-space) in quanto non presenta elementi fisici da allineare.

Al filtro 1, allo spettrometro 20 e all'apparato 37 sopra descritti un tecnico del ramo, allo scopo di soddisfare ulteriori e contingenti esigenze, potrà apportare numerose ulteriori modifiche e varianti, tutte peraltro comprese nell'ambito di protezione della presente invenzione quale definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Filtro ottico (1), in particolare interferometro di Mach-Zehnder, per sopprimere o attenuare la componente elastica di Rayleigh di una luce diffusa o riflessa, detto filtro (1) essendo integrabile all'interno di un circuito fotonico attivo e/o passivo e posizionabile tra una sorgente di luce diffusa (2) ed un analizzatore spettrale (3), in cui il filtro (1) comprende:

almeno un ingresso (4) per ricevere la luce diffusa;

almeno un elemento partitore (5) per dividere la luce diffusa in un primo fascio di luce (6) che viaggia lungo un primo percorso (7) ed in un secondo fascio di luce (8), separato dal primo fascio di luce (6), che viaggia lungo un secondo percorso (9), in cui la differenza tra il primo percorso (7) ed il secondo percorso (9), definita come la differenza di percorso (ΔL), è diversa da zero;

almeno un modulatore di fase (13) posizionato in corrispondenza del primo e/o del secondo percorso (7, 9);

un sistema di controllo a circuito chiuso (14) accoppiato al modulatore di fase (13);

un elemento combinatore (10) per combinare il primo fascio di luce (6) in uscita dal primo percorso (7) con il secondo fascio di luce (8) in uscita dal secondo percorso (9), ed una prima uscita (11) ed una seconda uscita (12) accoppiate all'elemento combinatore (10),

in cui la prima uscita (11) è configurata per propagare un primo segnale di uscita (15) dove la componente elastica di Rayleigh dello spettro di luce è attenuata o soppressa a seguito di un'interferenza distruttiva di detta componente elastica di Rayleigh tra il primo fascio di luce (6) ed il secondo fascio di luce (8).

2. Filtro (1) secondo la rivendicazione 1, in cui la seconda uscita (12) è configurata per propagare un secondo segnale di uscita (16), in cui il secondo segnale di uscita (16) è utilizzato dal sistema di controllo a circuito chiuso (14) per regolare l'interferenza tra il primo fascio di luce (6) ed il secondo fascio di luce (8) tramite il modulatore di fase (13) e minimizzare la componente elastica di Rayleigh del primo segnale di uscita (15).

3. Filtro (1) secondo la rivendicazione 2, comprendente inoltre un rilevatore ottico (19), in particolare un fotorilevatore, posizionato in corrispondenza della seconda uscita (12) per misurare l'intensità del secondo segnale di uscita (16) che viene utilizzato dal sistema di controllo ad anello chiuso (14).

4. Filtro (1) secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre un mezzo di assorbimento (17) posizionato in corrispondenza della prima uscita (11) per prelevare una porzione del primo segnale di uscita (15) che è utilizzato dal sistema di controllo a circuito chiuso (14) per regolare l'interferenza tra il primo fascio di luce (6) ed il secondo fascio di luce (8) tramite il modulatore di fase (13) e minimizzare il primo segnale di uscita (15) in modo tale da filtrare la componente elastica di Rayleigh dal primo segnale di uscita (15).

5. Filtro (1) secondo una delle rivendicazioni da 1 a 4, in cui

a. l'intensità del primo fascio di luce (6) è uguale all'intensità del secondo fascio di luce (8) ed in cui la differenza di percorso (ΔL) è diversa da zero; oppure

b. l'intensità del primo fascio di luce (6) è maggiore dell'intensità del secondo fascio di luce (8) ed in cui la differenza di percorso (ΔL) è maggiore di zero.

6. Filtro (1) secondo una delle rivendicazioni da 1 a 5, comprendente inoltre un modulo ad isteresi (18) accoppiato al sistema di controllo a circuito chiuso (14) per aumentare la stabilità e l'efficacia del controllo.

7. Spettrometro (20) per analizzare lo spettro di una luce diffusa o riflessa, comprendente:

un ingresso principale (21) per ricevere la luce diffusa; almeno un filtro ottico (1) per sopprimere o attenuare almeno la componente elastica di Rayleigh di una luce diffusa o riflessa secondo una delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui detto filtro (1) è accoppiato all'ingresso principale (21) dello spettrometro (21); e

un analizzatore spettrale (3) per selezionare e separare determinate componenti in frequenza multiple della luce diffusa, per misurare l'intensità delle diverse componenti in frequenza e ricostruire il profilo dello spettro della luce diffusa, in cui detto analizzatore spettrale (3) è accoppiato alla prima uscita (11) del filtro (1), in cui almeno il filtro (1) è costituito da un circuito integrato fotonico.

8. Spettrometro (20) secondo la rivendicazione 7, comprendente una pluralità di filtri ($1_1, 1_2, \dots, 1_n$) connessi tra loro in serie a formare un modulo filtrante (22) avente un ingresso di modulo (23) per ricevere la luce diffusa o riflessa, una prima uscita di modulo (24) ed una seconda uscita di modulo (25), la prima uscita di modulo (24)

essendo accoppiata all'analizzatore spettrale (3), in cui la prima uscita (11₁) di un primo filtro (1₁) della pluralità di filtri (1₁, 1₂, ..., 1_n) è accoppiata all'ingresso (4₂) di un secondo filtro (1₂) successivo.

9. Spettrometro (20) secondo la rivendicazione 8, in cui:

a. il sistema di controllo a circuito chiuso (14) comprende un sistema di controllo a ingresso singolo e uscita singola, SISO; oppure

b. il sistema di controllo a circuito chiuso (14) comprende un sistema di controllo a ingresso multiplo e uscita multipla, MIMO.

10. Spettrometro (20) secondo una delle rivendicazioni da 7 a 9, in cui l'analizzatore spettrale (3) comprende almeno un risonatore ottico ad anello (26) comprendente una guida d'onda d'ingresso (28) per ricevere la luce dalla prima uscita (11) del filtro (1), una guida d'onda chiusa ad anello (29), avente un indice di rifrazione effettivo n_{eff} e accoppiata alla guida d'onda d'ingresso (28) per selezionare almeno una determinata frequenza ν_{res} della luce diffusa, una guida d'onda di uscita (30) accoppiata alla guida d'onda chiusa ad anello (29) per l'uscita delle frequenze selezionate e una guida d'onda di passaggio (31) accoppiata alla guida d'onda d'ingresso (28) e alla guida d'onda chiusa ad anello (29) per l'uscita delle frequenze non selezionate, ed in cui l'analizzatore spettrale (3) comprende inoltre un elemento modulatore (27) accoppiato al risonatore ottico ad anello (26) per modulare l'indice di rifrazione effettivo n_{eff} e per scansionare le differenti componenti in frequenza multiple attraverso la variazione del cammino ottico della guida d'onda chiusa ad anello (29).

11. Spettrometro (20) secondo la rivendicazione 10, in cui l'analizzatore spettrale (3) comprende un unico elemento ottico angolare dispersivo (VIPA) (49) per disperdere un segnale elettromagnetico lungo la direzione trasversale rispetto alla direzione di propagazione del segnale di uscita (15).

12. Apparato (37) per la spettroscopia, microscopia o endoscopia di Brillouin comprendente lo spettrometro (20) secondo una delle rivendicazioni da 7 a 11.

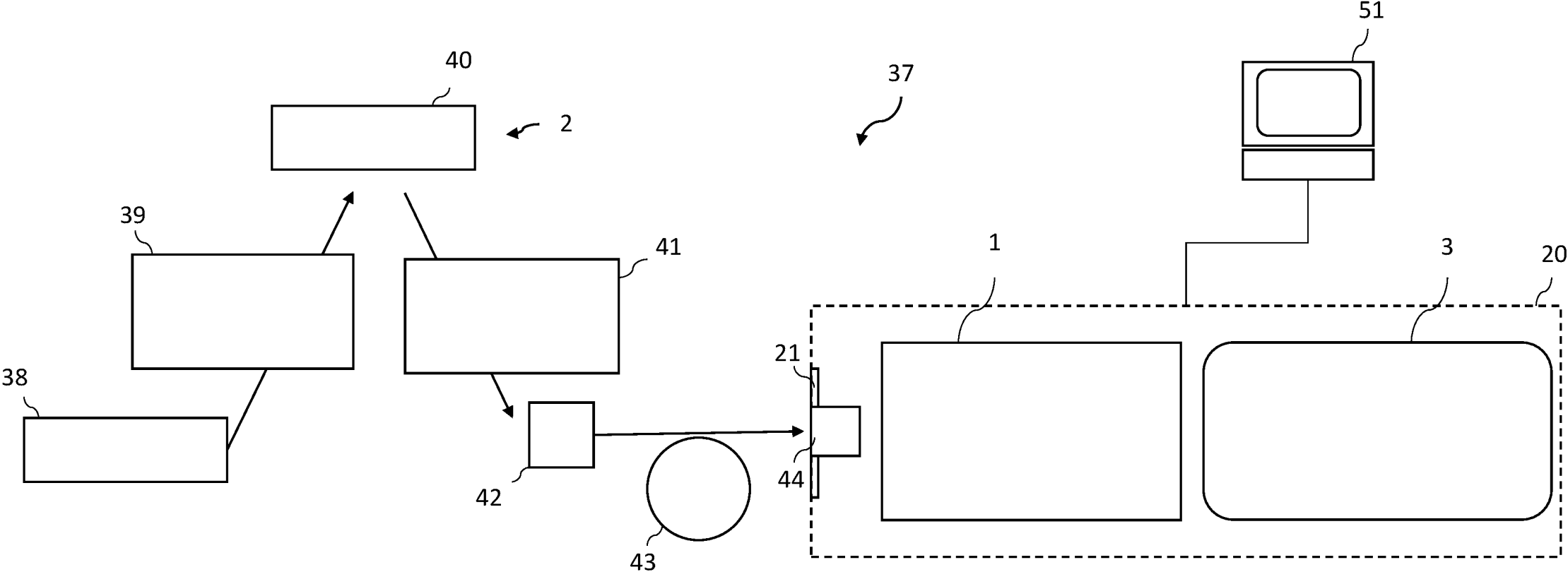


Fig. 1

2/9

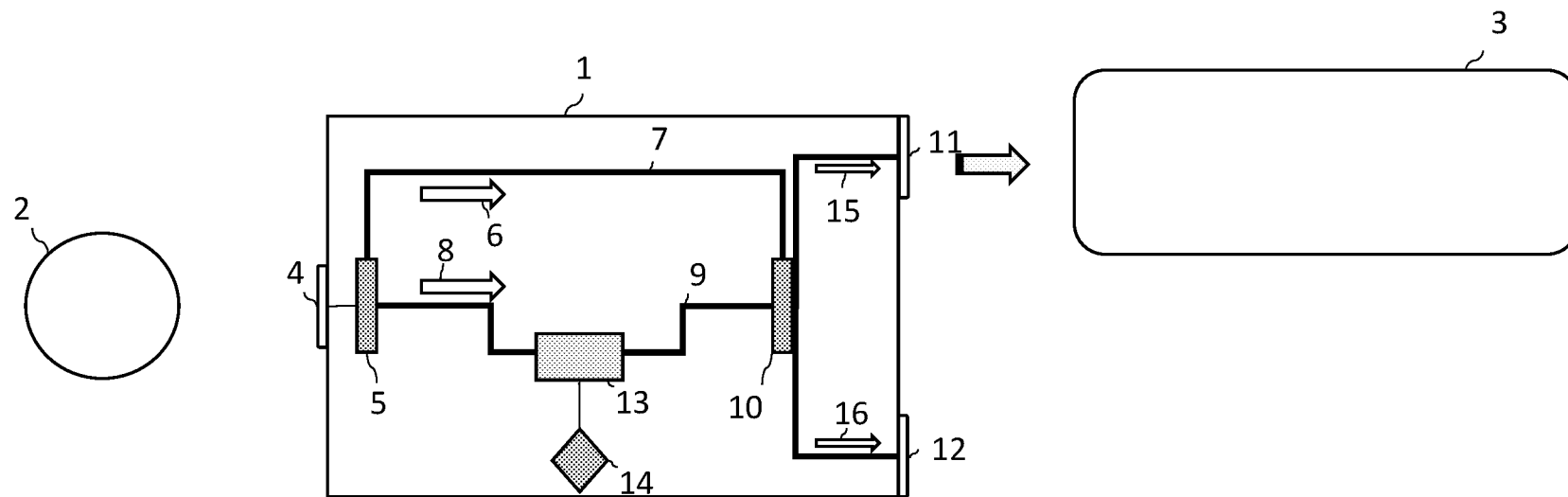


Fig. 2

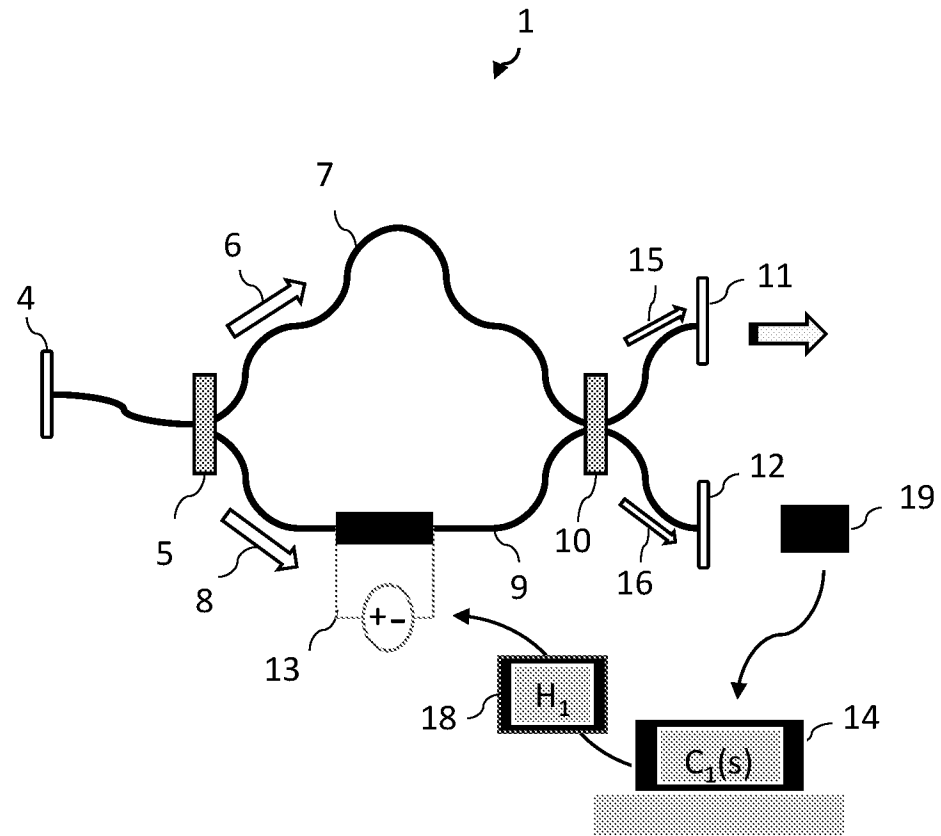


Fig. 3A

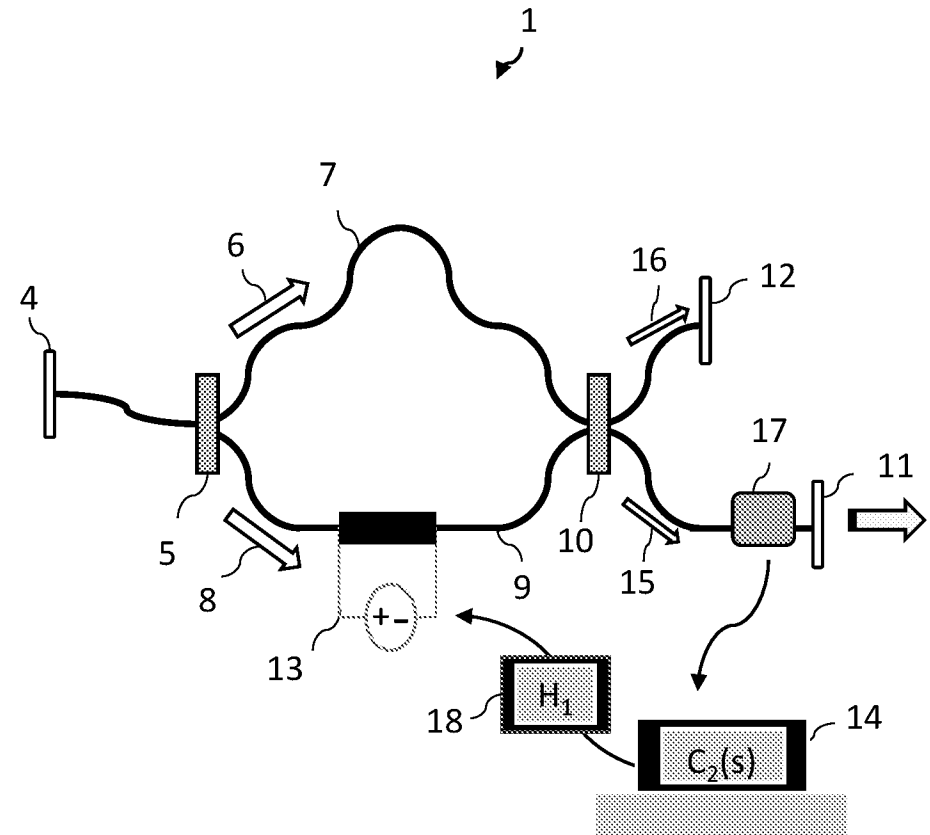


Fig. 3B

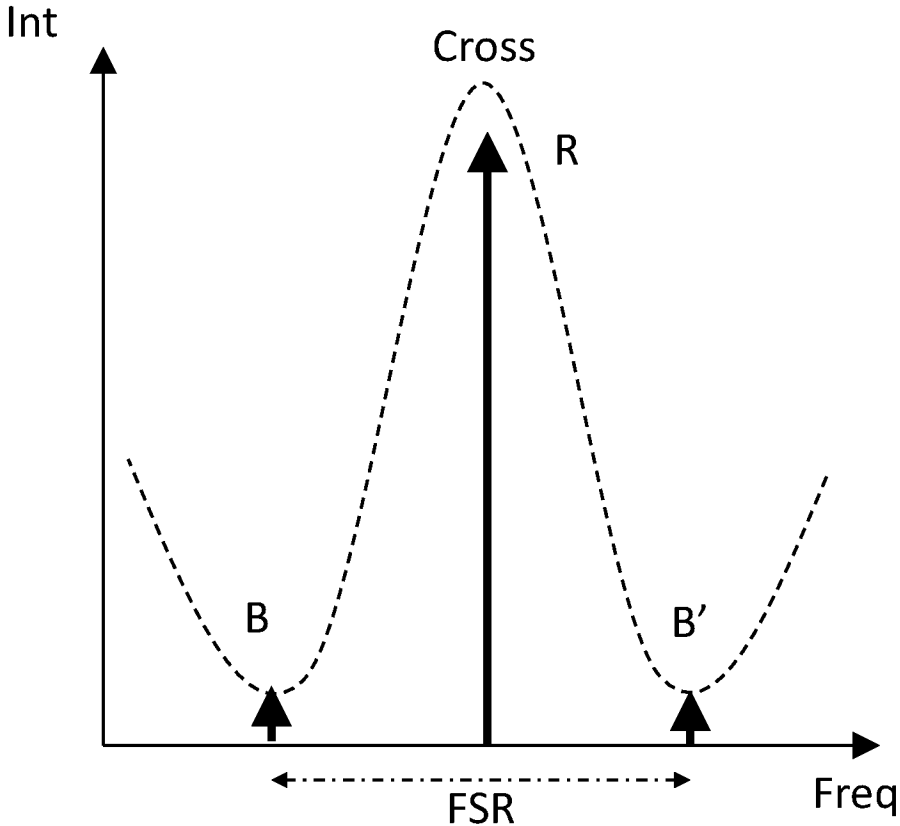


Fig. 4A

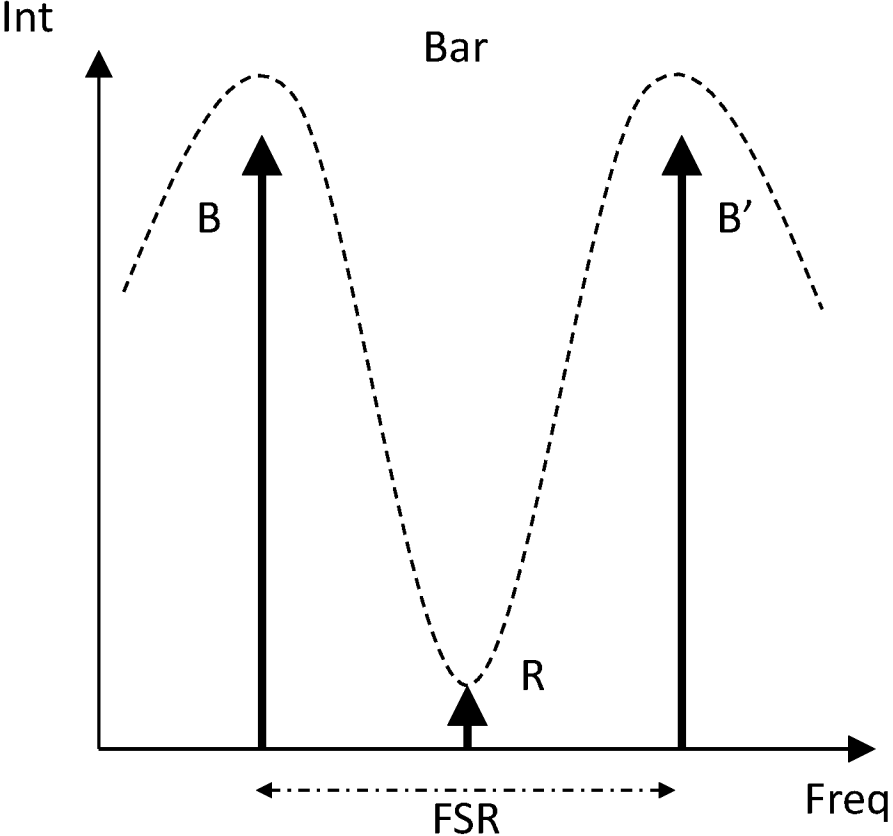
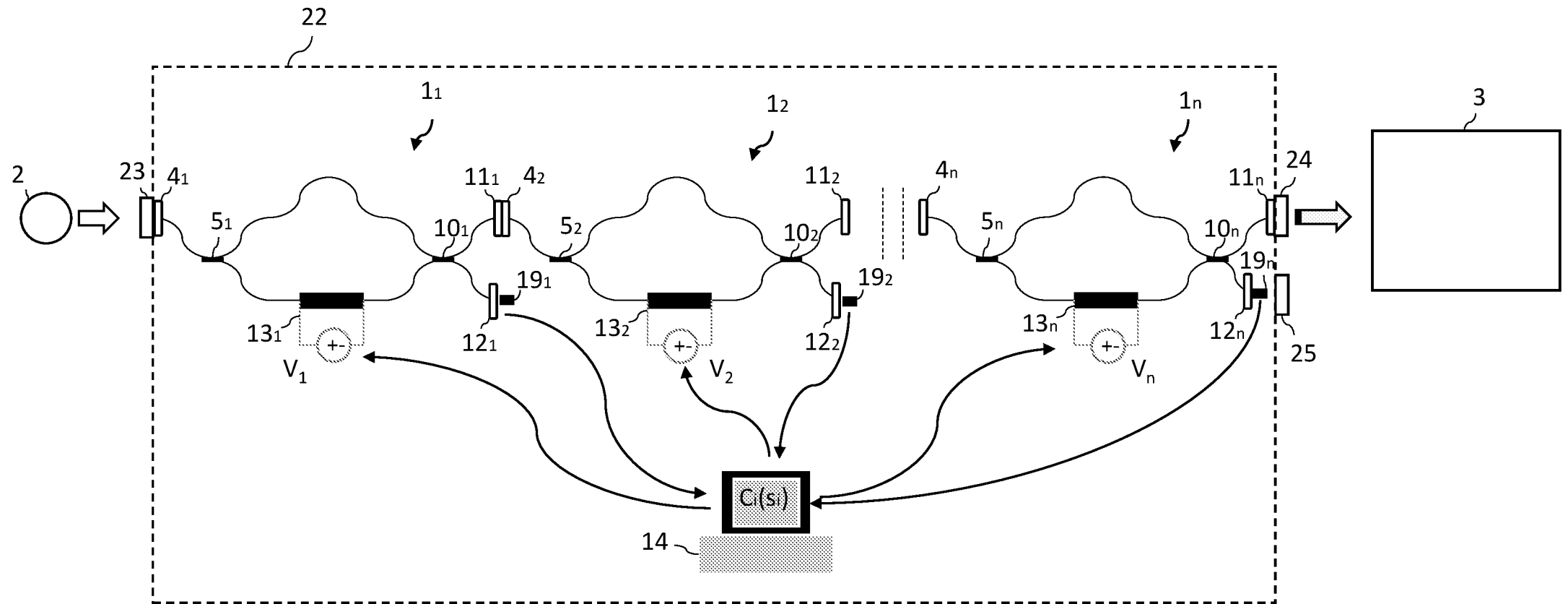


Fig. 4B

**Fig. 5**

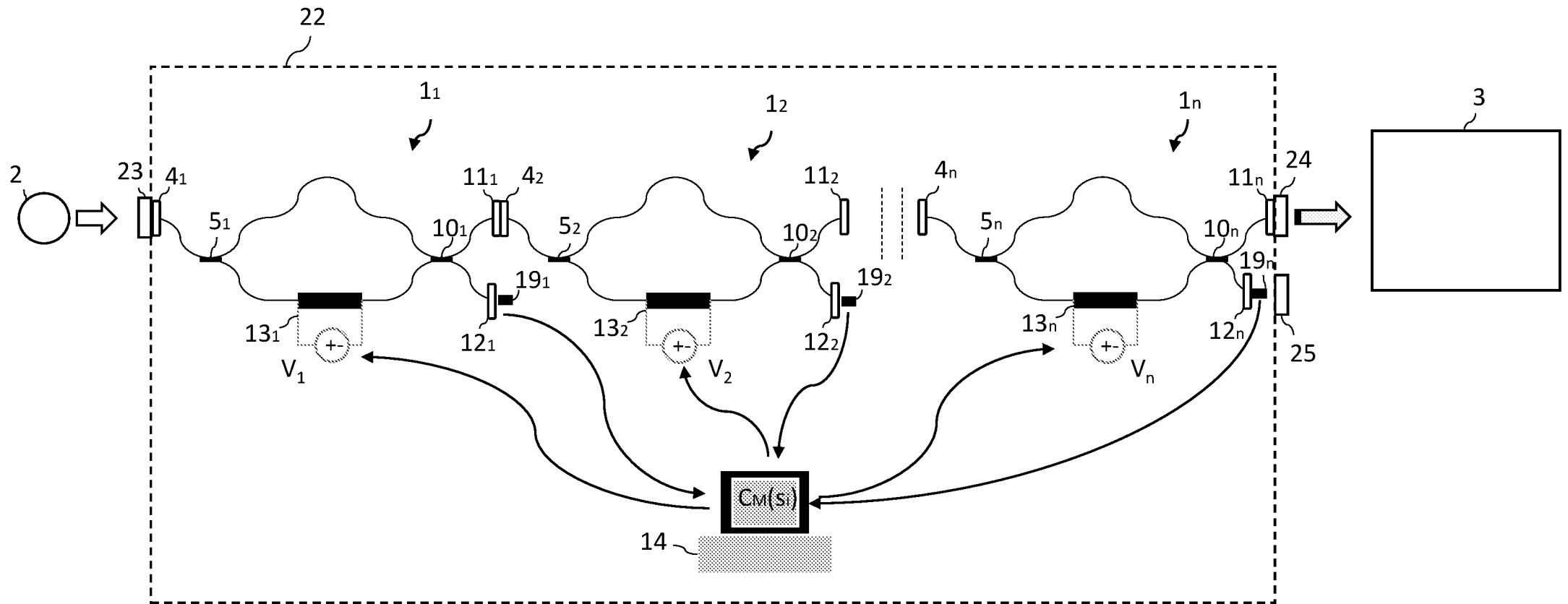


Fig. 6

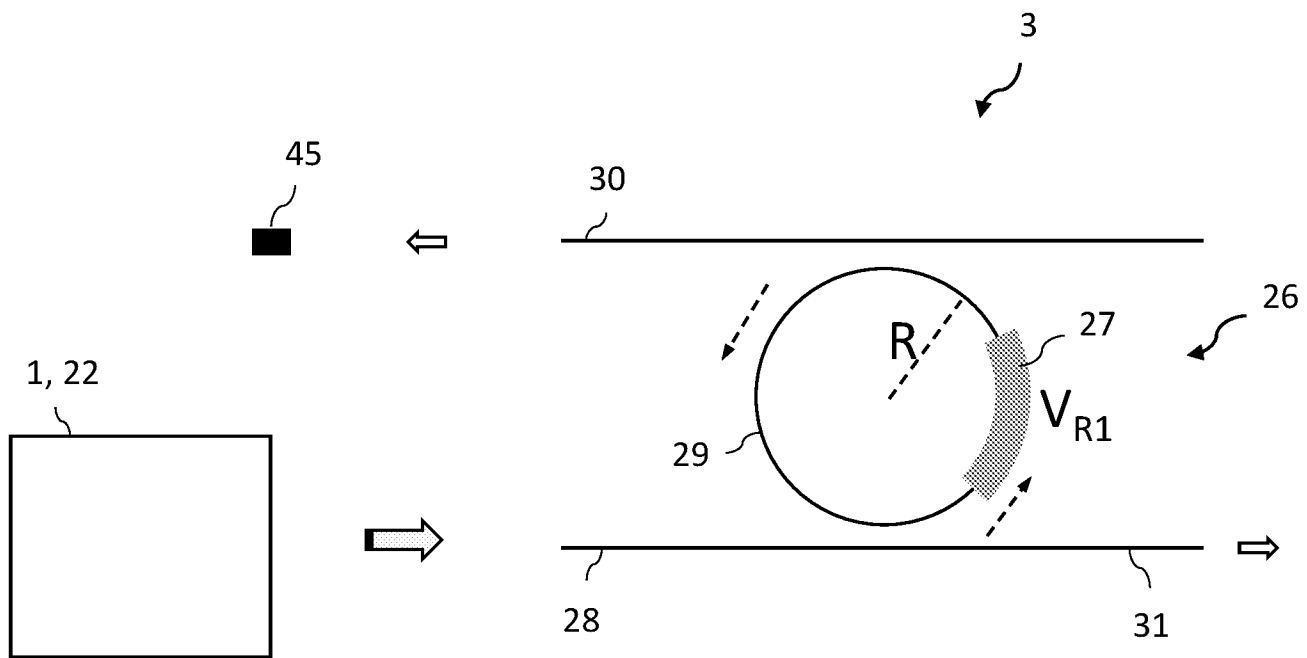


Fig. 7A

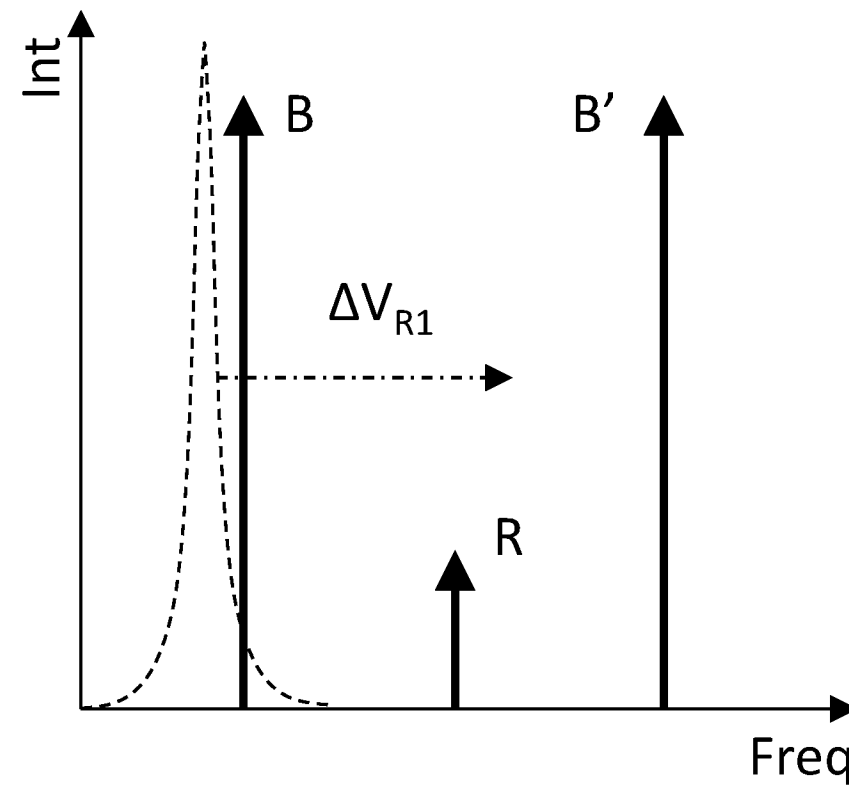


Fig. 7B

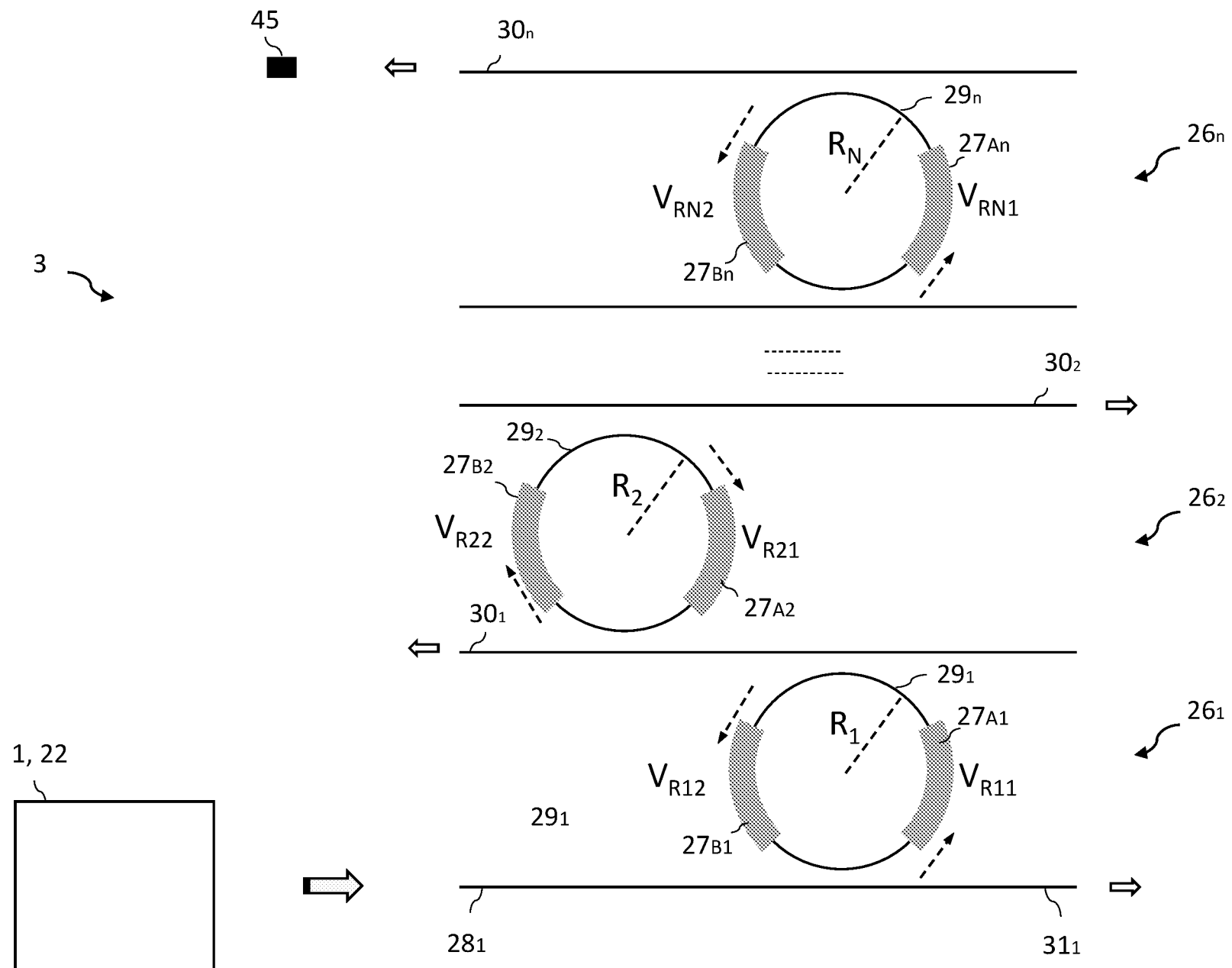


Fig. 8

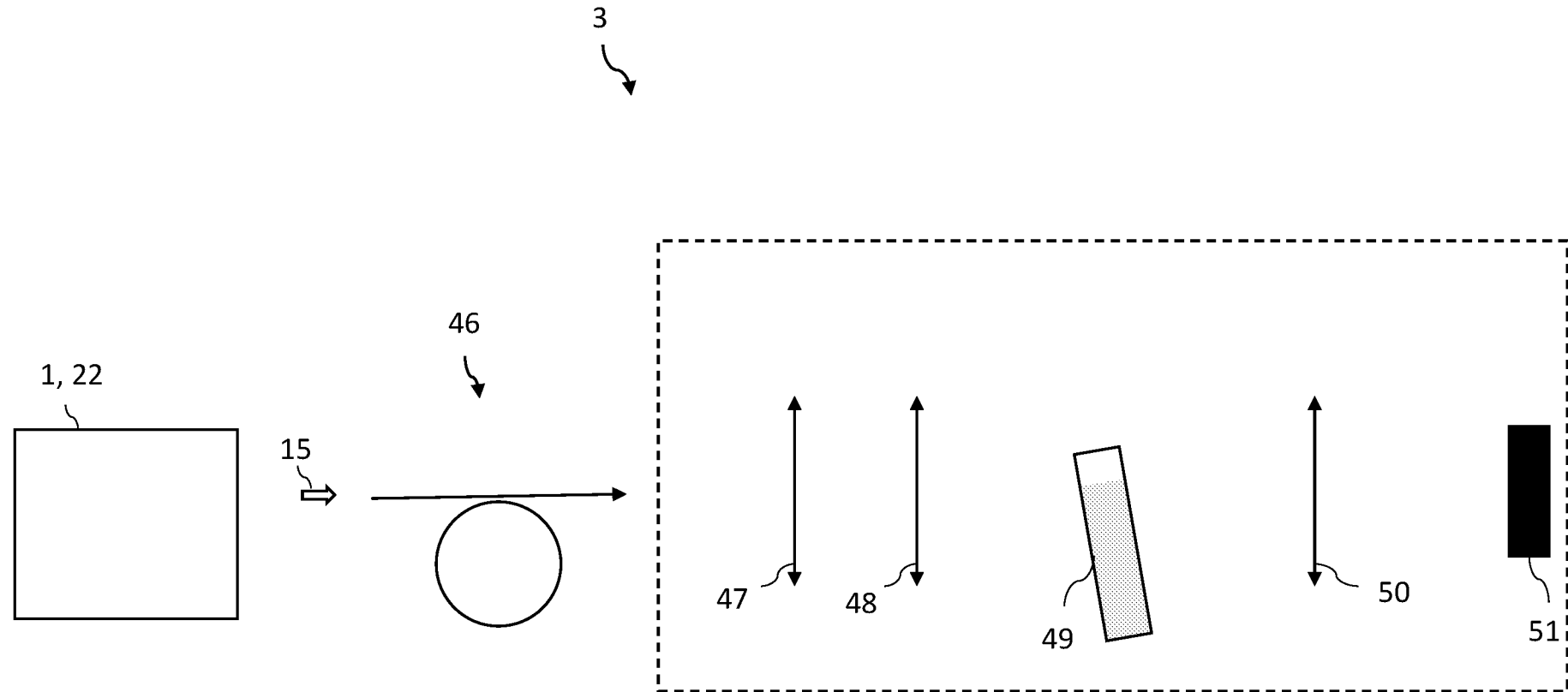


Fig. 9