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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	**102015000064890**
Data Deposito	**23/10/2015**
Data Pubblicazione	**23/04/2017**

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	27	16

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	35	32

Titolo

Generatore termoelettrico.

GENERATORE TERMOELETTRICO

Titolare: Delta Ti Research

Inventori: MASCOLO Danilo; BUOSCIOLO Antonietta; LATESSA Giuseppe; GAMMARIELLO Giuseppe; GIUSTI Marco; GISON Italo

La presente invenzione si riferisce ad un generatore termoelettrico.

Più specificamente, l'invenzione riguarda la struttura di un generatore termoelettrico, basato su un materiale termoelettrico sotto forma di film sottile e realizzato con tecnologia microelettronica, di tipo fabbricabile mediante processi planari e tecniche correlate di integrazione 3D, eterogenea o ibrida.

Un generatore termoelettrico è un dispositivo che permette di trasformare energia termica in energia elettrica, grazie alla possibilità di sfruttare l'effetto noto come effetto Seebeck.

Il funzionamento della maggior parte dei generatori termoelettrici di tipo noto è basato sull'utilizzo di un materiale termoelettrico ad elevato fattore di merito ZT, quale il tellururo di bismuto e sue leghe.

Tuttavia, il tellururo di bismuto e le sue leghe sono poco disponibili in natura e di conseguenza i generatori termoelettrici sono costosi e poco adatti a produzioni di massa.

Inoltre, si tratta di materiali che non possono essere facilmente miniaturizzati in quanto non sono

compatibili con i processi di lavorazione utilizzati nell'industria manifatturiera microelettronica.

Di conseguenza, non è possibile realizzare generatori termoelettrici su grande scala o a soddisfare mercati dagli alti volumi (automotive, elettronica di consumo …) quindi poco allineati con i trend di sviluppo quali l'Internet of Things o la Wearable electronics.

Negli ultimi decenni, quindi, attenzione è stata dedicata alla possibilità di realizzare generatori termoelettrici miniaturizzati, utilizzando tecnologie di processo tipiche dei dispositivi MEMS, dei dispositivi CMOS e più ingenerale degli ICs.

I generatori termoelettrici sono costituiti da un insieme di termocoppie.

Una termocoppia è costituita da due materiali conduttori elettrici o, in alternativa, un semiconduttore drogato di tipo p ed un semiconduttore drogato di tipo n uniti tra loro mediante una connessione ad elevata conducibilità elettrica, tipicamente realizzata attraverso un metallo.

Le termocoppie sono generalmente collegate elettricamente in serie e termicamente in parallelo per ottenere una tensione utile ad alimentare un dispositivo elettronico.

La configurazione di una termocoppia può essere *in-plane* o *out-of-plane*, a seconda se il flusso di calore che scorre in una termocoppia è parallelo o ortogonale al piano in cui scorre la corrente elettrica.

Da un lato, il processo di fabbricazione di

generatori termoelettrici, le cui termocoppie sono in configurazione *in-plane* (cfr. Figura 1 che riporta la configurazione della pubblicazione di Y. Van Andel et al.), è più semplice di un processo di fabbricazione di generatori termoelettrici le cui termocoppie sono in configurazione *out-of-plane*.

Dall'altro lato, l'elemento di svantaggio di un generatore termoelettrico le cui termocoppie sono in configurazione *in-plane* rispetto ad un generatore termoelettriche le cui termocoppie sono in configurazione *out-of-plane*, è che le aree di ingombro sono maggiori e vi è di conseguenza una perdita di miniaturizzazione. Nell'industria microelettronica, generalmente, aree maggiori implicano un maggiore costo di produzione del generatore termoelettrico.

Esempi di generatori termoelettrici miniaturizzati in configurazione *in-plane* sono riportati nelle seguenti pubblicazioni:

- Y. Van Andel, M. Jambunathan, R.J.M. Vullers, V. Leonov, Membrane-less in-plane bulk-micromachined thermopiles for energy harvesting, Microelectronic Engineering, Vol. 87 (2010) 1294-1296;
- Xie, J.; Lee, C.; Feng, H. Design, fabrication and characterization of CMOS MEMS-based thermoelectric power generators. J. Micromech. Syst. 2010, 19, 317-324;
- Kao, P.-H.; Shih, P.-J.; Dai, C.-L.; Liu, M.-C. Fabrication and characterization of CMOS-MEMS thermoelectric micro generators. Sensors 2010, 10, 1315-1325;

- Wang, Z.; Van Andel, Y.; Jambunathan, M.; Leonov, V.; Elfrink, R.; Vullers, J.M. Characterization of a bulk-micromachined membraneless in-plane thermopile. J. Electron. Mater. 2011, 40, 499-503.13;
- brevetto US 7,875,791 "Method for manufacturing a thermopile on a membrane and a membrane-less thermopile, the thermopile thus obtained and a thermoelectric generator comprising such thermopiles" Vladimir Leonov, Paolo Fiorini, Chris Van Hoof (2011).

Esempi di generatori termoelettrici miniaturizzati in configurazione *out-of-plane* sono riportati nelle seguenti pubblicazioni:

- Bottner H., Nurnus, J.; Schubert, A.; Volkert, F. "New high density micro structured thermogenerators for stand alone sensor systems" in Proceedings of 26th International Conference on Thermoelectrics, 2007. ICT 2007 (3-7 June 2007) Pages 306 - 309.
- M. Strasser, R. Aigner, M. Franosch, G. Wachutka," Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining", Sensors and Actuators A, Vol. 97-98, 535-542 (2002).
- Su, J.; Leonov, V.; Goedbloed, M.; van Andel, Y.; de Nooijer, M.C.; Elfrink, R.; Wang, Z.; Vullers, R.J. A batch process micromachined thermoelectric energy harvester: Fabrication and characterization. J. Micromech. Microeng. 2010, doi: 10.1088/0960-1317/20/10/104005.

Con riferimento al generatore termoelettrico miniaturizzato menzionato nella pubblicazione di Bottner et al. e illustrato in figura 2, tale generatore termoelettrico miniaturizzato è ottenuto mediante la tecnica *flip chip bonding*. Tuttavia, i materiali utilizzati sono i materiali di tipo noto, i.e. tellururo di bismuto e sue leghe, e sono depositati su wafer di silicio mediante *sputtering*.

Con riferimento al generatore termoelettrico menzionato nella pubblicazione di Strasser et al. e illustrato in figura 3, tale generatore termoelettrico è realizzato mediante surface *micromachining*.

In particolare, detto generatore termoelettrico è costituito da due coppie termolettriche realizzate tramite tecnologia BiCMOS.

L'isolamento tra la parte calda e la parte fredda di dette coppie termoelettriche è realizzato mediate una barriera di ossido LOCOS (Local Oxidation of Silicon).

Il materiale termoelettrico è uno strato con uno spessore di 400nm in polisilicio parzialmente drogato con fosforo per realizzare parti di tipo n e parzialmente drogato con il boro per realizzare parti di tipo p.

La presenza di ponti di alluminio evita la formazione di giunzioni p-n che altrimenti sarebbero presenti tra parti termoelettriche adiacenti.

Per aumentare l'efficienza di conversione dell'energia termica in energia elettrica sono state realizzate una pluralità di cavità nel substrato di

silicio.

Con riferimento al generatore termoelettrico menzionato nella pubblicazione Su et al. ed illustrato nella figura 4, tale generatore termoelettrico è costituito da termocoppie realizzate in poly-SiGe di tipo p e di tipo n, collegate tra loro mediante alluminio.

In particolare, le termocoppie di detto generatore termoelettrico sono *free standing*.

Il materiale termoelettrico ha sostanzialmente la forma di un ponte, in virtù del fatto che è stato rimosso il materiale sottostante per aumentare la differenza di temperatura a capi del materiale termoelettrico.

La parte inferiore e la parte superiore di detto generatore termoelettrico sono sigillate insieme mediante la tecnica del *flip-chip bonding* e mediante una pasta adesiva.

Scopo della presente invenzione è quello di superare detti svantaggi, fornendo un generatore termoelettrico con dimensioni compatte, avente una struttura semplice che è configurata per aumentare l'efficienza di conversione di energia termica in energia elettrica, in modo tale che sia possibile trasformare in corrente elettrica anche una quantità di calore per unità di superficie superiore rispetto ai dispositivi di arte nota a thin film.

Forma pertanto oggetto della presente invenzione un generatore termoelettrico secondo le allegate rivendicazioni, che fanno parte integrante della

presente descrizione.

La presente invenzione verrà ora descritta, a titolo illustrativo, ma non limitativo, secondo una sua forma di realizzazione, con particolare riferimento alle figure allegate, in cui:

- La figura 1 mostra il layout di un dispositivo in configurazione in-plane, secondo la tecnica nota;
- La figura 2 mostra una vista schematica di un TEG in configurazione out-of-plane, realizzato con tecnologia a film sottile, secondo la tecnica nota;
- La figura 3 mostra una vista schematica di due coppie termoelettriche in configurazione out-of-plane realizzate tramite BiCMOS, secondo la tecnica nota;
- La figura 4 mostra un esempio di struttura free-standing secondo la tecnica nota;
- la figura 5 mostra una sezione di una sezione parziale di un generatore termoelettrico, secondo l'invenzione;
- la figura 6 mostra in (a) una sezione di un primo substrato del generatore termoelettrico di figura 5, in (b) una porzione di un secondo substrato del generatore termoelettrico di figura 5;
- la figura 7 mostra una vista prospettica di una porzione del generatore termoelettrico di figura 5, con uno strato di materiale elettricamente e termicamente isolante disposto su una porzione

di una prima collina del primo substrato, il quale ha la forma di un tronco di piramide, pieno o anche parzialmente vuoto, e rivestito da materiale termoelettrico, quest'ultimo a contatto con conduttori metallici;

- la figura 8 mostra una vista laterale in sezione di un elemento base di una forma di realizzazione del generatore termoelettrico secondo l'invenzione;
- la figura 9 mostra una vista prospettica di elementi secondo la figura 7 collegati in serie, secondo un aspetto dell'invenzione;
- la figura 10 mostra una vista prospettica di elementi secondo la figura 7 collegati in parallelo, secondo un aspetto dell'invenzione;
- la figura 11 mostra una vista prospettica di elementi secondo la figura 7 collegati a griglia, secondo un aspetto dell'invenzione;
- la figura 12 mostra una vista prospettica di un differente elemento base di una forma di realizzazione del generatore termoelettrico secondo l'invenzione;
- la figura 13 mostra una vista prospettica di elementi secondo la figura 12 collegati a griglia, secondo un aspetto dell'invenzione;
- la figura 14 mostra una ulteriore forma di realizzazione dell'invenzione, in cui i collegamenti elettrici tra i blocchi costitutivi sono realizzati sulla parte back del wafer di silicio di base mediante l'utilizzo di VIAS di

interconnessione.

Con particolare riferimento alle figure 5-8, si illustra un blocco costitutivo 100 (building block) di un generatore termoelettrico secondo l'invenzione.

Detta parte di generatore termoelettrico 100 comprende:

- un primo substrato o substrato inferiore 110 (wafer di silicio);
- un secondo substrato o substrato superiore 120 (wafer di silicio) affacciato al substrato inferiore.

Si distinguono, in figura 5, due elementi di base 130 nel substrato inferiore 110, con collegamenti 140, meglio dettagliati in seguito (cfr. figure 9, 10, 11). Tra i due substrati inferiore e superiore è interposta un'intercapedine di aria o vuoto 150.

Con riferimento alla figura 6(a), si illustra la struttura del substrato inferiore 110. Esso è dotato di una superficie 111 con colline 111C e valli 111V alternate.

Con riferimento alla figura 6(b), si illustra la struttura del substrato superiore 120. Esso è dotato di una superficie 121 con colline 121C e valli 121V alternate.

Detto primo substrato 110 e detto secondo substrato 120 sono affacciati uno verso l'altro in modo tale che ciascuna collina 111C del primo substrato 110 sia affacciata ad una rispettiva collina 121C di detto secondo substrato 120 e che ciascuna valle 111V del primo substrato 110 sia affacciata ad una rispettiva

valle 121V del secondo substrato 120, come chiaro dalla figura 5. Le colline rispettive sui due strati sono proprio a contatto attraverso la loro sommità.

Le valli 111V del primo substrato 1 e le valli 121V del secondo substrato 2 contribuiscono ad aumentare la resistenza termica dell'aria presente nell'intercapedine tra detti substrati.

Nella forma di realizzazione illustrata, ciascuno di detti substrati è costituito da un rispettivo wafer di silicio.

Con riferimento al substrato inferiore 110, sull'intera superficie 111 vi è uno primo strato 114 di materiale elettricamente isolante, ad esempio ossido di silicio o nitruro di silicio con spessore che può variare tra pochi nanometri e un micron, a contatto con il wafer di silicio.

Al contatto con il primo strato di materiale elettricamente isolante 114 vi è uno strato localizzato 115 di materiale elettricamente isolante (ad esempio ossido di silicio, nitruro di silicio) che forma il corpo della collina 111C. Lo spessore di tale strato localizzato 115 ha uno spessore che va da 1 micron fino a centinaia di micron, preferibilmente dell'ordine delle decine di micron quando il materiale termoelettrico (descritto nel seguito) è dell'ordine delle centinaia di nanometri. A tale materiale di collina viene data una forma tronco-piramidale a base qualsiasi ad esempio rettangolare o quadrata (negli esempi riportati) o tronco-conica mediante tecniche fotolitografiche standard. La geometria del materiale

in questa zona e le sue caratteristiche termiche sono tali da costituire una resistenza termica significativamente più alta di quella delle altre parti che costituiscono l'elemento base (Il materiale di collina deve essere elettricamente isolante e termicamente deve presentare una conducibilità termica quanto più bassa possibile rispetto a quella del materiale termoelettrico).

Al di sopra dello strato localizzato 115, vi è uno strato di materiale termoelettrico 116, di tipo p o di tipo n. Tale materiale termoelettrico viene depositato su tutte le facce laterali (oppure solo su due facce solamente) della struttura 115 a forma di tronco di piramide o tronco di cono (cfr. fig. 7). Lo spessore può essere compreso tra 10 e 1000 nm, ma potrebbe essere anche maggiore di 1 micron a seconda della specifica applicazione per cui si progetta il TEG.

Esempi di material TE sono semiconduttori fortemente drogati come Si oppure SiGe.

Il primo substrato 110 ed il secondo substrato 120 possono essere wafer cristallini di silicio assottigliati o ultra assottigliati, per trasportare una maggiore quantità di calore verso i capi del materiale termoelettrico.

Infine, sono depositate delle metallizzazioni 117, che si estendono tra circa la metà di una valle e l'inizio di una collina, al di sopra del primo strato isolante 114. Vi è poi ancora una metallizzazione 118 alla sommità della collina 111C al di sopra del materiale termoelettrico 116. Tutte queste

metallizzazioni hanno la funzione di contatti elettrici. La base della metallizzazione 118 che appoggia sulla sommità della collina della struttura tronco-piramidale o tronco-conica funge anche da contatto termico.

L'elemento di base 130 dello strato inferiore 110 è mostrato nella figura 7 in prospettiva. Si vede anche una metallizzazione 119 che contorna la sommità della collina, e che può essere considerata un'estensione della metallizzazione 117 .

I contatti elettrici 118 e 119 tra detti contatti metallici sovrapposti al film sottile di materiale termoelettrico possono essere stabiliti attraverso un multistrato di interfaccia comprendente un film di siliciuro appartenente al gruppo composto TiSi2, WSi2, MoSi2, PtSi2 and CoSi2, per diminuire la resistenza elettrica di contatto. Allo stesso scopo, gli stessi contatti metallici possono essere stabiliti attraverso un multistrato di interfaccia comprendente un film intermedio di un metallo refrattario appartenente al gruppo composto da W, Ti, Ta e un film di nitruro di titanio in contatto col metallo.

Con riferimento al substrato superiore 120, sull'intera superficie 121 vi è un primo strato 124 di materiale elettricamente isolante, ad esempio ossido di silicio o nitruro di silicio con spessore che può variare tra pochi nanometri e un micron, a contatto con il wafer di silicio.

Un contatto elettrico 128 è depositato sullo strato isolante 124, alla sommità della collina 121C.

I contatti posti alle sommità delle colline dello strato superiore e dello strato inferiore sono a contatto nel dispositivo secondo l'invenzione. La figura 8 mostra questo contatto in un disegno più in scala.

I wafer di silicio di cui sopra possono essere micro-lavorati, uniti assieme mediante tecnica di smart-cut processing o tecnica di trasferimento di strati Smart Stacking™ della Soitec.

Per quanto riguarda la realizzazione del substrato inferiore (bottom chip, figura 6(a)) si possono utilizzare tecniche note e tecniche future. In particolare si può procedere ad esempio come segue:

1) A partire da un substrato di silicio monocristallino si deposita un film di ossido termico (dello spessore di 1µm o 2µm). Questo ossido servirà da maschera per gli attacchi seguenti.

2) Si realizzano, tramite procedimento fotolitografico, delle aperture sull'ossido termico per la realizzazione degli scavi di valle (111V).

3) Tramite una combinazione di attacchi chimici (Wet) e al plasma (Reactive Ion Etch) si realizzano le zone di valle (111V), sul substrato di silicio del Bottom Chip.

4) Si deposita un film di ossido di silicio spesso (spessore da 1µm a 10µm) tramite tecnica LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition), PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) o tramite deposizione di SOG (Spin On glass).

5) Si realizzano le strutture di collina (115),

con pendenza controllata [riferimento OPTICS EXPRESS, Vol. 20, No. 20 / 22934 (2012)], tramite maschere fotolitografiche e una combinazione di attacchi chimici (Wet) e al plasma (Reactive Ion Etch) dell'ossido di silicio spesso.

6) Si fa crescere un ossido termico (dello spessore di qualche centinaia di nanometri) sul silicio che è stato messo a nudo dagli attacchi precedenti. Questo ossido servirà a isolare elettricamente il substrato.

7) Si deposita il materiale termoelettrico (tipo "p" o tipo "n") e si delimitano, per fotolitografia, le zone attive di materiale termoelettrico sulle colline di ossido spesso.

8) Si deposita un film di metallo mediante tecnica di Sputtering e si delimitano, per fotolitografia, le zone di interconnessione del Bottom Chip.

Per quanto riguarda la realizzazione del substrato superiore (figura 6(b)) si possono utilizzare tecniche note e tecniche future. In particolare si può procedere ad esempio come segue:

1) A partire da un substrato di silicio monocristallino si fa crescere un ossido termico (dello spessore di 1µm o 2µm). Questo ossido servirà da maschera per gli attacchi seguenti.

2) Si realizzano, tramite procedimento fotolitografico, delle aperture sull'ossido termico.

3) Tramite una combinazione di attacchi chimici (Wet) e al plasma (Reactive Ion Etch) si creano le

zone di valle (121V), sul substrato di silicio del Top Chip.

4) Si elimina, tramite attacco Wet, il film di ossido termico.

5) Si deposita, tramite tecnica LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition) o PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) un film di nitruro di silicio. Questo film di nitruro servirà ad isolare elettricamente le interconnessioni da realizzare sul wafer di Top Chip, come descritto nello step successivo.

6) Si deposita un film di metallo tramite tecnica di Sputtering e si delimitano, per fotolitografia, le zone di interconnessione del Top Chip.

Questa tecnica fa riferimento alle seguenti pubblicazioni:

- "Semiconductor Devices, Physics and Technology, 2nd edition", S.M. Sze. John Wiley and Sons (2002)
- Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, Second Edition, Yoshio Nishi, Robert Doering. CRC Press (2007)
- "A fully integrated high-Q Whispering-Gallery Wedge Resonator" Fernando Ramiro-Manzano, Nikola Prtljaga, Lorenzo Pavesi, Georg Pucker and Mher Ghulinyan, OPTICS EXPRESS, Vol. 20, No. 20 / 22934 (2012).

Alcune caratteristiche che differenziano il dispositivo qui proposto da quelli dell'arte nota sono:

- assenza di strutture sospese o a ponte;
- struttura 3D del materiale termoelettrico con conseguente aumento della capacità di trasformare calore in elettricità;
- maggiore isolamento termico tra lo strato inferiore e lo strato superiore. Conseguente migliore capacità di accoppiamento termico con l'esterno e pertanto maggiore capacità di conversione termoelettrica;
- migliore contatto termico tra gli elementi del substrato inferiore e superiore che trasportano il calore (il miglioramento rispetto all'arte nota è dovuto all'impiego di flip-chip bonding o metal-to-metal bonding);
- migliore gestione dei flussi sia termici che elettrici: l'impiego di un materiale di collina che ha una elevata resistenza termica e la presenza di aria/vuoto nelle cavità, consente di guidare meglio il calore all'interno del materiale TE. Ad esempio nella soluzione presente nell'arte nota in Figura 3 la presenza dell'ossido di silicio crea un corto circuito termico tra la parte calda e quella fredda; invece nella soluzione in Figura 4 le parti calde e fredde sono più vicine rispetto alla nostra soluzione in cui sono stati praticati gli scavi nei wafer come visibile ai punti 111V e 121V;
- utilizzo di substrati assottigliati con conseguente riduzione delle perdite di substrato

(il wafer può essere assottigliato fino al limite di avere una struttura che sia ancora meccanicamente stabile (un range potrebbe essere tra 10 e 100 micron).

Per ottenere un generatore termoelettrico che abbia la massima differenza di temperatura ai capi del materiale termoelettrico ($\Delta T_{effettivo}$) si sfrutta un'intercapedine di aria oppure un'intercapedine in cui è praticato il vuoto, al fine di consentire un miglior disaccoppiamento termico tra il substrato inferiore ed il substrato superiore, al posto dello strato di ossido LOCOS riportato nel lavoro di Strasser et al.

Invece, rispetto al dispositivo riportato nel lavoro di Su, Leonov et al. si ottiene un maggiore $\Delta T_{effettivo}$ in quanto l'integrazione del substrato inferiore e del substrato superiore viene effettuata tramite flip-chip bonding o metal-to-metal bonding, senza ricorrere all'utilizzo di adesivi che introducono inevitabilmente delle perdite del flusso di calore che determina il $\Delta T_{effettivo}$. Inoltre, l'utilizzo di substrati assottigliati consente di ridurre le perdite termiche importanti. La presenza di un bonding via metallo oppure via ossido, in luogo di bonding che prevedono l'utilizzo di materiali polimerici o paste termiche, consente anche di raggiungere temperature più elevate prima del degrado.

Per ottenere un TEG a partire da un elemento base, è necessario collegare in modo opportuno più elementi base di tipo P e di tipo N. Gli elementi base sono di tipo N quando si impiega un materiale termoelettrico

costituito da un semiconduttore (ad esempio silicio) fortemente drogato (ad esempio con boro) in cui le cariche maggioritarie sono costituite da elettroni e di tipo P quando si impiega un materiale termoelettrico (ad esempio silicio) costituito da un semiconduttore fortemente drogato (ad esempio con fosforo) in cui le cariche maggioritarie sono costituite da lacune.

Si riporta di seguito il collegamento elettrico tra due elementi base di tipo P (100P) e due di tipo N (100N):

a) Collegamento in serie 1000S di due coppie di elementi base tipo P e tipo N, vedi Figura 9.

b) Collegamento in parallelo 1000P di due coppie di elementi base P ed N, vedi Figura 10.

c) Collegamento tipo a griglia 1000G di due coppie di elementi base P ed N, vedi Figura 11.

Nelle figure 9-11 sono mostrati i diversi collegamenti elettrici tra elementi base, le frecce indicano il verso in cui scorrerebbe la corrente elettrica nell'ipotesi in cui il substrato superiore del generatore termoelettrico fosse a contatto con un bagno termico a temperatura T_{hot} e che il substrato inferiore del generatore termoelettrico fosse a contatto con uno a temperatura T_{cold}.

Un'altra possibile realizzazione dell'invenzione proposta prevede un blocco di base dello strato inferiore 230 con una collina 211C tronco-piramidale, la deposizione del materiale termoelettrico 216 soltanto su due facce laterali del tronco di piramide, e i contatti elettrici laterali 217 e superiore 218

come riportato nella Figura 12.

Per ottenere un generatore termoelettrico a partire dall'elemento base riportato in Figura 5, è necessario collegare più elementi base di tipo P e di tipo N in modo analogo a come mostrato in precedenza. Si riporta ad esempio, nella Figura 13, il collegamento 2000G di tipo grid tra elementi base 230P di tipo P e 230N di tipo N.

L'unione dei blocchi costitutivi è fatta alternando, nel flusso di corrente, elementi di tipo P ed elementi di tipo N. L'unione in allineamento dei blocchi costitutivi è eseguita in modalità chip-on-chip, chip-on-wafer, wafer-on-wafer; o in modalità chip-on-wafer-on-substrate o chip-on-chip-on substrate.

In riferimento alla figura 14, si mette in luce un ulteriore vantaggiosa forma realizzativa dell'invenzione, in cui i collegamenti elettrici tra detti blocchi costitutivi sono realizzati sulla parte back del wafer di silicio di base 110 mediante l'utilizzo di VIAS di interconnessione. La presenza dei VIAS costituisce una sinergia con il resto della geometria sopra descritta. Infatti, vi è una migliore evacuazione del calore, perché il calore deve seguire un percorso; esso non deve andare nel substrato ma attraversarlo ed essere evacuato oltre il substrato di silicio. Inoltre in questi VIAS passa contemporaneamente l'energia elettrica. I VIAS sono preferibilmente realizzati in un wafer assottigliato.

VANTAGGI DELL'INVENZIONE

Vantaggiosamente, il generatore termoelettrico, oggetto dell'invenzione, permette di massimizzare la differenza di temperatura ai capi del generatore. Un secondo vantaggio è dato dal fatto che non sono presenti all'interno del generatore termoelettrico, oggetto dell'invenzione, strutture sospese o strutture a ponte, differentemente da generatori termoelettrici di tipo noto (come ad esempio quelli descritti nella pubblicazione di Strasser et al e nella pubblicazione di Su, Leonov et al). Dal punto di vista meccanico, dette strutture sospese o strutture a ponte indeboliscono la struttura del generatore termoelettrico e/o rendono detto generatore termoelettrico inadatto a resistere a elevate temperature (maggiori di 60°C) e/o ad essere sigillato mediante specifici tipi di *bonding*, quali ad esempio *flip-chip bonding* o *metal-to-metal bonding*.

Di conseguenza, l'assenza di strutture sospese o strutture a ponte rende il generatore termico, oggetto dell'invenzione, maggiormente robusto dal punto di vista meccanico.

Inoltre la struttura è miniaturizzabile ed integrabile direttamente nei dispositivi elettronici tradizionali o direttamente su silicio o in integrazioni eterogenee.

E' possibile disporre gli elementi base in architetture più complesse per rispondere a specifiche richieste applicative, disponendo gli elementi base in serie e/o in parallelo elettrico in funzione delle

grandezze elettriche che si intendono ottenere in uscita. E' possibile per esempio modificare entro un certo range le grandezze elettriche in uscita dei generatori lavorando sulle interconnessioni elettriche serie-parallelo tra elementi base : ad esempio, se n elementi base vengono disposti tutti in serie elettrica, si avrà la massima tensione erogabile e la massima resistenza elettrica (serie di n resistenze unitarie); se gli n elementi base vengono disposti in parallelo, si otterrà un è generatore con la minima resistenza (parallelo di n resistenze unitarie); disposizioni serie-parallelo consentono di ottenere una risposta elettrica che sia modulabile tra i due estremi, interamente serie o interamente parallelo.

La presente invenzione è stata descritta a titolo illustrativo, ma non limitativo, secondo una sua forma preferita di realizzazione, ma è da intendersi che variazioni e/o modifiche potranno essere apportate da un esperto del ramo, senza per questo uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

RIVENDICAZIONI

1. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato con configurazione a flusso di calore out-of-plane, comprendente un wafer di silicio di base (110) ed un wafer di silicio di copertura (120) ciascuno avente due facce opposte, in cui:

- detto wafer di silicio di base (110) presenta su una faccia delle due facce opposte una pluralità di colline (111C) ed una pluralità di valli (111V) tra dette colline (111C);
- ciascuna di dette colline (111C) comprende un primo tronco di piramide o di cono nel wafer di silicio, su cui è connesso un secondo tronco di piramide o cono (115) in materiale elettricamente e termicamente isolante, in cui la base maggiore del secondo tronco di piramide o cono è meno estesa della e appoggiata alla base minore del primo tronco di piramide o di cono nel wafer di silicio;
- sulla base minore e almeno in parte sulla superficie laterale di detto secondo tronco di piramide o di cono è presente uno strato di materiale termoelettrico (116) drogato di tipo p o n che si estende anche su almeno una porzione della base minore di detto primo tronco di piramide o di cono,
- è presente un contatto elettrico di sommità (118) sulla base minore di detto secondo tronco di piramide o cono e due o più contatti laterali (117) che ad una estremità sono a contatto con

detto strato di materiale termoelettrico su detta almeno una porzione della base minore di detto primo tronco di piramide o di cono e si estendono sul fianco di detta collina (111C) fino ad una porzione di una rispettiva valle (111V);

- detto wafer di silicio di copertura (120) presenta su una faccia di dette facce opposte una pluralità di valli (121V) e colline (121C),
- su sostanzialmente tutta detta una faccia del del wafer di silicio di copertura (120) è presente uno strato (124) di materiale elettricamente isolante;
- sulla sommità delle colline (121C) di detto wafer di silicio di copertura (120) sono posti dei contatti metallici che fungono sia da contatti elettrici che da contatti termici di sommità;
- detto wafer di silicio di copertura è contrapposto a detto wafer di silicio di base in modo tale che i rispettivi contatti di sommità (118, 128) siano in contatto e lo spazio tra detti wafer di silicio di copertura e detto wafer di silicio di base sia uno spazio in cui è praticato il vuoto o riempito da gas, in particolare aria.

2. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato secondo la rivendicazione 1, in cui detti contatti di sommità e laterali (117, 118, 128) sono in metallo, ad esempio alluminio, rame, argento, o in leghe metalliche.

3. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui su detta una faccia del wafer di silicio di

base (110) è presente uno strato (114) di materiale elettricamente isolante, con spessore compreso tra 1 nm a 1 μm.

4. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 3, in cui detto materiale termoelettrico è un semiconduttore drogato di tipo p o tipo n.

5. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 4, in cui detto secondo tronco di piramide o cono (115) ha un'altezza compresa tra 1 micron e 500 micron.

6. Un blocco costitutivo (100) di generatore termoelettrico integrato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 5, in cui detto secondo tronco di piramide o cono (115) è di un materiale appartenente al gruppo composto da: biossido di silicio, ossidi ad alta resistenza alla conduzione del calore, strutture reticolari nanometriche di materiale fononico, e super-lattici di film sottile di silicio nanometrico.

7. Un generatore termoelettrico integrato (1000S, 1000P, 1000G) formato da due o più blocchi secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui detti due o più blocchi sono connessi tra di loro per mezzo di detti contatti laterali (117) e detti contatti di sommità (128) in modo tale che essi risultino connessi in serie, o in parallelo o a griglia e in modo tale che una corrente elettrica generata per effetto Seeback scorra attraverso blocchi alternati con materiale

termoelettrico (116) drogato di tipo p o n.

8. Un generatore termoelettrico integrato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 8, in cui tra i rispettivi contatti di sommità del wafer di base e del wafer di copertura è presente un flip-chip bonding.

9. Un generatore termoelettrico integrato secondo la rivendicazione precedente, in cui detti wafer di base e di copertura sono uniti in allineamento con una tecnica appartenente al gruppo comprendente o costituito da: metal-to-metal bonding, termocompressione metallo-metallo, unione in plasma, unione mediante benzociclobutene, unione mediante poliammidi, unione mediante composti intermetallici, unione mediante interdiffusione solido liquido (SLID), unione mediante lega eutectica, unione rame-ossido, unione metallo-ossido metallico, unione anodica e unione mediante micro-bump.

10. Un generatore termoelettrico integrato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 7 a 9, in cui i collegamenti elettrici tra detti blocchi costitutivi sono realizzati sulla parte back del wafer di silicio di base (110) mediante l'utilizzo di VIAS di interconnessione.

Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

Tecnica precedente

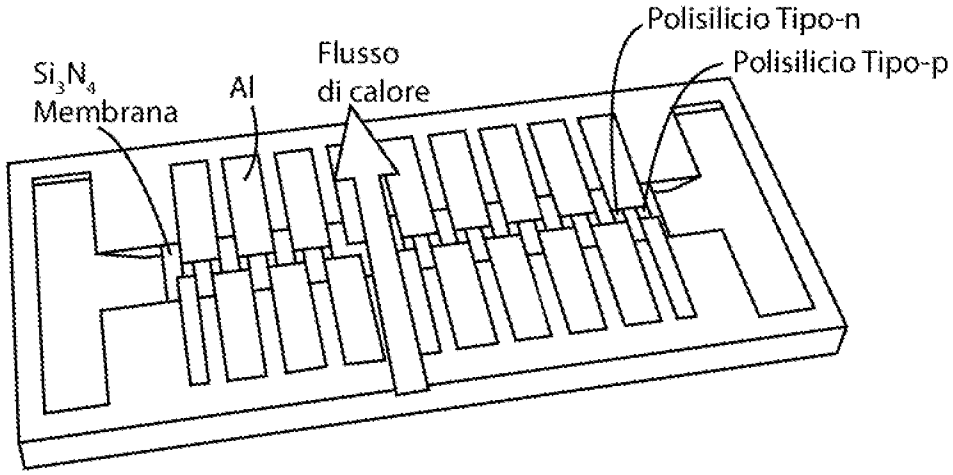


Fig. 1

Tecnica precedente

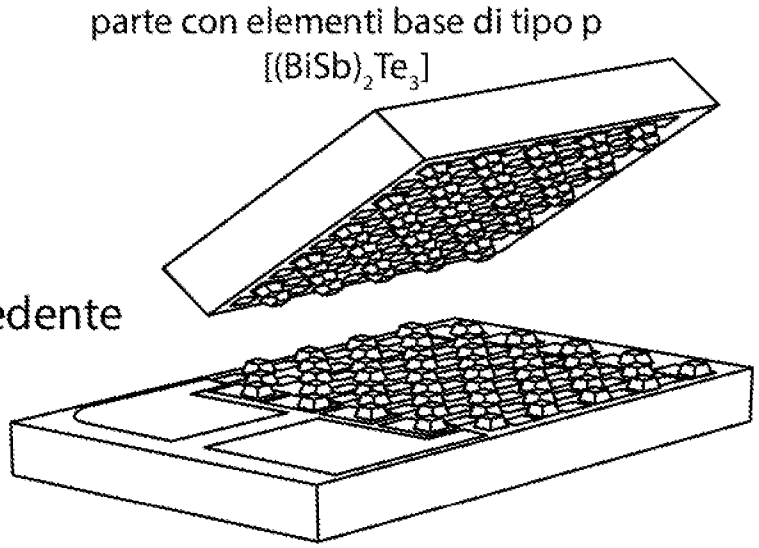


Fig. 2

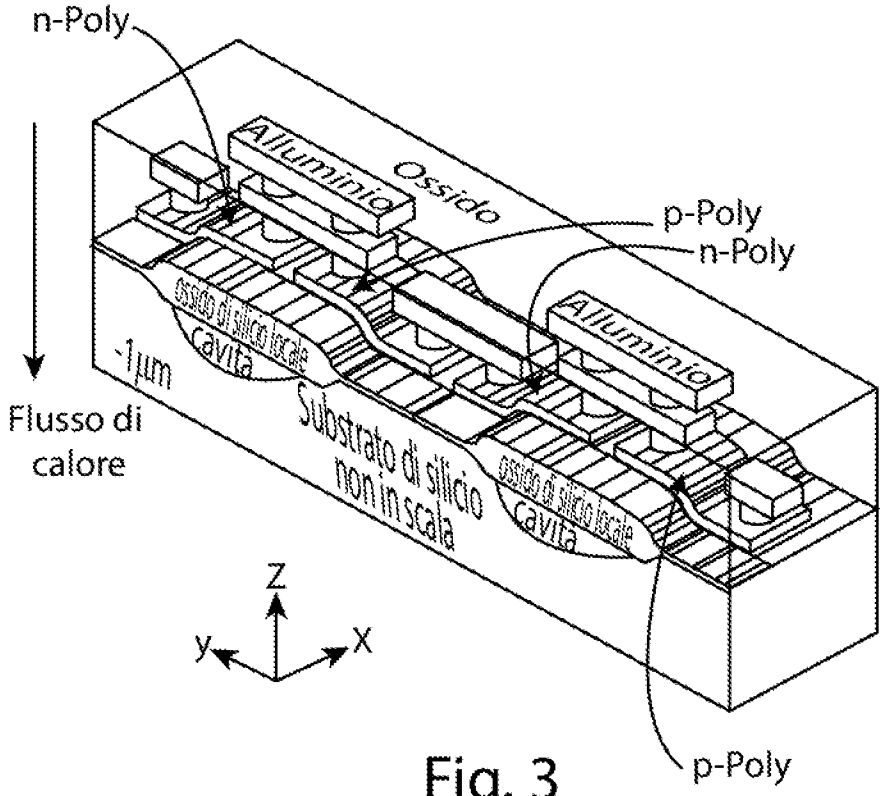

n-Poly
Alluminio
Ossido
p-Poly
n-Poly
Alluminio
ossido di silicio incavo
Cavità
-1µm
Flusso di calore
Substrato di silicio non in scala
ossido di silicio incavo
Cavità
Z
y
X
p-Poly

Fig. 3

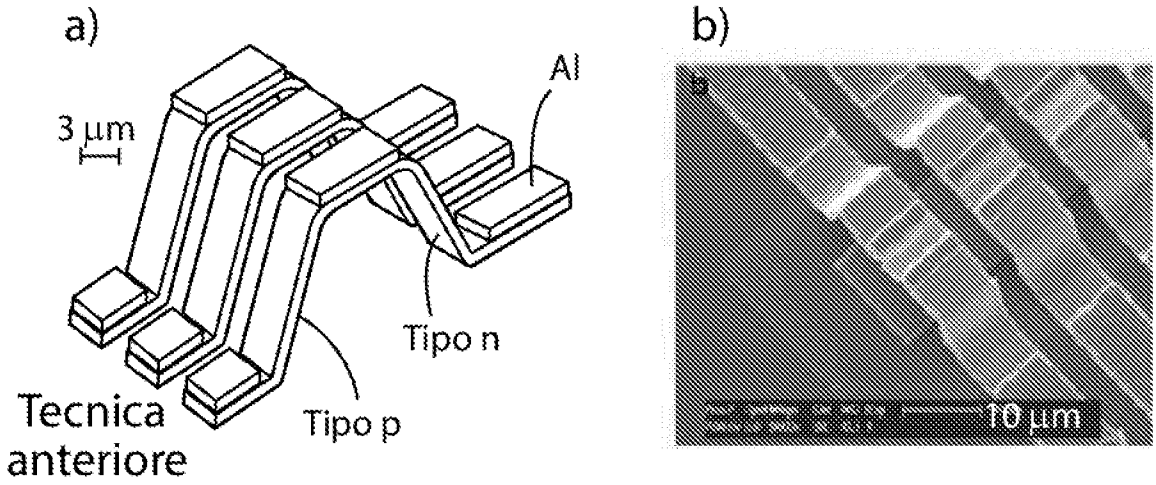

a)
3 µm
Al
Tipo n
Tipo p
Tecnica anteriore
b)
10 µm

Fig. 4

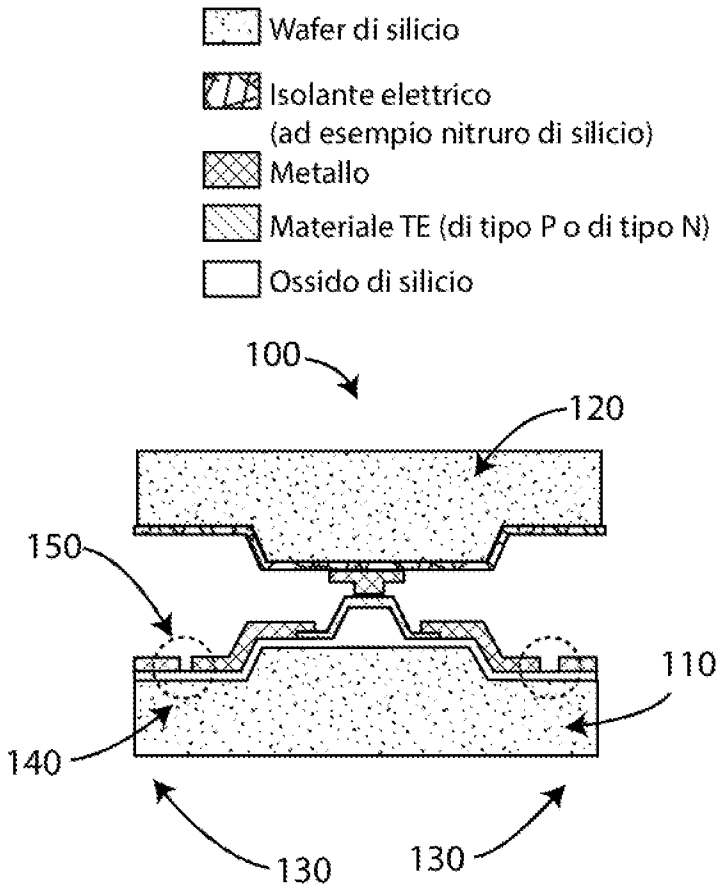
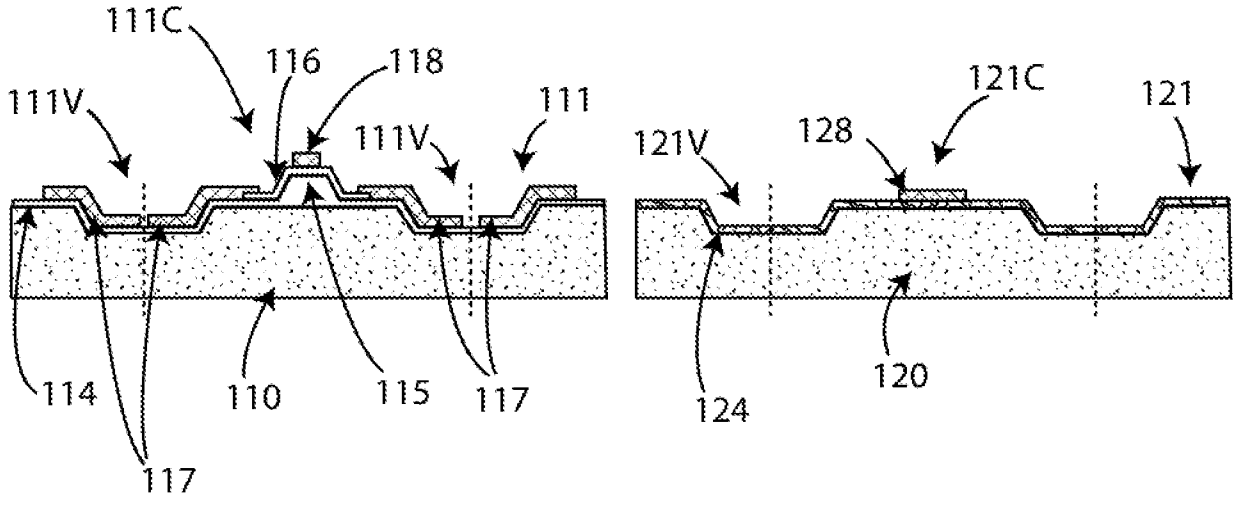

Wafer di silicio
Isolante elettrico
(ad esempio nitruro di silicio)
Metallo
Materiale TE (di tipo P o di tipo N)
Ossido di silicio
100
120
150
110
140
130
130

Fig. 5


111C
116
118
111V
111
111V
114
110
115
117
117
121C
121
121V
128
124
120

(a) (b)

Fig. 6

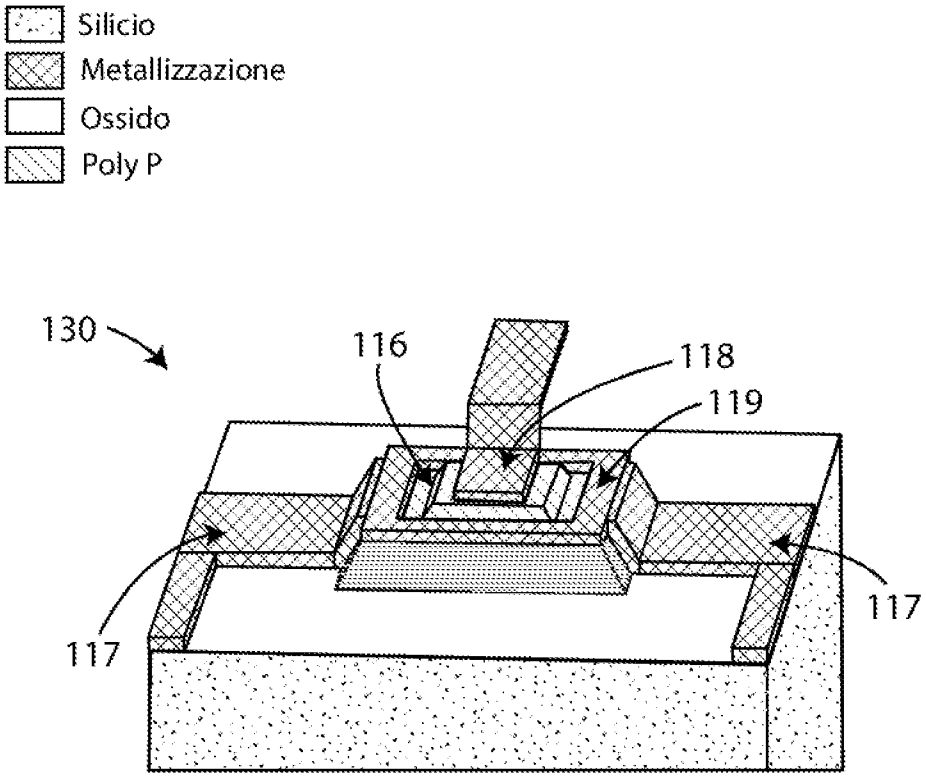

Silicio
Metallizzazione
Ossido
Poly P
130
116
118
119
117
117

Fig. 7

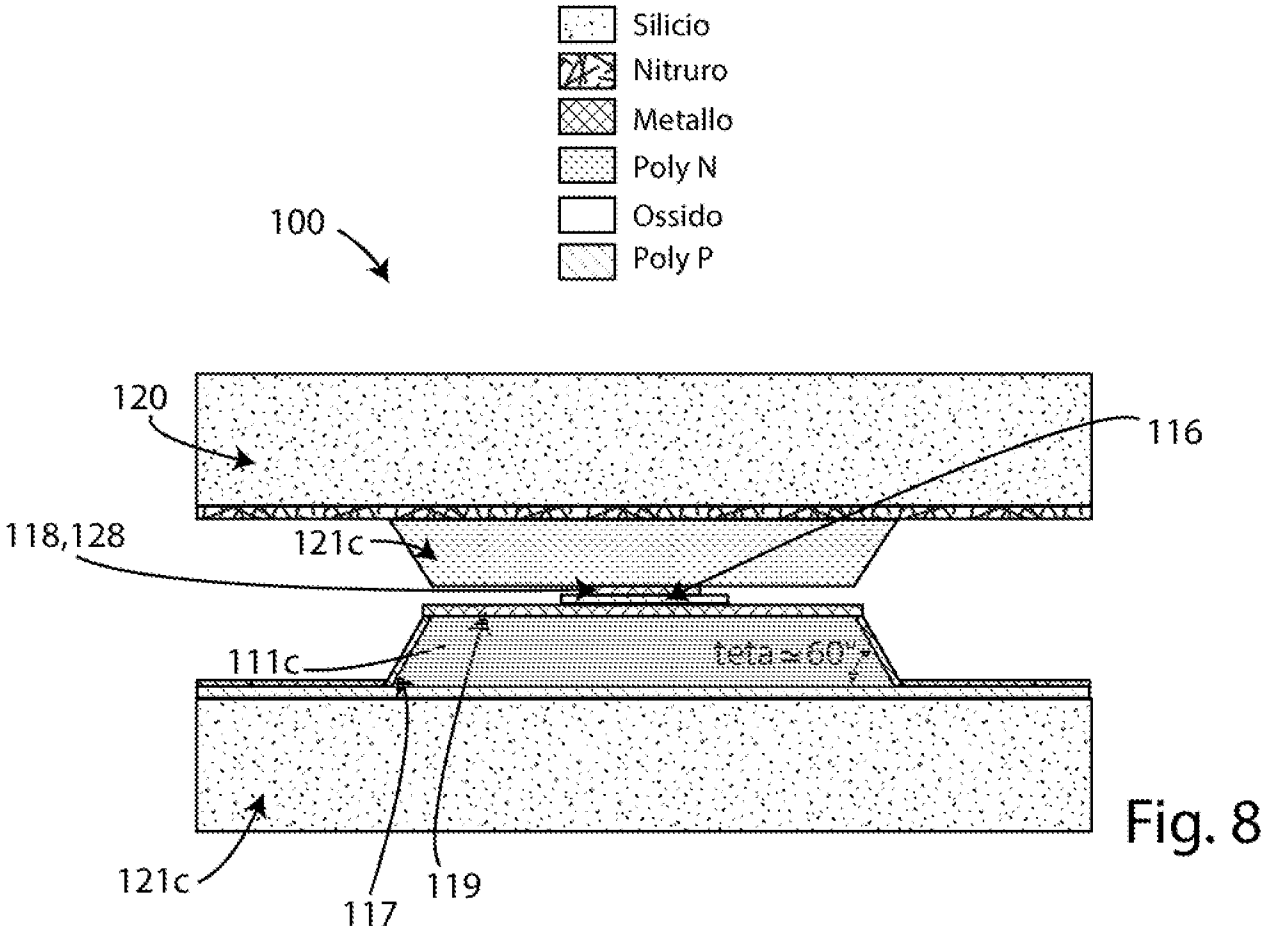

Silicio
Nitruro
Metallo
Poly N
Ossido
Poly P
100
120
116
118,128
121c
111c
teta ~ 60°
121c
117
119

Fig. 8

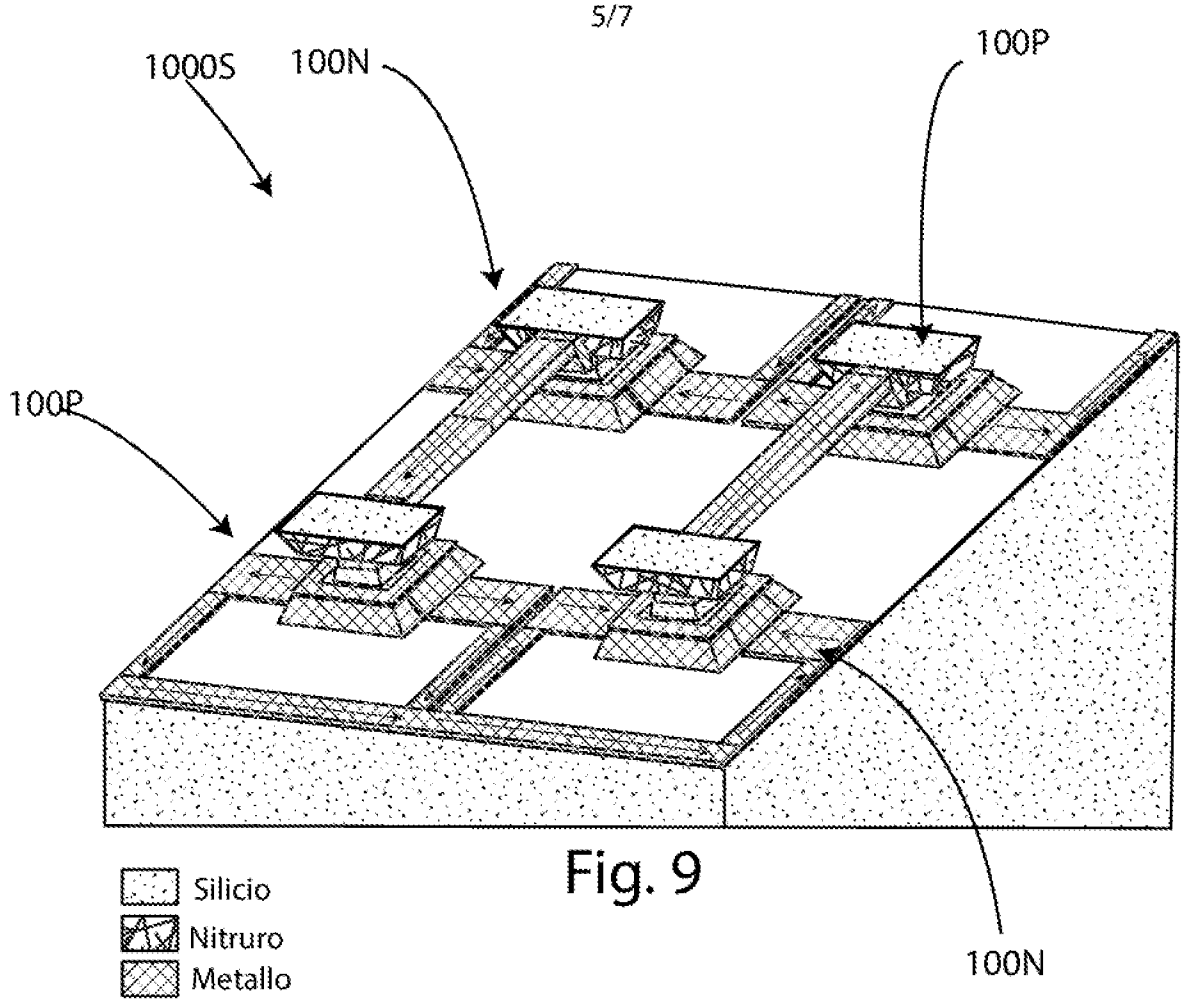

1000S
100N
100P
100P
100N
Silicio
Nitruro
Metallo
Poly N
Ossido
Poly P

Fig. 9

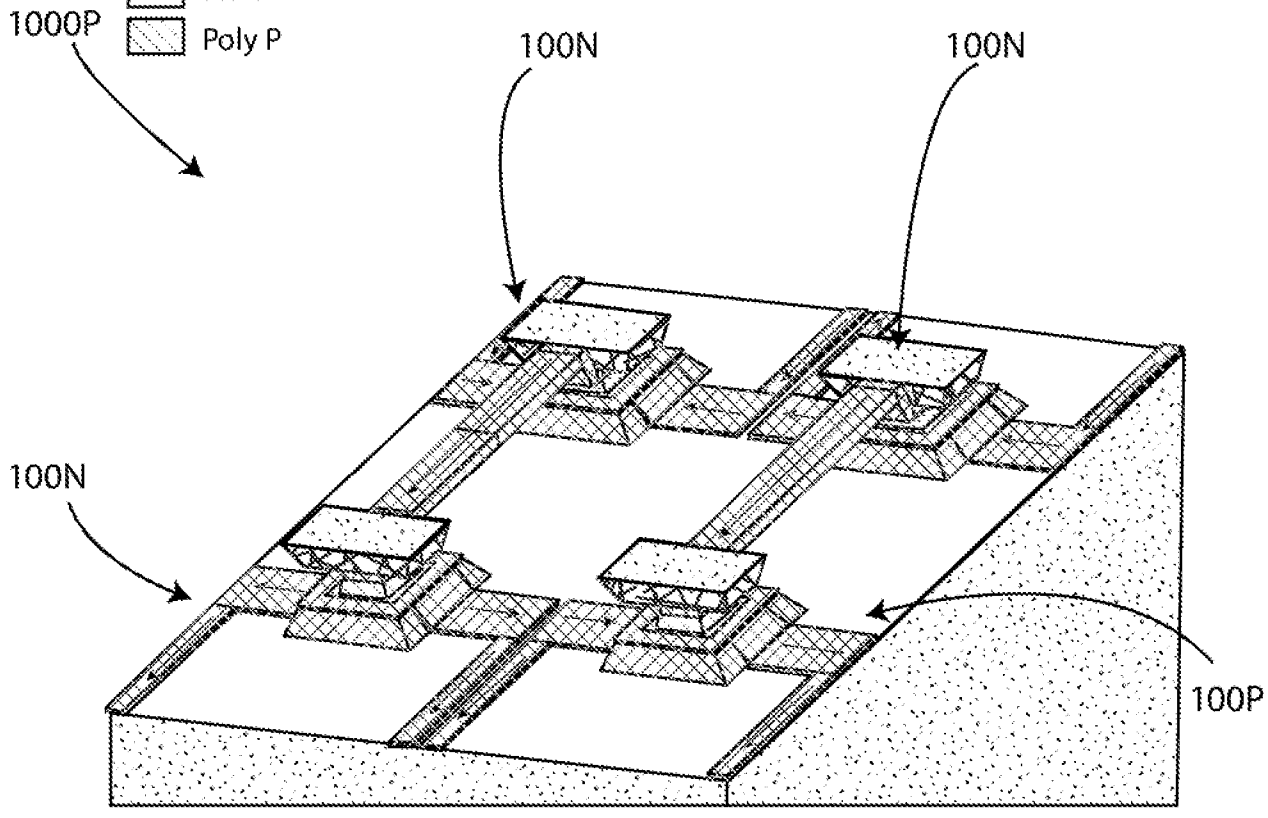

1000P
100N
100N
100N
100P

Fig. 10

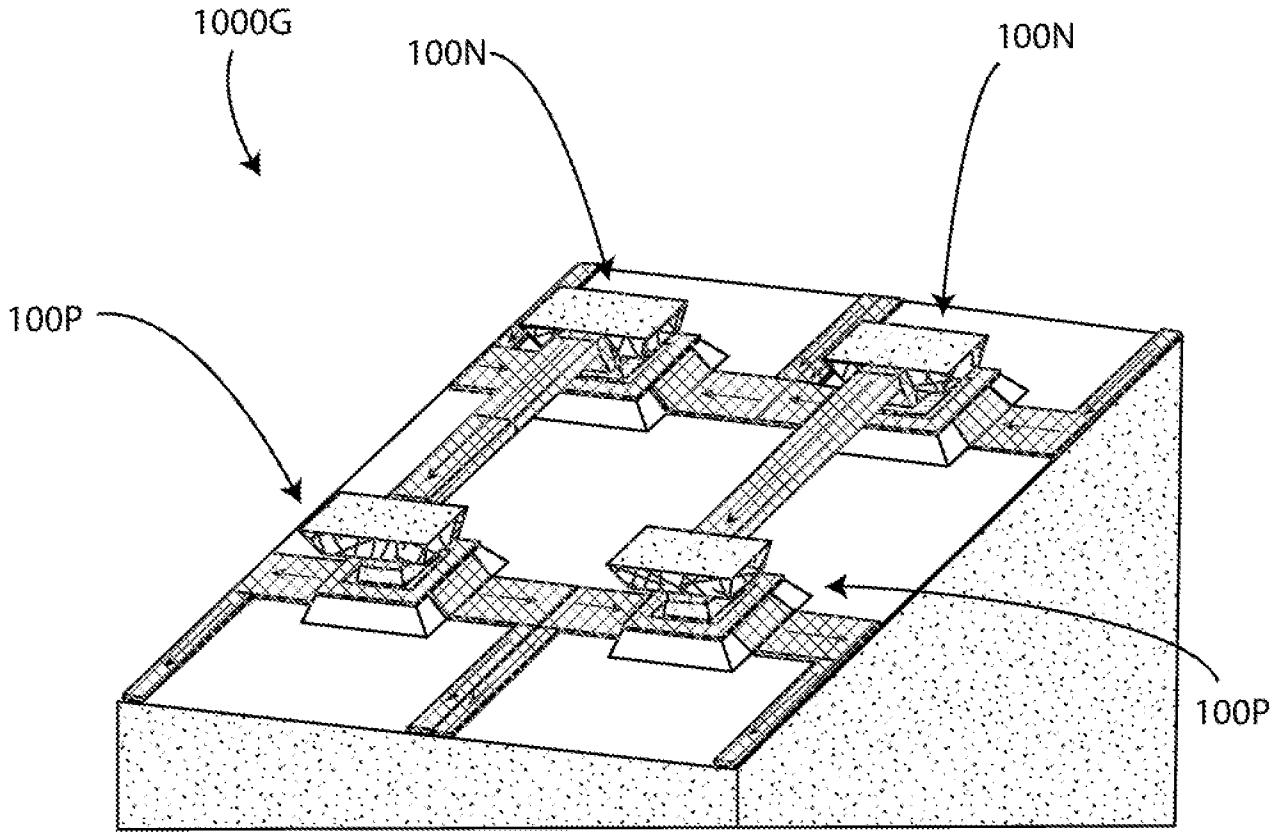

1000G
100N
100N
100P
100P

Fig. 11

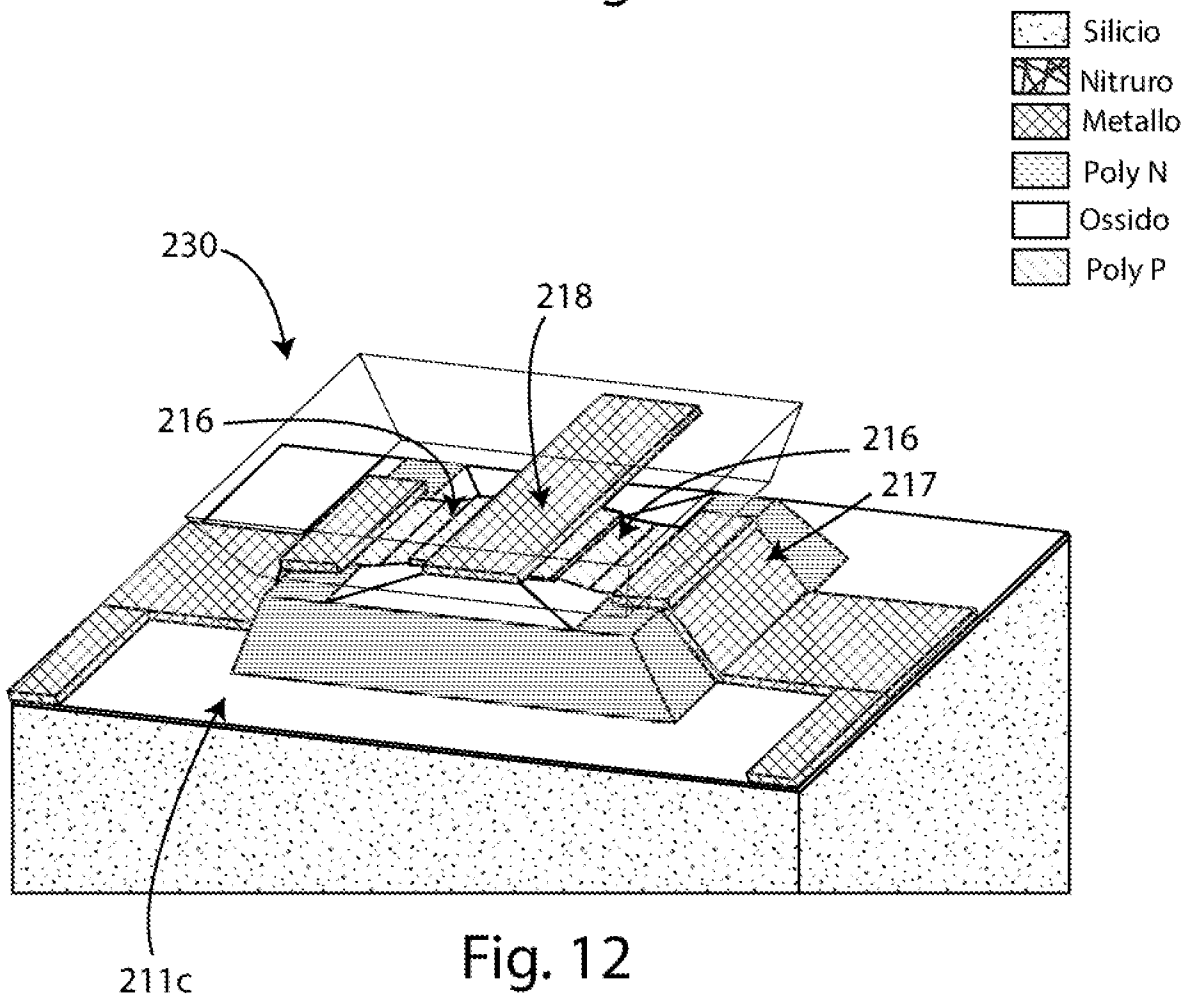

Silicio
Nitruro
Metallo
Poly N
Ossido
Poly P
230
218
216
216
217
211c

Fig. 12

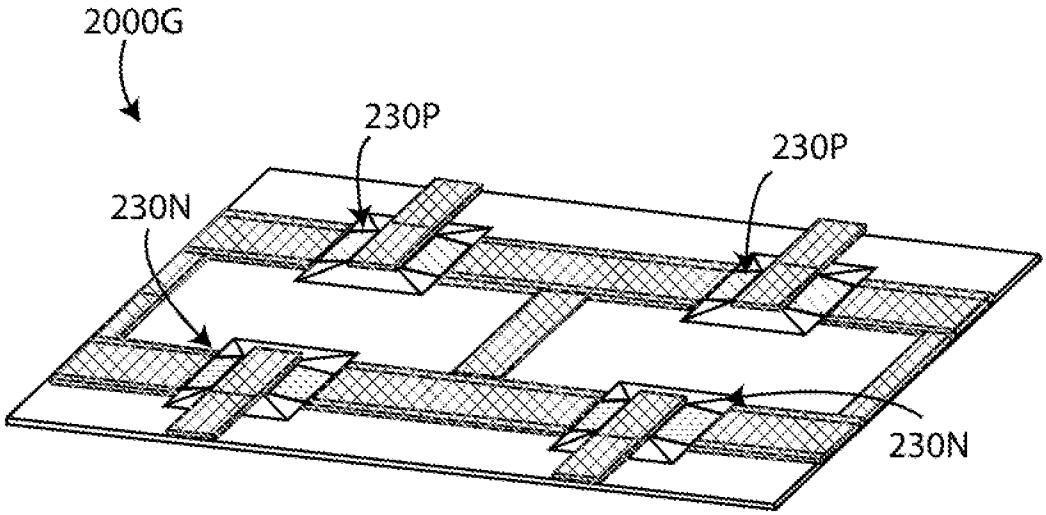
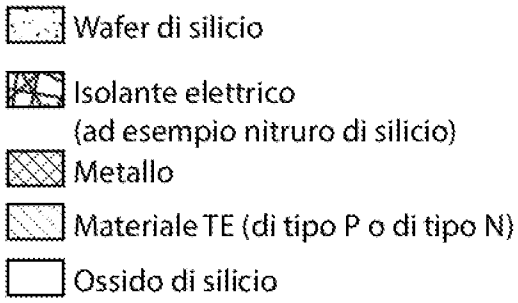

2000G
230P
230P
230N
230N

Fig. 13


Wafer di silicio
Isolante elettrico
(ad esempio nitruro di silicio)
Metallo
Materiale TE (di tipo P o di tipo N)
Ossido di silicio

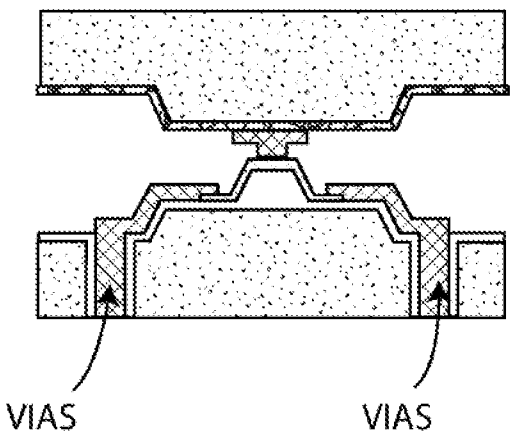

VIAS
VIAS

Fig. 14