POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

APPARATO DI PROPULSIONE PER VEICOLI SPAZIALI E PROCEDIMENTO CORRISPONDENTE

Original
APPARATO DI PROPULSIONE PER VEICOLI SPAZIALI E PROCEDIMENTO CORRISPONDENTE / Chiolerio, A., Porro, S.. - (2015).

Availability:
This version is available at: 11583/2847381 since: 2020-10-02T17:00:37Z

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

15 October 2026

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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	**102015000065421**
Data Deposito	**26/10/2015**
Data Pubblicazione	**26/04/2017**

Classifiche IPC

Titolo

APPARATO DI PROPULSIONE PER VEICOLI SPAZIALI E PROCEDIMENTO CORRISPONDENTE

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:
"Apparato di propulsione per veicoli spaziali e procedimento corrispondente"
di: Fondazione Istituto Italiano di Tecnologia, di nazionalità italiana, Via Morego, 30, 16163, Genova GE, Italia
Inventori designati: Alessandro CHIOLERIO, Samuele PORRO
Depositata il: 26 ottobre 2015

***

TESTO DELLA DESCRIZIONE

Campo tecnico

La presente descrizione è relativa a tecniche per la propulsione di veicoli nel vuoto, in particolare nello spazio, mediante un apparato di propulsione per veicoli spaziali, comprendente uno strato di sorgente di ossigeno, mezzi per estrarre ossigeno da detto strato di sorgente di ossigeno, mezzi per accelerare in modo corrispondente gli ioni ossigeno estratti nel vuoto.

Descrizione della tecnica nota

La possibilità di correggere l'assetto e/o la quota di piccoli veicoli spaziali, per es. i nano-satelliti, per mezzo di un sistema di propulsione interno, è una caratteristica che è sempre più richiesta per le missioni spaziali avanzate. La propulsione dei microsatelliti è normalmente studiata e ottenuta per mezzo di sistemi di propulsione miniaturizzati, che possono generare di solito una accelerazione (spinta) eiettando una parte della loro massa. Per quanto riguarda i nano-satelliti e i sistemi più piccoli, non c'è effettivamente alcuna soluzione per la loro propulsione, sebbene alcune proposte si basino su sistemi elettrodinamici (che sono limitati a una regione del campo magnetico terrestre nella quale la densità di

flusso è abbastanza elevata) o sulle vele solari. Ci sono vari modi per generare una spinta, che lavorano secondo differenti principi. Per esempio, può essere usata la potenza elettrica per generare calore e vaporizzare un propellente solido o liquido, che è accelerato attraverso un ugello. Lo stesso principio è applicato usando bolle di vapore. I dispositivi propulsori ("thruster") a colloidi producono la spinta mediante l'accelerazione elettrostatica di goccioline di liquido che formano uno spruzzo ("spray") elettrostatico. Nei dispositivi propulsori con plasma pulsato, è usato un arco per rimuovere per ablazione e accelerare una piccola quantità di propellente solido. I micro-razzi azionati a laser usano brevi impulsi laser per rimuovere per ablazione una piccola quantità di materiale e ottenere una spinta. solido o liquidoifferenti principi. magnetico terrestre nella quale la densità di

Un'altra classe di meccanismi usa un propellente liquido o gassoso che è immagazzinato ad alta pressione, per esempio in sistemi di propulsione con gas freddo.

Nella configurazione più semplice, un motore di un razzo con scarico a gas freddo consiste tipicamente di un serbatoio del gas, di un sensore di pressione e di temperatura, di una valvola di aperto/chiuso e di un dispositivi propulsori. Questi micro-propulsori o micro-thruster sono realizzati con tecnologia MEMS standard e sono dispositivi estremamente complessi, basati sulla eiezione di un gas e successivamente soggetti a erosione. In particolare, la fabbricazione di micro-valvole adatte per scopi di micro-propulsione è tecnologicamente impegnativa, perché è necessario che queste strutture siano a perfetta tenuta stagna nello stato chiuso e, nello stato aperto, la resistenza al flusso di gas deve essere molto

bassa. Questi due requisiti combinati sono molto difficili da soddisfare. Un tasso di perdita elevato provoca torsioni di disturbo indesiderate e deviazioni di assetto, abbreviando in modo apprezzabile la durata di una missione. Questo problema fondamentale è ulteriormente aumentato quando sono ridotte le dimensioni della valvola, al fine di soddisfare la richiesta crescente di miniaturizzazione dei componenti.

La pubblicazione di D. Reppin, F. Kuhl, M. Piechotka, T. Henning, P. J. Klar, N. Wolf, S. Kolling e J. Janek *"Concepts for micro-thrusters based on solid state ion conductors"*, IEPC-2013 Proceedings, (2013) IEPC-2013-128 descrive due soluzioni per i dispositivi propulsori a micro-propulsione elettrica basati su ossido di zirconio stabilizzato con ittrio (YSZ, "Yttria Stabilized Zirconia") conduttore di ioni a stato solido. Una delle soluzioni è basata su membrane di YSZ micro-fabbricate, in cui l'ossigeno dalla fase gassosa all'esterno di un serbatoio è incorporato sotto forma di ioni alla superficie di YSZ ed è condotto attraverso la membrana alla superficie opposta dove è estratto come ioni O^- ed è accelerato nel vuoto. L'altro approccio è basato su una pellicola di YSZ spessa sorgente di ossigeno, in cui l'ossigeno in eccesso è estratto dallo strato ed è accelerato nel vuoto.

In questo caso, nella prima configurazione, il serbatoio di ossigeno è nello stato liquido, quest'elemento distintivo conducendo ad alcuni inconvenienti importanti per quanto concerne la difficoltà dell'immagazzinamento e la pericolosità del materiale stesso. Nella seconda configurazione, lo strato attivo di YSZ agisce anche come serbatoio di ossigeno, conducendo a difficoltà nel controllo preciso della quantità di ossigeno disponibile e

nel controllo preciso del meccanismo di propulsione basato su ioni ossigeno. Inoltre, è necessario che la soluzione con il serbatoio di materiale solido, al fine di funzionare, porti l'YSZ a circa 1000 K, cioè è necessario lavorare a temperature elevate alle quali l'YSZ è permeabile all'ossigeno, il che genera inconvenienti nei termini dell'affidabilità, così come del costo, delle dimensioni complessive e del consumo.

Questo documento descrive, nella seconda configurazione, un dispositivo propulsore spaziale, comprendente un serbatoio di ossigeno, che accelera gli ioni ossigeno al fine di generare una propulsione, cioè un apparato di propulsione per veicoli spaziali secondo il preambolo della rivendicazione 1.

Scopo e sintesi

Uno scopo di una o più forme di attuazione è di superare le limitazioni inerenti nelle soluzioni ottenibili dalla tecnica nota.

Secondo una o più forme di attuazione, tale scopo è raggiunto grazie a un apparato di propulsione avente le caratteristiche specificate nella rivendicazione 1. Una o più forme di attuazione possono riferirsi a un corrispondente procedimento di propulsione e anche a un processo di fabbricazione di un dispositivo propulsore.

Le rivendicazioni formano parte integrante dell'insegnamento tecnico qui fornito in relazione alle varie forme di attuazione.

Secondo la soluzione qui descritta, l'apparato di propulsione comprende una pila comprendente uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido, uno strato attivo che è depositato sopra detto strato sorgente ricco

di ossigeno allo stato solido, a contatto con detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido, detto strato attivo essendo formato con un materiale differente da detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido, detto materiale essendo un ossido che presenta un comportamento con isteresi dell'impedenza.

In varie forme di attuazione, il materiale attivo è compreso tra due strati metallici, uno strato metallico intermedio disposto sullo strato ricco di ossigeno allo stato solido e uno strato metallico superiore, disposto sullo strato attivo.

In varie forme di attuazione, lo strato metallico intermedio e lo strato metallico superiore comprendono una pluralità di strisce parallele, in particolare due strisce ciascuno, le strisce dello strato metallico intermedio essendo disposte ortogonali alle strisce dello strato metallico superiore, in particolare in una disposizione "crossbar array, o a schiera a barre trasversali.

In varie forme di attuazione, le strisce di detto strato metallico intermedio e detto strato metallico superiore disposte ortogonali formano incroci e comprendono rispettivi fori passanti ottenuti in corrispondenza di uno o più di detti incroci, formando un condotto di uscita per gli ioni ossigeno emessi dallo strato attivo.

In varie forme di attuazione, l'apparato comprende degli ugelli posti sopra i fori dello strato metallico superiore.

In varie forme di attuazione, l'apparato comprende un elemento di accelerazione degli ioni posto sopra gli ugelli, in particolare una griglia metallica di accelerazione pilotata elettricamente.

In varie forme di attuazione, l'apparato comprende un

elettrodo di riscaldamento associato allo strato ricco di ossigeno allo stato solido.

La soluzione qui descritta è anche rivolta a un procedimento per la propulsione di un oggetto nel vuoto, usando un dispositivo propulsore secondo una qualsiasi delle forme di attuazione descritte in precedenza.

In varie forme di attuazione, il procedimento comprende

riscaldare lo strato ricco di ossigeno allo stato solido per diffondere ossigeno nello strato attivo per un dato tempo;

generare una serie di impulsi a un livello di impostazione di tensione, al fine di portare una resistenza dello strato attivo nello stato di bassa resistenza ed espellere gli ioni ossigeno attraverso lo strato attivo;

generare una serie di impulsi a un livello di tensione di reset per riportare allo strato di alta resistenza lo strato attivo per smettere di espellere ioni ossigeno.

La soluzione qui descritta è anche rivolta a un processo di fabbricazione di uno o più dispositivi propulsori di un apparato di propulsione secondo una qualsiasi delle forme di attuazione descritte in precedenza, comprendente

depositare un elettrodo posteriore su un substrato come elettrodo di riscaldamento,

depositare quindi uno strato serbatoio allo stato solido ricco di ossigeno sull'elettrodo posteriore,

depositare lo strato di metallizzazione intermedio sopra lo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido, in particolare come elettrodi di fondo di un sistema CPE (Cross-Point Electrode), comprendente fori passanti,

depositare quindi lo strato attivo di un ossido che presenta un comportamento con isteresi dell'impedenza,

depositare successivamente gli elettrodi di metallizzazione più in alto con fori in corrispondenza degli incroci con gli elettrodi di fondo,

depositare una porzione sacrificale ed incidere ("etch") successivamente detta porzione sacrificale per fabbricare gli ugelli di espansione intorno ai fori, il procedimento comprendendo inoltre in particolare posizionare un elemento di aumento dell'energia sopra gli ugelli.

Breve descrizione dei disegni

Le forme di attuazione saranno ora descritte, a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni annessi, nei quali:

- le Figure da 1A a 1F rappresentano le fasi di un processo di fabbricazione di un apparato secondo una forma di attuazione da una vista dall'alto;

- le Figure da 2A a 2F rappresentano le stesse fasi del processo di fabbricazione delle Figure da 1A a 1F attraverso una sezione laterale parziale;

- la Figura 3 rappresenta un diagramma temporale dei segnali impiegati per pilotare un apparato secondo una forma di attuazione;

- la Figura 4 rappresenta una vista schematica di un dispositivo propulsore di un apparato secondo una forma di attuazione qui descritta.

Descrizione dettagliata delle forme di attuazione

La descrizione che segue illustra vari dettagli specifici, allo scopo di fornire una comprensione approfondita delle forme di attuazione. Le forme di attuazione possono essere implementate senza uno o più dei

dettagli specifici, o con altri procedimenti, componenti, materiali, ecc. In altri casi, operazioni, materiali o strutture note non sono illustrate o descritte in dettaglio in modo tale che vari aspetti delle forme di attuazione non saranno resi poco chiari.

Un riferimento a "una forma di attuazione" nel quadro della presente descrizione intende indicare che una particolare configurazione, struttura o caratteristica descritta con riferimento alla forma di attuazione è compresa in almeno una forma di attuazione. Similmente, le frasi come "in una forma di attuazione" che possono essere presenti in vari punti della presente descrizione non fanno necessariamente riferimento proprio alla stessa forma di attuazione. Inoltre, particolari conformazioni, strutture o caratteristiche possono essere combinate in un modo adeguato qualsiasi in una o più forme di attuazione.

I riferimenti usati qui sono forniti semplicemente per convenienza e quindi non definiscono l'ambito di protezione o l'ambito delle forme di attuazione.

La soluzione qui descritta è basata su una pila, che è inclusa in un dispositivo propulsore per rilasciare ossigeno nel vuoto, in cui c'è uno strato sorgente di ossigeno e uno strato attivo depositato sopra lo strato sorgente di ossigeno, in modo tale che sia a contatto con detto strato sorgente di ossigeno. Lo strato attivo è formato con un materiale che è differente rispetto a quello di detto strato sorgente di ossigeno e che è specificamente un ossido che presenta un comportamento con isteresi dell'impedenza, cioè, come esempio non limitativo, un materiale a commutazione resistiva, noto anche come memresistore (memristor in inglese) o resistore con memoria. Inoltre, il materiale di ossido può essere un

materiale di ossido usato nei memcondensatori (memcapacitors in inglese) o nei meminduttori (meminductors in inglese).

I materiali a commutazione di impedenza, o resistiva, presentano due livelli stabili di resistenza o di impedenza controllati da una corrente o una tensione elettrica applicata. Per esempio, strati attivi ultrasottili di ossido di metallo di transizione, depositati a titolo di esempio per mezzo di una deposizione di strato atomico (ALD, "Atomic Layer Deposition"), hanno la capacità di commutare da uno stato di alta resistenza (HRS, "High Resistance State") a uno stato di bassa resistenza (LRS, "Low Resistance State") con la formazione di ponti conduttivi (carenze di ossigeno o ioni di metallo che si diffondono tra i contatti) attraverso la pellicola sottile di ossido. Secondo le informazioni in possesso degli inventori, la deriva/diffusione delle carenze di ossigeno (o anioni) pilotata da un campo elettrico e/o da una ossidazione/riduzione termochimica svolge un ruolo fondamentale in questo processo. Normalmente, la commutazione azionata elettricamente richiede da 1 ms fino a 1 ns, e ciascun dispositivo può supportare sino a 10^{12} cicli prima di un malfunzionamento. Durante la formazione di un filamento con carenza di ossigeno attraverso lo strato di ossido, gli atomi di ossigeno sono espulsi dalla pellicola sottile. Questo fenomeno produce chiaramente delle bolle di ossigeno visibili, la cui posizione corrisponde all'area di giunzione attiva, intrappolata sotto lo strato di metallo superiore. La quantità e il tasso di espulsione di gas possono essere controllabili elettricamente alla scala quasi atomica, così in un ambiente quasi sottovuoto possono essere sfruttati nella

fabbricazione di un sistema di propulsione per oggetti molto piccoli.

Perciò, la soluzione qui descritta fornisce l'uso in un sistema di propulsione per oggetti piccoli, cioè femto-satelliti e pico-satelliti, per cui è chiamato anche femto-propulsore, di una architettura di uno strato attivo disposto come schiere a barre trasversali di dispositivi con isteresi resistiva e prevede anche di includere, sotto detto strato attivo disposto come una schiera a barre trasversali, un substrato sorgente di ossigeno che è usato per ripristinare l'operabilità del propulsore, in particolare del thruster, tra accensioni susseguenti. Inoltre, secondo un altro aspetto, la soluzione fornisce un ugello, intagliato dallo strato attivo usando una lavorazione MEMS standard, in modo tale che, invece di generare una bolla di ossigeno intrappolata tra lo strato attivo e l'elettrodo superiore, il gas espulso sia libero di espandersi in un tale ugello.

Il processo di fabbricazione 100 di un apparato di propulsione 10 sarà ora descritto con riferimento alle Figure 1 e 2.

Nella Figura 1, è descritto il flusso di un processo di fabbricazione di un apparato di propulsione 10 sotto forma di una cella di dispositivi propulsori 30, in particolare quattro dispositivi propulsori 30, secondo la soluzione descritta. Le Figure da 1A a 1F rappresentano differenti fasi del processo da una vista dall'alto, in un piano X-Y.

Nella Figura 2, è descritto il flusso di un processo di fabbricazione della cella 30 da una vista laterale. Le Figure da 2A a 2F rappresentano le stesse fasi delle Figure da 1A a 1F in una vista laterale, lungo l'asse orizzontale

X, mentre l'asse Z è lo strato di profondità che passa attraverso la pila di differenti strati della cella. La Figura 2 rappresenta soltanto un dettaglio, in particolare un elettrodo 14 di un dispositivo propulsore 30 e un corrispondente foro 15, che rappresenta il foro di uscita del dispositivo propulsore 30, come descritto meglio in dettaglio in seguito.

Il flusso di lavoro del processo può iniziare dal substrato, per esempio una fetta mono-cristallina di semiconduttore, come silicio o carburo di silicio, che fornisce stabilità termo-meccanica per le parti susseguenti. Tale substrato meccanico sul quale si trova una cella 10 di dispositivi propulsori 30 non è rappresentato per semplicità.

Così, nella Figura 1A, il processo inizia da una situazione nella quale un elettrodo posteriore 12 è stato depositato in una fase precedente su un substrato e quindi uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido 11 è stato depositato in una fase susseguente sopra l'elettrodo posteriore 12. L'elettrodo posteriore 12 è usato per il riscaldamento dello strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido, 11, cioè il serbatoio di ossigeno, ed è preferibilmente sotto forma di uno strato meandriforme o una griglia di fondo di elettrodi metallici, ottenuto per esempio per mezzo della deposizione per vaporizzazione ionica/evaporazione termica di qualche metallo (Au, Cu, Cr, Ti, Al, Pt), preferibilmente con bassa affinità con l'ossigeno e con bassa densità, per consentire il riscaldamento dello strato serbatoio 11 e la retrodiffusione dell'ossigeno.

Lo strato serbatoio 11 è ottenuto mediante deposizione di perossidi o di superossidi (per es., K_2O o $LiClO_4$),

preferibilmente qualsiasi materiale che presenta una percentuale in peso di ossigeno superiore al 50% e preferibilmente non esplosivo e facilmente controllabile, come il perclorato di litio o il superossido di potassio. Lo spessore dello strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido 11 è determinato in funzione della quantità di accensioni che ci si aspetta durante la vita del propulsore e i requisiti di impulso, che vanno da decine di nm a centinaia di μm.

Nella Figura 1B, è quindi rappresentata una fase di deposizione di uno strato di neutralizzazione intermedia, che comprende elettrodi di fondo 14, depositati sopra lo strato 11, di un sistema CPE (Cross-Point Electrode), sottoforma di due strisce metalliche parallele. Due fori passanti 15 con un diametro d, leggermente minore della larghezza della striscia, sono ottenuti in ciascuna striscia, equidistanti dalle estremità della striscia e a una distanza w l'uno rispetto all'altro. La striscia nell'esempio ha una lunghezza di approssimativamente due volte la distanza w. La geometria di CPE è usata preferibilmente per gli elettrodi poiché il propulsore ha necessità di campi elettrici piuttosto elevati. La geometria di CPE nel suo complesso implica la deposizione dello strato di metallizzazione intermedio, con tecniche e con materiali analoghi a quelli descritti per l'elettrodo posteriore 12, quindi la deposizione di uno strato attivo 16, e di un elettrodo di metallizzazione più in alto 17, anche con tecniche e con materiali analoghi a quelli indicati per la deposizione dell'elettrodo posteriore 12 e degli elettrodi di fondo 14 dello strato di metallizzazione intermedio. Come rappresentato con riferimento alle Figure 1D e 2D, la geometria dell'elettrodo di metallizzazione più

in alto 17 è compatibile con il progetto di ugelli intagliati 20, come si può vedere nelle Figure 1D e 2D, cioè anche gli elettrodi 17 sono strisce metalliche, in particolare due strisce metalliche nelle Figure 1D, 2D che hanno sostanzialmente la stessa sagoma e dimensione degli elettrodi 14, disposte ortogonali rispetto alle strisce 14, in un modo a schiera a barre trasversali, che incrociano le strisce 14 in corrispondenza dei fori 15 e che hanno fori 18 in corrispondenza di tali incroci. In altre parole, i fori 15 e 18 sono allineati formando un condotto di uscita per gli ioni ossigeno proveniente dallo strato attivo 11.

Come già menzionato, gli elettrodi di fondo 14 sono due strisce di metallo rettangolari parallele che comprendono dei fori 15 nella direzione dell'asse orizzontale X, in particolare in questo caso due fori su ciascun elettrodo 14, che hanno un diametro d. Una larghezza w della cella 10 è la distanza tra i fori 15 su una stessa striscia, mentre una altezza h della cella 10 è la distanza tra due fori 15 su due elettrodi differenti alla stessa coordinata orizzontale X, cioè una distanza lungo l'asse verticale Y. Preferibilmente, la larghezza w è approssimativamente uguale all'altezza h, in modo tale che i fori 15 che corrispondono ai dispositivi propulsori 30 siano i vertici di un quadrato. La dimensione della cella 10 può essere tipicamente nel campo di 1 μm < w≈h < 1 mm, cioè un'area tra 1 μm^2 e 1 mm^2, la larghezza w e l'altezza h essendo circa uguali e comprese tra 1 micrometro e 1 millimetro.

Nella Figura 1C, è anche rappresentata la fase di deposizione, a titolo di esempio con una tecnica ALD (Atomic Layer Deposition), di uno strato attivo 16 atto a eiettare ioni ossigeno, a titolo di esempio uno strato di

ossidi come ZnO o di titanati come $SrTiO_3$ o un qualsiasi altro ossido complesso che presenta un comportamento memristivo (memristive in inglese), cioè un materiale a commutazione resistiva.

Lo strato attivo 16 rappresentato nella Figura 2C ha uno spessore t_{AO}, lungo la direzione dell'asse di profondità Z, di alcune decine di nm, con uno spessore tipico di 10 nm < t_{AO} < 50 nm. Tali piccoli valori di spessore permettono lo sviluppo di campi elettrici estremamente elevati per l'estrazione degli ioni ossigeno, usando, come anche indicato in precedenza, ossidi di metallo di transizione, cioè ZnO, TiO_2, TaO_x e così via, o in alternativa titanati come $SrTiO_3$, o qualsiasi altro ossido complesso che presenta un comportamento memristivo. Dalla Figura 2C, si può anche vedere che lo strato attivo 16 è a contatto diretto con lo strato sorgente, o serbatoio, di ossigeno 11.

Nella Figura 1D, è rappresentata la deposizione degli elettrodi superiori 17 del sistema CPE (come si vede meglio nella Figura 2D).

Nella Figura 1E, è rappresentata la fase di deposizione di una porzione sacrificale 19, cioè uno strato di resina, che è inciso successivamente per fabbricare ugelli di espansione 20 intorno ai fori 15.

Per ottenere gli ugelli 20 è usato un processo con bombardamento di ioni (o qualsiasi altra procedura di incisione solida/umida), esponendo lo strato attivo 16 e rendendo efficace l'eiezione di ossigeno, l'espansione e il trasferimento a impulsi al sistema. In varianti di forme di attuazione, secondo le condizioni esterne, è possibile accoppiare il microcircuito integrato ("chip") sul quale è ottenuto il propulsore 10 con una schiera polimerica di

ugelli, fornendo la curvatura corretta per l'espansione del gas. Dalla Figura 2E, si può anche apprezzare la sagoma parabolica dell'ugello di espansione 20, che è ottenuto incidendo lo strato di resina sacrificale 19 con bombardamento di ioni.

Nella Figura 1F, è rappresentata una fase di posizionamento di un elemento di aumento dell'energia, una griglia di accelerazione 21, che fornisce un trasferimento di energia aggiuntivo agli ioni eiettati. L'area attiva dell'ugello 20 è estremamente piccola: 100 nm < w≈h < 100 µm.

La griglia di accelerazione 21 fornisce un aumento pilotato elettricamente dell'energia degli ioni ossigeno espulsi. Gli ioni sono caricati elettricamente e saranno respinti da un campo dello stesso segno. In varianti di forme di attuazione, l'elemento di aumento dell'energia può essere uno pilotato magneticamente, poiché gli ioni ossigeno portano anche uno spin sbilanciato.

Così, in base a quanto precede, in una forma di attuazione un processo di fabbricazione di uno o più dispositivi propulsori 30 di un apparato di propulsione 10 comprende le fasi di

depositare un elettrodo posteriore 12 su un substrato come elettrodo di riscaldamento,

depositare quindi uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido 11 sopra l'elettrodo posteriore 12,

depositare lo strato di metallizzazione intermedio 14 sopra lo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido 11, in particolare come elettrodi di fondo di un sistema CPE (Cross-Point Electrode), comprendente fori passanti 15,

depositare quindi lo strato attivo 16 di un ossido che presenta un comportamento memristivo,

depositare successivamente gli elettrodi di metallizzazione più in alto 17 con fori 18 in corrispondenza degli incroci con gli elettrodi di fondo 14,

depositare una porzione sacrificale 19 ed incidere successivamente detta porzione sacrificale 19 per fabbricare ugelli di espansione 20 intorno ai fori 15.

Inoltre, in forme di attuazione di vario tipo, il procedimento di fabbricazione comprende inoltre posizionare un elemento di aumento dell'energia 21 sopra gli ugelli 20.

Nella Figura 3, è rappresentato un dispositivo propulsore 30 completo secondo una vista laterale. Nella Figura 3, soltanto la griglia di accelerazione 21 non è rappresentata per semplicità, ma in una variante della forma di attuazione può essere compresa in tale dispositivo propulsore 30.

Con 23 è indicato un modulo di controllo del riscaldatore, o un generatore che genera un segnale di riscaldamento V_h applicato al riscaldatore del serbatoio di ossigeno 12. Con 24 è indicato un generatore di controllo della spinta, che genera un segnale di controllo della spinta V_t, cioè un segnale a impulsi usato per azionare il dispositivo propulsore 30. Un altro segnale di controllo dell'accelerazione è inviato da un rispettivo modulo di controllo per pilotare la griglia di accelerazione 2, ma questo non è rappresentato nella Figura 3 per semplicità. Con 22 sono indicati gli ioni ossigeno emessi dal dispositivo propulsore 30.

Naturalmente, il dispositivo propulsore 30, quando fabbricato secondo il processo descritto con riferimento alle Figure 1 e 2, è uno di una pluralità di dispositivi

propulsori, in particolare quattro dispositivi propulsori; ciò nonostante, la soluzione qui descritta si estende anche a propulsori con un singolo motore a reazione 30, ottenuto con un procedimento di fabbricazione alternativo o selezionando un dispositivo propulsore 30 da una cella 10.

Così, nella Figura 3 è rappresentato un dispositivo propulsore 30 di un apparato di propulsione 10 comprendente una pila che comprende uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido 11, uno strato attivo 16 depositato sopra detto strato sorgente di ossigeno 11, a contatto con lo strato sorgente ricco di ossigeno 11, lo strato attivo 16 essendo formato con un materiale differente dallo stato sorgente ricco di ossigeno 11, il materiale essendo un ossido che presenta un comportamento memristivo.

Il materiale attivo 16 è compreso tra due strati metallici, uno strato metallico intermedio 14 disposto sullo strato sorgente ricco di ossigeno 11 e uno strato metallico superiore, disposto sullo strato attivo 14. Lo strato metallico intermedio 14 e lo strato metallico superiore 17 in un apparato 10 comprendono una pluralità di strisce parallele, specificamente due strisce ciascuno, le strisce dello strato metallico intermedio 14 essendo disposte ortogonali alle strisce dello strato metallico superiore 17, in particolare in una disposizione a schiera a barre trasversali, come si può anche vedere nelle Figure da 1A a 1F. Da tali figure, si può anche vedere che le strisce dello strato metallico intermedio 14 e dello strato metallico superiore 17, disposte ortogonali, formano incroci e comprendono rispettivi fori passanti 15, 18 ottenuti a uno o più degli incroci, formando un condotto di uscita per gli ioni ossigeno emessi dallo strato attivo 16

per un rispettivo dispositivo propulsore 30. Un ugello 20 può essere posto sopra un rispettivo foro 18 dello strato metallico superiore 17. Come menzionato, un elemento di accelerazione degli ioni 21 può essere posto sopra il rispettivo ugello 20, in particolare una griglia metallica di accelerazione 21 pilotata elettricamente. Inoltre, l'apparato 30 comprende un elettrodo di riscaldamento 12 associato allo strato sorgente ricco di ossigeno 11 per estrarre l'ossigeno.

Nella Figura 4, è rappresentato in modo corrispondente un diagramma temporale che illustra una forma di attuazione di un ciclo operativo del dispositivo propulsore 30 dell'apparato di propulsione 10.

V_h indica il segnale di riscaldamento applicato al riscaldatore del serbatoio di ossigeno 11. V_t indica un segnale di controllo della spinta, cioè un segnale a impulsi usato per azionare i dispositivi propulsori 30. Un altro segnale è inviato per pilotare la griglia di accelerazione, se presente, ma questo non è rappresentato nella Figura 4 per semplicità.

Durante un profilo di accensione, a titolo di esempio, nel dispositivo propulsore 30 hanno luogo gli eventi seguenti:

il riscaldamento del serbatoio 11 ha inizio (fase a), innalzando il segnale di riscaldamento V_h a un livello di tensione di riscaldamento V_{HL} e l'ossigeno si diffonde nello strato attivo 16 per un tempo T che corrisponde sostanzialmente al tempo per il quale il segnale di riscaldamento V_h è al livello di tensione di riscaldamento V_{HL}; questa fase induce qualche ritardo, dopodiché l'ossigeno è di nuovo in posizione nel reticolo dello strato attivo 16. Il tempo T può essere regolato, in

funzione del livello di esaurimento dell'ossigeno del dispositivo propulsore 30, per mezzo di un sistema di controllo di retroazione e di sensori esterni, al fine di aumentare la stabilità e l'affidabilità del dispositivo propulsore. Quindi (fase b), una unità di controllo del dispositivo propulsore genera impulsi V_t a un livello di impostazione di tensione V_e, al fine di portare una resistenza R16 dello strato attivo 16 nel LRS; qui, sono presenti carenze di ossigeno, consentendo il percorso conduttivo che porta la resistenza del dispositivo a un livello basso. Di conseguenza, gli ioni ossigeno sono espulsi attraverso lo strato attivo 16 e si espandono nell'ugello 20. Quando è raggiunto l'impulso desiderato, sono generati impulsi (fase c) al livello di tensione di reset VR (negativo nel caso di un meccanismo di conduzione bipolare) per riportare (fase d) all'HRS lo strato attivo 16 e distruggere le carenze di ossigeno, riconfigurando la distribuzione degli atomi di ossigeno all'interno dello strato attivo 16. Ora, può iniziare di nuovo un nuovo ciclo.

Al fine di affrontare l'analisi delle prestazioni del dispositivo propulsore 30, sarà effettuata una analisi di ingegnerizzazione delle equazioni correnti che descrivono sistemi analoghi. L'equazione usata per valutare una spinta netta approssimata S di un motore a getto (basato su ventole, razzo chimico o plasma elettromagnetico) è:

$$S=(p_e-p_n)A_e + \dot{m}_p u_e \qquad (1)$$

dove il primo termine è dovuto alla caduta di pressione entalpica (p_e-p_n) tra l'uscita dell'ugello 20 e l'ambiente esterno, moltiplicato per l'area dell'ugello effettiva A_e, e il secondo termine è dovuto all'energia cinetica dello

scarico e al suo contributo inerziale, che consiste fondamentalmente di un flusso di massa $\dot{m}_p$ moltiplicato la velocità di eiezione u_e.

Si può ipotizzare che la pressione di scarico p_n dell'ossigeno esaurito sia almeno uguale alla pressione ambiente (111,325 Pa), la pressione esterna p_e è trascurabile nel vuoto spaziale (nell'intorno di 1 nPa), l'area attiva A_e è quella di un cerchio con diametro *d* di 30 µm (sebbene possa essere molto più grande, fino a una dimensione millimetrica, in un prototipo ingegnerizzato). Per quanto riguarda il contributo cinetico, si può stimare che la massa di ossigeno emessa da ciascun ciclo abbia un volume di alcuni picolitri (come una piccola goccioliina, e che possa aumentare fino ad alcune centinaia di picolitri), corrispondente a centinaia di femtomoli (fino a una picomole in un prototipo ingegnerizzato). Il sistema dovrebbe essere esaurito a un ritmo che dipende dallo slew rate della tensione operativa, normalmente nell'intorno di 1 secondo, ma in linea di principio potrebbe essere tanto veloce quanto alcuni millisecondi, comparabile con la velocità del suono nel solido attivo. La velocità di esaurimento, che si può ipotizzare che sia approssimativamente uguale alla velocità di eiezione u_e, va da circa 5 a 10 µm/s, nel caso più conservativo.

Così, in base all'Equazione (1), il valore di spinta netta *S* è:

$S=(1.01325\text{x}10^{5}-1\ \text{x}10^{-9})*1\text{x}10^{-8}+5.312\text{x}10^{-37}+1\text{x}10-^{5}\approx1\text{x}10^{-3}\text{N}$

Ciò mostra che una spinta di 1 mN su un'area di 100 x 100 µm è raggiunta da un singolo dispositivo propulsore 30. Quando la schiera a barre trasversali è composta da una configurazione quadrata di celle, è possibile avere un'area globale di 300 x 300 µm, con quattro celle, una a ciascun

angolo della schiera.

Per stimare il peso medio del dispositivo propulsore 30, si considera una possibile forma di attuazione della pila, composta dalla seguente struttura di strati 12/11/14/16/17: $LiClO_4$ spessore di 41000 nm / Ta spessore di 20 nm / Pt spessore di 50 nm / TaO_x spessore di 35 nm / Pt spessore di 50 nm. Lo strato di tantalio Ta è impiegato come un promotore di adesione dello strato di Pt che realizza l'elettrodo 14 sul serbatoio 11. Lo strato di perclorato di litio $LiClO_4$ è impiegato qui allo stesso tempo anche come substrato 12, non solo come serbatoio 11, al posto del silicio, poiché è usato uno strato di $LiClO_4$ molto spesso.

Date le densità dei materiali (2,42 g/cm^3 per il $LiClO_4$, 16,69 per il Ta, 21,45 per il Pt e 8,2 per il TaO_x), si ottiene un peso stimato della cella 10 di 2 µg, che conduce a 500 ng per dispositivo propulsore 30. Ciò significa che il rapporto tra spinta e peso (TWR, "Thrust to Weight Ratio") del sistema di propulsione puro e semplice, escludendo il controllo e la generazione di potenza (che è disponibile a bordo per altri scopi) è $TWR= 1x10^{-3}/(9,807*5x10^{-7})=203,9$. Si sottolinea che il motore o il propulsore con le migliori prestazioni mai realizzato, un motore razzo a cherosene con ciclo generatore di gas chiamato Merlin 1D sviluppato da SpaceX, Stati Uniti d'America, raggiunge un valore di TWR di 159,9. Ciò rende un propulsore che comprende uno o più dispositivi propulsori 30 un'alternativa efficace ad altre tecnologie, se scalato verso spinte più elevate, così come la sola tecnologia disponibile per la propulsione autonoma e il posizionamento di satelliti estremamente piccoli e di sistemi (con sciami) "smart dust" (polvere intelligente).

Può anche essere calcolata la stima della potenza elettrica necessaria per accendere un singolo impulso che raggiunge una spinta di 1 mN: questo significa dissipare approssimativamente 10 mJ per l'espulsione dell'ossigeno e altri 10 mJ durante il ciclo di ripristino dell'ossigeno, in una durata totale di approssimativamente 1 s, così 20 mW di potenza elettrica. Poiché la quantità di ossigeno eiettata nello spazio è dell'ordine di 5×10^{-37} kg/ciclo, l'energia richiesta per kg di propellente è dell'ordine di 10^{16} YJ, mentre la minima potenza/spinta è di 20 W/N. per quanto riguarda l'energia per kg di propellente, i numeri dimostrano che la soluzione del dispositivo propulsore è probabilmente il meccanismo più efficiente nel trasferire energia al propellente.

Dall'ultima stima, può essere ricavato l'impulso specifico I_{sp}, secondo la seguente Equazione (2):

$$F_{thrust} = I_{sp} \dot{m} g_0 \qquad (2)$$

dove la spinta F_{thrust} [N] è in relazione con l'impulso I_{sp} [s] attraverso la portata in massa $\dot{m}$ [kg/s] e l'accelerazione gravitazionale g_0. Come già evidenziato, sono possibili impulsi tanto elevati quanto 10^{32} s, vari ordini di grandezza migliori delle tecnologie esistenti, il cui impulso massimo è sempre minore di 10^{5} s per dispositivi propulsori a ioni con stadio duale.

La soluzione secondo le varie forme di attuazione qui descritte consente di ottenere i seguenti vantaggi.

L'apparato descritto è un femto-propulsore a stato solido che è interamente pilotato elettricamente. L'assenza di parti in movimento e di combustibili liquidi assicura un funzionamento veloce e una capacità di operare con duty-cycle elevati.

Inoltre, la quantità di ossigeno solido per fare funzionare il propulsore è iniettata nello strato attivo dallo strato ricco di ossigeno che funziona come strato serbatoio, anche sotto forma di una pellicola sottile, consentendo così una reversibilità completa del propulsore e molteplici operazioni. Anche la diffusione dell'ossigeno dal serbatoio alla parte attiva è pilotata elettricamente.

Nell'apparato descritto, il processo di fabbricazione del dispositivo propulsore richiede soltanto processi MEMS e una tecnologia a film sottile standard. Una dimensione di cella tipica contenente quattro dispositivi propulsori è di 1 μm < w≈h < 1mm, ciò rendendo applicabile il dispositivo propulsore alla propulsione controllata di pico- e femto-satelliti.

L'apparato descritto comprende un ugello, intagliato dallo strato attivo usando una lavorazione MEMS standard, in modo tale che, invece di generare una bolla di ossigeno intrappolata tra lo strato attivo e l'elettrodo superiore, il gas espulso sia libero di espandersi in un tale ugello. L'area attiva dell'ugello è anche estremamente piccola: 100 nm < w≈h < 100 μm.

L'apparato descritto, che è completamente a stato solido e pilotato elettricamente, è superiore ad altre tecniche di propulsione nei termini dell'affidabilità, della stabilità e della sicurezza operativa. Inoltre, il numero elevato di cicli che l'architettura di un dispositivo con isteresi resistiva può supportare lo rende probabilmente il dispositivo propulsore con la più lunga durata di vita mai concepita, in grado anche di funzionare in modalità ad impulsi. Inoltre, i dispositivi con isteresi resistiva azionati in tensione consentono il controllo accurato della spinta, permettendo una gamma completa di

quantità di ossigeno eiettate dal dispositivo. L'accensione del dispositivo richiede una fase di riscaldamento estremamente semplice, senza alcun circuito fluidico o valvola critica. Similmente, lo spegnimento del dispositivo può essere compiuto facendo calare la tensione; nei termini dell'affidabilità, una eventuale perdita di potenza nei sistemi principali non può danneggiare il dispositivo propulsore. Le sue figure di merito mostrano il rapporto di spinta su peso più elevato mai concepito, un impulso specifico molto alto, con un rapporto di minima potenza/spinta rimarcabilmente basso. Inoltre, l'efficienza, l'impulso specifico e la spinta del dispositivo propulsore possono essere aumentati per mezzo di uno stadio di accelerazione magnetica/elettrica degli ioni espulsi.

Naturalmente, fermi restando i principi di fondo delle forme di attuazione, i dettagli di costruzione e le forme di attuazione possono variare ampiamente rispetto a quanto è stato descritto e illustrato qui puramente a titolo di esempio, senza uscire con ciò dall'ambito delle presenti forme di attuazione, come definite dalle rivendicazioni che seguono.

L'apparato potrebbe essere sviluppato inoltre includendo uno stadio di accelerazione secondario, basato su campi elettrici o magnetici, oppure anche su entrambi i campi, poiché gli ioni ossigeno sono caricati elettricamente e hanno anche un momento magnetico (spin) sbilanciato.

RIVENDICAZIONI

1. Apparato di propulsione (10) per veicoli spaziali, comprendente almeno un dispositivo propulsore (30) che comprende uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), mezzi (12) per estrarre ioni ossigeno da detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), mezzi (16, 14, 17) per accelerare in modo corrispondente gli ioni ossigeno estratti nel vuoto, caratterizzato dal fatto che comprende una pila comprendente detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), uno strato attivo (16) che è depositato sopra detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), a contatto con detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), detto strato attivo (16) essendo formato con un materiale differente da detto strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), detto materiale essendo un ossido che presenta un comportamento con isteresi dell'impedenza.

2. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto materiale attivo (16) è compreso tra due strati metallici (14, 17), uno strato metallico intermedio (14) disposto sullo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11) e uno strato metallico superiore, disposto sullo strato attivo (14).

3. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto strato metallico intermedio (14) e detto strato metallico superiore (17) comprendono una pluralità di strisce parallele, in particolare due strisce ciascuno, le strisce dello strato metallico intermedio (14) essendo disposte ortogonali alle strisce dello strato metallico superiore (17), in particolare in una disposizione di tipo "crossbar array".

4. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che dette strisce di detto strato metallico intermedio (14) e detto strato metallico superiore (17), disposte ortogonali, formano incroci e comprendono rispettivi fori passanti (15, 18) ottenuti a uno o più di detti incroci, che formano un condotto di uscita per gli ioni ossigeno emessi dallo strato attivo (16).

5. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che comprende ugelli (20) posti sopra i fori (18) dello strato metallico superiore (17).

6. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che comprende un elemento di accelerazione degli ioni (21) posto sopra gli ugelli (20), in particolare una griglia metallica di accelerazione (21) pilotata elettricamente.

7. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che comprende un elettrodo di riscaldamento (12) associato allo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11).

8. Procedimento per la propulsione di un oggetto nel vuoto, usando un propulsore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 7.

9. Procedimento secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che comprende

riscaldare lo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11) per diffondere ossigeno nello strato attivo (16) per un dato tempo;

generare una serie di impulsi (V_t) a un livello di impostazione di tensione (V_s), al fine di portare una resistenza (R16) dello strato attivo (16) in uno stato di bassa resistenza (LRS) ed espellere gli ioni ossigeno (22)

attraverso lo strato attivo (16);

generare una serie di impulsi a un livello di tensione di reset (VR) per riportare allo strato di alta resistenza (16) lo strato attivo (16) per smettere di espellere ioni ossigeno (22).

10. Processo di fabbricazione di uno o più dispositivi propulsori (30) di un apparato di propulsione (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 7, comprendente

depositare un elettrodo posteriore (12) su un substrato come elettrodo di riscaldamento,

depositare quindi uno strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11) sull'elettrodo posteriore (12),

depositare lo strato di metallizzazione intermedio (14) sopra lo strato sorgente ricco di ossigeno allo stato solido (11), in particolare come elettrodi di fondo di un sistema CPE (Cross-Point Electrode), comprendente fori passanti (15),

depositare quindi lo strato attivo (16) di un ossido che presenta un comportamento memristivo,

depositare successivamente gli elettrodi di metallizzazione più in alto (17) con fori (18) in corrispondenza degli incroci con gli elettrodi di fondo (14),

depositare una porzione sacrificale (19) ed incidere successivamente detta porzione sacrificale (19) per fabbricare ugelli di espansione (20) intorno ai fori (15), il procedimento comprendendo inoltre in particolare posizionare un elemento di aumento dell'energia (21) sopra gli ugelli (20).

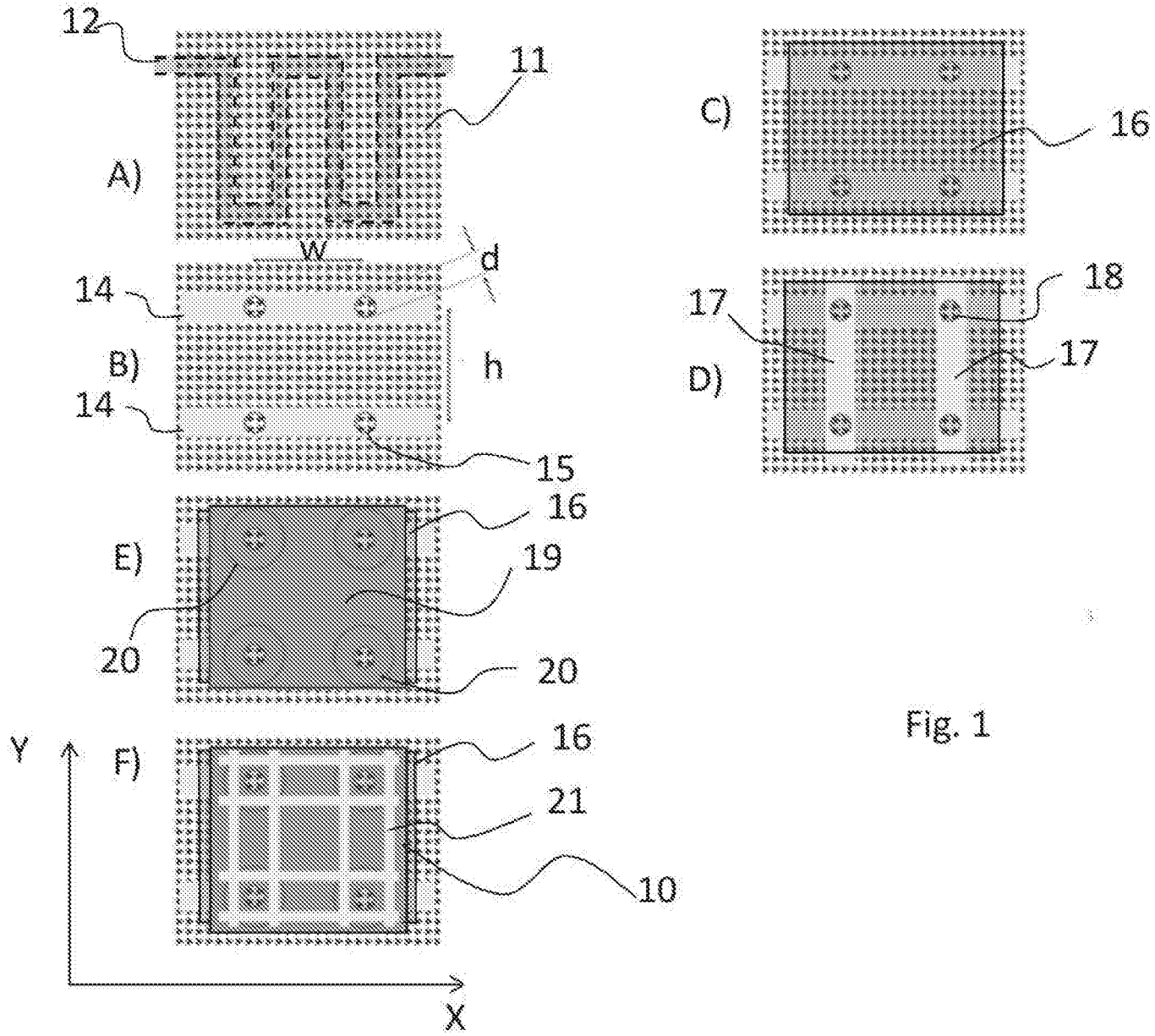

Fig. 1

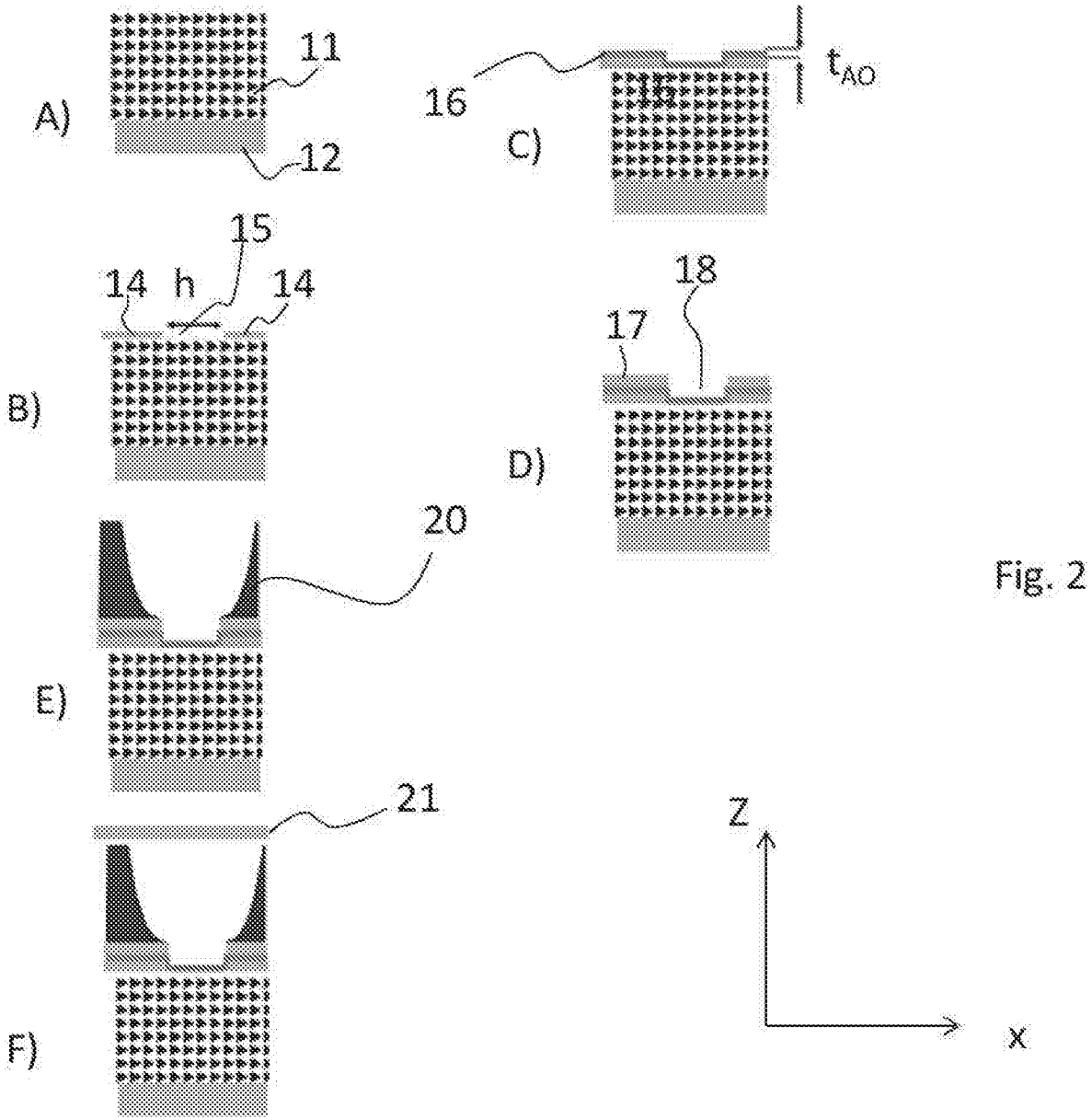

Fig. 2

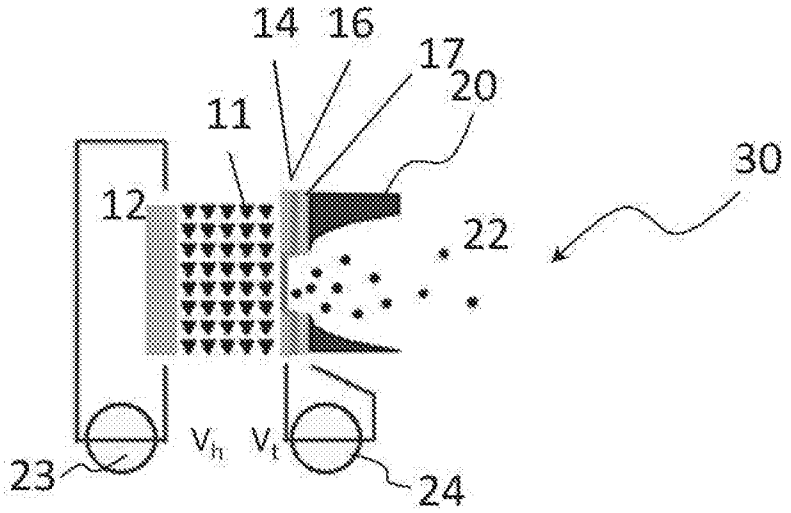

Fig. 4

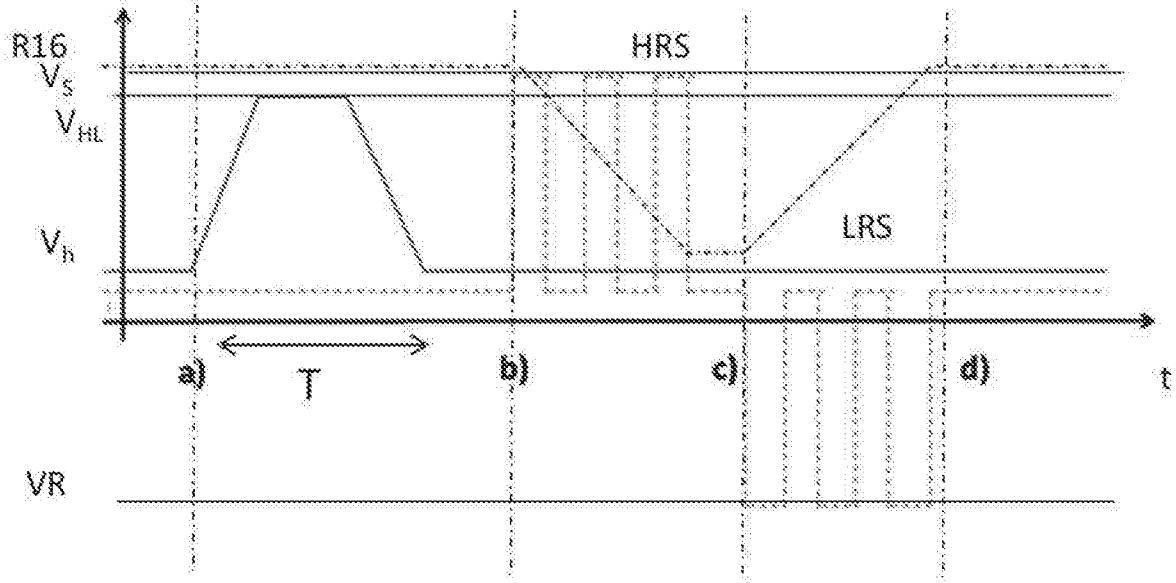

Fig. 3