

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902069891A1

Publication Date

20140118

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

FOTORIVELATORE CON CANALE MICROFLUIDICO INTEGRATO E
RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"FOTORIVELATORE CON CANALE MICROFLUIDICO INTEGRATO E
RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: RUSSO Alfio, VALVO Giuseppina

* * *

La presente invenzione si riferisce ad un fotorivelatore con canale microfluidico integrato, e al relativo procedimento di fabbricazione.

Come è noto, sono oggi disponibili numerosi dispositivi diagnostici, i quali trovano impiego, ad esempio, in campo biologico. Inoltre, nell'ambito dei dispositivi diagnostici, è noto l'impiego di fotorivelatori di tipo integrato, ciascuno dei quali include almeno un canale microfluidico otticamente accoppiato ad un fotodiodo.

A titolo esemplificativo, la domanda di brevetto italiano T02012A000501 depositata l'8 giugno 2012 a nome della Richiedente descrive un fotorivelatore comprendente un fotodiodo, il quale è formato da un corpo di materiale semiconduttore, ed una struttura ottica integrata, la quale

è disposta al di sopra del corpo semiconduttore. Inoltre, il fotorivelatore comprende un canale microfluidico disposto al di sopra della struttura ottica integrata; il canale microfluidico ospita almeno una regione di rilevamento ed è atto a ricevere una prima radiazione avente una prima lunghezza d'onda. La regione di rilevamento include almeno un recettore, il quale è in grado di legarsi ad una corrispondente molecola bersaglio, qualora quest'ultima sia presente all'interno del canale microfluidico; a sua volta, la molecola bersaglio può accoppiarsi ad un corrispondente marcatore che, quando eccitato dalla prima radiazione, emette una seconda radiazione avente una seconda lunghezza d'onda, tale seconda radiazione essendo rilevabile dal fotodiodo.

In pratica, la domanda di brevetto T02012A000501 descrive un cosiddetto dispositivo diagnostico a fluorescenza, il quale si caratterizza appunto per l'impiego di marcatori che, quando eccitati con una radiazione luminosa ad una certa lunghezza d'onda λ_e , emettono una propria radiazione luminosa ad una lunghezza d'onda λ_f maggiore della lunghezza d'onda λ_e . Pertanto, rilevando con il fotodiodo la radiazione luminosa alla lunghezza d'onda λ_f , è possibile desumere informazioni circa le caratteristiche chimico-fisiche del campione da analizzare, il quale viene fatto fluire all'interno del

canale microfluidico. Infatti, l'intensità luminosa rilevata dal fotodiode è funzione della quantità di marcatori attivati, tale quantità essendo funzione del numero di molecole bersaglio.

In particolare, la domanda di brevetto TO2012A000501 descrive l'impiego di un fotodiode operante in modalità Geiger ("Geiger-mode avalanche photodiode", GM-APD), anche noto come diode a valanga a singolo fotone ("Single Photon Avalanche Diode", SPAD), in quanto capace di rilevare fotoni singoli.

In generale, un fotodiode SPAD è formato da un fotodiode a valanga, dunque comprende una giunzione, tipicamente di tipo P+/N, oppure N+/P. La giunzione presenta una tensione di breakdown V_B ed è polarizzata, in uso, con una tensione di polarizzazione inversa V_A superiore in modulo alla tensione di breakdown V_B , tipicamente superiore del 10-20%. In tal modo, è sufficiente la generazione di una singola coppia elettrone-lacuna, in seguito all'assorbimento di un fotone incidente sul fotodiode SPAD, per innescare un processo di ionizzazione che causa una moltiplicazione a valanga dei portatori, con guadagni nell'intorno di 10^6 e conseguente generazione in tempi rapidi (centinaia di picosecondi) della corrente di valanga. La corrente di valanga può essere raccolta, tipicamente mediante una circuiteria

esterna collegata alla giunzione ed includente contatti di anodo e di catodo, e forma un segnale elettrico in uscita dal fotodiodo SPAD.

Il guadagno e la probabilità di rilevare un fotone, cioè la sensibilità del fotodiodo SPAD, sono direttamente proporzionali al valore di tensione di polarizzazione inversa V_A applicata al fotodiodo SPAD. Tuttavia, il fatto che la tensione di polarizzazione inversa V_A sia apprezzabilmente superiore alla tensione di breakdown V_B fa sì che il processo di ionizzazione a valanga, una volta innescato, si autosostenga. Pertanto, una volta innescato, il fotodiodo SPAD non è più in grado di rilevare fotoni, con la conseguenza che, in assenza di opportuni rimedi, il fotodiodo SPAD riesce a rilevare l'arrivo di un primo fotone, ma non l'arrivo di fotoni successivi. Per poter rilevare anche tali fotoni successivi, è necessario spegnere la corrente di valanga generata all'interno del fotodiodo SPAD, arrestando il processo di ionizzazione a valanga. In pratica, occorre abbassare, per un periodo di tempo noto come tempo di hold-off, la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione, tale tensione effettiva V_e essendo coincidente con la tensione di polarizzazione inversa V_A solo in assenza di fotoni, cioè in assenza di corrente all'interno del fotodiodo SPAD. In tal modo, si inibisce il processo di ionizzazione e si spegne la corrente di

valanga; successivamente, si ripristinano le condizioni iniziali di polarizzazione della giunzione, in modo che il fotodiodo SPAD sia nuovamente in grado di rilevare fotoni. Al fine di abbassare la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione successivamente all'assorbimento di un fotone, i fotodiodi SPAD adottano i cosiddetti circuiti di spegnimento ("quenching circuits"), siano essi di tipo attivo o passivo.

Indipendentemente dai dettagli implementativi del fotodiodo SPAD, e grazie all'impiego di quest'ultimo, il dispositivo diagnostico descritto nella domanda di brevetto TO2012A000501 si caratterizza per un'elevata sensibilità. Tuttavia, secondo la domanda di brevetto TO2012A000501, il canale microfluidico è formato al di sopra della regione di passivazione e dei contatti del fotodiodo; inoltre, tra il canale microfluidico ed il fotodiodo è presente un reticolo di Bragg, al fine di incrementare l'intensità del campo elettrico all'interno del canale microfluidico. Per tali motivi, l'accoppiamento ottico tra canale microfluidico e fotodiodo può non risultare ottimale, in particolare per alcune lunghezze d'onda.

Scopo della presente invenzione è fornire un fotorivelatore che consenta di risolvere almeno in parte gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo l'invenzione, vengono realizzati un

fotorivelatore ed un metodo di fabbricazione come definiti, rispettivamente, nelle rivendicazioni 1 e 13.

Per una migliore comprensione dell'invenzione, ne vengono ora descritte forme di realizzazione, a puro titolo di esempio non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- le figure 1 e 3 mostrano in modo schematico sezioni trasversali di forme di realizzazione del presente fotorivelatore;

- la figura 2 mostra schematicamente una sezione di una porzione di una forma di realizzazione del presente fotorivelatore;

- la figura 4 mostra in modo qualitativo una vista prospettica di porzioni di una forma di realizzazione del presente fotorivelatore;

- la figura 5 mostra uno schema a blocchi di un sistema diagnostico includente il presente fotorivelatore;

e

- la figure 6-11 mostrano schematicamente sezioni trasversali di una forma di realizzazione del presente fotorivelatore, durante fasi successive di un processo di fabbricazione.

La figura 1 mostra un fotorivelatore 1, il quale comprende un fotodiodo SPAD 2, al quale in seguito ci si riferisce, per brevità, come al fotodiodo 2.

In dettaglio, il fotodiodo 2 è integrato in una piastrina ("chip") 100 che include un substrato 3 di materiale semiconduttore, di tipo N++ e delimitato inferiormente da una superficie inferiore 2a. Inoltre, il fotodiodo 2 include uno strato epitassiale 6. Lo strato epitassiale 6 è di tipo N- e sovrasta, in contatto diretto, il substrato 3; inoltre, lo strato epitassiale 6 è delimitato superiormente da una superficie intermedia 6a.

Il substrato 3 e lo strato epitassiale 6 formano in pratica un corpo 10 di materiale semiconduttore, il quale ha un asse H che è perpendicolare alla superficie intermedia 6a ed alla superficie inferiore 2a. Inoltre, a titolo puramente esemplificativo, il livello di drogaggio del substrato 3 è maggiore di tre ordini di grandezza rispetto al livello di drogaggio dello strato epitassiale 6.

Una regione di anodo 12, di tipo P+, si affaccia alla superficie intermedia 6a e si estende all'interno dello strato epitassiale 6. In vista dall'alto, la regione di anodo 12 ha ad esempio forma circolare o poligonale (ad esempio, rettangolare).

Una regione arricchita 14, di tipo N+, si estende nello strato epitassiale 6, al di sotto della, ed in contatto diretto con, la regione di anodo 12. In vista dall'alto, la regione arricchita 14 presenta una forma

circolare o poligonale (ad esempio, rettangolare). Il livello di drogaggio della regione arricchita 14 è maggiore del livello di drogaggio dello strato epitassiale 6.

Ai fini pratici, la regione arricchita 14, lo strato epitassiale 6 ed il substrato 3 formano una regione di catodo; pertanto, la regione di anodo 12 e la regione arricchita 14 formano una giunzione PN, destinata a ricevere fotoni e a generare la corrente di valanga. La regione arricchita 14 e lo strato epitassiale 6 hanno inoltre lo scopo di confinare un elevato campo elettrico in prossimità della giunzione PN, riducendo la tensione di breakdown V_B della giunzione PN.

Un anello di guardia 16, di tipo P, si estende nello strato epitassiale 6; in particolare, l'anello di guardia 16 è affacciato alla superficie intermedia 6a ed è disposto all'esterno della, e contiguo alla, regione di anodo 12. L'anello di guardia 16 forma un diodo PN con lo strato epitassiale 6, in modo da prevenire il cosiddetto breakdown di bordo ("edge breakdown") della regione di anodo 12.

Il fotodiodo 2 comprende inoltre una regione di isolamento laterale 20, disposta esternamente all'anello di guardia 16. La regione di isolamento laterale 20 si estende a partire dalla superficie intermedia 6a, fino ad estendersi in parte all'interno del substrato 3.

La regione di isolamento laterale 20 comprende una

regione di channel stopper 22, la quale è disposta più esternamente, è formata di materiale dielettrico (ad esempio, ossido) ed è in contatto diretto con il substrato 3 e con lo strato epitassiale 6. Inoltre, la regione di isolamento laterale 20 comprende una regione metallica 24, la quale è circondata dalla regione di channel stopper 22.

Ai fini pratici, la regione di isolamento laterale 20 consente, attraverso la regione metallica 24, di isolare otticamente il fotodiode 2 da eventuali altri fotodiodi formati nella medesima piastrina 100. Inoltre, il channel stopper 22 garantisce l'isolamento elettrico del fotodiode 2 da tali eventuali altri fotodiodi.

Al di sopra della superficie intermedia 6a è disposta una struttura antiriflesso 30, formata da un primo e da un secondo strato antiriflesso 32, 34. In particolare, il primo strato antiriflesso 32 sovrasta la superficie intermedia 6a, mentre il secondo strato antiriflesso 34 sovrasta il primo strato antiriflesso 32. Il primo ed il secondo strato antiriflesso 32, 34 sono formati rispettivamente da un primo ed un secondo materiale dielettrico, i quali hanno rispettivamente indici di rifrazione n_1 e n_2 ; inoltre, il primo ed il secondo strato antiriflesso 32, 34 hanno spessori w_1 e w_2 , scelti in modo tale per cui la curva di riflettanza in funzione della lunghezza d'onda abbia un minimo in corrispondenza di λ_e ,

dove λ_e indica una lunghezza d'onda di eccitazione. Ad esempio, il primo ed il secondo materiale dielettrico possono essere rispettivamente biossido di silicio SiO_2 e nitruro di silicio Si_3N_4 .

Al di sopra della struttura ottica integrata 30, ed in particolare al di sopra del secondo strato antiriflesso 34, è disposto uno strato strutturale 40, formato ad esempio da tetraetilortosilicato (TEOS) e delimitato superiormente da una superficie superiore 40a. A titolo puramente esemplificativo, lo strato strutturale 40 può avere uno spessore, misurato lungo l'asse H, pari a circa $2\mu\text{m}$.

All'interno dello strato strutturale 40 è formato almeno un canale 42 atto a consentire il fluire di un fluido al suo interno. A titolo puramente esemplificativo, nella forma di realizzazione mostrata in figura 1 sono presenti tre canali 42.

Ciascun canale 42 si estende all'interno dello strato strutturale 40 a partire dalla superficie superiore 40a, con una profondità, misurata lungo l'asse H, compresa tra $1\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$, e con un'ampiezza, misurata lungo una direzione parallela alla superficie superiore 40a, compresa tra $0.2\mu\text{m}$ e $0.5\mu\text{m}$. Ciascun canale 42 ha dunque un rapporto di forma ("aspect ratio") compreso tra 4 e 5.

Le pareti laterali ed il fondo di ciascun canale 42 sono rivestite da un primo strato di rivestimento 44,

formato ad esempio di nitruro di silicio. Il primo strato di rivestimento 44 riveste anche porzioni della superficie superiore 40a interposte tra i canali 42.

In maggior dettaglio, considerato un singolo canale 42, il primo strato di rivestimento 44 forma, in corrispondenza di porzioni superiori delle pareti laterali del canale 42, una prima ed una seconda regione ispessita 45, 46, le quali occludono parzialmente la porzione superiore del canale 42, formando un'apertura superiore 48. La prima e la seconda regione ispessita 45, 46 rivestono appunto le porzioni superiori delle pareti laterali del canale 42, le quali sono adiacenti alla superficie superiore 40a, con cui sono in contatto diretto.

In maggior dettaglio, fatte salve le regioni ispessite, il primo strato di rivestimento 44 ha uno spessore all'incirca pari, ad esempio, a $0.05\mu\text{m}$.

Il fotorivelatore 1 comprende inoltre una regione sommitale 50, la quale si estende al di sopra dei canali 42, a contatto diretto con il primo strato di rivestimento 44; in particolare, la regione sommitale 50 chiude le aperture superiori 48.

Nella forma di realizzazione illustrata in figura 1, la regione sommitale 50 è formata da materiale metallico, quale ad esempio alluminio, oppure una lega di alluminio e rame.

Al di sopra della regione sommitale 50, e a contatto diretto con essa, si estende un secondo strato di rivestimento 52, formato ad esempio di TEOS. Il secondo strato di rivestimento 52 funge da strato isolante e si estende inoltre su porzioni della superficie superiore 40a che circondano la regione sommitale 50.

Il fotodiodo 2 comprende inoltre una piazzola ("pad") 54 di materiale metallico, la quale funge da elettrodo di anodo. La piazzola 54, alla quale ci si riferisce anche come alla metallizzazione di anodo, è disposta al di sopra della superficie superiore 40a ed è in contatto elettrico ohmico con l'anello di guardia 16, e dunque con la regione di anodo 12. Come mostrato in figura 1, la piazzola 54 è disposta lateralmente, e a distanza, dalla regione sommitale 50; inoltre, la piazzola 54 può essere in parte sovrapposta al secondo strato di rivestimento 52. A titolo puramente esemplificativo, il contatto elettrico tra la piazzola 54 e la regione di anodo 12 può essere ottenuto mediante realizzazione di connessioni conduttive (non mostrate) formate da strisce metalliche, le quali si estendono attraverso lo strato strutturale 40.

Il fotodiodo 2 comprende inoltre un elettrodo di catodo 26, il quale si estende al di sotto della superficie inferiore 2a del substrato 3. Gli elettrodi di anodo e di catodo 54, 26 consentono di polarizzare la giunzione PN con

una tensione di polarizzazione inversa V_A superiore, in modulo, alla tensione di breakdown V_B della giunzione PN stessa.

Il fotorivelatore 2 comprende inoltre una regione di passivazione 56, la quale si estende al di sopra del secondo strato di rivestimento 52, con il quale è a contatto diretto. La regione di passivazione 56 copre parzialmente la piazzola 54, in modo da consentire di connettere elettricamente la piazzola 54 a circuiti esterni.

In pratica, secondo la forma di realizzazione illustrata in figura 1, lo strato strutturale 40 separa la piazzola 54 dall'area attiva del fotodiodo 2, quest'ultima essendo definita dalla giunzione PN formata dalla regione di anodo 12 e dalla regione arricchita 14; inoltre, il secondo strato di rivestimento 52 isola elettricamente la regione sommitale 50 dalla piazzola 54. I canali 42 sono formati al di sotto della piazzola 54, e cioè al di sotto della metallizzazione di anodo, nonché al di sotto della regione di passivazione 56, in maniera tale per cui essi sono pienamente integrati con il fotodiodo 2.

Ciò premesso, ciascun canale 42 è accessibile ad un campione da analizzare di tipo fluido; a tal fine, in modo di per sé noto, il fotorivelatore 1 può comprendere, per ciascun canale 42, una prima ed una seconda apertura (non

mostrate). Inoltre, ancora in modo di per sé noto, all'interno di uno o più tra i canali 42 può essere formata almeno una regione di rilevamento 60 (figura 2), la quale può essere disposta, ad esempio, sulla porzione del primo strato di rivestimento 44 che riveste il fondo del canale 42.

Come mostrato a titolo puramente esemplificativo in figura 2, ciascuna regione di rilevamento 60 è formata, ad esempio, da una goccia 61 di materiale biologico, al cui interno sono presenti recettori 62, i quali sono ad esempio immobilizzati al primo strato di rivestimento 44.

Facendo entrare in contatto le regioni di rilevamento 60 con il campione da analizzare, possono stabilirsi legami tra i recettori 62 e molecole bersaglio MB presenti nel campione da analizzare che fluisce nel canale 42. E' quindi possibile fare in modo che marcatori 64 di tipo fluorescente (o fosforescente) si attivino, cioè si accoppino alle molecole bersaglio MB legatesi ai recettori 62, in maniera tale per cui tali marcatori 64 etichettano i recettori 62 stessi. A tal fine, e a titolo puramente esemplificativo, i marcatori 64 possono essere originariamente presenti in un fluido di marcatura, il quale viene fatto fluire nel canale 42 dopo aver fatto fluire nel canale 42 il campione da analizzare.

In modo di per sé noto, è quindi possibile illuminare

i marcatori attivati con radiazione elettromagnetica di eccitazione alla lunghezza d'onda λ_e , in modo che emettano per fluorescenza (o fosforescenza) radiazione luminosa ad una lunghezza d'onda di fluorescenza λ_f , la quale viene rilevata dal fotodiodo 2, che genera in risposta un segnale elettrico. Tale segnale elettrico è indicativo della quantità di molecole bersaglio MB presenti nel campione da analizzare.

In maggior dettaglio, la radiazione elettromagnetica di eccitazione può essere fatta penetrare all'interno dei canali 42 in modo di per sé noto, ad esempio mediante realizzazione di aperture. Inoltre, dal momento che la regione sommitale 50 è di materiale metallico, essa riflette in direzione del fotodiodo 2 la radiazione luminosa alla lunghezza d'onda di fluorescenza λ_f generata all'interno dei canali 42. In tale forma di realizzazione, la radiazione elettromagnetica di eccitazione può quindi propagarsi all'interno dei canali 42 in modo guidato.

Secondo una differente forma di realizzazione, mostrata in figura 3, la regione sommitale, qui indicata con 70, è formata di materiale dielettrico, quale ad esempio TEOS. In tal caso, il secondo strato di rivestimento 52 è assente, e dunque la piazzola 54 è disposta a contatto con la superficie superiore 40a.

La forma di realizzazione mostrata in figura 3 è

particolarmente adatta al caso in cui si vogliono illuminare i canali 42 mediante impiego di una sorgente luminosa (non mostrata) disposta al di sopra dei canali stessi e atta a generare radiazione elettromagnetica di eccitazione ad una lunghezza d'onda alla quale la regione sommitale 70 è sostanzialmente trasparente.

Come mostrato in figura 4, il fotodiodo 2 può appartenere ad una schiera 220 di fotodiodi 2, formata nella piastrina 100. La schiera 220 può comprendere un qualsiasi numero di fotodiodi, a seconda delle necessità.

In pratica, nella piastrina 100 è formata una matrice bidimensionale di fotodiodi di tipo SPAD, cresciuti su di un medesimo substrato. Tale matrice bidimensionale definisce un cosiddetto fotomoltiplicatore di silicio ("Silicon PhotoMultiplier", SiPM). Le metallizzazioni di anodo e gli elettrodi di catodo dei fotodiodi SPAD sono collegati in modo da poter essere connessi tutti ad un unico generatore di tensione. In particolare, le piazzole 54 (non mostrate in figura 4) sono elettricamente connesse ad una metallizzazione di fotomoltiplicatore 88, mostrata schematicamente in figura 4 ed avente sostanzialmente la forma di una griglia.

A titolo puramente esemplificativo, in figura 4 è altresì mostrato, sempre in modo qualitativo, un canale (indicato con 90), il quale è condiviso dai fotodiodi del

fotomoltiplicatore, cioè sovrasta le aree attive di tali fotodiodi. Per motivi di chiarezza, in figura 4 i dettagli dei fotodiodi non sono mostrati, bensì sono mostrate qualitativamente le corrispondenti regioni sommitali 50.

Nella forma di realizzazione mostrata in figura 4, il canale 90 ha forma, in vista dall'alto, di una serpentina; inoltre, il canale 90 presenta un ingresso 92 ed un'uscita 94, per consentire l'ingresso e l'uscita del campione da analizzare.

I fotodiodi 2 del fotomoltiplicatore SiPM possono dunque essere polarizzati ad una medesima tensione di polarizzazione inversa V_A ; inoltre, le correnti a valanga generate all'interno dei fotodiodi 2 sono multiplate insieme, in modo da generare un segnale di uscita del fotomoltiplicatore SiPM pari alla sommatoria dei segnali di uscita dei fotodiodi 2. Il fotomoltiplicatore SiPM è dunque un dispositivo a larga area e alto guadagno, capace di fornire, in media, un segnale elettrico di uscita (corrente) proporzionale al numero di fotoni che incidono sul fotomoltiplicatore SiPM. Infatti, ciascun fotodiodo 2 del fotomoltiplicatore SiPM si comporta come un contatore binario indipendente, ed il segnale di uscita del fotomoltiplicatore SiPM risulta proporzionale al numero di fotodiodi 2 in cui si è innescato il processo di ionizzazione a valanga (rilevamento di un fotone), tale

numero essendo a sua volta proporzionale al numero di fotoni incidenti.

Il fotorivelatore 1 può essere utilizzato in un generico sistema diagnostico 500 mostrato in figura 5, in cui una sorgente ottica 505 illumina il fotorivelatore 1 ed è controllata da un'unità a microcontrollore 510, la quale è inoltre collegata al fotorivelatore 1. L'unità a microcontrollore 510 elabora il segnale di uscita del fotorivelatore 1 e fornisce un segnale elaborato ad un elaboratore 520, il quale consente di analizzare tale segnale elaborato e di visualizzare le informazioni associate a tale segnale elaborato su uno schermo 530.

Facendo riferimento, a titolo puramente esemplificativo, alla forma di realizzazione mostrata in figura 1, il presente fotorivelatore può essere realizzato mediante il processo di fabbricazione mostrato nelle figure 6-11.

In dettaglio, si predispone (figura 6) il corpo 2 di materiale semiconduttore, al cui interno sono formate, in modo di per sé noto, la regione di anodo 12, la regione arricchita 14, l'anello di guardia 16, la regione metallica 24 e la regione di channel stopper 22. Inoltre, al di sopra del corpo 2 sono formati, in modo di per sé noto, il primo ed il secondo strato antiriflesso 32, 34 e lo strato strutturale 40.

In seguito (figura 7), si effettua un primo processo di fotolitografia per rimuovere selettivamente porzioni dello strato strutturale 40, in modo da formare un numero di trincee 102 pari al numero di canali 42. Il primo processo di fotolitografia avviene mediante impiego di una prima maschera di resist. Successivamente, si deposita il primo strato di rivestimento 44 al di sopra della superficie superiore 40a, in modo che rivesta le pareti laterali ed i fondi delle trincee 102 e formi le prime e le seconde regioni ispessite 45, 46. Al termine di tali operazioni, le trincee 102 sono aperte; in particolare, ciascuna trincea è accessibile mediante la corrispondente apertura superiore 48.

Successivamente (figura 8), viene formato uno strato sommitale 104, mediante un primo processo di polverizzazione ("sputtering") di materiale metallico al di sopra del primo strato di rivestimento 44; tale primo processo di sputtering avviene ad una prima temperatura, ad esempio compresa tra 200°C e 250°C. Il primo processo di sputtering è tale per cui lo strato sommitale 104 sovrasta il primo strato di rivestimento 44, occludendo le aperture superiori 48, senza penetrare all'interno delle trincee 102; vengono così formati i canali 42, di tipo chiuso. In altre parole, lo strato sommitale 104 è di tipo cosiddetto non conforme, poiché non segue fedelmente il profilo dello

strato al di sopra del quale viene formato (nella fattispecie, il primo strato di rivestimento 44).

In seguito (figura 9), si esegue un secondo processo di fotolitografia, mediante impiego di una seconda maschera di resist. Mediante il secondo processo di fotolitografia sono selettivamente rimosse porzioni dello strato sommitale 104 disposte lateralmente rispetto ai canali 42, nonché le porzioni del primo strato di rivestimento 44 ad esse sottostanti. La porzione rimanente dello strato sommitale 104 forma così la regione sommitale 50.

Successivamente (figura 10), viene depositato il secondo strato di rivestimento 52, al di sopra della regione sommitale 50 e delle porzioni esposte della superficie superiore 40a.

In seguito (figura 11), viene effettuato un secondo processo di sputtering di materiale metallico, al di sopra del secondo strato di rivestimento 52, al fine di formare, in modo di per sé noto, la piazzola 54. A titolo puramente esemplificativo, tale secondo processo di sputtering può avvenire ad una temperatura compresa tra 425°C e 475°C.

In modo non mostrato, viene quindi formata la regione di passivazione 56. Successivamente, in modo di per sé noto, sono formate, mediante rimozione selettiva di porzioni della regione di passivazione 56 e del primo e del secondo strato di rivestimento 44, 52, gli ingressi e le

uscite dei canali 42.

In pratica, le operazioni descritte con riferimento alle figure 6-10 sono effettuate dopo la cosiddetta planarizzazione del wafer formante la piastrina 100, e prima della realizzazione dei contatti. In tal modo, tali operazioni non comportano alcuna degradazione del corpo 10 di materiale semiconduttore, e quindi del fotodiodo 2.

I vantaggi che il presente fotorivelatore consente di ottenere emergono chiaramente dalla discussione precedente. In particolare, il presente fotorivelatore si caratterizza per l'integrazione di uno o più canali utili a finalità diagnostiche in un fotodiodo SPAD, o in un fotomoltiplicatore SiPM; inoltre, per i motivi precedentemente descritti, questa integrazione non comporta alcun incremento del rumore di buio del fotodiodo SPAD/fotomoltiplicatore SiPM. Infatti, a differenza di quanto avviene nell'arte nota, i canali sono fabbricati durante il cosiddetto processo di "front-end", ossia prima della fabbricazione delle metallizzazioni.

Risulta infine evidente che al fotorivelatore ed al metodo di fabbricazione descritti possono essere apportate modifiche e varianti, senza uscire dall'ambito della presente invenzione.

Ad esempio, i tipi di drogaggio possono essere invertiti rispetto a quanto descritto e mostrato. Inoltre,

i meccanismi di accoppiamento dei recettori, delle molecole bersaglio e dei marcatori possono essere differenti rispetto a quanto descritto. Ad esempio, in modo di per sé noto, i marcatori possono essere già presenti nel campione da analizzare, nel qual caso essi sono già legati alle molecole bersaglio, le quali si legano successivamente ai recettori. In generale, comunque, ci si riferisce ai marcatori attivati per riferirsi ai marcatori accoppiati ai recettori mediante accoppiamento alle molecole bersaglio, indipendentemente dai dettagli implementativi che hanno condotto all'accoppiamento.

RIVENDICAZIONI

1. Fotorivelatore includente:

- un fotodiodo (2) comprendente un corpo (10) di materiale semiconduttore delimitato da una prima superficie (6a), detto corpo formando una prima regione di elettrodo (12);

- una regione dielettrica (40), disposta al di sopra della prima superficie e delimitata da una seconda superficie (40a);

- almeno un canale (42) estendentesi all'interno della regione dielettrica, a partire da detta seconda superficie; e

- una prima metallizzazione (54), la quale è disposta al di sopra della seconda superficie ed è in contatto elettrico con detta prima regione di elettrodo.

2. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre una regione di chiusura (50;70) disposta al di sopra di detto almeno un canale (42), detta regione di chiusura chiudendo superiormente detto almeno un canale.

3. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 2, comprendente inoltre un primo strato di rivestimento (44) di materiale dielettrico, il quale riveste le pareti laterali di detto almeno un canale (42) e forma una prima ed una seconda regione ispessita (45,46) che rivestono

porzioni delle pareti laterali adiacenti alla seconda superficie (40a), delimitando un'apertura di canale (48).

4. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 3, in cui la regione di chiusura (50;70) sovrasta il primo strato di rivestimento (44) ed è disposta in modo da chiudere detta apertura di canale (48).

5. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 4, in cui la regione di chiusura (50) è formata da materiale metallico, detto fotorivelatore comprendendo inoltre un secondo strato di rivestimento (52) di materiale dielettrico, disposto al di sopra della regione di chiusura e atto ad isolare elettricamente la regione di chiusura dalla prima metallizzazione (54).

6. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 4, in cui la regione di chiusura (70) è formata da materiale dielettrico.

7. Fotorivelatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 6, comprendente inoltre una regione di passivazione (56), disposta al di sopra della regione di chiusura (50;70) e della prima metallizzazione (54).

8. Fotorivelatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto fotodiodo (2) è un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger.

9. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 8, in cui la prima regione di elettrodo (12) è affacciata alla prima

superficie (6a) ed è di un primo tipo di conducibilità, ed il corpo (10) forma inoltre una seconda regione di elettrodo (3,6,14) di un secondo tipo di conducibilità, disposta al di sotto della prima regione di elettrodo; ed in cui la prima e la seconda regione di elettrodo formano una giunzione avente una tensione di rottura (V_B), detta giunzione essendo atta ad essere polarizzata ad una tensione di polarizzazione inversa superiore, in modulo, alla tensione di rottura.

10. Fotorivelatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, includente una piastrina (100), detto primo fotodiodo (2) essendo formato all'interno della piastrina (100), detto fotorivelatore comprendendo inoltre un secondo fotodiodo (2), formato nella piastrina ed includente una terza regione di elettrodo (12), detto almeno un canale (90) essendo sovrapposto sia alla prima che alla terza regione di elettrodo.

11. Fotorivelatore secondo la rivendicazione 10, comprendente inoltre una seconda metallizzazione (54), detta seconda metallizzazione essendo elettricamente collegata a detta terza regione di elettrodo (12), dette prima e seconda metallizzazione essendo collegate ohmicamente da una connessione conduttiva (88).

12. Sistema diagnostico comprendente un fotorivelatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti ed

una sorgente luminosa (505) otticamente accoppiata a detto almeno un canale (42), detto sistema diagnostico comprendendo inoltre un'unità di elaborazione (510,520) accoppiata elettricamente a detto fotorivelatore.

13. Procedimento di fabbricazione di un fotorivelatore, comprendente le fasi di:

- formare un corpo (10) di materiale semiconduttore delimitato da una prima superficie (6a) e formante una regione di elettrodo (12);

- formare una regione dielettrica (40) al di sopra della prima superficie, detta regione dielettrica essendo delimitata da una seconda superficie (40a);

- formare almeno un canale (42) all'interno della regione dielettrica, a partire da detta seconda superficie;
e

- formare una metallizzazione (54) al di sopra della seconda superficie, in modo che detta metallizzazione sia in contatto elettrico con la regione di elettrodo.

14. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 13, comprendente inoltre la fase di formare una regione di chiusura (50;70) al di sopra di detto almeno un canale (42), in modo che chiuda superiormente detto almeno un canale.

15. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 14, in cui la fase di formare almeno un

canale (42) comprende scavare una trincea (102) nella regione dielettrica (40) e rivestire le pareti laterali della trincea con un primo strato di rivestimento (44) di materiale dielettrico, in modo che il primo strato di rivestimento formi una prima ed una seconda regione ispessita (45,46) che rivestono porzioni delle pareti laterali adiacenti alla seconda superficie (40a), delimitando un'apertura di canale (48).

16. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 15, in cui detta fase di formare una regione di chiusura (50;70) comprende effettuare una deposizione non conforme al di sopra del primo strato di rivestimento (44), in modo che la regione di chiusura chiuda l'apertura di canale (48).

17. Procedimento secondo la rivendicazione 16, in cui detta regione di chiusura (50) è di materiale metallico, e comprendente inoltre la fase di formare un secondo strato di rivestimento (52) di materiale dielettrico al di sopra della regione di chiusura, prima di effettuare la fase di formare una metallizzazione (54).

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

Elena CERBARO

CLAIMS

1. A photodetector including:
- a photodiode (2) comprising a body (10) of semiconductor material delimited by a first surface (6a), said body forming a first electrode region (12);
 - a dielectric region (40), arranged on top of the first surface and delimited by a second surface (40a);
 - at least one channel (42) extending within the dielectric region, starting from said second surface; and
 - a first metallization (54), which is arranged on top of the second surface and is in electrical contact with said first electrode region.
2. The photodetector according to claim 1, further comprising a closing region (50;70) arranged on top of said at least one channel (42), said closing region closing said at least one channel at the top.
3. The photodetector according to claim 2, further comprising a first coating layer (44) of dielectric material, which coats the side walls of said at least one channel (42) and forms a first thickened region (45) and a second thickened region (46) that coat portions of the side walls adjacent to the second surface (40a), thereby delimiting a channel opening (48).
4. The photodetector according to claim 3, wherein the closing region (50;70) overlies the first coating layer (44) and is arranged so as to close said channel opening (48).
5. The photodetector according to claim 4, wherein the closing region (50) is made of metal material, said photodetector further comprising a second coating layer (52) of dielectric material, arranged on top of the closing region and designed to electrically insulate the closing region from the first

metallization (54).

6. The photodetector according to claim 4, wherein the closing region (70) is made of dielectric material.

5

7. The photodetector according to any one of claims 2 to 6, further comprising a passivation region (56) arranged on top of the closing region (50;70) and of the first metallization (54).

10

8. The photodetector according to any one of the preceding claims, wherein said photodiode (2) is a Geiger-mode avalanche photodiode.

15

9. The photodetector according to claim 8, wherein the first electrode region (12) faces the first surface (6a) and has a first type of conductivity, and the body (10) moreover forms a second electrode region (3,6,14) of a second type of conductivity, arranged underneath the first electrode region; and wherein the first and second electrode regions form a junction having a breakdown voltage (V_B), said junction being designed to be biased at a reverse-biasing voltage higher, in modulus, than the breakdown voltage.

20

25

10. The photodetector according to any one of the preceding claims, including a die (100), said first photodiode (2) being formed within the die (100), said photodetector further comprising a second photodiode (2), formed in the die and including a third electrode region (12), said at least one channel (90) being arranged on top of both the first electrode region and the third electrode region.

30

35

11. The photodetector according to claim 10, further comprising a second metallization (54), said second metallization being electrically connected to said third

electrode region (12), said first and second metallizations being ohmically connected by a conductive connection (88).

12. A diagnostic system comprising a photodetector according to any one of the preceding claims and a light source (505) optically coupled to said at least one channel (42), said diagnostic system further comprising a processing unit (510, 520) electrically coupled to said photodetector.

13. A process for manufacturing a photodetector, comprising the steps of:

- forming a body (10) of semiconductor material, which is delimited by a first surface (6a) and forms an electrode region (12);
- forming a dielectric region (40) on top of the first surface, said dielectric region being delimited by a second surface (40a);
- forming at least one channel (42) within the dielectric region, starting from said second surface; and
- forming a metallization (54) on top of the second surface so that said metallization is in electrical contact with the electrode region.

14. The manufacturing process according to claim 13, further comprising the step of forming a closing region (50;70) on top of said at least one channel (42), so that it closes said at least one channel at the top.

15. The manufacturing process according to claim 14, wherein the step of forming at least one channel (42) comprises digging a trench (102) in the dielectric region (40) and coating the side walls of the trench with a first coating layer (44) of dielectric material so that the first coating layer forms a first thickened region (45) and a second thickened region (46) that coat portions of the side walls

adjacent to the second surface (40a), thereby delimiting a channel opening (48).

5 16. The manufacturing process according to claim 15, wherein said step of forming a closing region (50;70) comprises carrying out a non-conformable deposition on top of the first coating layer (44) so that the closing region closes the channel opening (48).

10 17. The process according to claim 16, wherein said closing region (50) is made of metal material, and further comprising the step of forming a second coating layer (52) of dielectric material on top of the closing region before carrying out the step of forming a metallization (54).

15

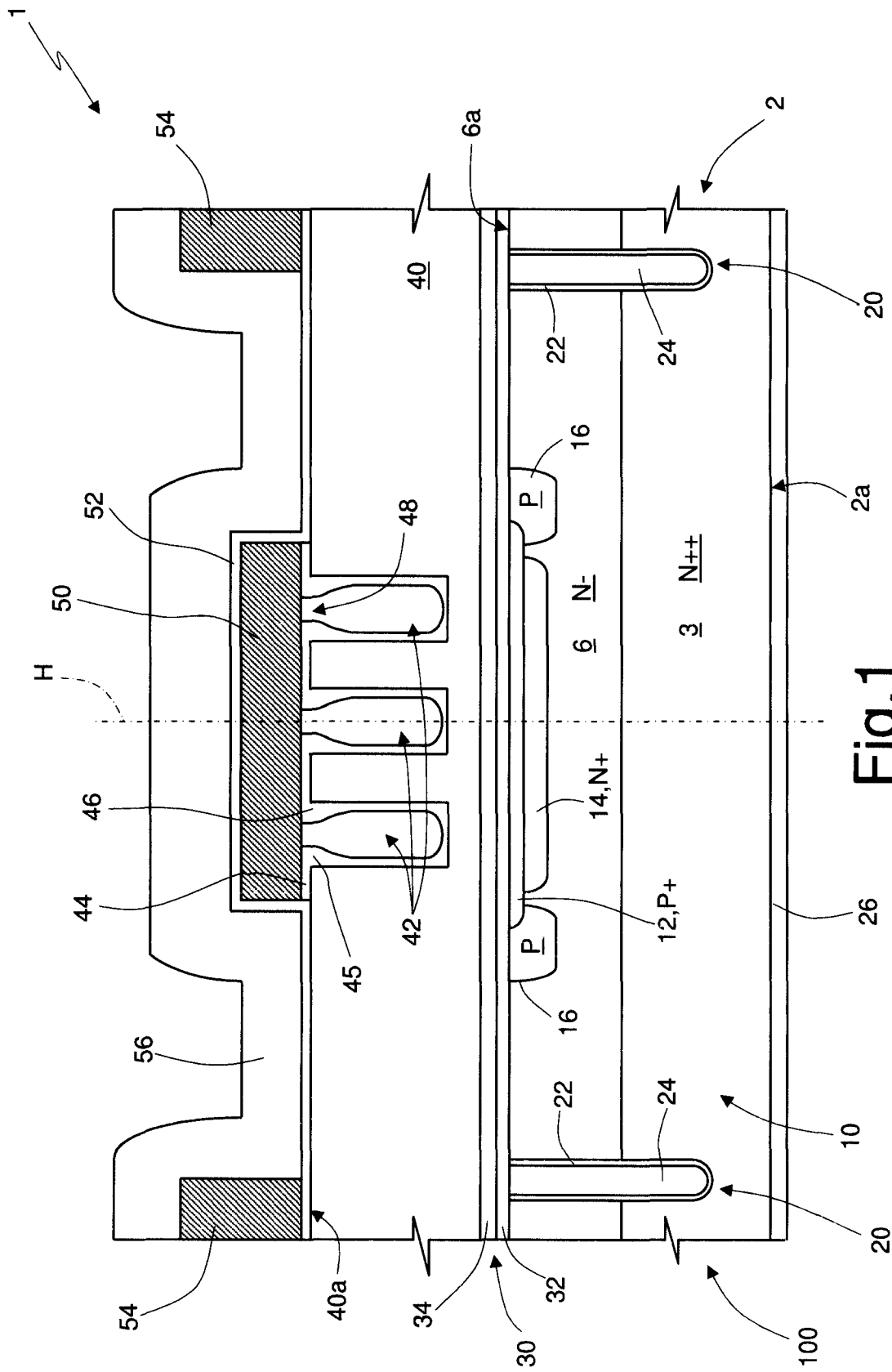


Fig. 1

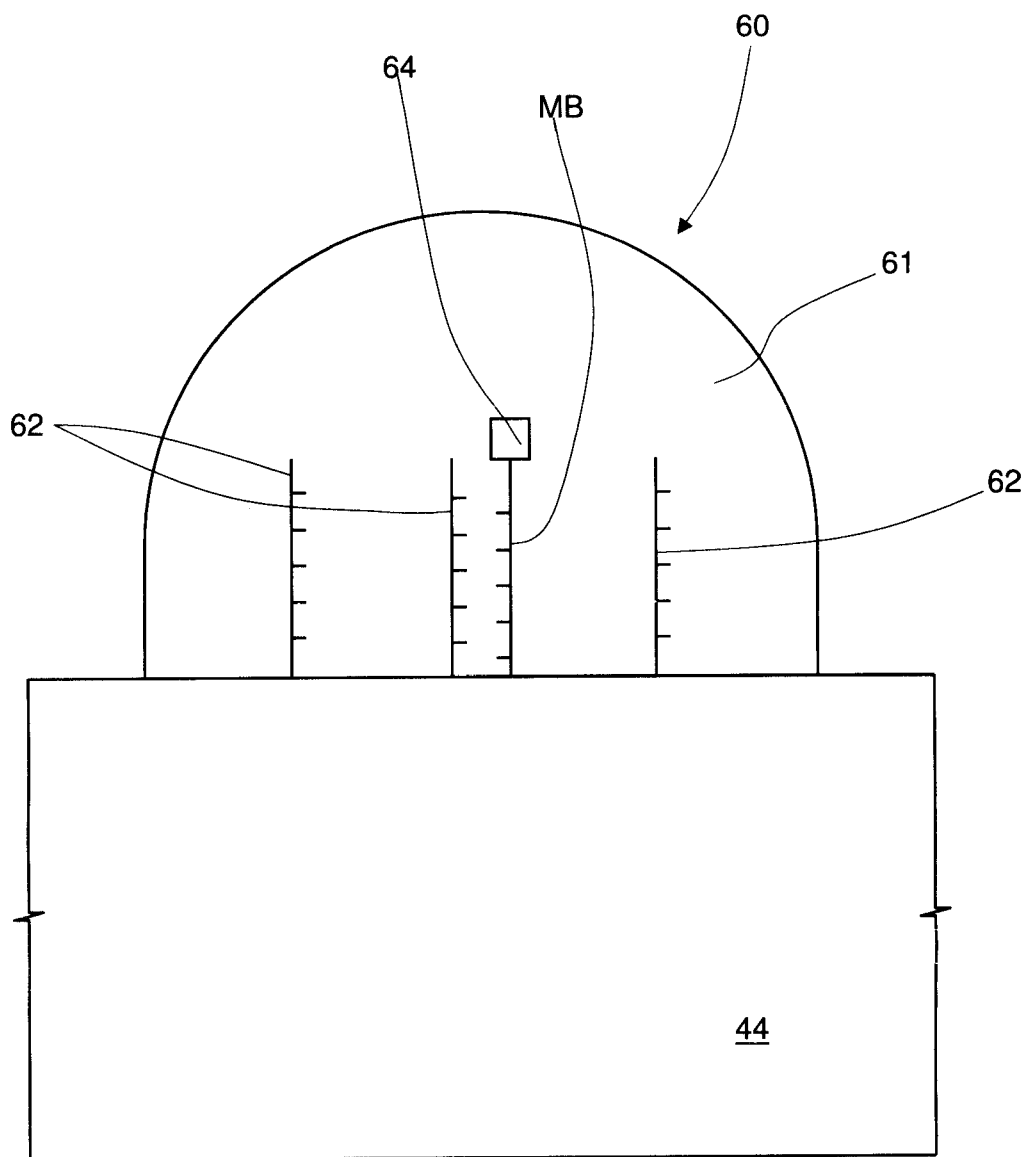


Fig.2

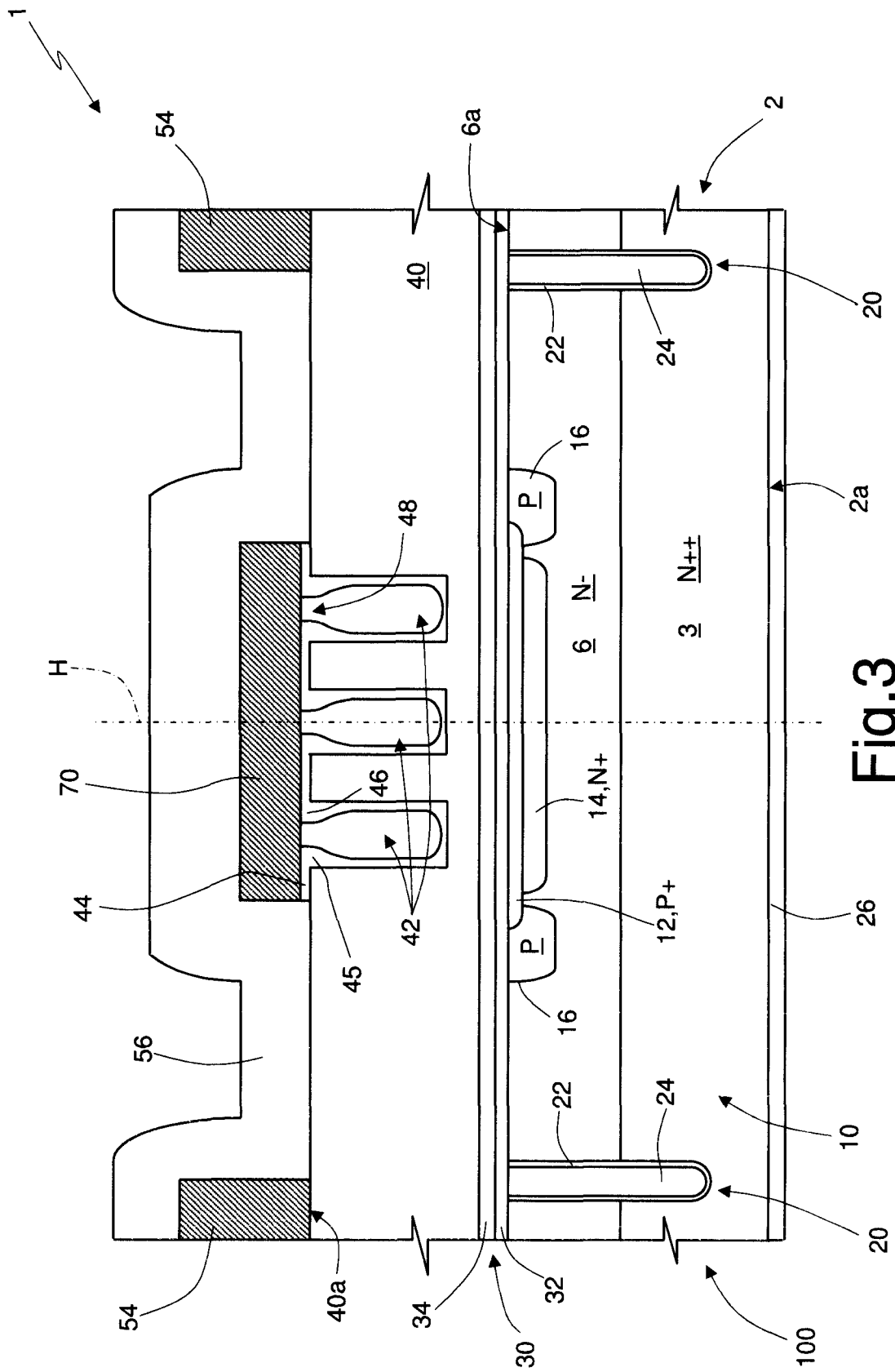


Fig. 3

Elena CERBARO
 (Iscrizione Albo nr. 426/BM)

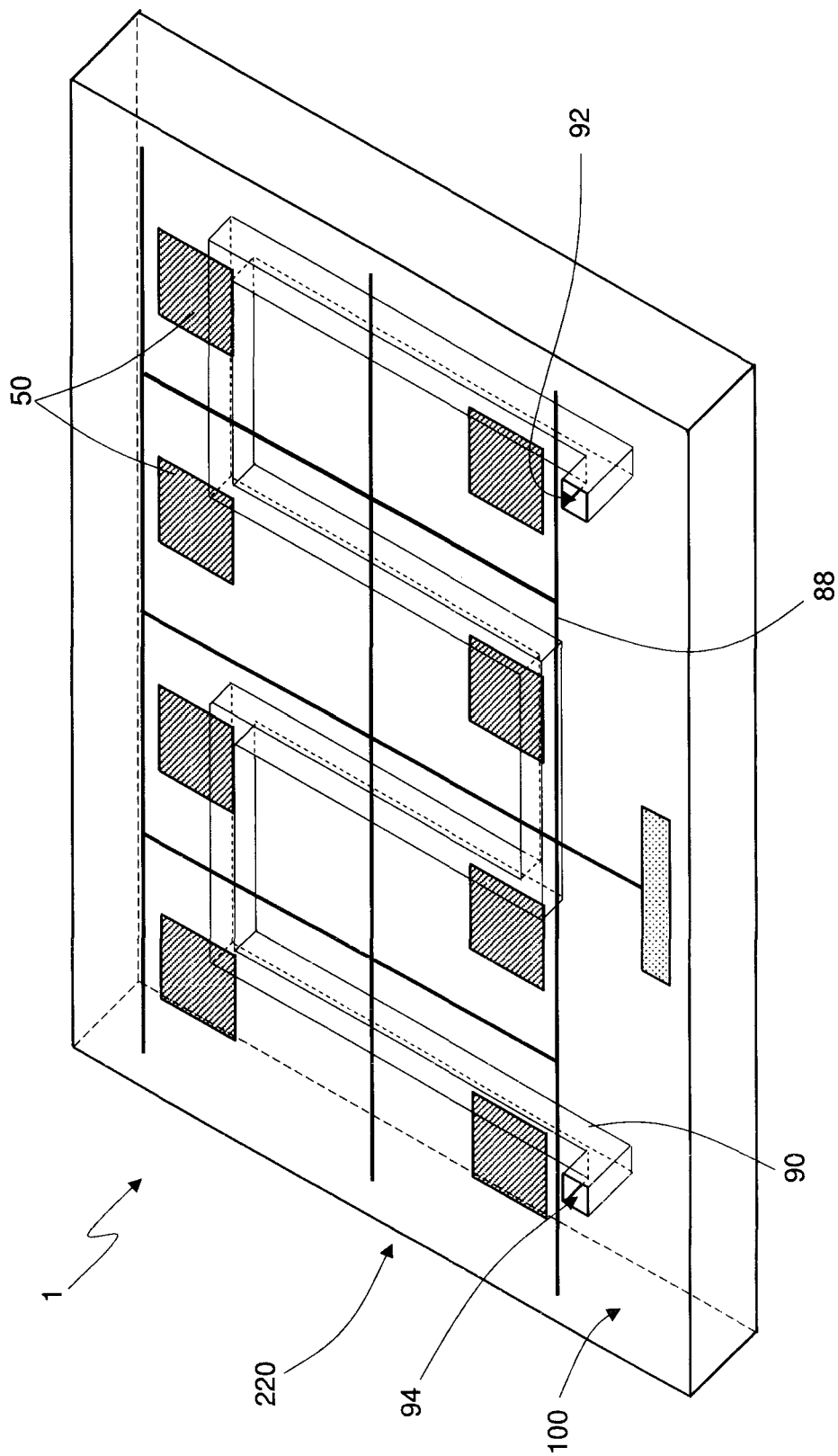


Fig.4

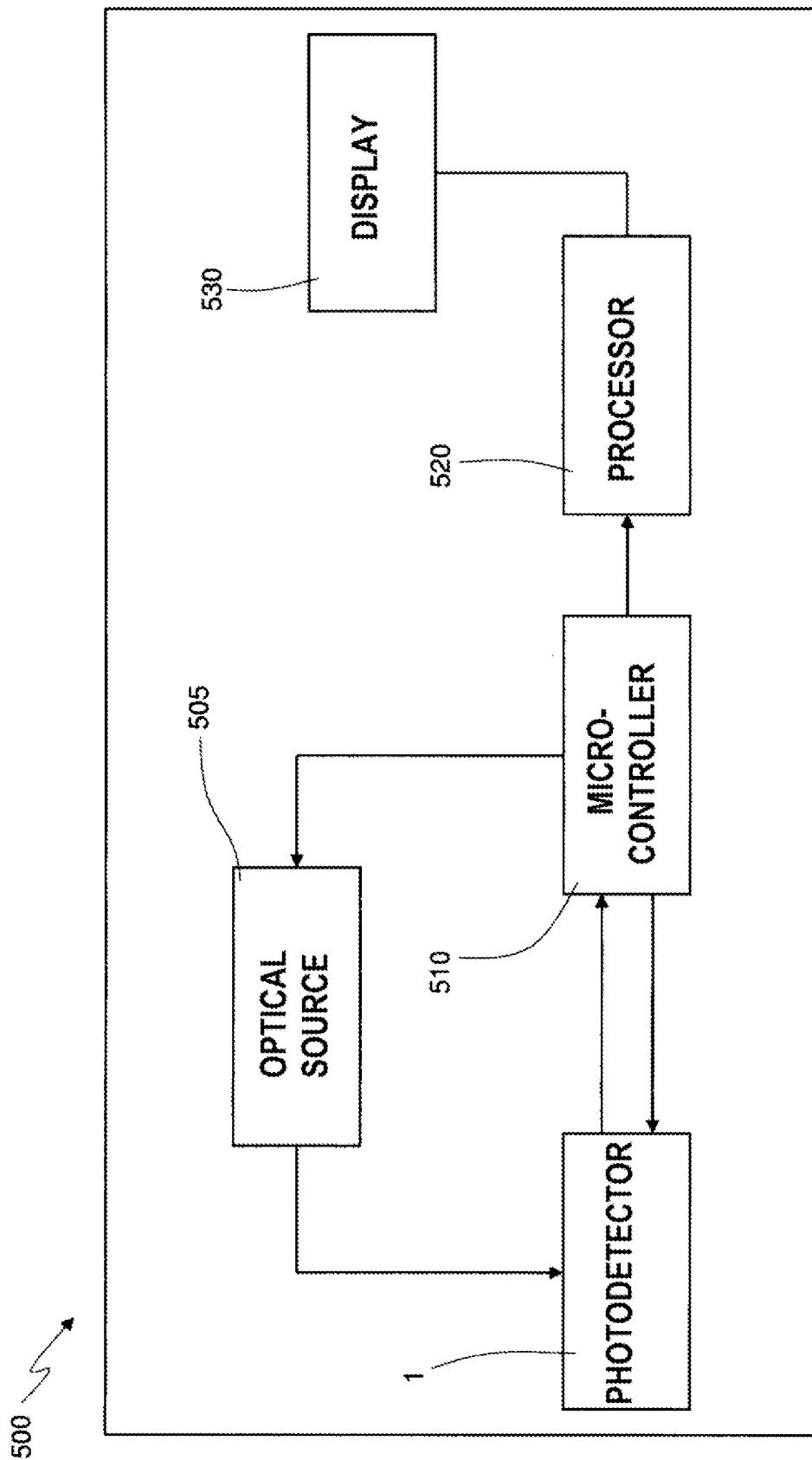


Fig.5

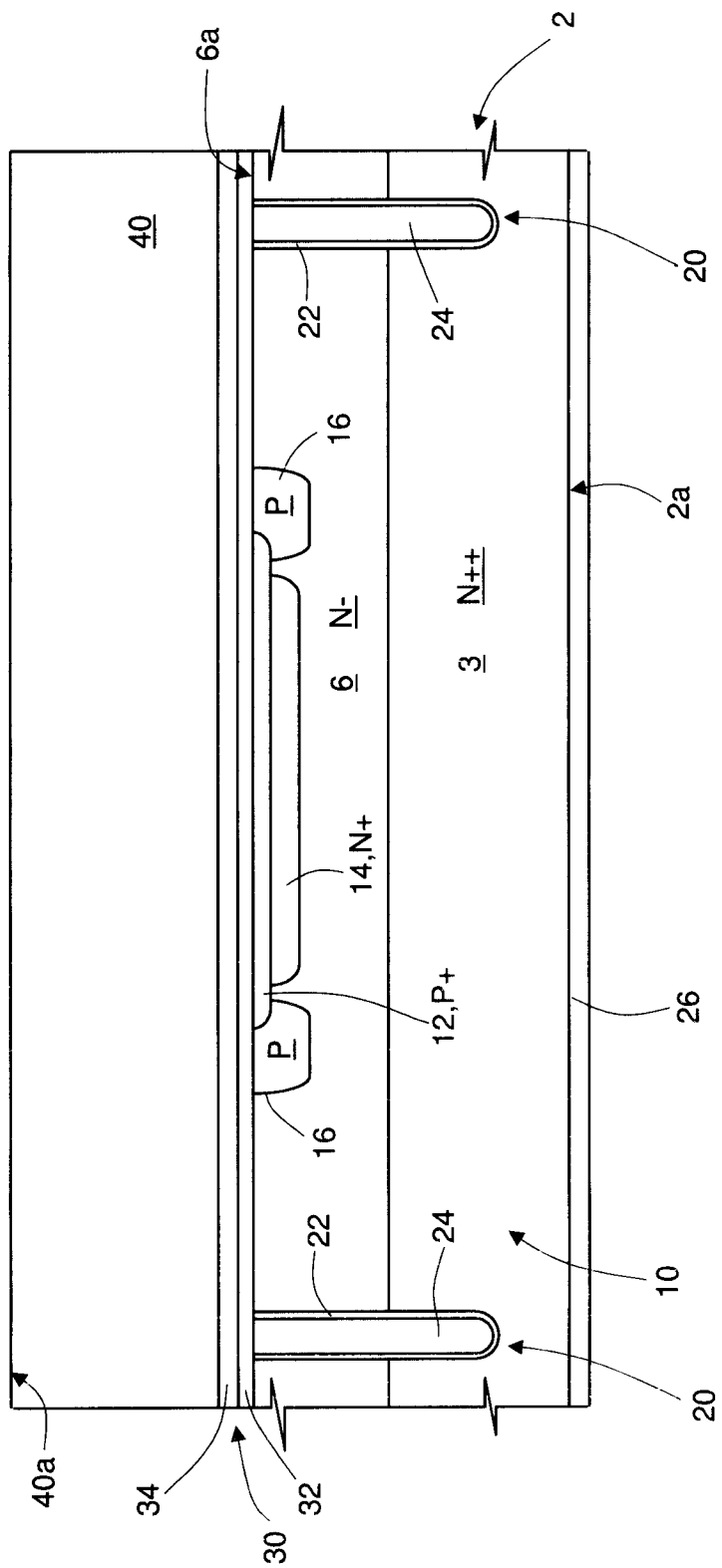


Fig.6

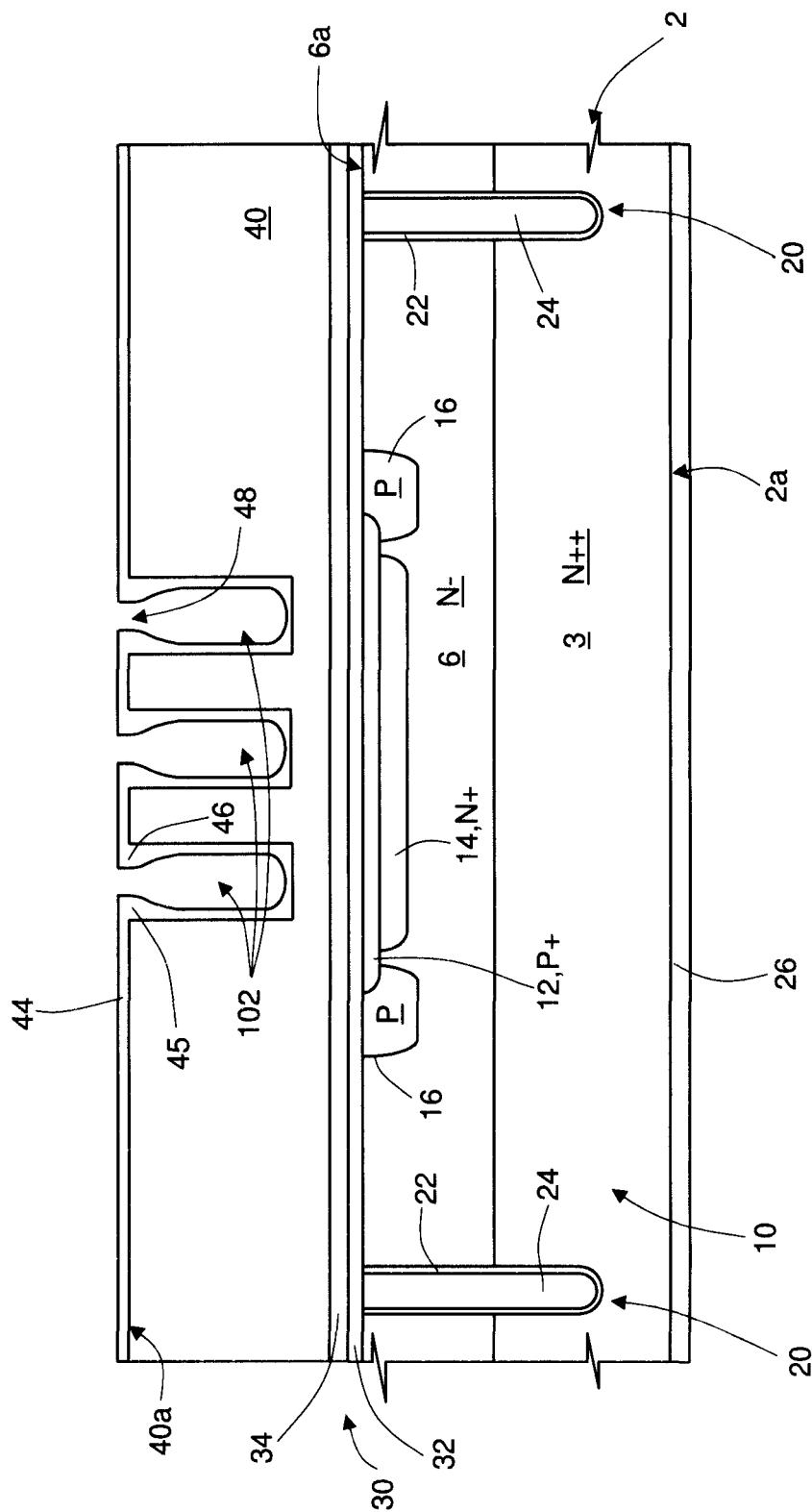


Fig.7

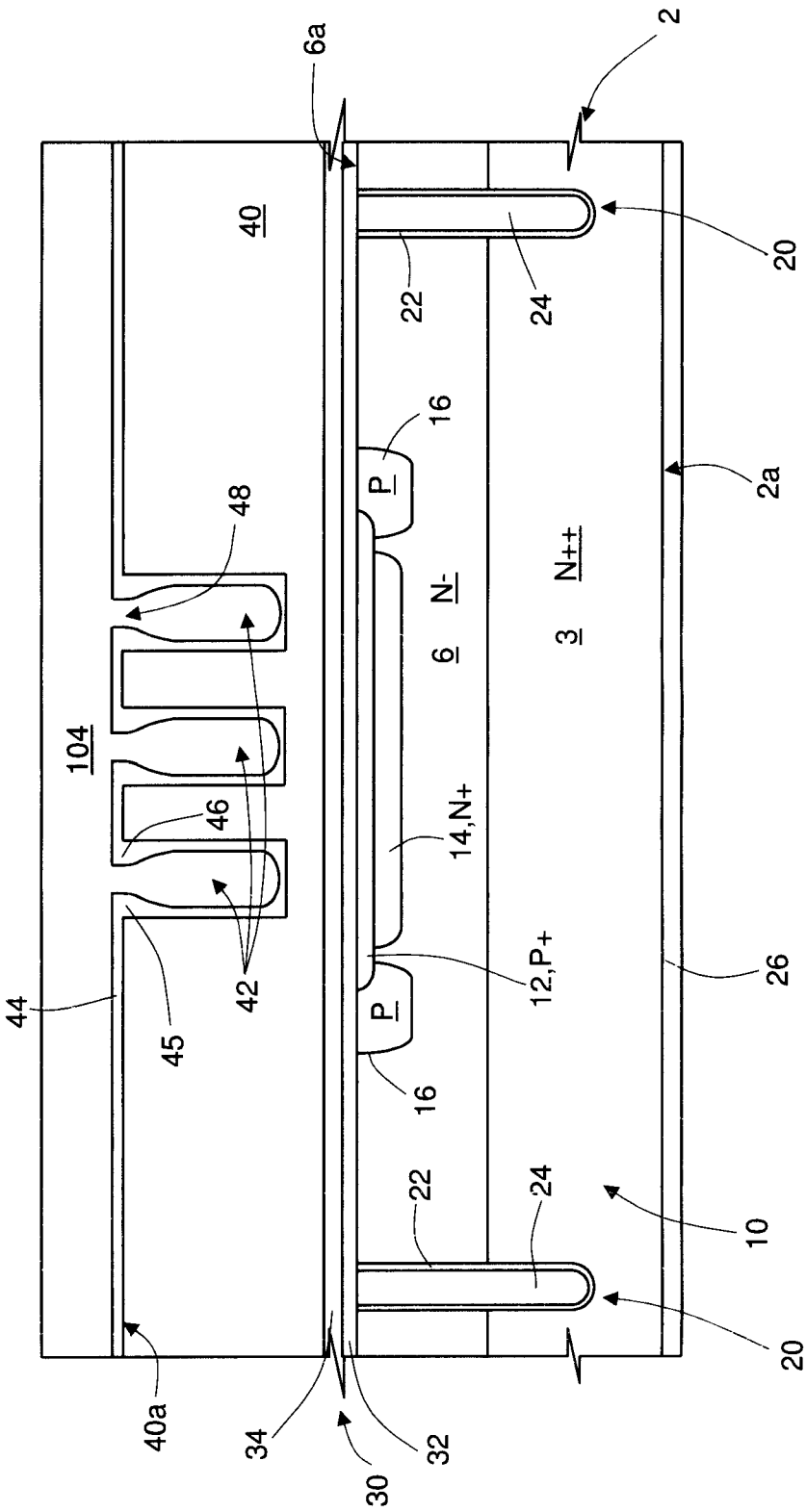


Fig.8

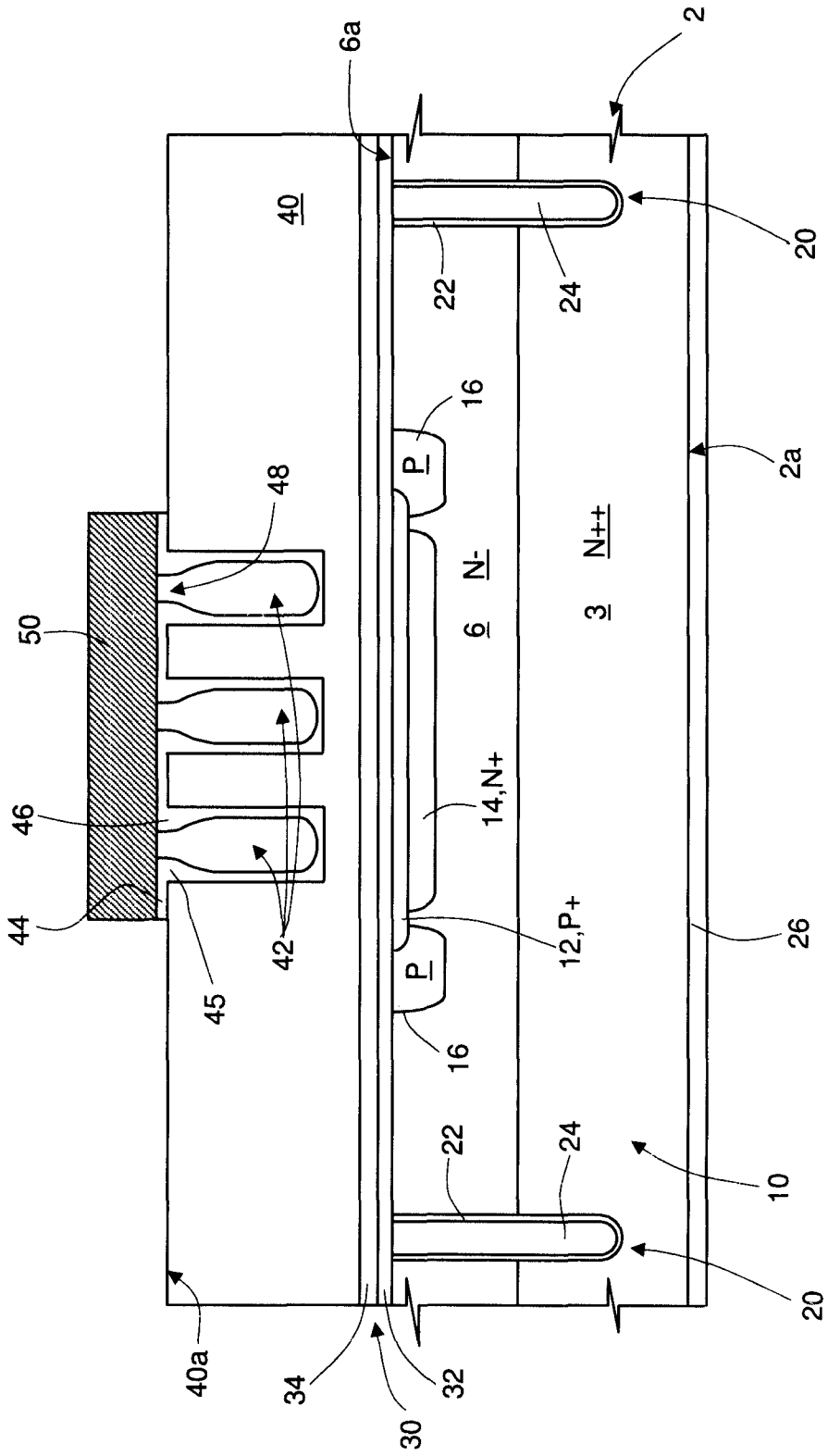


Fig.9

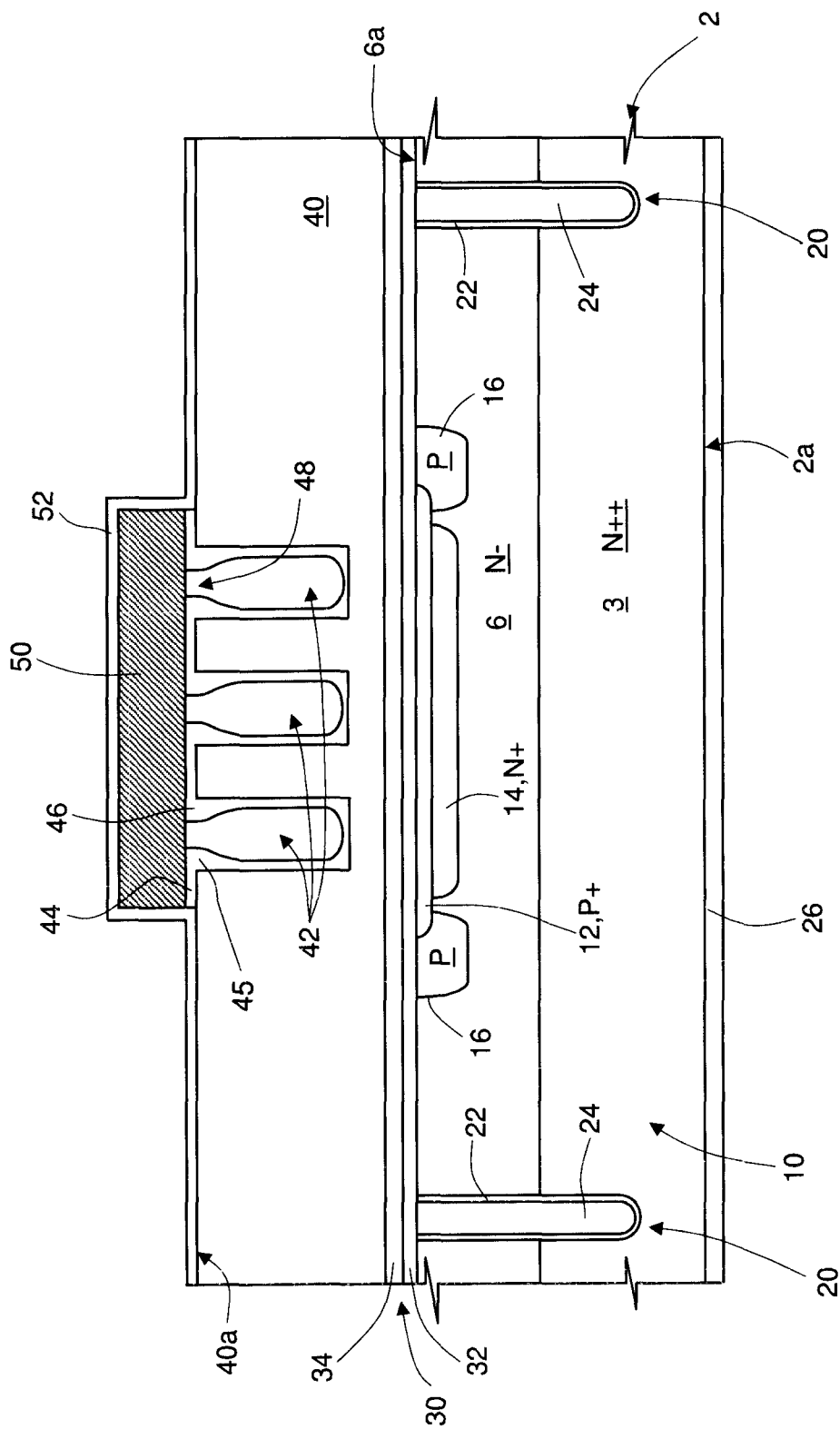


Fig.10

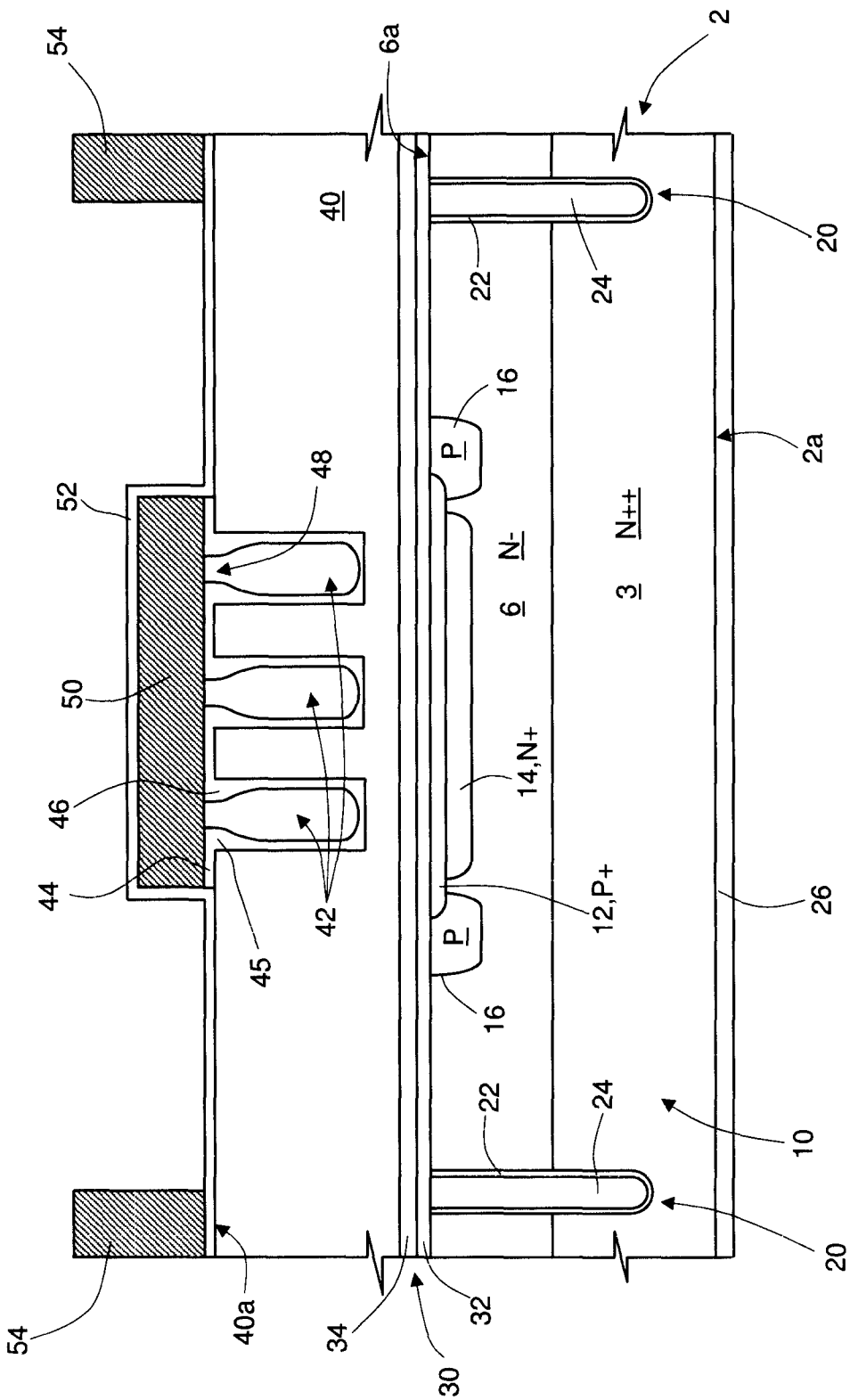


Fig.11