

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102008901688000A1

Publication Date

20100617

Applicant

STMICROELECTRONICS (ROUSSET) SAS

Title

FOTODIODO OPERANTE IN MODALITA' GEIGER CON RESISTORE DI
SOPPRESSIONE INTEGRATO E CONTROLLABILE, SCHIERA DI FOTODIODI
E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"FOTODIODO OPERANTE IN MODALITA' GEIGER CON RESISTORE DI
SOPPRESSIONE INTEGRATO E CONTROLLABILE, SCHIERA DI
FOTODIODI E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MI)

Inventori: MAZZILLO Massimo Cataldo, SANFILIPPO Delfo
Nunziato

La presente invenzione è relativa ad un fotodiodo operante in modalità Geiger con resistore di soppressione integrato e controllabile, a una schiera di fotodiodi e al relativo procedimento di fabbricazione.

Come è noto, nel campo tecnico della rivelazione di fotoni, è sentita l'esigenza di avere dispositivi che consentano di rilevare radiazione elettromagnetica con elevata sensibilità, dunque capaci di rilevare un numero anche limitato di fotoni associati alla radiazione elettromagnetica stessa.

A tal fine, sono noti da tempo i cosiddetti fotodiodi a valanga ("Avalanche PhotoDiode", APD), i quali comprendono tipicamente una giunzione di tipo P-N o P-I-N,

un contatto di anodo ed un contatto di catodo, atti a consentire la polarizzazione della giunzione. In particolare, un fotodiodo a valanga APD viene polarizzato applicando, mediante un opportuno circuito di polarizzazione, una tensione di polarizzazione inversa V_A molto elevata, ma inferiore (in modulo) alla tensione di rottura ("breakdown") V_B della giunzione presente nel fotodiodo a valanga APD, polarizzando quindi la giunzione in regione lineare. Data l'elevata tensione di polarizzazione inversa V_A , la giunzione presenta un'ampia regione di svuotamento, in cui è presente un campo elettrico avente modulo elevato.

Operativamente, dato un fotone che incide su un fotodiodo a valanga APD, tale fotone attraversa la giunzione, ed in particolare attraversa la regione di svuotamento, dove può essere assorbito, generando una corrispondente coppia elettrone-lacuna. Nel caso in cui si verifichi l'assorbimento del fotone, l'elettrone e la lacuna così creati, cui ci si riferisce genericamente come portatori, sono accelerati dal campo elettrico in direzioni opposte, con conseguente generazione di una corrente indicativa dell'assorbimento avvenuto. Essendo il fotodiodo APD polarizzato in regione lineare, la corrente risulta proporzionale al numero di fotoni assorbiti, quindi al numero di fotoni che incidono sul fotodiodo APD. Inoltre,

dato il modulo elevato del campo elettrico, l'accelerazione è tale per cui i portatori acquisiscono energie cinetiche sufficienti a provocare la generazione di ulteriori coppie elettrone-lacuna per ionizzazione atomica da impatto, cioè indipendentemente dall'assorbimento di fotoni. Ciascun portatore creato in seguito all'assorbimento di un singolo fotone può così generare una o più coppie elettrone-lacuna, con conseguente moltiplicazione della corrente di assorbimento e generazione di una corrente di valanga. Tale corrente di valanga viene opportunamente raccolta, ad esempio mediante una circuiteria esterna, ai contatti di anodo e di catodo, e rappresenta un segnale di uscita del fotodiodo a valanga APD.

Si noti che, a rigore, la tensione di polarizzazione inversa V_A applicata al fotodiodo a valanga APD coincide con la tensione effettiva V_e presente ai capi della giunzione solo in assenza di fotoni. Infatti, in presenza di fotoni, e dunque di corrente generata all'interno del fotodiodo a valanga APD, la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione risulta inferiore, in modulo, rispetto alla tensione di polarizzazione inversa V_A , come descritto in seguito in maggior dettaglio. Tuttavia, nel presente documento si assume, salvo laddove detto esplicitamente, che la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione coincida con la tensione di polarizzazione inversa V_A .

I fotodiodi a valanga APD più diffusi comprendono una giunzione P-I-N, capace di garantire una regione di svuotamento più ampia rispetto a quanto ottenibile con una giunzione P-N, ed inoltre comprendono una regione addizionale di materiale semiconduttore leggermente drogato, alternativamente P o N. Tale regione addizionale è disposta in maniera tale per cui il campo elettrico al suo interno risulta particolarmente elevato, in modo da favorire il processo di ionizzazione atomica da impatto.

In dettaglio, il fotodiodo a valanga APD comprende una struttura formata da regioni di semiconduttore che si succedono secondo uno schema P-N-I-N, oppure N-P-I-P, la regione addizionale essendo dunque interposta tra la regione intrinseca I, al più leggermente drogata, e la regione della giunzione P-I-N avente conducibilità di tipo opposto rispetto alla conducibilità della regione addizionale. Sulla base dei fenomeni fisici che vi avvengono, la regione addizionale è anche nota come zona di moltiplicazione, in quanto sede dei fenomeni di ionizzazione da impatto, mentre la regione intrinseca è anche nota come zona di assorbimento, dal momento che in essa viene assorbita la maggior parte dei fotoni.

I fotorivelatori a valanga APD del tipo descritto, anche noti come fotodiodi ad assorbimento e moltiplicazione separati ("Separate Absorption and Multiplication APD", SAM

APD), consentono di ottenere guadagni, cioè amplificazioni della corrente generata in seguito all'assorbimento di un fotone, dell'ordine di 10^2 . Tuttavia, a causa del rumore e di fenomeni di amplificazione del rumore, i fotorivelatori a valanga APD non consentono di rilevare singoli fotoni.

Per migliorare ulteriormente la sensibilità, sono stati proposti i cosiddetti fotodiodi a valanga operanti in modalità Geiger ("Geiger-mode avalanche photodiode"), teoricamente in grado di consentire la rivelazione di singoli fotoni singoli.

Un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger, anche noto come diodo a valanga a singolo fotone ("Single Photon Avalanche Diode", SPAD), è polarizzato applicando una tensione di polarizzazione inversa V_A superiore in modulo alla tensione di breakdown V_B , tipicamente superiore del 10-20%, in maniera tale per cui è sufficiente una singola coppia elettrone-lacuna, generata per assorbimento di un fotone, 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.

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. Infatti, tanto più la tensione di polarizzazione inversa V_A eccede, in modulo, la tensione di breakdown, tanto più è probabile che si verifichi una generazione a valanga di portatori di carica.

Tuttavia, tensioni di polarizzazione inversa V_A elevate fanno sì che, anche in assenza di fotoni incidenti (condizioni di buio), un singolo portatore di carica, generato ad esempio per trasferimento di energia termica, sia sufficiente ad innescare il processo di ionizzazione a valanga, generando la cosiddetta corrente di buio ("dark current"), che interferisce negativamente con il normale utilizzo del fotodiodo SPAD.

Inoltre, 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, i fotodiodi SPAD descritti riescono a rilevare l'arrivo di un primo fotone, ma non l'arrivo di fotoni successivi.

Per poter rilevare anche tali fotoni, è necessario spegnere la corrente di valanga generata all'interno del fotodiodo SPAD, arrestando il processo di ionizzazione a valanga. In dettaglio, occorre abbassare, per un periodo di

tempo noto come tempo di hold-off, la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione, in modo da inibire il processo di ionizzazione e spegnere la corrente di valanga, come descritto in seguito. Successivamente, si ripristinano le condizioni iniziali di polarizzazione della giunzione, in modo che il fotodiodo SPAD sia nuovamente in grado di rilevare fotoni. Dal momento che durante il tempo di hold-off il fotodiodo SPAD non è in grado di rilevare fotoni, è desiderabile che il tempo di hold-off sia quanto più possibile ridotto.

Per abbassare la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione successivamente all'assorbimento di un fotone, i fotodiodi SPAD adottano i cosiddetti circuiti di soppressione ("quenching circuits").

Tra gli altri, sono noti circuiti di spegnimento di tipo passivo, comprendenti un resistore di soppressione ("quenching resistor") posto in serie alla giunzione ed avente resistenza dell'ordine di centinaia di $K\Omega$.

In assenza di fotoni, la presenza del resistore di soppressione non altera la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione, che risulta pari alla tensione di polarizzazione inversa V_A . Tuttavia, in seguito all'assorbimento di un fotone ed al conseguente innesco del processo di ionizzazione, la corrente di valanga che ne scaturisce causa, scorrendo nel resistore di soppressione,

una riduzione di tipo esponenziale dell'ampiezza della tensione effettiva V_e ai capi della giunzione, che si riduce fino a raggiungere un valore di poco superiore alla tensione di breakdown V_B . Per quanto concerne, invece, la corrente di valanga generata all'interno del fotodiodo SPAD, essa passa da un valore nullo ad un valore di picco immediatamente dopo l'innesco del processo di ionizzazione a valanga (accensione del fotodiodo SPAD), quindi decresce esponenzialmente verso un valore asintotico, inversamente proporzionale alla resistenza del resistore di soppressione e direttamente proporzionale alla differenza tra la tensione di polarizzazione inversa V_A applicata del fotodiodo SPAD e la tensione di breakdown V_B , tale differenza essendo generalmente nota come sovratensione ("overvoltage", OV).

In dettaglio, è possibile dimostrare che il processo di ionizzazione a valanga è arrestato qualora il valore della corrente di valanga scenda al di sotto di un valore di soglia noto come corrente di latching I_L . Pertanto, dato un resistore di soppressione avente resistenza pari a R_q , esso è in grado di spegnere la corrente di valanga in caso di sovratensione pari al più al prodotto $R_q \cdot I_L$, cioè in caso di tensioni di polarizzazione inverse V_A non superiori a $V_B + R_q \cdot I_L$. Se tali condizioni sono rispettate, la corrente di valanga viene spenta; successivamente, il fotodiodo

SPAD, il cui comportamento è in una certa misura equiparabile a quello di un condensatore, si ricarica esponenzialmente attraverso il resistore di soppressione, in modo tale per cui la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione torna ad essere pari alla tensione di polarizzazione inversa V_A , il fotodiodo SPAD essendo così pronto a rilevare l'arrivo di un nuovo fotone. Durante il tempo di ricarica, cioè nell'intervallo di tempo in cui la tensione effettiva V_e cresce esponenzialmente fino a tornare ad essere pari alla tensione di polarizzazione inversa V_A , il fotodiodo SPAD presenta una sensibilità ridotta, che cresce al crescere della tensione effettiva V_e .

Sulla base di quanto detto, si deduce che applicazioni particolarmente esigenti in termini di sensibilità richiedono tipicamente elevate sovratensioni OV, quindi elevate tensioni di polarizzazione inversa V_A , con la conseguenza che il resistore di soppressione deve assumere valori elevati, pena l'impossibilità di spegnere la corrente di valanga e, quindi, di rilevare più fotoni.

Elevate resistenze di soppressione comportano un tempo di ricarica più lungo rispetto a quanto ottenibile in presenza di resistenze inferiori, tuttavia comportano un vantaggio addizionale. Infatti, durante il tempo di ricarica il fotodiodo SPAD è sì meno sensibile all'arrivo

dei fotoni, ma è anche meno sensibile al fenomeno degli impulsi spuri ("afterpulsing"), che solitamente degrada le prestazioni dei fotodiodi SPAD. In dettaglio, il fenomeno dell'afterpulsing consiste nell'emissione secondaria di portatori per la presenza di difetti reticolari nella regione di svuotamento, i quali creano livelli energetici intermedi (compresi tra banda di conduzione e banda di valenza) che possono catturare uno o più portatori della corrente di valanga, rilasciandoli poi con ritardi imprevedibili, provocando un incremento della corrente di buio e distorcendo il segnale di uscita del fotodiodo SPAD.

Sulla base di quanto detto, ne consegue che i resistori di soppressione sono dimensionati in fase di progetto, in funzione della tensione di polarizzazione inversa V_A che si prevede di applicare al fotodiodo SPAD, la quale a sua volta dipende dal tipo di applicazione in cui si intende utilizzare il fotodiodo SPAD, ed in particolare dalla sensibilità ("responsivity") e dall'efficienza quantica richieste. Inoltre, il valore di resistenza del resistore di soppressione viene dimensionato in funzione dei tempi di ricarica e della sensibilità al fenomeno dell'afterpulsing richiesti dall'applicazione per cui il fotodiodo SPAD è pensato. Ad esempio, nel caso di applicazioni in cui il tasso di arrivo dei fotoni è prevedibilmente basso, come ad esempio nel caso di

applicazioni astrofisiche, il resistore di soppressione viene dimensionato in modo che la sua resistenza sia elevata, in modo da limitare l'effetto dell'afterpulsing, il conseguente aumento del tempo di ricarica non essendo particolarmente rilevante in questo tipo di applicazioni.

I fotodiodi SPAD di tipo noto sono dunque ottimizzati per una specifica applicazione, pertanto le loro prestazioni decadono pesantemente quando impiegati in condizioni non perfettamente conformi a quanto ipotizzato in fase di progetto.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per le cosiddette schiere di fotodiodi SPAD, ed inoltre per i cosiddetti fotomoltiplicatori di silicio ("Silicon PhotoMultiplier", SiPM), impiegati al fine di migliorare le prestazioni ottenibili con singoli fotodiodi SPAD.

In particolare, una schiera di fotodiodi SPAD, di cui due esempi sono mostrati nelle domande di brevetto italiano TO2008A000046 e TO2008A000045 depositate il 18 Gennaio 2008 a nome della richiedente, è formata semplicemente da una matrice planare di fotodiodi SPAD cresciuti su un medesimo substrato.

Un fotomoltiplicatore SiPM è una particolare schiera di fotodiodi SPAD. In dettaglio, il fotomoltiplicatore SiPM è formato da una matrice di fotodiodi SPAD cresciuti su un medesimo substrato e provvisti di rispettivi resistori di

soppressione, di tipo verticale ed integrati nei fotodiodi SPAD, tali resistori di soppressione essendo tra loro disaccoppiati ed indipendenti. Inoltre, i contatti di anodo e di catodo di ciascun fotodiodo SPAD sono configurati in modo da poter essere connessi ad un unico generatore di tensione. Pertanto, i fotodiodi SPAD del fotomoltiplicatore SiPM possono essere polarizzati ad una medesima tensione di polarizzazione inversa V_A ; inoltre, le correnti a valanga generate al loro interno sono multiplate insieme in modo da generare un segnale di uscita del fotomoltiplicatore SiPM pari alla sommatoria dei segnali di uscita dei fotodiodi SPAD. Per quanto concerne la terminologia, nel campo tecnico dei SiPM è comune riferirsi all'insieme fotodiodo - resistore di soppressione come "pixel", il SiPM essendo dunque formato da una matrice di pixel.

Il 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 SiPM. Infatti, dal momento che i resistori di soppressione sono tra loro disaccoppiati, ciascun fotodiodo del SiPM si comporta come un contatore binario indipendente, mentre il segnale di uscita del SiPM risulta proporzionale al numero di pixel attivati, cioè al numero di fotodiodi SPAD 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.

Come indicato, nonostante il miglioramento delle prestazioni fornite dai fotomoltiplicatori SiPM, anch'essi sono suscettibili di miglioramento dal punto di vista della versatilità di impiego.

Scopo della presente invenzione è realizzare un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger che consenta di risolvere almeno in parte gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo l'invenzione, vengono realizzati un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger con resistore di soppressione integrato e controllabile, una schiera di fotodiodi, un sistema che utilizza la schiera di fotodiodi, ed il relativo procedimento di fabbricazione, come definiti, rispettivamente, nelle rivendicazioni 1, 7, 8 e 9.

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:

- la figura 1 mostra una sezione trasversale di un fotodiodo secondo la presente invenzione;

- la figura 2 mostra in forma schematica una schiera di fotodiodi durante l'uso;

- le figure 3-11 mostrano sezioni trasversali di un fotodiodo durante successive fasi di fabbricazione;

- la figura 12 mostra un sistema che utilizza la schiera di fotodiodi.

La figura 1 mostra un esempio di realizzazione di un fotodiodo 1 del tipo a valanga ed operante in modalità Geiger. Il fotodiodo 1 può appartenere, ad esempio, ad una schiera 220 di fotodiodi 1, come illustrato in figura 2, che mostra anche una sorgente luminosa esterna 200. La schiera 220 può comprendere un qualsiasi numero di fotodiodi 1, a seconda delle necessità.

Ritornando alla figura 1, il fotodiodo 1 è integrato in una piastrina ("chip") 100 includente un substrato 2, di tipo N⁺ ed avente una superficie inferiore 2a. Inoltre, il fotodiodo 1 include un primo strato epitassiale 3, di tipo N⁻, avente uno spessore h_1 pari a circa 50 μ m e sovrastante, in contatto diretto, il substrato 2; e un secondo strato epitassiale 4, di tipo N⁻, avente uno spessore h_2 pari a circa 5 μ m e una superficie superiore 4a, e sovrastante, in contatto diretto, il primo strato epitassiale 3. Il substrato 2, il primo e il secondo strato epitassiale 3, 4 formano in pratica un corpo 5 di materiale semiconduttore. Il livello di drogaggio del substrato 2 è maggiore di almeno tre ordini di grandezza, preferibilmente di cinque, rispetto al livello di drogaggio del primo

strato epitassiale 3; la differenza tra i livelli di drogaggio del primo e del secondo strato epitassiale 3, 4 è invece all'incirca pari a due ordini di grandezza.

Una regione di isolamento laterale 10 di forma, in vista dall'alto, circolare o poligonale, si estende verticalmente con una profondità h_3 almeno pari alla somma degli spessori h_1 , h_2 degli strati epitassiali 3, 4, in modo da delimitare e isolare porzioni del corpo 5 costituenti ciascuna una regione attiva 6 alloggiante un singolo fotodiodo 1. In pratica, ciascun fotodiodo 1 della schiera 220 è isolato dai fotodiodi 1 adiacenti dalla regione di isolamento laterale 10.

La regione di isolamento laterale 10 comprende una regione di channel stopper 11, disposta più esternamente, di materiale dielettrico, ad esempio ossido, in contatto diretto con il substrato 2, il primo ed il secondo strato epitassiale 3, 4; ed una regione metallica 13, ad esempio di tungsteno, riempiente la e circondata dalla regione di channel stopper 11, ed inoltre in contatto elettrico diretto con una metallizzazione ("metal region") di porta 22b.

La regione di channel stopper 11 è formata da un doppio strato: uno strato di rivestimento sottile 11a, ad esempio di ossido termico, disposto più esternamente, ed uno strato di rivestimento spesso 11b, ad esempio di ossido

TEOS, disposto più internamente. Lo spessore dello strato di rivestimento sottile 11a si aggira nell'ordine dei 15-25 nm, mentre lo spessore dello strato di rivestimento spesso 11b è dell'ordine di poche centinaia di nanometri.

Una regione di anodo 14, di tipo P+ e di forma circolare o quadrangolare, si estende all'interno del secondo strato epitassiale 4, affacciata alla superficie superiore 4a.

Una regione arricchita 16, di tipo N, si estende nel secondo strato epitassiale 4, al di sotto della ed in contatto diretto con la regione di anodo 14. La regione arricchita 16 ed il secondo strato epitassiale 4 hanno lo scopo di confinare un elevato campo elettrico in prossimità della giunzione P-N formata dalla regione di anodo 14 e della regione arricchita 16.

Un anello di guardia 19 di forma circolare, di tipo P, si estende nel secondo strato epitassiale 4, affacciato alla superficie superiore 4a, esternamente e contiguo alla regione di anodo 14. Tale anello di guardia 19 forma un diodo PN con il secondo strato epitassiale 4, in modo da prevenire il breakdown di bordo ("edge breakdown") della regione di anodo 14. Inoltre, l'anello di guardia 19 è in contatto elettrico diretto con una metallizzazione di anodo 22.

Si noti che i tipi della regione di anodo 14 e

dell'anello di guardia 19, e dunque le corrispondenti densità di drogaggio, sono tali per cui la regione di svuotamento che è presente a cavallo dell'interfaccia tra regioni di tipo P (regione di anodo 14 ed anello di guardia 19) e regioni di tipo N (regione arricchita 16 e secondo strato epitassiale 4) si estende principalmente nell'anello di guardia 19, piuttosto che nella regione di anodo 14, evitando che all'interfaccia tra la regione di anodo 14 (semiconduttore) e gli strati di ossido presenti sopra la regione di anodo 14 (descritti in seguito) possa localizzarsi un elevato campo elettrico, riducendo la corrente di buio del fotodiodo 1. Infatti, tale interfaccia è ricca di centri di Shockley-Read-Hall (SRH), dunque è opportuno limitare i campi elettrici in sua prossimità, pena un incremento indesiderato della corrente di buio del fotodiodo 1.

Su una regione periferica della superficie superiore 4a, lateralmente sfalsata rispetto alla regione di anodo 14, è presente un primo strato dielettrico 24.

Un secondo strato dielettrico 25, preferibilmente di ossido TEOS, si estende sopra la superficie superiore 4a, al di sopra del primo strato dielettrico 24, della regione di anodo 14 e (parzialmente, a meno del contatto con la metallizzazione di anodo 22) dell'anello di guardia 19. Uno strato di rivestimento 26, ad esempio di nitruro, si

estende sopra il secondo strato dielettrico 25 e realizza, insieme a questo, un doppio rivestimento anti-riflessione 30 ("Double Anti Reflection Coating", DLARC).

Modulando opportunamente, in modo di per sé noto, lo spessore del secondo strato dielettrico 25 e dello strato di rivestimento 26, è possibile ottimizzare il rivestimento anti-riflessione 30, in modo che sia trasparente solo per uno specifico intervallo di lunghezza d'onda e riflettente per le lunghezze d'onda al di fuori di tale intervallo. È così possibile realizzare fotodiodi 1 che siano sensibili solo ad alcune frequenze dello spettro luminoso.

Un terzo strato dielettrico 27 (formante uno strato unico con lo strato di rivestimento spesso 11b) ed un quarto strato dielettrico 28 si estendono sopra lo strato di rivestimento 26, lateralmente sfalsati rispetto alla regione di anodo 14. Tuttavia, come detto in precedenza, al di sopra della regione di isolamento laterale 10 è presente la metallizzazione di porta 22b, che attraversa tali strati dielettrici 24-28 ed è elettricamente connessa alla regione metallica 13.

Una regione di contatto di catodo 31, di tipo N++, si estende all'interno del substrato 2, ed è affacciata alla superficie inferiore 2a; tale regione di contatto di catodo 31 è inoltre in contatto diretto con una metallizzazione di catodo 32 di materiale metallico, che si estende sotto la

superficie inferiore 2a del substrato 2.

La regione arricchita 16, il secondo strato epitassiale 4, il primo strato epitassiale 3, il substrato 2 e la regione di contatto di catodo 31 formano una regione di catodo. All'interno della regione di catodo, il primo e il secondo strato epitassiale 3, 4 formano un resistore di soppressione 29 integrato, verticale, elettricamente connesso fra la regione di anodo 14 ed il substrato 2, ed in grado di spegnere la corrente di valanga generata in seguito all'assorbimento di un fotone. In questa struttura, la caduta di potenziale nel substrato 2, di tipo N+, è trascurabile a causa della bassa resistività del substrato 2 stesso. Inoltre, la resistenza del resistore di soppressione 29 è determinata, in prima approssimazione, dal solo primo strato epitassiale 3, di tipo N--, data la resistività notevolmente maggiore rispetto al secondo strato epitassiale 4, di tipo N-, ed il maggior spessore.

In dettaglio, data la disposizione delle metallizzazioni di anodo 22 e di catodo 32, e la presenza del channel stopper 11 di materiale dielettrico, la corrente di valanga è costretta a scorrere in modo verticale nella regione attiva 6 delimitata dalla regione di isolamento laterale 10, percorrendo il resistore di soppressione 29. Il valore della resistenza elettrica del resistore di soppressione 29 è determinato dall'area A del

pixel (fotodiodo 1 più resistore di soppressione 29), cioè dall'area della regione attiva (6), tale area dipendendo dalla forma della regione di isolamento laterale (10), e, in prima approssimazione, dallo spessore h_1 del primo strato epitassiale 3. Pertanto, è lecito assumere che la resistenza opposta dal resistore di soppressione 29 alla corrente di valanga sia pari a $\rho \cdot l/A$, in cui ρ è la resistività del primo strato epitassiale 3, e l è lo spessore h_1 del primo strato epitassiale 3.

Ad esempio, nel caso del fotodiodo 1 illustrato in figura 1, ed assumendo un valore di area A pari a $400 \mu\text{m}^2$ e un valore di resistività ρ del primo strato epitassiale 3 pari a $80 \Omega \cdot \text{cm}$, si ottiene una resistenza pari a $100 \text{ K}\Omega$. Dunque, assumendo un valore di corrente di latching pari a $20 \mu\text{A}$, ne consegue che il resistore di soppressione 29 descritto è in grado di spegnere la corrente di valanga in caso di sovratensioni OV pari al più a 2 Volt.

Nel caso in cui il valore di resistenza non sia sufficiente in relazione al tipo di impiego e di polarizzazione previsto per il fotodiodo 1, è possibile aumentare tale resistenza diminuendo il valore di area A del pixel.

A tal scopo, la metallizzazione di porta 22b può essere posta a contatto con un circuito esterno di polarizzazione di porta, configurato per erogare una

tensione di polarizzazione di porta V_G , in modo da applicare una tensione negativa alla regione metallica 13 contenuta nella regione di isolamento laterale 10. Così facendo, si crea attorno alla regione di isolamento laterale 10 una regione di svuotamento 33 estendentesi nel corpo 5 di materiale semiconduttore, in particolare nel primo strato epitassiale 3, ed in contatto diretto con il channel stopper 11. Infatti, la regione metallica 13, il channel stopper 11 ed il primo ed il secondo strato epitassiale 3, 4, ed eventualmente anche il substrato 2, nel caso in cui la regione di isolamento laterale 10 si estenda oltre il primo ed il secondo strato epitassiale 3, 4 ($h_3 > h_1 + h_2$) formano un sistema MOS. Pertanto, applicando alla regione metallica 13 una tensione di polarizzazione di porta V_G negativa, si crea la regione di svuotamento 33 ad alta resistività, in cui sono presenti donatori caricati positivamente, ma priva di cariche libere.

Data l'assenza di cariche libere, la corrente di valanga non può scorrere in tale regione di svuotamento 33, pertanto l'area A risulta ridotta rispetto al valore assunto in assenza di polarizzazione di porta V_G . Inoltre, indicando con w lo spessore di tale regione di svuotamento 33, tale spessore w può essere variato modulando la tensione di polarizzazione di porta V_G applicata alla regione metallica 13. In particolare, aumentando, in valore

assoluto, la tensione di polarizzazione di porta V_G , si aumenta lo spessore w della regione di svuotamento 33, dunque si aumenta la resistenza del resistore di soppressione 29; conseguentemente, diventa possibile applicare al fotodiodo 1 sovratensioni OV maggiori, dunque tensioni di polarizzazione inversa V_A maggiori, migliorando la sensibilità e l'efficienza quantica del fotodiodo 1.

L'applicazione di una tensione di polarizzazione di porta V_G negativa consente inoltre di compensare gli effetti indotti dalla presenza, all'interfaccia tra il corpo 5 ed il channel stopper 11, di cariche fisse positive.

In dettaglio, data la bassa densità di drogaggio del primo strato epitassiale 3, la presenza di tali cariche fisse positive causa, in assenza di tensione di polarizzazione di porta V_G , un accumulo di elettroni all'interfaccia tra il corpo 5 ed il channel stopper 11 della regione di isolamento laterale 10. Tale accumulo di elettroni realizza una regione a bassa resistività non controllabile, che può formare un cammino preferenziale per la corrente di valanga, riducendo l'intervallo di sovratensioni OV che possono essere applicate al fotodiodo 1. L'applicazione di una tensione di polarizzazione di porta V_G negativa allontana tali elettroni e previene il fenomeno descritto.

Da un punto di vista pratico, oltre a fungere da porta di un transistor MOSFET che controlla la resistenza del resistore di soppressione 29, la regione metallica 13 consente di isolare otticamente i fotodiodi 1 della schiera 220. Inoltre, l'ossido presente nel channel stopper 11 garantisce l'isolamento elettrico tra i fotodiodi 1 della schiera 220, rendendo indipendenti tra loro i resistori di soppressione 29. In altre parole, la regione di isolamento laterale 10 consente di limitare gli effetti negativi sul fotodiodo 1 indotti da portatori di carica (ad esempio elettroni) generati da fotodiodi adiacenti, e da fotoni generati per elettroluminescenza durante il processo di moltiplicazione a valanga in fotodiodi adiacenti, tali effetti essendo noti rispettivamente come "crosstalk elettrico" e "crosstalk ottico".

Si noti inoltre che, dal momento che la regione di isolamento laterale 10 si estende fino e oltre il substrato 2, e data la bassa resistività del substrato 2, ciascun pixel della schiera 220 risulta disaccoppiato dagli altri pixel. Infatti, la corrente di valanga produce una caduta di potenziale nel substrato 2 di entità trascurabile, con la conseguenza che l'accensione di un fotodiodo 1 non altera la polarizzazione dei fotodiodi 1 adiacenti, lasciando inalterata la tensione effettiva V_e ai capi delle giunzioni di tali fotodiodi 1.

Pertanto, la schiera 220 di fotodiodi 1 realizza un fotomoltiplicatore a semiconduttore SiPM, in cui tutti fotodiodi 1 lavorano in medesime condizioni operative.

I fotodiodi 1 di figura 1 vengono realizzati usando il procedimento di fabbricazione descritto nel seguito e rappresentato nelle figure 3-11.

Inizialmente, figura 3, il primo strato epitassiale 3, di tipo N-- (drogato con fosforo) e con densità di drogaggio circa pari a $5,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ (resistività equivalente circa pari a $80 \Omega \cdot \text{cm}$), viene cresciuto sul substrato 2, di tipo N+ (drogato con fosforo) e con densità di drogaggio circa pari a 10^{19}cm^{-3} . Successivamente viene cresciuto il secondo strato epitassiale 4, di tipo N- (drogato con fosforo) e con densità di drogaggio circa pari a $5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (resistività equivalente circa pari a $1 \Omega \cdot \text{cm}$). Ad esempio, il substrato 2 può presentare uno spessore di circa $500 \mu\text{m}$, mentre il primo ed il secondo strato epitassiale 3, 4 possono presentare spessori rispettivamente pari a circa $50 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$.

Successivamente, il primo strato dielettrico 24, formato ad esempio di ossido, viene prima cresciuto per ossidazione termica sopra il secondo strato epitassiale 4, e quindi selettivamente rimosso mediante fotolitografia ed attacco chimico umido ("wet etching") nelle aree in cui si vuole realizzare la regione di anodo 14. Nell'ambito di

tale processo di ossidazione, cresce anche uno strato inferiore 39 di ossido termico, sotto la superficie inferiore 2a.

Successivamente, un nuovo processo di ossidazione termica, seguito da un nuovo processo di rimozione mediante fotolitografia ed attacco chimico, consente di realizzare, in modo di per sé noto, i cosiddetti segni di allineamento ("alignment mark"), non mostrati in figura 3. L'attacco chimico viene realizzato ad esempio a umido, in quanto previene possibili danni al reticolo cristallino del secondo strato epitassiale 4 e permette di ridurre l'introduzione di particelle contaminanti non desiderate nel secondo strato epitassiale 4.

Per evitare che, durante i successivi processi di drogaggio per impiantazione, impurità metalliche contaminino il secondo strato epitassiale 4, un primo strato protettivo 36, ad esempio di ossido termico, viene cresciuto sul secondo strato epitassiale 4.

Quindi, per ridurre la contaminazione di siti esterni alla regione in cui si vuole effettuare l'impiantazione della regione arricchita 16, viene usata una prima maschera di resist 37.

Viene quindi eseguito un impianto a bassa energia (20-40KeV) di specie droganti di tipo N (ad esempio di atomi di fosforo), rappresentato dalle frecce 38, nel secondo strato

epitassiale 4, in modo da localizzare le specie droganti in un primo straterello 16' disposto al di sotto dello strato protettivo 36 e destinato a formare la regione arricchita 16 una volta terminati appositi trattamenti termici, come spiegato in seguito.

Quindi, figura 4, dopo la rimozione della prima maschera di resist 37, viene realizzata una seconda maschera di resist 40, in modo da definire con precisione la regione in cui si desidera realizzare l'anello di guardia 19. Viene quindi eseguito un impianto a bassa energia (20-40KeV) di specie droganti di tipo P (ad esempio di atomi di boro), rappresentato dalle frecce 41, nel secondo strato epitassiale 4, in modo da localizzare le specie droganti in un secondo straterello 19' estendentesi al di sotto dello strato protettivo 36, a distanza dal primo straterello 16'.

Successivamente, figura 5, la seconda maschera di resist 40 viene rimossa e viene effettuato un trattamento termico ("thermal annealing"), ad esempio a temperature superiori ai 1000°C, e per una durata di qualche ora, in modo da ridurre i siti del secondo strato epitassiale 4 danneggiati in seguito ai processi di impiantazione ionica e da attivare le specie droganti, formando in questo modo la regione arricchita 16 di tipo N, affacciata alla superficie superiore 4a, e l'anello di guardia 19 di tipo

P, anch'esso affacciato alla superficie superiore 4a. Al termine del trattamento termico, la densità di picco di drogaggio nella regione arricchita 16 è circa pari a $5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$, cioè un ordine di grandezza superiore alla densità di drogaggio del secondo strato epitassiale 4; la densità di picco di drogaggio dell'anello di guardia 19 risulta invece pari a circa 10^{16}cm^{-3} .

Quindi, figura 6, viene realizzata una terza maschera di resist 42, in modo da definire con precisione la regione in cui si desidera realizzare la regione di anodo 14, e successivamente viene eseguito un impianto a bassa energia (5-10 KeV) di specie droganti di tipo P (rappresentato dalle frecce 43) nel secondo strato epitassiale 4, in modo da localizzare le specie droganti in un terzo straterello 14' al di sotto dello strato protettivo 36.

In seguito, figura 7, la terza maschera di resist 42 viene rimossa, e viene rimosso, mediante attacco umido, lo strato protettivo 36 eventualmente rimasto dopo i summenzionati processi di impiantazione. Quindi, vengono depositati, ad esempio mediante tecnica CVD ("Chemical Vapor Deposition"), il secondo strato dielettrico 25, ad esempio di ossido, e lo strato di rivestimento 26, ad esempio di nitruro, realizzando così il rivestimento anti-riflessione 30.

Viene quindi eseguita una fase di rimozione totale

mediante attacco a secco ("dry etching") dello strato inferiore 39 di ossido termico, seguita da una fase di impianto ad alto dosaggio ($5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$) e alta energia (1MeV) di specie droganti di tipo N sulla superficie inferiore 2a del substrato 2, al fine di creare la regione di contatto di catodo 31, di tipo N++ . Si noti che, come descritto in seguito, tale fase di impianto ad alto drogaggio rappresenta anche il primo passo di un processo di "gettering", avente lo scopo di minimizzare i difetti reticolari all'interno del fotodiodo 1.

Successivamente, figura 8, viene realizzata la regione di isolamento laterale 10, di forma preferibilmente circolare, quadrangolare o, in genere, poligonale, di larghezza pari a circa $1 \mu\text{m}$ e profondità maggiore o uguale a $55 \mu\text{m}$, dunque caratterizzata da un elevato fattore di forma ("aspect ratio"), cioè elevato rapporto profondità/ampiezza. A tal scopo, viene eseguito un processo di fotolitografia, seguito da un processo di attacco, basato su cicli ripetuti di passivazione e di attacco eseguiti in ambiente ricco di fluoro, così da consentire la realizzazione di trincee 45 fortemente verticali (anisotrope).

Quindi, figura 9, viene dapprima cresciuto lo strato di rivestimento sottile 11a, di ossido termico ed avente uno spessore compreso nell'intervallo 15-25nm, e poi viene

depositato, ad esempio mediante tecnica CVD, uno strato dielettrico che va a formare sia lo strato di rivestimento spesso 11b sia il terzo strato dielettrico 27. Tale strato può ad esempio essere formato di ossido TEOS ed avere uno spessore compreso nell'intervallo 50 e 200nm, realizzando così il channel stopper 11.

Si noti che lo strato di rivestimento sottile 11a ricopre solamente i bordi interni ed il fondo della trincea 45, in quanto l'ossido termico non può crescere sopra lo strato di rivestimento 26, di nitruro. Pertanto, al di sopra della superficie superiore 4a, oltre ai già citati primo e secondo strato dielettrico 24, 25 ed allo strato di rivestimento 26, si aggiunge il solo il terzo strato dielettrico 27.

La fase di crescita termica dello strato di rivestimento sottile 11a richiede una quantità di calore, che viene utilmente impiegato anche per attivare le specie droganti impiantate nel terzo straterello 14', ed ottenere la regione di anodo 14, di tipo P+ e con densità di picco di drogaggio all'incirca pari a 10^{19}cm^{-3} .

Viene quindi eseguita una fase di trattamento termico a temperatura moderata (700°C) e della durata di alcune ore, noto come trattamento termico di segregazione ("segregation annealing"). Tale fase di trattamento termico ha lo scopo di far sì che le impurità metalliche presenti

nella regione attiva 6 in seguito ai processi di impiantazione diffondano e si agglomerino ai siti di getter, cioè in prossimità della regione di contatto di catodo 31, in cui sono presenti difetti reticolari dovuti all'impiantazione, in modo da ridurre le imperfezioni reticolari nell'area attiva 6 e migliorare le prestazioni del fotodiodo 1 in termini di corrente di buio e di afterpulsing.

In seguito, come mostrato in figura 10, la trincea 45 viene completamente riempita mediante deposizione di metallo, ad esempio tungsteno, formando la regione metallica 13. Dopo la deposizione di metallo, viene eseguito un attacco, ad esempio un attacco a secco, per la rimozione della porzione di metallo depositata al di sopra della superficie superiore 4a. Successivamente, viene depositato il quarto strato di dielettrico 28, ad esempio di ossido TEOS, in modo da isolare elettricamente (temporaneamente) la regione metallica 13.

Successivamente, come illustrato in figura 11, viene effettuato un processo di fotolitografia e di attacco a secco, al fine di rimuovere selettivamente:

- porzioni del terzo e del quarto strato dielettrico 27, 28, in modo da formare una prima finestra 46, disposta al di sopra della regione arricchita 16 e della regione di anodo 14, così da lasciare scoperta la regione di

rivestimento anti-riflessione 30 che, in uso, permette il passaggio di fotoni incidenti sul fotodiodo 1 verso la regione attiva 6; e una seconda finestra 47, al di sopra dell'anello di guardia 19 e di corrispondenti porzioni del secondo strato dielettrico 25 e dello strato di rivestimento 26;

- una porzione del quarto strato dielettrico 28, in modo da formare una terza finestra 48, disposta al di sopra delle trincee 45, in vista della realizzazione della metallizzazione di porta 22b. Si noti che, considerando più fotodiodi 1, appartenenti ad esempio alla schiera 220, la rimozione di porzioni del quarto strato dielettrico 28 può non essere effettuata in corrispondenza di uno o più fotodiodi 1, al fine di creare strutture prive della possibilità di controllare il corrispondente resistore di soppressione 29, ma utili in fase di test della schiera 220, per verificare il corretto funzionamento degli altri fotodiodi 1.

In seguito, viene effettuato un ulteriore processo di fotolitografia e di attacco umido, in modo da rimuovere selettivamente le porzioni del secondo strato dielettrico 25 e dello strato di rivestimento 26 sottostanti alla seconda finestra 47, in vista della realizzazione della metallizzazione di anodo 22.

Successivamente, viene effettuata una fase di

deposizione mediante tecnica sputtering di materiale metallico, ed un successivo processo di fotolitografia, in modo da realizzare le metallizzazioni di anodo 22 e di porta 22b. Quindi, viene depositato sulla superficie inferiore 2a del substrato 2, mediante tecnica sputtering, ulteriore materiale metallico, al fine di realizzare la metallizzazione di catodo 32, ottenendo la struttura di figura 1.

Infine, viene effettuato un processo di sinterizzazione a bassa temperatura ed in ambiente a base di idrogeno, allo scopo di passivare eventuali legami liberi ("dangling bonds") all'interfaccia tra regioni di ossido e regioni di silicio.

La schiera 220 di fotodiodi 1 può essere utilizzata in un generico sistema 500 mostrato in figura 12, in cui un alimentatore 510 alimenta almeno una schiera 220 di fotodiodi 1 e almeno un microcontrollore 520 collegato alla schiera 220. Il microcontrollore 520 elabora il segnale di uscita della schiera 220 di fotodiodi 1, e fornisce un segnale elaborato ad un elaboratore 320, che consente di analizzare tale segnale elaborato e di visualizzare le informazioni associate a tale segnale elaborato su uno schermo 330.

Risulta infine evidente che al fotodiodo e al processo descritti possono essere apportate modifiche e varianti,

senza uscire dall'ambito della presente invenzione.

Ad esempio, il substrato 2 ed il corpo 5 possono essere di tipo inverso, e la posizione della regione di contatto di catodo 31 e della regione di anodo 14, così come delle rispettive metallizzazioni 32, 22, possono essere invertite.

Similmente, sono possibili forme di realizzazione in cui il corpo 5 è privo del secondo strato epitassiale 4 e/o dell'anello di guardia 19. In caso di assenza di anello di guardia 19, la regione di anodo 14 e la regione arricchita 16 possono estendersi lateralmente fino a contattare direttamente la regione di channel stopper 11.

Analogamente, il channel stopper 11 può essere formato da un solo strato di materiale isolante. Inoltre, sono possibili forme di realizzazione in cui il corpo 5 è privo della regione arricchita 16.

Per quanto concerne il procedimento di fabbricazione, la regione di isolamento laterale 10 può essere realizzata in un differente momento del procedimento di fabbricazione descritto, ad esempio prima della deposizione del secondo strato dielettrico 25 e dello strato di rivestimento 26, oppure in una fase intermedia durante la formazione delle regioni 16, 19, 14 nel secondo strato epitassiale 4.

RIVENDICAZIONI

1. Fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger, comprendente:

- un corpo (5) di materiale semiconduttore di un primo tipo di conducibilità, avente una prima ed una seconda superficie (4a, 2a);

- una trincea (45) estendentesi attraverso detto corpo a partire da detta prima superficie e circondante una regione attiva (6);

- una regione di isolamento laterale (10) all'interno della trincea, detta regione di isolamento comprendendo una regione conduttiva (13) ed una regione isolante (11), di materiale dielettrico, circondante detta regione conduttiva; e

- una regione di anodo (14) di un secondo tipo di conducibilità, estendentesi all'interno di detta regione attiva ed affacciata a detta prima superficie;

detta regione attiva formando una regione di catodo estendentesi fra detta regione di anodo e la seconda superficie e definente un resistore di soppressione (29) verticale;

caratterizzato dal fatto di comprendere una regione di contatto (22b) di materiale conduttore, sovrastante detta prima superficie (4a) ed in contatto diretto con detta regione conduttiva, e atta ad essere elettricamente

collegata a un circuito esterno di polarizzazione della regione conduttiva ad una tensione di porta (V_G) tale da creare una regione di svuotamento (33) in detta regione attiva intorno a detta regione isolante, variando in tal modo la resistenza di detto resistore di soppressione.

2. Fotodiodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta regione conduttiva è formata da una regione metallica (13) e detta regione isolante è formata da una regione di channel stopper (11) di materiale dielettrico.

3. Fotodiodo secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui il corpo comprende un substrato (2) affacciato alla seconda superficie (2a) ed avente un primo livello di drogaggio ed un primo strato epitassiale (3), sovrastante il substrato ed avente un secondo livello di drogaggio minore del primo livello di drogaggio di almeno tre ordini di grandezza.

4. Fotodiodo secondo la rivendicazione 3, in cui il corpo (5) comprende inoltre un secondo strato epitassiale (4) avente un terzo livello di drogaggio compreso tra detti primo e secondo livello di drogaggio.

5. Fotodiodo secondo la rivendicazione 4, in cui detta regione di isolamento laterale (10) si estende all'interno di detto primo e secondo strato epitassiale (3,4), almeno fino a detto substrato (2).

6. Fotodiodo secondo la rivendicazione 5, in cui la regione di isolamento laterale (10) si estende parzialmente

all'interno del substrato (2).

7. Schiera (220) di fotodiodi (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti.

8. Sistema (500) di rivelazione di fotoni comprendente:

- un'unità di elaborazione (520);
- una schiera (220) di fotodiodi (1) secondo la rivendicazione 7, accoppiata a detta unità di elaborazione (520);
- un alimentatore (510) accoppiato a detta unità di elaborazione (520) e a detta schiera di fotodiodi.

9. Procedimento per la fabbricazione di un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger, comprendente le fasi di:

- formare un corpo (5) di materiale semiconduttore di un primo tipo di conducibilità e avente una prima ed una seconda superficie (4a, 2a);
- formare, all'interno di detto corpo, una trincea (45) a partire da detta prima superficie
- formare una regione isolante (11), di materiale dielettrico, all'interno della trincea;
- riempire detta trincea con una regione conduttiva (13) circondata dalla regione isolante, in modo da formare una regione di isolamento laterale (10) delimitante, in detto corpo, una regione attiva (6); e

- formare, all'interno della regione attiva, una regione di anodo (14) di un secondo tipo di conducibilità, affacciata a detta prima superficie, una regione di catodo (2,3,4,16,31) estendendosi in detta regione attiva fra detta regione di anodo e la seconda superficie e definendo un resistore di soppressione (29) verticale;

caratterizzato dal fatto di formare una regione di contatto (22b), di materiale conduttore, al di sopra di detta prima superficie ed in contatto diretto con detta regione conduttiva.

10. Procedimento secondo la rivendicazione 9, in cui detta regione conduttiva (13) è di metallo e detta regione isolante (11) è di materiale dielettrico.

11. Procedimento secondo la rivendicazione 9 o 10, in cui detta fase di formare un corpo (5) comprende formare un substrato (2) avente un primo livello di drogaggio, il substrato definendo la seconda superficie (2a); e formare un primo strato epitassiale (3) al di sopra del substrato, il primo strato epitassiale avendo un secondo livello di drogaggio minore del primo livello di drogaggio di almeno tre ordini di grandezza.

12. Procedimento secondo la rivendicazione 11, in cui detta fase di formare un corpo (5) comprende inoltre formare un secondo strato epitassiale (4) di un terzo livello di drogaggio compreso tra il primo e il secondo

livello di drogaggio, al di sopra del primo strato epitassiale (3).

13. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 9-12, in cui detta fase di formare una regione isolante (11) comprende crescere un primo strato di rivestimento (11a) di materiale dielettrico all'interno di detta trincea (45), e depositare uno secondo strato di rivestimento (11b) all'interno di detta trincea al di sopra di detto primo strato di rivestimento.

14. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 9-13, comprendente inoltre la fase di realizzare una regione di contatto di catodo (31) tramite impiantazione di specie ioniche droganti in detto corpo a partire dalla seconda superficie (2a), realizzando contemporaneamente una fase di gettering.

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

Elena CERBARO

CLAIMS

1. A Geiger-mode avalanche photodiode, comprising:

- a body (5) of semiconductor material having a first conductivity type, a first surface (4a) and a second surface (2a);
- a trench (45) extending through said body from said first surface and surrounding an active region (6);
- a lateral-isolation region (10) within the trench, said isolation region comprising a conductive region (13) and an insulating region (11) of dielectric material, which surrounds said conductive region; and
- an anode region (14) having a second conductivity type, extending within said active region and facing said first surface;

said active region forming a cathode region extending between said anode region and the second surface and defining a vertical quenching resistor (29);

characterized by a contact region (22b) of conductive material, overlying said first surface (4a) and in direct contact with said conductive region, and configured to be electrically connected to an external biasing circuit biasing the conductive region at a gate voltage (V_G) such as to create a depletion region (33) in said active region around said insulating region, thus varying the resistance of said quenching resistor.

2. The photodiode according to claim 1, wherein said conductive region is formed by a metal region (13) and said insulating region is formed by a channel-stopper region (11) of dielectric material.

3. The photodiode according to claim 1 or 2, wherein the body comprises a substrate (2) facing the second surface (2a) and having a first doping level, and a first epitaxial layer (3), overlying the substrate and having a second doping level lower than the first doping level by at least three orders of magnitude.

4. The photodiode according to claim 3, wherein the body (5) further comprises a second epitaxial layer (4) having a third doping level comprised between said first and second doping. Levels.

5. The photodiode according to claim 4, wherein said lateral-isolation region (10) extends within said first epitaxial layer (3) and said second epitaxial layer (4), at least up to said substrate (2).

6. The photodiode according to claim 5, wherein the lateral-isolation region (10) extends partially within the substrate (2).

7. An array (220) of photodiodes (1) according to any one of the preceding claims.

8. A photon-detection system (500) comprising:

- a processing unit (520);

- an array (220) of photodiodes (1) according to claim 7, coupled to said processing unit (520); and
- a power supply (510) coupled to said processing unit (520) and to said photodiode array.

9. A method for manufacturing a Geiger-mode avalanche photodiode, comprising the steps of:

- forming a body (5) of semiconductor material having with a first conductivity type, a first surface (4a) and a second surface (2a);
 - forming, within said body, a trench (45) extending from said first surface;
 - forming an insulating region (11) of dielectric material within the trench;
 - filling said trench with a conductive region (13) surrounded by the insulating region so as to form a lateral-isolation region (10) delimiting, in said body, an active region (6); and
 - forming, within the active region, an anode region (14) having a second conductivity type and facing said first surface, a cathode region (2, 3, 4, 16, 31) extending in said active region between said anode region and the second surface and defining a vertical quenching resistor (29);
- characterized in that a contact region (22b) of conductive material is formed on said first surface and in direct contact with said conductive region.

10. The method according to claim 9, wherein said conductive region (13) is of metal, and said insulating region (11) is of dielectric material.

11. The method according to claim 9 or 10, wherein said step of forming a body (5) comprises forming a substrate (2) having a first doping level, the substrate defining the second surface (2a); and forming a first epitaxial layer (3) on the substrate, the first epitaxial layer having a second doping level lower than the first doping level by at least three orders of magnitude.

12. The method according to claim 11, wherein said step of forming a body (5) further comprises forming a second epitaxial layer (4) of a third doping level comprised between the first and the second doping levels, on the first epitaxial layer (3).

13. The method according to any of claims 9-12, wherein said step of forming an insulating region (11) comprises growing a first coating layer (11a) of dielectric material within said trench (45), and depositing a second coating layer (11b) within said trench on said first coating layer.

14. The method according to any of claims 9-13, further comprising the step of providing a cathode contact region (31) by implanting dopant ionic species in said body from the second surface (2a), simultaneously performing a gettering step.

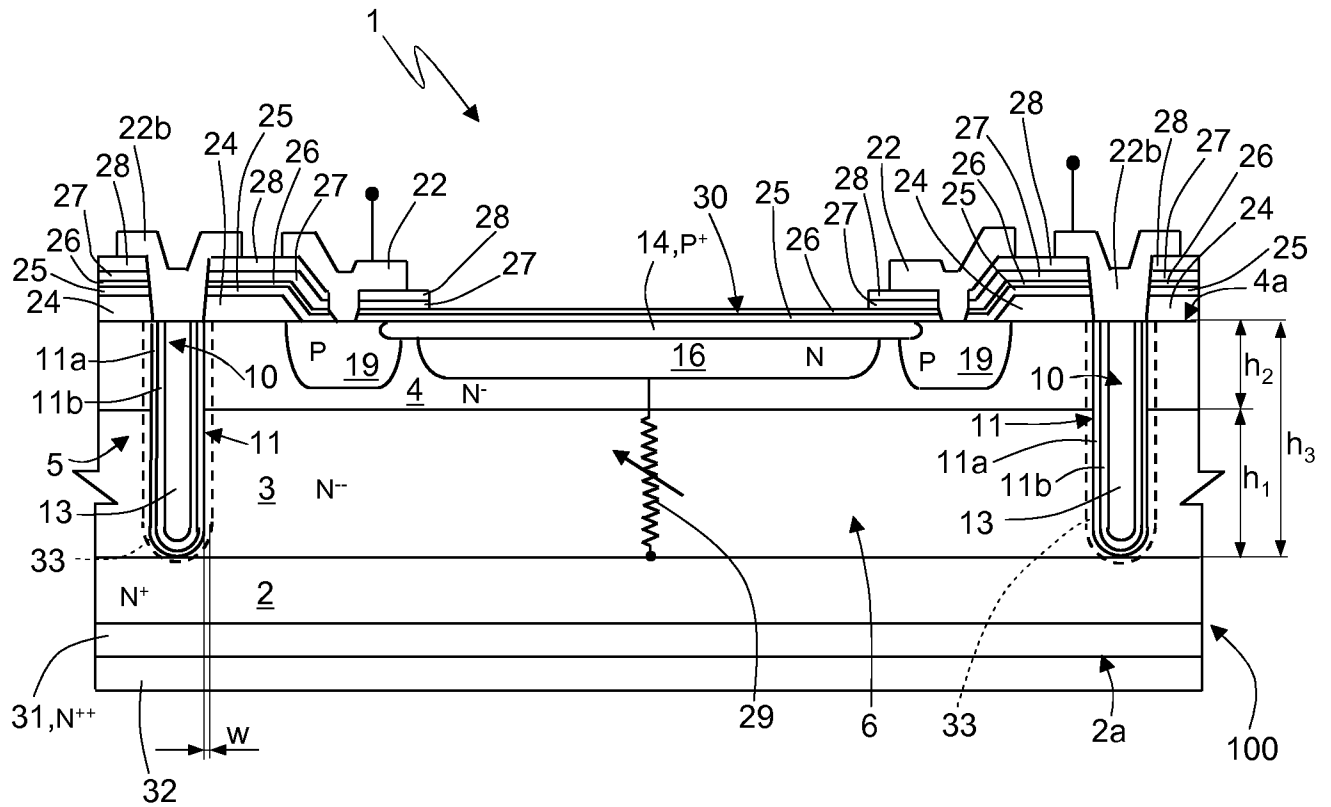


Fig.1

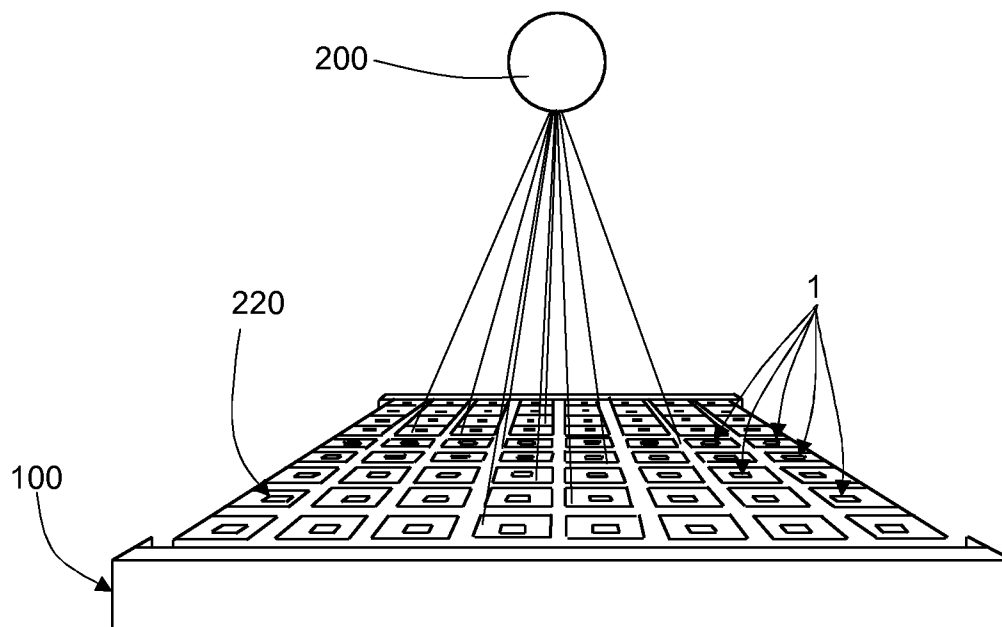


Fig.2

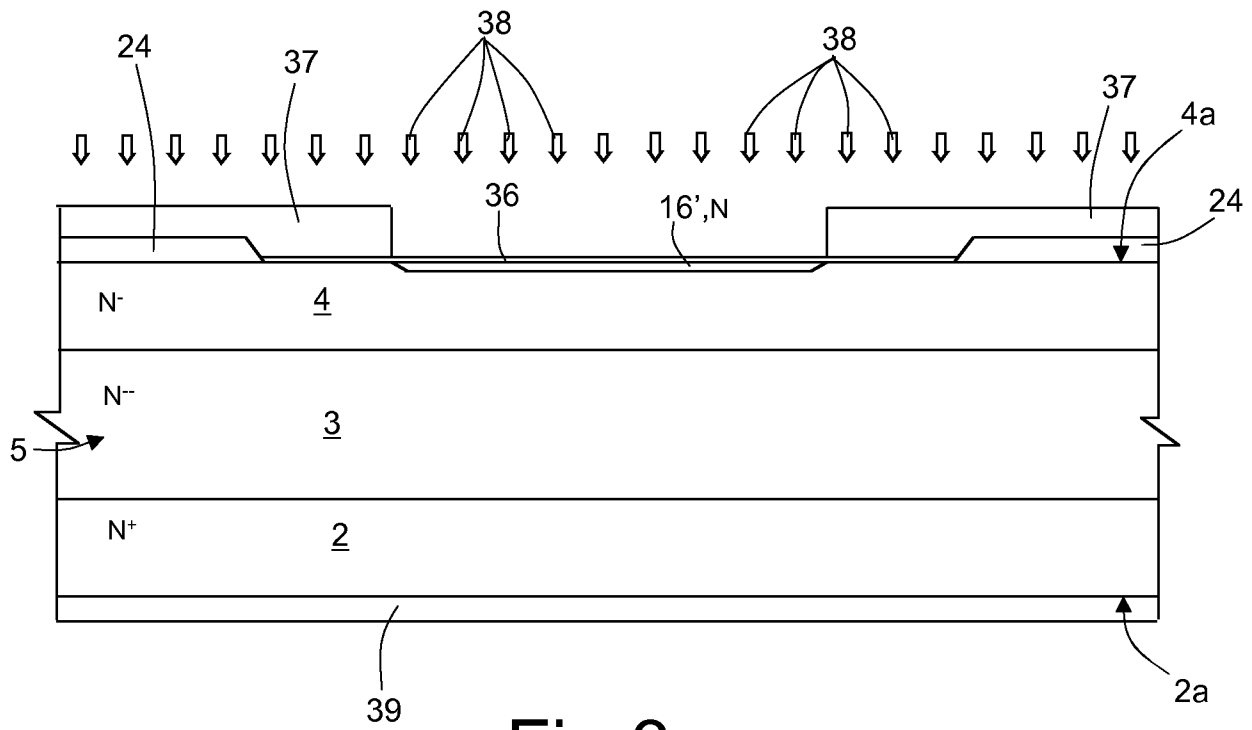


Fig.3

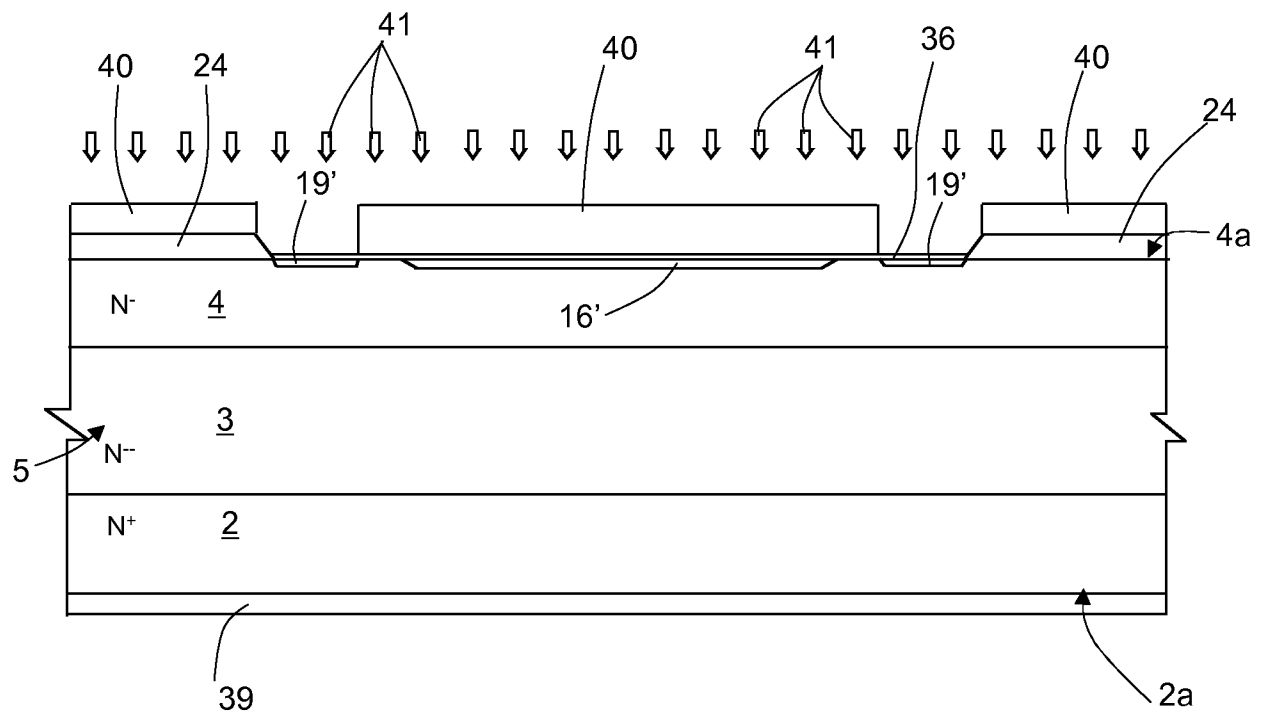


Fig.4

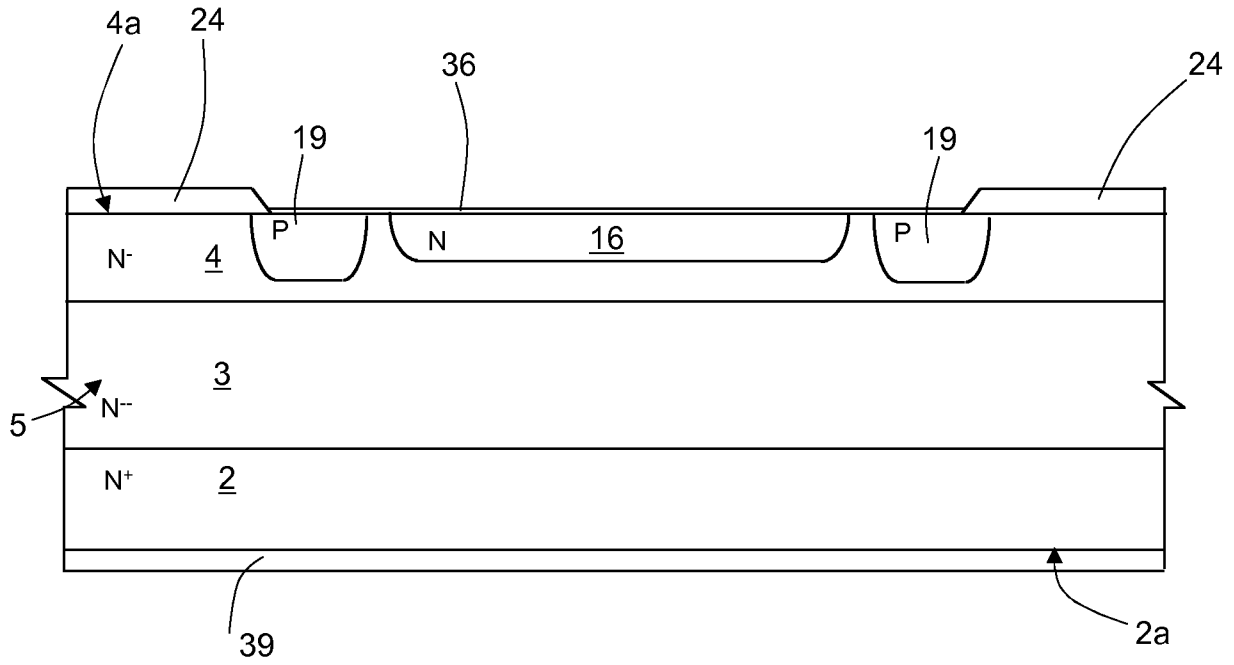


Fig.5

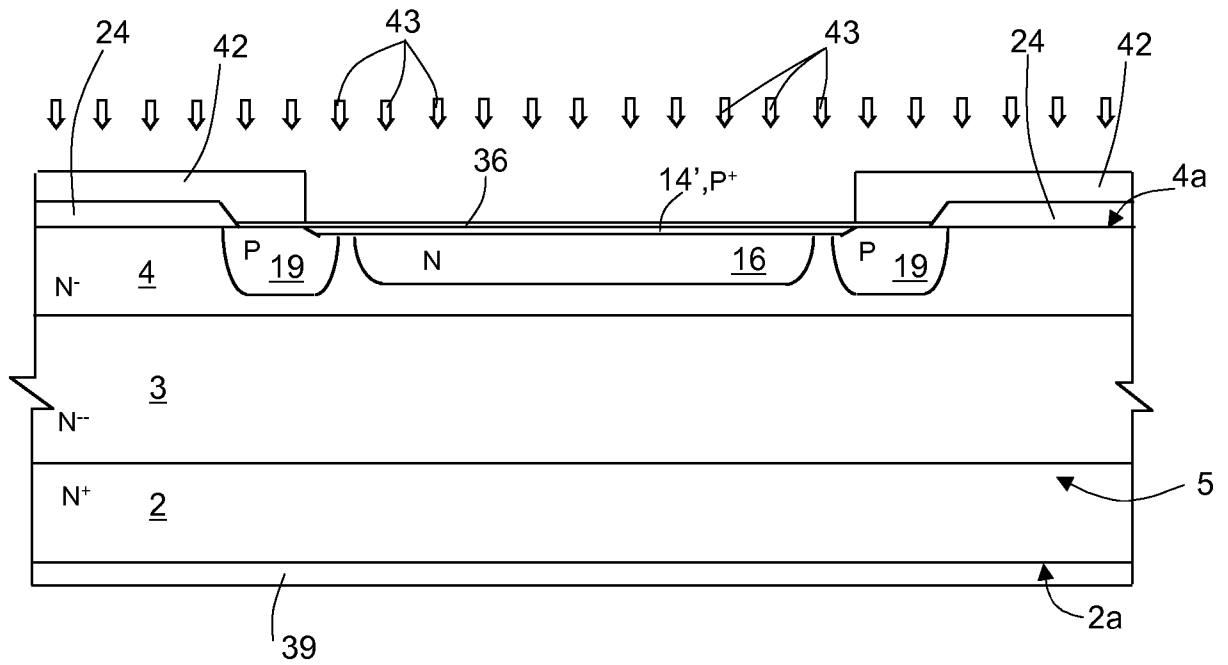


Fig.6

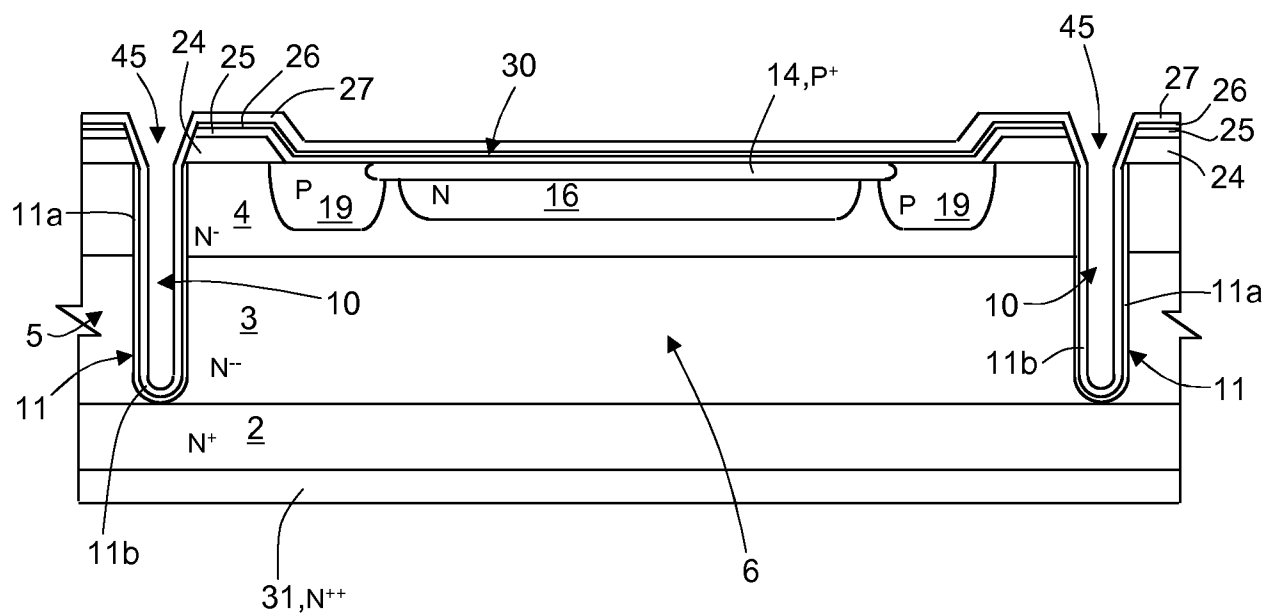


Fig.9

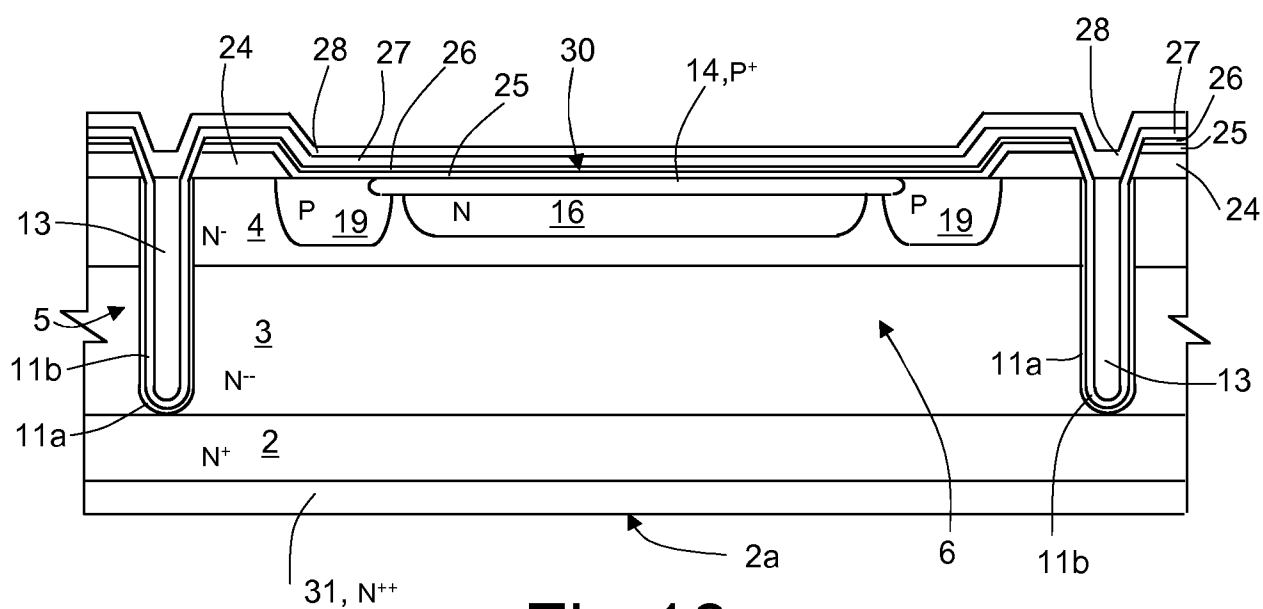


Fig.10

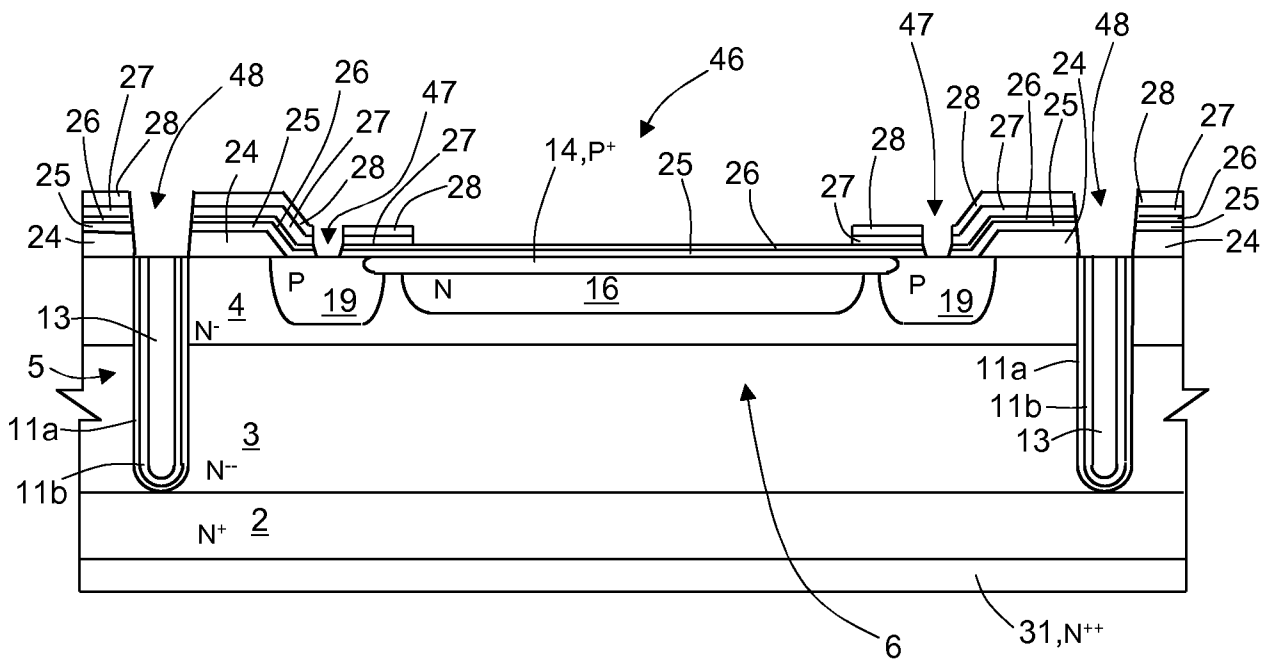


Fig. 11

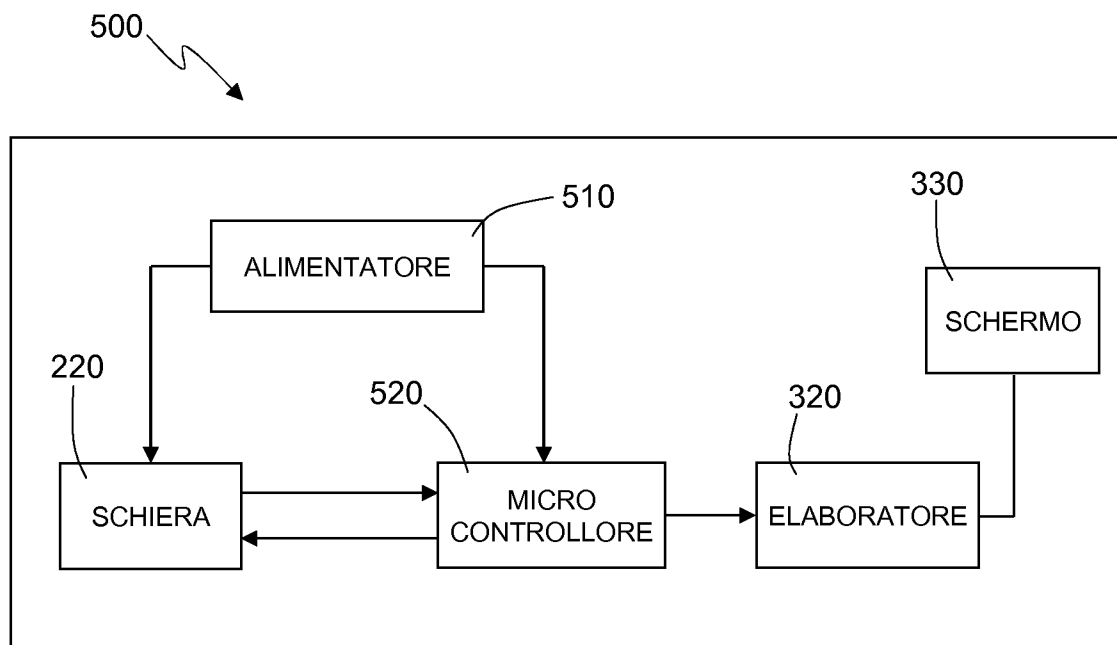


Fig.12