



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102019000005264
Data Deposito	05/04/2019
Data Pubblicazione	05/10/2020

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	S	3	106

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	S	5	14

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	B	9	02

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	F	1	141

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	F	1	21

Titolo

Laser sintonizzabile e metodo per sintonizzare una lunghezza d'onda di una luce emessa dal laser

Laser sintonizzabile e metodo per sintonizzare una lunghezza d'onda di una luce emessa dal laser

Campo tecnico

La presente invenzione riguarda un laser sintonizzabile, preferibilmente ma non necessariamente utilizzato per la tomografia a coerenza ottica (OCT), e un metodo per sintonizzare lo stesso. Il laser ha una risposta molto rapida, vale a dire che la velocità di sintonizzazione è relativamente elevata quando comparata ad altri laser sintonizzabili.

Stato dell'arte della tecnologia

Un laser sintonizzabile è un laser la cui lunghezza d'onda di funzionamento può essere alterata in modo controllato. Mentre sostanzialmente tutti i mezzi ottici attivi dei laser permettono piccoli spostamenti nella lunghezza d'onda di uscita, solo pochi tipi di laser permettono una sintonizzazione continua in una gamma di lunghezza d'onda significativa.

Vi sono molti tipi e categorie di laser sintonizzabili. Esistono allo stato gassoso, liquido e solido. I laser sintonizzabili trovano applicazioni per esempio nella spettroscopia, fotochimica, separazione isotopica di vapore atomico a laser e comunicazioni ottiche.

Il laser sintonizzabile può utilizzare tecnologie diverse per ottenere la sintonizzazione. I laser a riflettori distribuiti di Bragg con griglia di campionamento, per esempio, hanno una gamma di sintonizzazione relativamente maggiore. Altre tecnologie per raggiungere ampie gamme di sintonizzazione sono per esempio: laser a cavità esterna che utilizzano una struttura MEMS per sintonizzare la lunghezza di cavità o che utilizzano disposizioni per griglie a prisma multiplo. In alternativa, per ottenere una determinata gamma di regolazione, una matrice di laser DFB basati su diversi laser DFB a regolazione termica: La regolazione approssimata viene raggiunta selezionando la barra laser corretta e la sintonizzazione di fine viene eseguita termicamente. Un'altra opzione è il VCSEL sintonizzabile: una delle due pile di specchi è mobile.

Per alcune applicazioni, tuttavia, non è solo necessario che il laser possa essere sintonizzato all'interno di una data larghezza di banda, ma anche che la sintonizzazione venga eseguita in modo relativamente rapido.

Una di queste applicazioni è per esempio la tomografia a coerenza ottica (OCT) che utilizza luce coerente per acquisire immagini bidimensionali e tridimensionali di campioni, in particolare quando una prova non distruttiva del campione è necessaria, come ad esempio nei tessuti medici.

Il principio funzionale alla base dell'imaging OCT è l'interferenza luminosa. In un sistema OCT, il fascio di luce proveniente da una sorgente, per esempio una sorgente laser, è separato in due percorsi da un accoppiatore, che dirige la luce separata lungo due diversi bracci di un interferometro. Un braccio è

generalmente denominato braccio di riferimento, mentre l'altro viene denominato il braccio campione. Quando la luce esce dall'estremità di ciascuno dei due bracci, viene modellata da vari componenti ottici (specchio, lenti, eccetera) per controllare i parametri specifici del fascio quali forma, profondità di fuoco e distribuzione di intensità luminosa. Nel braccio di riferimento, la luce è retrodiffusa da uno specchio di riferimento (o qualsiasi altra superficie riflettente) e ritorna nel sistema di interferenza, propagandosi lungo lo stesso percorso da cui è venuta ma nella direzione opposta. Lo stesso processo avviene con la luce nel braccio campione, sebbene in questo caso la luce che esce dal braccio sia retrodiffusa dal campione. In un campione disomogeneo, strutture diverse all'interno del campione avranno diversi indici di rifrazione e la luce sarà retrodiffusa quando incontra un'interfaccia tra materiali di diverso indice di rifrazione. Le luci di ritorno da entrambi i bracci si ricombinano, per esempio in un accoppiatore, e generano un modello di interferenza, che viene registrato da un rilevatore.

Va inteso che nella presente applicazione il termine "luce" viene utilizzato nel senso generale di "radiazione elettromagnetica" e non è limitato alla radiazione nella gamma visibile.

Il campione può essere qualsiasi oggetto e la direzione di propagazione della luce che illumina il campione definisce la direzione di "profondità" del campione, o Z, mentre un piano perpendicolare a esso definisce un piano (X, Y). Lo scopo di OCT è, mediante una scansione di (X, Y), di acquisire informazioni sulla profondità del campione, cioè informazioni sul campione nella direzione Z, che è la direzione di propagazione del fascio di luce emesso dalla sorgente.

Per una posizione particolare dello specchio di riferimento, la luce che si propaga nel braccio di riferimento percorre una certa distanza ottica e forma il modello di interferenza corrispondente solo con la luce che ha percorso la stessa distanza ottica lungo il braccio campione, inclusa la porzione della distanza percorsa nel campione. Pertanto, quando lo specchio di riferimento viene traslato lungo la direzione di propagazione di luce, per diverse posizioni dello specchio, il riferimento di ritorno genera modelli di interferenza con la luce retrodiffusa dalle profondità corrispondenti all'interno del campione. In questo modo, è possibile misurare la dipendenza dalla profondità dell'intensità della luce retrodiffusa da sotto la superficie del campione.

Il segnale OCT registrato dal rilevatore durante un viaggio completo dello specchio di riferimento viene denominato scansione di profondità o A-scan. Per formare un'immagine OCT, il fascio del campione deve essere traslato sulla superficie del campione con una A-scan registrata in ogni posizione del fascio. Pertanto, una serie di A-scan consecutive viene ottenuta da un'immagine OCT o altrimenti chiamata B-scan (cioè insieme di A-scan consecutive lungo la direzione X). La combinazione 3D di tutte le A-scan e B-scan lungo la direzione Y, viene chiamata C-scan.

Nella scansione sopra descritta, vi sono due principali tecnologie OCT, OCT a dominio del tempo e OCT a dominio di Fourier (chiamato anche OCT a dominio della frequenza). Quest'ultima è ulteriormente divisa in

OCT a dominio spettrale (SD-OCT) e OCT del tipo a sorgente a spazzolamento (*swept source OCT, SS-OCT*). La SS-OCT utilizza una sorgente a banda larga che scansiona il campione in maniera controllata con una stretta linea spettrale lungo la larghezza di banda disponibile della sorgente. La differenza principale rispetto a prima è che lo specchio di riferimento è fissato, cioè non si muove. I movimenti dello specchio sono “sostituiti” dalle variazioni di lunghezza d'onda della sorgente luminosa. Come prima, tuttavia, il fascio di riferimento viene riflesso dallo specchio ora fissato e forma un modello di interferenza con la luce retrodiffusa dal campione, che è di conseguenza rilevata da un rilevatore di punti. A causa del modo in cui la sorgente viene scansionata attraverso la larghezza di banda disponibile, l'uscita è una fotocorrente dipendente dal numero d'onda che viene registrato dal rilevatore di punti contemporaneamente alla scansione della sorgente a banda stretta. La quantità di interesse, la A-scan, si ottiene eseguendo la trasformata di Fourier del segnale rilevato su uno spazzolamento (*sweeping*) della sorgente sulla banda larga disponibile. Ciò vuol dire che, nell'SS-OCT, il segnale OCT registrato dal rilevatore durante uno spazzolamento completo della sorgente nella sua banda larga viene denominato scansione di profondità o A-scan. La definizione di B-scan o C-scan resta immutata. Poiché la luce di una sorgente a spazzolamento (*swept source*) consiste in un segnale di sorgente con una lunghezza d'onda che cambia continuamente nel tempo, la lunghezza di coerenza del laser scansionato determina la profondità di imaging massima del sistema mentre la gamma di lunghezza d'onda su cui il laser viene spazzolato determina la risoluzione assiale del sistema. Pertanto, un laser di scansione con una larghezza di linea stretta consente una profondità di ispezione più profonda, mentre una gamma di spazzolamento più ampia produce immagini OCT con una risoluzione assiale più elevata.

Poiché i sistemi SS-OCT possono anche essere utilizzati per rilevare immagini di porzioni di corpi viventi, per esempio dell'occhio, è inoltre importante generare immagini OCT in tempo reale, per esempio per evitare problemi legati ai movimenti dell'occhio o per essere in grado di eseguire un imaging 3D di una porzione di tessuto anche durante un intervento chirurgico. Per esempio, un'immagine OCT avente una scansione di 200 x 200 pixel con una frequenza di ripetizione di 25 fotogrammi al secondo richiede un milione di scansioni di spazzolamento al secondo. Nella tecnologia SS-OCT, è pertanto importante avere una sorgente in cui il fascio di luce generato può variare il più rapidamente possibile.

Più in dettaglio, come menzionato, l'SS-OCT utilizza un interferometro. Il segnale di interferenza ottenuto, che è un segnale di battimento, ha una frequenza data. Supponendo che la sorgente vari linearmente la sua lunghezza d'onda (o frequenza), allora la frequenza del segnale di battimento è determinata dal ritardo relativo tra il segnale di riferimento proveniente dal braccio di riferimento e il segnale proveniente dal campione, pertanto essa dipende dalla distanza tra le due superfici che riflettono i due segnali in uscita dai due bracci. Se Δf è la velocità della variazione della frequenza di oscillazione della sorgente, la sua frequenza può essere scritta:

$$F = F_0 + (\Delta f)t$$

dove F_0 è la frequenza iniziale e t è il tempo trascorso dall'inizio della scansione. La frequenza di oscillazione che viene rilevata dal rivelatore del segnale di battimento (o segnale di interferenza) è quindi:

$$F_{beat} = F(t) - F(t - T) = (\Delta f)T$$

dove T è il tempo di ritardo tra i segnali ottici provenienti dai due bracci nell'interferometro che è a sua volta pari a

$$T = \frac{zn}{c}$$

5 dove z è la differenza nel percorso, c è la velocità della luce e n l'indice di rifrazione incontrato lungo il percorso della luce. I due bracci dell'interferometro hanno sostanzialmente una pari lunghezza, quindi la differenza di lunghezza z è principalmente dovuta alla differenza nel percorso causata dalla propagazione del segnale ottico nel campione.

Dopo che il segnale di interferenza è stato ricevuto, viene elaborato, può per esempio essere eseguita una
10 trasformata di Fourier e le frequenze rilevate elaborate indicano la profondità delle superfici riflettenti del campione.

Se il segnale di battimento di una riflessione singola relativa a una frequenza specifica o lunghezza d'onda del segnale ottico della sorgente viene rilevato per un tempo T_s e si suppone che la sorgente abbia una potenza di emissione costante, la sua trasformata di Fourier può essere scritta come

15 $S(F) = \sin \left[\frac{(F - F_0)T_s}{2} \right]$

Quindi la risoluzione di profondità (o z) del sistema OCT dipende dalla più piccola differenza rilevabile tra due frequenze di battimento che, in questo caso, può essere definita come la larghezza della funzione $\sin(x)/x$ al primo nodo della trasformata di Fourier. Senza essere vincolati dalla teoria, risulta che la risoluzione di profondità è pari a

20 $\Delta Z = \frac{c}{2n(T_s)(\Delta f)}$ (1)

dove $(\Delta f)(T_s)$ è la variazione totale di frequenza subita dalla luce emessa dalla sorgente durante un singolo spazzolamento. Ad esempio, per una risoluzione spaziale z di circa $10 \mu\text{m}$, il $(\Delta f)(T_s)$ prodotto (o larghezza di banda della sorgente) è di circa 100 nm .

La singola riflessione si riferisce a un punto di discontinuità nel campione che può riflettere o diffondere la
25 luce ed è preferibilmente visualizzato. Può appartenere alla superficie del campione. Alcuni campioni

possono avere più di un punto di riflessione per ciascuna lunghezza d'onda, a seconda della struttura del campione stesso. Ad esempio, nel caso di un occhio come campione, per ciascuna lunghezza d'onda e A-scan, è rilevata generalmente più di una riflessione. Ciascun punto di riflessione, appartenente a una superficie riflettente in una diversa posizione z , dà origine a una diversa frequenza di battimento.

5 Dal calcolo precedente, è chiaro che la sorgente da utilizzare nel sistema OCT ha bisogno di essere sintonizzabile in un'ampia gamma, allo stesso tempo ha bisogno anche di funzionare preferibilmente in un regime monomodale nell'intera gamma richiesta. Inoltre, l'ampia sintonizzazione dev'essere eseguita in un intervallo di tempo molto corto per permettere al sistema di essere utilizzato per esempio anche in campo medico.

10 Le sorgenti utilizzate nei sistemi SS-OCT comprese nell'arte antecedente sono per esempio sorgenti laser sintonizzabili. Le sorgenti laser sintonizzabili sono state menzionate in precedenza. Questi laser possono includere un mezzo di guadagno (*gain medium*), come una giunzione di semiconduttore, accoppiata con una cavità avente una lunghezza variabile, come una cavità VCSEL operata da MEMS. In maniera alternativa, può essere utilizzata una cavità di lunghezza fissa, incluso un filtro ottico avente una banda

15 sintonizzabile, come un laser a cavità esterna avente un filtro Etalon. La velocità di spazzolamento dipende dalla velocità dell'elemento mobile (nel caso di MEMS) o dalla sintonizzazione del filtro ottico. Gli elementi mobili ottici possono limitare la velocità di spazzolamento a causa della loro inerzia meccanica e quindi generalmente si preferisce un filtro ottico senza parti mobili. I filtri ottici, d'altra parte, come i filtri Etalon, che hanno un così ampio intervallo spettrale libero (*free spectral range*) (circa 100 nm per esempio)

20 sintonizzabili in un intervallo di tempo molto rapido, richiedono l'utilizzo di materiali elettro-ottici ultraveloci come il niobato di litio, o cristalli ottici molto speciali. Questi materiali hanno in ogni caso piccoli coefficienti elettro-ottici e quindi consentono piccole variazioni dell'indice di rifrazione.

Sommario dell'invenzione

25 La presente invenzione riguarda un laser sintonizzabile, un metodo per sintonizzare la lunghezza d'onda di un segnale luminoso coerente emesso da un laser, un sistema di imaging OCT e un metodo di analisi di OCT ottico, e in particolare per SS-OCT, in cui la sorgente laser utilizzata è sintonizzabile in maniera rapida e affidabile e allo stesso tempo fornisce una larghezza di banda o un intervallo spettrale libero (*free spectral range*) sufficientemente largo per molte applicazioni, come ad esempio la maggior parte delle applicazioni OCT.

30 Inoltre, un obiettivo dell'invenzione è di fornire una sorgente laser e un metodo per sintonizzare la lunghezza d'onda di un segnale luminoso coerente emesso da un laser, un sistema di imaging OCT e un metodo di analisi OCT ottico, e in particolare per SS-OCT, in cui la sorgente laser non include parti mobili per ottenere una sintonizzabilità ed è relativamente semplice da fabbricare.

I laser a cristalli liquidi sono noti. Un laser a cristallo liquido è un laser che utilizza un cristallo liquido come cavità risonante, consentendo la selezione della lunghezza d'onda di emissione e la polarizzazione dal mezzo laser attivo. Il mezzo di emissione di laser è abitualmente un colorante drogato nel cristallo liquido.

5 Iniziando con un cristallo liquido nella fase nematica, il passo elicoidale preferibilmente desiderato (la distanza lungo l'asse elicoidale per una completa rotazione delle sotto-unità a piano nematico) può essere ottenuto drogando il cristallo liquido con una molecola chirale. Per la luce polarizzata circolarmente con la stessa convenzione della mano (*handedness*), questa modulazione regolare dell'indice di rifrazione produce una riflessione selettiva della lunghezza d'onda data dal passo elicoidale, permettendo al laser a cristalli liquidi di fungere da propria cavità risonante. La sintonizzazione della lunghezza d'onda di uscita è ottenuta
10 variando fluidamente il passo elicoidale: mentre cambia l'avvolgimento, cambia anche la scala di lunghezza del cristallo. Questo a sua volta sposta il bordo della banda e cambia la lunghezza del percorso ottico nella cavità di emissione di laser. L'applicazione di un campo elettrico statico perpendicolare al momento dipolo della fase nematica locale fa ruotare le sotto-unità a forma di asta nel piano esagonale e riordina la fase chirale, avvolgendo o svolgendo il passo elicoidale.

15 In tali laser a cristalli liquidi, tuttavia, il riallineamento delle molecole (cioè dei loro assi ottici) è troppo lento per alcune applicazioni. Il cambiamento nell'indice di rifrazione del cristallo liquido, e quindi della lunghezza d'onda della luce emessa dal laser, è relativamente lento.

In realtà, per le applicazioni che richiedono una rapida variazione della lunghezza d'onda della luce emessa da un laser, i cristalli liquidi non sono generalmente considerati come materiali idonei a causa della lentezza
20 sopracitata delle variazioni dell'indice di rifrazione, altri materiali essendo preferiti, materiali che esibiscono un effetto elettro-ottico rapido e significativo, per esempio il niobato di litio, InP o altri semiconduttori.

In questo contesto "rapido" significa un effetto avente un tempo di risposta dell'ordine di 10 ns o anche più rapido, e "significativo" significa che la variazione conseguibile dell'indice di rifrazione del cristallo liquido relativo è superiore a 0,01.

25 D'altra parte, il termine "lento" è inteso nel presente documento come un effetto avente un tipico tempo di risposta dell'ordine di un millisecondo, come per esempio il riorientamento ad azionamento termico e/o elettrico dell'asse molecolare delle molecole di cristallo liquido.

In generale alcuni cristalli liquidi potrebbero avere un rapido effetto elettro-ottico, quest'ultimo tuttavia
30 non genera un cambiamento dell'indice di rifrazione significativo e per questa ragione i cristalli liquidi non sono generalmente noti come materiali idonei per le applicazioni che richiedono una variazione rapida della lunghezza d'onda della luce emessa da un laser. Tuttavia, recentemente un nuovo effetto, un effetto elettro-ottico, è stato scoperto nel cristallo liquido, come dettagliato per esempio in V.Borshch, S.V.

Shiyanovskii, O.D. Lavrentovich, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 107802; V. Borshch, S.V. Shiyanovskii, B.-X. Li, O.D. Lavrentovich, Physical Review E 90 (2014) 062504; B.-X. Li, V. Borshch, S.V. Shiyanovskii, S.-B. Liu, O.D. Lavrentovich, Appl. Phys. Lett. 104 (2014) 201105. Questo rapido effetto è chiamato NEMOP (Nanosecond Electrooptic Modification of an Order Parameter) e può generare un cambiamento significativo dell'indice di rifrazione dei cristalli liquidi

Un campo elettrico può indurre o modificare la birifrangenza nella fase isotropica e nematica dei cristalli liquidi. Nella fase isotropica, il campo elettrico induce la birifrangenza con un asse ottico lungo il campo. Nella nematica, è stato scoperto il cambiamento della birifrangenza esistente attraverso una modifica elettrica in nanosecondi dei parametri di ordine (NEMOP) che non richiede un riallineamento dell'asse ottico. Nella presente invenzione, è fatto uso di questo effetto per fabbricare un laser sintonizzabile con una sintonizzabilità molto rapida.

I Richiedenti si sono resi conto che sfruttare il classico fenomeno elettro-ottico che è relativo all'effetto Frederik, cioè il riorientamento del direttore n delle molecole in un campo elettrico a bassa frequenza causato da anisotropia della suscettibilità dielettrica, non è abbastanza rapido per gli utilizzi preferiti. Nell'effetto di Frederik, il campo elettrico applicato nella stessa direzione del direttore n forza il direttore a ruotare perpendicolarmente a E . Questo effetto può essere di certo relativamente rapido (centinaia di ns) quando il campo elettrico è acceso, ma lento quando il campo elettrico applicato al cristallo liquido è spento, a causa del comportamento elastico di NLC (tempo di decine di ms).

Per ottenere una risposta ultrarapida sia nella fase di attivazione sia di disattivazione del campo (decine di ns), i Richiedenti hanno scoperto che possono sfruttare l'effetto NEMOP (Nanosecond Electrically induced Modification of Order Parameters) del cristallo liquido come un filtro ottico sintonizzabile di un laser.

I Richiedenti hanno compreso che l'effetto NEMOP può essere sfruttato efficacemente applicando una differenza di tensione al cristallo liquido per un tempo di comando inferiore a 1 microsecondo, poiché si evitano o riducono gli effetti relativamente "lenti" che provocano variazioni dell'indice di rifrazione del cristallo liquido. Lo stesso vale nel caso di molteplici applicazioni ripetute di una differenza di tensione per una pluralità di tempi di comando (più brevi di 1 microsecondo)

Secondo un aspetto, l'invenzione riguarda un laser sintonizzabile comprendente una cavità.

Preferibilmente, la cavità include un mezzo di guadagno.

Preferibilmente, la cavità include un filtro ottico sintonizzabile.

Preferibilmente, la cavità include un primo e un secondo specchio, uno dei quali è parzialmente riflettente.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile include un primo e un secondo elettrodo.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile include un cristallo liquido.

Preferibilmente, il cristallo liquido è soggetto a un campo elettrico creato dal primo e dal secondo elettrodo.

5 Preferibilmente, il laser sintonizzabile comprende un generatore di tensione per applicare una differenza di tensione tra il primo e il secondo elettrodo.

Preferibilmente, il generatore di tensione è programmato per applicare la differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 μ s.

10 Preferibilmente, il generatore di tensione è programmato per variare la differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a 0,1 kV.

Secondo un secondo aspetto, l'invenzione riguarda un sistema di tomografia a coerenza ottica (OCT) che include il laser sintonizzabile secondo il primo aspetto emettendo un segnale luminoso coerente.

15 Preferibilmente, il sistema OCT include un interferometro ottico per dividere il segnale luminoso coerente in un braccio di riferimento che porta a un riflettore di riferimento e un braccio campione che porta a un campione.

Preferibilmente, il sistema OCT include un elemento ottico per dirigere selettivamente un segnale luminoso campione che esce dal braccio campione a una porzione specifica del campione, in modo che per ciascuna selezione nell'elemento ottico viene illuminata una porzione specifica diversa del campione.

20 Preferibilmente, il sistema OCT include un rivelatore ottico per la rilevazione di un segnale di interferenza generato da una combinazione di segnali di riferimento e di ritorno del campione dal braccio di riferimento e dal braccio campione, riflessi rispettivamente dal riflettore di riferimento e dal campione.

Secondo un terzo aspetto, l'invenzione riguarda un metodo per sintonizzare una lunghezza d'onda di un segnale luminoso coerente emesso da un laser sintonizzabile, il laser sintonizzabile comprendendo una cavità.

25 Preferibilmente, la cavità include un mezzo di guadagno.

Preferibilmente, la cavità include un filtro ottico sintonizzabile.

Preferibilmente, la cavità include un primo e un secondo specchio, uno dei quali è parzialmente riflettente.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile include un primo e un secondo elettrodo.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile include un cristallo liquido.

Preferibilmente, il metodo comprende l'applicazione di una differenza di tensione tra il primo e il secondo elettrodo per applicare un campo elettrico al cristallo liquido.

5 Preferibilmente, l'applicazione di una differenza di tensione include l'applicazione della differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 μ s.

Preferibilmente, l'applicazione di una differenza di tensione include la variazione della differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a 0,1 kV.

10 Secondo un quarto aspetto, l'invenzione riguarda un metodo di analisi di tomografia a coerenza ottica, comprendente: la fornitura di un sistema di tomografia a coerenza ottica secondo il secondo aspetto.

Preferibilmente, il metodo comprende lo spazzolamento del laser sintonizzabile per un intervallo di tempo ΔT , in modo che una lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente che porta al segnale luminoso campione che illumina la porzione specifica del campione cambi da una lunghezza d'onda minima a una
15 lunghezza d'onda massima.

Preferibilmente, detto spazzolamento include: l'applicazione di una differenza di tensione agli elettrodi per applicare un campo elettrico al cristallo liquido.

Preferibilmente, l'applicazione di una differenza di tensione include l'applicazione della differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 μ s.

20 Preferibilmente, l'applicazione di una differenza di tensione include la variazione della differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a 0,1 kV.

Preferibilmente, il metodo comprende il rilevamento del segnale di interferenza generato dallo
25 spazzolamento.

Preferibilmente, il metodo comprende l'elaborazione del segnale di interferenza rilevato generato dallo spazzolamento per ottenere un'immagine OCT della porzione specifica del campione.

Nel laser sintonizzabile dell'invenzione, il cristallo liquido è preferibilmente l'elemento sintonizzabile che permette la variazione di lunghezza d'onda della sorgente luminosa coerente emessa dal laser stesso.

Il cristallo liquido utilizzato (LC) può includere molti tipi di materiali di cristallo liquido, con anisotropia positiva o negativa, e una certa misura di ordine, relativa alla loro fase (nematica, smettica, colonnare, bent-core, blue-phase).

Una variabile S del cristallo liquido può essere definita come segue.

5 L'ordine nel cristallo liquido può essere approssimato dal seguente:

$$S = \left\langle \frac{3(\cos\theta)^2 - 1}{2} \right\rangle$$

dove θ è l'angolo di qualsiasi possibile molecola e il direttore medio.

Il grado di ordine massimo ideale è dove θ è zero, quindi $S=1$. La maggior parte dei casi reali di disposizione molecolare mostra un livello di ordine tra 0,3 e 0,9: per una fase nematica S è tra 0,7 e 0,4 (questa vicino alla transizione alla fase isotropa, dopo la transizione è 0). L'ordine è generalmente una funzione della
10 temperatura, che aumenta se si abbassa la temperatura da quella di clearing (temperatura di transizione alla fase isotropa).

I cristalli liquidi preferiti utilizzati nella presente invenzione sono quelli aventi un valore S compreso tra 0,3 e 0,8. Come viene definito e misurato il valore S può essere trovato ad esempio in **"Nanosecond electric modification of order parameter in nematic and isotropic phases of materials with negative and positive dielectric anisotropy"**, scritto da Bing-Xiang Lia et al, Emerging Liquid Crystal Technologies X, a cura di
15 Liang-Chy Chien, Harry J. Coles, Hirotsugu Kikuchi, Ivan I. Smalyukh, Proc. of SPIE Vol. 9384, 93840U - © 2015 SPIE e in **"Measurement of order parameter, birefringence and polarizability of liquid crystals"**, scritto da Anita Kanwar, J. Optics disponibile online al seguente Digital Object Identifier (D.O.I.), DOI: 10.1007/s12596-013-0141-1.

20 Il cristallo liquido utilizzato nel laser è un cristallo liquido avente una risposta NEMOP. Pertanto, il cristallo liquido utilizzato ha preferibilmente un coefficiente elettro-ottico. Un'efficienza elettro-ottica può essere definita come $\frac{\Delta n}{E}$, che è la rapporto tra la variazione nell'indice di rifrazione e il campo elettrico applicato. Il cristallo liquido utilizzato nell'invenzione ha preferibilmente l'efficienza elettro-ottica maggiore di 30 pm/V. Inoltre, il cristallo liquido selezionato ha una risposta rapida al campo elettrico. Il tempo in cui modificano il
25 loro indice di rifrazione all'applicazione di un campo elettrico è $< 1 \mu s$.

La sorgente laser ha una cavità. La cavità è limitata da specchi. Preferibilmente, uno degli specchi è uno specchio parzialmente riflettente e l'altro è uno specchio ad alta riflettanza. La cavità include un mezzo di guadagno e un filtro ottico sintonizzabile. Il filtro ottico sintonizzabile include preferibilmente il cristallo liquido come specificato sopra.

Come noto, affinché il mezzo di guadagno amplifichi la luce, è necessario che sia alimentato tramite pompaggio. L'energia è tipicamente alimentata come corrente elettrica o come luce a una diversa lunghezza d'onda. La luce dal mezzo di guadagno rimbalza avanti e indietro tra gli specchi, passando attraverso il mezzo di guadagno ed essendo amplificata ogni volta. La luce passa anche attraverso il filtro ottico sintonizzabile. Lo specchio parzialmente trasparente permette a parte della luce di sfuggire attraverso esso. Pertanto, a seconda delle caratteristiche del filtro ottico, per esempio il suo indice di rifrazione, la lunghezza d'onda della luce che sfugge dalla cavità attraverso lo specchio parzialmente trasparente può variare. Cambiando le caratteristiche del filtro ottico sintonizzabile, cambia la lunghezza d'onda della luce emessa dal laser.

Il filtro ottico dell'invenzione ha una larghezza di banda o intervallo spettrale libero (*free spectral range*), ad esempio può essere sintonizzabile da un valore minimo a un valore massimo di indice di rifrazione (o viceversa) applicando ad esso un campo elettromagnetico.

La sintonizzazione della lunghezza d'onda dell'emissione del laser, cioè la lunghezza d'onda di un segnale luminoso coerente, dipende quindi dall'indice di rifrazione del filtro ottico sintonizzabile. L'effetto utilizzato nella presente invenzione per ottenere una variazione della lunghezza d'onda del Cristallo Liquido nel filtro ottico sintonizzabile nella cavità della sorgente laser è l'effetto NEMOP (Nanosecond Electrically Induced Modification of Order Parameters del cristallo liquido).

Nell'effetto NEMOP, il campo elettrico viene applicato al cristallo liquido perpendicolarmente al direttore n , in modo da evitare il suo riorientamento: solo i componenti del tensore ottico vengono cambiati:

$$\tilde{\epsilon}_x = \tilde{\epsilon}_\perp + \delta\tilde{\epsilon}_x; \quad \tilde{\epsilon}_y = \tilde{\epsilon}_\perp + \delta\tilde{\epsilon}_y; \quad \tilde{\epsilon}_z = \tilde{\epsilon}_\parallel + \delta\tilde{\epsilon}_z.$$

Il cristallo liquido può essere di qualsiasi tipo con dielettrico positivo o negativo e anisotropia magnetica.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile è un etalon (chiamato anche filtro Fabry-Pérot).

Inoltre, per ottenere una larghezza di banda ragionevole, il cristallo liquido è preferibilmente drogato. Il cristallo liquido è preferibilmente drogato con un additivo polare, vale a dire, con molecole polari, preferibilmente con molecole fortemente polari. In alternativa o in aggiunta, il materiale LC può includere vari additivi, ad esempio, ma non solo: nanoparticelle, reti polimeriche che formano sistemi polimerici stabilizzati, ad esempio, cristallo liquido disperso in polimeri (PDLC), cristallo liquido stabilizzato con polimeri (PSLC), LC in mezzi porosi, LC drogato con nanoparticelle e particelle submicroniche organiche e inorganiche di metallo, polimero, dielettrico.

La sintonizzazione del cristallo liquido viene quindi eseguita applicando un campo elettromagnetico esterno attraverso il cristallo liquido mediante elettrodi. Per questo fine, un primo e un secondo elettrodo interpongono il cristallo liquido, formando una cella.

Una variazione nel campo elettromagnetico applicato causa una variazione nell'indice di rifrazione del cristallo liquido e quindi una variazione della lunghezza d'onda del segnale di luce coerente emesso dal laser.

Per esempio, per ottenere una sintonizzabilità lineare, il segnale generatore stimola gli elettrodi che applicano una tensione di comando al cristallo liquido nel filtro ottico. Variando linearmente la differenza di tensione, l'indice di differenza di rifrazione di LC varia linearmente, così come cambia la caratteristica di trasmissione del filtro Fabry-Perot.

La differenza di tensione viene applicata per un breve lasso di tempo. Cioè, la differenza di tensione viene applicata agli elettrodi per un intervallo di tempo di comando avente una durata data in modo che anche il campo elettromagnetico generato è applicato al cristallo liquido per un breve intervallo di tempo. La differenza di tensione applicata include almeno un periodo "on", vale a dire che la differenza di tensione viene applicata almeno per un intervallo di tempo di comando che dura meno di 1 μ s.

L'intervallo di tempo di comando ha preferibilmente una durata compresa tra 1 ns e 1 μ s. Più preferibilmente, l'intervallo di tempo di comando ha preferibilmente una durata compresa tra 10 e 500 ns. Più preferibilmente, l'intervallo di tempo di comando ha una durata compresa tra 10 e 100 ns.

Questa differenza di tensione, per sintonizzare la lunghezza d'onda, all'interno di un singolo intervallo di tempo di comando, viene anch'essa variata per ottenere, ancora all'interno dello stesso intervallo di tempo di comando, una variazione della lunghezza d'onda del segnale di luce coerente emesso dal laser. All'interno della sintonizzazione, vengono raggiunti valori relativamente alti di differenza di tensioni tra gli elettrodi.

La differenza di tensione di pilotaggio è preferibilmente di circa 0,1 kV, più preferibilmente di circa 0,2 kV, più preferibilmente compresa tra 0,2 kV e 10 kV, più preferibilmente compresa tra 0,5 kV e 5 kV, ancora più preferibilmente compresa tra 1 kV e 2 kV.

Questa differenza di tensione di comando tra due elettrodi crea un campo elettromagnetico dell'ordine di 10^8 V/m al cristallo liquido. Questo campo elettromagnetico, per di più applicato a una cella relativamente stretta, è relativamente alto e potrebbe causare danni alla cella stessa se applicata troppo a lungo. Pertanto, preferibilmente, la tensione tra due elettrodi non è applicata continuamente, ma in intervalli di tempo di comando brevi. Ancora più preferibilmente, la differenza di tensione viene applicata in intervalli di tempo di comando "brevi", cioè più brevi o pari a 1 μ s. All'interno di questo corto intervallo di tempo di

comando, si verifica una variazione della differenza di tensione applicata che porta a una regolazione della lunghezza d'onda del segnale emesso dal laser. Ciò è possibile poiché la risposta NEMOP è molto rapida. La risposta standard del cristallo liquido, cioè il riorientamento delle molecole, sarebbe troppo lento per reagire all'applicazione di questa tensione. Tuttavia, la risposta NEMOP, essendo dell'ordine di ns, è
5 abbastanza rapida da seguire l'effetto di tale differenza di tensione dell'intervallo di tempo di comando rapido.

I Richiedenti hanno capito che applicando una differenza di tensione al cristallo liquido per un tempo di comando inferiore a 1 microsecondo, si evitano o riducono gli effetti relativamente "lenti" che provocano variazioni dell'indice di rifrazione del cristallo liquido. Ciò vale anche nel caso di applicazioni multiple
10 ripetute di una differenza di tensione per una pluralità di tempi di comando (inferiori a 1 microsecondo), purché tale pluralità di tempi di comando sia generata con una frequenza di ripetizione compresa tra 100 KHz e 100 MHz, che corrisponde a un tempo di ripetizione compreso tra 0,01 millisecondi e 0,01 microsecondi.

Il termine "lento" è inteso nel presente documento come un effetto avente un tipico tempo di risposta
15 dell'ordine di un millisecondo, come per esempio il riorientamento ad azionamento termico e/o elettrico dell'asse molecolare delle molecole di cristallo liquido.

Di conseguenza, questi effetti lenti possono causare forti variazioni dell'indice di rifrazione dei cristalli liquidi ($\Delta n > 0,1$) quando comandati a una frequenza massima di 10 KHz. D'altra parte, la variazione dell'indice di rifrazione causato da quegli effetti "lenti" diminuisce quando la frequenza di comando eccede
20 i 10 kHz. In particolare, quando la differenza di tensione viene applicata al cristallo liquido per un tempo di comando inferiore a 1 microsecondo, il contributo alla variazione dell'indice di rifrazione del cristallo liquido di qualsiasi effetto "lento" è minore o perfino molto minore rispetto alla variazione dell'indice di rifrazione del cristallo liquido dovuta all'effetto NEMOP, che può essere grande abbastanza da produrre una variazione Δn reversibile dell'indice di rifrazione del cristallo liquido maggiore di 0,01 (a circa 0,5 kV di
25 differenza di tensione di pilotaggio).

Ancora una volta, ciò vale anche nel caso di ripetute applicazioni multiple di una differenza di tensione per una pluralità di tempi di comando (inferiori a 1 microsecondo), purché tale pluralità di tempi di comando sia generata con una frequenza di ripetizione compresa tra 100 KHz e 100 MHz.

Frequenze di ripetizione superiori anche a 100 MHz, cioè nella gamma dei GHz o superiore, possono anche
30 essere previsti con un drogaggio adeguato del cristallo liquido.

Il campo elettromagnetico esterno è preferibilmente applicato in configurazioni di accensione e spegnimento. Per esempio, il campo elettromagnetico è applicato al LC per un intervallo di tempo dato ed è spento. Alternativamente, può essere variato rapidamente. I tempi tipici di salita e discesa del campo elettromagnetico in questo comportamento on/off sono di circa 5-10 ns. Bisogna notare che la risposta del

cristallo liquido dovuta all'effetto NEMOP mostra un tempo di risposta molto rapido, tipicamente inferiore a 100 ns.

Gli elettrodi sono connessi a un generatore di segnale in modo che un segnale possa essere applicato agli elettrodi per generare un campo elettromagnetico. Tale segnale è stato descritto in precedenza.

5 Il sistema OCT e il metodo dell'invenzione sono utilizzati per ottenere una scansione OCT di un campione. Il campione può essere una porzione del corpo umano o qualsiasi altro elemento desiderato, trasparente alla gamma di lunghezza d'onda impiegata del segnale emesso da una sorgente luminosa.

10 Nel sistema SS-OCT dell'invenzione, viene utilizzata una sorgente laser. La sorgente laser può emettere un segnale luminoso coerente avente una lunghezza d'onda che può essere variata all'interno di una data larghezza di banda. Questo laser può essere per esempio un laser sintonizzabile. Il laser sintonizzabile ha una larghezza di banda $\Delta\lambda$.

15 Nel sistema SS-OCT, la luce coerente dal laser è divisa in due mediante un interferometro. I due bracci degli interferometri sono chiamati bracci campione e di riferimento. Pertanto una porzione del segnale luminoso diviso viaggia nel braccio campione ed esce da questo, generando il segnale luminoso campione. Il segnale
20 luminoso campione che esce dal braccio campione illumina una porzione del campione. Per selezionare quale porzione del campione deve essere illuminata per ottenere una A-scan dello stesso, un elemento ottico è fornito per spostare la luce coerente proveniente dal braccio campione a diverse porzioni del campione. Secondo dati parametri, l'elemento ottico può illuminare selettivamente con il segnale luminoso
25 luminoso campione proveniente dal braccio campione una porzione del campione. Questa porzione illuminata cambia, cioè viene selezionata un'altra porzione del campione, quando l'elemento ottico sposta il segnale luminoso campione sul campione. L'illuminazione delle due diverse porzioni del campione può parzialmente sovrapporsi, cioè due selezioni possono portare a un'illuminazione delle due diverse porzioni del campione che non sono completamente distinte dal punto di vista spaziale. Una A-scan corrisponde a
ciascuna selezione da parte dell'elemento ottico di una porzione del campione, per esempio una A-scan in un'immagine OCT di una porzione del campione selezionato dall'elemento ottico.

30 Questa selezione di una porzione del campione da parte dell'elemento ottico può essere effettuata meccanicamente, per esempio considerando l'elemento ottico come comprendente uno specchio rotante che può dirigere il segnale luminoso campione proveniente dal braccio campione verso una porzione specifica del campione. Il segnale luminoso campione può essere orientato in movimento, per esempio ruotando, lo specchio stesso, per esempio lungo la direzione X o Y, entrambe perpendicolari alla direzione di propagazione del segnale luminoso campione proveniente dal braccio campione, finché la porzione desiderata del campione viene illuminata.

Alternativamente, il segnale luminoso campione proveniente dal braccio campione può essere spostato sul campione per selezionare una porzione desiderata utilizzando un dispositivo acusto-ottico, e quindi la porzione del campione da illuminare può essere selezionata cambiando un valore di tensione o corrente che viene alimentato all'elemento ottico. Qualsiasi dispositivo ottico atto a cambiare la posizione di un
 5 segnale luminoso campione su un campione può essere utilizzato anche come elemento ottico.

Il secondo braccio dell'interferometro, il braccio di riferimento, ha la stessa funzione dell'SS-OCT standard ed emette un segnale luminoso di riferimento verso un riflettore di riferimento.

Il campione e il riflettore riflettono la luce sui due bracci dell'interferometro generando rispettivamente un segnale di ritorno campione e un segnale di ritorno di riferimento.

10 Selezionata una porzione del campione da illuminare, viene eseguito uno spazzolamento della sorgente luminosa, cioè viene eseguita una sintonizzazione della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente emesso dalla sorgente, dove la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente viene modificata entro $\Delta\lambda$ per un tempo di spazzolamento ΔT . Lo spazzolamento viene eseguito mantenendo sempre fisso nella stessa posizione il fascio del segnale luminoso campione proveniente dal braccio campione, cioè impattando
 15 sempre la stessa porzione selezionata di campione per l'intera durata di spazzolamento. Questo spazzolamento corrisponde alla generazione di una singola A-scan. Durante l'intervallo ΔT , la luce emessa dalla sorgente cambia la sua lunghezza d'onda da un minimo a un massimo. Il minimo e il massimo sono dati dalla larghezza di banda della sorgente laser, data dal filtro ottico contenente l'LC.

La sintonizzazione dell'LC dovuta all'effetto NEMOP è molto rapida e particolarmente idonea per
 20 l'applicazione OCT.

Nel primo, secondo, terzo o quarto aspetto menzionato in precedenza, l'invenzione può includere le caratteristiche seguenti, in combinazione o come alternative.

Preferibilmente, l'applicazione di una differenza di tensione include l'applicazione della differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 ns e 1 μ s.

25 Sebbene l'effetto NEMOP sia "rapido", c'è un limite del tempo di risposta anche quando si utilizza questo fenomeno. Pertanto, preferibilmente, la differenza di tensione viene applicata agli elettrodi più a lungo di 1 ns, preferibilmente più a lungo di 5 ns.

Preferibilmente, il cristallo liquido comprende o è un cristallo liquido nematico.

Preferibilmente, il cristallo liquido o il cristallo liquido nematico sono drogati con un additivo polare.

Preferibilmente, variando la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo in un intervallo di tempo di comando, si può variare la differenza di tensione tra un minimo e un massimo.

Pertanto, il valore di 0,1 kV è preferibilmente incluso tra questo minimo e questo massimo.

5 Preferibilmente, variare la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo in un intervallo di tempo di comando include variare la differenza di tensione linearmente con il tempo.

Nella sintonizzazione della lunghezza d'onda, la variazione di essa nel tempo può essere lineare. Per ottenere una variazione lineare della lunghezza d'onda, viene eseguita una variazione lineare del campo elettrico applicato al LC.

10 Preferibilmente, variare la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo in un intervallo di tempo di comando include: variare la differenza di tensione tra un valore minimo e un valore massimo; e variare la differenza di tensione tra il valore massimo e il valore minimo successivamente.

Le variazioni possono essere in entrambe le direzioni, o aumentando o diminuendo la lunghezza d'onda emessa dal laser. Si ottiene un comportamento triangolare della lunghezza d'onda nel tempo. Se la velocità alla quale la differenza di tensione applicata è aumentata e la velocità alla quale la differenza di tensione applicata è diminuita è sostanzialmente la stessa, allora il risultato della variazione della lunghezza d'onda nel tempo è una curva che assomiglia a un triangolo isoscele.

Preferibilmente, variare la tensione applicata al primo e al secondo elettrodo in un intervallo di tempo di comando include: variare la differenza di tensione tra un valore minimo e un valore massimo; e interrompere l'applicazione di differenza di tensione.

20 Preferibilmente, in un'applicazione successiva di una differenza di tensione agli elettrodi, la tensione applicata è tale che si verifica la fase successiva: variazione della tensione tra il valore minimo e il valore massimo dopo l'interruzione.

Un'onda a dente di sega viene ottenuta.

25 Preferibilmente, la differenza di tensione applicata ha un intervallo di ripetizione compreso tra 100 kHz e 100 Mhz. Preferibilmente, l'applicazione di una variazione della tensione applicata al primo e al secondo elettrodo in un intervallo di tempo di comando comprende: applicazione di una differenza di tensione al primo e al secondo elettrodo con una frequenza di ripetizione compresa tra 100 kHz e 100 Mhz.

30 Preferibilmente, la differenza di tensione non viene applicata al primo e al secondo elettrodo solo una volta per un intervallo di tempo di comando inferiore a 1 μ s, ma per diversi intervalli di tempo di comando, tutti inferiori a 1 μ s. Gli intervalli di tempo di comando possono avere tutti la stessa durata o diverse durate.

Preferibilmente, il filtro ottico sintonizzabile comprende inoltre un primo e un secondo strato dielettrico ad alta riflettanza fra i quali si interpone il cristallo liquido.

Preferibilmente, lo strato ad alta riflettanza è uno strato dielettrico ad alta riflettanza, pertanto il filtro ottico sintonizzabile comprende inoltre un primo e un secondo strato dielettrico ad alta riflettanza fra i quali si interpone il cristallo liquido.

Più preferibilmente, il primo e/o il secondo strato ad alta riflettanza definisce una riflettanza, la riflettanza essendo maggiore o uguale al 95%.

La riflettanza dello strato altamente riflettente è preferibilmente maggiore del 95% per garantire una ridotta larghezza della linea spettrale del segnale in uscita dalla cavità. Per l'applicazione OCT, una larghezza di linea di 0,6 nm è generalmente preferita poiché può portare, per una geometria di etalon tipica, a una riflettanza maggiore del 95%, preferibilmente maggiore del 97%.

Preferibilmente, lo strato ad alta riflettanza è un multistrato.

Preferibilmente, lo strato dielettrico ad alta riflettanza ha uno spessore compreso tra 1 μm e 10 μm . Preferibilmente, lo spessore è compreso tra 1 e 6 μm . Questo valore include lo spessore dell'intero strato su entrambi i lati del cristallo liquido.

Preferibilmente, il cristallo liquido definisce uno spessore di cristallo liquido, e in cui la distanza tra il primo e il secondo elettrodo è compresa tra 10 micron e 200 micron.

Preferibilmente, gli strati ad alta riflettanza sono interposti tra gli elettrodi e il cristallo liquido. Alternativamente, gli elettrodi sono interposti tra gli strati ad alta riflettanza e il cristallo liquido.

Per esempio, il cristallo liquido nel laser dell'invenzione riempie uno spazio vuoto tra due lastre otticamente trasparenti (preferibilmente vetro), in cui detto spazio vuoto ha una larghezza inferiore a 100 μm , preferibilmente inferiore a 50 μm , ancora più preferibilmente inferiore a 30 μm . D'altra parte, la larghezza dello spazio vuoto è preferibilmente maggiore di 10 μm . In generale, minore è lo spazio vuoto tra due lastre otticamente trasparenti, maggiore sarà la gamma spettrale libera (*free spectral range*) derivante dal filtro sintonizzabile. Allo stesso tempo, lo spazio vuoto ha preferibilmente una larghezza minima, in modo che il cristallo liquido possa essere interposto tra dette due lastre otticamente trasparenti, riempiendo lo spazio vuoto.

Secondo una forma di realizzazione, il cristallo liquido viene applicato mediante centrifugazione su una lastra otticamente trasparente (preferibilmente vetro) e poi confinata a un'altra lastra otticamente trasparente (preferibilmente vetro). Ancora più preferibilmente, le lastre trasparenti sono interposte tra elettrodi esterni e questi ultimi vengono interposti tra strati di vetro esterni.

La tipica gamma di spessore di LC per ottenere la sintonizzabilità della sorgente laser nell'intervallo desiderato, per esempio in una gamma maggiore di 20 nm, è preferibilmente tra 10 e 50 micron, più preferibilmente tra 15 e 40 micron, ancora più preferibilmente tra 20 e 30 micron. Lo spessore della cella è sostanzialmente lo spessore del cristallo liquido poiché lo spessore del multistrato dielettrico è
 5 relativamente piccolo, rispetto a quello degli strati ad alta riflettanza.

Secondo una forma di realizzazione, la cella comprende, dall'alto verso il basso (alto e basso sono utilizzati per descrivere una successione di strati, l'orientamento fisico della cella può essere arbitrario): substrato di quarzo o di vetro, uno strato di Ossido di stagno di indio (ITO) conduttivo e trasparente alle lunghezze d'onda che viaggiano nella cavità (questo definisce l'elettrodo), un multistrato dielettrico avente un'alta
 10 riflettanza e includente due strati, un basso indice di rifrazione uno (ad esempio SiO_2) e un alto indice di rifrazione uno (ad esempio TiO_2), il cristallo liquido e poi ancora il multistrato dielettrico, ITO e substrato di quarzo o di vetro. La posizione dell'elettrodo e del multistrato può essere scambiata per modificare la riflettanza nel campo di lunghezza d'onda di interesse.

Preferibilmente, l'additivo polare ha una anisotropia dielettrica negativa.

15 Il cristallo liquido nematico senza additivi può mostrare una variazione limitata nell'indice di rifrazione. Può essere aggiunto un additivo non-mesogenico, per esempio 2, 3-diciano-4-pentilossifenil 4'-pentilossibenzoato (DPP) con un grande momento di dipolo trasversale a materiali mesogenici per migliorare la loro anisotropia dielettrica negativa. Il drogaggio del DPP aumenta sostanzialmente la birifrangenza indotta dal campo negli effetti NEMOP e Kerr, fino a 0,02. Il drogaggio rallenta anche i
 20 processi di commutazione, ma quest'effetto può essere compensato aumentando le temperature di lavoro, se necessario.

Preferibilmente, il primo e il secondo elettrodo sono almeno parzialmente trasparenti a una radiazione avente una lunghezza d'onda data che risuona nella cavità.

Il cristallo liquido viene posizionato tra due elettrodi, per esempio pellicole sottili di ridotta resistività, materiale di alta trasparenza TCO (ossido conduttivo trasparente). Questi strati conduttivi sono preferibilmente rivolti l'uno verso l'altro all'interno della cella e sono separati da un apposito spazio
 25 riempito dal materiale scelto. La cella può essere sigillata mediante una guarnizione contenente microparticelle controllate dimensionalmente per garantire una distanza uniforme. Inoltre, il multistrato dielettrico altamente riflettente è preferibilmente depositato sopra almeno uno, preferibilmente sopra
 30 ciascuno, del TCO per garantire un comportamento di Fabry Perot. Va inteso che il significato di "sopra" è uguale a "a contatto con la superficie di", essendo l'orientamento della cella di cristallo liquido arbitrario.

Secondo una forma di realizzazione, la cella comprende, dagli strati interni agli strati esterni, il cristallo liquido o il cristallo liquido nematico interposto tra le lastre di vetro $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ che formano il multistrato ad alta riflettanza, il multistrato ad alta riflettanza essendo interposto tra un paio di elettrodi, il paio di elettrodi essendo interposto tra un paio di strati di vetro.

5 Preferibilmente, le lastre di vetro $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ non hanno proprietà elettro-ottiche.

Preferibilmente, il primo specchio è parzialmente riflettente e il secondo specchio è sostanzialmente totalmente riflettente; il primo specchio definisce una gamma spettrale libera (*free spectral range*) dello specchio e il filtro ottico sintonizzabile definisce una gamma spettrale libera del filtro; e la gamma spettrale libera dello specchio è dello stesso ordine di grandezza dello stesso ordine di grandezza della gamma
10 spettrale libera del filtro.

Più preferibilmente, la gamma spettrale libera (*free spectral range*) del filtro e/o la gamma spettrale libera dello specchio è > 20 nm.

A causa del fatto che la lunghezza d'onda della luce nella cavità varia perché il filtro ottico può essere sintonizzabile, anche lo specchio parzialmente trasparente ha preferibilmente un intervallo spettrale dato
15 libero. Preferibilmente, la gamma spettrale libera dello specchio parzialmente trasparente è la stessa o sostanzialmente la stessa dell'intervallo spettrale libero del filtro ottico. In questo modo, si può ottenere la linearità dell'uscita della sorgente laser e si evita sostanzialmente l'emissione simultanea di raggio laser a due o più lunghezze d'onda. Preferibilmente, la gamma spettrale libera (*free spectral range*) dello specchio e/o del filtro ottico sintonizzabile è minore di 40 nm, più preferibilmente minore di 30 nm, più
20 preferibilmente maggiore di 20 nm.

Più preferibilmente, il sistema OCT include inoltre un'unità di elaborazione, detta unità di elaborazione essendo programmata per, per la stessa selezione nell'elemento ottico che illumina una porzione specifica del campione, definendo un intervallo di tempo di spazzolamento ΔT .

Preferibilmente, il sistema OCT include inoltre un'unità di elaborazione, detta unità di elaborazione essendo
25 programmata per, per la stessa selezione nell'elemento ottico che illumina una porzione specifica del campione, cambiando il segnale di luce coerente che porta al segnale di luce del campione che illumina la porzione specifica del campione da una lunghezza d'onda minima a una lunghezza d'onda massima e nello stesso spazzolamento modifica la lunghezza d'onda del segnale di luce coerente in modo da raggiungere lo stesso valore tra la lunghezza d'onda minima e la lunghezza d'onda massima almeno due volte durante lo
30 spazzolamento.

Preferibilmente, il sistema OCT include inoltre un'unità di elaborazione, detta unità di elaborazione essendo programmata per, per la stessa selezione nell'elemento ottico che illumina una porzione specifica del

campione, elaborando il segnale di interferenza rilevato per ottenere un'immagine OCT della porzione specifica del campione.

5 Come mostrato nella figura 1 e nell'equazione (1) precedente, è stato mostrato che per avere la risoluzione di profondità necessaria in una quantità limitata di tempo (un tempo di spazzolamento rapido), la variazione nella lunghezza d'onda della luce emessa dalla sorgente in un periodo di tempo così breve dev'essere alquanto ampia, ovvero di circa 100 nm o più. Questo limita notevolmente il numero di sorgenti luminose disponibili o richiede l'utilizzo di una sorgente luminosa molto costosa o complessa.

10 I Richiedenti hanno notato che i tempi di ritardo dei segnali luminosi provenienti dagli interferometri hanno una grandezza di frazioni di nanosecondi, mentre il tempo di spazzolamento complessivo per ogni A-scan è dell'ordine di centinaia di nanosecondi, quindi ci sono tre ordini di grandezza di differenza. Inoltre, i richiedenti hanno notato che, per i segnali di interferenza rilevati, delle frequenze positive o negative hanno lo stesso "effetto". Il segnale di interferenza, in altre parole, non dipende dalla frequenza di oscillazione assoluta, ma dipende dal (piccolo rispetto alla durata di spazzolamento complessiva) ritardo tra i segnali provenienti dal campione e dal riferimento e che viaggiano nei due bracci dell'interferometro, e
15 dalla velocità in cui la frequenza (o lunghezza d'onda) cambia nel tempo.

I Richiedenti si sono quindi resi conto che non è necessario aumentare continuamente la lunghezza d'onda della luce emessa dalla sorgente luminosa durante l'intero tempo di spazzolamento. Dato un tempo di spazzolamento ΔT , in cui si ottiene una singola A-scan, la lunghezza d'onda della luce emessa dalla sorgente del sistema OCT non ha bisogno di aumentare da un minimo ottenuto a $t=0$ a un massimo ottenuto a $t= \Delta T$,
20 come generalmente ipotizzato nell'arte antecedente. Il tempo di spazzolamento ΔT può essere diviso in sotto-intervalli, o tempi di sotto-spazzolamento, in ognuno dei quali la lunghezza d'onda del segnale emesso dalla sorgente potrebbe aumentare o diminuire tra un minimo e un massimo. Questo massimo può essere minore, perfino molto minore, rispetto alla lunghezza d'onda massima che in un regime lineare, come per esempio quello della figura 1, deve essere raggiunta per ottenere la risoluzione desiderata in
25 profondità.

Avere un tempo di scansione in cui la sorgente cambia la sua lunghezza d'onda non solo in modo monotono permette di utilizzare in un sistema SS-OCT sorgenti luminose che hanno una gamma di variazione di lunghezza d'onda più limitata rispetto a quanto richiesto dall'arte antecedente, senza penalizzare il tempo per ottenere la scansione complessiva e la qualità dell'immagine (risoluzione).

30 Nella presente invenzione, durante lo spazzolamento, la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente viene cambiata, ma non è sempre in aumento come illustrato nella figura 1. Nella presente invenzione, il tempo di spazzolamento ΔT viene diviso in vari sotto-intervalli, almeno due sotto-intervalli. In ciascuno di questi sotto-intervalli di spazzolamento, tutti appartenenti allo stesso spazzolamento, ovvero tutti

concorrenti alla realizzazione della stessa A-scan (ovvero tutti concorrenti alla formazione di un'immagine OCT della stessa porzione del campione in profondità), la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente è variata, preferibilmente, ma non necessariamente, in modo lineare.

In ogni sottointervallo, la lunghezza d'onda λ del segnale di sorgente luminoso è variata, all'interno dell'intervallo definito dal minimo e massimo complessivo (ma non necessariamente raggiungendoli), in modo tale che la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente a un istante all'interno del sottointervallo $(i+M)_{esimo}$ (dove i e M sono numeri interi) abbia lo stesso valore che aveva in un istante diverso durante il sottointervallo i_{esimo} , cioè:

λ nel sottointervallo i_{esimo} al tempo $t_1 = \lambda$ nel sottointervallo $(i+M)_{esimo}$ al tempo t_2

Potrebbero esserci molti "punti" (per esempio istanti di tempo o perfino intervalli di tempo) in cui il segnale di sorgente luminosa ha la stessa lunghezza d'onda sia nel sottointervallo i_{esimo} sia nel sottointervallo $(i+M)_{esimo}$. Inoltre, se ci sono $N > 2$ intervalli di sotto-spazzolamento, ci potrebbe essere un istante nel primo sottointervallo in cui la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente è identica alla lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente in un istante nel secondo sottointervallo che è identico alla lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente in un istante nel terzo intervallo e così via, ad esempio:

λ nel sottointervallo i_{esimo} in un tempo $t_1, t_2, t_3... = \lambda$ nel sottointervallo $(i+M)$ -esimo in un tempo $t_k, t_{k+1}, t_{k+2}... =$

λ nel sottointervallo $(i+M+L)$ -esimo in un tempo $t_m, t_{m+1}, t_{m+2}...$

dove M, i e L sono numeri interi.

Lo spazzolamento è quindi diviso in sotto-spazzolamenti in cui la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente ha un comportamento dato. La durata Δt_i di ogni intervallo di sotto-spazzolamento, dove $i=1...N$ numero intero, è tale che $\sum_1^N \Delta t_i = \Delta T$.

In questo modo, l'ampiezza dell'intervallo in cui la lunghezza d'onda del segnale di sorgente luminosa deve essere sintonizzato può essere minore rispetto alla situazione della figura 1, ma lo stesso risultato è raggiunto in termini di velocità e risoluzione. La variazione di lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente emesso dalla sorgente è divisa in "sotto variazioni", ciascuna richiedendo un intervallo minore. Ciò non influenza la risoluzione del sistema, come dettagliato in seguito.

Bisogna sottolineare che la sorgente luminosa nell'SS-OCT è una sorgente luminosa singola che esegue lo spazzolamento nel modo sopra descritto. In altre parole, lo spazzolamento che include i sotto-intervalli è generato da una singola sorgente luminosa, la cui lunghezza d'onda è modulata in ciascun sottointervallo di spazzolamento.

Questo segnale luminoso coerente come menzionato viaggia negli interferometri e genera il segnale luminoso di riferimento e il segnale luminoso del campione che escono dal riferimento campione e dal braccio campione. Questi due segnali, a loro volta, vengono riflessi dal riflettore di riferimento e dal campione, rispettivamente, generando un segnale di riferimento e un segnale di ritorno del campione che
5 ritorna indietro nel braccio di riferimento e nel braccio campione.

I due segnali di ritorno generano un segnale di interferenza, o segnale di battimento, che viene rilevato. Il rilevatore può essere per esempio un fotorilevatore. Questo segnale di interferenza che è rilevato include il segnale di interferenza generato anche dai segnali luminosi campione generati dagli almeno due segnali luminosi coerenti provenienti dalla sorgente laser e imprimendo il campione e avendo la stessa lunghezza
10 d'onda.

Il fatto che l'intervallo di spazzolamento sia diviso in sottointervalli, aventi una durata temporale di Δt_i , senza un aumento costante della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente nell'intero intervallo di spazzolamento avente una durata di ΔT come definito precedentemente, non influenza la risoluzione dell'immagine finale, poiché per il segnale di interferenza solo la differenza nel percorso tra i segnali di
15 interferenza è rilevante, non il valore assoluto delle lunghezza d'onda. Senza essere vincolati dalla teoria, si può affermare che solo il valore assoluto della differenza di lunghezza d'onda conta nella generazione del segnale di interferenza.

La A-scan per la porzione selezionata del campione illuminata per la durata dello spazzolamento è ottenuta utilizzando sia i segnali luminosi coerenti all'interno dello stesso spazzolamento e aventi la stessa lunghezza
20 d'onda, sia particolare il segnale di interferenza (o segnale di battimento) generato da entrambi i segnali di ritorno dei corrispondenti campioni dei due segnali luminosi coerenti aventi la stessa lunghezza d'onda viene utilizzato per ottenere la A-scan. Va inteso che la stessa lunghezza d'onda dei segnali luminosi coerenti è presente quando i due segnali luminosi sono emessi (in tempi diversi) alla sorgente.

Nel primo e secondo aspetto menzionati in precedenza, l'invenzione può includere le caratteristiche
25 seguenti, in combinazione o come alternative.

Preferibilmente, spazzolare la sorgente per un intervallo di tempo ΔT , include dividere lo spazzolamento in N , dove $N \geq 2$, intervallo sotto-spazzolato, in cui in ogni intervallo di sotto-spazzolamento, per una porzione di questa, la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente varia con il tempo sostanzialmente in modo
30 identico alla fase precedente di sotto-spazzolamento o varia con il tempo in modo opposto alla fase precedente di sotto-spazzolamento.

Il segnale luminoso coerente, come detto, in ogni intervallo di sotto-spazzolamento, porzione del tempo totale di spazzolamento ΔT , può variare da un minimo a un massimo, indipendentemente dall'intervallo di

sotto-spazzolamento precedente o successivo, purché vi siano almeno due punti (ad esempio istanti di tempo) durante l'intero tempo di spazzolamento in cui il segnale luminoso coerente raggiunge lo stesso valore di lunghezza d'onda. Preferibilmente, per una porzione di ciascun intervallo di sotto-spazzolamento, la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente ha lo stesso comportamento rispetto al tempo, ovvero ha gli stessi valori, che sono raggiunti nell'intervallo precedente o successivo di sotto-spazzolamento. Ad esempio, se $f(t)$ è il valore della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente in funzione del tempo, vi è di preferenza un primo intervallo di tempo Δt_i appartenente all'intervallo i -esimo di sotto-spazzolamento e un secondo intervallo di tempo Δt_{i+1} appartenente all'intervallo $(i+1)$ -esimo di sotto-spazzolamento per cui

$$f(t) \text{ for } t \in \Delta t_i = \pm f(t) + C \text{ for } t \in \Delta t_{i+1}$$

dove C è una costante e $i+1 \leq N$. Il significato dell'equazione è che per tutti gli istanti t nell'intervallo di tempo Δt_i appartenente all'intervallo i -esimo di sotto-spazzolamento, il comportamento della lunghezza d'onda nel tempo è sostanzialmente identico, o opposto, al comportamento della lunghezza d'onda nel tempo per tutti gli istanti t nell'intervallo di tempo Δt_{i+1} appartenente all'intervallo $(i+1)$ -esimo di sotto-spazzolamento, a eccezione di una costante C .

In altre parole, la lunghezza d'onda negli intervalli i -esimi di sotto-spazzolamento definisce una funzione di curva del tempo. Una porzione di questa curva è riprodotta nell'intervallo di sotto-spazzolamento successivo $(i+1)$ -esimo, o il suo opposto (ovvero l'opposto della funzione, $-f(t)$). La costante C può variare in ciascun intervallo di sotto-spazzolamento.

L'identità in $f(t)$ non è naturalmente un'identità matematica. L'emissione di una lunghezza d'onda e la sintonizzazione del segnale sono legati a tolleranze degli apparecchi utilizzati e quindi l'"identità" è all'interno delle tolleranze menzionate in precedenza. Queste tolleranze sono preferibilmente $> 20\%$ per ciascun punto della curva, preferibilmente $>10\%$, più preferibilmente $>5\%$, ancora più preferibilmente $>2\%$.

I richiedenti si sono resi conto che frequenze "positive" o "negative" portano sostanzialmente allo stesso risultato quando il segnale di interferenza viene quindi elaborato, per esempio i segnali di battimento restano invariati a prescindere dall'aumento o dalla diminuzione della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente (sostanzialmente allo stesso modo). In altre parole, il segnale di interferenza rilevato resta invariato se la variazione di lunghezza d'onda è sostanzialmente invertita. Solo il valore assoluto della differenza di lunghezza d'onda può contare generando il segnale di interferenza.

Preferibilmente, elaborare il segnale di interferenza rilevato implica l'esclusione di una regione del segnale menzionato in precedenza corrispondente al momento in cui l'intervallo di sotto-spazzolamento $N-1$ termina e l'intervallo di sotto-spazzolamento N inizia.

Nel momento in cui il comportamento della lunghezza d'onda come funzione di tempo cambia, per esempio da un comportamento crescente a un comportamento decrescente, il segnale di interferenza conseguente non deve essere utilizzabile per ottenere un'immagine OCT adeguata. Questi momenti, o anche l'approssimarsi di questi momenti, di "cambiamenti di comportamento" possono essere rimossi dal
 5 segnale di interferenza complessivo e non elaborati ulteriormente.

Preferibilmente queste porzioni che sono eliminate dal segnale di interferenza rilevato corrispondono a regioni in cui la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente è a circa il suo massimo o a circa il suo minimo.

Preferibilmente, tutti gli intervalli di sotto-spazzolamento hanno una durata di sotto-spazzolamento
 10 identica $\Delta t \leq \Delta T/2$.

La durata di spazzolamento totale ΔT è preferibilmente divisa in intervalli di sotto-spazzolamento N aventi tutti la stessa durata Δt , in modo che $\sum_1^N \Delta t_i = N\Delta t = \Delta T$. Poiché il tempo complessivo della fase di spazzolamento è fisso e dipende dall'applicazione, la durata degli intervalli di sotto-spazzolamento determina il numero N di intervalli. Preferibilmente N non è troppo grande, per evitare di rimuovere molte
 15 porzioni del segnale di interferenza rilevato.

Preferibilmente, il comportamento della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente nel tempo in ogni segnale di sotto-spazzolamento è lo stesso, cioè il comportamento di lunghezza d'onda nel tempo è sostanzialmente periodico con periodo Δt .

Preferibilmente, spazzolare la sorgente di spazzolamento per un intervallo di tempo ΔT include spazzolare
 20 la sorgente di spazzolamento per un intervallo di tempo più breve di $10 \mu\text{s}$, più preferibilmente più breve di $1 \mu\text{s}$. Più preferibilmente, ΔT è più breve di 100 ns .

ΔT , la durata di una A-scan, è preferibilmente molto "rapida". Tuttavia, per ottenere una risoluzione accettabile in Z dell'immagine OCT, e allo stesso tempo avere una scansione sufficientemente rapida, il tempo assegnato a ciascuno spazzolamento è preferibilmente compreso nell'intervallo rivendicato in
 25 precedenza.

Gli intervalli di sotto-spazzolamento sono preferibilmente più corti di 50 ns ciascuno. Più preferibilmente, sono più lunghi di $\Delta T/6$. Più preferibilmente, sono più corti di $\Delta T/2$.

Preferibilmente, il metodo include: dividere lo spazzolamento in N , dove $N \geq 2$, intervallo di sotto-spazzolamento, fornendo l'intervallo di sotto-spazzolamento $(i-1)$ -esimo avente una durata Δt_{i-1} con la
 30 lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente avente il comportamento seguente:

$\lambda_{i-1}(t) = f(t)$ dove $f(t)$ è una funzione monotona tra t_1 e t_2 , dove t_1 e $t_2 \in \Delta t_{i-1}$; e

fornendo l'intervallo di sotto-spazzolamento i -esimo avente una durata Δt_i con la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente avente il seguente comportamento:

$\lambda_i(t) = -f(t) + C$ dove C è una costante, tra t_3 e t_4 , dove t_3 e $t_4 \in \Delta t_i$.

5 Alternativamente, il metodo include: dividere lo spazzolamento in N , dove $N \geq 2$, intervallo di sotto-spazzolamento, fornendo l'intervallo di sotto-spazzolamento $(i-1)$ -esimo avente una durata Δt_{i-1} con la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente avente il comportamento seguente:

$\lambda_{i-1}(t) = f(t)$ dove $f(t)$ è una funzione monotona tra t_1 e t_2 , dove t_1 e $t_2 \in \Delta t_{i-1}$; e fornendo l'intervallo di sotto-spazzolamento i -esimo avente una durata Δt_i con la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente
10 avente il seguente comportamento:

$\lambda_i(t) = f(t) + C$ dove C è una costante, tra t_3 e t_4 , dove t_3 e $t_4 \in \Delta t_i$.

Pertanto, in questa forma di realizzazione, il comportamento della lunghezza d'onda nel tempo in due intervalli adiacenti di sotto-spazzolamento è lo stesso ($f(t)$ è lo stesso in entrambi gli intervalli). C può anche essere uguale a zero.

15 Preferibilmente, per almeno una porzione di ciascun intervallo di sotto spazzolamento, il comportamento di lunghezza d'onda nel tempo è una funzione monotona di tempo. Pertanto, raffigurando la lunghezza d'onda come una funzione della curva del tempo, ogni intervallo di sotto spazzolamento include una porzione della stessa curva, o il suo opposto, "spostato nel tempo", che è monotono per un intervallo di tempo. Preferibilmente, questa porzione monotona di curva è presente in tutti gli intervalli di sotto-
20 spazzolamento. $\lambda_{i-1}(t)$ indica il valore della lunghezza d'onda della sorgente luminosa coerente nell'intervallo $i-1$, mentre $\lambda_i(t)$ indica il valore della lunghezza d'onda della sorgente luminosa coerente nell'intervallo i , dove i è un numero intero e $i = 1 \dots N$.

Più preferibilmente, tutti gli intervalli di sotto-spazzolamento hanno una pari durata Δt di sotto-spazzolamento e $\lambda_{i-1}(t) = \lambda_i(t) + C$ dove C è una costante per l'intera durata dell'intervallo di sotto-
25 spazzolamento.

Alternativamente, tutti gli intervalli di sotto-spazzolamento hanno pari durata di sotto-spazzolamento Δt e $\lambda_{i-1}(t) = -\lambda_i(t) + C$ dove C è una costante per l'intera durata dell'intervallo di sotto spazzolamento.

Preferibilmente, il comportamento della lunghezza d'onda in tutti gli intervalli di sotto-spazzolamento è lo stesso, o il suo opposto. Ancora una volta, la definizione di "lo stesso" o "identico" si riferisce a un'identità
30 all'interno delle tolleranze menzionate in precedenza intrinseche dell'apparecchio. Lo stesso

comportamento della lunghezza d'onda considerato come una curva in un intervallo di sotto spazzolamento è copiato e spostato nel tempo all'intervallo di sotto-spazzolamento seguente, o è copiato, l'opposto viene fatto, e poi spostato.

Ancora più preferibilmente, $f(t)$ è una funzione sostanzialmente lineare.

5 La lunghezza d'onda è preferibilmente una funzione lineare di tempo ed è divisa in segmenti lineari, un segmento per ciascun intervallo di sotto-spazzolamento. Preferibilmente, il numero complessivo di segmenti può essere ascendente o discendente (per esempio, possono avere tutti derivati positivi o tutti i derivati negativi), o preferibilmente potrebbe essere alternato (ovvero alcuni ascendenti e alcuni discendenti).

10 Per esempio, preferibilmente, la lunghezza d'onda in ciascun segnale di sotto spazzolamento ha la forma seguente:

$\lambda_i(t) = mt + a_i$ dove $i=1\dots N$ e a_i è un intervallo costante dipendente di sotto-spazzolamento.

In ciascun altro intervallo di sotto-spazzolamento k , dove $k=1\dots N$ con $k \neq i$, la lunghezza d'onda cambia come:

$$\lambda_k(t) = mt + b_k$$

o

$$\lambda_k(t) = -mt + c_k$$

15 dove b_k e c_k sono costanti che dipendono dall'intervallo di sotto-spazzolamento. Pertanto la pendenza m della curva lineare resta la stessa o diventa il suo opposto. Le curve lineari non sono strettamente parallele (o opposte) in senso matematico, ovvero il valore m è lo stesso in tutti i sotto-intervalli non in modo assoluto, ma all'interno di una tolleranza. Preferibilmente, da un intervallo di sotto-spazzolamento all'altro può esserci una differenza nel valore m di massimo il 20%, preferibilmente inferiore al 10%, più
20 preferibilmente inferiore al 2%.

Preferibilmente, tutti gli intervalli di sotto-spazzolamento hanno una durata di sotto-spazzolamento Δt e la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente è una funzione periodica con periodo Δt o $2 \Delta t$.

Il comportamento lunghezza d'onda vs tempo potrebbe essere ad esempio quello di un'onda a dente di sega. In questo caso, tra un dente di sega e quello vicino, il laser è preferibilmente spento. L'intervallo di
25 tempo in cui il laser è spento corrisponde a una regione nel segnale di interferenza che deve essere scartato.

Alternativamente, potrebbe essere un'onda triangolare. Il triangolo definito dall'onda è preferibilmente isoscele.

Preferibilmente, il metodo include la fase di dividere la spazzolamento in N intervalli di sotto-spazzolamento, in cui N può variare da un minimo di 2 a un massimo di 15. Più preferibilmente, N può variare da un minimo di 2 a un massimo di 8. Ancora più preferibilmente, N può variare da un minimo di 4 a un massimo di 6. Il numero massimo di intervalli di sotto-spazzolamento dipende da cosa viene considerato come un livello di rumore accettabile che proviene dalle discontinuità nel segnale di interfaccia. Queste discontinuità, che generalmente si generano in corrispondenza di porzioni di un intervallo di sotto-spazzolamento in cui la lunghezza d'onda raggiunge i suoi valori minimi e/o massimi, sono preferibilmente rimosse prima di elaborare il segnale di interferenza.

Sorgenti luminose coerenti con una velocità di regolazione minore di 50 nm/μs sono commercialmente disponibili, mostrando un intervallo di sintonizzazione tipico di circa 100 nm. Al fine di aumentare la velocità di scansione, uno speciale materiale ottico lo consente, ma hanno campi di sintonia più piccoli, tipicamente inferiori a 20 nm. Pertanto, il numero preferito di intervalli di sotto-spazzolamento è un compromesso tra la "piccola larghezza di banda" generalmente disponibile di sorgenti sintonizzabili e la quantità di segnale di interferenza da scartare, ed è preferibilmente compresa tra 2 e 15, più preferibilmente tra 2 e 6.

Breve descrizione dei disegni

La presente invenzione sarà compresa meglio con riferimento non limitativo ai disegni allegati, dove:

- La figura 1 rappresenta un comportamento della variazione della lunghezza d'onda (λ) nel tempo (t) in una sorgente luminosa secondo l'arte antecedente;
- La figura 2 è una rappresentazione schematica di un sistema SS-OCT secondo l'invenzione;
- La figura 3A è un dettaglio del sistema della figura 2;
- La figura 3B è un dettaglio in vista ingrandita della figura 3A;
- La figura 4 rappresenta come linea continua una prima forma di realizzazione di un comportamento della variazione della lunghezza d'onda ($\Delta\lambda$), espressa in nanometri, nel tempo (t) in una sorgente luminosa del sistema della figura 2 e 3A-B secondo la presente invenzione, la linea tratteggiata mostrata rappresenta il segnale della figura 1;
- La figura 5A rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 1 è utilizzato per illuminare una porzione di un campione secondo l'arte antecedente;

- La figura 5B rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 4 viene utilizzato per illuminare la stessa porzione dello stesso campione della figura 5A secondo l'invenzione;
- La figura 5C rappresenta la sovrapposizione delle figure 5A e 5B;
- 5 - La figura 6 rappresenta una seconda forma di realizzazione di un comportamento della variazione della lunghezza d'onda ($\Delta\lambda$), espressa in nanometri, nel tempo (t) in una sorgente luminosa del sistema della figura 2 e 3A-B secondo la presente invenzione, la linea tratteggiata mostrata rappresenta il segnale della figura 1 secondo l'arte antecedente;
- La figura 7A rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel
10 tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 1 è utilizzato per illuminare una porzione di un campione secondo l'arte antecedente;
- La figura 7B rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 6 viene utilizzato per illuminare la stessa porzione della figura 7A secondo l'invenzione;
- 15 - La figura 7C rappresenta la sovrapposizione delle figure 7A e 7B;
- La figura 8A rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 1 è utilizzato per illuminare una porzione di un campione secondo l'invenzione, dove due riflessioni sono presenti;
- La figura 8B rappresenta l'ampiezza (A) in unità arbitrarie del segnale di interferenza derivante nel
20 tempo (t), espresso in microsecondi, quando il segnale della figura 6 viene utilizzato per illuminare la stessa porzione della figura 8A secondo l'invenzione;
- La figura 8C rappresenta la sovrapposizione delle figure 8A e 8B;
- La figura 9A mostra l'ampiezza (A) in unità arbitrarie della trasformata di Fourier veloce (FFT) sulla frequenza (f) in unità arbitrarie per il segnale di interferenza della figura 8A;
- 25 - La figura 9B mostra l'ampiezza (A) in unità arbitrarie della trasformata di Fourier veloce (FFT) sulla frequenza (f) in unità arbitrarie per il segnale di interferenza della figura 8B; e
- La figura 9C mostra la sovrapposizione delle figure 9A e 9B.

Descrizione delle forme di realizzazione preferite dettagliate dell'invenzione

30 Nella figura 2, è illustrato uno scanner di tomografia a coerenza ottica 100 per SS-OCT. Lo scanner è utilizzato per illuminare un campione 110, un tipico campione essendo dato da tessuti nella parte posteriore dell'occhio umano.

Lo scanner 100 include una sorgente coerente spaziale di luce, 101. Questa sorgente è preferibilmente una sorgente laser a spazzolamento.

Inoltre, lo scanner include un interferometro 105, per esempio includente due bracci chiamati braccio di riferimento e braccio campione, 103, 104 realizzati con fibre ottiche.

5 La luce dalla sorgente 101, ovvero un segnale luminoso coerente, viene indirizzata per illuminare il campione 110 mediante il braccio campione 104 dell'interferometro 105. Inoltre, la luce dalla sorgente 101 illumina un riflettore di riferimento 106 mediante il braccio di riferimento 103.

10 Lo scanner 100 include inoltre un elemento ottico 107 posizionato tra l'estremità del braccio campione 104 e il campione 110. L'elemento ottico è in grado di scansionare la luce che esce dal braccio 104 sul campione 110, in modo che il fascio di luce (linea tratteggiata 108) spazzi l'area o il volume da rappresentare. Quest'area o volume del campione è chiamata porzione selezionata del campione 110.

La direzione della propagazione della luce verso il campione emessa dal braccio campione definisce una direzione o profondità Z. Un piano perpendicolare a esso, dove il campione si trova almeno parzialmente, definisce un piano (X, Y).

15 La luce diffusa dal campione 110 viene raccolta, tipicamente nello stesso braccio campione 104 usato per indirizzare la luce per l'illuminazione della porzione selezionata del campione 110.

La luce di riferimento derivata dalla stessa sorgente 101 percorre un percorso separato, incluso il braccio di riferimento 103. La luce emessa dal braccio di riferimento 103 è riflessa da un riflettore 108. Una luce riflessa dal riflettore viaggia quindi in senso contrario nel braccio di riferimento 103.

20 Questi due campioni "di ritorno" e luci di riferimento che effettuano una propagazione posteriore nei bracci campione e di riferimento 103, 104 vengono raccolti. La luce di ritorno del campione raccolto è combinata con la luce di ritorno del riferimento raccolto, tipicamente in un accoppiatore di fibra 111, per formare una luce di interferenza che viene diretta a un rivelatore 120, come un fotodiodo. L'uscita dal rivelatore 120 è alimentata a un processore 130. I risultati possono essere registrati nel processore.

25 L'interferenza fa sì che l'intensità della luce interferita vari da uno spettro all'altro. Per ogni punto di diffusione nel campione, ci sarà una certa differenza nella lunghezza del percorso tra la luce dalla sorgente e riflessa da quel punto, e la luce dalla sorgente che percorre il percorso di riferimento. La luce interferita ha un'intensità relativamente alta o bassa a seconda che la differenza di lunghezza del percorso sia un numero pari o dispari di mezze lunghezze d'onda, poiché queste differenze di lunghezza del percorso
30 determinano rispettivamente un'interferenza costruttiva o distruttiva. Pertanto l'intensità della luce interferita varia con la lunghezza d'onda in modo tale che essa riveli la differenza di lunghezza del percorso;

una differenza maggiore di lunghezza del percorso porta a una variazione più rapida tra l'interferenza costruttiva e distruttiva attraverso lo spettro.

La trasformata di Fourier dello spettro di interferenza rivela il profilo delle intensità di diffusione ottica a lunghezze di percorso differenti, e quindi la diffusione ottica come una funzione di profondità nel campione.

Il profilo di diffusione ottica come una funzione di profondità viene chiamato scansione assiale (A-scan). Un set di A-Scan misurati in punti vicini (varie porzioni selezionate) nel campione produce un'immagine trasversale (tomogramma) del campione.

L'intervallo di lunghezze d'onda a cui l'interferenza è registrata determina la risoluzione con cui si può determinare la profondità dei centri di diffusione, e quindi la risoluzione assiale del tomogramma.

Una vista più dettagliata della sorgente laser 101 utilizzata nello scanner 100 secondo l'invenzione è illustrata nella figura 3A. La sorgente laser, per sintonizzare la lunghezza d'onda del segnale emesso, utilizza un etalon basato su cristallo liquido 150 con una portata spettrale libera di 25 nm e una frequenza di risposta di circa 10 MHz.

La sorgente laser 101 include una cavità 141 delimitata da un primo e un secondo specchio. Il primo specchio 142 è uno specchio altamente riflettente, mentre il secondo specchio 143 è uno specchio parzialmente trasparente avente uno specchio FSR e ha la funzione di accoppiatore di uscita. L'uscita dell'etalon 150 è indicata con 146 nella figura.

La cavità include inoltre un mezzo di guadagno (*gain medium*) o un chip ottico attivo 144, pompato in modo noto, e una lente collimatrice 145 per focalizzare la luce sull'etalon 150. L'etalon 150 è collegato a un generatore di tensione 160.

Il processore 130 collegato al laser cambia la tensione di pilotaggio dell'etalon tramite il generatore di tensione 160 in modo che, durante una A-scan, la lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente emesso dal laser 101 cambia a seconda dell'invenzione.

Nella figura 3B, una vista più dettagliata dell'etalon 150 è mostrato in una vista ingrandita.

L'etalon 150 include un elemento di cristallo liquido 151. L'elemento di cristallo liquido può includere uno qualsiasi tra: CCN-47, MLC-20180, HNG715600-100 disponibili rispettivamente da Nematel GmbH (Germania), Merck (USA), Jiangsu Hecheng Display technology (Cina).

L'elemento cristallo liquido 151 è drogato con un additivo polare, preferibilmente 2, 3 -diciano-4-pentilossifenil 4'-pentilossibenzoato (DPP), CAS 67042-21-1 disponibile da UAB Tikslioji Sintezė, Lituania.

Ulteriori informazioni sul materiale di cristallo liquido utilizzato possono essere trovate in “Enhanced nanosecond electro-optic effect in isotropic and nematic phases of dielectrically negative nematics doped by strongly polar additive”, pubblicato nel giornale Molecular Physics, dicembre 2017, scritto da Bingxian Li et al.

5 Due lati opposti dell'elemento LC 151 sono rivestiti con un multistrato dielettrico ad alta riflettività 152 e la struttura risultante è inserita tra due elettrodi 153 collegati al generatore di tensione 160. La riflettanza del multistrato è di circa il 95%.

Due lastre di vetro 154 chiudono quindi l'etalon 150.

10 Il generatore di tensione applica una tensione adeguata agli elettrodi 153 in modo che l'indice di rifrazione delle variazioni LC 151 cambi. Una variazione di tensione lineare implica un cambiamento lineare nella lunghezza d'onda dell'uscita 146. I valori di differenza di tensione applicati agli elettrodi variano tra 0 e pochi kV.

Nella figura 4, è mostrata una prima forma di realizzazione preferita dello spazzolamento per una A-scan che dura ΔT , la durata di spazzolamento è divisa in sotto intervalli di eguale durata Δt .

15 In questa forma di realizzazione, come visibile nella figura, in ciascuno di questi sotto intervalli di durata Δt , la lunghezza d'onda dell'uscita luminosa coerente 146 è aumentata linearmente e in modo monotono per una durata Δt_A . Inoltre, nello stesso intervallo di sotto spazzolamento, la lunghezza d'onda è diminuita linearmente e in modo monotono per una durata Δt_B dove preferibilmente $\Delta t_B \ll \Delta t_A$. Il comportamento della lunghezza d'onda derivante della lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente 146 in t è una
 20 funzione periodica nel tempo con periodo $\Delta t = \Delta t_A + \Delta t_B$. La lunghezza d'onda definisce sostanzialmente, se $\Delta t_B \ll \Delta t_A$, una funzione del tempo a dente di sega leggermente “deformata” come rappresentato nella figura 4. La scansione del dente di sega può essere effettuata o con un reset molto rapido del filtro sintonizzabile 150 se il materiale elettro-ottico è abbastanza veloce o utilizzando un separatore di fascio per
 25 dividere la sorgente luminosa in due o più porzioni e una linea/delle linee di ritardo ottico per combinare dette porzioni in un profilo di dente di sega e un interruttore ottico con il laser funzionante in maniera simmetrica come nella forma di realizzazione preferita.

Pertanto, la differenza di tensione è applicata agli elettrodi per un tempo Δt prima di essere spenta e riavviata per essere applicata per un altro Δt . All'interno di ciascun Δt , la differenza di tensione applicata varia linearmente tra 0 kV e 1 kV (al massimo prima di essere ridotta di nuovo).

30 Nella figura 4, viene mostrata anche la regolazione della lunghezza d'onda (curva tratteggiata lineare equivalente alla figura 1), dove la lunghezza d'onda aumenta linearmente per tutta la durata dello spazzolamento ΔT .

Una simulazione numerica del segnale dal rilevatore OCT 120 del segnale di interferenza ottenuto nel caso in cui i segnali (arte antecedente e invenzione) della figura 4 siano spazzati sulla porzione selezionata del campione è illustrata nella figura 5A e 5B, nel risultato dell'arte antecedente nella figura 5A e il caso della presente invenzione nella figura 5B. Inoltre, nella figura 5C viene fatta una sovrapposizione dei due segnali (linea tratteggiata = arte antecedente, curva solida = invenzione presente).

Nella figura 5A, caso arte antecedente, il segnale di interferenza è una senoide.

Nella figura 5B, il segnale di interferenza mostra una senoide e alcune "porzioni di rumore". Dalla figura 5B è possibile vedere che il segnale di interferenza nell'invenzione presenta una pluralità di regioni in cui il segnale non può essere utilizzato. Queste regioni corrispondono alle porzioni Δt_b degli intervalli di sotto spazzolamento. Tuttavia, si può anche vedere che nella parte rimanente della curva (cioè al di fuori delle parti scartate) il segnale è in perfetta sintonia con il segnale dell'arte antecedente, cioè non c'è sostanzialmente alcuna differenza nel variare continuamente la lunghezza d'onda da un minimo a un massimo "alto" e variando la lunghezza d'onda da un minimo a un massimo molto più piccolo e ripetendo più volte questo cambiamento. Ciò può essere chiaramente visto nella figura 5C dove i due segnali corrispondono perfettamente al di fuori delle regioni "rumorose".

Può essere mostrato che, se Δt_b è ridotto al minimo, anche le porzioni derivanti da scartare possono essere ridotte. Più Δt_b è piccolo, più diventa piccola la parte del segnale di interferenza derivante che ha bisogno di non essere considerata.

Nella figura 6, è mostrata una seconda forma di realizzazione preferita dello spazzolamento per una A-scan che dura ΔT , la durata di spazzolamento è divisa in sottointervalli di eguale durata.

In ciascuno di questi sottointervalli di durata Δt , la lunghezza d'onda è variata linearmente e in modo monotono per l'intera durata Δt . Tuttavia, la variazione è alternativamente in aumento o in diminuzione. In un primo intervallo di sotto-spazzolamento, la lunghezza d'onda viene ad esempio aumentata linearmente e in modo monotono e nel successivo intervallo di sotto-spazzolamento la lunghezza d'onda viene diminuita linearmente e in modo monotono. La pendenza della curva lineare è la stessa sebbene l'opposto. In altre parole, se nel sottointervallo i -esimo la pendenza del segmento definito dalla lunghezza d'onda (t) della funzione è m , la pendenza della curva nel sottointervallo $(i+1)$ -esimo è $-m$.

Questo comportamento del segnale è ottenuto aumentando con una certa velocità la tensione applicata agli elettrodi 153, raggiungendo un massimo, e quindi diminuendo la tensione fino al minimo alla stessa velocità dell'aumento.

La differenza di tensione è applicata agli elettrodi per un tempo $2\Delta t$ prima di essere spenta e riavviata per essere applicata per un altro $2\Delta t$. All'interno di ciascun Δt , la differenza di tensione applicata varia linearmente tra 0 kV e 1 kV e poi da 1 kV a 0 kV.

5 Nella figura 6, viene mostrata anche la regolazione della lunghezza d'onda (curva tratteggiata lineare equivalente alla figura 1), dove la lunghezza d'onda aumenta linearmente per tutta la durata dello spazzolamento ΔT .

Una simulazione numerica del segnale dal rilevatore OCT 120 del segnale di interferenza ottenuto nel caso in cui i segnali (arte antecedente e invenzione) della figura 6 siano spazzati sulla porzione selezionata del campione è illustrata nella figura 7A e 7B, nel risultato dell'arte antecedente nella figura 7A e il caso della
10 presente invenzione nella figura 7B. Inoltre, nella figura 7C viene fatta una sovrapposizione dei due segnali (linea tratteggiata = arte antecedente, curva solida = invenzione presente).

Nella figura 7A, caso arte antecedente, il segnale di interferenza è una sinusoide.

Nella figura 7B, il segnale di interferenza mostra una sinusoide e alcune "porzioni di rumore". Dalla figura 7B è possibile vedere che il segnale di interferenza nell'invenzione presenta una pluralità di regioni in cui il
15 segnale non può essere utilizzato. Queste regioni corrispondono al confine tra un intervallo di sotto-spazzolamento e il prossimo intervallo di sotto-spazzolamento. Esse corrispondono anche al punto in cui la lunghezza d'onda cambia comportamento, da crescente a decrescente. Tuttavia, si può anche vedere che nella parte rimanente della curva (cioè al di fuori delle parti scartate) il segnale è in perfetta sintonia con il segnale dell'arte antecedente, cioè non c'è sostanzialmente alcuna differenza nel variare continuamente la
20 lunghezza d'onda da un minimo a un massimo "alto" e variando la lunghezza d'onda da un minimo a un massimo e dal massimo allo stesso minimo ripetendo più volte questo cambiamento. Ciò può essere chiaramente visto nella figura 7C dove i due segnali corrispondono perfettamente al di fuori delle regioni "rumorose".

Le figure 8A-8C mostrano i risultati di simulazioni utilizzando il segnale di spazzolamento della seconda
25 forma di realizzazione della figura 6, tuttavia in questo caso due riflessioni separate da $10 \mu\text{m}$ sono presenti nel campione.

Una simulazione numerica del segnale dal rilevatore OCT 120 del segnale di interferenza ottenuto nel caso in cui i segnali (arte antecedente e invenzione) della figura 6 siano spazzati sulla porzione selezionata del campione è illustrata nella figura 8A e 8B, nel risultato dell'arte antecedente nella figura 8A e il caso della
30 presente invenzione nella figura 8B. Inoltre, nella figura 8C viene fatta una sovrapposizione dei due segnali (linea tratteggiata = arte antecedente, curva solida = invenzione presente).

Nella figura 8A, caso arte antecedente, il segnale di interferenza è una sovrapposizione di due sinusoidi aventi diversa frequenza. Ogni frequenza rappresenta una diversa riflessione sul campione.

Nella figura 8B, il segnale di interferenza mostra anche due sinusoidi sovrapposte e alcune "porzioni di rumore". È possibile vedere dalla figura 8B che il segnale di interferenza nell'invenzione presenta una pluralità di regioni in cui il segnale non può essere utilizzato. Queste regioni corrispondono al confine tra un intervallo di sotto-spazzolamento e il prossimo intervallo di sotto-spazzolamento. Esse corrispondono anche al punto in cui la lunghezza d'onda cambia comportamento, da crescente a decrescente. Tuttavia, si può anche vedere che nella parte rimanente della curva (cioè al di fuori delle parti scartate) il segnale è in perfetta sintonia con il segnale dell'arte antecedente, cioè non c'è sostanzialmente alcuna differenza nel variare continuamente la lunghezza d'onda da un minimo a un massimo "alto" e variando la lunghezza d'onda da un minimo a un massimo e dal massimo allo stesso minimo ripetendo più volte questo cambiamento. Ciò può essere chiaramente visto nella figura 8C, dove i due segnali corrispondono perfettamente al di fuori delle regioni "rumorose".

Le figure 9A-9C mostrano la trasformata di Fourier veloce (FFT) per questo segnale di interferenza delle figure 9A-9C (rispettivamente) dove le due riflessioni possono essere chiaramente distinte. Nei due casi dell'arte antecedente e della presente invenzione. È possibile vedere che i due comportamenti spettrali sono molto simili con solo un piccolo rumore aggiunto per il caso della presente invenzione.

Esempi

Il laser può emettere luce a 1550 nm utilizzando un chip ottico attivo basato su InP. La lunghezza d'onda di emissione cambia regolando il filtro sintonizzabile all'interno della cavità a diverse lunghezze d'onda di trasmissione variando la tensione applicata al materiale elettro-ottico (nel nostro caso un sottile film di cristallo liquido all'interno di una cavità Fabry-Perot). L'uscita del laser è accoppiata all'ingresso di un interferometro (un accoppiatore di fibra 2x2). All'altro braccio di ingresso è accoppiato un fotodiodo rapido (larghezza di banda di circa 1 GHz) connesso con un processore di segnale. All'estremità di uno dei bracci di uscita viene fissato lo specchio di riferimento e all'altro braccio di uscita l'elemento di scansione basato su una lente collimatrice e uno specchio di scansione. La lunghezza dei due bracci di uscita è preferibilmente bilanciata per un lavoro di interferometro ottimale.

Il tempo di spazzolamento è impostato per essere pari a 1 μ s ed è diviso in N=4 intervalli di sotto-spazzolamento, ognuno di 250 ns.

Ciò che viene chiamato segnale dell'"arte antecedente" è sostanzialmente lo spazzolamento della figura 1, ottenuta mantenendo la sorgente laser per 1 μ s coprendo 100 nm.

Il segnale come illustrato nella figura 6 è ottenuto spazzolando il laser per 250 ns aumentando la lunghezza d'onda di uscita di 25 nm e poi invertendo lo spazzolamento per altri 250 nm tornando alla lunghezza d'onda iniziale e poi ripetendo i due precedenti spazzolamenti una seconda volta. Durante questo 1 μ s (4 x 250 ns) l'elemento ottico del OCT resta fisso sullo stesso punto di riferimento.

5 Il segnale di figura 4 si ottiene spazzando linearmente la lunghezza d'onda di uscita per 225 ns a una velocità leggermente superiore di 25 nm poi reset in 25 ns e ripetere quattro volte questo ciclo (vedi figura 4). Come nell'esempio precedente, durante questo 1 μ s (4 x 250 ns) l'elemento ottico del OCT resta fisso sullo stesso punto di riferimento.

Il segnale elettrico dal fotodiodo è quindi amplificato e campionato (nell'esempio 10 campione per ns). I
10 10.000 campioni derivanti sono quindi trasformati secondo Fourier utilizzando un algoritmo di trasformata veloce di Fourier (FFT) Cooley-Tukey.

La struttura del filtro ottico sintonizzabile o etalon 150 è la seguente:

- Vetro 154: ogni lastra di vetro ha uno spessore minore di 1 mm, preferibilmente minore di 0,75 mm;
- 15 - ITO 153: ogni elettrodo ha uno spessore minore di 100 nm, preferibilmente minore di 50 nm;
- Multistrato dielettrico ad alta riflettanza 152: ha uno spessore compreso nell'intervallo tra 0,5 μ m e 5 μ m in funzione della riflettanza desiderata;
- Cristallo liquido 151: ha uno spessore minore di 100 μ m, preferibilmente minore di 50 μ m, più preferibilmente minore di 30 μ m (l'intervallo spettrale libero (*free spectral range*) è influenzato
20 dalla scelta dello spessore, che è a sua volta influenzato dalle caratteristiche del cristallo liquido come indice di rifrazione, birifrangenza indotta, e campo elettromagnetico applicato esternamente);

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per sintonizzare una lunghezza d'onda di un segnale luminoso coerente (146) emesso da un laser sintonizzabile (101), il laser sintonizzabile comprendendo:

- una cavità (141), la cavità includendo:

- un mezzo di guadagno (144),
- un filtro ottico sintonizzabile (150),
- un primo e un secondo specchio (142, 143), uno dei quali è parzialmente riflettente,

in cui il filtro ottico sintonizzabile (150) include:

- un primo e un secondo elettrodo (153),
- un cristallo liquido (151),

il metodo comprendendo:

- applicare una differenza di tensione tra il primo e il secondo elettrodo (153) per applicare un campo elettrico al cristallo liquido (151); dove applicare una differenza di tensione include:

- applicare la differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 μ s; e
- variare la differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a 0,1 kV.

2. Laser sintonizzabile (101) comprendente:

- una cavità (141), la cavità includendo:

- un mezzo di guadagno (144),
- un filtro ottico sintonizzabile (150),
- un primo e un secondo specchio (142, 143), uno dei quali è parzialmente riflettente,

In cui il filtro ottico sintonizzabile (150) include:

- un primo e un secondo elettrodo (153),
- un cristallo liquido (151), il cristallo liquido essendo soggetto a un campo elettrico creato dal primo e dal secondo elettrodo (153), e

- un generatore di tensione (160) per applicare una differenza di tensione tra il primo e il secondo elettrodo, detto generatore di tensione essendo programmato per:

- applicare la differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 μ s; e

- variare la differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a 0,1 kV.

3. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui l'applicazione di una differenza di tensione include l'applicazione della differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di 1 ns e 1 μ s.
4. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il cristallo liquido (151) comprende un cristallo liquido nematico.
5. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il cristallo liquido o il cristallo liquido nematico (151) è drogato con additivo polare.
6. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui variare la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo (153) in un intervallo di tempo di comando include di variare la differenza di tensione tra un minimo e un massimo.
7. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 6, in cui variare la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo (153) in un intervallo di tempo di comando include di variare la differenza di tensione linearmente con il tempo.
8. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 6 o 7, in cui variare la differenza di tensione applicata al primo e al secondo elettrodo (153) in un intervallo di tempo di comando include:
 - variare la differenza di tensione tra un valore minimo e un valore massimo; e
 - variare la differenza di tensione tra il valore massimo e successivamente il valore minimo.
9. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 6 o 7, in cui variare la tensione applicata al primo e al secondo elettrodo (153) in un intervallo di tempo di comando include:
 - variare la differenza di tensione tra un valore minimo e un valore massimo;
 - interrompere l'applicazione di differenza di tensione.
10. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo una o più delle rivendicazioni precedenti, in cui la differenza di tensione applicata ha una frequenza di ripetizione compresa tra 100 kHz e 100 Mhz.
11. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo una o più delle rivendicazioni precedenti, in cui il filtro ottico sintonizzabile (150) comprende inoltre un primo e un secondo strato dielettrico ad alta riflettanza (152) fra i quali si interpone il cristallo liquido (151).
12. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 11, in cui il primo e/o il secondo strato dielettrico ad alta riflettanza (152) definisce una riflettanza, la riflettanza essendo maggiore o uguale al 95%.

13. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il cristallo liquido (151) definisce uno spessore di cristallo liquido, e in cui la distanza tra il primo e il secondo elettrodo (153) è compresa tra 10 micron e 200 micron.
14. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti quando dipendenti dalla rivendicazione 5, dove l'additivo polare ha un'anisotropia dielettrica negativa.
15. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il primo e il secondo elettrodo (153) sono almeno parzialmente trasparenti a una radiazione avente una lunghezza d'onda data che risuona nella cavità.
16. Metodo e laser sintonizzabile (101) secondo qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui:
- il primo specchio (143) è parzialmente riflettente e il secondo specchio (142) è sostanzialmente totalmente riflettente;
 - il primo specchio (143) definisce una gamma spettrale libera (*free spectral range*) dello specchio e il filtro ottico sintonizzabile (150) definisce una gamma spettrale libera del filtro; e
 - in cui la gamma spettrale libera dello specchio è dello stesso ordine di grandezza della gamma spettrale libera del filtro.
17. Metodo o laser sintonizzabile (101) secondo la rivendicazione 16, in cui la gamma spettrale libera del filtro e/o la gamma spettrale libera dello specchio è > 20 nm.
18. Sistema (100) di tomografia a coerenza ottica (OCT) includente:
- il laser sintonizzabile (101) secondo una o più delle rivendicazioni 2 – 17 che emette un segnale di luce coerente (146);
 - un interferometro ottico (105) per dividere il segnale luminoso coerente in un braccio di riferimento (103) che porta a un riflettore di riferimento (106) e a un braccio campione (104) che porta a un campione (110);
 - un elemento ottico (107) per dirigere selettivamente un segnale luminoso campione (108) che esce dal braccio campione a una porzione specifica del campione (110), in modo che per ciascuna selezione nell'elemento ottico (107) venga illuminata una porzione specifica diversa del campione;
 - un rivelatore ottico (120) per la rilevazione di un segnale di interferenza generato da una combinazione di segnali di riferimento e di ritorno del campione dal braccio di riferimento (103) e dal braccio campione (104), riflessi rispettivamente dal riflettore di riferimento e dal campione.
19. Sistema OCT (100) secondo la rivendicazione 18, includendo inoltre:
- una unità di elaborazione (130), detta unità di elaborazione essendo programmata per, per la stessa selezione nell'elemento ottico che illumina una porzione specifica del campione:

- i. definire un intervallo di spazzolamento ΔT ;
- ii. cambiare il segnale di luce coerente che porta al segnale di luce del campione che illumina la porzione specifica del campione da una lunghezza d'onda minima a una lunghezza d'onda massima e nello stesso spazzolamento modificare la lunghezza d'onda del segnale di luce coerente in modo da raggiungere lo stesso valore tra la lunghezza d'onda minima e la lunghezza d'onda massima almeno due volte durante lo spazzolamento;
- iii. elaborare il segnale di interferenza rilevato per ottenere un'immagine OCT della porzione specifica del campione.

20. Metodo di analisi di tomografia a coerenza ottica, comprendente:

- fornire un sistema di tomografia a coerenza ottica (100) secondo la rivendicazione 18 o 19, in cui il metodo comprende inoltre:
- spazzolare il laser sintonizzabile (101) per un intervallo di tempo ΔT , in modo che una lunghezza d'onda del segnale luminoso coerente (146) che porta al segnale luminoso campione (108) che illumina la porzione specifica del campione (110) cambi da una lunghezza d'onda minima a una lunghezza d'onda massima, dove detto spazzolamento include:
 - o applicare una differenza di tensione tra il primo e il secondo elettrodo (143) per applicare un campo elettrico al cristallo liquido (151); dove applicare una differenza di tensione include:
 - applicare la differenza di tensione per almeno un intervallo del tempo di comando che dura meno di $1 \mu\text{s}$; e
 - variare la differenza di tensione applicata tra il primo e il secondo elettrodo all'interno dell'intervallo di tempo di comando in modo che una differenza di tensione massima applicata sia raggiunta e detta tensione massima applicata sia superiore a $0,1 \text{ kV}$;
- rilevare il segnale di interferenza generato dallo spazzolamento;
- elaborare il segnale di interferenza rilevato generato dallo spazzolamento per ottenere un'immagine OCT della porzione specifica del campione (110).

FIG. 1

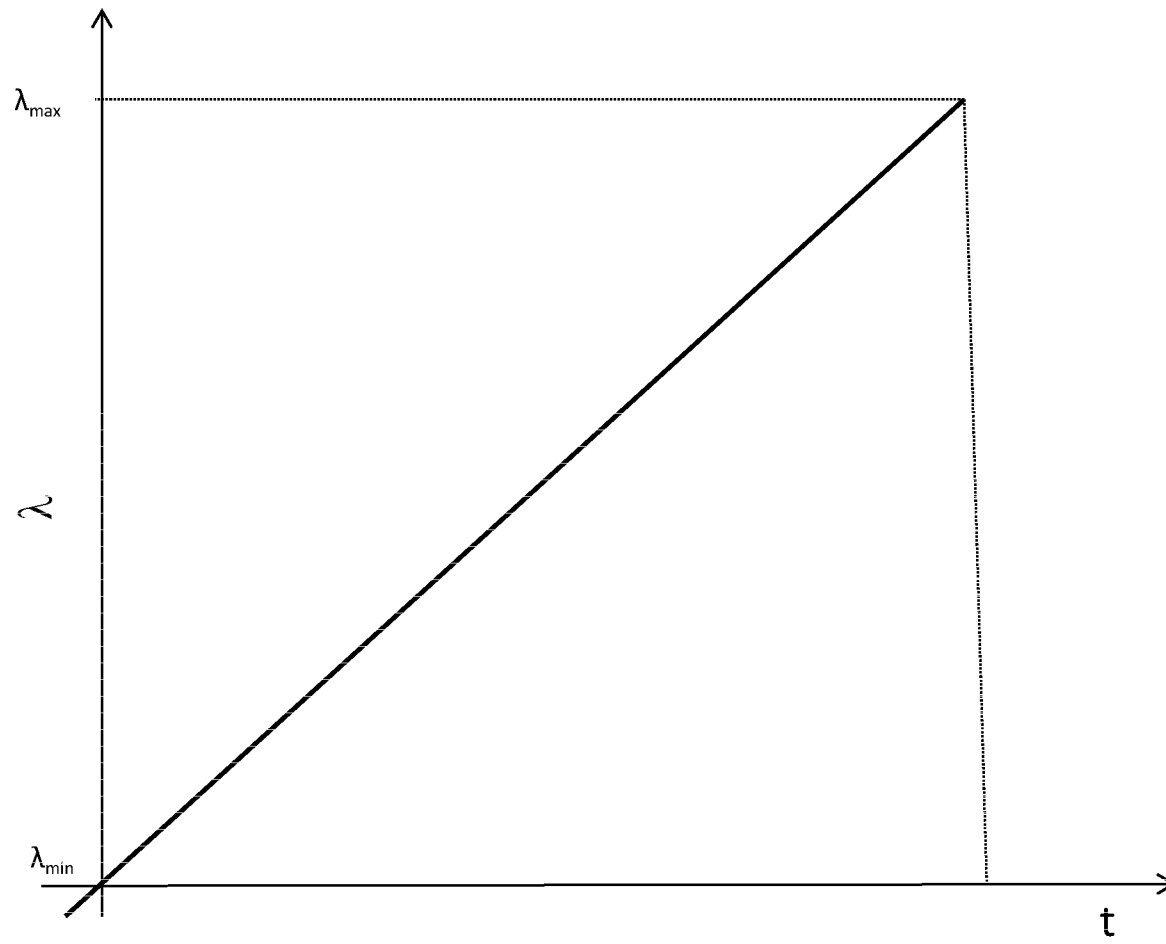


FIG. 2

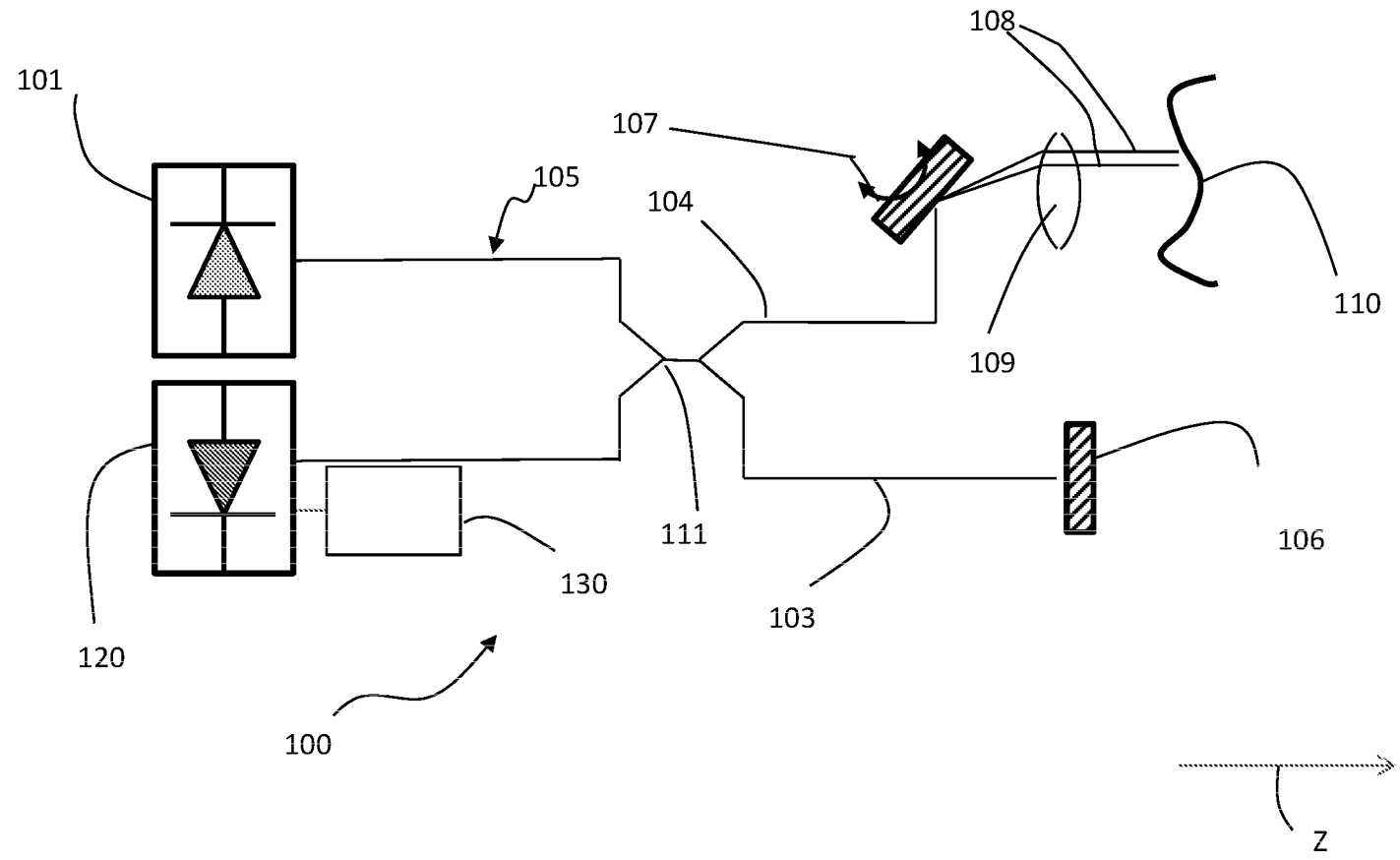


FIG. 3B

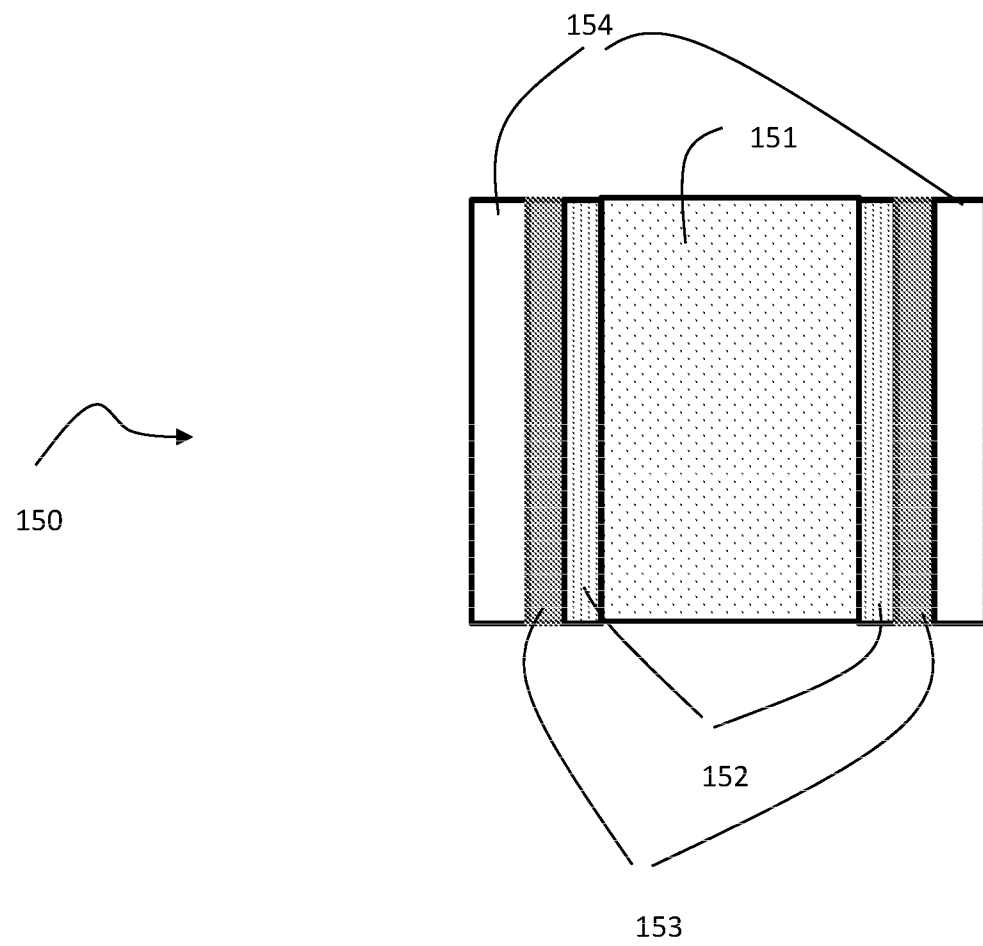


FIG. 3A

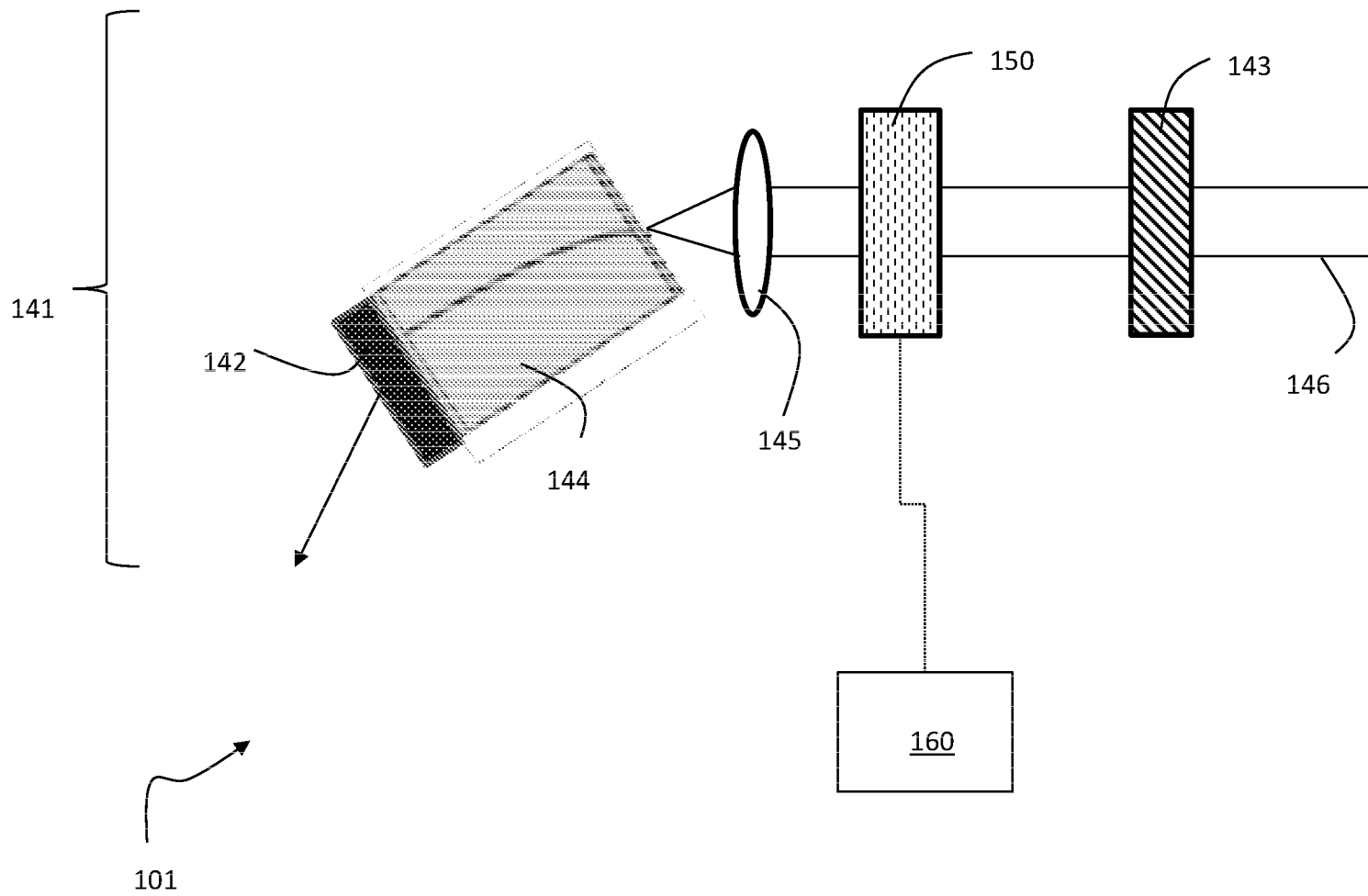


FIG. 4

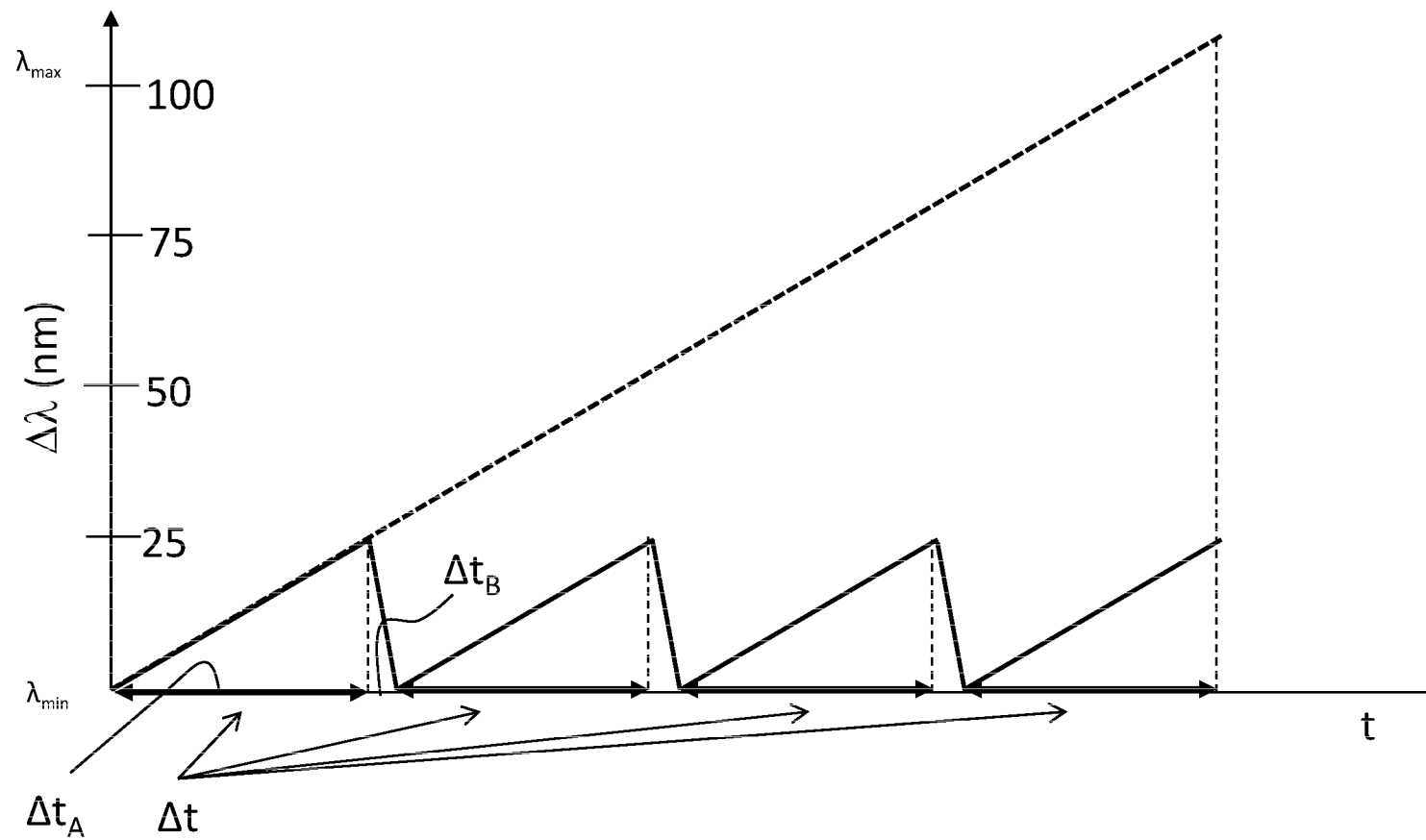


FIG. 5A

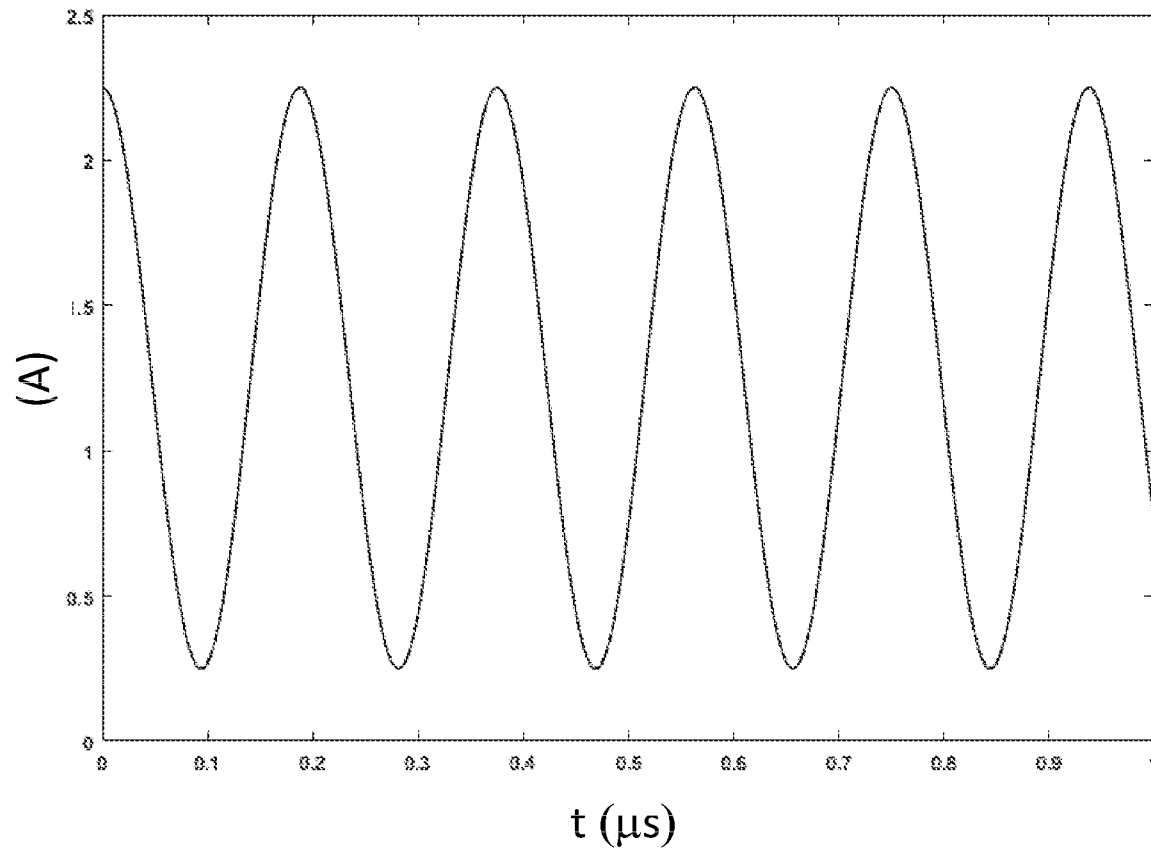


FIG. 5B

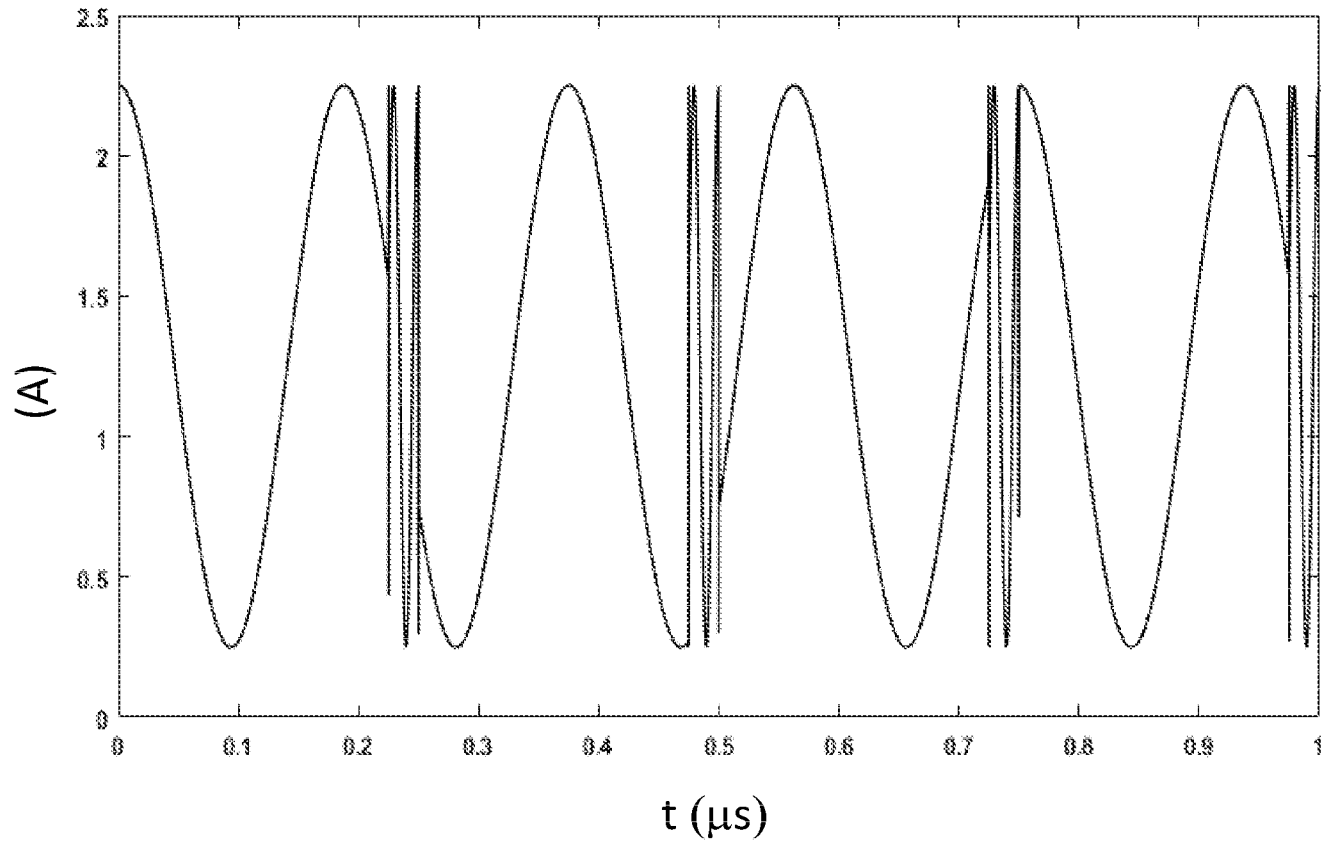


FIG. 5C

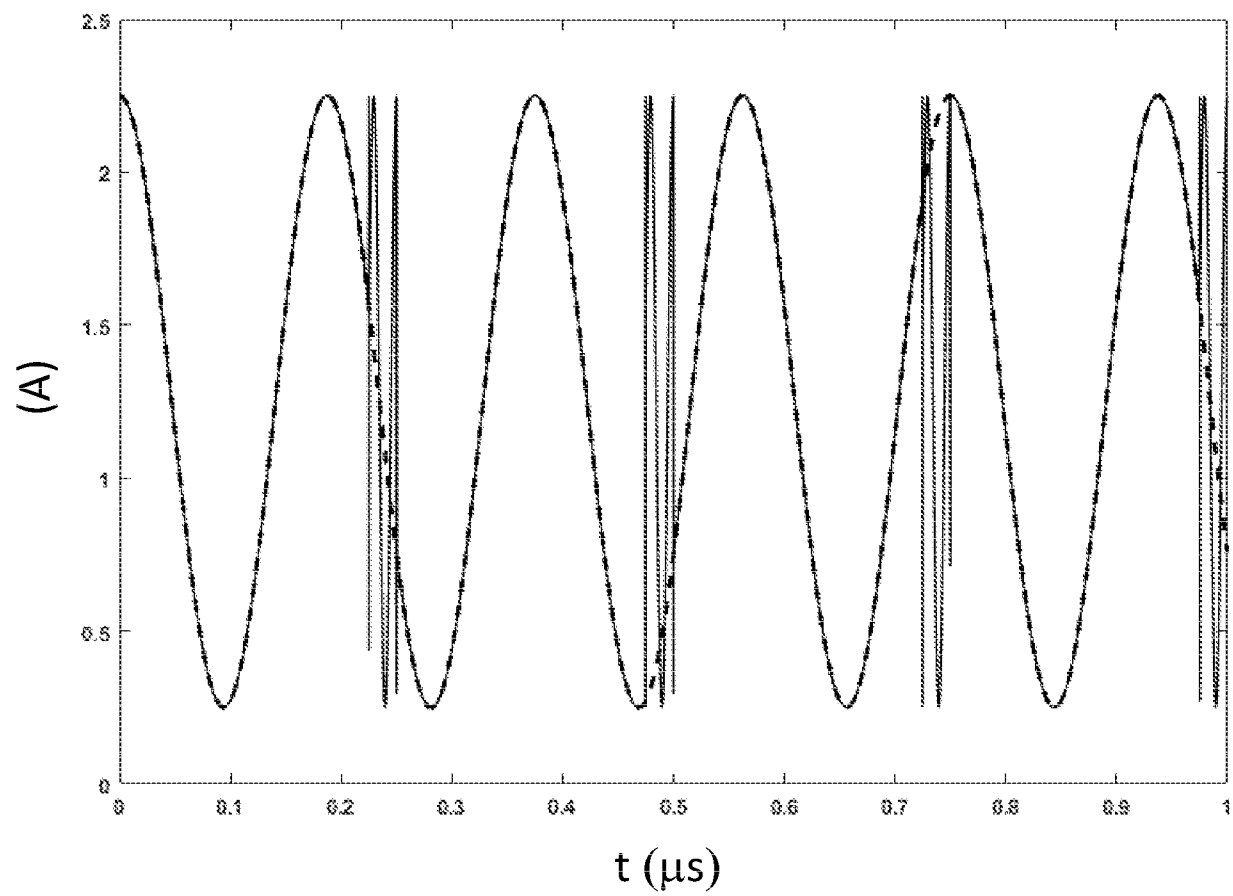


FIG. 6

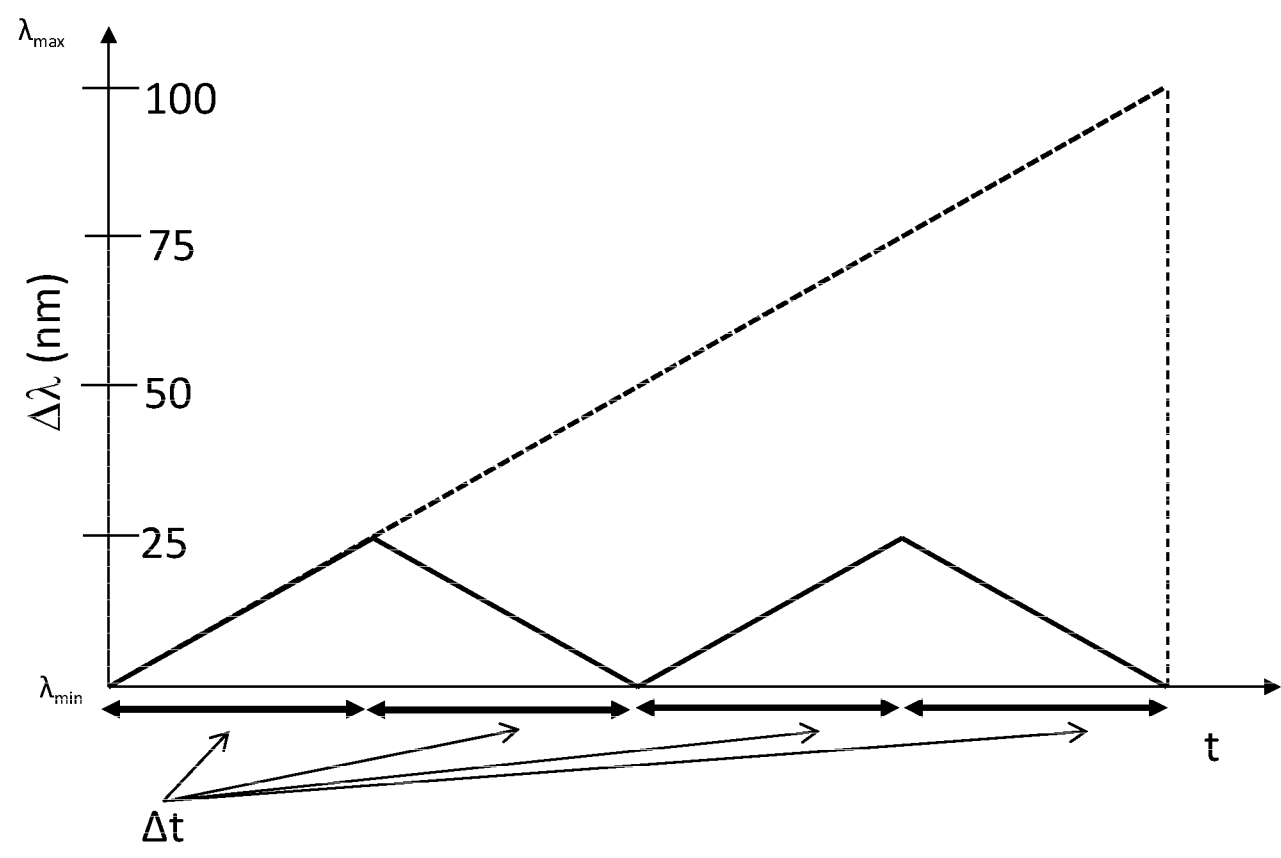


FIG. 7A

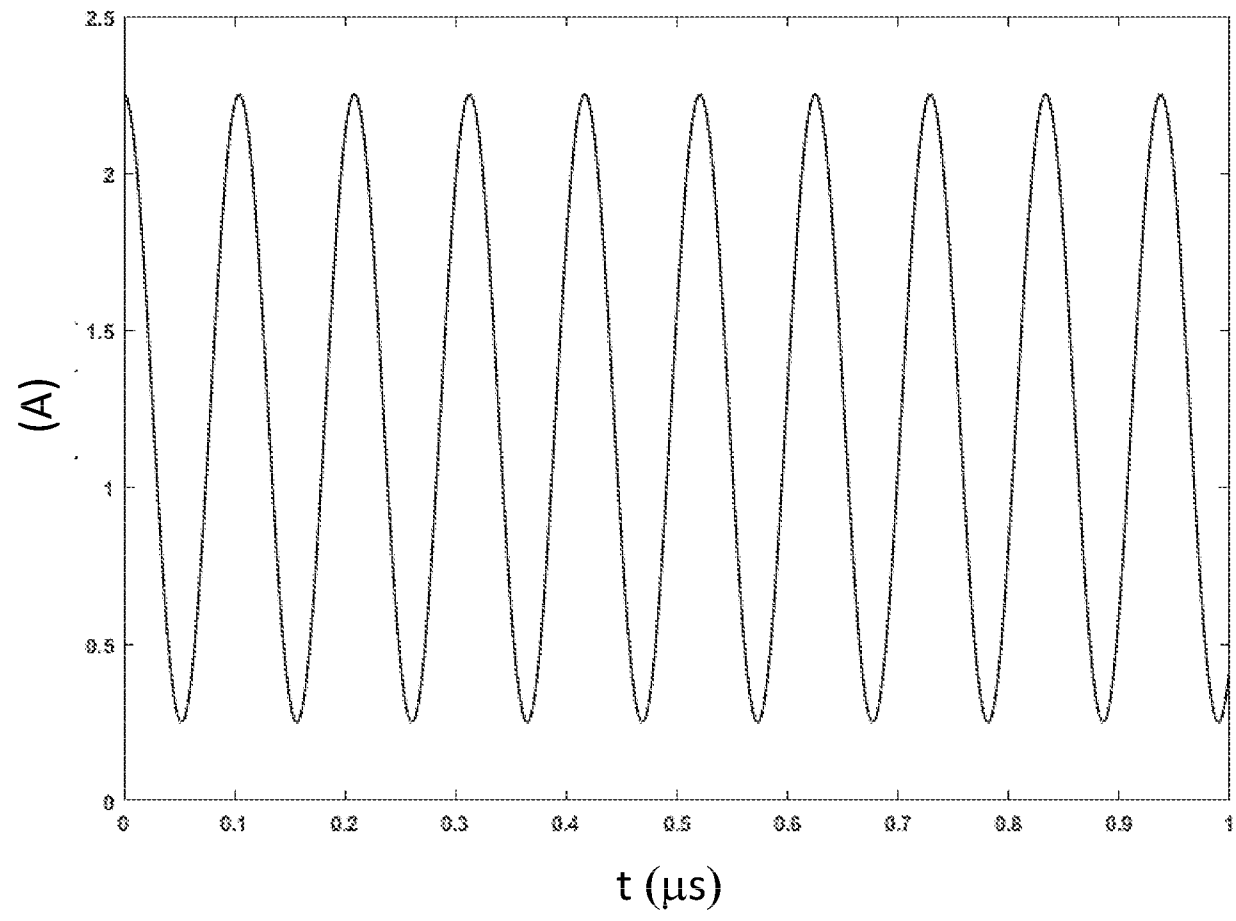


FIG. 7B

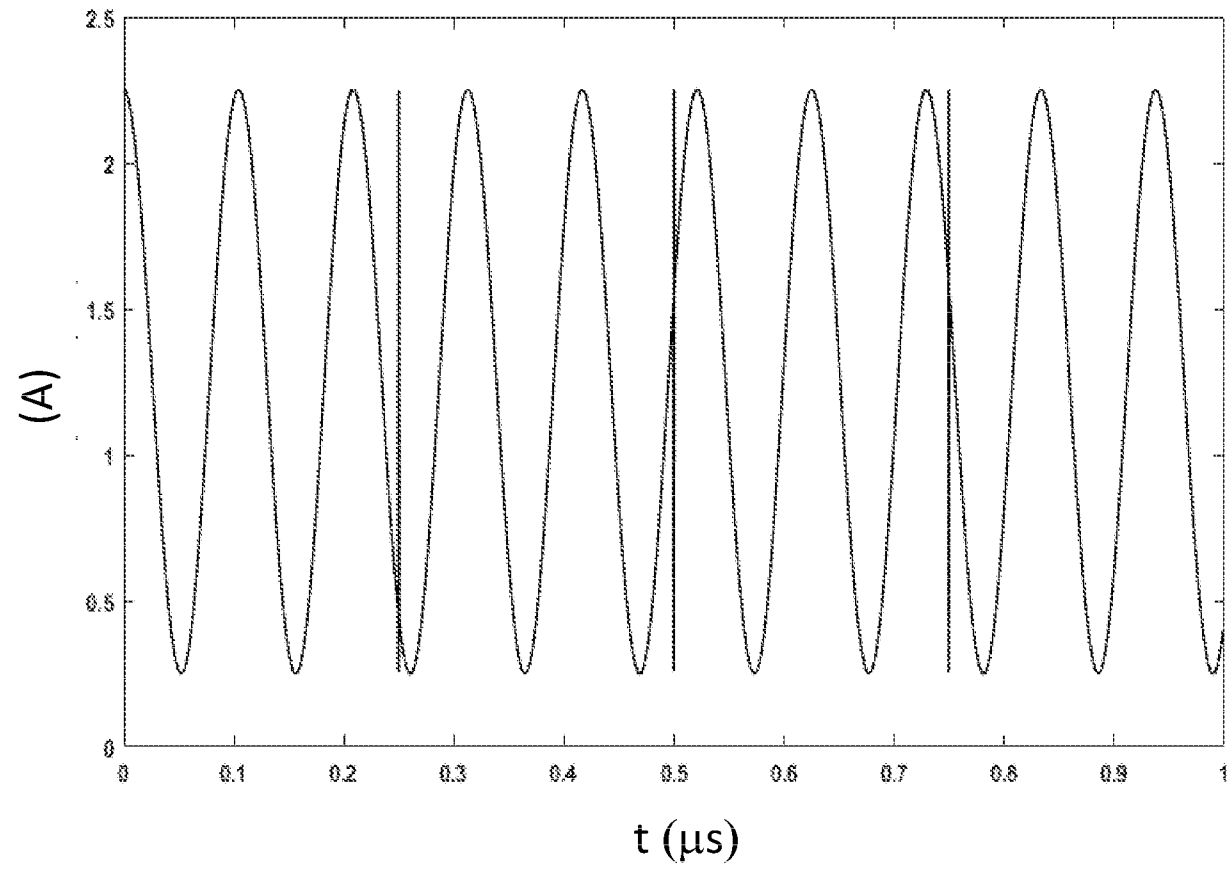


FIG. 7C

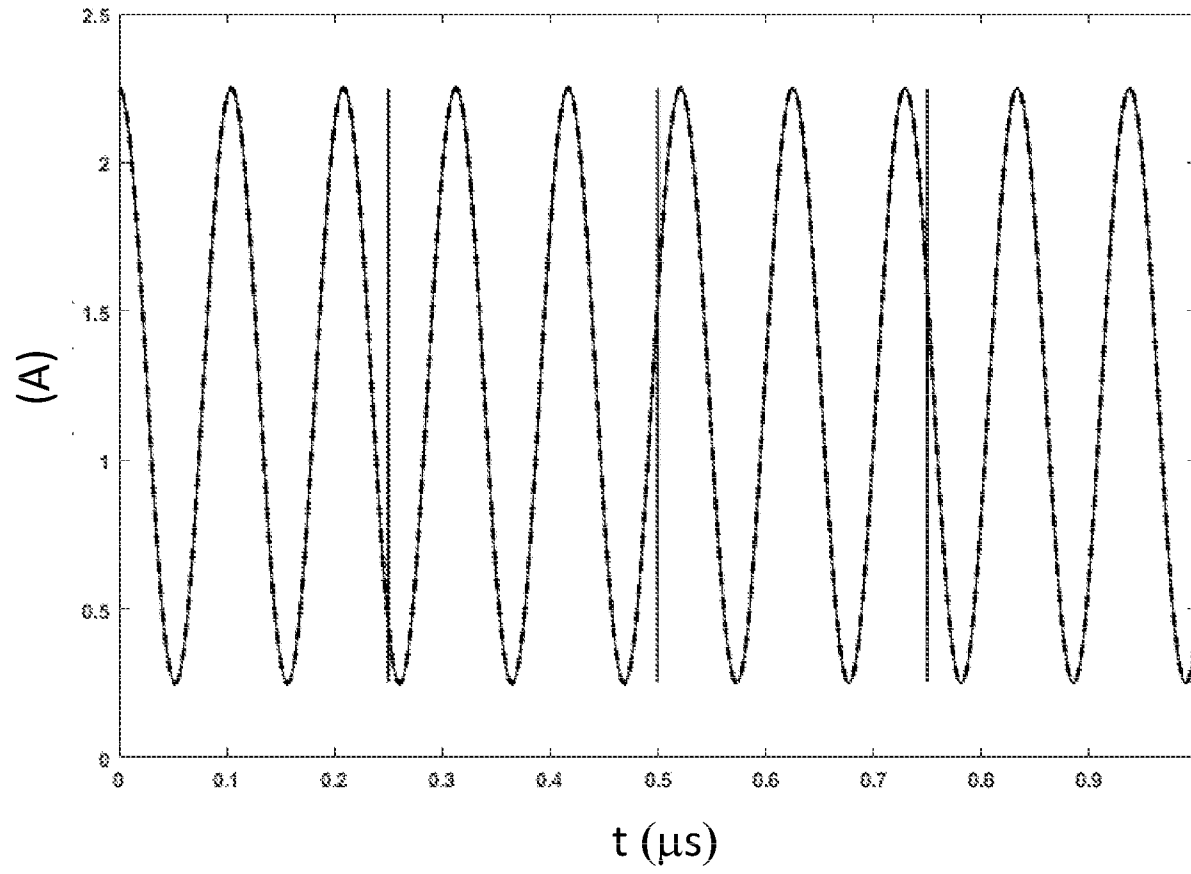


FIG. 8A

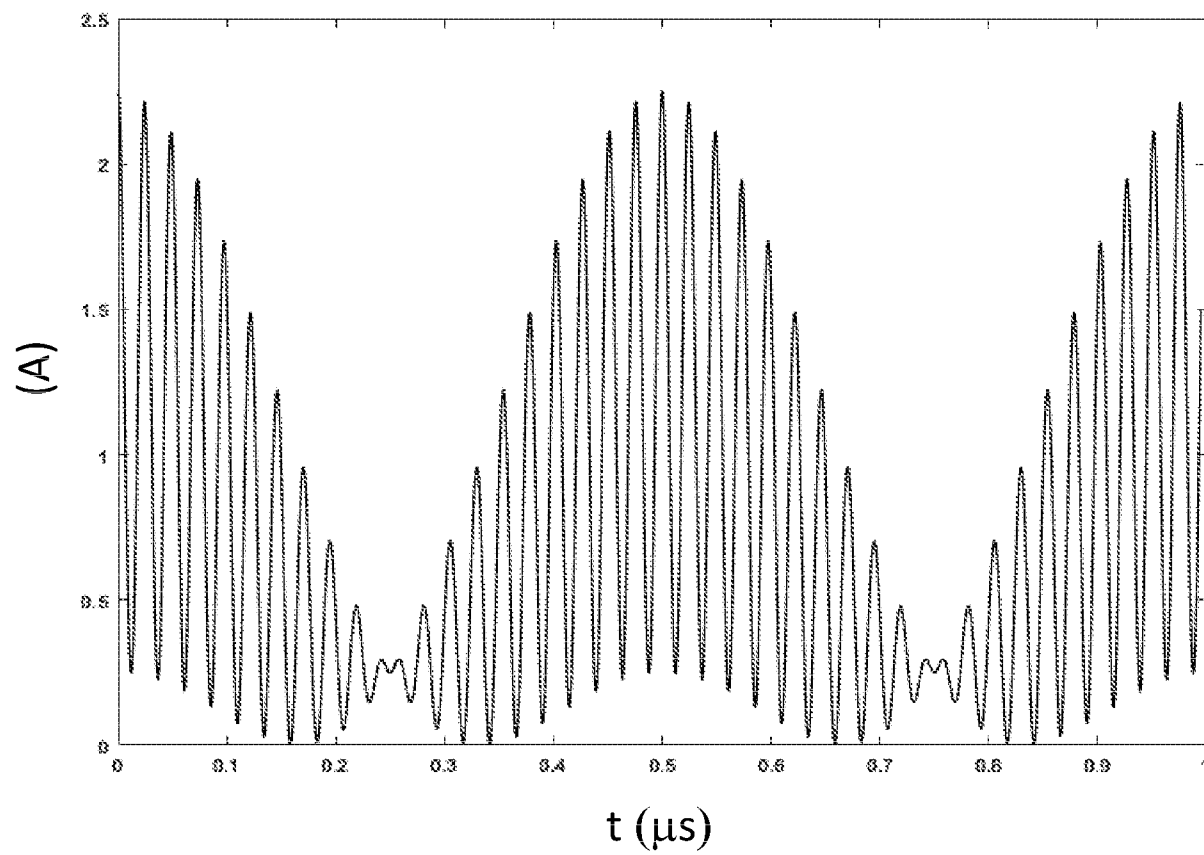


FIG. 8B

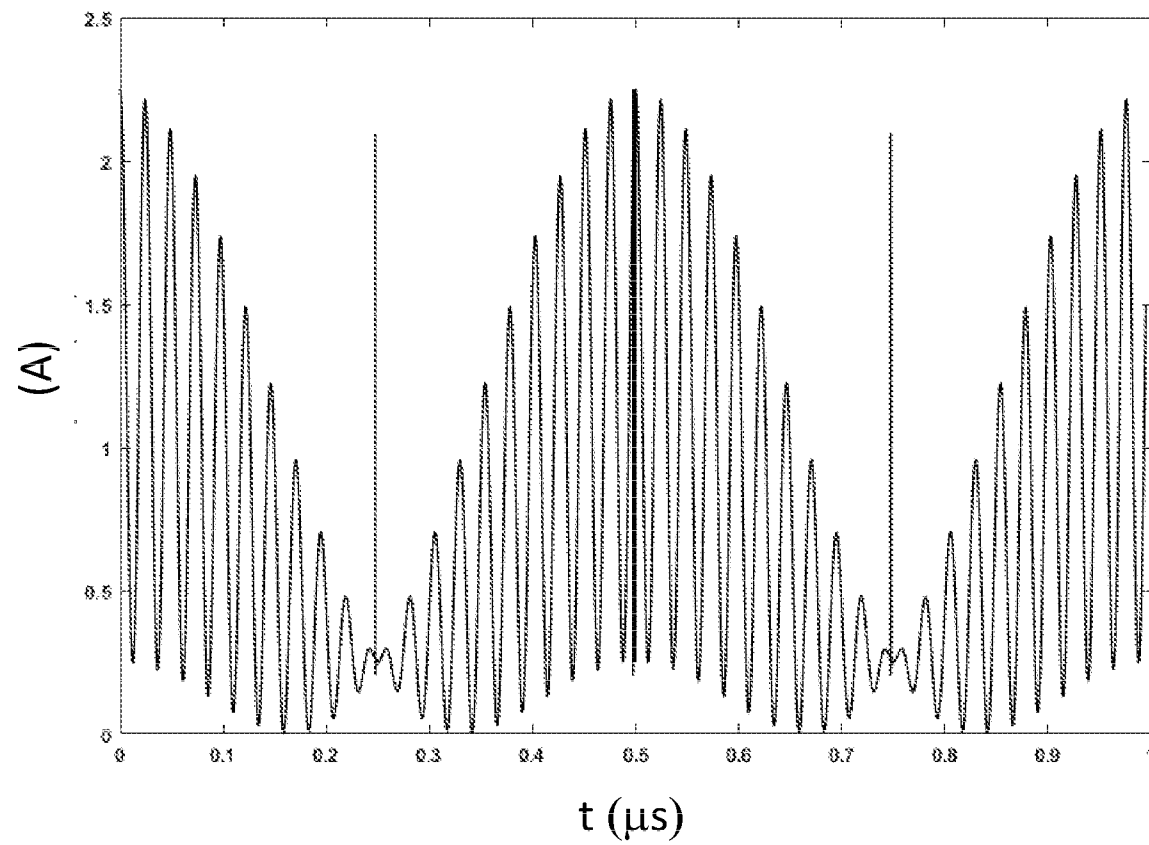


FIG. 8C

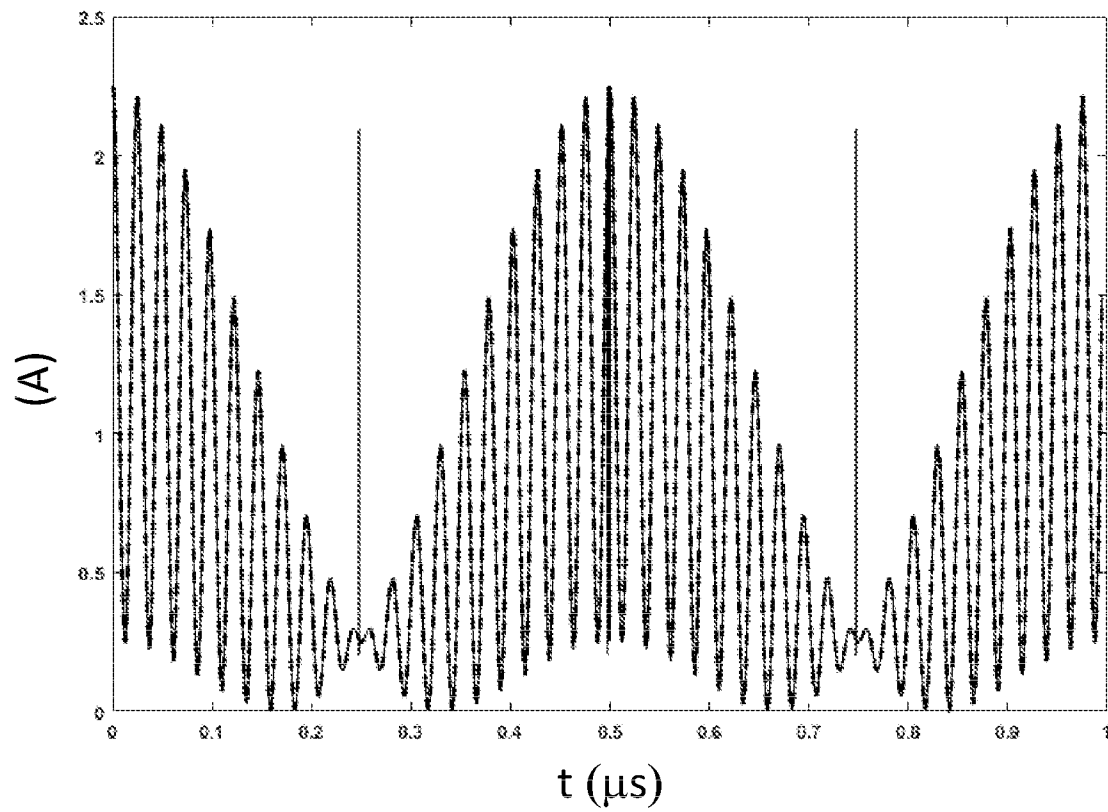


FIG. 9A

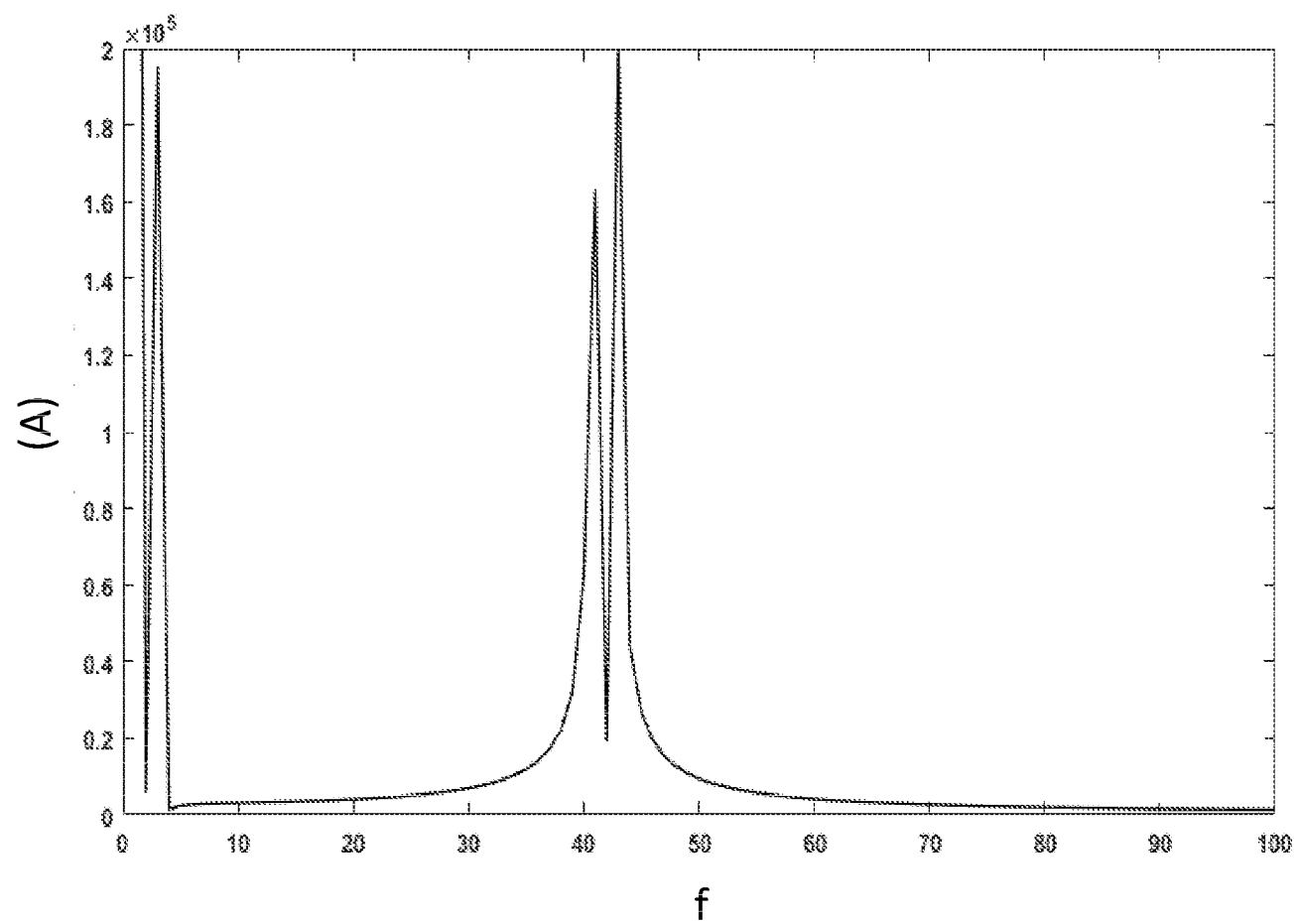


FIG. 9B

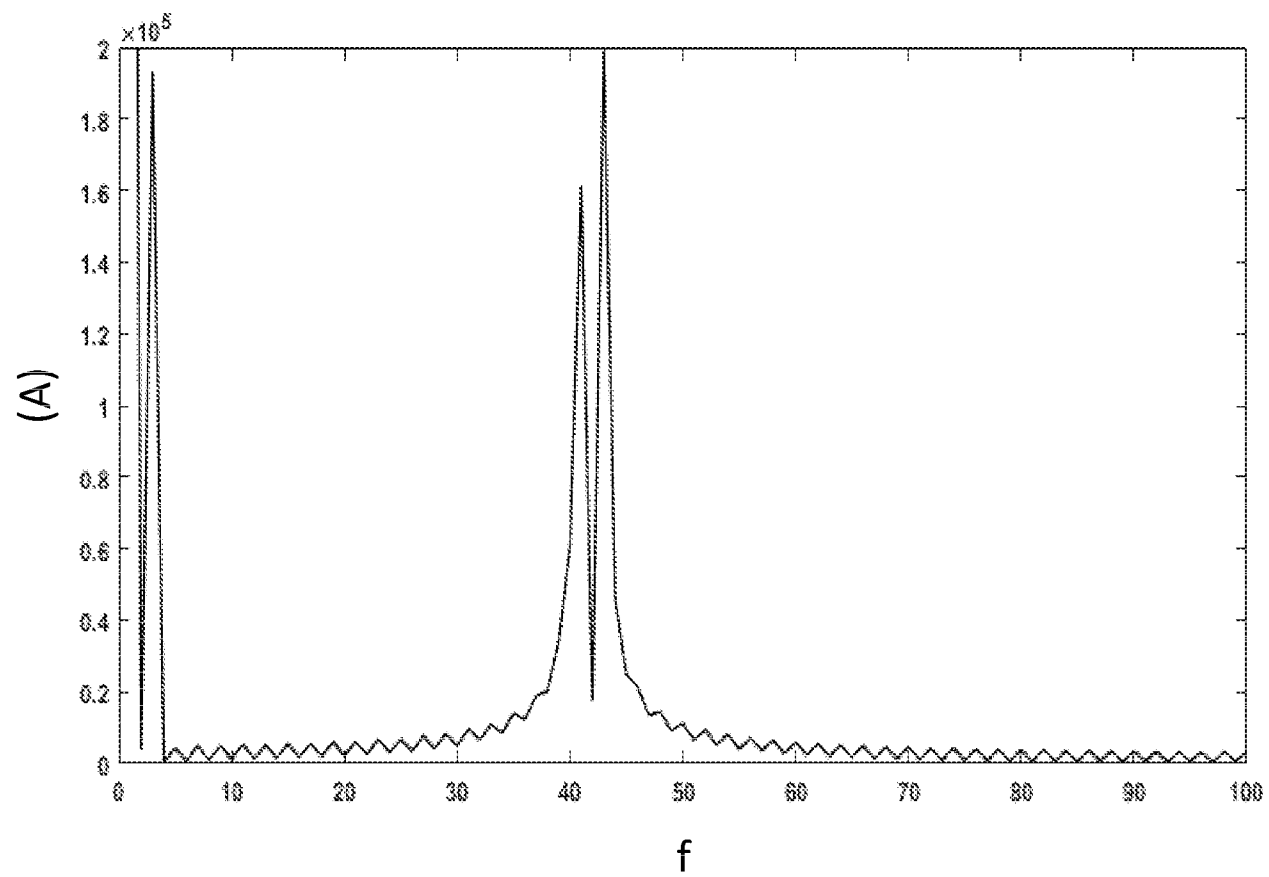


FIG. 9C

