



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETA' INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	102013902170407
Data Deposito	28/06/2013
Data Pubblicazione	28/12/2014

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	H		

Titolo

SISTEMA E METODO DI MISURA DI FREQUENZA DI OSCILLAZIONE PER UN SENSORE MEMS E CORRISPONDENTE SENSORE MEMS
--

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"SISTEMA E METODO DI MISURA DI FREQUENZA DI OSCILLAZIONE
PER UN SENSORE MEMS E CORRISPONDENTE SENSORE MEMS"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: RUSSO Alfio, MAZZILLO Massimo Cataldo, NAGY
Ferenc

* * * * *

La presente invenzione è relativa ad un sistema e a un
corrispondente metodo per misurare la frequenza di
oscillazione di un elemento oscillante in un sensore MEMS
(Micro-Electro-Mechanical System -sistema micro-elettro-
meccanico).

Come è noto, svariati sensori MEMS includono elementi
mobili, che, durante il funzionamento, sono sottoposti a
movimenti di oscillazione.

Per esempio, accelerometri, giroscopi e microfoni MEMS
noti includono elementi mobili (ad esempio sotto forma di
travi o elementi a sbalzo sospesi tramite una disposizione
a molla), che possono vibrare a una frequenza di
oscillazione.

In particolare, un movimento di vibrazione passivo di

un elemento mobile può essere generato da un'accelerazione esterna (ad esempio un urto), e le proprietà di questo movimento di vibrazione possono essere studiate per misurare l'accelerazione esterna o altre proprietà fisiche dell'ambiente esterno.

Inoltre, una vibrazione attiva dell'elemento mobile può essere generata e mantenuta, tramite impulsi elettrici esterni, in modo da rilevare altre proprietà fisiche, quale una rotazione dovuta al principio di Coriolis (ad esempio in un giroscopio), oppure una modifica della frequenza di risonanza (ad esempio in un accelerometro risonante).

La frequenza di oscillazione dell'elemento mobile può anche cambiare secondo la composizione chimica, la pressione e la densità di un mezzo ambientale circostante; di conseguenza, le proprietà del movimento oscillante possono essere anche utilizzate allo scopo di rilevare i parametri chimici del mezzo circostante.

L'utilizzo efficace di una misura della frequenza di oscillazione dell'elemento mobile è tuttavia difficile da implementare, dato che è necessario un sistema di misura molto rapido e sensibile allo scopo di misurare i valori molto elevati della stessa frequenza di oscillazione.

Ad esempio, nei sensori MEMS noti è stato proposto uno schema di accoppiamento capacitivo, tra l'elemento mobile (di solito indicato come elemento "rotore") e uno o più

corrispondenti elementi fissi (di solito indicati come elementi "statore"). Il segnale elettrico, indicativo della variazione capacitiva, è rilevato ed elaborato per misurare la frequenza di oscillazione.

Tuttavia, questa soluzione non si dimostra essere completamente soddisfacente, in termini di un relativo tempo di risposta e di una relativa sensibilità.

Lo scopo della presente invenzione è di risolvere, almeno in parte, i problemi sopra citati.

Secondo la presente invenzione, sono di conseguenza previsti un sistema e un metodo di misura della frequenza di oscillazione per un sensore MEMS, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

Per una migliore comprensione della presente invenzione, ne saranno ora descritte relative forme di realizzazione preferite, puramente in modo esemplificativo e non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, in cui:

- la Figura 1 è una vista in sezione trasversale schematica di un sensore MEMS, con un sistema di misura della frequenza di oscillazione, secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- la Figura 2 è un diagramma a blocchi schematico del sensore MEMS;

- la Figura 3 è una vista schematica di una schiera di

fotodiodi nel sensore MEMS di Figura 1;

- la Figura 4 è un circuito equivalente schematico della schiera di fotodiodi di Figura 3;

- le Figure 5a, 5b illustrano grafici dei segnali di uscita dalla schiera di fotodiodi di Figura 3, in diverse condizioni operative;

- le Figure 6a, 6b illustrano grafici di segnali analogici relativi alla misura di frequenza di oscillazione nel sensore MEMS;

- la Figura 7 illustra un diagramma a blocchi di un circuito di rilevamento digitale nel sensore MEMS;

- la Figura 8 illustra grafici di segnali digitali nel circuito di rilevamento di Figura 7;

- la Figura 9 illustra una vista in sezione trasversale schematica di una particolare forma di realizzazione di un elemento mobile nel sensore MEMS;

- le Figure 10a-10b illustrano grafici relativi al dimensionamento del sensore MEMS di Figura 9;

- le Figure 11a-11f illustrano sezioni trasversali schematiche di un corpo di materiale semiconduttore in fasi consecutive di un processo di fabbricazione per realizzare il sistema di misura del sensore MEMS; e

- la Figura 12 è una vista in sezione trasversale schematica di un involucro del sensore MEMS.

La Figura 1 illustra schematicamente una porzione di

un sensore MEMS 1, ad esempio un accelerometro, un giroscopio o un microfono (soltanto la porzione rilevante per la descrizione della presente soluzione è illustrata e discussa in dettaglio in questo contesto, mentre la struttura generale del sensore MEMS 1 può essere di qualsiasi tipo noto).

Il sensore MEMS 1 include: un corpo 2 contenente materiale semiconduttore, ad esempio silicio, avente una superficie anteriore 2a; ed un elemento mobile 4, ad esempio una trave o un elemento a sbalzo, sospeso al di sopra della superficie anteriore 2a del corpo 2, tramite una struttura di sospensione 5, ad esempio sotto forma di pilastro verticale, che si estende lungo una direzione verticale z dallo stesso elemento mobile 4 fino alla superficie anteriore 2a del corpo 2 (a cui è attaccato attraverso opportuni mezzi).

L'elemento mobile 4 è atto ad essere sottoposto ad un movimento oscillante ad una frequenza di oscillazione (ad esempio alla relativa frequenza di risonanza), e fa parte di una struttura di rilevamento (indicata come 14b in Figura 2), configurata in generale in modo da rilevare la grandezza fisica di interesse, ad esempio un'accelerazione lineare o angolare, una pressione, una quantità chimica. La frequenza di oscillazione dell'elemento mobile 4 può essere ad esempio nell'intervallo da 2 kHz a 4 MHz.

Il sensore MEMS 1 include inoltre un sistema di misura della frequenza di oscillazione 10, accoppiato al corpo 2, in particolare integrato all'interno del corpo 2, e configurato per eseguire una misura ottica della frequenza di oscillazione dell'elemento mobile 4.

Il sistema di misura 10 include: una sorgente di luce 11, configurata per generare un raggio di luce 12, in particolare un raggio di luce collimato; ed un rilevatore di luce 13, disposto e configurato in modo da rilevare il raggio di luce 12, dopo che è stato riflesso indietro dall'elemento mobile 4 durante la relativa oscillazione. In particolare, il raggio di luce 12 è riflesso da una superficie di affaccio 4a dell'elemento mobile 4, che è affacciata alla superficie anteriore 2a del corpo 2. La sorgente di luce 11 può includere ad esempio un LED (diode emettitore di luce), comprendente una giunzione a semiconduttori P-N polarizzata direttamente. Inoltre, la polarizzazione può essere in modalità continua o ad intervalli - "gated" (quest'ultima opzione consentendo di ridurre la potenza emessa e il relativo rumore ambientale).

La sorgente di luce 11 e il rilevatore di luce 13 sono disposti opportunamente affiancati lungo un asse orizzontale x che si trova nel piano della superficie anteriore 2a, in particolare essendo integrati nello stesso corpo 2 (come sarà discusso in dettaglio in seguito).

Come illustrato schematicamente in Figura 2, la sorgente di luce 11 e il rivelatore di luce 13 del sistema di misura 10 possono essere integrati in una stessa prima piastrina (die) 1' di materiale semiconduttore (comprendente il corpo 2), e l'elemento mobile 4 (ed eventuali parti rimanenti della struttura di rilevamento 14b del sensore MEMS 1) può essere integrato nella stessa prima piastrina 1' oppure in una seconda piastrina 1" di materiale semiconduttore, che è accoppiata alla prima piastrina 1'.

Il sistema di misura 10 inoltre include un circuito di rilevamento 14a, accoppiato operativamente al rivelatore di luce 13, allo scopo di fornire una misura della frequenza di oscillazione.

Il circuito di rilevamento 14a è previsto opportunamente come ASIC (Application Specific Integrated Circuit - circuito integrato specifico per applicazione), ed è tipicamente integrato in una terza piastrina 1''' di materiale semiconduttore, che può essere alloggiata all'interno di uno stesso involucro (package) con il gruppo della prima e della seconda piastrina 1', 1", in cui sono integrati la struttura di rilevamento 14b del sensore MEMS 1 e la sorgente di luce 11 ed il rivelatore di luce 13. Lo stesso ASIC può integrare un'ulteriore circuiteria elettronica, ad esempio una circuiteria di controllo per

polarizzare la sorgente di luce 11 e il rilevatore di luce 13, o un'ulteriore circuiteria di elaborazione.

Secondo un aspetto della presente forma di realizzazione, il rilevatore di luce 13 consente un'operazione di rilevamento a singoli fotoni (consentendo così di ottenere un'elevata sensibilità), e ha un tempo di risposta rapido, con una frequenza di rilevamento superiore a 20 MHz.

In particolare, il rilevatore di luce 13 include un SiPM (Silicon Photo-Multiplier - fotomoltiplicatore al silicio), che è integrato opportunamente all'interno del corpo 2.

Come è noto, e come illustrato schematicamente in Figura 3, una struttura SiPM si basa su una schiera di pixel o celle di fotodiode 15; in particolare i fotodiodi sono SPAD (Single Photon Avalanche Diode - diode a valanga a singolo fotone), che operano in una condizione di rilevamento a singolo impulso.

Come illustrato nel circuito equivalente di Figura 4, ogni cella 15 include uno SPAD 15a, connesso in serie ad un resistore di raffreddamento ("quenching") di disaccoppiamento integrato 15b; le celle 15 sono connesse in parallelo tra un terminale di polarizzazione 16, su cui è prevista una tensione di polarizzazione V_{bias} , e un terminale di uscita 17, su cui è applicato un carico 18

(rappresentato schematicamente come un resistore R_{out}). Un segnale di uscita V_{out} è previsto sul terminale di uscita 17.

Ogni SPAD nella struttura SiPM opera come contatore di fotoni indipendente, cioè nella cosiddetta "modalità Geiger", e fornisce uno stesso segnale quando innescato da un fotone (indicato schematicamente con P in Figura 3).

In particolare, nella modalità di funzionamento Geiger, i fotodiodi sono polarizzati a una tensione di polarizzazione inversa, che ha un valore assoluto superiore alla loro tensione di rottura; a causa dell'elevato campo elettrico nello strato di svuotamento, un portatore di cariche primarie in modo termico o foto-generato può innescare un evento di valanga e si genera un impulso di corrente brusco con tempo di salita in termini di sub-nanosecondi e un valore di picco di qualche mA.

Dato che tutte le celle 15 hanno un carico comune 18, la quantità di carica raccolta sul terminale di uscita 17 è fornita dalla sovrapposizione analogica dei segnali generati da tutte le celle 15 innescate.

Pertanto risulta facile distinguere il segnale generato da molte celle 15 innescate simultaneamente, da un cosiddetto "segnale scuro" ("dark signal") generato da una singola cella innescata 15 dovuta a rumore scuro ("dark noise"), grazie alle ampiezze di segnale sensibilmente

differenti (come illustrato dal confronto di Figura 5a, che illustra il segnale di uscita V_{out} nel caso di N celle 15 attivate, avente ampiezza Nk ; e la Figura 5b, che illustra il segnale di uscita V_{out} in caso di una singola cella 15 attivata, avente ampiezza k).

In generale, minore è il numero di celle 15, minore è il tempo di ricarica e così più rapida è la risposta temporale della struttura di rilevamento 14b.

L'integrazione dei resistori di raffreddamento 15b con gli SPAD 15a consente di ridurre le capacità parassite e ottenere tempi di ricarica nell'intervallo da alcuni nanosecondi ad alcune decine di nanosecondi, rendendo così disponibili SPAD per rilevare segnali a impulsi con una velocità superiore a 10 MHz nella modalità di rilevamento a singoli fotoni.

Con riferimento nuovamente alla Figura 1 e anche alle Figure 6a e 6b, sarà ora discusso il principio operativo del sistema di misura 10.

Durante l'oscillazione dell'elemento mobile 4, il raggio di luce 12 viene riflesso verso la superficie anteriore 2a del corpo 2 all'interno di un campo di scansione S lungo l'asse orizzontale x (che si trova nella stessa superficie anteriore 2a), compreso tra le posizioni limite $-A$ e $+A$ (considerando la posizione della sorgente di luce 11 come l'origine 0 lungo l'asse x).

La proiezione del raggio di luce 12 lungo l'asse x , illustrata in Figura 6a, ha così un andamento sostanzialmente sinusoidale nel tempo, alla frequenza di oscillazione f_{osc} , almeno per un piccolo campo di deflessione intorno all'origine 0 (estendendo e spostando il campo di scansione, la proiezione può diventare non lineare, senza che questo tuttavia influenzi la determinazione della frequenza di oscillazione f_{osc} , realizzata come discusso in dettaglio più avanti).

In particolare, durante ogni periodo di oscillazione T_{osc} , il raggio di luce 12 colpisce due volte il SiPM del rilevatore di luce 13, ogni volta generando uno "strobe", cioè un picco di ampiezza o un impulso nel segnale di uscita V_{out} generato all'uscita dello stesso SiPM, che è illustrato in Figura 6b.

Ogni picco di ampiezza è dovuto all'innesco simultaneo di un certo numero di celle 15, ed è chiaramente distinto dai picchi di ampiezza inferiori nei segnali di uscita, che possono essere dovuti a "rumore scuro". In particolare, si può identificare facilmente una soglia di discriminazione Th , che consente di discriminare i picchi di ampiezza dovuti al rilevamento del raggio di luce 12 riflesso da parte del rilevatore di luce 13, da eventi generati da rumore.

È così possibile misurare il periodo di oscillazione

T_{osc} come l'intervallo di tempo tra ogni due primi (o secondi) impulsi (strobe), o picchi, consecutivi, nel pattern di ampiezza del segnale di uscita V_{out} generato dal SiPM nel rilevatore di luce 13. La frequenza di oscillazione f_{osc} corrisponde all'inverso del periodo di oscillazione T_{osc} misurato.

La Figura 7 illustra una possibile implementazione digitale del circuito di rilevamento 14a, configurato per fornire una misura della frequenza di oscillazione f_{osc} , basandosi sul principio operativo sopra discusso, e in particolare basandosi sull'elaborazione del segnale di uscita V_{out} generato dal rilevatore di luce 13.

In dettaglio, e con riferimento anche alla Figura 8, il circuito di rilevamento 14a è configurato per ricevere il segnale di uscita V_{out} dal rilevatore di luce 13 e include:

un'unità di discriminazione 20, in particolare un discriminatore di fronti anteriori (Leading Edge Discriminator - L.E.D.), che riceve il segnale di uscita V_{out} e fornisce un primo segnale elaborato S_1 , contenente un certo numero di impulsi, di forma rettangolare, ciascuno corrispondente ad un impulso nel segnale di uscita V_{out} avente un'ampiezza superiore alla soglia di discriminazione Th ;

un contatore digitale 22, in particolare un contatore

asincrono a due bit, avente un ingresso di conteggio che riceve il primo segnale elaborato S_1 , e fornisce in uscita un conteggio a due bit, comprendente un segnale digitale di primo bit "bit 0" e un segnale digitale di secondo bit "bit 1"; e

un modulo TDC (Time to Digital Converter - convertitore da tempo a digitale) 26, collegato in cascata con il contatore digitale 22, e avente un ingresso di inizio di conteggio che riceve il segnale digitale di secondo bit "bit 1", e un ingresso di interruzione di conteggio che riceve il complementare dello stesso segnale digitale di secondo bit "bit 1".

Come illustrato in Figura 8, il segnale digitale di primo bit "bit 0" è del tipo a impulsi, avente un intervallo ON (cioè l'intervallo dove il segnale è a livello logico alto) tra i fronti anteriori di due impulsi consecutivi del primo segnale elaborato S_1 ; e un segnale digitale di secondo bit "bit 1", anch'esso del tipo a impulsi, che ha un intervallo ON (cioè un intervallo dove il segnale è al livello logico alto) tra i fronti di discesa di due impulsi consecutivi del segnale digitale di primo bit "bit 0". Di conseguenza, il modulo TDC 26 misura l'intervallo di tempo tra due secondi picchi consecutivi nel segnale di uscita V_{out} .

Il modulo TDC 26 fornisce così in corrispondenza della

sua uscita una misura del periodo di oscillazione T_{osc} , per ulteriori elaborazioni, in particolare per la determinazione del valore della frequenza di oscillazione f_{osc} come l'inverso dello stesso periodo di oscillazione T_{osc} .

Questa determinazione può essere effettuata all'interno dello stesso ASIC del circuito di rilevamento 14a, oppure da parte di un'unità di elaborazione esterna (ad esempio l'unità a microprocessore di un apparecchio elettronico dove è incorporato il sensore MEMS 1, qui non illustrato).

In una possibile forma di realizzazione, illustrata in Figura 9, l'elemento mobile 4 del sistema di misura 10 ha una porzione principale avente la superficie di affaccio 4a, ed è dotato di una porzione di punta 28, che si estende dalla superficie di affaccio 4a verso la superficie anteriore 2a del corpo 2; la porzione di punta 28 è progettata opportunamente in modo da riflettere il raggio di luce 12 in un campo di scansione S più largo.

Questa forma di realizzazione consente di ottenere una maggiore distanza per il collocamento del rilevatore di luce 13, ed è pertanto vantaggiosa consentendo una più agevole progettazione del sistema di misura 10.

La porzione di punta 28, che è a forma di cuneo (o a forma triangolare in una sezione trasversale rispetto al

piano della superficie anteriore 2a del corpo 2), ha una superficie riflettente la luce 28a, inclinata, atta a riflettere il raggio di luce 12 generato dalla sorgente di luce 11.

La superficie riflettente la luce 28a è inclinata ad un angolo di inclinazione β rispetto alla superficie di affaccio 4a della porzione principale dell'elemento mobile 4, che a sua volta si trova ad un angolo di deflessione α rispetto all'asse x, dovuto al movimento oscillante dello stesso elemento mobile 4.

Si può dimostrare che, durante il funzionamento, una forza di circa 10^{-4} N, che agisce sull'elemento mobile 4, è in grado di generare angoli di deflessione α nell'intervallo da 5° a 12° (considerando dimensioni comuni per l'elemento mobile 4).

Utilizzando relazioni geometriche, che risulteranno evidenti dall'esame di Figura 9, la distanza d dall'origine O del punto dove il raggio di luce riflesso 12 raggiunge la superficie anteriore 2a del corpo 2 è fornita dalla seguente espressione:

$$d = (H + dH) \cdot \tan(2 \cdot (\beta - \alpha))$$

dove (H+dH) è la distanza lungo la direzione verticale z del punto dove il raggio di luce 2 viene a contatto con la superficie riflettente la luce 28a della porzione di punta 28 dell'elemento mobile 4 rispetto alla superficie

anteriore 2a del corpo 2 (H essendo una distanza fissa in una condizione a riposo tra la superficie di affaccio 4a dell'elemento mobile 4 e la superficie anteriore 2a del corpo 2, e dH è una distanza variabile a seconda del movimento di oscillazione dello stesso elemento mobile 4).

Inoltre, si applicano le ulteriori espressioni seguenti:

$$dH = \alpha - c$$

$$c = (D-b) \cdot \tan(\beta - \alpha)$$

$$\alpha = L \cdot \sin(\alpha)$$

$$b = L \cdot \cos(\alpha)$$

dove D è la distanza lungo l'asse x tra la posizione della sorgente di luce 11 e quella della struttura di sospensione 5, ed L è la lunghezza della porzione di corpo dell'elemento mobile 4 (cioè senza considerare la sua porzione di punta 28).

La Figura 10a illustra il grafico della suddetta espressione per la distanza d, in funzione dell'angolo di deflessione α , considerando tre valori diversi per l'angolo di inclinazione β : 40°, 42° e 44°. Inoltre, si considerano i seguenti valori: L = 200 μm ; D = 205 μm ; e H = 25 μm .

La Figura 10b illustra il grafico della suddetta espressione per la distanza d, di nuovo in funzione dell'angolo di deflessione α , questa volta considerando

tre valori diversi per la distanza H: 25 μm , 35 μm e 45 μm . Inoltre, si considerano i seguenti valori: L = 200 μm ; D = 205 μm ; e $\beta = 40^\circ$.

Considerando un intervallo di 12° per l'angolo di deflessione α , il suddetto grafico indica che la soluzione e la conformazione sopra discusse per il dispositivo di misura 10 consentono un collocamento opportuno del rilevatore di luce 13 rispetto alla sorgente di luce 11, in maniera tale da essere in grado di ricevere il raggio di luce 12 riflesso. Il rilevatore di luce 13 è disposto all'interno dello spazio consentito lungo l'asse x, tra l'origine 0 e la struttura di sospensione 5, in questo caso di circa 200 μm (indicato come Δx nelle Figure 10a-10b).

In particolare, nel caso in cui la sorgente di luce presenta ad esempio una dimensione di 10-20 μm lungo l'asse x, il SiPM del rilevatore di luce 13 può avere una dimensione che varia ad esempio da 50x50 μm a 100x100 μm in un piano parallelo alla superficie anteriore 2a del corpo 2, sufficientemente estesa da progettare una schiera di 2x2 o 3x3 celle 15.

Viene ora descritta una forma di realizzazione esemplificativa di un processo di fabbricazione del sensore MEMS 1, con particolare riguardo al sistema di misura 10.

In una prima fase, Figura 11a, è predisposto un substrato 30, fatto di materiale semiconduttore, in

particolare silicio; un primo strato strutturale 32, ad esempio uno strato epitassiale, è formato sul substrato 30 (come alternativa, il primo strato strutturale 32 può essere una struttura multistrato di materiali compositi).

La sorgente di luce 11 è quindi formata all'interno del primo strato strutturale 32; nel caso in cui la sorgente di luce 11 include un LED, si forma una giunzione a semiconduttore, tramite la formazione di almeno una prima regione drogata 33 all'interno di una porzione di superficie del primo strato strutturale 32 (la prima regione drogata 33 avendo un tipo di drogaggio diverso rispetto al primo strato strutturale 32).

In una successiva fase, Figura 11b, un secondo strato strutturale 35, ad esempio uno strato epitassiale (oppure una struttura multistrato di materiali compositi), è formato sul primo strato strutturale 32, e il rilevatore di luce 13 è quindi formato all'interno dello stesso secondo strato strutturale 35; nel caso in cui il rilevatore di luce 13 includa un SiPM, un certo numero di ulteriori regioni drogate 36 (una sola delle quali è illustrata schematicamente in Figura 11b), disposte in modo da formare la schiera di celle 15 (comprendenti ciascuna uno SPAD), sono formate all'interno di una porzione di superficie del secondo strato strutturale 35.

In seguito, Figura 11c, uno strato isolante spesso 37,

ad esempio di ossido di silicio, è formato sul secondo strato strutturale 35, ed è quindi sottoposto a tre diverse operazioni di attacco fotolitografico:

una prima operazione di attacco con un primo strato di mascheramento (non illustrato), per la rimozione di porzioni dello strato isolante spesso 37 e del secondo strato strutturale 35, per formare prime trincee 38, progettate per contattare la sorgente di luce 11;

una seconda operazione di attacco con un secondo strato di mascheramento (non illustrato), per la rimozione di porzioni dello strato isolante spesso 37, del secondo strato strutturale 35 e del primo strato strutturale 32, per formare seconde trincee 39, progettate per isolare la sorgente di luce 11 dal rilevatore di luce 13 (le seconde trincee 39 formano vantaggiosamente una struttura di confinamento chiusa intorno alla sorgente di luce 11, ad esempio con una sezione ad anello parallelamente alla superficie principale del substrato 30); e

una terza operazione di attacco con un terzo strato di mascheramento (non illustrato), per la rimozione di porzioni dello strato isolante spesso 37, per formare terze trincee 40, progettate per entrare in contatto con il rilevatore di luce 13.

Nella successiva fase, Figura 11d, si esegue una deposizione metallica con riattacco, allo scopo di riempire

le prime, seconde e terze trincee 38, 39, 40 con rispettive regioni di riempimento metalliche 41, 42, 43, ad esempio di tungsteno.

In particolare, la prima e la terza regione di riempimento metallico 41, 43 forniscono percorsi di contatto elettrico con la sorgente di luce 11 e il rilevatore di luce 13, rispettivamente; mentre le seconde regioni di riempimento metalliche 42 definiscono una struttura di confinamento per evitare l'illuminazione diretta del rilevatore di luce 13 da fotoni emessi direttamente dalla sorgente di luce 11 (che sono bloccati dalle stesse seconde regioni di riempimento metalliche 42, operative come materiale isolante ottico).

Si noti che i disegni non sono in scala, e che l'area attiva della sorgente di luce 11 è di gran lunga minore della rispettiva area attiva del rilevatore di luce 14, allo scopo di ridurre l'emissione a cono di luce.

Si formano quindi un primo e un secondo contatto elettrico 45, 46, Figura 11e, per entrare in contatto elettrico con la prima e la terza regione di riempimento metallico 41, 43 e così la sorgente di luce 11 e il rilevatore di luce 13, allo scopo di consentire la loro polarizzazione (a una tensione di polarizzazione diretta, e rispettivamente, ad una tensione di polarizzazione inversa elevata), e il rilevamento di segnali di uscita; in

particolare, un ulteriore strato isolante 47 è formato sullo strato isolante spesso 37, ad esempio di TEOS, che viene quindi planarizzato, e si esegue quindi un'operazione di metallizzazione.

Si forma così il corpo 2 dove è integrato il sistema di misura 10, con il primo e il secondo contatto elettrico 45, 46 disposti sulla superficie anteriore 2a.

Una fase finale del processo di fabbricazione, Figura 11f, prevede l'accoppiamento della struttura di rilevamento 14b del sensore MEMS 1 (integrato nella seconda piastrina 1") sul corpo 2, attraverso l'operazione di attacco della piastrina, e l'interposizione di uno strato adesivo 49.

In particolare, l'elemento mobile 4 è disposto in modo da essere di fronte alla superficie anteriore 2a del corpo 2 e della sorgente di luce 11 e del rilevatore di luce 13.

La superficie di affaccio 4a dell'elemento mobile 4 di fronte alla superficie anteriore 2a del corpo 2, così come la superficie interna 5a della struttura di sospensione 5, può essere parzialmente rivestita con un opportuno strato di assorbimento della luce 50, ad esempio di TiN.

Inoltre, la superficie riflettente la luce 28a della punta 28 può essere rivestita da uno strato riflettente 51 di qualsiasi materiale riflettente adatto, ad esempio di vetro, allo scopo di migliorare la riflettività ai raggi di luce 12.

Occorre notare che la probabilità di disporre del SiPM nel rilevatore di luce 13 innescato da fotoni emessi direttamente dalla sorgente di luce 11 è ulteriormente ridotta dalla trincea ottica tra emettitore e rilevatore, definita dalla struttura di confinamento sopra discussa.

La soluzione a doppia trincea disposta tutto intorno alla sorgente di luce 11 riduce ulteriormente l'emissione di coni di luce, rendendo quasi collimata la luce emessa dalla stessa sorgente di luce 11 e riflessa dall'elemento mobile 4.

Come discusso in precedenza, in una possibile forma di realizzazione, il LED nella sorgente di luce 11 è attivato utilizzando la polarizzazione diretta in un regime di luce ad emissione continua; il SiPM è attivato in condizione inversa a una polarizzazione superiore alla sua tensione di rottura. I resistori di raffreddamento 15b nelle celle 15 del SiPM spengono la corrente a valanga nei pixel innescati in un dato tempo nell'intervallo da alcuni nanosecondi ad alcune decine di nanosecondi, rendendoli così disponibili per rilevare segnali a impulsi con una velocità superiore a 10 MHz in una modalità di rilevamento a singoli fotoni, anche per flussi di fotoni incidenti a bassa sensibilità.

La Figura 12 illustra un contenitore (package) 52 esemplificativo per il sensore MEMS 1.

Il contenitore 52 include un substrato di base 54; il

gruppo della prima e della seconda piastrina 1',1" che integrano la struttura di rilevamento 14b e il sistema di misura 10 del sensore MEMS 1, e inoltre la terza piastrina 1''' del circuito ASIC 14a sono disposti affiancati sul substrato di base 54.

Un composto di stampaggio - "mold" (non illustrato) può rivestire il substrato di base 54 e la terza piastrina 1'''; una cavità 56 è in ogni caso definita sul gruppo della prima e della seconda piastrina 1', 1".

Inoltre, è previsto uno strato di copertura 57, per chiudere nella parte superiore la cavità 56; si può prevedere un'apertura 58 attraverso lo strato di copertura 57, allo scopo di accedere alla cavità 56 dall'ambiente esterno (ad esempio per consentire l'entrata di onde di pressione sonora).

I vantaggi della soluzione descritta risultano evidenti dalla precedente discussione.

In ogni caso, si enfatizza nuovamente che un sistema di misura ottico 10 è integrato all'interno di un sensore MEMS 1, per fornire una misura ottica della frequenza di oscillazione f_{osc} del relativo elemento mobile 4.

La misura di frequenza di oscillazione può essere utilizzata per un certo numero di scopi, ad esempio per misurare un'accelerazione lineare o angolare, una pressione, una composizione chimica di un mezzo, ecc. In

altre parole, utilizzando una sola struttura di rilevamento e la misura di frequenza di oscillazione risultante (dopo che è stata opportunamente elaborata), è possibile ottenere misure di varie grandezze meccaniche e chimiche di interesse.

La soluzione discussa garantisce una realizzazione compatta e a basso costo per il rilevamento della frequenza di oscillazione f_{osc} .

Inoltre, l'utilizzo di un'operazione di rilevamento a singoli fotoni in modalità Geiger consente una misura molto accurata delle frequenze di oscillazione superiori a decine di MHz, grazie alla risposta temporale rapida del rilevatore.

Infine, risulta evidente che modifiche e variazioni possono essere apportate a quanto qui descritto e illustrato, senza discostarsi dall'ambito di protezione della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, la disposizione e la conformazione del sistema di misura 10 possono essere modificate opportunamente allo scopo di aumentare ulteriormente la sensibilità della misura ottica.

Per esempio, la lunghezza L dell'elemento mobile 4 può essere aumentata, allo scopo di aumentare la distanza disponibile per il rilevamento di luce, anche per angoli di

deflessione α più piccoli; e il valore dell'angolo di inclinazione β può essere modificato anch'esso secondo i requisiti di dimensionamento.

L'utilizzo di una lente divergente accoppiata al rilevatore di luce 13 potrebbe essere anche previsto, allo scopo di aumentare ulteriormente la sensibilità.

La soluzione discussa può essere applicata anche al caso in cui l'elemento mobile 4 è una membrana o altro tipo di struttura mobile, e la conformazione della struttura di sospensione 5 e la struttura generale della struttura di rilevamento 14b nel sensore MEMS 1 possono variare rispetto quanto è stato illustrato schematicamente, in modo esemplificativo.

Inoltre, la sorgente di luce 11 può essere di un tipo diverso, ad esempio un laser a diodi o un VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser); inoltre, la schiera di celle 15 nel SiPM può essere raffreddata attivamente, invece che passivamente.

RIVENDICAZIONI

1. Sensore MEMS (1) comprendente almeno un elemento mobile (4) atto ad oscillare ad una frequenza di oscillazione (f_{osc}), e un sistema di misura integrato (10) accoppiato all'elemento mobile (4) per fornire una misura della frequenza di oscillazione, caratterizzato dal fatto che il sistema di misura (10) include una sorgente di luce (11) configurata per emettere un raggio di luce (12) verso l'elemento mobile (4), ed un rilevatore di luce (13) configurato per ricevere il raggio di luce (12) riflesso dall'elemento mobile (4), in cui il rilevatore di luce (13) include una schiera di fotodiodi a semiconduttore.

2. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 1, in cui il rilevatore di luce (13) è un fotomoltiplicatore integrato includente una schiera di diodi a valanga a singolo fotone (15a).

3. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui il sistema di misura (10) è integrato in un corpo (2) contenente materiale semiconduttore, e l'elemento mobile (4) è accoppiato al corpo (2), sospeso al di sopra di una sua superficie anteriore (2a).

4. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 3, in cui la sorgente di luce (11) è confinata in modo ottico all'interno del corpo (2) tramite una regione di confinamento circostante (38), che separa la sorgente di

luce (11) dal rilevatore di luce (13) all'interno del corpo (2).

5. Sensore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un circuito di rilevamento elettronico (14a), accoppiato operativamente al rilevatore di luce (13), allo scopo di fornire una misura della frequenza di oscillazione (f_{osc}) sulla base di un segnale di uscita (V_{out}) ricevuto da detto rilevatore di luce (13).

6. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 5, in cui il circuito di rilevamento (14a) include un rilevatore di picco (20), configurato per ricevere il segnale di uscita (V_{out}) dal rilevatore di luce (13), avente una configurazione con almeno un picco all'interno di ogni periodo di oscillazione (T_{osc}) corrispondente al rilevamento del raggio di luce (12) riflesso, e fornire un primo segnale elaborato (S_1); e uno stadio di misura temporale (22, 26) configurato per ricevere il primo segnale elaborato (S_1) e misurare l'intervallo di tempo che intercorre tra picchi corrispondenti rilevati in periodi di oscillazione consecutivi.

7. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 6, in cui il circuito di rilevamento elettronico (14a) è previsto come ASIC integrato in una piastrina (1'''), contenente materiale semiconduttore, accoppiata al corpo (2)

all'interno di uno stesso contenitore (52).

8. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 6 o 7, in cui il segnale di uscita (V_{out}) ha un primo e un secondo picco dovuti al raggio di luce riflesso (12) all'interno di ogni periodo di oscillazione; e in cui il circuito di rilevamento (14a) è del tipo digitale, e lo stadio di misura temporale (22, 26) include un contatore digitale configurato per misurare l'intervallo di tempo tra una coppia di primi, o secondi, picchi rilevati in due periodi di oscillazione consecutivi.

9. Sensore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 6 a 8, in cui la misura della frequenza di oscillazione (f_{osc}) fornita dal circuito di rilevamento elettronico (14a) è atta a fornire inoltre una misura ottica di movimento del sensore MEMS (1) e/o una misura chimica relativa a un mezzo che circonda il sensore MEMS (1).

10. Sensore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui l'elemento mobile (4) ha una porzione principale affacciata ad una superficie anteriore (2a) del corpo (2) con una superficie di affaccio (4a); in cui la porzione principale porta un elemento di punta (28) avente una superficie riflettente la luce (28a), inclinata a un angolo di inclinazione (β) rispetto alla sua superficie di affaccio (4a) e disposta in modo da

riflettere il raggio di luce (12) emesso dalla sorgente di luce (11) verso la superficie anteriore (2a) del corpo (2).

11. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 10, in cui l'elemento mobile (4) è sospeso al di sopra della superficie anteriore (2a) del corpo (2) tramite una struttura di sospensione (5), e il rilevatore di luce (13) è disposto, rispetto alla superficie anteriore (2a), in una regione compresa tra la struttura di sospensione (5) e la sorgente di luce (11); in cui l'angolo di inclinazione (β) ha un valore tale per cui la superficie riflettente la luce (28a) dell'elemento di punta (28) riflette il raggio di luce (12) all'interno di detta regione.

12. Sensore MEMS secondo la rivendicazione 10 o 11, in cui la porzione principale dell'elemento mobile (4) è almeno in parte rivestita con uno strato di assorbimento della luce (50), e la superficie riflettente la luce (28a) della punta (28) è rivestita almeno in parte da uno strato di materiale riflettente (51).

13. Sensore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il rilevatore di luce (13) è un fotomoltiplicatore integrato comprendente una schiera di diodi a valanga a singolo fotone (15a), e resistori di raffreddamento passivo (15b) integrati accoppiati a rispettivi diodi a valanga a singolo fotone (15a).

14. Sensore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il rilevatore di luce (13) è un fotomoltiplicatore integrato contenente una schiera di diodi a valanga a singolo fotone (15a); in cui i diodi a valanga a singolo fotone (15a) sono atti ad operare come contatori di fotoni indipendenti, cioè nella cosiddetta "modalità Geiger", essendo polarizzati ad una tensione di polarizzazione inversa, avente un valore assoluto superiore alla loro tensione di rottura; e in cui la sorgente di luce (11) include un diodo emettitore di luce integrato polarizzato direttamente.

15. Metodo per misurare la frequenza di oscillazione (f_{osc}) di un elemento mobile (4) di un sensore MEMS (1), che è atto ad oscillare ad una frequenza di oscillazione (f_{osc}),

caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

emettere un raggio di luce (12) verso l'elemento mobile (4), tramite una sorgente di luce (11);

ricevere il raggio di luce (12) riflesso dall'elemento mobile (4), tramite un rilevatore di luce (13), generando un segnale di uscita (V_{out}); e

misurare la frequenza di oscillazione (f_{osc}) sulla base del segnale di uscita (V_{out}),

in cui il rilevatore di luce (13) include una schiera di fotodiodi a semiconduttore.

16. Metodo secondo la rivendicazione 15, in cui un

segnale di uscita (V_{out}) dal rilevatore di luce (13) ha una configurazione con almeno un picco all'interno di ogni periodo di oscillazione (T_{osc}) corrispondente al rilevamento del raggio di luce riflesso (12); e in cui la misura della frequenza di oscillazione (f_{osc}) include la misura di un intervallo di tempo che intercorre tra picchi nel segnale di uscita (V_{out}) rilevati all'interno di periodi di oscillazione consecutivi.

17. Procedimento per la fabbricazione di un sensore MEMS (1), comprendente le fasi di:

predisporre almeno un elemento mobile (4) progettato per oscillare ad una frequenza di oscillazione (f_{osc});

integrare un sistema di misura (10) all'interno di un corpo (2) comprendente materiale semiconduttore; e

accoppiare l'elemento mobile (4) al corpo (2) in modo tale che l'elemento mobile (4) sia sospeso al di sopra di una relativa superficie anteriore (2a), il sistema di misura (10) essendo in tal modo disposto in maniera da fornire una misura della frequenza di oscillazione (f_{osc}),

caratterizzato dal fatto che la fase di integrare un sistema di misura (10) comprende formare all'interno del corpo (2) una sorgente di luce (11) configurata per emettere un raggio di luce (12) verso l'elemento mobile (4), e un rilevatore di luce (13) configurato per ricevere il raggio di luce (12) riflesso dall'elemento mobile (4);

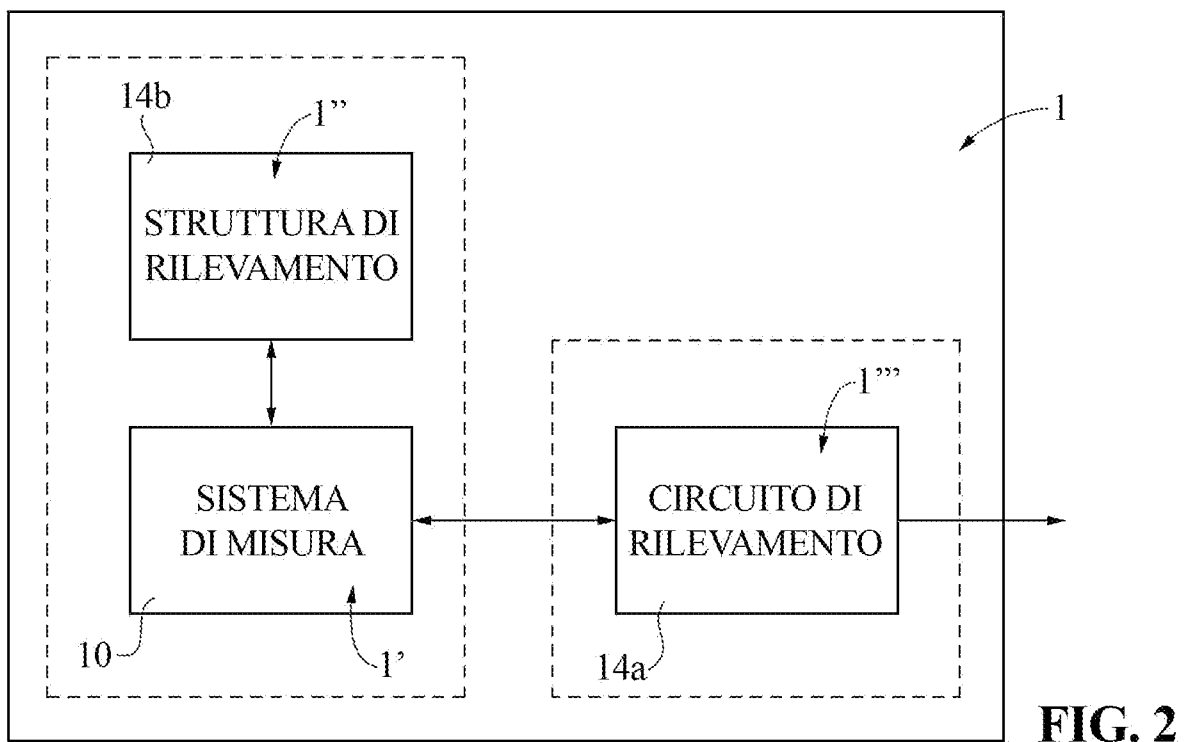
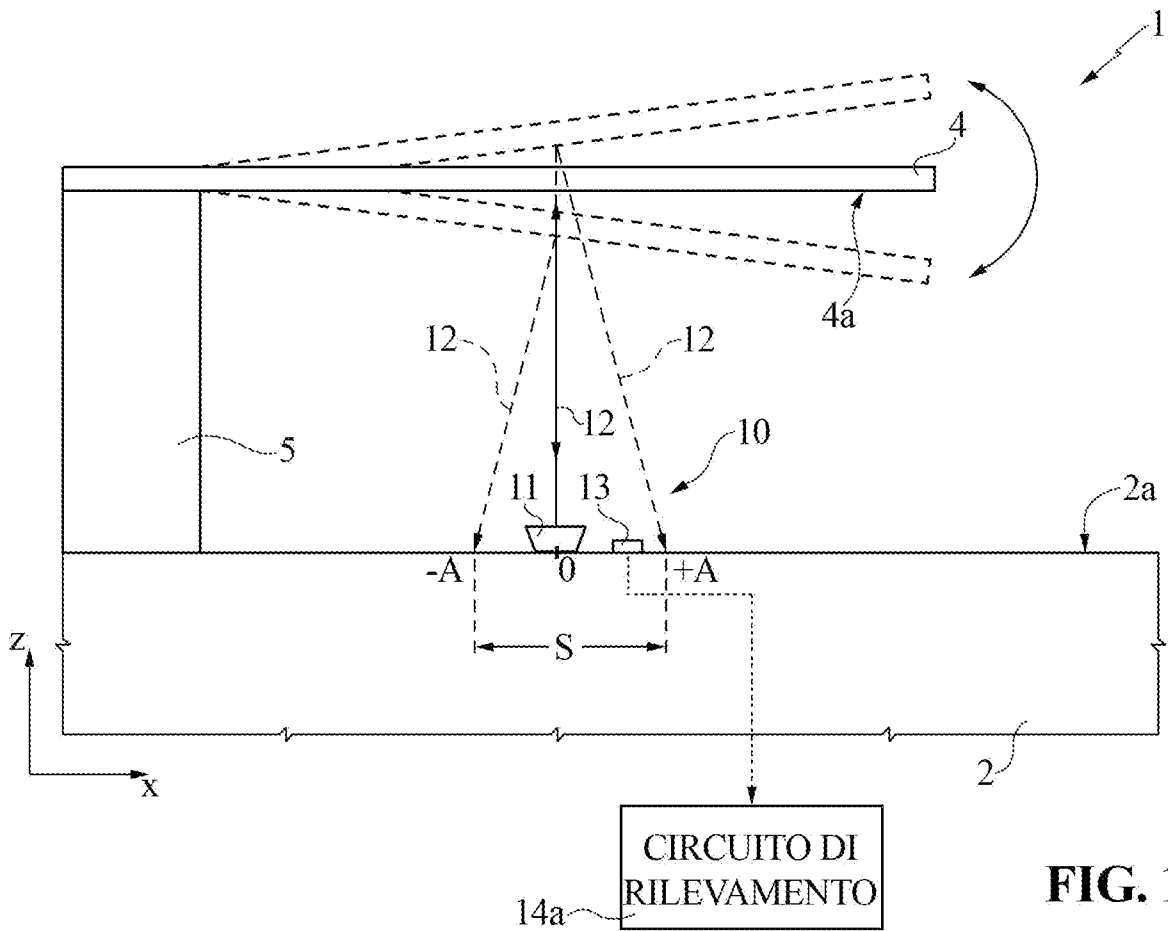
in cui la fase di formare il rilevatore di luce (13) include integrare all'interno del corpo (2) una schiera di fotodiodi a semiconduttore.

18. Procedimento secondo la rivendicazione 17, in cui la fase di formare la sorgente di luce (11) include formare almeno una prima regione drogata (33) all'interno di un primo strato strutturale (32) per definire una giunzione a semiconduttore; formare una trincea di confinamento (38) che circonda la prima regione drogata (33); e riempire la trincea di confinamento (38) con un materiale di isolamento ottico, formando in tal modo una regione di confinamento circostante (42), che isola la sorgente di luce (11) dal rilevatore di luce (13) all'interno del corpo (2).

19. Procedimento secondo la rivendicazione 18, in cui la fase di formare il rilevatore di luce (13) include formare un certo numero di ulteriori regioni drogate (36) all'interno di un secondo strato strutturale (35), per definire corrispondenti giunzioni di fotodiodi a semiconduttore (15a); in cui le ulteriori regioni drogate (36) sono separate dalla prima regione drogata (33) tramite la regione di confinamento circostante (42).

p.i.: STMICROELECTRONICS S.R.L.

Lorenzo NANNUCCI



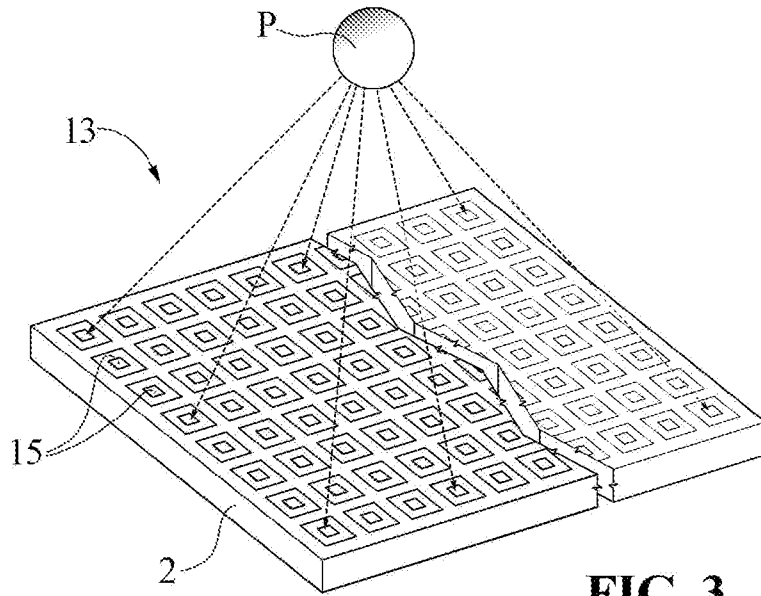


FIG. 3

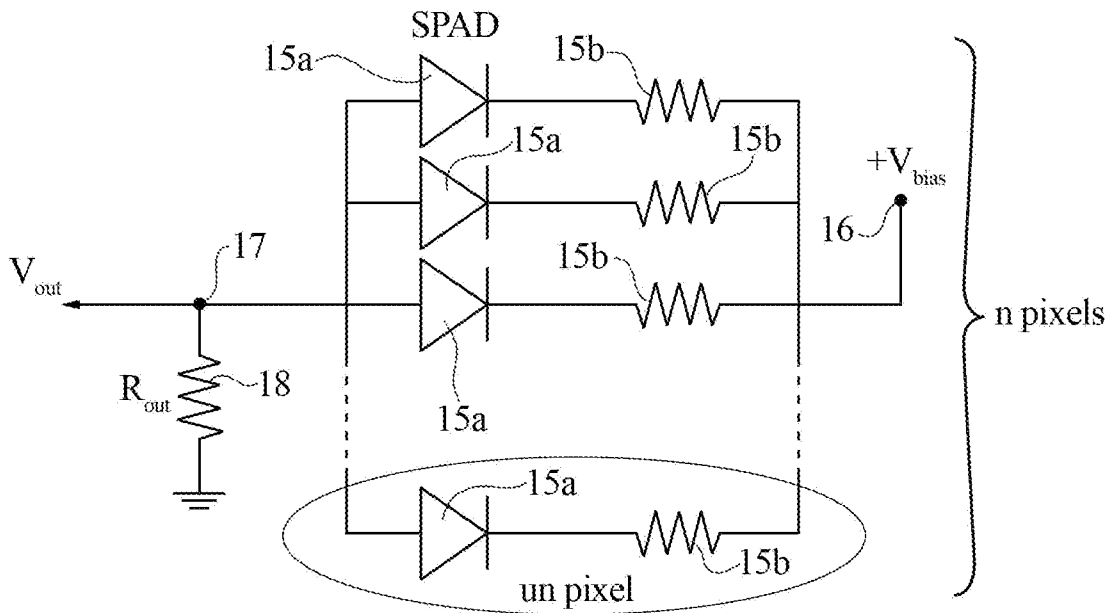


FIG. 4

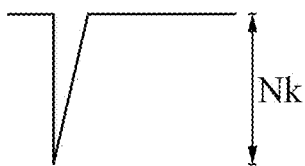


FIG. 5A

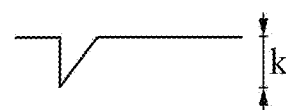


FIG. 5B

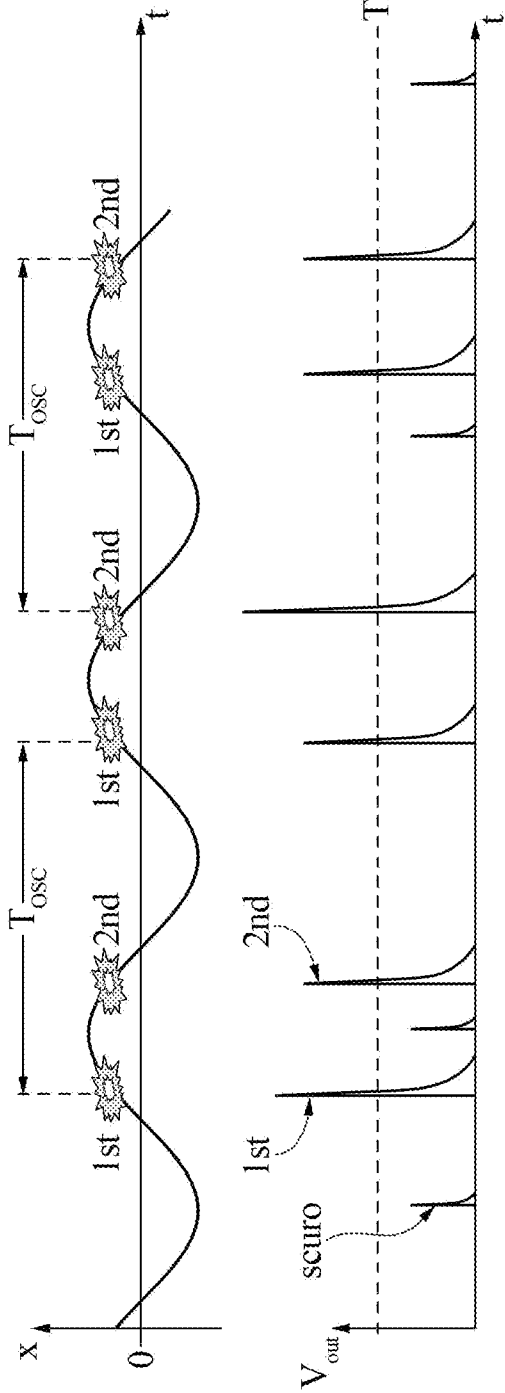


FIG. 6A

FIG. 6B

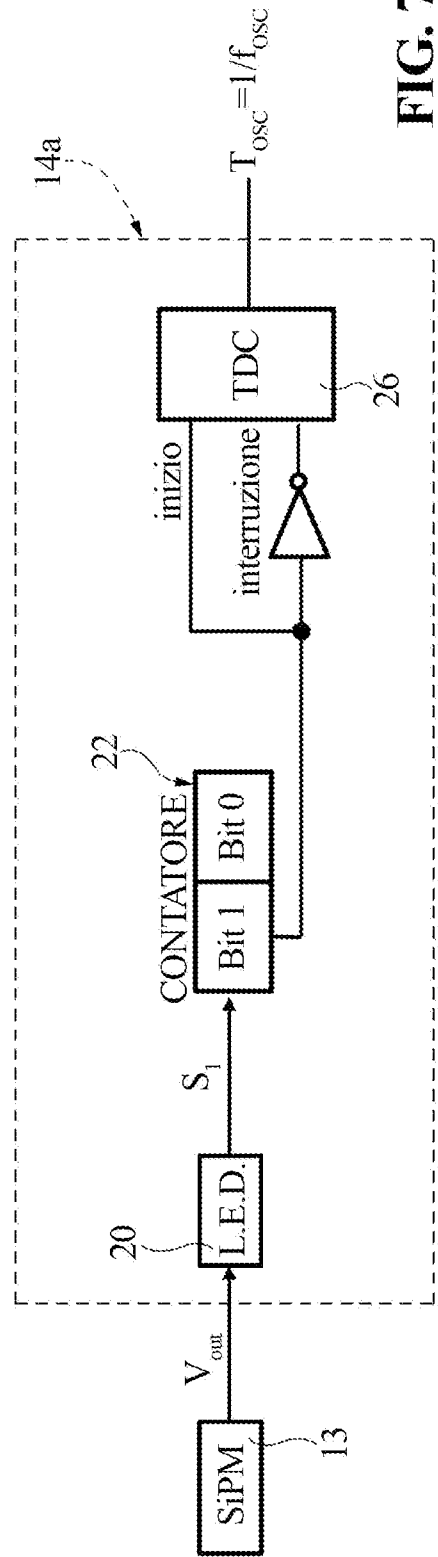


FIG. 7

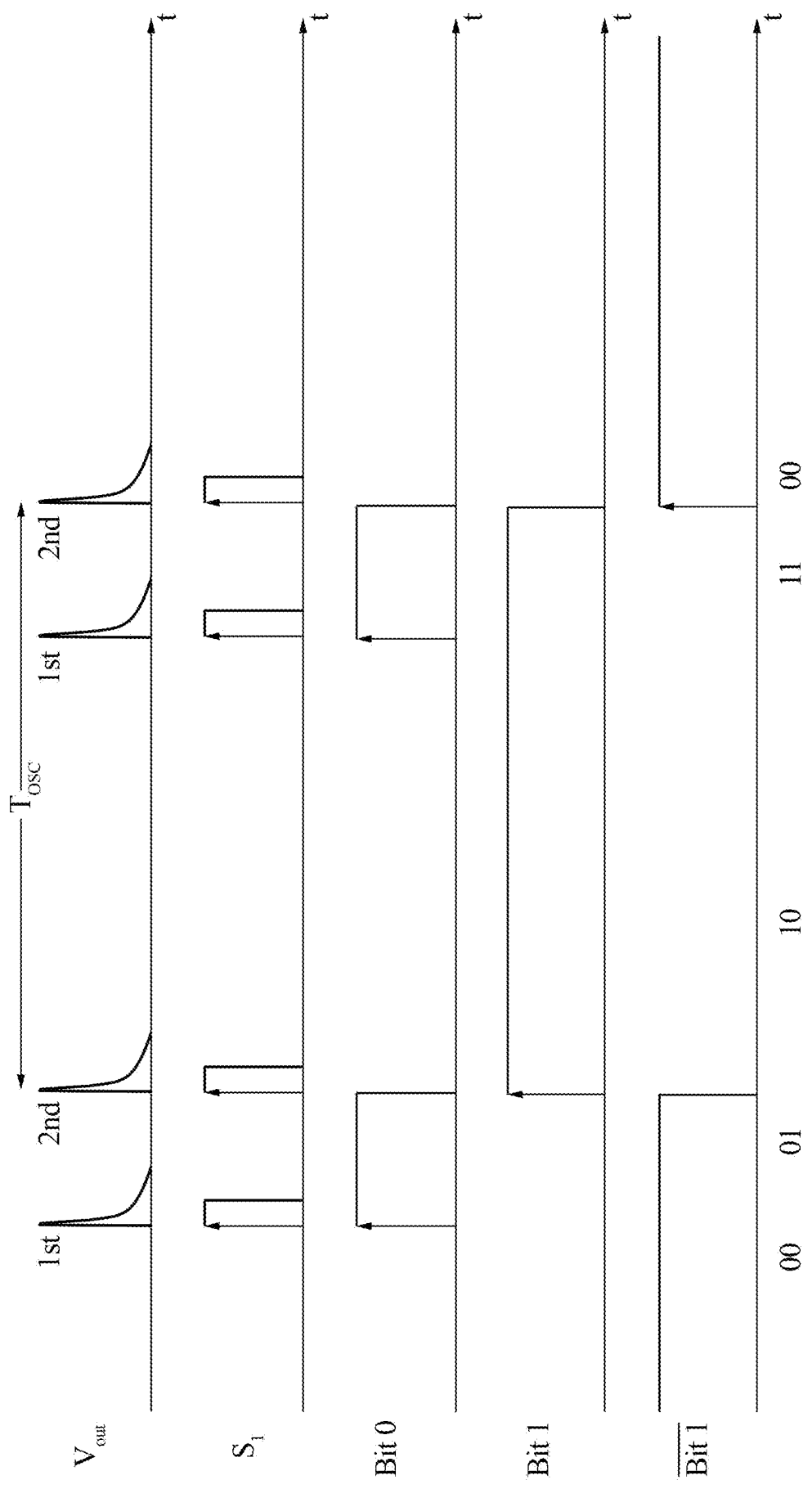


FIG. 8

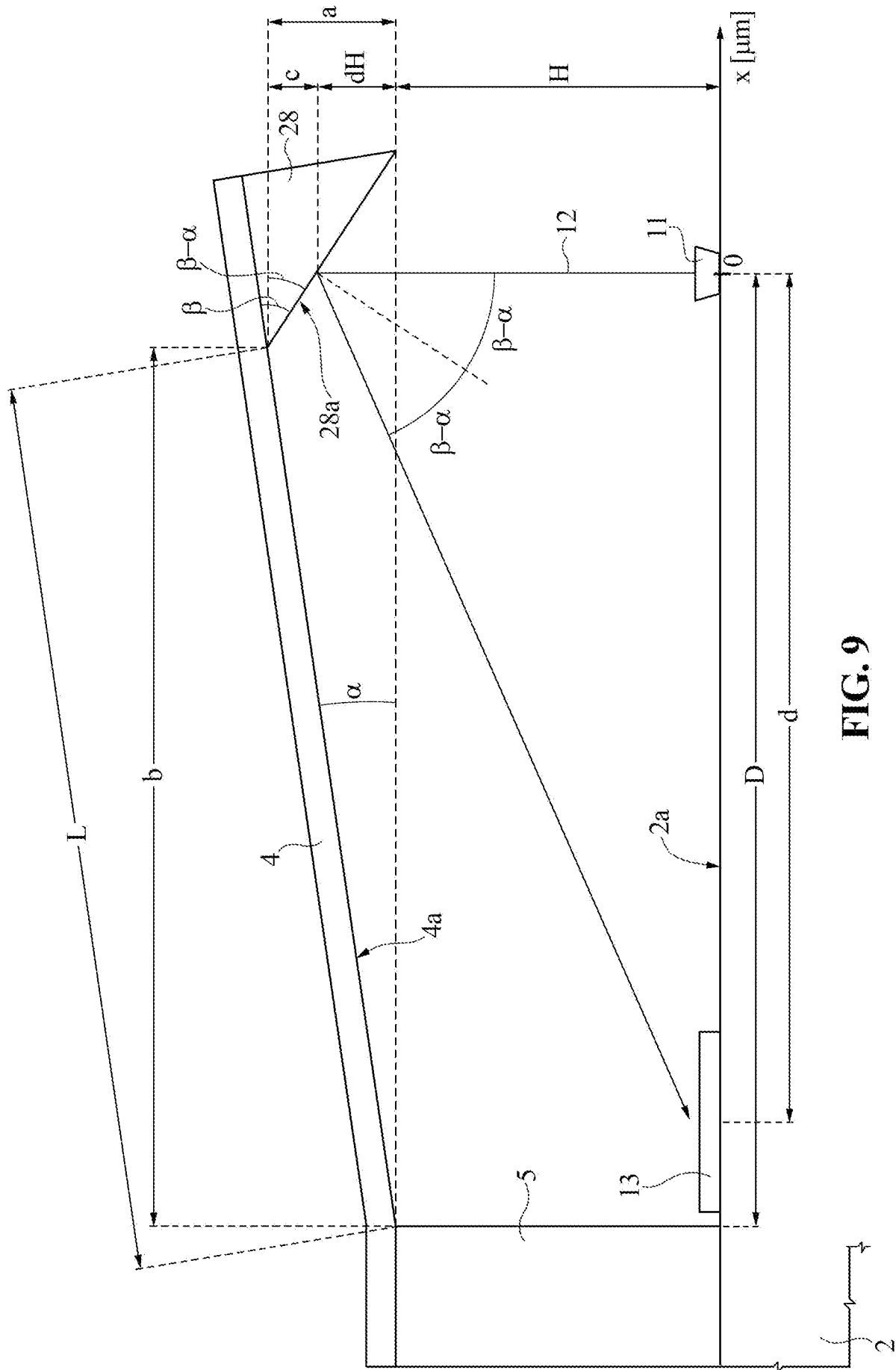


FIG. 9

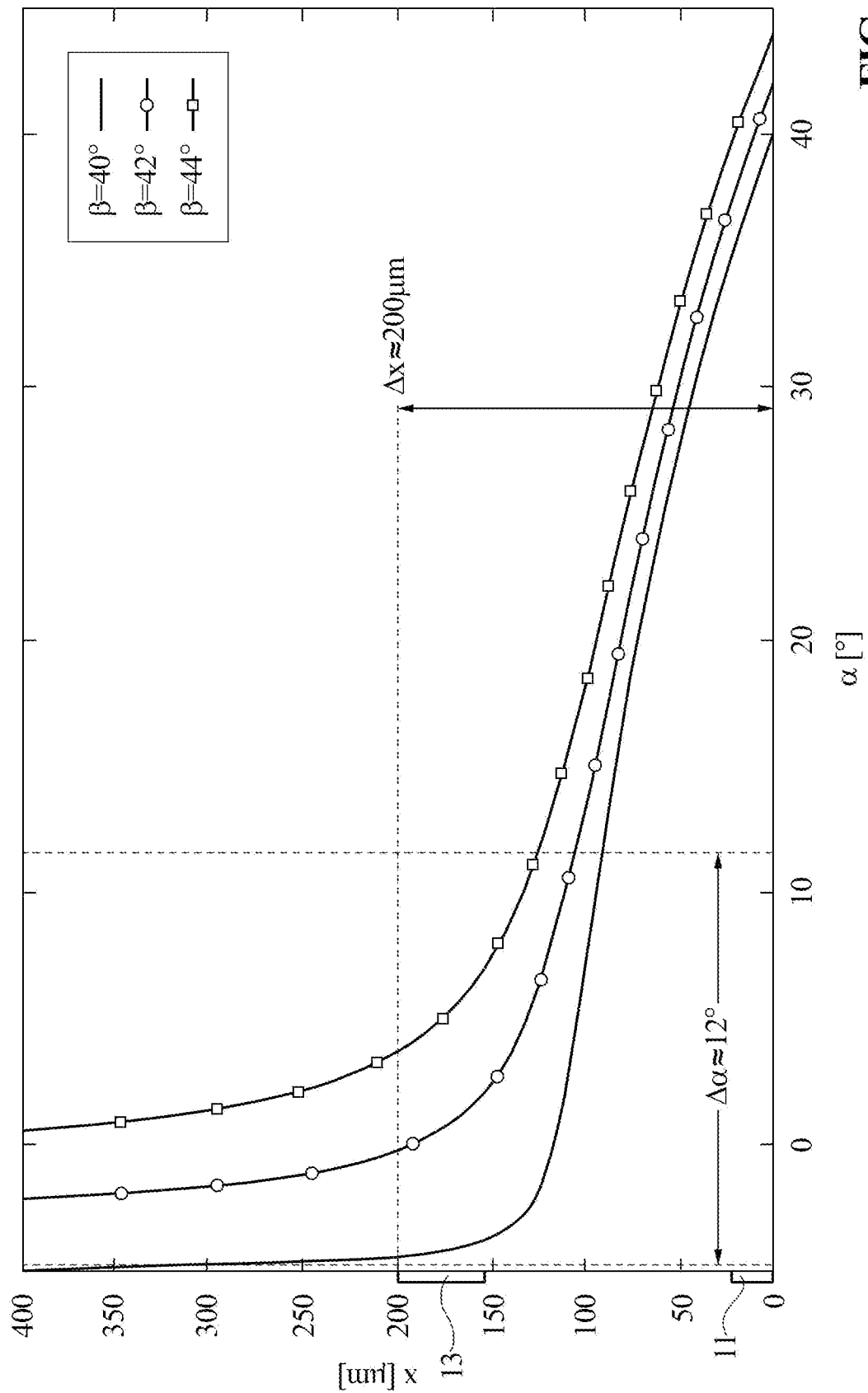


FIG. 10A

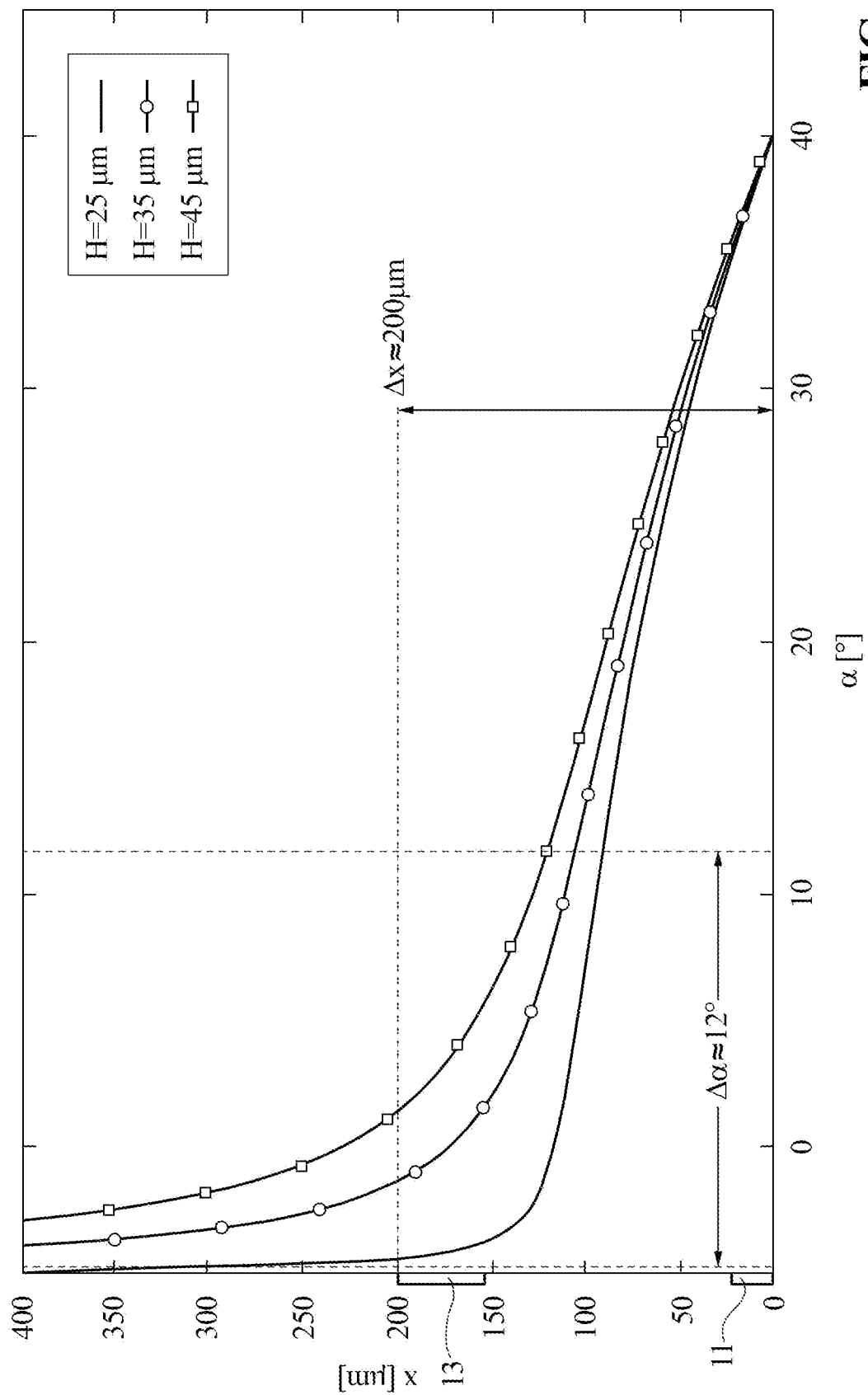


FIG. 10B

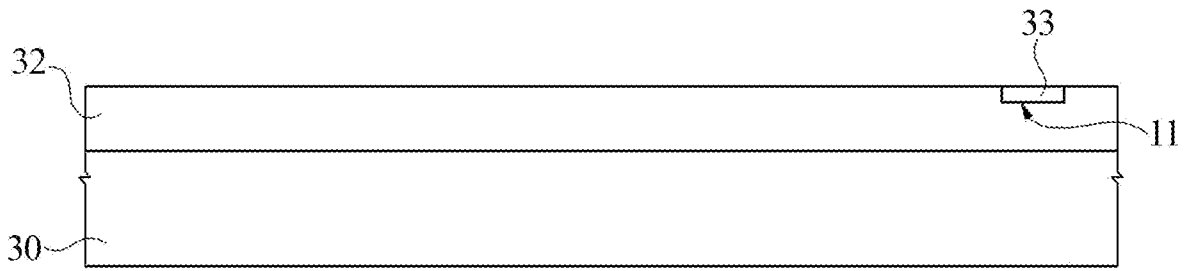


FIG. 11A

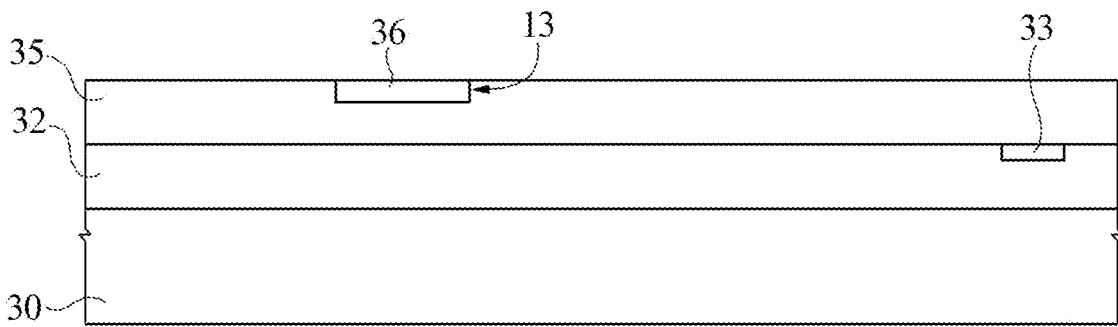


FIG. 11B

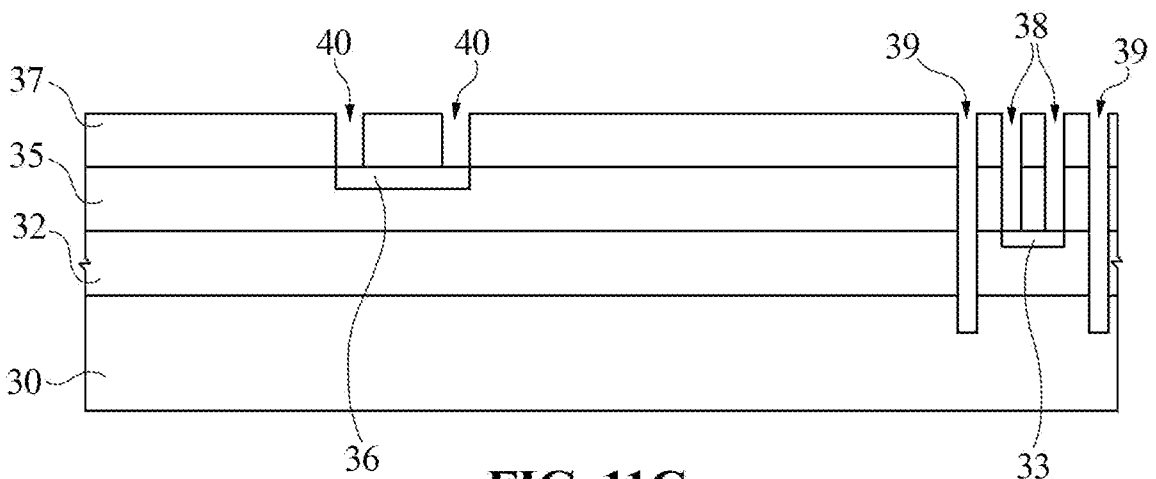


FIG. 11C

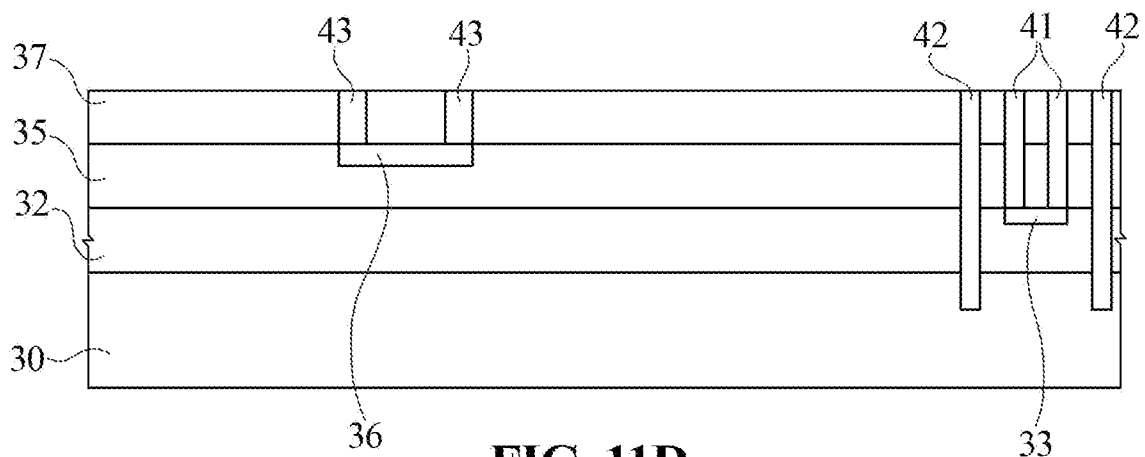


FIG. 11D

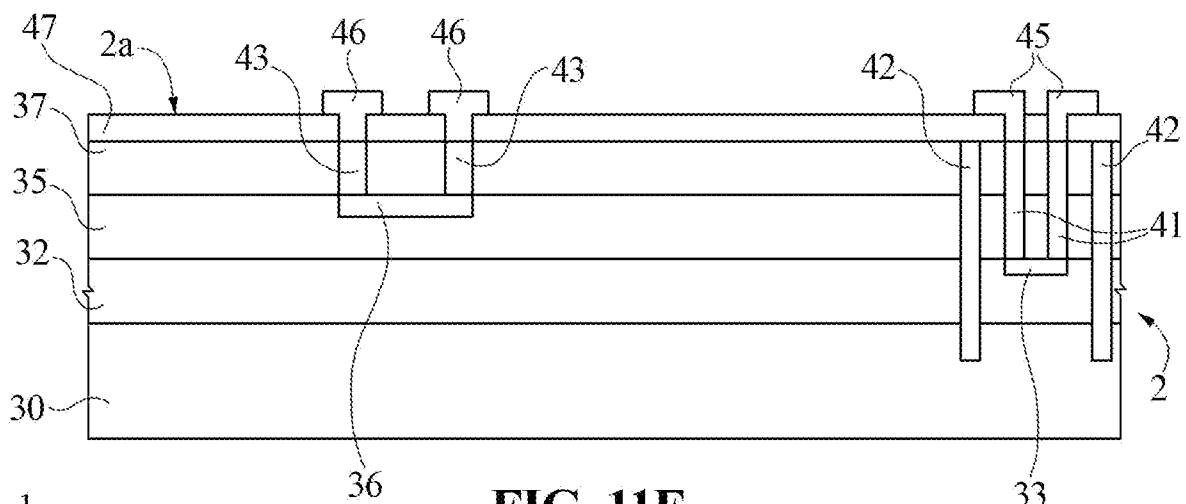


FIG. 11E

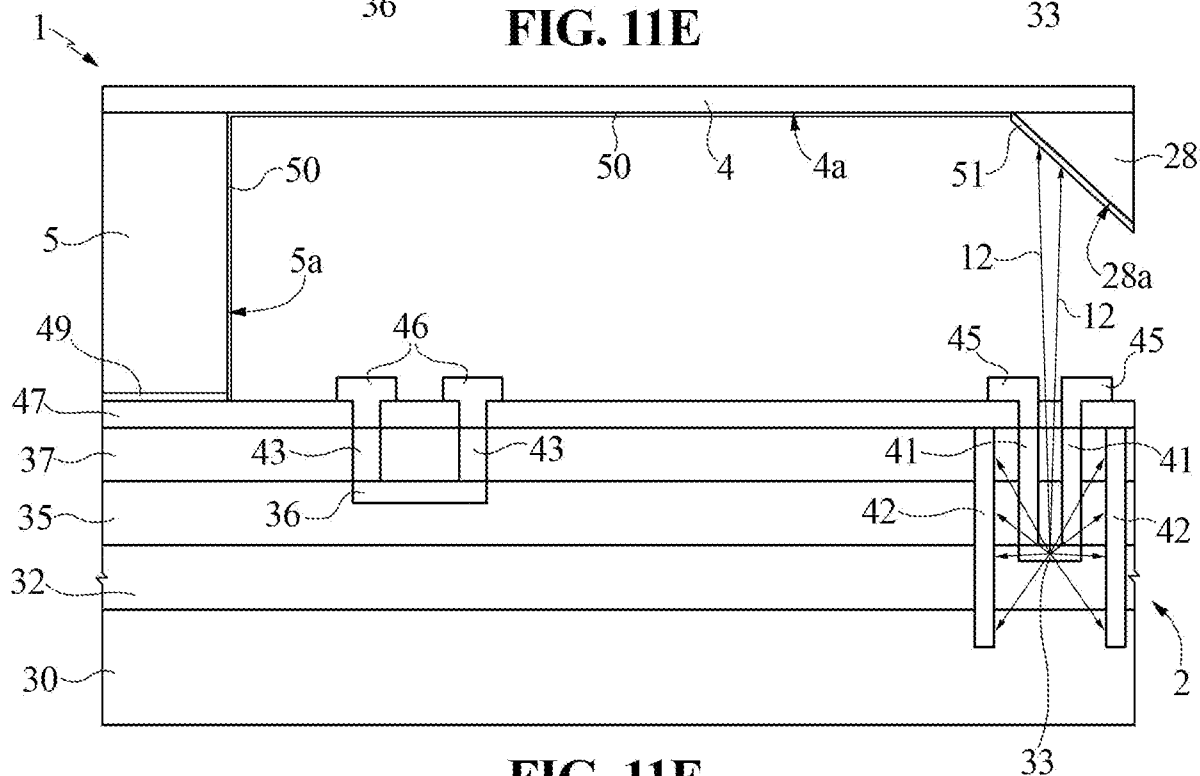


FIG. 11F

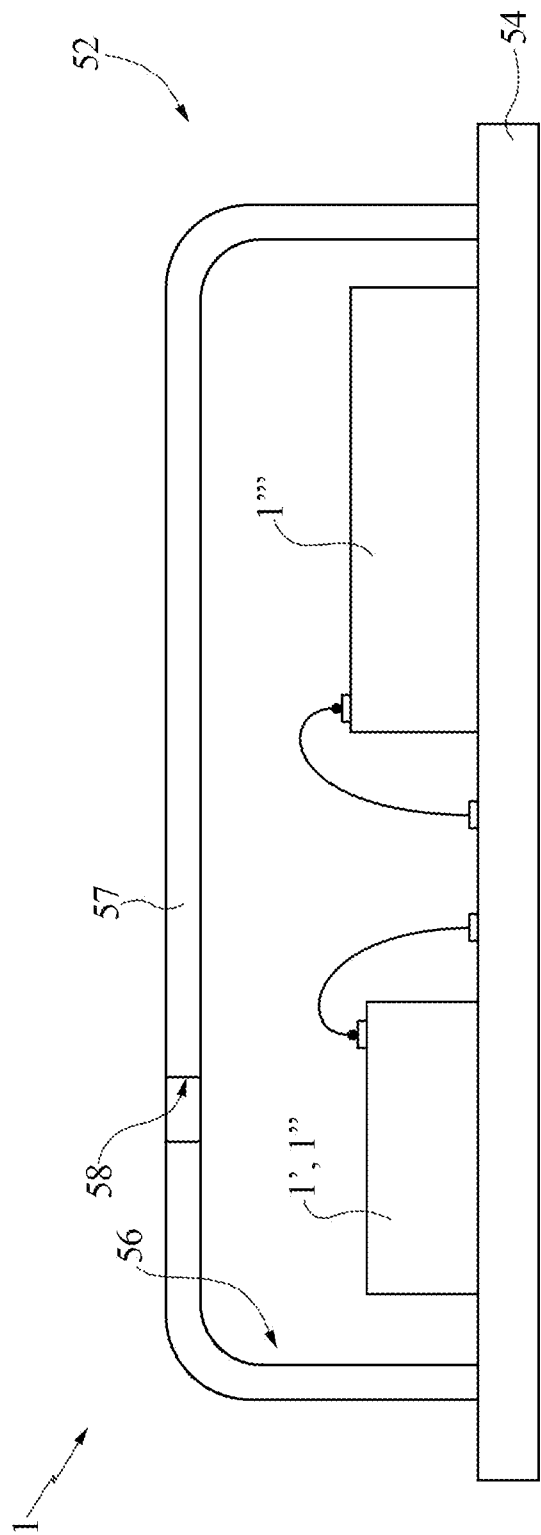


FIG. 12