

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901824920A1

Publication Date

20110930

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

FOTODIODO A VALANGA OPERANTE IN MODALITA' GEIGER AD ELEVATO
RAPPORTO SEGNALE RUMORE E RELATIVO PROCEDIMENTO DI
FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"FOTODIODO A VALANGA OPERANTE IN MODALITA' GEIGER AD ELEVATO
RAPPORTO SEGNALE RUMORE E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"
di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: MAZZILLO Massimo Cataldo, SANFILIPPO Delfo Nunziato

* * *

La presente invenzione è relativa ad un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger ad elevato rapporto segnale rumore, e al relativo procedimento di fabbricazione.

Come è noto, nel campo tecnico della rilevazione 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 i cosiddetti fotodiodi a valanga operanti in modalità Geiger ("Geiger-mode avalanche photodiode", GM-APD), teoricamente in grado di consentire la rivelazione di singoli fotoni.

Un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger,

anche noto come diodo a valanga a singolo fotone ("Single Photon Avalanche Diode", SPAD), è formato da un fotodiodo a valanga APD, dunque comprende una giunzione di materiale semiconduttore, la quale presenta una tensione di rottura ("breakdown") V_B ed è polarizzata, in uso, con una tensione di polarizzazione inversa V_A superiore in modulo alla tensione di rottura V_B della giunzione (la quale, come è noto, dipende dal materiale semiconduttore e dal livello di drogaggio della regione meno drogata della giunzione stessa), tipicamente superiore del 10-20%. In tal modo, la giunzione presenta una regione svuotata particolarmente estesa, al cui interno è presente un campo elettrico non trascurabile. Perciò, la generazione di una singola coppia elettrone-lacuna ("electron-hole pair"), causata dall'assorbimento all'interno della regione svuotata di un fotone incidente sul fotodiodo SPAD all'interno della regione svuotata, può essere sufficiente per innescare un processo di ionizzazione. Tale processo di ionizzazione causa a sua volta una moltiplicazione a valanga dei portatori, con guadagni nell'intorno di 10^6 , e la conseguente generazione in tempi rapidi (centinaia di picosecondi) della cosiddetta corrente di valanga, o più precisamente di un impulso della corrente di valanga.

Tale corrente di valanga può essere opportunamente raccolta, tipicamente mediante una circuiteria esterna

collegata alla giunzione, ad esempio mediante opportuni contatti di anodo e di catodo, e rappresenta un segnale di uscita del fotodiodo SPAD, al quale ci si riferisce anche come alla corrente di uscita. In pratica, in linea di principio, per ogni fotone assorbito, si genera un impulso della corrente di uscita del fotodiodo SPAD.

Si noti che, a rigore, ai capi della giunzione è presente una tensione effettiva V_e , la quale coincide con la tensione di polarizzazione inversa V_A solo in assenza di fotoni. Infatti, in presenza di fotoni, e dunque di corrente generata all'interno del fotodiodo SPAD, la tensione effettiva V_e ai capi della giunzione risulta inferiore, in modulo, rispetto alla tensione di polarizzazione inversa V_A . Tuttavia, nel presente documento si assume, salvo laddove detto esplicitamente, che la tensione effettiva V_e ai capi delle giunzione coincida con la tensione di polarizzazione inversa V_A .

Si noti altresì che, alla generazione della corrente di uscita, o meglio di corrispondenti impulsi della corrente di uscita, possono concorrere non solo entrambi i portatori di ciascuna coppia elettrone-lacuna generatasi in seguito all'assorbimento di un fotone all'interno della regione svuotata, bensì, stante la polarizzazione inversa della giunzione, anche i portatori minoritari delle coppie elettrone-lacune generatesi in seguito all'assorbimento di

un fotone al di fuori della regione svuotata, dunque in una regione quasi neutra, cioè con campo elettrico sostanzialmente nullo. Ad esempio, assumendo una giunzione di tipo PN con la regione P disposta, rispetto alla direzione di propagazione dei fotoni, a monte della regione N, possono contribuire alla corrente di uscita sia gli elettroni delle coppie elettrone-lacuna generate nella porzione non svuotata della regione P della giunzione (anche nota come strato morto, "dead layer"), sia le lacune delle coppie elettrone-lacuna generate nella porzione non svuotata della regione N della giunzione (generalmente nota come "epilayer").

In particolare, i summenzionati portatori minoritari possono causare la generazione di corrispondenti impulsi di corrente di uscita qualora riescano a diffondere fino a raggiungere la regione svuotata, prima di ricombinarsi. Tuttavia, sebbene possano contribuire anch'essi alla rilevazione di fotoni, i portatori minoritari delle coppie elettrone-lacune generatesi al di fuori della regione svuotata necessitano, per poter raggiungere la regione svuotata, di tempi di diffusione variabili (a seconda del punto di generazione e del livello di drogaggio) tra centinaia di picosecondi e decine di nanosecondi, dunque possono essere raccolti ai terminali di anodo e di catodo con notevoli ritardi. In tal modo, si verifica un

deterioramento delle prestazioni dei fotodiodi SPAD in termini di rapidità nel generare di un impulso di corrente di uscita in seguito all'assorbimento di un fotone, cioè in termini del cosiddetto tempo di risposta ("timing") del fotodiodo SPAD. In particolare, si verifica la generazione, nella corrente di uscita, delle cosiddette code di diffusione ("diffusion tail").

Il fatto che la tensione di polarizzazione inversa V_A sia apprezzabilmente superiore alla tensione di rottura 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, ed in particolare abbassando, 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. 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"), siano essi di tipo attivo o passivo. In particolare, nel caso di circuiti di soppressione di tipo passivo, è comune impiegare resistori di soppressione, come descritto ad esempio nelle domande di brevetto italiano T009A000322 e T008A000945, a nome della Richiedente e depositate rispettivamente il 23 Aprile 2009 e il 17 Dicembre 2008.

Come è noto, il guadagno e la probabilità di rilevare un fotone, cioè la sensibilità del fotodiode SPAD, sono direttamente proporzionali al valore di tensione di polarizzazione inversa V_A applicata al fotodiode SPAD. Infatti, tanto più la tensione di polarizzazione inversa V_A eccede, in modulo, la tensione di rottura V_B , tanto più è probabile che si verifichi una generazione a valanga di portatori di carica, dal momento che comporta un ampliamento della regione svuotata e del campo elettrico ivi presente.

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.

In particolare, la generazione della corrente di buio può avvenire, oltre che nel caso in cui il summenzionato portatore generato termicamente sia generato all'interno della regione svuotata, anche nel caso in cui tale portatore generato termicamente sia generato al di fuori della regione svuotata, e riesca comunque a diffondere fino a raggiungere la regione svuotata prima di ricombinarsi. In particolare, stante la polarizzazione inversa della giunzione del fotodiodo SPAD, alla corrente di buio possono contribuire, oltre a tutti i portatori termicamente generati nella regione svuotata della giunzione, i portatori minoritari termicamente generati al di fuori della regione svuotata, questi ultimi solamente nel già citato caso in cui riescano a diffondere fino a raggiungere la regione svuotata.

In pratica, ciascuno dei summenzionati portatori minoritari generati termicamente può generare un corrispondente impulso di corrente di uscita ("output current pulse"), al quale non corrisponde un'effettiva rilevazione di un fotone. In condizioni di buio, tali impulsi di corrente di uscita presentano una statistica di Poisson, e il relativo valore medio statistico è noto come

tasso di conteggio di buio ("dark count rate") o tasso di rumore di buio ("dark noise rate").

Da un punto vista quantitativo, le prestazioni di un generico fotodiodo SPAD sono quantificate mediante la cosiddetta efficienza quantistica di rilevazione ("Quantum Detection Efficiency", QDE), la quale è definita come il rapporto tra un primo numero di rilevazione di fotoni pari alla differenza tra il numero medio di fotoni rilevati in una unità di tempo ed il tasso di rumore di buio medio durante tale unità di tempo, e un secondo numero pari al numero medio di fotoni che effettivamente incidono sul fotodiodo SPAD in tale unità di tempo.

In maggior dettaglio, l'efficienza quantistica di rilevazione QDE è pari al prodotto di un'efficienza di assorbimento di fotoni ("photon absorption efficiency") η e di una probabilità di innesco di moltiplicazione a valanga ("avalanche triggering probability"), quest'ultima essendo definita come la probabilità che una coppia elettrone-lacuna generata nella regione di svuotamento inneschi effettivamente un processo di ionizzazione a valanga che si autosostiene; in particolare, tale probabilità non è unitaria, perché vi è una probabilità non trascurabile che i portatori della coppia perdano energia a causa di interazioni reticolari ("lattice scattering"), ricombinandosi in maniera tale per cui il processo di

ionizzazione a valanga abortisce.

Relativamente all'efficienza di assorbimento di fotoni η , essa è in prima approssimazione (trascurando il contributi dei summenzionati portatori minoritari) pari a:

$$\eta = (1-R) \cdot e^{-\alpha D} \cdot (1 - e^{-\alpha W}) \quad (1)$$

in cui: α è un coefficiente di assorbimento dei fotoni da parte del semiconduttore che forma il generico fotodiode SPAD, ed è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda dei fotoni; R è un coefficiente di riflessione di potenza relativo ad un'interfaccia aria-semiconduttore oppure aria-dielettrico qualora i fotoni incidano, prima che sulla giunzione, su uno o più strati dielettrici antiriflesso; W è lo spessore della regione svuotata, mentre D è lo spessore della porzione non svuotata della regione della giunzione che si trova a monte rispetto alla direzione di propagazione dei fotoni (in pratica, lo strato morto, cioè la porzione di semiconduttore che i fotoni devono attraversare prima di giungere nella regione svuotata).

Al fine di migliorare le prestazioni dei fotodiode SPAD, ed in particolare al fine di ottimizzare il rapporto segnale rumore ("signal to noise ratio"), cioè il rapporto tra una corrente di uscita efficace relativa al solo assorbimento di fotoni, e la corrente di buio, è quindi opportuno limitare quanto più possibile le difettosità reticolari dei fotodiode SPAD stessi. Infatti, il

principale contributo al tasso di conteggio di buio è dato dal cosiddetto fenomeno di generazione Shockley-Read-Hall (SRH) attraverso i cosiddetti centri di generazione e ricombinazione ("generation recombination center", G-R center), i quali sono disposti all'interno della banda proibita del materiale semiconduttore che forma la giunzione del fotodiodo SPAD, e sono causati dalle imperfezioni reticolari. Riducendo il tasso di conteggio di buio, si incrementa la durata del cosiddetto intervallo di quiescenza, cioè l'intervallo di tempo medio che intercorre tra due successivi impulsi di corrente di uscita (in condizioni di buio). Dal momento che, durante l'intervallo di quiescenza, è possibile rilevare correttamente l'arrivo dei fotoni, tanto minore è il tasso di conteggio di buio, tanto maggiore è la probabilità di assorbire fotoni e di innescare il processo di ionizzazione a valanga, migliorando le prestazioni complessive dei fotodiodi SPAD in termini di rapporto segnale rumore. A tal proposito, a parità di tasso di conteggio di buio, il rapporto segnale rumore può essere migliorato incrementando l'efficienza quantistica di rilevazione QDE.

Tradizionalmente, le giunzioni dei fotodiodi SPAD di tipo noto sono formate mediante processi di impiantazione ionica diretta, dunque comportano l'inevitabile introduzione di imperfezioni reticolari, nonostante

l'esecuzione di successivi trattamenti termici per l'annealing dei difetti e l'attivazione delle impurità. Inoltre, principalmente a causa dei summenzionati trattamenti termici, i fotodiodi SPAD presentano rispettive giunzioni tali per cui i relativi strati morti hanno spessori non trascurabili (fino a qualche centinaio di nanometri), con conseguente decremento dell'efficienza quantistica di rilevazione QDE, e quindi decremento del rapporto segnale rumore, in particolare per quanto concerne fotoni altamente energetici (ad esempio, fotoni nel cosiddetto ultravioletto prossimo al blu, "blue-near ultraviolet"). Ancora, la presenza di strati morti con spessori non trascurabili comporta correnti di buio non trascurabili, nonché possibili deterioramenti delle prestazioni in termini di tempi di risposta, a causa della generazione di code di diffusione.

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

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

soppressione (ad esempio, di tipo verticale) 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.

In pratica, il fotomoltiplicatore SiPM è 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; tuttavia i fotomoltiplicatori SiPM presentano i medesimi inconvenienti dei fotodiodi SPAD che li formano.

Scopo della presente invenzione è fornire un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger ed un processo di fabbricazione che consentano di risolvere almeno in parte gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo l'invenzione, vengono realizzati un fotodiodo a valanga operante in modalità Geiger, un sistema di rilevazione di fotoni che utilizza il fotodiodo, ed il

relativo procedimento di fabbricazione, come definiti, rispettivamente, nelle rivendicazioni 1, 15 e 16.

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 una forma di realizzazione del presente fotodiodo del tipo a valanga;

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

- la figura 3 mostra una vista dall'alto di una porzione del fotodiodo mostrato in figura 1;

- la figura 4 mostra una sezione trasversale di un'ulteriore porzione del fotodiodo 1 mostrato in figura 1;

- le figure 5 e 6 mostrano sezioni trasversali di ulteriori forme di realizzazione del presente fotodiodo del tipo a valanga;

- le figure 7-25 mostrano sezioni trasversali di un fotodiodo del tipo a valanga durante successive fasi di fabbricazione; e

- la figura 26 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 quale può essere formata, ad esempio, da uno scintillatore, come descritto in seguito. 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 che include un substrato 2 di materiale semiconduttore, di tipo P++ (ad esempio drogato con boro), avente una superficie inferiore 2a ed un primo spessore h_2 compreso ad esempio tra 300 μ m e 500 μ m. Inoltre, il fotodiodo 1 include un primo strato epitassiale 4, di tipo N+ (ad esempio, drogato con fosforo), avente uno spessore h_4 compreso ad esempio tra 8 μ m e 12 μ m, e sovrastante, in contatto diretto, il substrato 2; e un secondo strato epitassiale 6, di tipo N-, avente una superficie superiore 6a e uno spessore h_6 compreso ad esempio tra 3 μ m e 5 μ m, e sovrastante, in contatto diretto, il primo strato epitassiale 4.

In maggior dettaglio, il substrato 2 può avere un rispettivo livello di drogaggio compreso tra 10^{19}cm^{-3} e 10^{20}cm^{-3} , in maniera tale da definire un buon contatto ohmico di fondo ("bottom ohmic contact"); il primo strato epitassiale 4 può avere un rispettivo livello di drogaggio

compreso tra 10^{16}cm^{-3} e $5\cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}$. Il secondo strato epitassiale può avere, invece, un rispettivo livello di drogaggio compreso tra $1\cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$ e $3\cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$.

Il substrato 2, il primo ed il secondo strato epitassiale 4, 6 formano in pratica un corpo 8 di materiale semiconduttore, compreso tra la superficie inferiore 2a e la superficie superiore 6a.

Una regione superiore di anodo 10, di tipo P+ (ad esempio, drogata con boro) e con livello di drogaggio ad esempio pari a circa $2\cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$, si affaccia alla superficie superiore 6a e si estende all'interno del secondo strato epitassiale 6.

Come mostrato in maggior dettaglio e a titolo esemplificativo in figura 3, la regione superiore di anodo 10 può comprendere un anello esterno 12 con forma rettangolare e spessore s. L'anello esterno 12 può comunque avere forme differenti, quali ad esempio una forma circolare o poligonale; inoltre, l'anello esterno 12 non ha necessariamente forma chiusa.

Inoltre, la regione superiore di anodo 10 comprende una pluralità di regioni a striscia ("strip") 14 disposte, in vista dall'alto, all'interno dell'anello esterno 12, al quale sono ohmicamente collegate. Le regioni a striscia 14 e l'anello esterno 12 si estendono all'interno del secondo strato epitassiale 6 a partire dalla superficie superiore

6a, con una profondità d_r (figura 4) che può essere compresa tra $0,15\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$, ad esempio pari a $0,2\mu\text{m}$. Coppie di regioni a striscia 14 adiacenti sono separate da un rispettivo interstizio 16, il quale si estende nel secondo strato epitassiale 6 a partire dalla superficie superiore 6a, con la medesima profondità delle regioni a striscia 14.

Come mostrato a titolo esemplificativo in figura 3, le regioni a striscia 14, e di conseguenza anche gli interstizi 16, possono avere forma, in vista dall'alto, di rettangolo con larghezza d_s (misurata lungo l'asse x del sistema di riferimento xyz mostrato nelle figure 1 e 2), ad esempio pari a $1\mu\text{m}$. Inoltre, le regioni a striscia 14 possono essere uguali e parallele tra loro; è altresì possibile che tra coppie di regioni a striscia 14 adiacenti siano presenti interstizi 16 uguali.

A titolo esemplificativo, e con particolare riferimento alla forma di realizzazione mostrata in figura 3, è possibile che tutti gli interstizi 16 abbiano forma, in vista dall'alto, rettangolare, e larghezza pari a d_i , la quale può essere compresa tra $2,5\mu\text{m}$ e $3,5\mu\text{m}$; ad esempio, larghezza d_i può essere pari all'incirca a $3\mu\text{m}$. E' inoltre possibile definire un primo interstizio 16a e un secondo interstizio 16b, i quali a rigore non separano coppie di regioni a striscia 14 adiacenti, bensì separano dall'anello

esterno 12 rispettivamente una prima regione a striscia 14a e una seconda regione a striscia 14b, tali prima e seconda regione a striscia 14a, 14b essendo, tra tutte le regioni a striscia 14, le regioni a striscia più prossime, rispettivamente, a un primo ed un secondo lato dell'anello esterno 12, tra loro opposti e paralleli alle regioni a striscia 14 stesse. Anche tali primo e secondo interstizio 16a, 16b possono avere larghezza pari a d_i .

Analoghe considerazioni possono essere fatte nel caso in cui l'anello esterno 12 abbia ad esempio forma, in vista dall'alto, circolare, nel qual caso sia le regioni a striscia 14 che gli interstizi 16 hanno forma, in vista dall'alto, di sezioni circolari a due basi, mentre il primo ed il secondo interstizio hanno forma di sezione circolare ad una base. Anche in tale caso, come pure nel caso in cui, in generale, la forma della regione superiore di anodo 10 non sia regolare, è comunque possibile definire una larghezza massima d_{max} , la quale indica la larghezza massima in assoluto tra le larghezze massime di tutti gli interstizi 16 presenti all'interno della regione superiore di anodo 10.

Una regione arricchita di contatto di anodo 18, di tipo P++ (ad esempio drogata con boro), si estende nel secondo strato epitassiale 6, al di sotto di ed in contatto diretto con l'anello esterno 12 della regione superiore di

anodo 10. Ad esempio, la regione arricchita di contatto di anodo 18 può avere la medesima forma dell'anello esterno 12 della regione superiore di anodo 10, e può avere livello di drogaggio di picco all'incirca pari a $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

Una regione arricchita 20, di tipo N (ad esempio, drogata con fosforo), si estende nel secondo strato epitassiale 6, al di sotto della ed in contatto diretto con la regione superiore di anodo 10. In vista dall'alto, la regione arricchita 20 presenta una forma circolare o poligonale, ad esempio uguale alla forma dell'anello esterno 12 della regione superiore di anodo 10, al cui interno risulta compresa (in vista dall'alto). Più in dettaglio, la regione arricchita di contatto di anodo 18 si estende nel secondo strato epitassiale 6 esternamente e contigua alla regione arricchita 20. Inoltre, in corrispondenza degli interstizi 16, la regione arricchita 20 si estende nel secondo strato epitassiale 6 direttamente a partire dalla superficie superiore 6a, riempiendo dunque gli interstizi 16 stessi. Ancora, la regione arricchita 20 può avere livello di drogaggio di picco all'incirca pari a $4 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$.

Ai fini pratici, la regione superiore di anodo 10 e la regione arricchita di contatto di anodo 18 formano una regione di anodo di una prima giunzione PN, destinata a ricevere fotoni e a generare la corrente di valanga, come

descritto in seguito. Inoltre, tale regione di anodo è in contatto elettrico con una metallizzazione di anodo 22, mediante la quale è possibile polarizzare la prima giunzione PN; in particolare, è possibile collegare la metallizzazione di anodo 22 ad un circuito esterno di polarizzazione di giunzione (non mostrato), come descritto in seguito. A titolo di precisazione, in uso i fotoni incidono sul fotodiodo 1 con verso opposto al verso del versore z mostrato in figura 1, in maniera tale per cui, rispetto alla direzione ed al verso di propagazione dei fotoni, la superficie superiore 6a risulta a monte dalla superficie inferiore 2a.

Un anello di guardia 24 di forma circolare o poligonale, di tipo P- (ad esempio, drogato con boro), si estende nel secondo strato epitassiale 6, esternamente e contiguo alla regione arricchita 20. In maggior dettaglio, l'anello di guardia 24 risulta in parte affacciato alla superficie superiore 6a, ed in parte sottostante all'anello esterno 12 della regione superiore di anodo 10 ed alla regione arricchita di contatto di anodo 18, con i quali è in contatto diretto. Inoltre, l'anello di guardia 24 può avere livello di drogaggio di picco all'incirca pari a $7 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$.

Operativamente, l'anello di guardia 24 forma un diodo PN con il secondo strato epitassiale 6, in modo da

prevenire il rottura di bordo ("edge breakdown") della regione di anodo della summenzionata prima giunzione PN.

Esternamente all'anello di guardia 24, una regione profonda ("sinker region") 26, di tipo N+ (ad esempio drogata con fosforo) e di forma, in vista dall'alto, circolare o poligonale, si estende nel secondo strato epitassiale 6 a partire dalla superficie superiore 6a, fino a contattare il primo strato epitassiale 4. Inoltre, la regione profonda 26 è in contatto elettrico diretto con una metallizzazione di catodo 28, la quale può essere posta a contatto con il summenzionato circuito esterno di polarizzazione di giunzione. Ancora, la regione profonda 26 può avere livello di drogaggio di picco all'incirca pari a $3 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

In pratica, il primo strato epitassiale 4, il secondo strato epitassiale 6, la regione arricchita 20 e la regione profonda 26 formano una regione di catodo della summenzionata prima giunzione PN. Pertanto, in uso, la prima giunzione PN viene polarizzata mediante il circuito esterno di polarizzazione di giunzione, il quale applica tra la metallizzazione di anodo 22 e la metallizzazione di catodo 28 una tensione di polarizzazione inversa V_A superiore, in modulo, alla tensione di rottura V_B della prima giunzione PN, la quale in prima approssimazione dipende dal livello di drogaggio della regione arricchita

20.

Ancora con riferimento alla prima giunzione PN, la regione superiore di anodo 10 presenta una sorta di geometria modellata ("patterned") grazie alla presenza delle regioni a striscia 14 e dell'anello esterno 12. In tal modo, la prima giunzione PN presenta un'interfaccia di giunzione, cioè una superficie che separa la regione di anodo dalla regione di catodo, con un'area di giunzione superiore a quanto ottenibile in caso di giunzione piana, dunque migliorando l'efficienza quantistica di rilevazione QDE, in particolare nel caso di fotoni altamente energetici. In pratica, l'area di giunzione può risultare superiore alla cosiddetta area attiva del fotodiodo 1, cioè l'area all'interno della quale i fotoni incidenti sul fotodiodo 1 devono passare per poter essere rilevati. In prima approssimazione, l'area attiva è definita dall'area della regione arricchita 20, a meno delle porzioni di metallizzazione di anodo 22 che possono estendersi marginalmente su porzioni esterne della regione arricchita 20.

Le forme e le disposizioni dell'anello esterno 12, delle regioni a striscia 14 e, dunque, degli interstizi 16, sono inoltre tali per cui, quando il circuito esterno di polarizzazione di giunzione polarizza la prima giunzione PN con una tensione almeno pari, in modulo, alla tensione di

rottura V_B della prima giunzione PN, nella prima giunzione PN si forma una regione svuotata la quale, in corrispondenza degli interstizi 16, si affaccia sulla superficie superiore 6a. In altre parole, alla tensione di rottura V_B , tale regione svuotata si estende, a partire dall'interfaccia di giunzione (e quindi, a partire dalle regioni a striscia 14), all'interno della regione di catodo con una profondità W_N almeno pari alla metà della larghezza massima d_{max} , come mostrato a titolo esemplificativo in figura 4, in cui si fa riferimento alla forma di realizzazione mostrata in figura 3, per la quale vale $d_{max}=d_i$.

A titolo esemplificativo, in figura 4 sono mostrati una prima ed una seconda regione adiacente tra le regioni a striscia 14, indicate rispettivamente con 14c e 14d, all'interno delle quali la regione svuotata si estende, a partire dall'interfaccia di giunzione, con uno spessore W_p ; inoltre, sempre a partire dall'interfaccia di giunzione, la regione svuotata si estende nella regione di catodo, ed in particolare nella regione arricchita 20, con uno spessore W_N almeno pari a $d_i/2$.

In altre parole, per tensioni di polarizzazione inversa V_A almeno pari, in modulo, alla tensione di rottura V_B della prima giunzione PN, si ottengono elevati rapporti segnale rumore, in particolare nel caso di fotoni altamente

energetici, i quali hanno alte probabilità di essere assorbiti appena al di sotto della superficie superiore 6a, e basse probabilità di poter penetrare maggiormente all'interno del fotodiodo 1 (ad esempio fino a raggiungere il primo strato epitassiale 4), a causa degli elevati coefficienti di assorbimento α . In maggior dettaglio, i fotoni altamente energetici hanno maggiori probabilità di essere assorbiti nella regione svuotata della prima giunzione PN, con conseguente incremento della probabilità di innesco di moltiplicazione a valanga, e quindi dell'efficienza quantistica di rilevazione QDE. Inoltre, in prima approssimazione il fotodiodo 1 non presenta alcuno strato morto, se non per le porzioni non svuotate delle regioni a striscia 14 e dell'anello esterno 12, le quali hanno profondità pari a $d_f - W_p$.

Ancora con riferimento alla prima giunzione PN, il livello di drogaggio del primo stato epitassiale 4 assolve la funzione di fornire alla corrente di valanga un cammino a bassa resistenza tra la metallizzazione di anodo 22 e la metallizzazione di catodo 28. Una funzione analoga è assolta dalla regione profonda 26, la quale garantisce un buon contatto ohmico con la metallizzazione di catodo 28. Similmente, la regione arricchita di contatto di anodo 18 garantisce un buon contatto ohmico tra la regione superiore di anodo 10 della prima giunzione PN e la metallizzazione

di anodo 22. Il secondo strato epitassiale 6 assolve invece la funzione di confinare un elevato campo elettrico in prossimità della prima giunzione PN. Inoltre, la regione arricchita 20 assolve la funzione di confinare un elevato campo elettrico in prossimità dell'interfaccia di giunzione della prima giunzione PN.

Nuovamente con riferimento alla figura 1, il fotodiodo 1 comprende inoltre una regione di isolamento laterale 30, disposta esternamente ed eventualmente contigua alla regione profonda 26 (come nel caso della forma di realizzazione mostrata in figura 1). Sebbene non mostrato, è comunque possibile che, esternamente rispetto alla regione di isolamento laterale 30 stessa, si estenda una ulteriore regione profonda, cioè che la regione di isolamento laterale 30 si estenda all'interno di una regione profonda aggregata, formata dalla regione profonda 26 e dalla ulteriore regione profonda.

In dettaglio, la regione di isolamento laterale 30 ha forma, in vista dall'alto, circolare o poligonale, e si estende verticalmente nel corpo 8 con una profondità h_{30} , misurata a partire dalla superficie superiore 6a, ad esempio maggiore di h_6 e pari all'incirca a $10\mu\text{m}$. Inoltre, la regione di isolamento laterale 30 può avere larghezza all'incirca pari a $1\mu\text{m}$.

La regione di isolamento laterale 30 comprende una

regione di channel stopper 32 disposta più esternamente, di materiale dielettrico, ad esempio ossido, ed in contatto diretto con il primo ed il secondo strato epitassiale 4, 6. Inoltre, la regione di isolamento laterale comprende una regione metallica 34, ad esempio di tungsteno, riempiente la e circondata dalla regione di channel stopper 32, ed inoltre in contatto diretto con uno strato dielettrico descritto in dettaglio in seguito e menzionato poi come quarto strato dielettrico 50, il quale può avere uno spessore all'incirca pari a 500nm.

La regione di channel stopper 32 è formata da un doppio strato: uno strato di rivestimento sottile 36, ad esempio di ossido termico, disposto più esternamente, ed uno strato di rivestimento spesso 38, ad esempio di ossido TEOS, disposto più internamente. Lo spessore dello strato di rivestimento sottile 36 si aggira nell'ordine dei 15-25nm, mentre lo spessore dello strato di rivestimento spesso 38 è dell'ordine di poche centinaia di nanometri (ad esempio, 100-200nm).

Operativamente, la regione di isolamento laterale 30 consente, mediante la regione metallica 34, di isolare otticamente i fotodiodi 1 della schiera 220. Inoltre, l'ossido presente nel channel stopper 32 garantisce l'isolamento elettrico tra i fotodiodi 1 della schiera 220. In altre parole, la regione di isolamento laterale 30

consente di limitare gli effetti negativi sul fotodiodo 1 indotti da portatori di carica 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".

Su una regione periferica della superficie superiore 6a, lateralmente sfalsata rispetto alla regione superiore di anodo 10, ed in particolare lateralmente sfalsata rispetto all'anello esterno 12, è presente un primo strato dielettrico 40. Il primo strato dielettrico 40 si estende parzialmente al di sopra dell'anello di guardia 24 e della regione profonda 26, ma non in corrispondenza della metallizzazione di anodo 22 e della metallizzazione di catodo 28.

Un secondo strato dielettrico 42, ad esempio di biossido di silicio SiO_2 , si estende sopra la superficie superiore 6a, al di sopra del primo strato dielettrico 40, della regione superiore di anodo 10 e degli interstizi 16, a meno del contatto con la metallizzazione di anodo 22 e con la metallizzazione di catodo 28. Uno strato di rivestimento 44, ad esempio di nitrato di silicio (Si_3N_4), si estende sopra il secondo strato dielettrico 42 e forma, insieme a questo, un doppio rivestimento anti-riflessione

46 ("Double Anti Reflection Coating", DLARC).

Modulando opportunamente, in modo di per sé noto, lo spessore del secondo strato dielettrico 42 e dello strato di rivestimento 44, è possibile ottimizzare il rivestimento anti-riflessione 46, in modo che esso 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. Ad esempio, per ottimizzare l'assorbimento di fotoni con lunghezze d'onda prossime a 420nm, il secondo strato dielettrico 42 e lo strato di rivestimento 44 possono avere spessori rispettivamente pari, all'incirca, a 140nm e 60nm.

Un terzo strato dielettrico 48 (ad esempio di ossido TEOS), il quale forma uno strato unico con lo strato di rivestimento spesso 38, ed il già citato quarto strato dielettrico 50 (ad esempio di ossido TEOS) si estendono sopra lo strato di rivestimento 44, lateralmente sfalsati rispetto alla regione superiore di anodo 10, ed in particolare lateralmente sfalsati rispetto all'anello esterno 12, con cui può esserci parziale sovrapposizione, con interposizione di porzioni del secondo strato dielettrico 42 e dello strato di rivestimento 44. Tuttavia, come detto in precedenza, al di sopra della regione

profonda 26 è presente la metallizzazione di catodo 28, che attraversa il secondo, il terzo ed il quarto strato dielettrico 42, 48, 50, nonché lo strato di rivestimento 44, ed è in contatto diretto con la regione profonda 26. Similmente, al di sopra della regione metallica 34 della regione di isolamento laterale 30, la quale può estendersi anche al di sopra della superficie superiore 6a, è presente il solo quarto strato dielettrico 50, il quale è a contatto diretto con la regione metallica 34 stessa.

Al di sotto della superficie inferiore 2a e a contatto diretto con essa si estende un primo strato metallico inferiore 52, ad esempio formato di titanio. Un secondo strato metallico inferiore 54, formato ad esempio di nickel o platino, si estende al di sotto ed in contatto diretto con il primo strato metallico inferiore 52. Un terzo strato metallico inferiore 56, formato ad esempio d'oro, si estende al di sotto ed in contatto diretto con il secondo strato metallico inferiore 54. Il primo, il secondo ed il terzo strato metallico inferiore 52, 54, 56 formano una metallizzazione inferiore, e possono avere spessori rispettivamente compresi negli intervalli 50nm-100nm, 20nm-500nm e 20nm-50nm.

Operativamente, oltre alla summenzionata prima giunzione PN, il fotodiode 1 presenta una seconda giunzione PN, formata dal substrato 2 e dal primo strato epitassiale

4. Gli spessori h_2 e h_4 ed i livelli di drogaggio del substrato 2 e del primo strato epitassiale 4 sono tali per cui, polarizzando, mediante la metallizzazione di catodo 28 e la metallizzazione inferiore, la seconda giunzione PN ad una tensione nulla o blandamente negativa (pochi Volt), la regione svuotata presente in tale seconda giunzione PN non si estende fino a raggiungere il secondo strato epitassiale 6. Inoltre, anche lo spessore h_6 del secondo strato epitassiale 6 può essere determinato in modo da evitare che le regioni svuotate della prima e della seconda giunzione PN si sovrappongano, cioè in modo da mantenere disaccoppiate la prima e la seconda giunzione PN.

Operativamente, polarizzando la seconda giunzione PN ad una tensione nulla o blandamente negativa, si limita la possibilità che portatori, in particolare lacune, generati nella porzione di corpo 8 sottostante alla prima giunzione PN, contribuiscano alla corrente di valanga, e dunque al segnale di uscita. In dettaglio, tali portatori, alternativamente generati termicamente o per assorbimento di fotoni, possono diffondere e raggiungere la regione svuotata della prima giunzione PN, dove possono innescare un processo di ionizzazione a valanga che causa, rispettivamente, un incremento della corrente di buio, oppure un incremento delle code di diffusione; in quest'ultimo caso, si assiste a una limitazione della

rapidità del fotodiode 1 nel generare un impulso di corrente di uscita in seguito all'assorbimento di un fotone. In pratica, quando la seconda giunzione PN è polarizzata ad una tensione nulla o blandamente negativa, si crea un debole campo elettrico all'interfaccia tra il substrato 2 ed il primo strato epitassiale 4, il quale attrae le summenzionate lacune verso il substrato 2, quindi lontano dalla prima giunzione PN, limitando i fenomeni descritti.

Come mostrato in figura 5, è altresì possibile che il corpo 8 comprenda un terzo strato epitassiale 60, interposto tra il primo ed il secondo strato epitassiale 4, 6, ed avente la funzione di disaccoppiare la prima e la seconda giunzione PN. In tale forma realizzativa, il primo ed il secondo strato epitassiale 4, 6 possono avere spessori h_4 e h_6 ridotti rispetto a quanto descritto relativamente alla figura 1.

Come mostrato in figura 6, è inoltre possibile che il substrato 2 abbia il medesimo tipo di drogaggio del primo e del secondo strato epitassiale 4, 6, ad esempio di tipo N++, come nella forma di realizzazione mostrata in figura 1. In tal caso, la corrente di valanga può essere raccolta direttamente alla metallizzazione inferiore, riducendo le dimensioni del fotodiode 1 nel piano xy. In questa forma di realizzazione, la metallizzazione di catodo 28 può essere

assente, così da aumentare l'area attiva a parità di ingombro complessivo.

I fotodiodi 1 descritti possono essere realizzati usando il procedimento di fabbricazione descritto nel seguito e rappresentato nelle figure 7-25, in cui si fa riferimento, a titolo esemplificativo, alla forma di realizzazione mostrata in figura 1. Il procedimento descritto può comunque essere impiegato anche per la fabbricazione delle altre forme realizzative precedentemente descritte.

In maggior dettaglio, come mostrato in figura 7, inizialmente vengono cresciuti sul substrato 2 di tipo P++ il primo strato epitassiale 4, di tipo N+, e poi il secondo strato epitassiale 6, di tipo N-.

Successivamente, come mostrato sinteticamente in figura 8, viene eseguito un processo di ossidazione termica, il quale consente di formare il primo strato dielettrico 40. Tale processo di ossidazione termica viene seguito da un processo di fotolitografia e di attacco umido ("wet etching"), al fine di definire l'area attiva (qui indicata con 70) e porzioni di superficie superiore 6a, qui indicate con 72, al di sotto delle quali verrà poi formata la regione profonda 26. Un ulteriore processo di ossidazione termica e di attacco umido consente, mediante formazione e successiva rimozione di uno strato sacrificale

di ossido (non mostrato), di formare i cosiddetti segni di allineamento ("alignment mark"), non mostrati. In tali fasi, l'impiego dell'attacco ad umido previene possibili danni al reticolo cristallino del secondo strato epitassiale 6, e permette di ridurre l'introduzione di particelle contaminanti non desiderate nel secondo strato epitassiale 6.

Come mostrato sempre in figura 8, ancora mediante ossidazione termica, al di sopra della superficie superiore 6a viene formato un primo strato di ossido protettivo 74, il quale può avere uno spessore all'incirca pari a 50nm, ed ha la funzione di evitare che, durante i successivi processi di drogaggio per impiantazione, impurità metalliche contaminino il secondo strato epitassiale 6. Si noti che, durante il processo di ossidazione termica, al di sotto della superficie inferiore 2a si forma un primo strato dielettrico inferiore 76.

In seguito, come mostrato in figura 9, mediante un processo di fotolitografia e una successiva impiantazione ionica di specie droganti di tipo N, si forma un primo straterello 26', il quale si estende nel secondo strato epitassiale 6, al di sotto della superficie superiore 6a, ed è destinato a formare la regione profonda 26 una volta terminati appositi trattamenti termici, come spiegato in seguito. In maggior dettaglio, tale impianto, indicato

dalle frecce 78, può avvenire ad alto dosaggio ($5 \cdot 10^{14}$ - $1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$) e alta energia (100KeV-150KeV), ed impiegando una prima maschera di resist 80, per ridurre la contaminazione di siti esterni alla regione in cui si vuole effettuare l'impianto stesso. La prima maschera di resist 80 viene quindi rimossa ad impianto ultimato.

Successivamente (figura 10) il primo strato di ossido protettivo 74 ed il primo strato dielettrico inferiore 76 vengono rimossi mediante un attacco umido, seguito da un successivo processo di ossidazione termica, il quale consente di formare, al di sopra della superficie superiore 6a, un secondo strato di ossido protettivo 82; contestualmente, viene inoltre formato un secondo strato dielettrico inferiore 84, al di sotto della superficie inferiore 2a. In particolare, il secondo strato di ossido protettivo 82 può avere spessore compreso tra 15nm e 25nm, e assolve la funzione di proteggere la superficie superiore 6a ed il sottostante materiale semiconduttore durante i successivi processi di impiantazione ionica. Inoltre, al fine di creare la regione arricchita 20, al centro dell'area attiva 70 viene effettuato, mediante una seconda maschera di resist 86, un ulteriore processo di impiantazione ionica a basso dosaggio ($5 \cdot 10^{11}$ - $1 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$) e a bassa energia (40-60KeV) di specie droganti di tipo N, indicato dalle frecce 88, il quale conduce alla formazione,

al di sotto della superficie superiore 6a, di un secondo straterello 20'. Terminato l'impianto, anche la seconda maschera di resist 86 viene rimossa.

Successivamente (figura 11), in una porzione periferica dell'area attiva 70, prossima al primo strato dielettrico 40, ed esternamente rispetto al secondo straterello 20', viene effettuato, mediante una terza maschera di resist 90, un ulteriore processo di impiantazione ionica a basso dosaggio ($5 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$) e a bassa energia (40-60KeV) di specie droganti di tipo P, indicato dalle frecce 92. Tale processo di impiantazione ionica conduce alla formazione, al di sotto della superficie superiore 6a, di un terzo straterello 24', destinato a formare l'anello di guardia 24. Terminato l'impianto, anche la terza maschera di resist 90 viene rimossa.

Come mostrato in figura 12, viene quindi effettuato un primo trattamento termico ("thermal annealing"), per attivare le impurità elettriche precedentemente impiantate e per ridurre i siti del secondo strato epitassiale 6 danneggiati in seguito ai precedenti processi di impiantazione ionica. Il primo trattamento termico può avvenire a temperature prossime a 1150°C, e per una durata di qualche ora, ad esempio tre ore. Inoltre, esso comporta un aumento degli spessori del primo, del secondo e del

terzo straterello 26', 20', 24'.

Successivamente (figura 13), impiegando una quarta maschera di resist 94, viene effettuato un ulteriore processo di impiantazione ionica ad alto dosaggio ($1 \cdot 10^{14}$ - $5 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$) e a bassa energia (5-10KeV) di specie droganti di tipo P, indicato dalle frecce 96. Tale processo di impiantazione ionica conduce alla formazione, al di sotto della superficie superiore 6a ed all'interno del terzo straterello 24', di un quarto straterello 18', destinato a formare la regione arricchita di contatto di anodo 18. Terminato l'impianto, anche la quarta maschera di resist 94 viene rimossa.

Successivamente (figura 14), il secondo strato di ossido protettivo 82 viene rimosso dall'area attiva, mediante un attacco a umido, e viene formato al di sopra della superficie superiore 6a un terzo strato di ossido protettivo 98, avente spessore compreso, ad esempio, tra 50nm e 100nm. Durante tali operazioni, si verifica la rimozione del secondo strato dielettrico inferiore 84, e successivamente la formazione di un terzo strato dielettrico inferiore 99, disposto al di sotto della superficie inferiore 2a. Il terzo strato di ossido protettivo 98 può essere ottenuto mediante un processo di crescita a temperatura compresa tra 750° e 900° , ad esempio pari a 800° , e della durata, ad esempio, di circa cento

minuti. Successivamente, al di sopra del fotodiodo, ed in particolare al di sopra del terzo strato di ossido protettivo 98 e del primo strato dielettrico 40, viene depositato uno strato di polisilicio 100, drogato "in-situ" (cioè, durante la deposizione stessa) con specie droganti di tipo P. Lo strato di polisilicio 100 può avere spessore compreso tra 50nm e 100nm, e può avere livello di drogaggio compreso tra $1 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$ e $3 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$.

Come mostrato in figura 15, mediante un processo di fotolitografia e un successivo processo di attacco a secco ("dry etch process") avente come punto terminale ("end point") il terzo strato di ossido protettivo 98, lo strato di polisilicio 100 viene sagomato ("patterned") nella porzione sovrastante l'area attiva 70. In pratica, durante il processo di fotolitografia si usa una quinta maschera di resist 102, la quale, in vista dall'alto, ha la medesima forma della regione superiore di anodo 10, creata in seguito. In tal modo, come mostrato in figura 16, al termine del processo di attacco a secco, lo strato di polisilicio 100 viene rimosso dal fotodiodo, tranne che all'interno dell'area attiva 70, al cui interno rimane uno strato sagomato 110, di polisilicio. In pratica, lo strato sagomato 110 si estende al di sopra della superficie superiore 6a, con interposto il terzo strato di ossido protettivo 98, ed ha forma, in vista dall'alto, uguale alla

forma della regione superiore di anodo 10, da creare.

Con riferimento, a titolo esemplificativo, alla forma di realizzazione mostrata in figura 3, lo strato sagomato 110 comprende una porzione sagomata esterna 112, corrispondente all'anello esterno 12, e una pluralità di porzioni sagomate a striscia 114, corrispondenti alle regioni a striscia 14. Ad esempio, le porzioni sagomate a striscia 114 possono avere larghezza pari a $1\mu\text{m}$, ed essere spaziate di $3\mu\text{m}$.

Come mostrato in figura 17, viene quindi eseguito un processo di diffusione ("drive-in") della durata compresa tra cinque minuti e quindici minuti, ad esempio circa dieci minuti, e ad una temperatura compresa tra e 1100°C e 1200°C , ad esempio circa 1150°C . In tal modo, le specie droganti di tipo P presenti nello strato sagomato 110 possono diffondere, attraverso il terzo strato di ossido protettivo 98, al di sotto della superficie superiore 6a, dunque nel secondo strato epitassiale 6 e, più in dettaglio, all'interno del secondo straterello 20', formando un quinto straterello 10', destinato a formare la regione superiore di anodo 10, cioè l'anello esterno 12 e le regioni a striscia 14. In pratica, il quinto straterello 10' ha forma che, in vista dall'alto, rispecchia fedelmente la forma dello strato sagomato 110, e dunque comprende una prima ed una seconda sottoregione 12' e 14', destinate a

formare, rispettivamente, l'anello esterno 12 e le regioni a striscia 14. Inoltre, grazie alla tecnica di diffusione attraverso ossido, il quinto straterello 10', e poi, a processo di formazione ultimato, la regione superiore di anodo 10, presentano una profondità ridotta rispetto a quanto ottenibile con diffusione diretta nel semiconduttore, in particolare nel caso in cui, come nella forma di realizzazione descritta, le specie droganti presenti nello strato sagomato 110 siano di tipo P (ad esempio, boro), dunque caratterizzate da elevate velocità di diffusione. Inoltre, la diffusione attraverso ossido consente di limitare, rispetto alla tradizionale tecnica di impiantazione ionica, i difetti che si introducono nella regione superiore di anodo 10.

Durante il processo di drive-in, si verificano ulteriori processi di diffusione tali per cui gli spessori del primo, del secondo, del terzo e del quarto straterello 26', 20', 24' e 18' aumentano.

Successivamente, come mostrato in figura 18, lo strato sagomato 110 viene completamente rimosso, mediante un attacco a secco con punto terminale sul terzo strato di ossido protettivo 98. In seguito, anche il terzo strato di ossido protettivo 98 e il terzo strato dielettrico inferiore 99 vengono rimossi, mediante un attacco umido a tempo. Successivamente, vengono depositati il secondo

strato dielettrico 42 e lo strato di rivestimento 44, formando così il rivestimento anti-riflessione 46.

Al fine di realizzare la regione di isolamento laterale 30, viene successivamente (figura 19) realizzata una trincea 120 avente la forma e le dimensioni della regione di isolamento laterale 30, formata in seguito. In dettaglio, la trincea 120 può essere realizzata mediante un processo di fotolitografia con attacco a secco, ed impiegando una sesta maschera di resist 122.

Successivamente (figura 20), viene cresciuto all'interno della trincea 120 lo strato di rivestimento sottile 36, ad esempio con un processo termico a 900°C e della durata di circa dieci minuti. Durante tale processo termico, a partire dal primo, dal secondo, dal terzo, dal quarto e dal quinto straterello 26', 20', 24', 18' e 10' si ottengono, rispettivamente, la regione profonda 26, la regione arricchita 20, l'anello di guardia 24, la regione arricchita di contatto di anodo 18 e la regione superiore di anodo 10, senza tuttavia che tale processo termico alteri in maniera apprezzabile gli spessori del primo, del secondo, del terzo, del quarto e del quinto straterello 26', 20', 24', 18' e 10'. Viene quindi depositato, ad esempio mediante tecnica CVD, uno strato dielettrico, il quale forma sia il terzo strato dielettrico 48 che lo strato di rivestimento spesso 38. In pratica, lo strato di

rivestimento sottile 36 ricopre solamente i bordi interni ed il fondo della trincea 120, in quanto l'ossido termico non può crescere sopra lo strato di rivestimento 44, formato da nitruro di silicio (Si_3N_4). Pertanto, al di sopra della superficie superiore 6a, oltre ai già citati primo e secondo strato dielettrico 40, 42, ed allo strato di rivestimento 44, si aggiunge solamente il terzo strato dielettrico 48. Inoltre, durante la crescita dello strato di rivestimento sottile 36, al di sotto della superficie inferiore 2a si forma un quarto strato dielettrico inferiore 124.

Successivamente, come mostrato in figura 21, la trincea 120 viene completamente riempita tramite deposizione mediante tecnica CVD di metallo, ad esempio tungsteno, formando la regione metallica 34.

Come mostrato in figura 22, dopo la deposizione del metallo, viene eseguito un attacco, ad esempio un attacco a secco, per rimuovere la porzione di metallo depositata al di sopra della superficie superiore 6a. Successivamente, viene depositato il quarto strato dielettrico 50, ad esempio di ossido TEOS, in modo da isolare elettricamente la regione metallica 34.

Successivamente, si formano una prima ed una seconda finestra 130, 132, in vista della formazione delle metallizzazioni di catodo 28 e di anodo 22. In particolare,

come mostrato in figura 23, mediante un processo di fotolitografia e di attacco a secco si rimuovono selettivamente porzioni del terzo e del quarto strato dielettrico 48, 50 disposte al di sopra dell'area attiva 70, lasciando scoperta la regione del doppio rivestimento anti-riflessione 46 che, in uso, permette il passaggio di fotoni incidenti sul fotodiodo 1 verso la regione superiore di anodo 10 e la regione arricchita 20. Inoltre, vengono rimosse porzioni del terzo e del quarto strato dielettrico 48, 50 disposte al di sopra della regione profonda 26, cioè dove si andrà a formare la prima finestra 130.

Successivamente, come mostrato in figura 24, viene effettuato un ulteriore processo di fotolitografia, seguito da un attacco a secco con punto terminale sul secondo strato dielettrico 42, per rimuovere lo strato di rivestimento 44 in corrispondenza della regione arricchita di contatto di anodo 18 e della regione profonda 26. Infine, viene eseguito un ulteriore processo di attacco umido, per rimuovere il secondo strato dielettrico 42 in corrispondenza della regione arricchita di contatto di anodo 18 e della regione profonda 26, formando così, rispettivamente, la seconda e la prima finestra 132, 130. In tal modo, in corrispondenza della prima e della seconda finestra 130, 132, la superficie superiore 6a risulta esposta, cioè non vi è sovrapposto nessuno strato tra lo

strato di rivestimento 44, e il primo, il secondo, il terzo e il quarto strato dielettrico 40, 42, 48, 50. Tra l'altro, l'attacco a umido causa anche la rimozione del quarto strato dielettrico inferiore 124.

Successivamente (figura 25), viene effettuata una fase di deposizione mediante tecnica sputtering di uno strato metallico superiore (non mostrato), formato ad esempio da una lega ternaria di alluminio, silicio e rame, ed avente spessore compreso, ad esempio, tra $1\mu\text{m}$ e $3\mu\text{m}$. Un successivo processo di fotolitografia e di attacco umido dello strato metallico superiore consente di formare le metallizzazioni di catodo 28 e di anodo 22, rispettivamente in corrispondenza della prima e della seconda finestra 130, 132. Successivamente, sulla superficie inferiore 2a del substrato 2, mediante tecnica sputtering vengono depositati in successione il primo, il secondo ed il terzo strato metallico inferiore 52, 54, 56.

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, in modo da ridurre il tasso di ricombinazione Shockley-Read-Hall.

La schiera 220 di fotodiodi 1 può essere utilizzata in un generico sistema 500 mostrato in figura 26, 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.

A titolo esemplificativo, la schiera 220 di fotodiodi 1 può essere utilizzata nel campo della tomografia ad emissione di positroni ("Positron Emission Tomography", PET), in cui si rilevano raggi gamma mediante impiego di cosiddetti scintillatori, quali ad esempio a scintillatori a base di ortosilicato di lutezio ("Lutetium Orthosilicate", LSO) o ortosilicato di lutezio e ittrio ("Lutetium-Yttrium Orthosilicate", LYSO). Con riferimento, a titolo esemplificativo, alla figura 2, la sorgente luminosa esterna 200 può essere formata da uno di tali scintillatori LSO o LYSO, i quali ricevono raggi gamma ed emettono, in risposta a tali raggi gamma, fotoni nel blu e nel vicino ultravioletto. In questo modo, i fotoni generati da tali scintillatori possono essere efficacemente rilevati dalla schiera 220.

I vantaggi che il presente fotodiodo operante in modalità Geiger consente di ottenere emergono chiaramente dalla discussione precedente. In particolare, il presente fotodiodo presenta contemporaneamente una bassa difettosità

ed uno strato morto con spessore sostanzialmente ridotto rispetto ai fotodiodi SPAD di tipo tradizionale.

In maggior dettaglio, la sostanziale assenza dello strato morto comporta un incremento dell'efficienza quantistica di rilevazione QDE, in particolare per quanto concerne fotoni altamente energetici, i quali hanno maggiori probabilità di essere assorbiti in prossimità della superficie superiore del fotodiode SPAD, e dunque all'interno di un ipotetico strato morto, con il rischio che essi non inneschino effettivamente corrispondenti processi di ionizzazione a valanga, oppure che li inneschino, ma con elevati tempi di risposta. Inoltre, la sostanziale assenza dello strato morto riduce la possibilità che portatori minoritari ivi generati contribuiscano alla corrente di buio.

Sebbene tutti i tipi di drogaggio possano risultare invertiti rispetto a quanto descritto, le forme di realizzazione descritte risultano vantaggiose nel caso di fotoni altamente energetici, perché i portatori minoritari che si generano in seguito all'assorbimento di fotoni nelle porzioni non svuotate della regione superiore di anodo 10 e che, una volta raggiunta la regione di svuotamento, possono innescare un processo di ionizzazione a valanga, sono elettroni e non lacune. Pertanto, dal momento che gli elettroni, rispetto alle lacune, hanno un tasso di ionizzazione da impatto ("impact ionization rate") superiore

e un tasso di ricombinazione ("recombination rate") nelle porzioni non svuotate della regione superiore di anodo 10 inferiore, la probabilità di innesco di moltiplicazione a valanga, e quindi l'efficienza quantistica di rilevazione QDE, risultano particolarmente elevate.

Inoltre, la sostanziale assenza dello strato morto e la presenza della metallizzazione inferiore comporta una riduzione del tasso di generazione termica di portatori minoritari in regioni disposte al di sotto della regione svuotata della prima giunzione PN, e quindi una riduzione della corrente di buio. Inoltre, per i medesimi motivi si verifica una riduzione delle code di diffusione, migliorando i tempi di risposta del fotodiodo.

Risulta infine evidente che al fotodiodo e al processo descritti possono essere apportate modifiche e varianti, senza uscire dall'ambito della presente invenzione.

In particolare, è possibile che il fotodiodo presenti uno strato resistivo, ad esempio di polisilicio, disposto tra lo strato di rivestimento 44 ed il terzo strato dielettrico 48. Lo strato resistivo può essere opportunamente drogato e sagomato, ad esempio mediante un rispettivo processo di fotolitografia e di attacco, in maniera tale per cui esso assolve la funzione elettrica di resistore di soppressione ("quenching resistor"). In luogo del polisilicio, è altresì possibile impiegare un altro materiale provvisto di

un'opportuna conduttività e una banda di energia proibita ("Energy bandgap") più ampia di quella del semiconduttore che forma il corpo del fotodiodo.

A titolo esemplificativo, il summenzionato strato resistivo può essere depositato, e successivamente sagomato, tra le fasi descritte e mostrate rispettivamente nelle figure 18 e 19. Inoltre, in tal caso, il budget termico impiegato durante la fase di crescita dello strato di rivestimento sottile 36 consente, contemporaneamente, di attivare la impurità presenti nello strato resistivo.

E' inoltre possibile che il corpo 8, la regione di anodo (regione superiore di anodo 10 e regione arricchita di contatto di anodo 18), l'anello di guardia 24 e la regione arricchita 20 siano di tipo inverso rispetto a quanto descritto.

Sono inoltre possibili forme di realizzazione prive del secondo strato epitassiale 6 e/o dell'anello di guardia 24. Inoltre, sono possibili forme di realizzazione prive della regione arricchita 20 e/o della regione di isolamento laterale 30. Ancora, la regione di channel stopper 32 può essere formata da un solo strato di materiale isolante.

Infine, in luogo delle regioni a striscia 14, la regione superiore di anodo 10 può comprendere regioni o isole di forma differente.

RIVENDICAZIONI

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

- un corpo (8) di materiale semiconduttore, avente una prima ed una seconda superficie (6a, 2a);

- una regione di catodo (4,6,20,26) di un primo tipo di conducibilità, estendentesi all'interno di detto corpo a partire dalla prima superficie (6a);

- una regione di anodo (10,12,14,18) di un secondo tipo di conducibilità, estendentesi all'interno della regione di catodo ed affacciata a detta prima superficie, detta regione di anodo e detta regione di catodo definendo una prima giunzione;

- una metallizzazione di anodo (22), a contatto con detta regione di anodo, e una metallizzazione di catodo (28), a contatto con detta regione di catodo, atte ad essere elettricamente collegate a un circuito esterno di polarizzazione per polarizzare detta prima giunzione a una prima tensione (V_A);

caratterizzato dal fatto che:

detta regione di anodo comprende almeno due sottoregioni (14,14a-14d) estendentesi a distanza reciproca all'interno di detta regione di catodo a partire da detta prima superficie, e delimitanti almeno un primo interstizio (16,16a,16b) alloggiante una porzione di detta regione di catodo, detto

primo interstizio avendo una rispettiva larghezza massima (d_i), misurata lungo un prima direzione (x), la larghezza massima di detto primo interstizio ed i livelli di drogaggio di dette due sottoregioni e di detta regione di catodo essendo tali per cui, quando detta prima tensione (V_A) è almeno pari a una prima tensione di rottura (V_B) di detta prima giunzione, una prima regione svuotata occupa completamente la porzione della regione di catodo alloggiata all'interno del primo interstizio.

2. Fotodiodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta regione di anodo (10,12,14,18) comprende un anello esterno (12) e una pluralità di sottoregioni (14) includenti dette due sottoregioni, estendentesi all'interno dell'anello esterno e ohmicamente collegate a questo, e separate tra loro da una pluralità di interstizi (16) includenti detto primo interstizio.

3. Fotodiodo secondo la rivendicazione 2, in cui detta regione di anodo (10,12,14,18) comprende una regione di contatto di anodo (18) estendentesi al di sotto ed in contatto diretto con detto anello esterno (12), detta regione di contatto di anodo avendo un rispettivo livello di drogaggio superiore al livello di drogaggio dell'anello esterno.

4. Fotodiodo secondo la rivendicazione 2 o 3, in cui detti interstizi hanno rispettive larghezze massime (d_i)

inferiori ad un valore (d_{\max}) e, quando detta prima tensione (V_A) è almeno pari alla tensione di rottura (V_B) di detta prima giunzione, detta regione svuotata si estende in detta regione di catodo, a partire da dette sottoregioni (14), con una profondità (W_N) almeno pari alla metà di detto valore ($d_{\max}/2$).

5. Fotodiodo secondo la rivendicazione 4, in cui dette sottoregioni (14) hanno rispettive larghezze massime (d_s), misurate lungo detta prima direzione (x) ed uguali tra loro.

6. Fotodiodo secondo la rivendicazione 5, in cui le larghezze massime di detti interstizi (16) sono uguali tra loro.

7. Fotodiodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto corpo (8) comprende: un substrato (2) del secondo tipo di conducibilità ed affacciato alla seconda superficie (2a); un primo strato epitassiale (4) sovrastante il substrato, del primo tipo di conducibilità; e un secondo strato epitassiale (6) sovrastante il primo strato epitassiale, del primo tipo di conducibilità e definente detta prima superficie (6a), detto secondo strato epitassiale avendo un livello di drogaggio inferiore al livello di drogaggio del primo strato epitassiale.

8. Fotodiodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui detto corpo (8) comprende: un substrato (2) del secondo tipo di conducibilità ed affacciato alla seconda

superficie (2a); un primo strato epitassiale (4) sovrastante il substrato e del primo tipo di conducibilità; uno strato epitassiale intermedio (60) sovrastante il primo strato epitassiale e del primo tipo di conducibilità; e un secondo strato epitassiale (6) sovrastante lo strato epitassiale intermedio, del primo tipo di conducibilità e definente detta prima superficie (6a), detto secondo strato epitassiale avendo un livello di drogaggio inferiore al livello di drogaggio del primo strato epitassiale, detto primo strato epitassiale avendo un livello di drogaggio inferiore al livello di drogaggio dello strato epitassiale intermedio.

9. Fotodiode secondo la rivendicazione 7 o 8, in cui detta regione di catodo (4,6,20,26) comprende una regione arricchita (20) estendentesi all'interno di detto secondo strato epitassiale, al di sotto di detta regione di anodo (10,12,14,18) e all'interno di detto primo interstizio (16,16a,16b), detta regione arricchita avendo un livello di drogaggio superiore al livello di drogaggio del secondo strato epitassiale (6).

10. Fotodiode secondo la rivendicazione 9, comprendente inoltre un anello di guardia (24) del secondo tipo di conducibilità, estendentesi esternamente a detta regione di anodo (10,12,14,18) e a detta regione arricchita (20), ed in contatto con detta regione di anodo, detto anello di guardia (24) avendo un livello di drogaggio inferiore al livello di

drogaggio di detta regione di anodo.

11. Fotodiode secondo una rivendicazione qualsiasi da 7 a 10, comprendente inoltre una metallizzazione inferiore (52,54,56) a contatto con detto substrato (2) e disposta al di sotto di detta seconda superficie (2a), detto substrato e detto primo strato epitassiale (4) formando una seconda giunzione polarizzabile ad una seconda tensione indipendente da detta prima tensione, detto substrato e detto primo strato epitassiale avendo rispettivi spessori e livelli di drogaggio tali per cui, quando detta seconda giunzione è polarizzata inversamente ad una tensione almeno pari a una seconda tensione di rottura della seconda giunzione, si crea una seconda regione svuotata, completamente contenuta all'interno del primo strato epitassiale e del substrato.

12. Fotodiode secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta regione di catodo (4,6,20,26) comprende inoltre una regione profonda (26) estendentesi attraverso detto corpo (8) a partire da detta prima superficie (6a), esternamente alla regione di anodo (10,12,14,18), e a contatto con detta metallizzazione di catodo (28).

13. Fotodiode secondo la rivendicazione 12, comprendente inoltre:

- una trincea (120) estendentesi attraverso detto corpo (8) a partire da detta prima superficie (6a) e

circondante detta regione profonda (26);

- una regione di isolamento laterale (30) all'interno della trincea, detta regione di isolamento laterale comprendendo una regione conduttiva (34) ed una regione isolante (36,38) di materiale dielettrico, circondante detta regione conduttiva.

14. Fotodiodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto primo tipo di conducibilità è una conducibilità di tipo N, e in cui detto secondo tipo di conducibilità è una conducibilità di tipo P.

15. Sistema (500) di rilevazione di fotoni comprendente:

- un'unità di elaborazione (520);

- una schiera (220) di fotodiodi (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-14, accoppiata a detta unità di elaborazione (520);

- un alimentatore (510) accoppiato a detta unità di elaborazione (520) e a detta schiera di fotodiodi.

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

- formare un corpo (8) di materiale semiconduttore, avente una prima ed una seconda superficie (6a, 2a);

- formare una regione di catodo (4,6,20,26) di un primo tipo di conducibilità, estendentesi all'interno di detto corpo a partire dalla prima superficie (6a);

- formare una regione di anodo (10,12,14,18) di un secondo tipo di conducibilità, estendentesi all'interno della regione di catodo ed affacciata a detta prima superficie (6a), detta regione di anodo e detta regione di catodo definendo una prima giunzione;

- formare una metallizzazione di anodo (22), a contatto con detta regione di anodo, e una metallizzazione di catodo (28), a contatto con detta regione di catodo, atte ad essere elettricamente collegate a un circuito esterno di polarizzazione per polarizzare detta prima giunzione a una prima tensione (V_A);

caratterizzato dal fatto che:

detta fase di formare una regione di anodo comprende formare almeno due sottoregioni (14,14a-14d) estendentesi a distanza reciproca all'interno di detta regione di catodo a partire da detta prima superficie, e delimitanti almeno un primo interstizio (16,16a,16b) alloggiante una porzione di detta regione di catodo, detto primo interstizio avendo una rispettiva larghezza massima (d_1), misurata lungo un prima direzione (x), la larghezza massima di detto primo interstizio ed i livelli di drogaggio di dette due sottoregioni e di detta regione di catodo essendo tali per cui, quando detta prima tensione (V_A) è almeno pari a una prima tensione di rottura (V_B) di detta prima giunzione, una prima regione svuotata occupa completamente la porzione della

regione di catodo alloggiata all'interno del primo interstizio.

17. Procedimento secondo la rivendicazione 16, in cui detta fase di formare una regione di anodo (10,12,14,18) comprende le fasi di:

- formare al di sopra della prima superficie (6a) uno strato materiale protettivo (98);

- depositare in situ, al di sopra dello strato di materiale protettivo, uno strato di polisilicio (100) drogato con specie ioniche droganti del secondo tipo di conducibilità;

- sagomare lo strato di polisilicio, ottenendo uno strato sagomato (110);

- diffondere le specie ioniche droganti dallo strato sagomato nel corpo (8), attraverso lo strato di materiale protettivo, formando dette almeno due sottoregioni (14,14a-14d).

18. Procedimento secondo la rivendicazione 17, in cui detta fase di sagomare lo strato di polisilicio comprende sagomare detto strato di polisilicio (100) in modo da formare una porzione sagomata esterna (112) e una pluralità di porzioni sagomate interne (114) separate tra loro, disposte all'interno della porzione sagomata esterna ed in contatto con la porzione sagomata esterna.

19. Procedimento secondo la rivendicazione 17 o 18, in

cui detta fase di formare un corpo(8) comprende le fasi:

- formare un substrato (2) del secondo tipo di conducibilità ed affacciato alla seconda superficie (2a);

- formare un primo strato epitassiale (4) sovrastante il substrato, del primo tipo di conducibilità; e

- formare un secondo strato epitassiale (6) sovrastante il primo strato epitassiale, del primo tipo di conducibilità e definente detta prima superficie (6a), detto secondo strato epitassiale avendo un livello di drogaggio inferiore al livello di drogaggio di detto primo strato epitassiale;

il procedimento comprendendo inoltre la fase di:

- formare una metallizzazione inferiore al di sotto di detta seconda superficie (2a), a contatto con detto substrato.

20. Procedimento secondo una rivendicazione qualsiasi da 16 a 19, in cui detto primo tipo di conducibilità è una conducibilità di tipo N, e in cui detto secondo tipo di conducibilità è una conducibilità di tipo P.

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

Elena CERBARO

CLAIMS

1. An geiger-mode avalanche photodiode, comprising:

- 5 - a body (8) of semiconductor material, having a first surface (6a) and a second surface (2a);
- a cathode region (4, 6, 20, 26) of a first type of conductivity, which extends within said body starting from the first surface (6a);
- 10 - an anode region (10, 12, 14, 18) of a second type of conductivity, which extends within the cathode region and faces said first surface, said anode region and said cathode region defining a first junction;
- an anode metallization (22), in contact with said anode region, and a cathode metallization (28), in contact with said
- 15 cathode region, which are designed to be electrically connected to an external biasing circuit for biasing said first junction at a first voltage (V_A);

characterized in that:

20 said anode region comprises at least two subregions (14, 14a-14d), which extend at a distance apart within said cathode region starting from said first surface and delimit at least one first gap (16, 16a, 16b) housing a portion of said cathode region, said first gap having a respective maximum width (d_1), measured in a first direction (x), the maximum width of said

25 first gap and the levels of doping of said two subregions and of said cathode region being such that, when said first voltage (V_A) is at least equal to a first breakdown voltage (V_B) of said first junction, a first depleted region occupies completely the portion of the cathode region housed within the

30 first gap.

2. The photodiode according to claim 1, wherein said anode region (10, 12, 14, 18) comprises an external ring (12) and a plurality of subregions (14), which include said two

35 subregions, extend within the external ring and are ohmically connected to the latter, and are separated from one another by

a plurality of gaps (16), which include said first gap.

3. The photodiode according to claim 2, wherein said anode region (10, 12, 14, 18) comprises an anode-contact region (18), which extends underneath and in direct contact with said external ring (12), said anode-contact region having a respective level of doping higher than the level of doping of the external ring.

10 4. The photodiode according to claim 2 or claim 3, wherein said gaps have respective maximum widths (d_i) smaller than a value (d_{max}) and, when said first voltage (V_A) is at least equal to the breakdown voltage (V_B) of said first junction, said depleted region extends in said cathode region, starting from said subregions (14), with a depth (W_N) at least equal to half of said value ($d_{max}/2$).

5. The photodiode according to claim 4, wherein said subregions (14) have respective maximum lengths (d_s), measured in said first direction (x) and the same as one another.

6. The photodiode according to claim 5, wherein the maximum widths of said gaps (16) are the same as one another.

25 7. The photodiode according to any one of the preceding claims, wherein said body (8) comprises: a substrate (2) having the second type of conductivity and facing the second surface (2a); a first epitaxial layer (4), which overlies the substrate and has the first type of conductivity; and a second epitaxial layer (6), which overlies the first epitaxial layer, has the first type of conductivity, and defines said first surface (6a), said second epitaxial layer having a level of doping lower than the level of doping of the first epitaxial layer.

35 8. The photodiode according to any one of claims 1 to 6,

wherein said body (8) comprises: a substrate (2) having the second type of conductivity and facing the second surface (2a); a first epitaxial layer (4), which overlies the substrate and has the first type of conductivity; an
5 intermediate epitaxial layer (60), which overlies the first epitaxial layer and has the first type of conductivity; and a second epitaxial layer (6), which overlies the intermediate epitaxial layer, has the first type of conductivity, and defines said first surface (6a), said second epitaxial layer
10 having a level of doping lower than the level of doping of the first epitaxial layer, said first epitaxial layer having a level of doping lower than the level of doping of the intermediate epitaxial layer.

15 9. The photodiode according to claim 7 or claim 8, wherein said cathode region (4, 6, 20, 26) comprises an enriched region (20), which extends within said second epitaxial layer, underneath said anode region (10, 12, 14, 18) and within said first gap (16, 16a, 16b), said enriched region having a level
20 of doping higher than the level of doping of the second epitaxial layer (6).

10. The photodiode according to claim 9, further comprising a guard ring (24) having the second type of conductivity, which
25 extends externally to said anode region (10, 12, 14, 18) and to said enriched region (20), and in contact with said anode region, said guard ring (24) having a level of doping lower than the level of doping of said anode region.

30 11. The photodiode according to any one of claims 7 to 10, further comprising a bottom metallization (52, 54, 56) in contact with said substrate (2) and set underneath said second surface (2a), said substrate and said first epitaxial layer (4) forming a second junction that can be biased at a second
35 voltage independent of said first voltage, said substrate and said first epitaxial layer having respective thicknesses and

5 levels of doping such that, when said second junction is reversely biased at a voltage at least equal to a second breakdown voltage of the second junction, a second depleted region is created, completely contained within the first epitaxial layer and the substrate.

12. The photodiode according to any one of the preceding claims, wherein said cathode region (4, 6, 20, 26) further comprises a sinker region (26), which extends through said body (8) starting from said first surface (6a), externally to the anode region (10, 12, 14, 18), and in contact with said cathode metallization (28).

13. The photodiode according to claim 12, further comprising:
15 - a trench (120), which extends through said body (8) starting from said first surface (6a) and surrounding said sinker region (26); and
- a lateral insulation region (30) within the trench, said lateral insulation region comprising a conductive region (34)
20 and an insulating region (36, 38) of dielectric material, surrounding said conductive region.

14. The photodiode according to any one of the preceding claims, wherein said first type of conductivity is a conductivity of an N type, and wherein said second type of conductivity is a conductivity of a P type.

15. A photon-detection system (500) comprising:
- a processing unit (520);
30 - an array (220) of photodiodes (1) according to any one of claims 1-14, coupled to said processing unit (520); and
- a power supply (510) coupled to said processing unit (520) and to said array of photodiodes.

35 16. A process for the production of a geiger-mode avalanche photodiode, comprising the steps of:

- forming a body (8) of semiconductor material, having a first surface (6a) and a second surface (2a);
 - forming a cathode region (4, 6, 20, 26) of a first type of conductivity, which extends within said body starting from the first surface (6a);
 - forming an anode region (10, 12, 14, 18) of a second type of conductivity, which extends within the cathode region and faces said first surface (6a), said anode region and said cathode region defining a first junction; and
 - forming an anode metallization (22), in contact with said anode region, and a cathode metallization (28), in contact with said cathode region, which are designed to be electrically connected to an external biasing circuit for biasing said first junction at a first voltage (V_A);
- characterized in that:
- said step of forming an anode region comprises forming at least two subregions (14, 14a-14d), which extend at a distance apart within said cathode region starting from said first surface, and delimit at least one first gap (16, 16a, 16b) housing a portion of said cathode region, said first gap having a respective maximum width (d_i), measured in a first direction (x), the maximum width of said first gap and the levels of doping of said two subregions and of said cathode region being such that, when said first voltage (V_A) is at least equal to a first breakdown voltage (V_B) of said first junction, a first depleted region occupies completely the portion of the cathode region housed within the first gap.
17. The process according to claim 16, wherein said step of forming an anode region (10, 12, 14, 18) comprises the steps of:
- forming on the first surface (6a) a layer made of protective material (98);
 - depositing *in situ*, on top of the layer made of protective material, a polysilicon layer (100) doped with dopant ion species of the second type of conductivity;

- patterning the polysilicon layer to obtain a patterned layer (110);

- diffusing the dopant ion species from the patterned layer into the body (8), through the layer made of protective material, forming said at least two subregions (14, 14a- 14d).

18. The process according to claim 17, wherein said step of patterning the polysilicon layer comprises patterning said polysilicon layer (100) so as to form an external patterned portion (112) and a plurality of internal patterned portions (114) separated from one another, set within the external patterned portion and in contact with the external patterned portion.

19. The process according to claim 17 or claim 18, wherein said step of forming a body (8) comprises the steps:

- forming a substrate (2) having the second type of conductivity and facing the second surface (2a);

- forming a first epitaxial layer (4), which overlies the substrate and has the first type of conductivity; and

- forming a second epitaxial layer (6), which overlies the first epitaxial layer, has the first type of conductivity, and defines said first surface (6a), said second epitaxial layer having a level of doping lower than the level of doping of said first epitaxial layer;

the process further comprising the step of:

- forming a bottom metallization underneath said second surface (2a), in contact with said substrate.

20. The process according to any one of claims 16 to 19, wherein said first type of conductivity is a conductivity of an N type, and wherein said second type of conductivity is a conductivity of a P type.

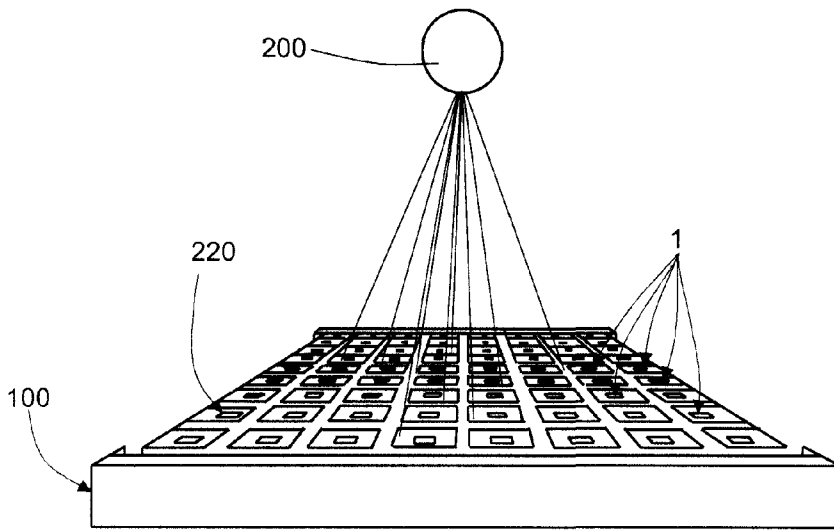


Fig.2

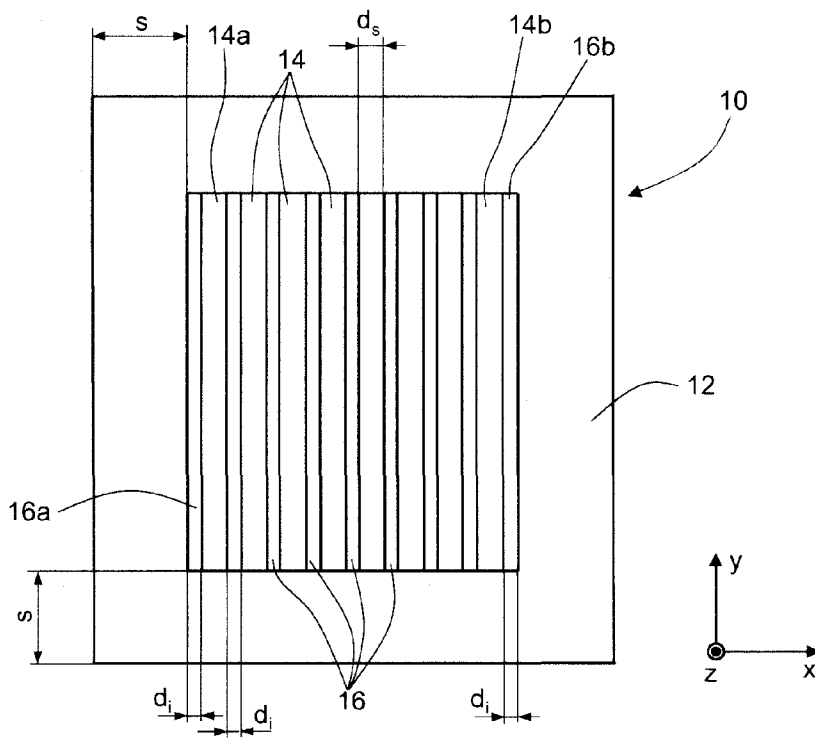


Fig.3

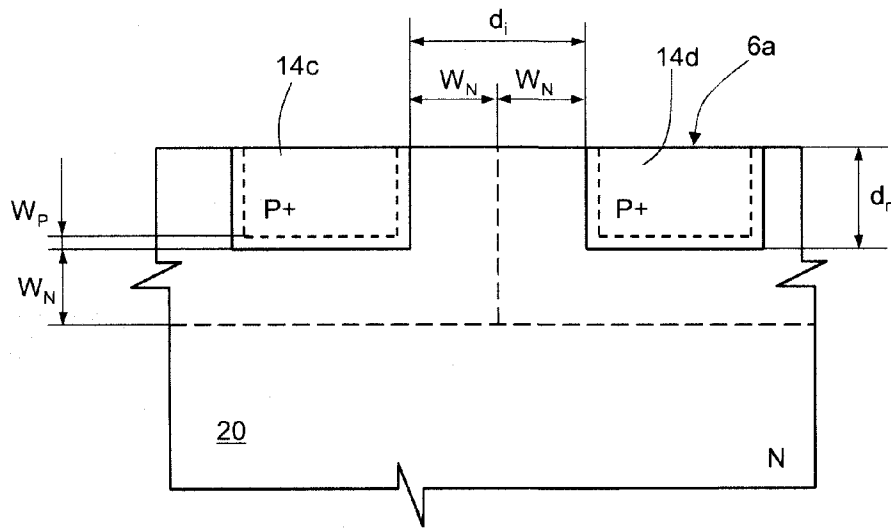


Fig.4

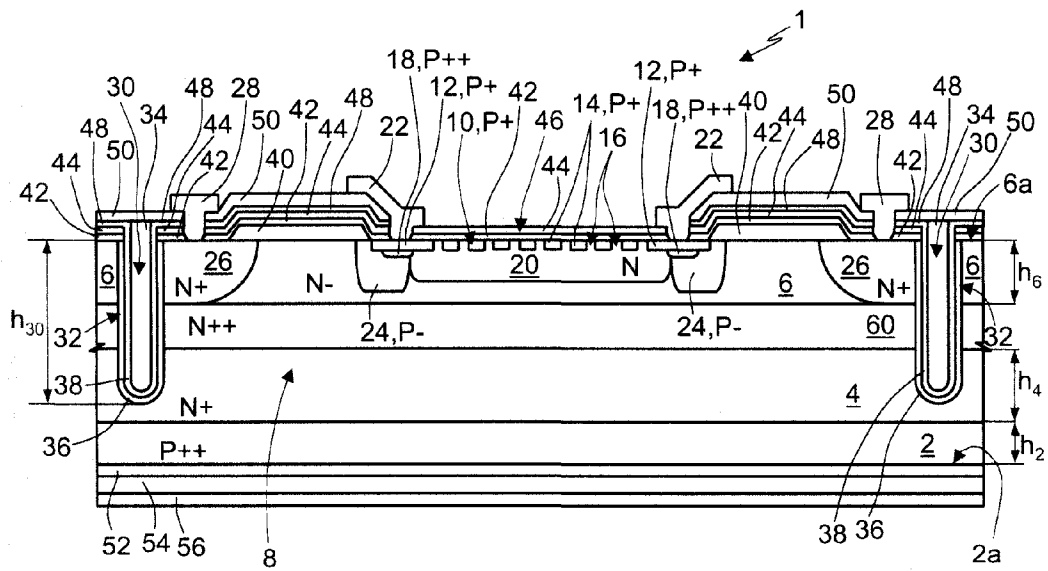
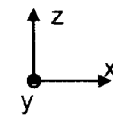


Fig.5



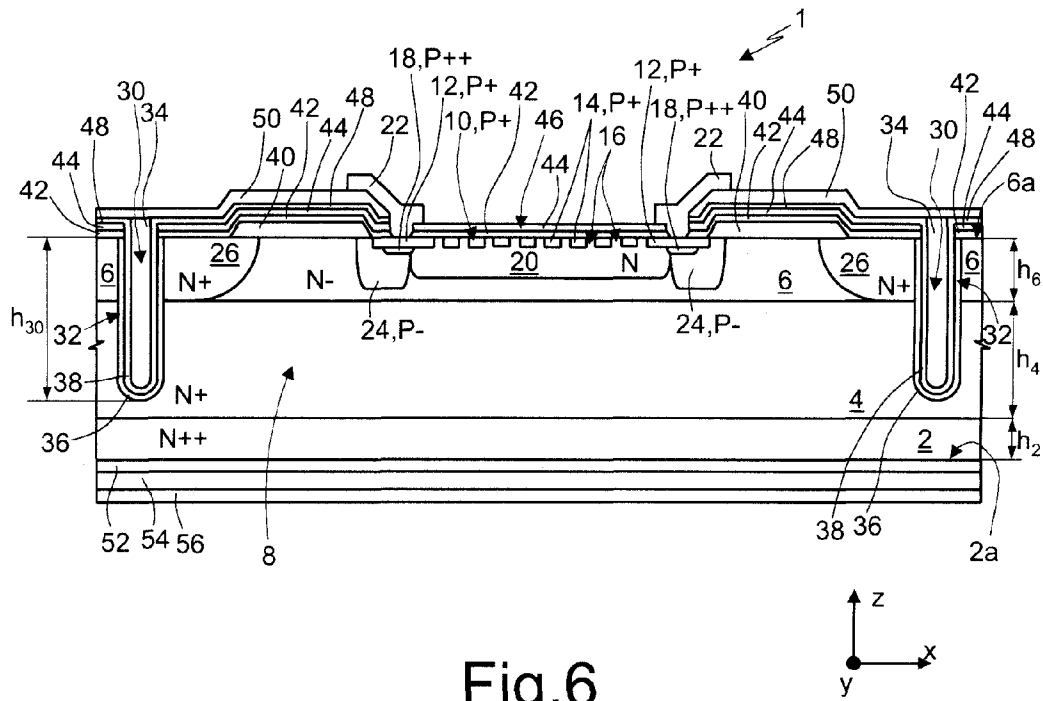


Fig. 6

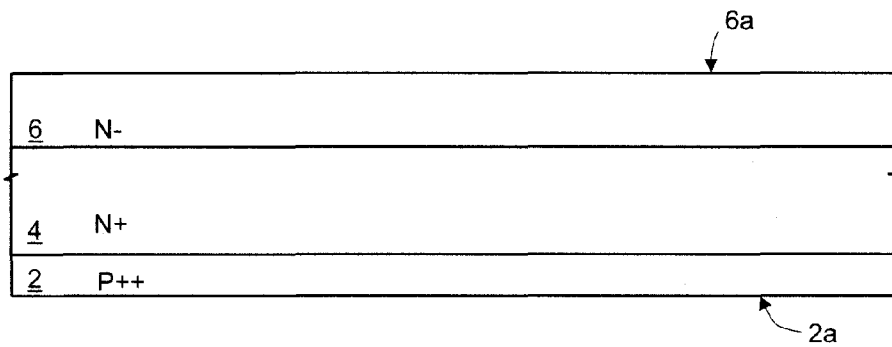


Fig. 7

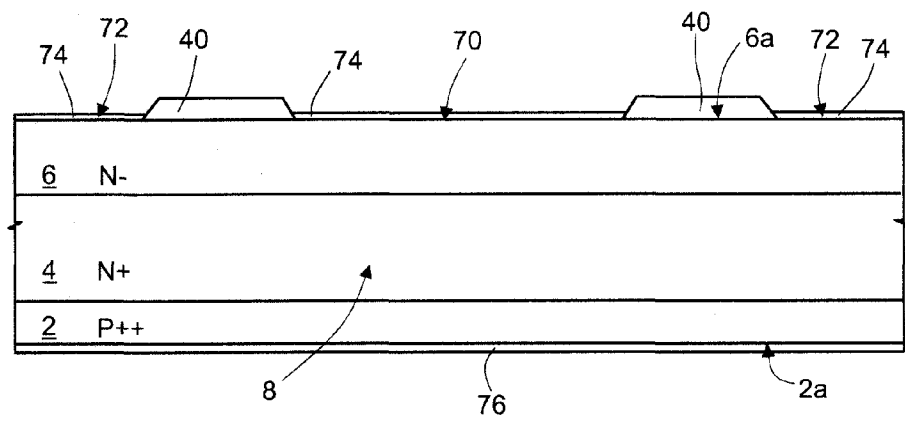


Fig.8

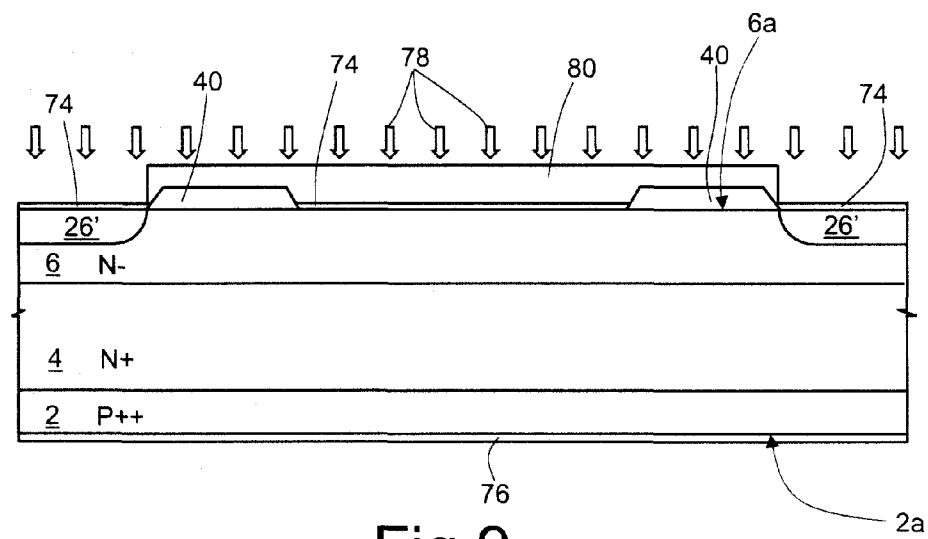


Fig.9

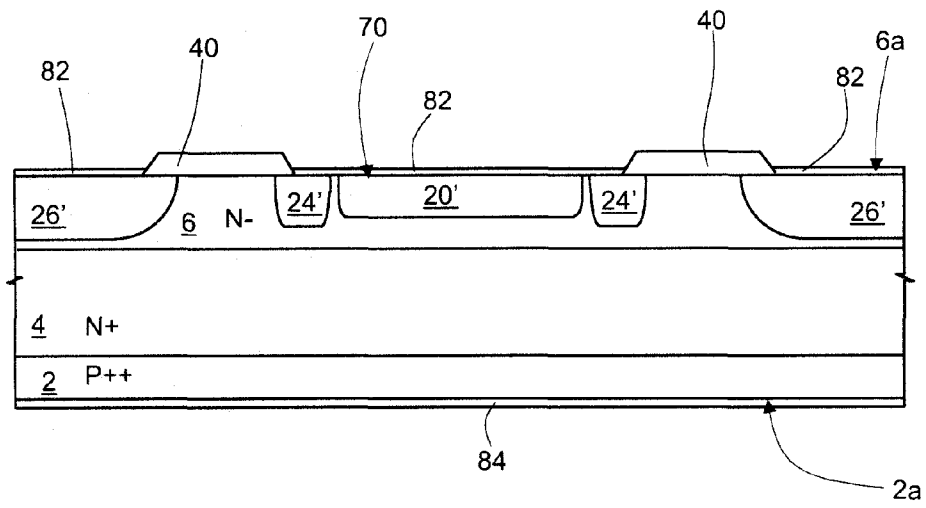


Fig.12

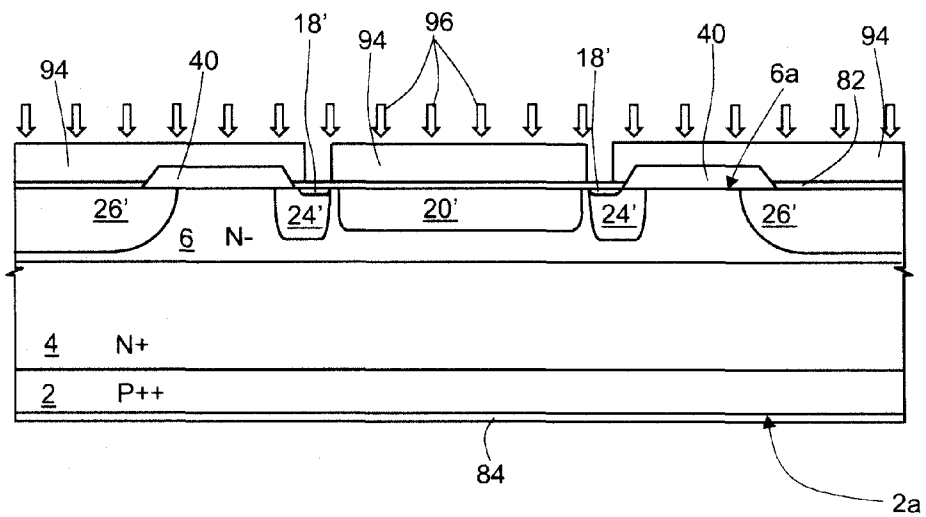


Fig.13

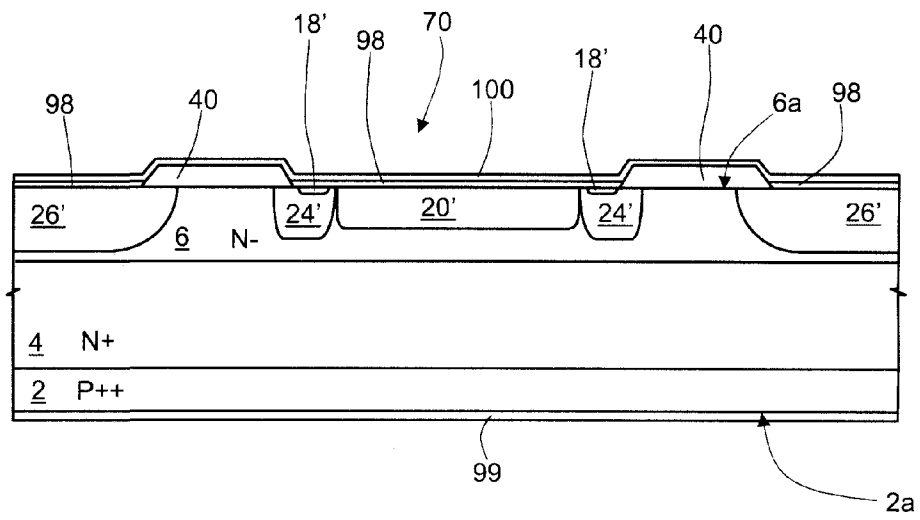


Fig.14

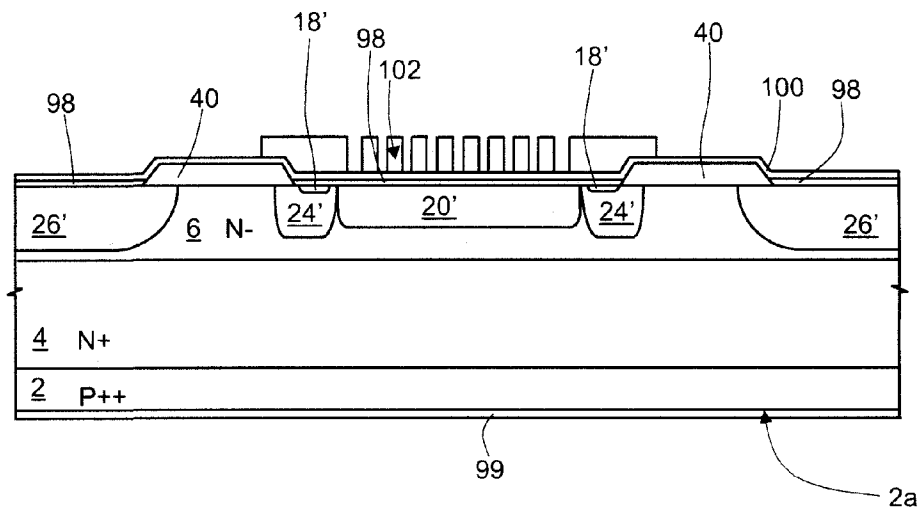


Fig.15

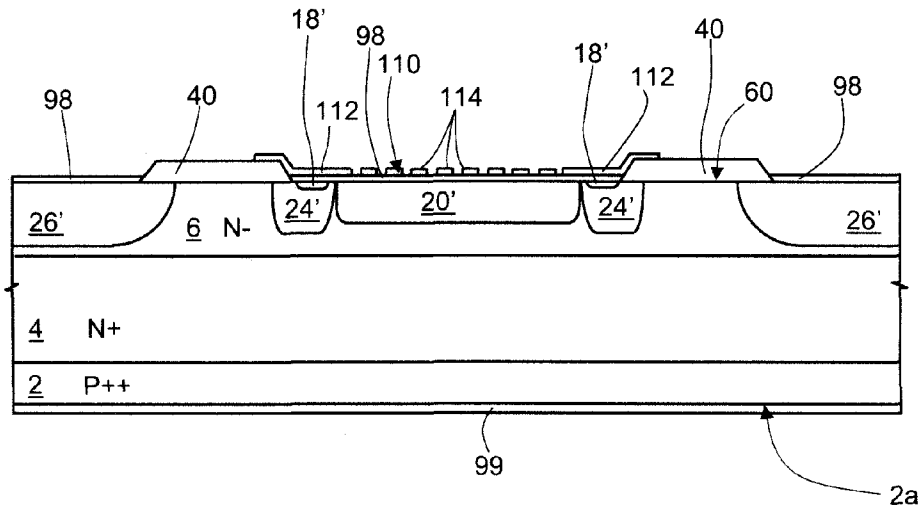


Fig.16

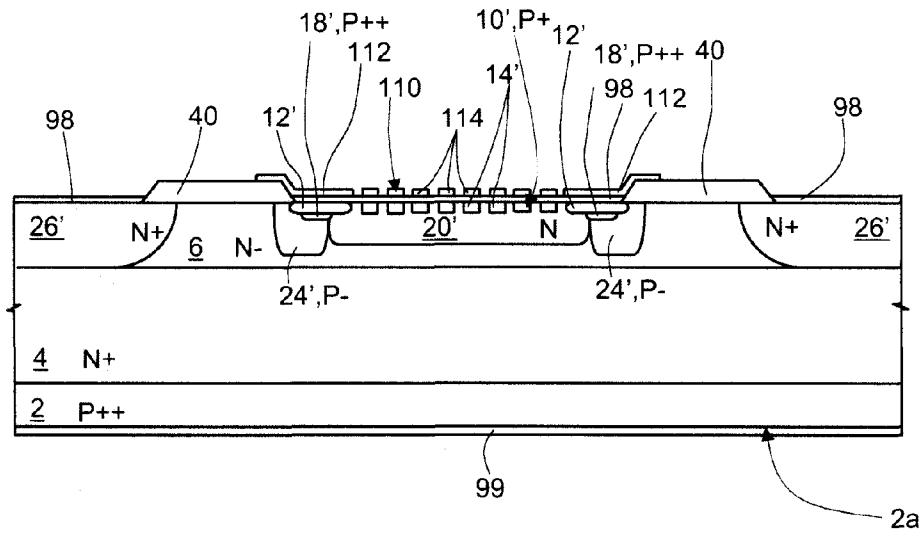


Fig.17

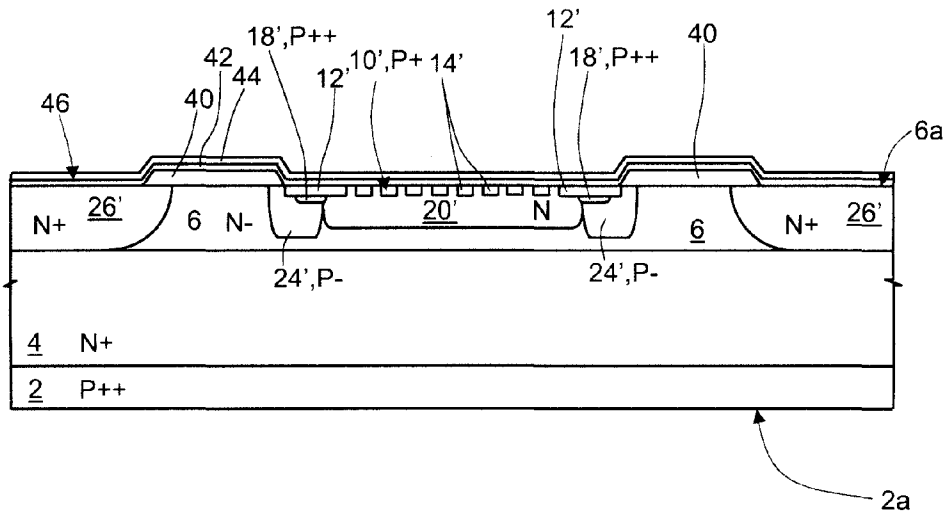


Fig.18

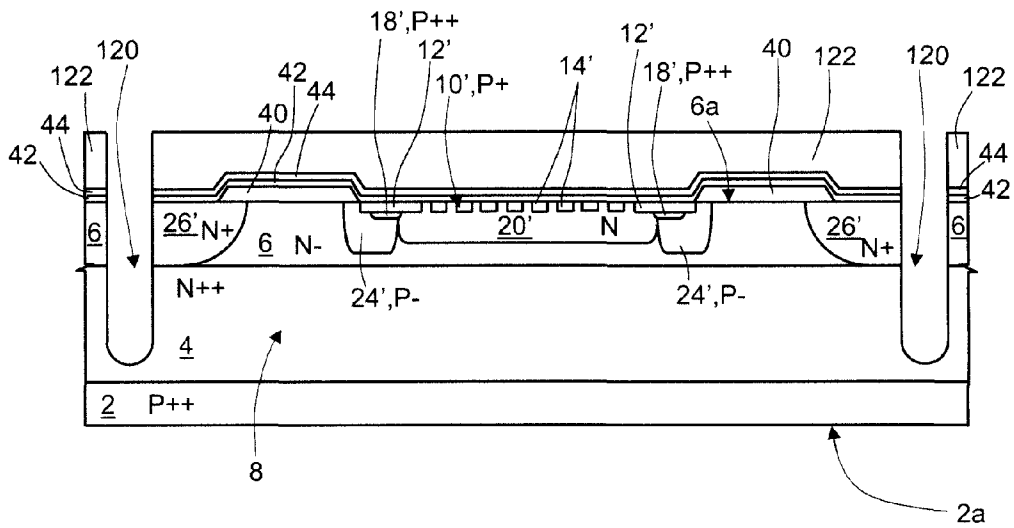


Fig.19

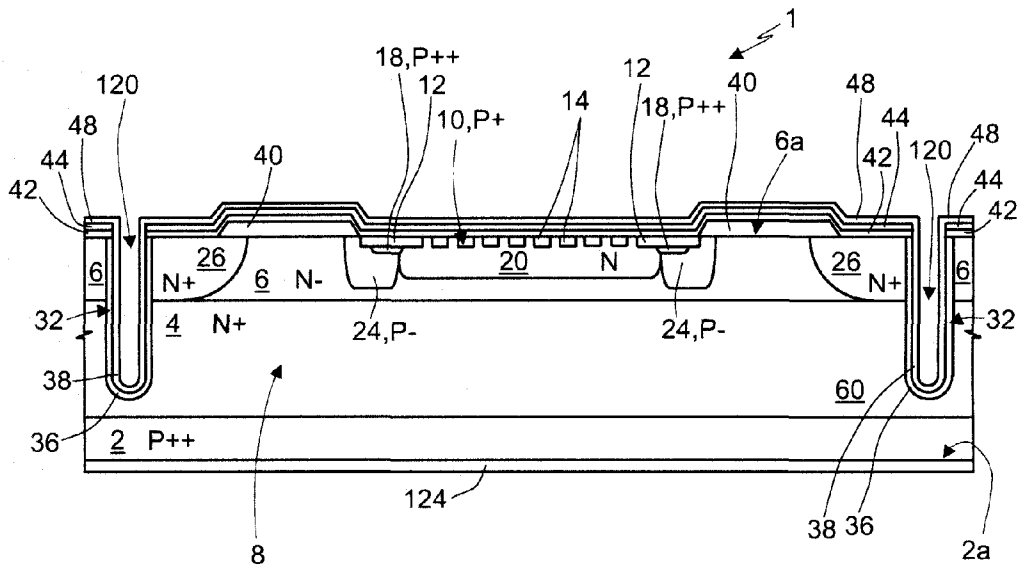


Fig.20

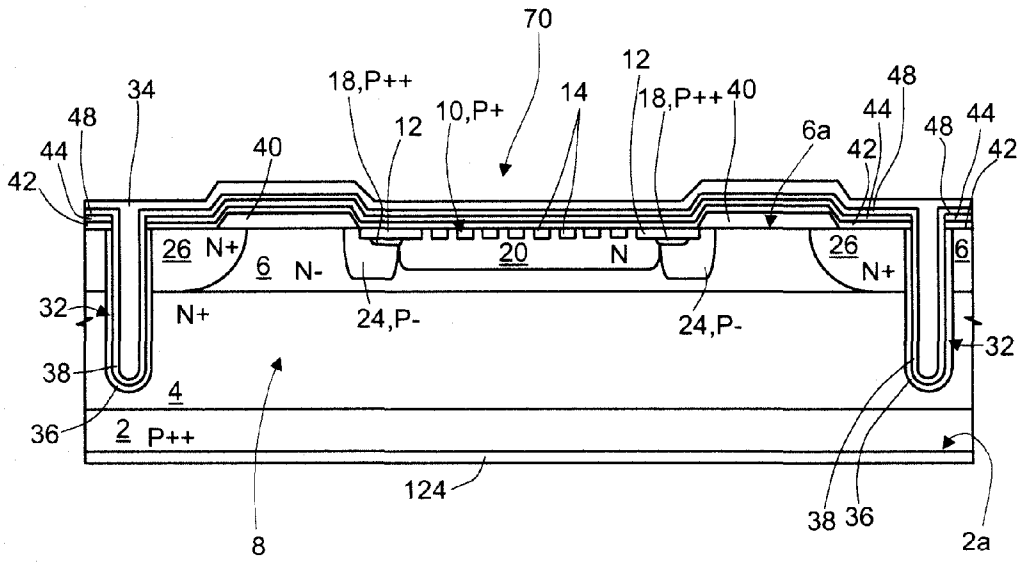


Fig.21

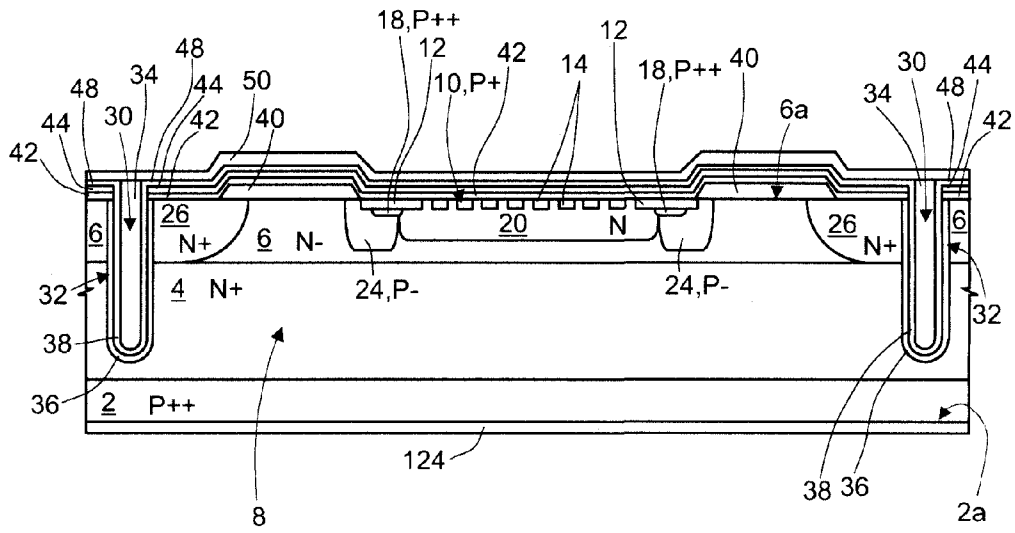


Fig.22

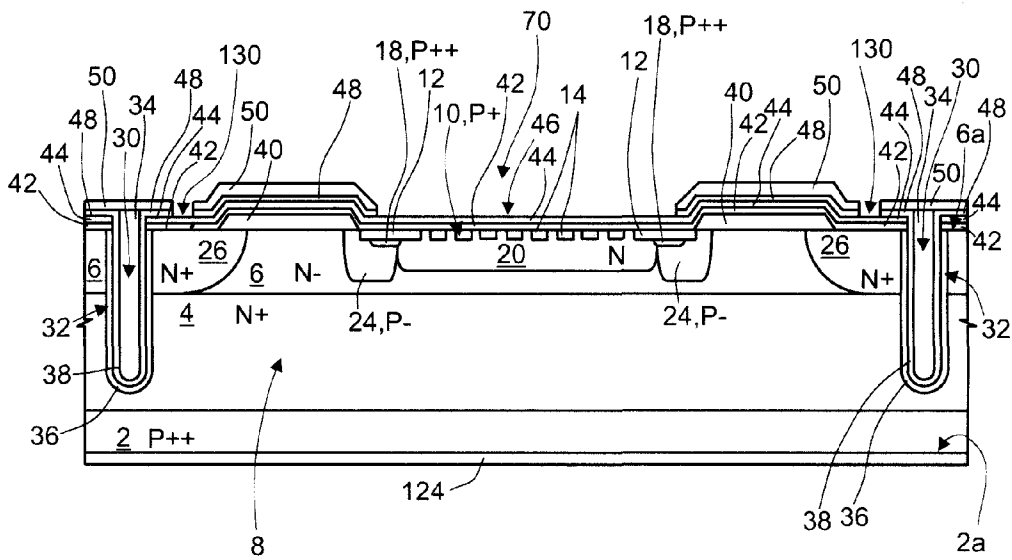


Fig.23

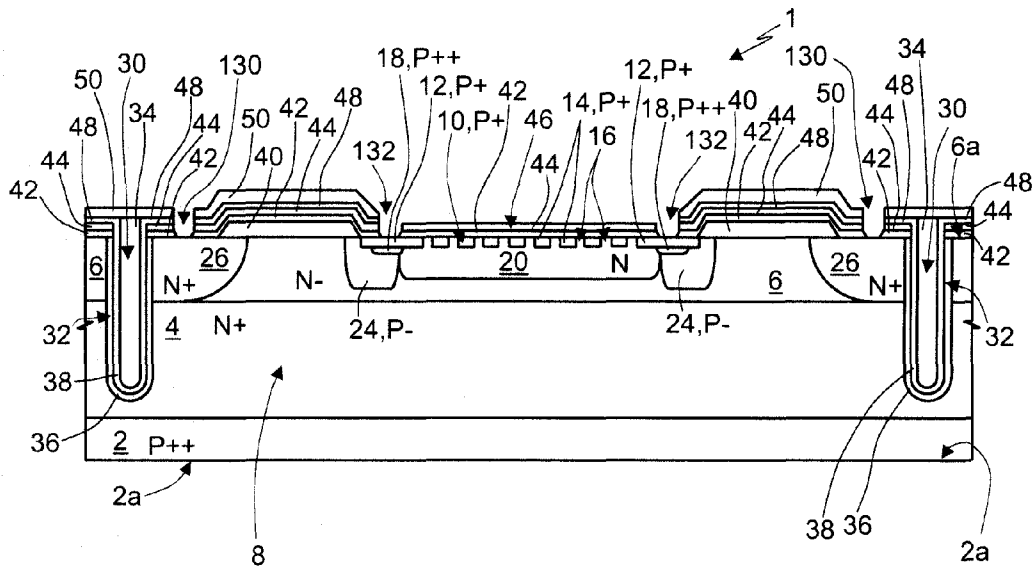


Fig.24

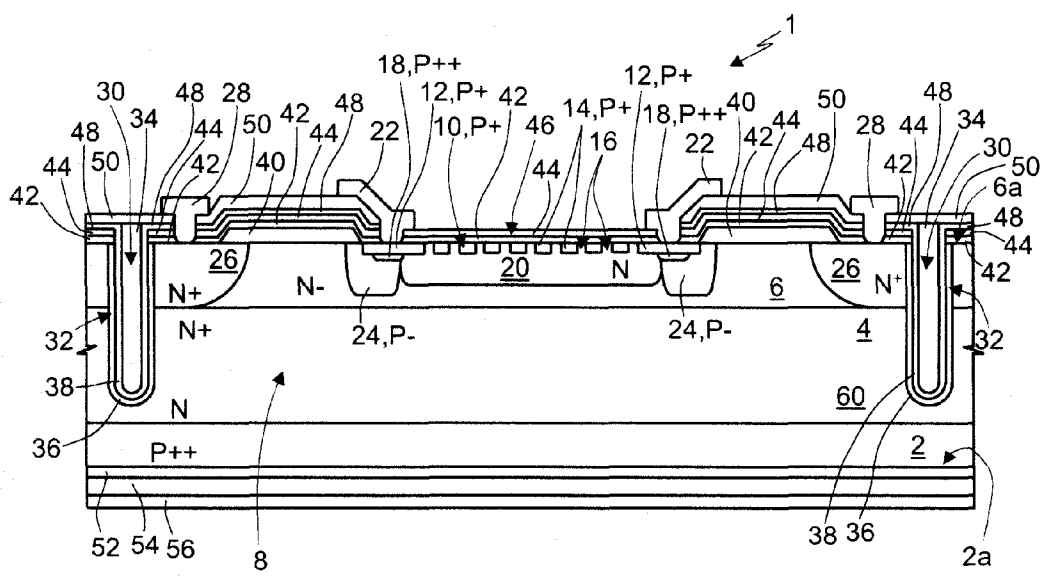


Fig.25

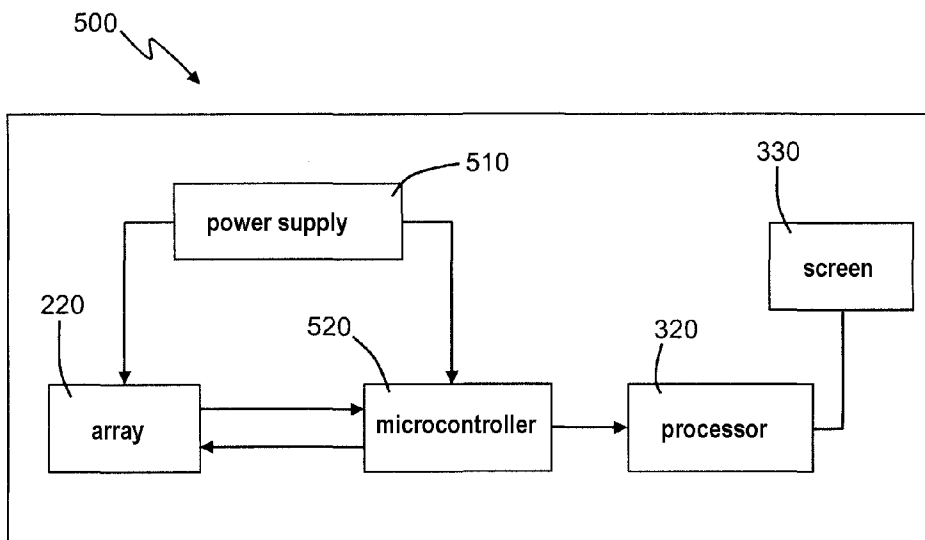


Fig.26