

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102009901776073A1

Publication Date

20110421

Applicant

SAET S.P.A.

Title

METODO E DISPOSITIVO PER L'OTTENIMENTO DI UN MATERIALE
SEMICONDUTTORE MULTICRISTALLINO, IN PARTICOLARE SILICIO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"METODO E DISPOSITIVO PER L'OTTENIMENTO DI UN MATERIALE
SEMICONDUTTORE MULTICRISTALLINO, IN PARTICOLARE SILICIO"

di SAET S.P.A.

di nazionalità italiana

con sede: VIA TORINO, 213

LEINI' (TO)

Inventori: DUGHIERO Fabrizio, FORZAN Michele, CISCATO
Dario, CESANO Mario, CRIVELLO Fabrizio, BERNABINI Paolo

* * *

La presente invenzione è relativa ad metodo e ad un
dispositivo per l'ottenimento di un materiale
semiconduttore multi cristallino, in particolare silicio,
per fusione del materiale semiconduttore e successiva
solidificazione direzionale dello stesso.

La richiesta di materiale semiconduttore, in
particolare di silicio, ad un grado di purezza elevato,
detto "solare", è sempre più alta, in quanto tale materiale
serve per la costruzione di celle fotovoltaiche ad elevata
efficienza.

Per l'ottenimento di un tale materiale si effettuano
dapprima delle raffinazioni mediante tradizionali
procedimento metallurgici e, infine, viene formato un
lingotto, da quale sezionare poi i wafer necessari per la

realizzazione delle celle fotovoltaiche. Tale lingotto viene formato con una metodologia nota come DSS, dall'acronimo inglese "Directional Solidification System", ovvero facendo fondere il materiale semiconduttore in un crogiuolo, per poi provocarne una solidificazione direzionale con ottenimento alla fine di silicio multi cristallino.

Per ottenere la solidificazione direzionale è necessario provocare la stessa nel crogiuolo mantenendo un gradiente termico verticale nel lingotto in fase di formazione in modo da ottenere velocità di raffreddamento tali da ottenere l'avanzamento del fronte di solidificazione di 1-2 cm/h. Un vantaggio di tale tecnologia è che le impurezze presenti nel materiale di partenza rimangono preferenzialmente nel materiale fuso e salgono pertanto verso l'alto insieme al fronte di solidificazione. A lingotto solidificato è pertanto sufficiente eliminare la parte superiore del lingotto stesso per ottenere silicio multi cristallino raffinato al grado di purezza desiderato.

Per ottenere tali risultati è necessario poter esercitare un controllo molto preciso dei flussi termici, in particolare impedendo perdite laterali di calore dal crogiuolo, ovvero flussi termici in direzione trasversale a quella di avanzamento del fronte di solidificazione, che è

verticale. Nei forni DSS noti, sia dotati di riscaldamento a resistenze elettriche, sia dotati di riscaldamento per induzione, questo è ottenuto mediante l'utilizzo di pesanti strati isolanti, che aumentano i costi e gli ingombri del forno e, conseguentemente, i consumi energetici per gestirlo. Inoltre, la fase di fusione del materiale semiconduttore solido da raffinare richiede tempi lunghi ed elevati consumi energetici.

Scopo della presente invenzione è quello di superare gli inconvenienti dell'arte nota fornendo un dispositivo ed un metodo per l'ottenimento di un materiale semiconduttore, tipicamente silicio, multi cristallino a grado di purezza "solare", che siano di semplice ed economica realizzazione, che consentano un controllo affidabile ed efficace dei flussi termici e che permettano di ridurre gli ingombri ed i consumi energetici delle apparecchiature necessarie.

Qui e di seguito per grado di purezza "solare" si intende quello necessario alla realizzazione di celle fotovoltaiche ad elevata efficienza.

L'invenzione è dunque relativa ad un dispositivo per la fusione e successiva solidificazione direzionale di un materiale semiconduttore, tipicamente per l'ottenimento di silicio multi cristallino a grado di purezza "solare", secondo la rivendicazione 1 e ad un metodo per l'ottenimento di un materiale semiconduttore multi

cristallino a grado di purezza "solare", tipicamente silicio, mediante una fase di fusione del materiale semiconduttore ed una successiva fase di solidificazione direzionale del materiale semiconduttore, secondo la rivendicazione 9.

In particolare, il dispositivo secondo il trovato comprende: almeno un induttore inferiore che è mobile verticalmente in modo da poter variare in uso la sua distanza dalla parete di fondo di un contenitore a tazza in grafite alloggiante il crogiuolo, nel quale è contenuto il materiale semiconduttore da raffinare; ed almeno un induttore laterale comprendente una pluralità di spire disposte coassiali, sovrapposte una all'altra nella direzione verticale e mezzi per selettivamente mettere in corto circuito le spire, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, o rispettivamente collegarle con, o scollegarle da, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, dei mezzi di alimentazione elettrica AC; inoltre, almeno l'induttore laterale include mezzi per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, tra almeno due valori diversi e tali da produrre per induzione il riscaldamento selettivo della grafite e/o del materiale semiconduttore contenuto nel crogiuolo, una volta che quest'ultimo ha raggiunto la temperatura di conduzione.

I mezzi per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire comprendono una prima ed una seconda batteria di condensatori accoppiati ai mezzi per selettivamente mettere in corto circuito le spire o rispettivamente collegarle con, o scollegarle dai, mezzi di alimentazione elettrica AC. I mezzi per selettivamente mettere in corto circuito le spire o rispettivamente collegarle con, o scollegarle dai, mezzi di alimentazione elettrica AC comprendono a loro volta un banco di commutatori opportunamente collegati.

Secondo il metodo dell'invenzione, la fase di solidificazione viene eseguita mediante i passi di:

- disattivare l'almeno un induttore inferiore, mantenendo però in circolazione nelle spire dello stesso un flusso di un fluido di raffreddamento;

- avvicinare l'induttore inferiore al crogiuolo, fino a portarlo sostanzialmente in contatto con un suscettore inferiore disposto sotto il crogiuolo;

- attivare e disattivare selettivamente e indipendentemente una dall'altra una o più spire dell'almeno un induttore laterale, avendo realizzato le stesse come spire disposte coassiali una sull'altra in direzione verticale ed a coprire in uso almeno l'intera altezza occupata nel crogiuolo dal materiale semiconduttore fuso, in modo tale da realizzare per induzione una

produzione localizzata di calore in un suscettore disposto lateralmente al crogiuolo tale da compensare le perdite termiche laterali del crogiuolo;

- mettere in corto circuito, selettivamente, almeno una spira per volta dell'induttore laterale, selezionando la spira o le spire da mettere in corto circuito tra quelle disposte progressivamente sempre più in alto, in modo da formare con essa/esse uno schermo di campo elettromagnetico che segue sostanzialmente il fronte di solidificazione del materiale semiconduttore.

Inoltre, la fase di fusione viene eseguita mediante i passi di:

- attivare induttori disposti inferiormente, superiormente e lateralmente rispetto al crogiuolo, alimentandoli ad una prima frequenza prefissata (dell'ordine dei kHz) tale da produrre per induzione elettromagnetica il riscaldamento di suscettori in grafite che circondano il crogiuolo;

- non appena il materiale semiconduttore viene riscaldato dai suscettori ad una temperatura tale da diventare conduttore, diminuire la frequenza di alimentazione di almeno alcune spire dell'almeno un induttore laterale e, eventualmente, dell'almeno un induttore inferiore, fino ad una seconda frequenza prefissata (dell'ordine dalle decine di Hz alle centinaia

di Hz) in cui almeno parte dell'induzione elettromagnetica va ad interessare direttamente il materiale semiconduttore.

In questo modo, la fase di fusione si ottiene in modo rapido e con ridotti consumi energetici, in quanto almeno parte del calore necessario viene sviluppato direttamente entro il materiale da fondere, il che limita inoltre le perdite per irraggiamento dai suscettori. Inoltre, in particolare operando opportunamente sulle frequenze , si ottiene un effetto indotto di mescolamento ("stirring") sul materiale fuso, che lo rende perfettamente omogeneo, portandolo nelle condizioni ideali per eseguire poi la solidificazione direzionale.

Durante quest'ultima fase è inoltre possibile, utilizzando opportuni sensori di temperatura e intervenendo poi, sulla base delle letture di questi, sui singoli induttori, mantenere un controllo estremamente buono dei flussi termici, in particolare utilizzando la possibilità di mettere in corto circuito e/o alimentare separatamente le spire del/dei induttore/i laterale/i e di usare l'induttore inferiore, disattivato, come elemento di raffreddamento.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi del trovato appariranno chiari dalla descrizione che segue di un suo esempio non limitativo di realizzazione, illustrato a scopo puramente esemplificativo con riferimento alle figure dei

disegni annessi, nei quali:

- la figura 1 illustra una vista schematica in elevazione e sezionata parallelamente all'asse di simmetria verticale di un dispositivo per la fusione e successiva solidificazione direzionale di un materiale semiconduttore, realizzato secondo il trovato ed illustrato in una configurazione atta a consentire il caricamento del materiale semiconduttore da trattare;

- la figura 2 illustra il dispositivo di figura 1 in una configurazione operativa di lavoro, sempre in sezione ed in alzata, illustrato solo a metà, la parte mancante essendo simmetrica;

- le figure 3 e 4 illustrano in scala ingrandita, in modo schematico e sempre in sezione ed in elevazione rispettivi dettagli costruttivi del dispositivo di figure 1 e 2; e

- le figure 5 e 6 illustrano in scala ingrandita e sempre schematicamente, alcuni componenti del dispositivo di figure 1 e 2.

Con riferimento alle figure da 1 a 4, è indicato nel suo complesso con 1 un dispositivo per la fusione e successiva solidificazione direzionale di un materiale 2 semiconduttore, tipicamente per l'ottenimento di silicio multi cristallino a grado di purezza "solare".

Il dispositivo 1 comprende almeno un crogiuolo 3 per

il materiale semiconduttore 2, preferibilmente realizzato in quarzo o materiale ceramico, alloggiato in modo rimovibile in un contenitore 4 conformato a tazza e realizzato in grafite; ed un involucro 5 a tenuta stagna alloggiante al proprio interno il contenitore 4 in grafite e delimitato da un semiguscio inferiore 6 e da un semiguscio superiore 7, conformati a tazza; questi ultimi, che sono preferibilmente realizzati in acciaio, sono normalmente accoppiati a sovrapposizione (figura 2) con le concavità affacciate e rispettivi bordi 8,9 dotati di opportune guarnizioni non illustrate accoppiati testa a testa, a tenuta stagna.

Il dispositivo 1 comprende inoltre mezzi 10 per allontanare verticalmente il semiguscio superiore 7 dal semiguscio inferiore 6, nella fattispecie in modo l'involucro 5 assuma una configurazione "aperta", illustrata in figura 1, per permettere l'accesso al contenitore in grafite 4. Secondo un aspetto del trovato, il semiguscio inferiore 6 è montato verticalmente fisso, ad esempio su piedi 11 appoggiati a terra, mentre il semiguscio superiore 7 è supportato verticalmente mobile da una struttura di supporto 11, che supporta inoltre anche i mezzi 10 di movimentazione di tipo noto per poterlo allontanare dal, o avvicinare al, semiguscio inferiore 6.

Il dispositivo 1 comprende inoltre, secondo un aspetto

del trovato, almeno un induttore superiore (o un "blocco" di più induttori separati) 12 , comprendente rispettive spire 13 che possono essere ad esempio sagomate secondo una spirale piana, disposto affacciato, con almeno l'interposizione di una piastra in grafite 14, ad una imboccatura 15 del contenitore 4 in grafite; almeno un induttore laterale 16 (o un "blocco" di più induttori separati) disposto, in uso, a semigusci 6,7 accoppiati (figura 2), intorno ad una parete laterale 17 del contenitore 4 in grafite; ed un induttore inferiore 18 disposto direttamente affacciato ad una parete di fondo 19 del contenitore 4 in grafite.

Il dispositivo 1 comprende infine mezzi 20 di alimentazione elettrica AC, noti e pertanto indicati schematicamente semplicemente con dei blocchi, per alimentare separatamente e indipendentemente uno dall'altro gli induttori 12,16 e 18; e mezzi 21 di raffreddamento, pure noti e quindi indicati schematicamente con dei blocchi, per alimentare un fluido refrigerante entro le spire 13, internamente cave in quanto costituite da elementi tubolari, degli induttori 12,16 e 18.

Secondo il trovato, l'induttore inferiore 18 è mobile verticalmente in modo da poter variare in uso la sua distanza D (figura 3) dalla parete di fondo 19, mentre l'almeno un induttore laterale 16 (figure 5 e 6) include

una pluralità di spire 13a,..13e aventi ciascuna sviluppo in un medesimo piano di giacitura, disposte coassiali rispetto ad un asse A di simmetria dei semigusci 6,7, sovrapposte nella direzione verticale e conformate in modo da risultare indipendenti una dall'altra.

In particolare, le spire 13a,..13e sono formate ciascuna da un rispettivo tubo in rame ripiegato ad anello nel medesimo piano ed avente asse di simmetria A, terminante con due opposte estremità 22 disposte adiacenti e ripiegate ad angolo in modo da sporgere radialmente sull'esterno dell'anello formato dalla spira. Le spire 13a,..13e, tutte delle medesime dimensioni, sono poi disposte a pacco una sull'altra, nella direzione di estensione dell'asse A, che è verticale, e sono tenute insieme in una unica unità funzionale, da rispettive morse 23. Le estremità 22 sono dotate di raccordi 24 atti ad effettuarne il collegamento idraulico ai mezzi di raffreddamento 21 (definiti da un circuito idraulico noto dotato di pompe, non illustrato per semplicità) ed il collegamento elettrico ai mezzi di alimentazione 20.

In combinazione con le caratteristiche suddette, l'almeno un induttore laterale 16 (figura 5) include inoltre mezzi 25 di connessione elettrica, schematizzati nel loro complesso con un blocco in figura 5 e come una pinza mobile atta ad agire sui raccordi 24 in figura 6, per

selettivamente, secondo un primo aspetto del trovato, mettere in corto circuito le spire 13a,...13e, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, e/o, secondo un altro aspetto del trovato, rispettivamente collegarle con, o scollegarle dai, mezzi 20 di alimentazione elettrica AC, tutte insieme o separatamente una o più alla volta.

In particolare, i mezzi 25 sopra descritti nel loro aspetto funzionale, possono essere implementati in modo da comprendere un banco di commutatori 25b, opportunamente collegati in modo ovvio per il tecnico del ramo, una volta definite le funzioni ad essi assegnate, e pertanto non descritto nei dettagli. È chiaro infatti che i commutatori 26 possono svolgere sia le funzioni di messa in corto circuito delle spire 13, una o più alla volta, schematizzata dalla pinza in figura 6, sia le funzioni di collegamento/scollegamento selettivo delle spire 13a,...13e ai/dai mezzi di alimentazione 20. Secondo un aspetto del trovato questi sono presenti in numero maggiore di uno, in modo che almeno alcune delle spire 13a,...13e possano essere alimentate attraverso il blocco 25 sia in serie, come schematizzato in figura 5, sia in parallelo, sia indipendentemente le une dalle altre, mediante convertitori 20 differenti, che possono dunque alimentare al limite ciascuna spira 13a,...13e ad una potenza e frequenza differente. In pratica è come se l'induttore 16 fosse

costituito da una pluralità di induttori monospira separati, collegabili tra loro in maniera qualsiasi.

Secondo un ultimo ma non meno importante aspetto del trovato, almeno l'induttore laterale 16 (ed eventualmente anche l'induttore inferiore 18) include mezzi 26 (illustrati come integrati nel blocco 25 in figura 5) per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire 13, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, tra almeno due valori diversi e tali da produrre per induzione il riscaldamento selettivo della grafite con cui sono formate le pareti 17 e 19 e/o del materiale semiconduttore 2 contenuto nel crogiuolo 3, una volta che quest'ultimo ha raggiunto la temperatura di conduzione, che per il silicio è di circa 900°C.

Nella fattispecie illustrata, i mezzi 26 per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire 13a,...13e comprendono una prima, 27, ed una seconda, 28, batteria, illustrate in modo schematico, di condensatori accoppiati ai mezzi 25 di connessione elettrica ed in particolare elettricamente collegati al banco di commutatori 26.

La variazione della frequenza di alimentazione delle spire 13 produce una variazione selettiva e localizzata del campo magnetico che va ad interessare in uso sia gli elementi in grafite 17,19, sia il materiale semiconduttore

2 stesso. Una ulteriore o alternativa variazione localizzata del campo magnetico prodotto dall'induttore 16 considerato nel suo complesso può poi essere ottenuta facendone variare l'induttanza complessiva, ad esempio scollegando una o più spire 13 dai mezzi 20 di alimentazione elettrica in AC.

Nella forma preferita di realizzazione, il semiguscio inferiore 6 supporta al suo interno il contenitore 4 in grafite mediante elementi 29 termicamente isolanti, nonché l'induttore inferiore 18 e mezzi 30, schematizzati con un blocco, per spostare verticalmente quest'ultimo da e verso la parete di fondo 19 del contenitore 4 in grafite. I mezzi 30 possono essere costituiti da un qualsiasi motore noto che agisce per traslare verticalmente uno stelo 31 il quale supporta solidale, alla sua estremità superiore, l'induttore piano 18 e porta al proprio interno linee idrauliche ed elettriche di connessione ai mezzi refrigeranti 21 e di alimentazione AC 20 dedicati all'induttore 18.

Viceversa, l'induttore superiore 12, insieme con la piastra in grafite 14, l'induttore laterale 16 e altri elementi isolanti 29 sono solidali al semiguscio superiore 7, in modo da circondare il contenitore 4 in grafite a semigusci 6,7 accoppiati (figura 2) e da lasciare scoperto il contenitore 4 in grafite a semigusci 6,7 allontanati uno

dall'altro (figura 1). Secondo una tecnica nota, la parete laterale 17 e parete di fondo 19 del contenitore 4 in grafite e la piastra 14 in grafite hanno composizione e dimensioni tali da costituire suscettori elettromagnetici per rispettivamente l'almeno un induttore laterale 16, l'almeno un induttore inferiore 18 e l'almeno un induttore superiore 12, ai quali sono operativamente associati.

In particolare, è da notare che gli elementi isolanti 29 definiscono, a semigusci 6,7 accoppiati, un vano entro il quale è disposto l'almeno un induttore inferiore 18, che così rimane direttamente affacciato al suscettore 19 ad esso associato, mentre gli elementi isolanti 29 circondano i suscettori 14,17,19, cosicché gli induttori 12 e 16 risultano invece preferibilmente disposti all'esterno di tale vano e, quindi, con gli elementi isolanti 29 interposti tra di essi ed i suscettori 14,17 ad essi associati.

In modo noto, il dispositivo 1 descritto comprende anche mezzi 32 noti, indicati con un blocco (figura 2) per fare il vuoto nell'involucro 5, ad involucro sigillato a tenuta, dunque a semigusci 6,7 accoppiati, e mezzi 33 pure noti e indicati con un blocco (figura 2) per far circolare all'interno della camera di lavoro delimitata dall'involucro 5, a semigusci 6,7 accoppiati, un gas inerte, preferibilmente argon; secondo un aspetto del

trovato, la parete laterale 17 del contenitore 4 in grafite è provvista di una pluralità di feritoie 34 verticali passanti (figure 3,4) per favorire la circolazione del gas inerte e quindi contribuire all'equilibrio dei flussi termici entro la camera adiabatica definita dentro l'involucro 5 dagli elementi isolanti di supporto 29.

Secondo un ultimo aspetto del trovato, i mezzi di raffreddamento 21 sono realizzati in modo che il fluido refrigerante da essi utilizzato e che circola nelle spire 13 cave di almeno uno degli induttori 12,16,18, ad esempio dell'induttore 18, possa essere un olio diatermico, anziché acqua. In questo modo, in caso di perdite di fluido refrigerante all'interno dell'involucro 5, durante il processo di fusione o di solidificazione direzionale, o in caso di rottura del crogiuolo 3 con conseguente versamento del silicio 2 fuso nel semiguscio inferiore 6, non si ha il rischio di esplosioni conseguenti alle possibili reazioni chimiche del silicio con l'acqua.

Sulla base di quanto descritto è chiaro che, mediante il dispositivo 1 è possibile implementare efficacemente un metodo per l'ottenimento di un materiale semiconduttore multi cristallino a grado di purezza "solare", tipicamente silicio, mediante una fase di fusione del materiale 2 semiconduttore ed una successiva fase di solidificazione direzionale del materiale semiconduttore 2 stesso ottenute

mediante l'utilizzo di almeno tre induttori, nella fattispecie gli induttori 12, 16 e 18, alimentabili separatamente e indipendentemente uno dall'altro in AC e disposti rispettivamente superiormente, inferiormente e lateralmente ad un crogiuolo 3 contenente il materiale semiconduttore 2, con l'interposizione di suscettori 14, 17 e 19 in grafite. In particolare, secondo il metodo del trovato, la fase di solidificazione viene eseguita mediante i passi di:

- disattivare l'induttore inferiore 18, mantenendo però in circolazione nelle spire 13 dello stesso un flusso di un fluido di raffreddamento;

- avvicinare l'induttore inferiore 18 al crogiuolo 3, fino a portarlo sostanzialmente in contatto con il suscettore 19 inferiore disposto sotto il crogiuolo 3;

- attivare e disattivare selettivamente e indipendentemente una dall'altra una o più spire 13a...13e dell'induttore laterale 16, avendo realizzato le stesse come spire disposte coassiali una sull'altra in direzione verticale ed a coprire in uso almeno l'intera altezza occupata nel crogiuolo 3 dal materiale semiconduttore 2 fuso, in modo tale da realizzare per induzione una produzione localizzata di calore nel suscettore 17 disposto lateralmente al crogiuolo 3 tale da compensare le perdite termiche laterali del crogiuolo 3 stesso;

- mettere in corto circuito, selettivamente, almeno una spira 13a...13e per volta dell'induttore laterale 16, selezionando la spira o le spire da mettere in corto circuito tra quelle disposte progressivamente sempre più in alto (ovvero 13e...13a), in modo da formare con essa/esse uno schermo di campo elettromagnetico che segue sostanzialmente il fronte di solidificazione del materiale 2 semiconduttore.

Sempre secondo un aspetto non meno importante del trovato, la fase di fusione viene eseguita mediante i passi di:

- attivare gli induttori 12, 16 e 18 alimentandoli ad una prima frequenza prefissata tale da produrre per induzione elettromagnetica il riscaldamento dei suscettori 14,17,19;

- non appena il materiale 2 semiconduttore viene riscaldato dai suscettori 14,17,19 ad una temperatura tale da diventare conduttore (ad esempio circa 900°C per il silicio), diminuire la frequenza di alimentazione di almeno alcune spire 13 dell'induttore laterale 16 e, eventualmente, dell'induttore inferiore 18, fino ad una seconda frequenza prefissata in cui almeno parte dell'induzione elettromagnetica va ad interessare direttamente il materiale 2 semiconduttore.

La prima frequenza prefissata viene scelta nel campo

dei kHz, tipicamente intorno a circa 2 kHz, mentre la seconda frequenza prefissata viene scelta in un campo che va da pochi Hz alle centinaia di Hz, tipicamente circa 500 Hz. Con il silicio in temperatura di conduzione, la frequenza di 500 Hz si è visto che assicura una fornitura diretta di potenza nel silicio di circa il 30% di quella fornita dai mezzi di alimentazione 20, mentre a 50 Hz tutta la potenza fornita dai mezzi di alimentazione 20 va nel silicio.

Secondo il metodo del trovato, infine, almeno prima di attuare la fase di solidificazione direzionale, il materiale semiconduttore 2 allo stato fuso e/o di incipiente fusione viene agitato per provocarne la omogeneizzazione facendo variare in modo localizzato nel materiale semiconduttore 2 la frequenza e/o l'intensità del campo magnetico, in modo da produrre nel materiale 2 stesso moti convettivi. Tale variazione localizzata del campo magnetico viene ottenuta alimentando almeno alcune delle spire 13a...13e dell'induttore laterale 16 ad una opportuna frequenza, di qualche ordine di grandezza inferiore di quella usata per riscaldare i suscettori 14,17,19 e/o non alimentando almeno una delle spire 13a...13e dell'induttore laterale 16 in modo da variare la induttanza dello stesso.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo (1) per la fusione e successiva solidificazione direzionale di un materiale (2) semiconduttore, tipicamente per l'ottenimento di silicio multi cristallino a grado di purezza "solare", comprendente almeno un crogiuolo (3) per il materiale semiconduttore, preferibilmente realizzato in quarzo o materiale ceramico, alloggiato in modo rimovibile in un contenitore (4) a tazza in grafite; almeno un induttore superiore (12), disposto affacciato, con l'interposizione di almeno una piastra (14) in grafite ad esso operativamente associata, ad una imboccatura (15) del contenitore in grafite; almeno un induttore laterale (16) disposto, in uso intorno ad una parete laterale (17) del contenitore in grafite; almeno un induttore inferiore (18) disposto direttamente affacciato ad una parete di fondo (19) del contenitore in grafite; mezzi (20) di alimentazione elettrica AC per alimentare separatamente e indipendentemente uno dall'altro i detti induttori (12,16,18); e mezzi (21) di raffreddamento per alimentare un fluido refrigerante entro rispettive spire (13) cave degli induttori; **caratterizzato dal fatto che,** in combinazione:

- l'almeno un induttore laterale (16) include una pluralità di spire (13a...13e) disposte sovrapposte nella

direzione verticale e mezzi (25) per selettivamente mettere in corto circuito le spire, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, o rispettivamente collegarle con, o scollegarle da, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, detti mezzi (20) di alimentazione elettrica AC;

- almeno l'almeno un induttore laterale (16) include mezzi (26) per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire (13), tutte insieme o separatamente una o più alla volta, tra almeno due valori diversi e tali da produrre per induzione il riscaldamento selettivo della grafite e/o del materiale semiconduttore (2) contenuto nel crogiuolo (3), una volta che quest'ultimo ha raggiunto la temperatura di conduzione.

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere inoltre un involucro (5) a tenuta stagna alloggiante al proprio interno il contenitore (4) in grafite e delimitato da un semiguscio inferiore (6) e da un semiguscio superiore (7), conformati a tazza, accoppiati a sovrapposizione con le concavità affacciate; e mezzi (10) per allontanare verticalmente il semiguscio superiore (7) dal semiguscio inferiore (6) per permettere l'accesso al contenitore in grafite.

3. Dispositivo secondo la rivendicazione 2,

caratterizzato dal fatto che l'almeno un induttore inferiore (18) è mobile verticalmente in modo da poter variare in uso la sua distanza (D) dalla parete di fondo (19); detto semiguscio inferiore (6) supportando al suo interno il contenitore in grafite (4) mediante elementi (29) termicamente isolanti, nonché l'almeno un induttore inferiore (18) e mezzi (30) per spostare verticalmente quest'ultimo da e verso la parete di fondo (19) del contenitore in grafite (4).

4. Dispositivo secondo la rivendicazione 2 o 3, caratterizzato dal fatto che il semiguscio inferiore (6) è montato verticalmente fisso, mentre il semiguscio superiore (7) è supportato verticalmente mobile da una struttura di supporto (11), per poterlo allontanare dal o avvicinare al semiguscio inferiore (6); detti almeno un induttore superiore (12) ed almeno un induttore laterale (16) essendo portati solidali, entrambi, dal detto semiguscio superiore (7), in modo, a semigusci accoppiati, da circondare il contenitore in grafite (4) con l'interposizione di elementi isolanti (29) e da lasciare scoperto il contenitore in grafite a semigusci (6,7) allontanati uno dall'altro.

5. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 2 a 4, caratterizzato dal fatto che comprende mezzi (32) per fare il vuoto nel detto involucro (5), a semigusci

accoppiati, e mezzi (33) per far circolare nell'involucro (5), a semigusci accoppiati, un gas inerte, preferibilmente argon; detta parete laterale (17) del contenitore in grafite (4) essendo provvista di una pluralità di feritoie (34) verticali passanti per favorire la circolazione del gas inerte.

6. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che dette parete laterale (17) e parete di fondo (19) del contenitore in grafite (4) e detta piastra (14) in grafite hanno composizione e dimensioni tali da costituire suscettori elettromagnetici per rispettivamente detti almeno un induttore laterale (16), inferiore (18) e superiore (12).

7. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detti mezzi (26) per variare la frequenza di alimentazione elettrica delle spire comprendono una prima (27) ed una seconda (28) batteria di condensatori accoppiati a detti mezzi (25) per selettivamente mettere in corto circuito le spire, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, o rispettivamente collegarle con, o scollegarle da, tutte insieme o separatamente una o più alla volta, detti mezzi (20) di alimentazione elettrica AC, i quali mezzi (25) comprendono a loro volta un banco (25b) di commutatori

opportunamente collegati.

8. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detto fluido refrigerante che circola nelle spire (13) cave di almeno uno dei detti induttori (18;16) è un olio diatermico.

9. Metodo per l'ottenimento di un materiale semiconduttore (2) multi cristallino a grado di purezza "solare", tipicamente silicio, mediante una fase di fusione del materiale semiconduttore ed una successiva fase di solidificazione direzionale del materiale semiconduttore ottenute mediante l'utilizzo di almeno tre induttori (12,16,18) alimentabili separatamente e indipendentemente uno dall'altro in AC e disposti rispettivamente superiormente, inferiormente e lateralmente ad un crogiuolo (3) contenente il materiale semiconduttore, con l'interposizione di suscettori (14,17,19) in grafite; in cui la fase di solidificazione viene eseguita mediante i passi di:

- disattivare l'almeno un induttore inferiore (18), mantenendo però in circolazione nelle spire (13) dello stesso un flusso di un fluido di raffreddamento;

- attivare e disattivare selettivamente e indipendentemente una dall'altra una o più spire (13a...13e) dell'almeno un induttore laterale (16), avendo realizzato

le stesse come spire disposte coassiali una sull'altra in direzione verticale ed a coprire in uso almeno l'intera altezza occupata nel crogiuolo (3) dal materiale semiconduttore (2) fuso, in modo tale da realizzare per induzione una produzione localizzata di calore in un suscettore (17) disposto lateralmente al crogiuolo tale da compensare le perdite termiche laterali del crogiuolo (3);

- mettere in corto circuito, selettivamente, almeno una spira (13a...13e) per volta dell'almeno un induttore laterale (16), selezionando la spira o le spire da mettere in corto circuito tra quelle disposte progressivamente sempre più in alto, in modo da formare con essa/esse uno schermo di campo elettromagnetico che segue sostanzialmente il fronte di solidificazione del materiale (2) semiconduttore.

10. Metodo secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che la fase di fusione viene eseguita mediante i passi di:

- attivare detti almeno un induttori inferiore, superiore e laterale (18,14,16) alimentandoli ad una prima frequenza prefissata tale da produrre per induzione elettromagnetica il riscaldamento di detti suscettori (14,17,19);

- non appena il materiale (2) semiconduttore viene

riscaldato dai suscettori ad una temperatura tale da diventare conduttore, diminuire la frequenza di alimentazione di almeno alcune spire (13a...13e) dell'almeno un induttore laterale (16) e, eventualmente, dell'almeno un induttore inferiore (18), fino ad una seconda frequenza prefissata in cui almeno parte dell'induzione elettromagnetica va ad interessare direttamente il materiale semiconduttore (2).

11. Metodo secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che detta prima frequenza prefissata viene scelta nel campo dei kHz, mentre detta seconda frequenza prefissata viene scelta in un campo che va da pochi Hz alle centinaia Hz.

12. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 9 a 11, caratterizzato dal fatto che, almeno prima di attuare la fase di solidificazione direzionale, il materiale semiconduttore (2) allo stato fuso e/o di incipiente fusione viene agitato per provocarne la omogeneizzazione facendo variare in modo localizzato nel materiale semiconduttore la frequenza e/o l'intensità del campo magnetico, in modo da produrre al suo interno dei moti di mescolamento.

13. Metodo secondo la rivendicazione 12, caratterizzato dal fatto che detta variazione localizzata

del campo magnetico viene ottenuta alimentando almeno alcune delle spire (13a...13e) dell'almeno un induttore laterale (16) ad una opportuna frequenza di qualche ordine di grandezza inferiore di quella usata per riscaldare i detti suscettori e/o non alimentando almeno una delle spire dell'induttore laterale (16) in modo da variare la induttanza dello stesso.

14. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 9 a 13, caratterizzato dal fatto che, dopo il passo di disattivare l'almeno un induttore inferiore (18) mantenendo però in circolazione nelle spire (13) dello stesso un flusso di un fluido di raffreddamento, l'induttore inferiore viene avvicinato (18) al crogiuolo (3), fino a portarlo sostanzialmente in contatto con un suscettore (19) inferiore disposto sotto il crogiuolo.

p.i.: SAET S.P.A.

Rinaldo PLEBANI

CLAIMS

1. A device (1) for melting and subsequent directional solidification of a semiconductor material (2), typically for obtaining multicrystalline silicon with "solar" degree of purity, comprising: at least one crucible (3) for the semiconductor material, preferably made of quartz or ceramic material, housed in a removable way in a cup-shaped graphite container (4); at least one top inductor (12), set facing, with the interposition of at least one graphite plate (14) operatively associated thereto, an inlet opening (15) of the graphite container; at least one lateral inductor (16) set, in use, around a side wall (17) of the graphite container; at least one bottom inductor (18) set directly facing a bottom wall (19) of the graphite container; a.c. electrical-supply means (20) for supplying said inductors (12, 16, 18) separately and independently of one another; and cooling means (21) for supplying a refrigerating fluid within respective hollow coils (13) of the inductors; said device being **characterized in that**, in combination:

- the at least one lateral inductor (16) includes a plurality of coils (13a, ..., 13e) arranged above one another in the vertical direction and means (25) for selectively short-circuiting the turns, all together or separately one or more at a time, or respectively connecting them with, or

disconnecting them from, all together or separately one or more at a time, said a.c. electrical-supply means (20);

- the at least one lateral inductor (16) includes means (26) for varying the frequency of the electrical supply of the coils (13), all together or separately one or more at a time, between at least two different values such as to produce by induction selective heating of the graphite and/or of the semiconductor material (2) contained in the crucible (3), once the latter has reached the conduction temperature.

2. The device according to Claim 1, characterized in that it further comprises: a fluid-tight casing (5), which houses inside it the graphite container (4) and is delimited by a bottom half-shell (6) and by a top half-shell (7), which are cup-shaped and are coupled by being mutually superimposed with the concavities set facing one another; and means (10) for moving the top half-shell (7) vertically away from the bottom half-shell (6) for enabling access to the graphite container.

3. The device according to Claim 2, characterized in that the at least one bottom inductor (18) is vertically mobile so as to be able to vary in use its distance (D) from the bottom wall (19); said bottom half-shell (6) supporting inside it the graphite container (4) by means of thermally insulating elements (29), as well as the at least

one bottom inductor (18) and means (30) for displacing the latter vertically away from and towards the bottom wall (19) of the graphite container (4).

4. The device according to Claim 2 or Claim 3, characterized in that the bottom half-shell (6) is mounted vertically fixed, whereas the top half-shell (7) is supported vertically mobile by a supporting structure (11) so that it can be moved away from or approached to the bottom half-shell (6); said at least one top inductor (12) and at least one lateral inductor (16) being both carried fixed with respect to one another by said top half-shell (7) in such a way as to surround, with the half-shells coupled together, the graphite container (4) with the interposition of insulating elements (29) and to leave the graphite container uncovered when the half-shells (6, 7) are moved away from one another.

5. The device according to any one of Claims 2 to 4, characterized in that comprises means (32) for causing a vacuum in said casing (5), with the half-shells coupled together, and means (33) for causing circulation in the casing (5), with the half-shells coupled together, of an inert gas, preferably argon; said side wall (17) of the graphite container (4) being provided with a plurality of through vertical slits (34) for favouring circulation of the inert gas.

6. The device according to any one of the preceding claims, characterized in that said side wall (17) and bottom wall (19) of the graphite container (4) and said graphite plate (14) have a composition and dimensions such as to constitute electromagnetic susceptors for said at least one lateral inductor (16), bottom inductor (18), and top inductor (12), respectively.

7. The device according to any one of the preceding claims, characterized in that said means (26) for varying the frequency of the electrical supply of the coils comprise a first battery (27) and a second battery (28) of capacitors coupled to said means (25) for selectively short-circuiting the turns, all together or separately one or more at a time, or respectively connecting them with, or disconnecting them from, all together or separately one or more at a time, said a.c. electrical-supply means (20), said means (25) in turn comprising a bank (25b) of switches appropriately connected together.

8. The device according to any one of the preceding claims, characterized in that said refrigerating fluid that circulates in the hollow turns (13) of at least one of said inductors (18; 16) is a diathermic oil.

9. A method for obtaining a multicrystalline semiconductor material (2) with "solar" degree of purity, typically silicon, by means of a step of melting of the

semiconductor material and a subsequent step of directional solidification of the semiconductor material, which are obtained by using at least three inductors (12, 16, 18), which can be supplied separately and independently of one another with an a.c. supply and are arranged respectively at the top, at the bottom, and at the sides of a crucible (3) containing the semiconductor material, with the interposition of graphite susceptors (14, 17, 19); wherein the step of solidification is executed by means of the steps of:

- de-activating the at least one bottom inductor (18), maintaining, however, in circulation in the coils (13) thereof a flow of a cooling fluid;

- activating and de-activating selectively and independently of one another one or more coils (13a, ..., 13e) of the at least one lateral inductor (16), having obtained the coils as coils arranged co-axial onto one another in the vertical direction so as to cover in use at least the entire height occupied in the crucible (3) by the molten semiconductor material (2), in such a way as to obtain by induction a localized production of heat in a susceptor (17), which is set at the sides of the crucible, such as to compensate for the lateral thermal losses of the crucible (3);

- short-circuiting, selectively, at least one coil

(13a, ..., 13e) at a time of the at least one lateral inductor (16), selecting the coil or coils to be short-circuited from among the ones set progressively further up so as to form with it/them a shield for the electromagnetic field that substantially follows the front of solidification of the semiconductor material (2).

10. The method according to Claim 9, characterized in that the step of melting is executed by means of the steps of:

- activating said at least one bottom, top, and lateral inductors (18, 14, 16) by supplying them at a first pre-set frequency so as to produce heating of said susceptors (14, 17, 19) by electromagnetic induction;

- as soon as the semiconductor material (2) is heated by the susceptors at a temperature such as to become conductive, reducing the frequency of supply of at least some coils (13a, ..., 13e) of the at least one lateral inductor (16) and, possibly, of the at least one bottom inductor (18), down to a second pre-set frequency in which at least part of the electromagnetic induction comes to involve directly the semiconductor material (2).

11. The method according to Claim 10, characterized in that said first pre-set frequency is chosen in the range of kilohertz, whilst said second pre-set frequency is chosen in a range that goes from a few hertz to hundreds of hertz.

12. The method according to any one of Claims 9 to 11, characterized in that, at least before performing the step of directional solidification, the semiconductor material (2) at the molten state and/or at the state of incipient melting is stirred to cause homogeneization thereof by varying the frequency and/or intensity of the magnetic field in a localized way in the semiconductor material so as to produce within it motions of mixing.

13. The method according to Claim 12, characterized in that said localized variation of the magnetic field is obtained by supplying at least some of the coils (13a, ..., 13e) of the at least one lateral inductor (16) at an appropriate frequency of a few orders of magnitude below the one used for heating said susceptors and/or by not supplying at least one of the coils of the lateral inductor (16) so as to vary the inductance of the latter.

14. The method according to any one of Claims 9 to 13, characterized in that, after the step of de-activating the at least one bottom inductor (18) maintaining, however, a flow of a cooling fluid in circulation in the coils (13) thereof, the bottom inductor is approached (18) to the crucible (3), until it is brought substantially into contact with a bottom susceptor (19) set underneath the crucible.

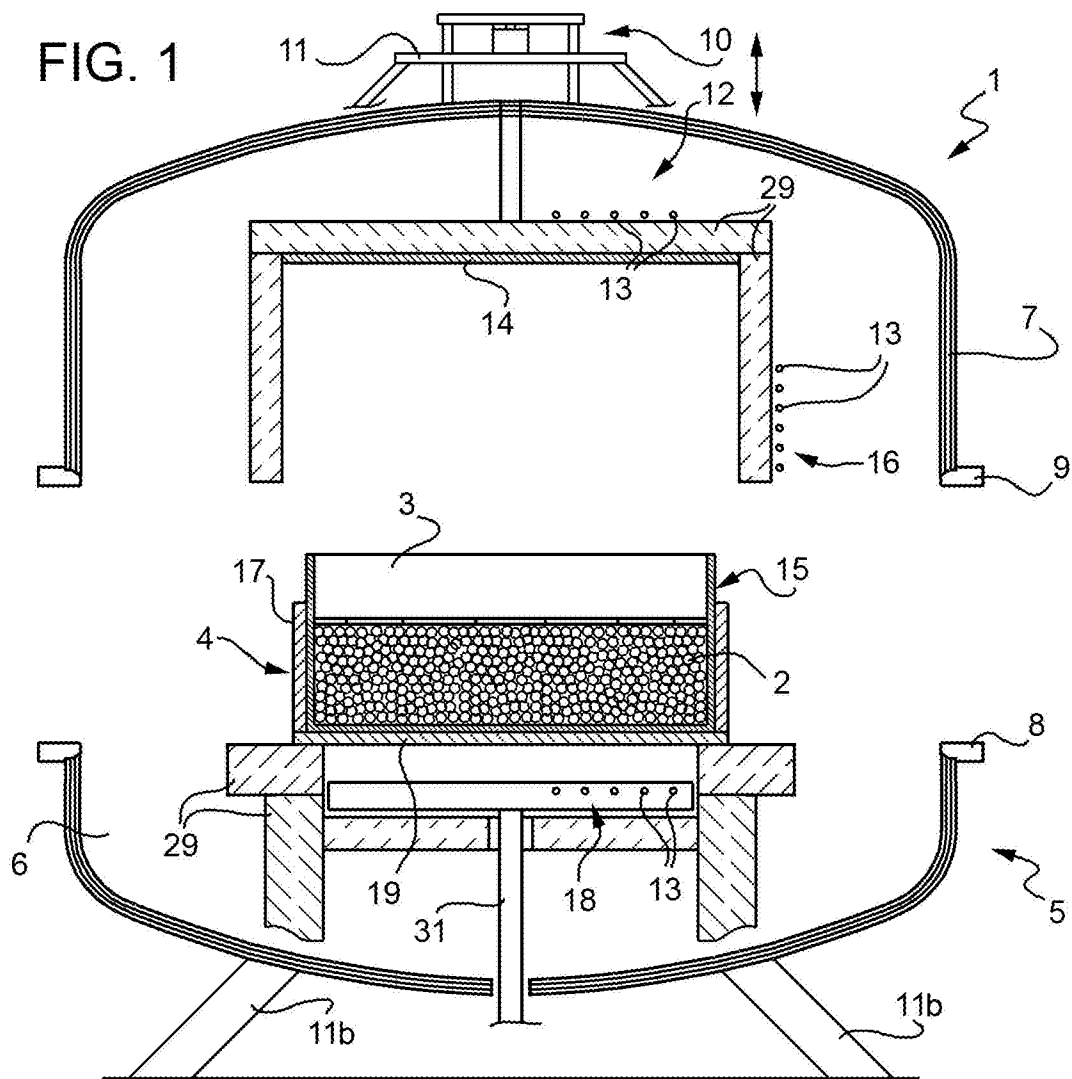


FIG. 2

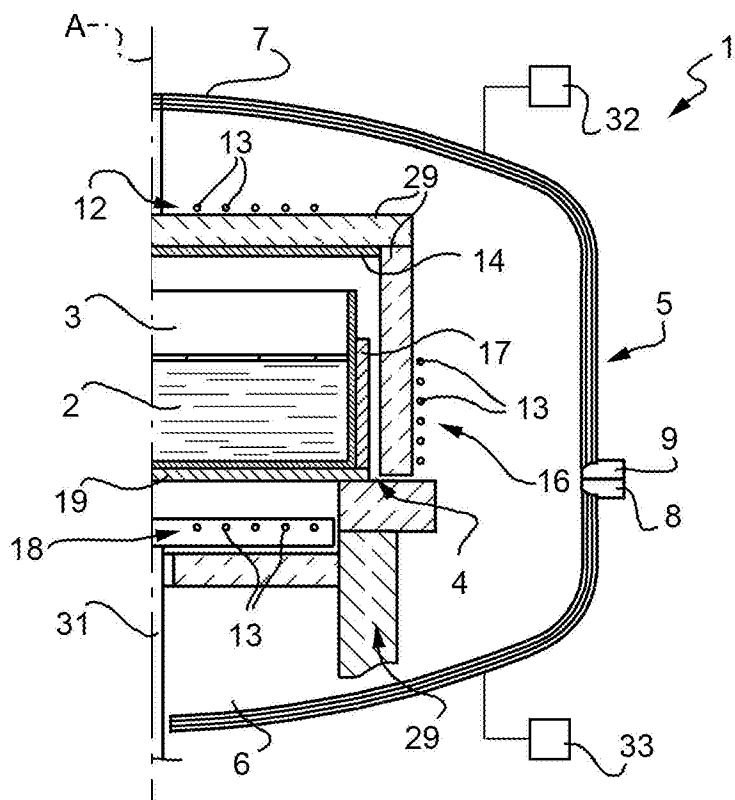


FIG. 4

p.i.: SAET S.P.A.

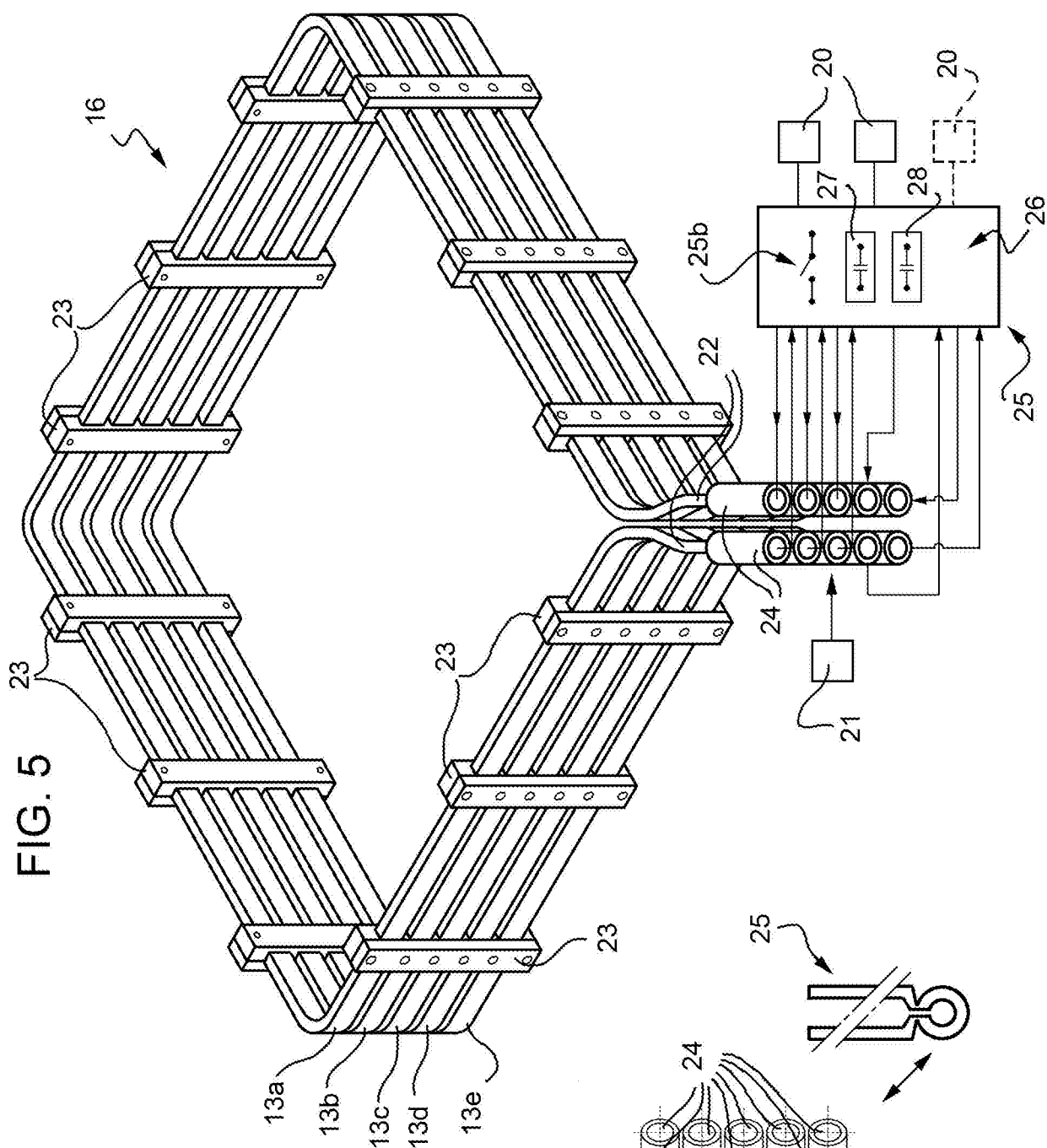
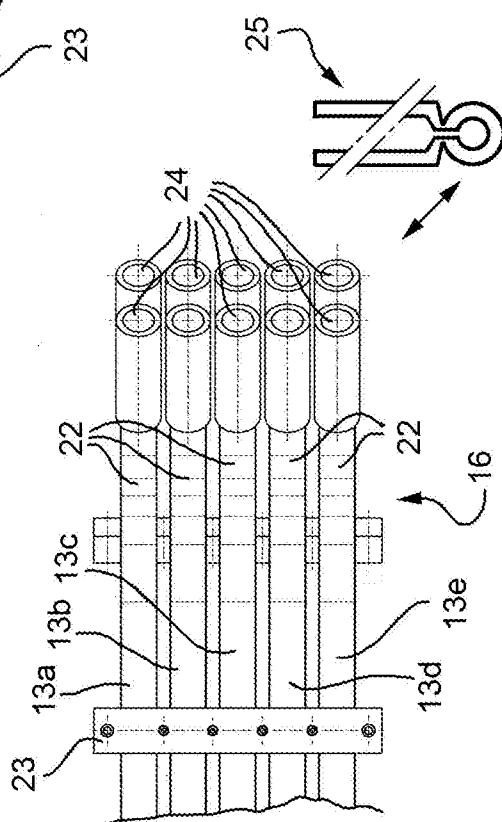


FIG. 5

FIG. 6



p.i.: SAET S.P.A.

Rinaldo PLEBANI
(Iscrizione Albo nr. 358/BM)