

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902105827A1

Publication Date

20140529

Applicant

DHITECH - DISTRETTO TECNOLOGICO HIGH TECH S.C.A.R.L.

Title

DISPOSITIVO ELETTRONICO PER LA REALIZZAZIONE DI FUNZIONI
DIGITALI MEDIANTE ELEMENTI FUNZIONALI MOLECOLARI.

Titolare: STMicroelectronics S.r.l.

"Dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali mediante elementi funzionali molecolari."

SFONDO TECNOLOGICO DELL'INVENZIONE

Campo di applicazione

La presente invenzione si riferisce ad un dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali e porte logiche miniaturizzate, basato su elementi funzionali molecolari, e ad un metodo per la computazione digitale realizzato da tale dispositivo.

Sono altresì compresi nell'invenzione un sistema di elaborazione elettronica, impiegante uno o più dispositivi sopra menzionati, ed un metodo per la fabbricazione del dispositivo medesimo.

Descrizione dell'arte nota

L'evoluzione della microelettronica, in particolare applicata a processori ed elaboratori elettronici basati su circuiti integrati, si è sviluppata negli ultimi decenni mantenendo lo straordinario ritmo previsto dalla cosiddetta "legge di Moore". Ciò si è manifestato in particolare nella miniaturizzazione sempre più spinta dei circuiti

integrati elettronici, ovvero, a parità di dimensioni, nella sempre maggiore capacità computazionale ottenibile, dipendente a sua volta dal numero di elementi funzionali (ad esempio, porte logiche) integrabili in un dato spazio, e dalla velocità di operazione di tali elementi funzionali.

Questa evoluzione è stata resa possibile da miglioramenti di tipo prevalentemente tecnologico, rimanendo invece invariati i principi fondamentali dei circuiti micro-elettronici, basati ormai da decenni sul transistor come elemento di base.

Di fatto, l'evoluzione sopra citata ha comportato il progetto, la fabbricazione e l'integrazione di transistori sempre più veloci, miniaturizzati, e capaci di consumare sempre meno energia. Per quanto riguarda la miniaturizzazione, l'aspetto fondamentale è stato ed è la capacità di utilizzare processi litografici di fabbricazione su scale spaziali via via sempre più piccole.

Tale evoluzione tecnologica, tuttavia, appare sempre più vicina al proprio limite. I costi e la fattibilità di processi litografici su scale più ridotte di quelle attuali appaiono problematici.

Per superare le barriere ed i limiti sopra citati, emerge l'esigenza di un salto di qualità,

nella concezione stessa di dispositivi, sistemi di elaborazione e processori elettronici, secondo quello che si può definire in sintesi il passaggio dalla micro-elettronica alla nano-elettronica.

Il passaggio dalla micro-elettronica alla nano-elettronica implica in modo particolare la necessità di sfruttare leggi fisiche ancor più fondamentali di quelle sfruttate nei transistori, ad esempio fenomeni quantistici su scala atomico-molecolare.

La ricerca in tale ambito persegue dunque la possibilità di ideare dispositivi nano-elettronici cosiddetti "transistor-like" (come i "transistori molecolari" o i "tri-gate transistors") che, pur basandosi su fenomeni quantistici, mirano a riprodurre il funzionamento dei transistori tradizionali. Tuttavia, le soluzioni nano-elettroniche "transistor-like" presentano severi inconvenienti, poiché esse non consentono ad oggi di raggiungere le prestazioni dei transistori micro-elettronici allo stato dell'arte. Inoltre, un sistema basato su transistori necessita comunque di interconnessioni complesse, che devono essere ottenute mediante processi litografici, e quindi non consentono di superare i già citati limiti di tali processi.

Un ulteriore filone di ricerca, sviluppato per

lo più in ambito accademico, riguarda una classe di dispositivi definibili come "transistor-less", cioè tali da non prevedere l'uso di transistori.

Questo filone di ricerca comprende ad esempio i QCA - "Quantum-dot Cellular Automata" (cioè "automi cellulari a punti quantici"). I QCA si basano sull'idea secondo cui, poiché le proprietà dei materiali cambiano radicalmente su scala nano-metrica, vi possono essere su tale scala metodi di elaborazione che sfruttano fenomeni quantistici su scala atomico-molecolare, quali l'interazione elettrostatica combinata con l'effetto di tunneling quantistico ed il confinamento quantistico di carica. Tali metodi di elaborazione possono essere molto più efficienti, rispetto a metodi basati su commutatori, quali di fatto sono i transistori.

I QCA prevedono unità funzionali composte ad esempio di celle a sei punti (ovvero sei atomi o gruppi atomici) capaci di assumere due diversi stati polarizzati ed uno stato neutro, corrispondenti a diverse configurazioni di carica intorno ai diversi atomi o gruppi atomici, equivalenti ad altrettanti "siti di confinamento". Ogni cella può essere realizzata ad esempio mediante due molecole comprendenti ciascuna tre siti di confinamento.

È stata dimostrata la possibilità di realizzare, mediante QCA, singole unità funzionali quali celle di memoria, linee binarie, invertitori logici, fino a singole porte logiche booleane.

Tuttavia, ad oggi, i QCA non si sono rivelati tali da permettere la realizzazione di processori complessi, poiché per costruire un processore complesso, basato su celle di tipo QCA, si ricade comunque nella necessità di utilizzare processi litografici sostanzialmente tradizionali, sino alla risoluzione spaziale della singola cella QCA, con tutte le già citate limitazioni che ciò comporta.

Un ulteriore inconveniente delle soluzioni QCA, specialmente a scala molecolare, deriva dal fatto che esse richiedono di essere realizzate sulla base di molecole altamente simmetriche nella struttura e nella configurazione elettrica, mentre le molecole reali tendono a presentare naturalmente delle asimmetrie, se non altro derivanti dalla loro deposizione su substrati, assieme ad altre molecole anche simili.

L'impiego di molecole non perfettamente simmetriche costituisce un severo limite per le prestazioni ottenibili mediante i QCA.

Da quanto sopra, risulta evidente che l'esigenza di disporre di dispositivi nano-elettronici integrati,

aventi prestazioni di elaborazione digitale paragonabili a quelle degli attuali circuiti e processori micro-elettronici, e realizzabili a costi ragionevoli, resta largamente non soddisfatta.

Lo scopo della presente invenzione è quello di escogitare e mettere a disposizione un dispositivo elettronico basato su elementi funzionali molecolari, per la realizzazione di funzioni digitali e di porte logiche miniaturizzate, nonché un metodo per la fabbricazione del dispositivo medesimo, ed inoltre un sistema di elaborazione elettronica, impiegante uno o più di tali dispositivi, ed un relativo metodo di computazione elettronica, migliorati in modo tale da ovviare almeno parzialmente agli inconvenienti qui sopra descritti con riferimento alla tecnica nota.

In particolare, si propone un dispositivo elettronico basato su fenomeni fisici anche quantistici, e nel contempo in grado di integrare numerosi elementi funzionali, tali da costituire volendo un processore o una rete logica complessa, realizzabili a costi sostenibili ed aventi elevate prestazioni.

SOMMARIO DELL'INVENZIONE

Tale scopo viene raggiunto da un dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali

in accordo con la rivendicazione 1.

Ulteriori forme di realizzazione del dispositivo sono definite nelle rivendicazioni dipendenti 2-19.

Un sistema di elaborazione elettronica comprendente tale dispositivo è definito nella rivendicazione 20.

Ulteriori forme di realizzazione del sistema sono definite nelle rivendicazioni dipendenti 21-28.

Un metodo per la computazione digitale elettronica, realizzato dal dispositivo secondo l'invenzione, è definito nella rivendicazione 29.

Un'ulteriore forma di realizzazione di tale metodo è definita nella rivendicazione dipendente 30.

Un metodo di fabbricazione del dispositivo dell'invenzione è definito nella rivendicazione 31.

Ulteriori forme di realizzazione del metodo di fabbricazione sono definite nelle rivendicazioni dipendenti 32-35.

Un metodo di fabbricazione del sistema dell'invenzione è definito nella rivendicazione 36.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

Ulteriori caratteristiche e vantaggi del dispositivo, del sistema, del metodo di computazione e del metodo di fabbricazione secondo l'invenzione

risulteranno dalla descrizione di seguito riportata di esempi preferiti di realizzazione, dati a titolo indicativo e non limitativo, con riferimento alle annesse figure, in cui:

- la figura 1 illustra una vista in sezione di un dispositivo secondo una forma realizzativa della presente invenzione;
- la figura 2 illustra una vista in sezione di una regione dielettrica compresa nel dispositivo, ed un profilo di campo elettrico, variabile spazialmente, entro tale regione dielettrica;
- le figure 3A e 3B illustrano rispettivamente una vista prospettiva ed una vista dall'alto di una parte di strato molecolare compreso nel dispositivo;
- la figura 4 illustra una vista laterale di una molecola dello strato molecolare;
- le figure 5A e 5B illustrano in modo semplificato una molecola dello strato molecolare;
- la figura 6 illustra una molecola neutra ad alta polarizzabilità, cioè una forma realizzativa di una molecola dello strato molecolare;
- le figure 7A-7C illustrano diagrammi energetici degli stati che possono essere assunti da tali molecole, secondo diversi esempi realizzativi;
- la figura 8 illustra un esempio di polarizzazione

assunta da tre molecole adiacenti;

- le figure da 9 a 13 illustrano viste in sezione di rispettivi esempi realizzativi di parti del dispositivo secondo l'invenzione;

- le figure 14A e 14B raffigurano viste in sezione di ulteriori esempi realizzativi del dispositivo;

- la figura 15 rappresenta diagrammi risultanti da simulazioni del profilo di campo elettrico in dipendenza di un profilo dielettrico del dispositivo;

- la figura 16 illustra una vista in sezione di un dispositivo secondo una ulteriore forma realizzativa della presente invenzione;

- la figura 17 rappresenta una vista dall'alto dello strato molecolare, in cui è evidenziata un'unità funzionale del dispositivo;

- la figura 18 mostra un elemento di uscita di segnale del dispositivo, visto dall'alto;

- la figura 19 rappresenta un diagramma spaziale e temporale dell'evoluzione di un campo elettrico elettrodico, ed il rispettivo effetto sulle molecole dello strato molecolare;

- le figure 20A e 20B illustrano esempi realizzativi di uno strato di dielettrico appartenente alla regione dielettrica del dispositivo;

- la figura 21 rappresenta una vista dall'alto di una

porzione di strato molecolare configurata per realizzare una linea binaria;

- le figure da 22A a 22D rappresentano viste dall'alto di quattro condizioni operative di una porzione di strato molecolare che opera da porta logica universale NAND/NOR, secondo una forma realizzativa dell'invenzione;

- la figura 23 rappresenta uno schema di un esempio realizzativo di un sistema di elaborazione elettronica, secondo la presente invenzione.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA

Con riferimento alla figura 1, viene ora descritto un dispositivo elettronico 1 per la realizzazione di funzioni digitali, secondo una forma di realizzazione preferita dell'invenzione.

Come mostrato nella vista in sezione della figura 1, il dispositivo elettronico comprende: una prima regione elettrodica 2 ed una seconda regione elettrodica 3, separate da una regione di interposizione 4 comprendente una regione dielettrica 40, in cui tali prima 2 e seconda regione elettrodica 3 comprendono rispettivamente almeno un primo elettrodo 20 ed almeno un secondo elettrodo 30, configurati per generare nella regione di interposizione 4 (in particolare, in ogni punto della

regione di interposizione 4) un campo elettrico elettrodico E dipendente da una differenza di potenziale elettrico ΔV ad essi applicata.

In figura 1, tale differenza di potenziale ΔV corrisponde alla differenza tra i potenziali $V+$ e $V-$ applicati da una sorgente 7 (ad esempio, un generatore di tensione 7) rispettivamente al secondo elettrodo 30 ed al primo elettrodo 20.

Si osservi che gli elettrodi 20, 30 sono tipicamente metallici, ma possono essere anche di altri materiali, quali ad esempio il grafene. In ogni caso, ciascuno di tali elettrodi è isopotenziale, ed assume istantaneamente il potenziale ad esso applicato dalla sorgente 7. La differenza di potenziale varia dunque nel tempo così come imposto dalla sorgente 7, e questo determina, in ogni punto della regione di interposizione 4, l'andamento temporale del campo elettrico elettrodico E .

Il dispositivo 1 comprende inoltre, entro la regione di interposizione 4, uno strato molecolare 5 comprendente una pluralità di molecole 50, ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in dipendenza di un campo elettrico avvertito E_1 .

La sopra menzionata regione dielettrica 40

presenta un profilo dielettrico spazialmente variabile, per determinare un rispettivo profilo di campo del campo elettrico elettrodico E e per modulare spazialmente il campo elettrico avvertito E_1 in corrispondenza dello strato molecolare 5.

Il profilo spaziale del campo elettrico elettrodico E dipende dal profilo dielettrico spazialmente variabile della regione dielettrica, secondo le note leggi dell'elettromagnetismo.

Ulteriori dettagli teorico/matematici circa le relazioni tra il profilo dielettrico variabile ed il campo elettrico elettrodico saranno forniti nel seguito di questa descrizione. Viene qui anticipata una illustrazione semplificata di tali relazioni, con riferimento alla figura 2, in cui è raffigurata l'intensità e la direzione del campo elettrico elettrodico E , in alcuni punti della regione dielettrica 40, in un caso in cui il profilo dielettrico spazialmente variabile è ottenuto realizzando la regione dielettrica 40 mediante due strati dielettrici 41, 42, aventi una superficie di contatto 43 (che appare come una linea 43 nella vista in sezione di figura 2) con profilo spazialmente variabile. In tal modo, viene definito per ciascuno strato uno spessore variabile da punto a punto, a

parità di spessore totale della regione dielettrica 40. Inoltre, i due strati dielettrici sono caratterizzati da due rispettive diverse costanti dielettriche, indicate come ϵ_1 ed ϵ_2 .

Si noti che la struttura del dispositivo, secondo l'idea generale dell'invenzione, è sostanzialmente la medesima in ogni altra sezione del dispositivo stesso, sezione perpendicolare, ad esempio, al piano di sviluppo delle regioni elettrodiche e dello strato molecolare; mentre lo specifico andamento del profilo dielettrico variabile può variare da sezione a sezione, in funzione del progetto dello specifico dispositivo da realizzare.

La descrizione sopra riportata ha illustrato come venga definito, in ogni punto della regione di interposizione 4, l'andamento spaziale e temporale del campo elettrico elettrodico E , dipendente direttamente dagli elettrodi.

Con riferimento al campo elettrico avvertito E_1 , si osservi che esso è definito in ogni punto dello strato molecolare 5, e può essere visto come una combinazione del campo elettrico elettrodico E , presente in quel punto, e di un campo elettrico locale, dovuto alle interazioni elettrostatiche tra le molecole, definibile quindi come campo elettrico

di interazione. Da ciò deriva che il campo elettrico avvertito E_1 in ogni punto dello strato molecolare 5 viene modulato spazialmente dal profilo di campo elettrodico E spazialmente variabile, dipendente dal profilo dielettrico spazialmente variabile. In altri termini, il campo elettrico avvertito E_1 in ogni punto dello strato molecolare è a sua volta modulato spazialmente, in un modo voluto, dalla conformazione strutturale della regione dielettrica 40.

Con riferimento alle figure 3A, 3B e 4 si consideri ora lo strato molecolare 5.

Secondo una forma realizzativa (illustrata in modo schematico nella vista prospettica di figura 3A) lo strato molecolare 5 è uno strato molecolare planare, o localmente planare, composto da una pluralità di molecole 50 di uno stesso tipo (ciascuna indicata esemplificativamente in figura 3A come comprendente tre atomi o gruppi atomici 501, 502, 503, tra loro legati), disposte in una griglia 500 sostanzialmente regolare (indicata in figura 3A mediante tratteggio) ed aventi rispetto a tale griglia un orientamento spaziale sostanzialmente uniforme e stabile.

Nella forma realizzativa illustrata in figura 3A, lo strato molecolare 5 è un mono-strato, avente

uno spessore di una singola molecola.

Per strato molecolare planare, o localmente planare, si indica qui il fatto che lo strato si estende principalmente lungo le direzioni indicate come x e y , giacenti su un piano di ancoraggio delle molecole, o substrato, sul quale è definita la griglia. Quindi, la dimensione lungo la dimensione z delle molecole, corrispondente allo "spessore" dello strato, è trascurabile rispetto all'estensione dello strato molecolare nelle direzioni x e y . Al proposito, si osservi che la figura 3A mostra esemplificativamente solo un campione limitato dello strato, che tipicamente, nel dispositivo, si estende molto di più, sul piano x - y .

Per griglia sostanzialmente regolare, si intende qui il fatto che i punti di ancoraggio delle molecole, nei limiti di margini d'errore trascurabili rispetto alla dimensione molecolare, sono disposti in modo regolare, a formare una griglia geometrica. Nell'esempio illustrato in figura 3B (che, si noti, è una vista dall'alto, non in prospettiva), la griglia ha come elemento geometrico di base un parallelogramma (a ciascuno dei cui vertici è ancorata una molecola) avente date dimensioni Δx e Δy , ed un dato angolo di inclinazione α tra i lati.

La griglia 500 è dunque caratterizzata dai parametri di griglia ΔX , ΔY e α .

In altre forme realizzative, l'elemento base della griglia può essere differente, ad esempio un rombo o un quadrato.

L'orientamento spaziale di ciascuna delle molecole rispetto alla griglia può essere definito da un angolo azimutale Φ (evidenziato nella vista dall'alto della fig. 3B), formato dalla proiezione sul piano x-y dell'asse che unisce i due gruppi atomici 501 e 502 e dalla direzione x della griglia; e da un angolo polare θ (mostrato nella vista laterale della fig. 4) definito dal detto asse che unisce i due gruppi atomici 501 e 502 e dalla direzione z perpendicolare al piano x-y.

Il fatto che l'orientamento spaziale delle molecole sia stabile implica che esso non cambia al variare, nello spazio e nel tempo, del campo elettrico avvertito dalle molecole, ed implica inoltre che le molecole sono sostanzialmente indeformabili, anche sotto l'effetto della variazione della loro stessa polarizzazione. Le molecole quindi sono scelte in modo che gli arrangiamenti geometrici dovuti al riposizionamento delle cariche, sotto l'azione del campo elettrico avvertito, non alterino

in maniera rilevante la geometria molecolare.

Con riferimento ora alle figure 5A, 5B e 6 verrà descritta una molecola 50 dello strato molecolare 5 secondo l'invenzione.

Secondo una forma di realizzazione preferita, le molecole 50 dello strato molecolare 5 sono molecole elettricamente bistabili, aventi cariche confinabili in modo controllabile, mediante interazione elettrostatica, in dipendenza del campo elettrico avvertito E1.

Ciascuna molecola è in grado di assumere alternativamente uno stato neutrale e l'uno o l'altro di due stati polarizzati, aventi livelli energetici differenti rispetto a quello dello stato neutrale, in cui ciascuno stato polarizzato presenta una rispettiva polarizzazione delle cariche.

Secondo una notazione in uso in ambito QCA, e qui adottata, la distinzione tra stati polarizzati e stato neutrale è basata sull'effetto che lo stato di una molecola induce su molecole vicine. In particolare, una molecola in uno stato polarizzato è tale da favorire elettrostaticamente l'assunzione, da parte delle molecole vicine, di uno stato a sua volta polarizzato, uguale oppure opposto a quello della molecola stessa. Viceversa, la molecola in stato

neutrale non induce sostanzialmente alcuno sbilanciamento energetico tra gli stati polarizzati delle molecole vicine, non favorendone perciò alcuno. Sia gli stati polarizzati sia quello neutrale sono associati a configurazioni di carica molecolari. Lo stato neutrale, in particolare, può essere associato ad una configurazione con cariche nettamente separate, ma in modo spazialmente simmetrico rispetto alla molecola e alle molecole vicine, oppure ad una configurazione con carica mobile delocalizzata sulla molecola, eliminando così sostanzialmente la polarizzazione e, quindi, l'effetto elettrostatico della molecola sulle vicine.

La capacità di assumere i due stati polarizzati e lo stato neutrale, e di effettuare transizioni tra stati diversi, può avvenire grazie a fenomeni quali il confinamento di carica e l'effetto di tunneling che permette il movimento della carica/cariche in dipendenza di un campo elettrico applicato. Tipicamente, nella presente invenzione, il campo elettrico applicato è il campo elettrico avvertito dalla molecola, E_1 . Tale campo elettrico avvertito E_1 ha una componente verticale E_{1z} (nella direzione z perpendicolare allo strato molecolare) coincidente sostanzialmente con il campo elettrico elettrodotto E

presente in corrispondenza della molecola, ed una componente orizzontale E_{1xy} (giacente su un piano parallelo al piano x-y dello strato molecolare) coincidente sostanzialmente con il campo elettrico dovuto ad interazione elettrostatica molecolare tra molecole vicine (ovvero entro i rispettivi raggi di interazione elettrostatica).

Dal punto di vista della molecola, la capacità di assumere i due stati polarizzati e lo stato neutrale è resa possibile dal fatto che la molecola comprende almeno una carica mobile ed almeno un sito di confinamento per ognuno degli stati che la molecola può assumere: nell'esempio qui considerato, ed illustrato in figura 5A, un primo sito di confinamento 501, corrispondente ad un primo stato polarizzato, ovvero ad uno dei due valori booleani (ad esempio "1"); un secondo sito di confinamento 502, corrispondente ad un secondo stato polarizzato, ovvero all'altro dei due valori booleani (ad esempio "0"); un terzo sito di confinamento 503, corrispondente allo stato neutrale, ovvero all'assenza di un valore booleano definito.

Quindi, considerando ora per semplicità di illustrazione la carica mobile come una particella localizzata 505, quando la carica mobile 505 si trova

presso il primo sito di confinamento 501 (come mostrato in figura 5A) la molecola si trova nello stato polarizzato booleano "1"; quando la carica mobile 505 si trova presso il secondo sito di confinamento 502, la molecola si trova nello stato polarizzato booleano "0",; quando la carica mobile 505 si trova presso il terzo sito di confinamento 503 (come mostrato in figura 5B) la molecola si trova nello stato neutrale. In termini più corretti, la presenza della carica mobile presso un sito di confinamento è un confinamento quantistico presso quel sito; ed il movimento della carica mobile da un sito all'altro è una redistribuzione della carica, ad esempio associato ad una transizione di una carica mobile per effetto tunnel.

Si noti che ogni sito di confinamento può essere costituito da un singolo atomo o da un gruppo di atomi. La molecola può naturalmente comprendere ulteriori atomi o gruppi atomici, non raffigurati, purché non inficino le proprietà sopra illustrate.

Preferibilmente, i siti di confinamento sono in posizioni opposte, all'interno della molecola.

In figura 5A sono illustrati due ulteriori parametri dimensionali della molecola: la distanza L tra i due siti di confinamento 502 e 503, che

corrispondono ai due stati polarizzati (L è tipicamente dell'ordine del nanometro); e la differenza di altezza Δh , nella direzione z , tra il sito di confinamento 503 corrispondente allo stato neutrale e l'altezza media dei siti di confinamento 501 e 502, corrispondenti a stati polarizzati (Δh è tipicamente dell'ordine dei decimi di nanometro oppure dei nanometri).

Si osservi anche che la molecola 50 comprende un ancoraggio 504, ad esempio un legame di ancoraggio in grado di ancorare la molecola ad un substrato planare, consentendo la formazione della griglia precedentemente descritta.

Si noti inoltre che la molecola secondo l'invenzione è complessivamente neutra. In termini più precisi, una molecola secondo l'invenzione è una molecola in cui è possibile ottenere, in maniera controllata e variabile nel tempo, una netta separazione di carica (intesa in senso quantistico), preservando la neutralità complessiva, o per la presenza di una carica mobile bilanciata da una opposta fissa, oppure per la elevata deformabilità degli orbitali, grazie a cui il momento di dipolo può assumere valori significativi e versi opposti in dipendenza dal campo intermolecolare.

Esempi noti di un tale tipo di molecola sono le molecole complessivamente neutre ma ad alta polarizzabilità (quali quelle citate in "*IEEE Trans. Electron Devices* 2003, vol. 50, n. 9, pagg. 1890-1896") in cui, come illustrato emblematicamente in figura 6, il campo elettrico può indurre una separazione netta delle cariche di segno opposto. In figura 6, la carica in senso quantistico è raffigurata mediante le due "nuvole" 506. Se per carica mobile intendiamo convenzionalmente quella negativa (cioè l'elettrone, in termini di particella) la nuvola con segno negativo è riconoscibile come carica mobile 505, e la molecola della figura 6 si trova dunque nello stato polarizzato booleano "1".

Sulla base di quanto sopra, si comprende come si possono realizzare, usando metodi di per sé noti, le molecole che servono nella presente invenzione: cioè come molecole ad elevata polarizzabilità, in una forma realizzativa preferita; oppure, in un'altra forma realizzativa, come molecole neutre caricate artificialmente e dotate nel contempo di una controcarga fissa per mantenere la neutralità, il che si può ottenere ad esempio mediante processi di ossidazione.

Con riferimento alle figure 7A-7C vengono ora

illustrate le caratteristiche energetiche degli stati della molecola.

Si osservi innanzi tutto che, in ognuno degli esempi illustrati, i due stati polarizzati sono quasi iso-energetici, ma non esattamente iso-energetici. Ciò significa che i due stati polarizzati, in una molecola isolata, sono separati da una differenza energetica ΔE , ad esempio di decine o centinaia di meV, che è molto minore rispetto alla differenza tra la loro energia media e l'energia dello stato neutrale (differenza che verrà denotata come ΔU), ed è altresì trascurabile rispetto alla variazione energetica che può essere indotta dall'interazione con le molecole vicine, sebbene sia tale da favorire una separazione netta di carica nella molecola isolata alle temperature di interesse, in particolare a temperatura ambiente. Questa caratteristica è tipicamente presente in modo naturale in una molecola del tipo sopra descritto.

Quindi, in una molecola isolata, i due stati polarizzati comprendono uno stato polarizzato naturale, assunto dalla molecola in assenza di interazioni, ed uno stato polarizzato, ad energia leggermente più elevata, che definiamo "eccitato".

La geometria dello stato molecolare sopra

descritta, con una opportuna scelta dei parametri, permette alle molecole presenti nello strato, dunque non isolate, di interagire tra loro attraverso una normale interazione elettrostatica, in modo che, dato un certo valore di differenza energetica ΔE tra gli stati polarizzati, alcune delle molecole possano trovarsi nello stato naturale ed altre molecole possano trovarsi nello stato eccitato; ed in particolare in modo che, data una molecola, almeno una molecola tra quelle adiacenti possa assumere uno stato di polarizzazione uguale a quello della prima molecola. Tale condizione è illustrata in figura 8, nella quale è raffigurato lo stato di polarizzazione di tre molecole adiacenti (indicando come annerito il relativo sito di confinamento), in una situazione in cui si ha allineamento di polarizzazione tra le molecole 52 e 53, e si ha invece anti-allineamento di polarizzazione tra le molecole 51 e 52.

Più specificamente, le condizioni di polarizzazione delle molecole dello strato dipendono dai parametri geometrici della griglia (ΔX , ΔY e α), dai parametri geometrici della molecola (distanza L tra i siti di confinamento, angoli Φ e θ) e dalla differenza energetica ΔE .

Un aspetto rilevante dell'invenzione è che i

parametri sopra citati offrono sufficienti gradi di libertà per ottenere la configurazione di mutua interazione inter-molecolare desiderata.

A titolo di esempio, si riportano nella seguente Tabella 1 un insieme coerente di valori dei parametri, precedentemente definiti, che consentono di ottenere il comportamento sopra descritto.

ΔX	prima dimensione della griglia	1.4 nm
ΔY	seconda dimensione della griglia	1.2 nm
α	angolo di inclinazione della griglia	90°
Φ	angolo azimutale della molecola	40°
θ	angolo polare della molecola	80°
L	distanza tra siti confinamento in molecola	1.0 nm
Δh	differenza d'altezza intra-molecolare	1.5 nm
ΔE	differenza energetica tra gli stati polarizzati, in molecola isolata	45 meV
ΔU	differenza in valore assoluto tra la "media delle energie degli stati polarizzati" e la "energia stato neutrale", in molecola isolata	130 meV

Tabella 1

Tuttavia, da quanto sopra illustrato, è evidente che le combinazioni di valori dei suddetti parametri che consentono di ottenere il comportamento desiderato (e sono dunque comprese nell'invenzione) sono molto numerose. Gli specifici parametri possono

essere definiti in fase di progetto mediante metodi di simulazione numerica per sé noti (quali il metodo agli elementi finiti).

Inoltre, ciascun parametro può essere compreso in un intervallo, ad esempio nell'intorno dei valori indicati. A titolo di esempio, si considerino intervalli di valori tipici per le variabili ΔU e Δh riscontrabili in molecole utilizzabili nella presente invenzione: ΔU (come definito in tabella 1) compreso in un intervallo tra 40 e 150 meV; Δh (come definito in tabella 1) compreso tra 0.1 nm ed alcuni nm. Le combinazioni opportune delle citate variabili, entro i rispettivi intervalli, vengono poi definite tenendo conto dell'ulteriore condizione secondo cui l'intensità massima del campo elettrico elettrodotto E , che deve essere applicato per generare le transizioni di stato molecolare, risulti dell'ordine di grandezza tra 10^6 e 10^8 V/m, il che è compatibile con l'esigenza di non raggiungere livelli tali da danneggiare il dielettrico della regione dielettrica.

I parametri geometrici ammissibili per la griglia possono essere poi stabiliti in dipendenza del preciso valore assunto, entro gli intervalli indicati, dai parametri geometrici ed energetici della molecola.

La figura 7A illustra una forma di realizzazione in cui lo stato neutrale è caratterizzato da un livello energetico più alto, rispetto a quelli degli stati polarizzati. Ciò implica che la molecola può assumere lo stato neutrale, cioè transitare da uno degli stati polarizzati allo stato neutrale, solo in presenza di un campo elettrico. In particolare, secondo un esempio di tale forma di realizzazione, la molecola può assumere lo stato neutrale solo se l'intensità della componente verticale del campo elettrico E_z avvertito dalla molecola è al di sopra di una certa soglia di intensità E_{thr} . Come già illustrato, la componente verticale del campo elettrico E_z coincide sostanzialmente con il campo elettrico elettrodico E generato dagli elettrodi in corrispondenza della molecola stessa. Ciò implica che, nel dispositivo, la transizione da e verso lo stato neutrale è controllata mediante il campo elettrico elettrodico, come verrà meglio dettagliato nel seguito.

Si osservi che il fatto che il sito di confinamento 503 corrispondente allo stato neutrale si trovi ad un'altezza diversa rispetto all'altezza media dei siti di confinamento 501, 502 corrispondenti agli stati polarizzati (cioè $\Delta h \neq 0$)

consente di minimizzare o azzerare eventuali effetti di secondo ordine della componente orizzontale del campo elettrico avvertito, di origine intermolecolare, sulle transizioni di stato da e verso lo stato neutrale.

La figura 7B illustra una forma di realizzazione alternativa, in cui lo stato neutrale è ad un livello energetico più basso rispetto agli stati polarizzati: in tal caso, il campo elettrico elettrodico viene usato per determinare il passaggio della molecola dallo stato neutrale ad uno degli stati polarizzati, mentre in assenza di campo elettrico la molecola assume lo stato neutrale.

La figura 7C illustra un'ulteriore forma di realizzazione alternativa, in cui i tre stati energetici sono quasi degeneri, cioè hanno livelli energetici molto simili. In tal caso, la molecola assume lo stato neutrale ovvero l'uno o l'altro degli stati polarizzati, in presenza di campo elettrico verticale, e in dipendenza del segno di tale campo.

Sintetizzando in modo di per sé noto un tipo di molecola avente le proprietà sopra indicate, si può ottenere una molecola operante secondo quanto richiesto dall'invenzione. L'invenzione quindi non è limitata all'uso di una particolare molecola.

A puro titolo esemplificativo, molecole aventi proprietà simili a quelle ideali sopra descritte sono quelle (appartenenti alla categoria più ampia denominata dei "bisferroceni") che comprendono due ferroceni legati ad una parte centrale (carbazolo) operante come sito di confinamento neutrale, a sua volta legata ad una catena alifatica operante da ancoraggio (si veda ad esempio l'articolo "*Towards quantum-dot automata units: thiolate-carbazole linked bisferrocenes*" - Nanoscale 2012, 4, 813).

Peraltro, come già notato, ogni tipo di molecola, caratterizzata dalle proprietà sopra descritte in dettaglio, può essere impiegato nello strato molecolare del dispositivo dell'invenzione.

Con riferimento ora alle figure da 9 a 13, si consideri più in dettaglio la struttura del dispositivo 1 secondo l'invenzione.

In una forma di realizzazione preferita (illustrata nelle fig. 1 e 9) il primo ed il secondo elettrodo 20, 30 sono disposti su due piani elettrodici tra loro paralleli; la regione dielettrica 40 si sviluppa tra i due piani elettrodici; lo strato molecolare planare 5 è sostanzialmente parallelo ai piani elettrodici; lo strato molecolare 5 è disposto tra la regione

dielettrica 40 e la prima regione elettrodica 2.

Il dispositivo 1 comprende inoltre una ulteriore regione dielettrica 45 interposta tra lo strato molecolare 5 e la prima regione elettrodica 2.

L'ulteriore regione dielettrica 45 serve a distanziare lo strato molecolare 5 dall'elettrodo 20, per evitare effetti di schermatura elettrostatica del segnale molecolare dovuti all'eccessiva prossimità con l'elettrodo 20, e permettere di modulare spazialmente il campo elettrico elettrodico e dunque il campo elettrico avvertito dallo strato molecolare.

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione del dispositivo, anche l'ulteriore regione dielettrica 45 presenta un rispettivo ulteriore profilo dielettrico spazialmente variabile. In tal caso, il profilo di campo del campo elettrico avvertito in corrispondenza dello strato molecolare 4 dipende sia dal profilo dielettrico della regione dielettrica 40 sia dall'ulteriore profilo dielettrico della ulteriore regione dielettrica 45.

Quindi, secondo diverse forme di realizzazione preferite, lo strato molecolare 5 è interposto tra una regione dielettrica 40 ed una ulteriore regione dielettrica 45, almeno una delle quale presenta un profilo dielettrico variabile.

Secondo una forma realizzativa, illustrata in dettaglio nelle figure 9 e 10, la regione dielettrica 40 a profilo variabile del dispositivo comprende: un primo strato dielettrico 41, caratterizzato da un primo valore di permittività elettrica ϵ_1 , ed avente, rispetto alla direzione z perpendicolare allo strato molecolare 5, un primo spessore dielettrico d1; ed un secondo strato dielettrico 42, sovrapposto al primo strato dielettrico 41, caratterizzato da un secondo valore di permittività elettrica ϵ_2 , diverso dal primo valore di permittività elettrica ϵ_1 , ed avente, rispetto alla direzione z perpendicolare allo strato molecolare 5, un secondo spessore dielettrico d2.

In tale struttura, il primo spessore dielettrico d1 ed il secondo spessore dielettrico d2 sono variabili spazialmente (lungo la direzione x ed in funzione di essa) in modo da definire il profilo dielettrico spazialmente variabile; essi sono dunque indicati nelle fig. 9 e 10 come d1(x) e d2(x), mentre per ogni x è costante lo spessore totale della regione dielettrica $D=d1+d2$.

Si osservi che, in differenti esempi realizzativi dell'invenzione, il numero, il tipo, l'ordine e la conformazione delle regioni dielettriche e degli strati dielettrici possono

essere i più diversi, purché definiscano un profilo dielettrico spazialmente variabile, nel senso precedentemente illustrato. Inoltre, benché la sezione rappresentata sia lungo il piano $x-z$, la variabilità del profilo dielettrico deve intendersi come estesa all'intero piano $x-y$.

Le figure 9-13 illustrano strutture previste in diverse forme realizzative del dispositivo.

La figura 9 illustra il seguente tipo di struttura, dal basso verso l'alto: elettrodo; regione dielettrica con due strati a profilo variabile; strato molecolare; ulteriore regione dielettrica a profilo costante; elettrodo.

La figura 10 illustra il seguente tipo di struttura, dal basso verso l'alto: elettrodo; ulteriore regione dielettrica a profilo costante (che costituisce qui un substrato/supporto per lo strato molecolare); strato molecolare; regione dielettrica con due strati a profilo variabile; elettrodo.

La figura 11 illustra una struttura in cui la regione dielettrica 40 è mono-strato e costituisce un supporto per lo strato molecolare 5, mentre l'ulteriore regione dielettrica 45 è profilata spazialmente, con una cavità 450 nella sua parte superiore, e costituisce un supporto per una regione

elettrodica 2 non planare (comprendente un elettrodo non planare 20 oppure una pluralità di elettrodi).

La figura 12 mostra una struttura in cui entrambe le regioni dielettriche sono mono-strato e profilate spazialmente, in modo che tra esse sia interposto uno strato molecolare 5 non planare. Si osservi che in questa forma di realizzazione la griglia molecolare è dunque non planare, benché resti quasi ovunque localmente planare.

Tipicamente, le regioni dielettriche 40, 45 sono formate di materiale dielettrico solido. Tuttavia, in una forma realizzativa compresa nell'invenzione, una regione dielettrica può essere una regione di ultra-alto vuoto (ultra-high vacuum). Un esempio di tale forma realizzativa è raffigurato in figura 13, in cui si riscontrano, a partire dal basso della figura: il secondo elettrodo 30; una regione di ultra-high vacuum 46, interposta tra il secondo elettrodo 30 e lo strato molecolare 50, il quale è attaccato ad un substrato dielettrico solido 45, che è a sua volta sostenuto da sostegni laterali (non mostrati in figura) e opzionalmente da pilastri dielettrici 47; e quindi, come in altre forme realizzative già illustrate, una regione dielettrica 40 con due strati di dielettrico solido e profilo

spazialmente variabile; ed il primo elettrodo 20.

Vantaggiosamente, la regione di ultra-high vacuum 46 ha proprietà dielettriche eccellenti, in grado di sostenere campi elettrici elevati, azzerando nel contempo le correnti residuali attraverso la pila di dielettrici. Inoltre, in tal caso, lo strato molecolare non necessita di essere "sepolto" entro il dielettrico solido. D'altra parte, la realizzazione di questa struttura può essere più complessa rispetto agli altri esempi realizzativi del dispositivo.

Si consideri ora l'effetto del profilo dielettrico sul campo elettrico percepito dallo strato molecolare.

Una possibile descrizione di tale effetto si basa su una schematizzazione dello strato molecolare 5 come comprendente una pluralità di porzioni di strato molecolare, preferibilmente contigue, ciascuna comprendente almeno una molecola. Si noti che ci si riferisce qui ad una partizione funzionale dello strato molecolare, non ad una partizione fisica (le proprietà fisiche dello strato molecolare, sostanzialmente omogeneo e regolare, sono quelle già precedentemente descritte).

Analogamente, la regione dielettrica comprende una pluralità di porzioni dielettriche corrispondenti

a rispettive porzioni di strato molecolare. Ciascuna porzione dielettrica è lateralmente delimitata da una superficie laterale, sostanzialmente perpendicolare allo strato molecolare, e la cui intersezione con esso coincide con il perimetro della corrispondente porzione di strato molecolare.

Riferendosi ad una struttura descritta come sopra, si può affermare che il campo elettrico avvertito in ognuna delle porzioni di strato molecolare dipende da una costante dielettrica effettiva della corrispondente porzione dielettrica.

La costante dielettrica effettiva della porzione dielettrica, variabile da porzione a porzione, dipende a sua volta dal profilo dielettrico spazialmente variabile della regione dielettrica.

Ad esempio, con riferimento alla struttura del dispositivo 1 mostrata in figura 9, la costante dielettrica effettiva di una porzione dielettrica dipende dal primo valore di permittività elettrica ϵ_1 , dal secondo valore di permittività elettrica ϵ_2 , ed inoltre dal primo spessore dielettrico d_1 e dal secondo spessore dielettrico d_2 , in corrispondenza della porzione dielettrica.

Verrà qui di seguito descritto più in dettaglio l'effetto del profilo dielettrico sul campo elettrico

percepito dallo strato molecolare, con riferimento alla forma realizzativa del dispositivo illustrata in figura 14A. Tale dispositivo è simile a quello della figura 10, a parte il fatto che lo strato molecolare 5 non si trova esattamente sull'interfaccia tra il primo strato dielettrico 41 ed il substrato 45, ma è contenuto nel primo strato dielettrico 41, sia pure in una zona molto prossima al substrato 45. Entrambe le forme realizzative citate sono comprese nell'invenzione.

Il dispositivo 1 in figura 14A prevede un substrato (o ulteriore regione dielettrica) 45 avente uno spessore d_{sub} ed una permittività dielettrica ϵ_{sub} ; un primo strato dielettrico 41 con una permittività dielettrica ϵ_1 , ed avente un profilo, determinato da un primo spessore $d_1(x)$, nella direzione z perpendicolare allo strato molecolare, variabile lungo la direzione x parallela allo strato molecolare; un secondo strato dielettrico 42 con una permittività dielettrica ϵ_2 , ed avente un profilo determinato da un secondo spessore $d_2(x)$, nella detta direzione z , variabile lungo la detta direzione x .

Si osservi che il profilo del secondo strato è complementare a quello del primo strato, nel senso che $d_1(x) + d_2(x) = D$, dove D , per ogni x , è un

valore in questo caso costante, equivalente allo spessore totale della regione dielettrica 40.

Tipicamente, i valori di d_1 e d_2 sono dell'ordine di decine di nanometri, ed il valore complessivo di D può arrivare ad un ordine di grandezza di 100 nm.

Il materiale dielettrico può essere ad esempio SiO_2 , variamente drogato, oppure altri tipi di materiali che verranno citati in seguito, quando sarà descritto il metodo di fabbricazione del dispositivo. Si noti che vengono considerati, qui e nelle formule successive, i valori relativi di permittività dielettrica ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_{sub} , che sono dunque definibili anche come "costanti dielettriche".

La realizzazione di strati così sottili, come sopra indicato, è vantaggiosa per permettere la generazione di un campo elettrico elettrodico sufficientemente grande con differenze di potenziale relativamente basse. Dal punto di vista della robustezza meccanica, tuttavia, tali spessori potrebbero non essere sufficienti. Per questo, in una forma di realizzazione preferita del dispositivo 1, esso è costruito su un ulteriore substrato molto più spesso 48, come mostrato nella figura 14B.

Considerando il dispositivo 1 della figura 14A,

si può descrivere il campo elettrico in corrispondenza di ogni punto dello strato molecolare 5 avente coordinata x , applicando una teoria a parametri concentrati, basata su un'approssimazione dell'effetto del dielettrico come di una capacità planare variabile localmente. In particolare, è possibile considerare con ottima approssimazione ogni sezione bidimensionale x - z del dispositivo (come quella mostrata in fig. 14A) come un sistema a sé stante, in cui ogni punto (e quindi anche i punti in cui si trova lo strato molecolare) è caratterizzato da una propria capacità planare.

Sulla base di tale modello, è possibile ricavare la formula che regola la relazione tra la differenza di potenziale ΔV applicata agli elettrodi e l'intensità del campo elettrico elettrodico E , sperimentato in ogni punto dello strato molecolare avente coordinata x . Utilizzando i parametri della figura 14A, come sopra definiti, tale formula è:

$$E(x,t) = \Delta V(t) \frac{[d_1(x)\epsilon_2\epsilon_{sub} + d_2(x)\epsilon_1\epsilon_{sub} + d_{sub}\epsilon_1\epsilon_2]}{d_1(x)\epsilon_1[d_2(x)\epsilon_{sub} + d_{sub}\epsilon_2]} \quad (1)$$

La formula (1) illustra chiaramente la relazione tra E da ΔV . Coerentemente con quanto già osservato in termini generali, si può notare che l'andamento temporale del campo elettrico elettrodico

E dipende dall'andamento temporale della differenza di potenziale ΔV applicata agli elettrodi; mentre la modulazione spaziale del campo elettrico elettrodico E , nella direzione x , dipende dai valori $d_1(x)$ e $d_2(x)$, cioè può essere precisamente controllata attraverso la modulazione spaziale del profilo dielettrico, dipendente dallo spessore variabile dei due strati dielettrici.

In termini teorici ancora semplificati, ma più generali, si noti che la regione di interposizione può essere modellizzata come un condensatore di capacità C_m (capacità per unità di area dello strato dielettrico contenente lo strato molecolare) ed un condensatore di capacità C_{nm} (capacità per unità di area di tutti gli strati dielettrici, superiori o inferiori, che non contengono lo strato molecolare), posti in serie. Inoltre, la capacità C_m può essere approssimata come ϵ_m/d_m (dove ϵ_m e d_m sono rispettivamente la costante dielettrica e lo spessore dello strato dielettrico contenente lo strato molecolare), mentre la capacità C_{nm} può essere approssimata come ϵ_{nm}/d_{nm} (dove ϵ_{nm} e d_{nm} sono rispettivamente la costante dielettrica effettiva e lo spessore dell'insieme degli strati dielettrici non contenenti lo strato molecolare).

La differenza di potenziale V_m attraverso lo strato dielettrico contenente lo strato molecolare si può quindi esprimere come:

$$V_m = \frac{C_{nm}}{C_{nm} + C_m} \Delta V = \frac{\varepsilon_{nm} d_m}{\varepsilon_{nm} d_m + \varepsilon_m d_{nm}} \Delta V \quad (2)$$

La formula (2) suggerisce alcuni criteri per il progetto del dispositivo.

Affinché resti rilevante l'effetto di dipendenza del campo elettrico elettrodico sullo strato molecolare dalla modulazione spaziale del profilo dielettrico, i valori di capacità C_m e C_{nm} devono essere preferibilmente simili, e comunque non eccessivamente differenti l'uno dall'altro. In tal caso, una simile relazione vale di conseguenza anche tra le differenze di potenziale V_m e $(\Delta V - V_m)$. Si noti che, valendo le relazioni sopra indicate, l'entità del campo elettrico elettrodico in corrispondenza dello strato molecolare (qui indicato come E_m) può essere considerevolmente diversa rispetto a quella del campo elettrico elettrodico presente in altre parti della regione dielettrica E_{nm} , dipendentemente dalla differenza tra le rispettive costanti dielettriche ε_m e ε_{nm} , poiché, assumendo che il campo elettrodico sia sostanzialmente verticale e

approssimando l'interfaccia tra dielettrici come localmente piana ed orizzontale, vale la relazione:

$$\epsilon_m \cdot E_m = \epsilon_{nm} \cdot E_{nm}.$$

Dunque, scegliendo opportunamente le costanti dielettriche, è possibile limitare lo stress dielettrico dovuto ad eventuali campi di intensità elevata, almeno in parte degli strati dielettrici.

A supporto della trattazione teorica semplificata sopra riportata, sono qui illustrati, con riferimento alla figura 15, alcuni risultati più specifici, orientati alla progettazione, derivanti da simulazioni fondate su metodi di computazione ad elementi finiti. Tali simulazioni sono state effettuate su un dispositivo avente parametri quali quelli già riportati in Tabella 1, in cui il valore previsto per ΔU (130 meV) è pari a $5 \cdot k_B \cdot T$ per temperatura ambiente $T=300$ K, e pari a $3,76 \cdot k_B \cdot T_{high}$ per il limite superiore normale di operazione dei circuiti integrati $T_{high} = 125^\circ\text{C}$.

La struttura di massima del dispositivo considerato è quella della figura 14A, ma con un profilo variabile particolare, riportato in dettaglio nel diagramma superiore della figura 15, in cui in ordinata è riportato lo spessore $d_1(x)$ in nm del primo strato dielettrico, al variare di x in ascissa

(compreso tra 0 e 20 nm).

Lo spessore totale D del dielettrico è 110 nm, da cui si ricava che $d_2(x) = 110 - d_1(x)$.

Lo spessore del substrato d_{sub} è di 30 nm. Le costanti dielettriche relative valgono rispettivamente 3.9 per il substrato (valore di SiO_2) e 3 e 50 per gli altri due dielettrici, conformi a valori riportati in letteratura per materiali che verranno citati successivamente.

Nel diagramma inferiore della figura 15 è riportato il risultante profilo di intensità della componente verticale del campo elettrico avvertito ("vertical field profile", corrispondente al campo elettrico elettrodico), che risulta modulato spazialmente in funzione di x .

In termini di valori assoluti, la simulazione ha previsto che il valore di campo elettrico elettrodico necessario per portare tutte le molecole allo stato neutrale è $E_{\text{max}} = 87.3 \text{ MV/m}$ (ottenibile mediante una differenza di potenziale massima $\Delta V_{\text{max}} = 4.975 \text{ V}$); mentre il valore di campo elettrico elettrodico al di sotto del quale tutte le molecole sono in uno stato polarizzato è $E_{\text{min}} = 85.1 \text{ MV/m}$ (ottenibile mediante una differenza di potenziale minima $\Delta V_{\text{min}} = 4.913 \text{ V}$). I valori ottenuti sono

compresi negli intervalli desiderati, come precedentemente indicati.

Con riferimento ora alle regioni elettrodiche, secondo una forma di realizzazione del dispositivo, la prima regione elettrodica può comprendere una pluralità di primi elettrodi, e la seconda regione elettrodica può comprendere una pluralità di secondi elettrodi, in modo da definire una pluralità di coppie di elettrodi, in cui ciascuna coppia di elettrodi è configurata per determinare, in una porzione della regione di interposizione tra essi interposta, un campo elettrico dipendente da una rispettiva differenza di potenziale applicata alla coppia di elettrodi.

In accordo con un'ulteriore forma di realizzazione, la pluralità di primi elettrodi è ricavata su un primo piano di metallizzazione, e la pluralità di secondi elettrodi è ricavata su un secondo piano di metallizzazione.

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione, la prima regione elettrodica comprende almeno un ulteriore piano di metallizzazione, su cui è ricavato almeno uno della pluralità di primi elettrodi.

La figura 16 mostra ad esempio un dispositivo 1 con una seconda regione elettrodica 3 comprendente un

solo elettrodo di riferimento 30 (posto a massa), e con una prima regione elettrodica 2 comprendente tre elettrodi 21, 22, 23 (due tra loro complanari, ed il terzo su un diverso piano), in cui i tre elettrodi sono pilotati da tre diversi potenziali, rispettivamente indicati come V1, V2, V3.

Con riferimento ora alla differenza di potenziale ΔV applicata agli elettrodi, si noti che essa comprende tipicamente una componente in continua (ad esempio, da 0 a qualche decina di Volt) ed una componente variabile nel tempo, secondo un qualsivoglia andamento, avente un'ampiezza picco-picco tipicamente fino ad alcuni Volt, ma talvolta molto inferiori (come riportato nell'esempio numerico citato in precedenza).

Per generare la componente in continua, si può usare una batteria, con eventuali moltiplicatori di tensione (ad esempio, pompe di carica), se necessari per ottenere valori sufficientemente elevati.

Per generare la componente variabile, possono essere usati generatori controllabili di tensione variabile, operanti in un intervallo predefinito di escursione di tensione.

Si considerino ora più in dettaglio gli aspetti funzionali del dispositivo secondo l'invenzione.

Nel dispositivo secondo l'invenzione, l'informazione, cioè il "segnale", è codificata dallo stato di polarizzazione di una molecola o di un gruppo di molecole.

Il flusso dell'informazione da input ad output, e la relativa elaborazione, sono determinati dallo schema (o "pattern") spaziale di variazione del campo elettrico. Inoltre, nel mono-strato molecolare, il tipo di propagazione lungo una particolare direzione dipende in modo decisivo da parametri geometrici ed energetici, quali quelli già riportati nella prima colonna della Tabella 1.

Sono qui definite "molecole caratterizzate" le molecole già polarizzate, che hanno già assunto uno dei due stati polarizzati; come già osservato, le molecole si trovano in questa condizione quando sono in presenza di un campo elettrico elettrodico inferiore ad una certa soglia di intensità E_{thr} .

Sono definite inoltre "molecole non caratterizzate" le molecole che si trovano nello stato neutrale, il che avviene, come già descritto, quando esse sono in presenza di un campo elettrico elettrodico superiore alla soglia di intensità E_{thr} .

Quando, a causa della variazione del campo elettrico elettrodico, le molecole di una porzione

planare dello strato molecolare commutano da "non caratterizzate" a "caratterizzate", lo stato polarizzato, dunque il valore booleano, che ciascuna assume dipende sia dalla geometria dello strato molecolare di quella porzione, sia dallo stato delle molecole già caratterizzate, sia dalla reciproca posizione tra le molecole non caratterizzate e caratterizzate che sono adiacenti.

L'interazione tra molecole adiacenti, nel monostrato, avviene attraverso campi elettrici di interazione (in accordo con il principio generale secondo cui la configurazione complessiva di carica tende sempre alla minima energia). I campi elettrici di interazione, nella geometria considerata, sono prevalentemente orizzontali (cioè aventi una direzione compresa nel piano x-y coincidente o parallelo allo strato molecolare); e sono dunque ben distinti dal campo elettrico elettrodico, verticale, la cui azione è stata sopra descritta.

La figura 17 illustra una forma realizzativa preferita del dispositivo; essa rappresenta una vista dall'alto (non in prospettiva) dello strato molecolare 5 del dispositivo, in cui ciascuna molecola è rappresentata per semplicità come un'ellisse (inclinata ad indicare schematicamente

l'angolo azimutale di inclinazione). Le stesse convenzioni di rappresentazione saranno adottate nelle successive figure 21 e 22A-D.

Le molecole 50 dello strato molecolare 5, illustrato in figura 17, sono raggruppate logicamente a formare unità funzionali 6; ciascuna unità funzionale 6 comprende una porzione planare 60 dello strato molecolare, porzione uniforme formata di molecole dello stesso tipo; inoltre, ciascuna unità funzionale 6 è configurata per realizzare una funzione digitale.

Da questo punto di vista, il dispositivo 1 può quindi corrispondere ad una porta logica o ad una rete di porte logiche comprendente una pluralità di porte logiche tra loro inter-operanti.

La funzione digitale svolta dall'unità funzionale 6 dipende innanzi tutto dall'interazione elettrostatica tra le molecole dell'unità funzionale e dal reciproco orientamento e/o posizionamento delle molecole stesse.

In accordo con una forma di realizzazione, la porzione planare 60 dell'unità funzionale 6 comprende una o più porzioni di ingresso 61, una o più porzioni di elaborazione 63, una o più porzioni di uscita 62.

Ogni porzione di ingresso 61 comprende una o

più molecole di ingresso, sensibili ad uno o più segnali di ingresso. Un segnale di ingresso può essere un campo elettrico di interazione (tipicamente orizzontale, nel piano x-y) generato da altre molecole, ad esempio appartenenti alla porzione di uscita 72 (tratteggiata in figura 17) di un'altra unità funzionale.

Alternativamente, un segnale di ingresso può essere un campo elettrico esterno di ingresso anch'esso tipicamente orizzontale, nel piano x-y. Tale campo è definito esterno, in quanto non generato dallo strato molecolare. A tal proposito, una forma realizzativa del dispositivo prevede che esso comprenda ulteriormente almeno un elemento di ingresso 80, configurato per generare l'uno o più segnali di ingresso, sulla base di un comando esterno di input della porta logica.

In accordo con un esempio realizzativo, illustrato in fig. 16, l'elemento di ingresso 80 comprende almeno una coppia di elettrodi di ingresso 81, 82, disposti sul medesimo substrato planare dello strato molecolare (sul piano x-y), configurati per generare il campo elettrico esterno di ingresso, avente direzione sostanzialmente orizzontale, cioè parallela allo strato molecolare.

Ogni porzione di uscita 62 comprende una o più molecole di uscita, sensibili all'interazione con le molecole della porzione di ingresso oppure all'interazione con le molecole della porzione di elaborazione 63. Le molecole di uscita, a loro volta, sono atte ad influenzare uno o più segnali di uscita dell'unità funzionale, i quali dipendono dai segnali di ingresso e dalle interazioni elettrostatiche tra le molecole dell'unità funzionale.

Un segnale di uscita può essere un campo elettrico di interazione (tipicamente orizzontale, nel piano $x-y$), che influenza lo stato di polarizzazione di molecole di una porzione di ingresso 71 (tratteggiata in figura 17) di un'altra unità funzionale.

Alternativamente, un segnale di uscita può essere un campo elettrico di interazione che viene rilevato e veicolato all'esterno del dispositivo, così come un output di una porta logica tradizionale, interponendo eventualmente un dispositivo elettronico di per sé noto di adattamento dei rispettivi segnali. A tal proposito, una forma realizzativa del dispositivo prevede che esso comprenda ulteriormente almeno un elemento di uscita 90, configurato per rilevare lo stato di polarizzazione delle molecole di

output e generare l'uno o più segnali di uscita.

In accordo con un esempio realizzativo, illustrato in figura 18, l'elemento di uscita è un elettrometro miniaturizzato 90, disposto sul medesimo substrato planare dello strato molecolare 5. Tale elettrometro è sensibile alla polarizzazione della porzione di uscita 62 dell'unità funzionale del dispositivo, e configurato per generare l'uno o più segnali di uscita, ad esempio una differenza di potenziale tra i terminali di uscita 91, 92. In particolare, l'elettrometro 90 può essere sensibile all'orientazione dei dipoli, e dunque alla posizione delle cariche, entro il gruppo di molecole di uscita della porzione di uscita 62. Secondo un particolare esempio, tale elettrometro miniaturizzato può essere un Single Electron Transistor (SET).

Sulla base di quanto sopra, si può osservare che, secondo una forma realizzativa di un'unità funzionale 6 del dispositivo 1, l'uno o più segnali di ingresso ed il campo elettrico elettrodico E, generato dalle regioni elettrodiche, cooperano per determinare lo stato di polarizzazione di ciascuna delle molecole della porzione di ingresso 61; quindi, lo stato di polarizzazione così determinato delle molecole della porzione di ingresso 61 ed il campo

elettrico elettrodico E cooperano per determinare lo stato di polarizzazione di ciascuna delle molecole della porzione di elaborazione 63; quindi, lo stato di polarizzazione così determinato delle molecole della porzione di elaborazione 63 ed il campo elettrico elettrodico E cooperano per determinare lo stato di polarizzazione di ciascuna delle molecole della porzione di uscita 62; infine, lo stato di polarizzazione così ottenuto delle molecole della porzione di uscita 62 determina l'uno o più segnali di uscita dell'unità funzionale 6, a loro volta destinati all'esterno del dispositivo oppure ad un'altra unità funzionale del dispositivo stesso.

Il contributo del campo elettrico elettrodico E è quello di forzare le molecole nello stato neutrale (nei punti in cui l'intensità del campo supera una soglia E_{thr}) o di permettere alle molecole di assumere uno stato polarizzato (nei punti in cui l'intensità del campo è al di sotto della soglia E_{thr}). In altri termini, attraverso il campo elettrico elettrodico E , modulato spazialmente, si può decidere quali molecole dell'unità funzionale siano "caratterizzate" e quali siano "non caratterizzate". Naturalmente, questo vale anche per operazioni di re-impostazione (o "reset") di molecole che in precedenti condizioni operative

erano "caratterizzate", e che devono tornare allo stato di "non caratterizzate" prima di assumere un nuovo stato in una nuova condizione operativa.

Quindi, in questo esempio realizzativo, il cambiamento di stato di una molecola, dall'uno all'altro dei due stati polarizzati, avviene attraverso una transizione da uno stato polarizzato iniziale allo stato neutrale, in dipendenza dal campo elettrodico, e attraverso una ulteriore transizione dallo stato neutrale all'altro stato polarizzato, in dipendenza dal campo di interazione, cioè di interazioni elettrostatiche con altre molecole dell'unità funzionale.

La figura 19 mostra un esempio di evoluzione spazio-temporale della modalità operativa sopra descritta. Per ciascuno di tre istanti t_0 , t_1 , t_2 è raffigurato lo stato di polarizzazione di alcune molecole, linearmente adiacenti lungo l'asse x ; ed è altresì mostrata l'intensità di campo elettrico elettrodico, in corrispondenza di tali molecole, modulato spazialmente nella direzione x . Si ipotizza qui che la modulazione spaziale del profilo dielettrico, in corrispondenza delle molecole 54-59, sia tale che l'intensità del campo elettrico elettrodico E , in ogni dato istante, in

corrispondenza di una data differenza di potenziale ΔV , cresca linearmente da sinistra a destra, nella direzione x . Si consideri poi la situazione in cui si imponga un andamento temporalmente decrescente, a partire da t_0 , alla differenza di potenziale ΔV applicata agli elettrodi. Questo si manifesta, nella figura 19, in uno spostamento verso valori inferiori dell'intera retta che rappresenta l'intensità del campo elettrico elettrodico in funzione dello spazio (in direzione x), man mano che si procede nel tempo dall'istante t_0 a t_1 a t_2 .

All'istante t_0 la molecola 54 assume uno stato polarizzato, ad esempio lo stato naturale (indicato dal sito di confinamento 541 annerito), poiché, in corrispondenza di tale molecola 54, l'intensità del campo elettrico elettrodico è inferiore alla soglia E_{thr} . In corrispondenza delle altre molecole 55-59, l'intensità del campo elettrico elettrodico è invece superiore alla soglia E_{thr} , e quindi le molecole 55-59 sono mantenute da tale campo nel proprio stato neutrale (rappresentato convenzionalmente dai rispettivi siti di confinamento neutrali 553-593 anneriti) e lo stato polarizzato della molecola 54 non può propagarsi alle altre molecole.

All'istante t_1 , il campo elettrico elettrodico

assume un valore inferiore alla soglia E_{thr} anche in corrispondenza della molecola 55, la quale, non essendo più forzata allo stato neutrale, sperimenta una transizione verso uno stato polarizzato (sito di confinamento 551 annerito), a causa della interazione elettrostatica con la molecola 54. Le altre molecole 56-59 restano nello stato neutrale.

Analogamente, all'istante t_2 il campo elettrico elettrodotico assume un valore inferiore alla soglia E_{thr} anche in corrispondenza della molecola 56, la quale, non essendo più forzata allo stato neutrale, sperimenta una transizione verso uno stato polarizzato (sito di confinamento 561 annerito), a causa della interazione elettrostatica con la molecola 55. Le altre molecole 57-59 restano nello stato neutrale.

La spiegazione si può iterare per illustrare il comportamento anche in istanti successivi.

L'esempio sopra descritto mostra come la transizione dello stato delle molecole sia controllato variando nel tempo la differenza di potenziale applicata agli elettrodi del dispositivo, mentre il tipo di evoluzione ottenuta, e dunque l'operazione svolta dall'unità funzionale, può essere pre-impostata attraverso una modulazione spaziale del

campo elettrico elettrodico, il che a sua volta viene ottenuto attraverso una modulazione del profilo dielettrico in corrispondenza dei diversi punti dello strato molecolare.

Quindi, nella presente invenzione, è stabilita una correlazione tra la modulazione spaziale del profilo della regione dielettrica del dispositivo e la funzionalità delle varie parti dello strato molecolare del dispositivo stesso. Ciascuna parte dello strato molecolare, di per sé uniforme, diventa una unità funzionale, avente una specifica funzione, in dipendenza della modulazione spaziale del profilo dielettrico presente (a seconda della forma realizzativa) al di sopra e/o al di sotto di essa.

Per illustrare meglio gli aspetti legati alla "modulazione spaziale del profilo dielettrico", si consideri la particolare forma di realizzazione del dispositivo secondo cui la regione dielettrica è composta da un primo e da un secondo strato dielettrico. Il primo strato dielettrico è inciso in modo controllato, cioè una pluralità di cavità e/o incisioni viene ricavata su una superficie (ad esempio superiore) di tale strato. Forma, dimensioni e posizioni delle cavità sono qualsivoglia, in linea di principio; per ogni specifico caso, esse sono

realizzate secondo un progetto prestabilito per ottenere uno specifico profilo della regione dielettrica, e di conseguenza una specifica funzione della unità funzionale sulla corrispondente porzione di strato molecolare.

Il secondo strato dielettrico presenta una superficie, ad esempio inferiore, esattamente corrispondente e complementare alla superficie superiore del primo strato dielettrico, in modo che, quando i due strati dielettrici sono sovrapposti, a stretto contatto l'un con l'altro, il secondo strato dielettrico riempia tutte le cavità e/o incisioni del primo strato dielettrico, e presenti sull'altro lato una superficie piana, operante ad esempio da supporto per lo strato molecolare.

La forma realizzativa sopra descritta determina dispositivi che, visti in sezione, possono corrispondere ad esempio alle figure 1, 9-14, 16.

Esempi di porzioni di primo strato dielettrico secondo una tale forma realizzativa sono illustrati nelle figure 20A e 20B.

La porzione di primo strato dielettrico 41 mostrata in figura 20A presenta una cavità 410 formata da una incisione avente dimensioni controllate, ed in particolare una profondità

variabile secondo una pendenza costante lungo una direzione evidenziata mediante linea tratteggiata. Tale porzione di strato dielettrico 41, vista in sezione, porta ad un profilo dielettrico linearmente variabile quale quello illustrato ad esempio dal diagramma superiore della figura 15.

La porzione di primo strato dielettrico 41 mostrata in figura 20B presenta una cavità più complessa, realizzata mediante una pluralità di incisioni: una prima incisione 413 (centrale, nella figura) avente profondità costante, con un primo valore di profondità, in modo da generare una porzione di cavità con fondo piatto, di forma ad esempio rettangolare; una seconda incisione 412, confinante con la prima incisione 413 in corrispondenza di un tratto di perimetro 4120 del detto fondo rettangolare della prima incisione, sviluppantesi in direzione trasversale rispetto alla prima incisione, ed avente profondità variabile, con una pendenza costante, dal detto primo valore di profondità sino ad un secondo valore di profondità minore del primo valore di profondità; una coppia di terze incisioni 411, confinanti con la prima incisione 413 in rispettivi tratti 4110 di un lato del fondo rettangolare opposto al lato da cui si

diparte la seconda incisione 412; ciascuna delle terze incisioni 411 si sviluppa in una direzione trasversale rispetto alla prima incisione 413, sul lato opposto di questa rispetto alla seconda incisione 412; inoltre, ciascuna delle terze incisioni 411 presenta una profondità variabile secondo una ulteriore pendenza costante, dal detto primo valore di profondità sino ad un rispettivo terzo valore di profondità, maggiore del primo valore di profondità.

Si osservi che, combinando un primo dielettrico 41 avente caratteristiche geometriche analoghe a quelle della figura 20B, ed un secondo dielettrico 42, avente una superficie inferiore complementare alla superficie superiore incisa del primo dielettrico, si ottiene una regione dielettrica 40 in grado di definire, su uno strato molecolare posto sopra o sotto di essa, una unità funzionale quale quella descritta in figura 17, laddove le terze incisioni 411 sono in corrispondenza delle porzioni di ingresso 61, la prima incisione 413 è in corrispondenza della porzione di elaborazione 63, la seconda incisione 412 è in corrispondenza della porzione di uscita 62.

Tenendo presente tale corrispondenza, nella

figura 20B si può individuare una direzione input-output, lungo la quale la pendenza delle incisioni risulta quindi "in salita" nel primo tratto (terze incisioni 411 "di ingresso"), poi "piatta" nella parte centrale (prima incisione 413 "di elaborazione"), infine ancora "in salita" nell'ultimo tratto (seconda incisione 412 "di uscita").

Con riferimento ora alle funzioni realizzabili dal dispositivo sopra descritto, esse riguardano tutte le principali categorie di operazioni digitali di un segnale: memorizzazione, propagazione lungo una direzione ed elaborazione di uno o più input per ottenere un output.

In modo corrispondente, le unità funzionali del dispositivo, sopra descritte, sono in grado di svolgere una pluralità di funzioni logiche, tra cui, ad esempio e non limitativamente, una o una combinazione di funzioni del seguente gruppo: cella di memoria, linea binaria, porta logica NOT o inverter, porta logica AND, porta logica OR, porta logica NAND, porta logica NOR.

Come già descritto, la realizzazione dell'una o dell'altra funzione dipende da una scelta degli schemi di variazione spazio-temporale del campo elettrico applicato al dispositivo (cioè il campo

elettrico elettrodico).

La funzione come cella di memoria, atta ad immagazzinare un valore "0" o "1", è ovvia, se si associa ogni valore logico ad un rispettivo dei due stati di polarizzazione di ogni molecola.

La funzione come linea binaria, atta a trasferire in modo controllato un valore logico su celle (o molecole, o gruppi di molecole, adiacenti) si ottiene pilotando opportunamente la differenza di potenziale applicata agli elettrodi in dispositivi che, visti in sezione, presentano una regione dielettrica avente un confine variabile linearmente, con una pendenza, costante o variabile in maniera predefinita. Ciò corrisponde a dispositivi in cui il primo strato dielettrico è inciso come già illustrato con riferimento alla figura 20A. L'evoluzione spazio-temporale del campo elettrico elettrodico e della polarizzazione delle molecole, in tal caso, è quella già esemplificata con riferimento alla figura 19.

Partendo poi da una linea binaria come quella sopra descritta, avendo impostato opportunamente l'orientamento reciproco tra le molecole di un certo gruppo, e determinando opportunamente il campo elettrodico, come sopra illustrato, si può far sì che lo stato di polarizzazione di una serie di molecole

adiacenti cambi periodicamente nello spazio, come mostrato in figura 21. Lo strato molecolare 5 della figura 21 è caratterizzato dai parametri riportati in Tabella 1, ad eccezione della differenza energetica tra gli stati polarizzati, che è qui stabilita in 15 meV (si osservi che peraltro è ben possibile ottenere una linea binaria con le proprietà qui descritte anche in uno strato molecolare con ΔE uguale a quello della tabella 1, variando altri parametri geometrici della griglia). La geometria del dielettrico sottostante presenta un profilo linearmente variabile lungo la direzione x , che è anche la direzione di propagazione dell'informazione. Lo strato molecolare 5 presenta una porzione di ingresso, denotata con 71, formata da molecole su cui viene imposto uno stato di polarizzazione, corrispondente ad uno stato booleano (ad esempio "0" - convenzionalmente indicato in bianco). Lo strato molecolare 5 comprende inoltre una porzione di trasporto di segnale (o linea binaria) 73. La propagazione del segnale nella linea binaria, lungo la direzione x , da sinistra a destra, si sviluppa come già illustrato in figura 19. In questo caso, tuttavia, la pendenza del profilo dielettrico e l'interazione delle molecole sono tali da determinare periodicamente un allineamento ed un anti-

allineamento della polarizzazione. Di conseguenza, dopo che la diminuzione del campo elettrico elettrodico consente alle molecole di uscire dallo stato neutrale, le porzioni 721 della linea binaria presentano molecole con polarizzazione allineata (stato booleano "0") a quella della porzione di ingresso, mentre le porzioni 722 della linea binaria presentano molecole (annerite in figura) con polarizzazione anti-allineata (stato booleano "1").

Ciò consente dunque, sulla base dello stesso principio, di trasportare lungo lo strato molecolare, e di rendere disponibili in posizioni note, sia un valore logico che il suo negato.

Disponendo ad esempio le porzioni di uscita, sullo strato molecolare, in adiacenza alle porzioni di anti-allineamento 722 si può ottenere una funzione di inverter.

Per quanto riguarda le funzioni di porta logica, viene qui illustrata esemplificativamente una porta logica universale NAND e/o NOR.

Si consideri una unità funzionale quale quella descritta in figura 17, ricavata su uno strato molecolare caratterizzato da parametri quali quelli riportati in Tabella 1. Il profilo dielettrico è determinato da un primo profilo dielettrico inciso

come mostrato in figura 20B, e la relazione tra profilo dielettrico e porzioni di unità funzionale è quella che è stata già illustrata durante la descrizione della figura 20B.

Il fatto che la porzione di elaborazione 63 corrisponda ad una zona in cui il profilo dielettrico è piatto (prima incisione 413) implica che tutte le molecole di questa zona si rilassino contemporaneamente, uscendo dallo stato neutrale, quando il campo elettrico elettrodico scende sotto la soglia E_{thr} .

Lo stato di polarizzazione in cui ciascuna molecola si stabilizza dipende dalle caratteristiche dello strato molecolare, ma anche da condizioni al contorno, che comprendono il valore dei segnali elettrostatici delle porzioni di ingresso, la collocazione dei confini tra le porzioni di ingresso e la porzione di elaborazione, la forma e le dimensioni della porzione di elaborazione, e l'orientamento geometrico della porzione di elaborazione (dipendente dalle caratteristiche geometriche della corrispondente incisione/cavità nel primo strato dielettrico) rispetto all'orientamento delle molecole.

Le figure da 22A a 22D illustrano in forma

schematica i risultati delle simulazioni ottenute per le diverse possibili combinazioni di input. In tutte le figure, convenzionalmente, sono indicate in nero le molecole che presentano il primo stato di polarizzazione (naturale) ed in bianco le molecole che presentano il secondo stato di polarizzazione (eccitato).

Nell'evoluzione temporale del funzionamento della porta logica, si polarizzano prima le molecole delle porzioni di ingresso, in dipendenza dei segnali di ingresso; poi si polarizzano, contemporaneamente, le molecole della porzione di elaborazione; quindi, si polarizzano le molecole della porzione di uscita, in dipendenza del pattern di polarizzazione che è risultato nella porzione di elaborazione.

Nella figura 22A, è illustrata la situazione in cui alle molecole di entrambe le porzioni di ingresso è imposto lo stato di polarizzazione naturale. La parte centrale della porzione di elaborazione si pone in anti-allineamento rispetto alla polarizzazione di ingresso, e determina una polarizzazione contraria (stato polarizzato eccitato) nelle molecole della porzione di uscita.

Nella figura 22B, è illustrata la situazione in cui alle molecole di entrambe le porzioni di ingresso

è imposto lo stato di polarizzazione eccitato. La parte centrale della porzione di elaborazione si pone in anti-allineamento rispetto alla polarizzazione di ingresso, e determina una polarizzazione contraria (dunque lo stato di polarizzazione naturale) nelle molecole della porzione di uscita.

Nelle figure 22C e 22D, sono illustrate la situazioni in cui alle molecole di una porzione di ingresso è imposto lo stato di polarizzazione naturale, mentre alle molecole dell'altra porzione di ingresso è imposto lo stato di polarizzazione eccitato. Le molecole della parte centrale della porzione di elaborazione, interagendo in questo caso con porzioni adiacenti aventi polarizzazione diversa, si rilassano sullo stato di polarizzazione naturale, e determinano anche nelle molecole della porzione di uscita lo stato di polarizzazione naturale.

Nella tabella 2 viene riportata la "tabella della verità" che descrive il comportamento della porta logica sopra illustrata.

PRIMO INPUT	SECONDO INPUT	OUTPUT
NERO	NERO	BIANCO
BIANCO	BIANCO	NERO
BIANCO	NERO	NERO
NERO	BIANCO	NERO

Tabella 2

Si osservi che il comportamento dell'unità funzionale sopra descritta è quello di una porta logica universale, poiché corrisponde alla funzione NAND o alla funzione NOR a seconda del significato booleano attribuito allo stato naturale (1 o 0).

Inoltre, su uno stesso strato molecolare, si possono realizzare una pluralità di porte logiche universali e di linee di trasporto o inverter quali quelle precedentemente descritte.

È addirittura possibile realizzare funzioni diverse, sullo stesso strato molecolare del dispositivo, sulla base della stessa struttura, creando reti logiche con più porte logiche, semplicemente codificando nell'uno o nell'altro modo i segnali booleani, e tenendo conto di ciò, in fase di progetto, per armonizzare tra loro (ad esempio mediante degli inverter) segnali provenienti da zone dello strato in cui sono usate codifiche diverse.

Naturalmente, è possibile realizzare una porta logica AND e una porta logica OR, mediante un inverter associato ad una porta NAND e NOR, rispettivamente.

La descrizione sopra riportata ha messo in luce come la funzione svolta dall'unità funzionale (il

trasporto di segnali binari, eventualmente con inversione periodica, o l'elaborazione di uno o più segnali di input per ricavare un segnale di output) dipende sia da parametri energetici e geometrici (orientamento e posizionamento reciproco) delle molecole dello strato molecolare, sia da parametri geometrici della regione dielettrica (ad esempio, direzione e pendenza dei profili incisi nel dielettrico, dimensione e orientamento delle cavità), sia dalla opportuna coordinazione degli uni e degli altri. Tale coordinazione tra i parametri geometrici dello strato molecolare e i parametri geometrici della regione dielettrica viene definita in fase di progetto, secondo le indicazioni dettagliate che sono state precedentemente illustrate.

Si osservi poi che, secondo una particolare forma di realizzazione del dispositivo, la prima e la seconda regione elettrodica sono configurate per fornire un segnale di orologio e/o sincronizzazione alle unità funzionali.

D'altra parte, come già osservato, la prima e la seconda regione elettrodica sono configurate per fornire un segnale di neutralizzazione, diretto ad una o più molecole dello strato molecolare, per controllarne la transizione da o verso lo stato

neutrale. Quindi, secondo una forma di realizzazione del dispositivo, i citati segnale di orologio e segnale di neutralizzazione sono lo stesso segnale, impartito dalla differenza di potenziale applicata agli elettrodi, tale da generare un campo elettrodico, a sua volta modulato dal profilo variabile del dielettrico.

Secondo una ulteriore forma di realizzazione, la prima e la seconda regione elettrodica sono ulteriormente configurate per fornire uno o più ulteriori segnali di ingresso delle unità funzionali. In tal caso, gli elettrodi della regione elettrodica cooperano o sostituiscono gli elettrodi di ingresso complanari con lo strato molecolare.

Con riferimento alla figura 23, viene ora descritto un sistema di elaborazione elettronica secondo la presente invenzione.

Il sistema di elaborazione 100 comprende almeno un dispositivo elettronico 1 per la realizzazione di funzioni digitali, secondo una qualsiasi delle forme realizzative precedentemente descritte. Per semplicità, il dispositivo elettronico 1 è rappresentato mediante uno schema funzionale, nel caso in cui esso comprende due reti logiche 10, 11, ciascuna delle quali è realizzata mediante una o più

unità funzionali quali quelle precedentemente descritte, un solo elemento di ingresso 80 del dispositivo, collegato alla prima rete logica 10, ed un solo elemento di uscita 90 del dispositivo, collegato alla seconda rete logica 11. La prima rete logica 10 dispone anche di un proprio elemento di uscita 95; la seconda rete logica 11 dispone anche di un proprio elemento di ingresso 85. Tale schema può essere generalizzato, in modo ovvio, a forme realizzative che prevedono nel dispositivo un qualsivoglia numero di elementi di ingresso, di elementi di uscita e di reti logiche.

Come mostrato in figura 23, il sistema di elaborazione 100 comprende inoltre una circuiteria addizionale 101 di controllo e di generazione ed elaborazione di segnali.

Secondo una forma realizzativa preferita, il dispositivo elettronico 1 per la realizzazione di funzioni digitali e la circuiteria addizionale 101 sono integrati in forma di circuito integrato contenuto in un rispettivo package.

La circuiteria addizionale 101 può comprendere un generatore di tensione 7, collegato mediante primi mezzi di collegamento 111 al dispositivo 1 (in particolare, agli elettrodi del dispositivo, non

mostrati in fig. 23) e configurato per generare la differenza di potenziale ΔV tra tali elettrodi.

In un ulteriore esempio realizzativo, la circuiteria addizionale 101 comprende una pluralità di generatori di tensione, collegati mediante una pluralità di primi mezzi di collegamento ad una rispettiva pluralità di coppie di elettrodi della regione elettrodica del dispositivo, e configurati per generare rispettive differenze di potenziale tra ciascuna coppia della pluralità di coppie di elettrodi. Ciascuna delle citate differenze di potenziale è continua o variabile nel tempo.

Inoltre, la circuiteria addizionale 101 comprende almeno un modulo di ingresso 102, collegato, mediante secondi mezzi di collegamento 112, all'almeno un elemento di ingresso 80 del dispositivo 1, per fornire il rispettivo almeno un segnale di ingresso.

La circuiteria addizionale comprende poi almeno un modulo di uscita 103, collegato, mediante terzi mezzi di collegamento 113, all'almeno un elemento di uscita 90 del dispositivo 1, per ricevere ed elaborare il rispettivo almeno un segnale di uscita.

Secondo un esempio realizzativo, il modulo di uscita 103 comprende un modulo di calibrazione,

configurato per calibrare la relazione di dipendenza tra la polarizzazione delle molecole di uscita ed il segnale d'uscita generato dall'elemento di uscita del dispositivo; ed un amplificatore di tensione, per amplificare il segnale d'uscita.

In accordo con ulteriori esempi realizzativi, la circuiteria addizionale può comprendere un modulo di controllo o processore 104, collegato al dispositivo 1 mediante quarti mezzi di collegamento 114; e un modulo di controllo della temperatura 105, collegato al dispositivo 1 mediante quinti mezzi di collegamento 115.

Secondo una forma realizzativa, la circuiteria addizionale 101 comprende vantaggiosamente sesti mezzi di collegamento 116 tra l'elemento di uscita 95 della prima rete logica 10 l'elemento di ingresso 85 della seconda rete logica 11, consentendo di realizzare funzioni complesse mediante cooperazione di diverse reti logiche e/o unità funzionali dello stesso dispositivo. Si osservi, al proposito, che il collegamento tra più reti logiche realizzate nello stesso dispositivo, ciascuna composta di una o più porte logiche, a seconda dei casi e della convenienza, può avvenire esternamente al dispositivo, mediante i sesti mezzi di collegamento

116; oppure mediante linee binarie di trasporto del segnale all'interno del dispositivo stesso.

In accordo con una forma di realizzazione, i citati primi, secondi, terzi, quarti, quinti e sesti mezzi di collegamento sono realizzati mediante metallizzazioni, disposte su uno o più livelli di metallizzazione del sistema.

Dalla precedente descrizione del dispositivo, si deduce anche il metodo per la computazione elettronica, secondo la presente invenzione.

Tale metodo comprende le fasi di: prevedere un dispositivo elettronico 1 comprendente una prima regione elettrodica 2 ed una seconda regione elettrodica 3, separate da una regione di interposizione 4 comprendente una regione dielettrica 40 avente un profilo dielettrico spazialmente variabile, in cui la prima 2 e la seconda regione elettrodica 3 comprendono rispettivamente almeno un primo elettrodo 20 ed almeno un secondo elettrodo 30; prevedere ulteriormente, entro la regione di interposizione 4 del dispositivo 1, uno strato molecolare 5 comprendente una pluralità di molecole 50, ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in dipendenza di un campo elettrico avvertito E_1 ;

quindi, applicare una differenza di potenziale ΔV tra il primo 20 ed il secondo elettrodo 30, per generare un campo elettrico elettrodico E nella regione di interposizione 4; di conseguenza, influenzare lo stato delle molecole 50 dello strato molecolare 5 mediante una modulazione spaziale del campo elettrico presente in corrispondenza dello strato molecolare, in cui la modulazione spaziale dipende da un profilo di campo spazialmente variabile determinato dal profilo dielettrico spazialmente variabile della regione dielettrica 40.

Secondo un esempio realizzativo del metodo, la differenza di potenziale ΔV applicata tra il primo 20 e secondo elettrodo 30 varia nel tempo, in modo da determinare una variazione temporale del campo elettrico E generato nella regione dielettrica 40 e del campo elettrico avvertito E1 in corrispondenza dello strato molecolare 5.

In accordo con un ulteriore esempio realizzativo, il metodo comprende inoltre le fasi di: prevedere una pluralità di coppie di elettrodi, in cui ciascuna coppia è formata da due elettrodi appartenenti rispettivamente alla prima 2 ed alla seconda regione elettrodica 3, e applicare a ciascuna coppia di elettrodi una rispettiva differenza di

potenziale, costante nel tempo oppure variabile nel tempo, secondo un rispettivo andamento temporale.

Nel seguito, verrà descritto un metodo di fabbricazione di un dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali, pure compreso nell'invenzione. Tale metodo di fabbricazione comprende le fasi di: depositare una regione elettrodica, comprendente uno o più elettrodi metallici; quindi, depositare una regione di materiale dielettrico sopra la regione elettrodica; poi, depositare, su una superficie superiore della regione di materiale dielettrico, in prime posizioni prestabilite, uno o più elementi di ingresso, ciascuno comprendente una coppia di elettrodi di ingresso; successivamente, depositare, sulla superficie superiore della regione di materiale dielettrico, in seconde posizioni prestabilite, uno o più elementi di uscita, ciascuno comprendente un elettrometro; depositare inoltre, sulla superficie superiore della regione di materiale dielettrico, su una zona prestabilita in dipendenza delle sopra citate prime e seconde posizioni prestabilite, uno strato molecolare comprendente una pluralità di molecole, ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in

dipendenza di un campo elettrico avvertito; quindi, depositare una ulteriore regione di materiale dielettrico al di sopra dei già depositati strato molecolare, almeno un elemento di ingresso, e almeno un elemento di uscita; infine, depositare una ulteriore regione elettrodica, comprendente uno o più elettrodi metallici, al di sopra della ulteriore regione di materiale dielettrico. In tale metodo, inoltre, almeno una delle citate fasi di depositare una regione di materiale dielettrico e depositare una ulteriore regione di materiale dielettrico comprende il determinare un profilo dielettrico spazialmente variabile, in almeno una tra le rispettive regione dielettrica ed ulteriore regione dielettrica.

Secondo una particolare forma realizzativa del metodo, la fase di depositare una regione dielettrica comprende: depositare almeno un primo strato dielettrico, con un primo valore di permittività dielettrica ed avente un profilo spaziale variabile in modo controllato; poi, depositare almeno un secondo strato dielettrico con un secondo valore di permittività dielettrica e sovrapposto al primo strato dielettrico, in modo da ottenere nella regione di materiale dielettrico un profilo dielettrico spazialmente variabile.

Secondo una particolare forma realizzativa del metodo, la fase di depositare una regione di materiale dielettrico comprende: dopo aver depositato il primo strato dielettrico, incidere il primo strato dielettrico per ottenere incisioni e/o cavità di forma, dimensioni e posizione prestabilite, così da determinare il profilo spaziale, variabile in modo controllato, del primo strato dielettrico.

Secondo ulteriori esempi di realizzazione del metodo, il primo strato dielettrico è composto da un primo materiale polimerico, o polimerico-ceramico, e la fase di incidere il dielettrico è realizzata secondo una delle seguenti tecniche:

- soft lithography;
- incisione con punte nanometriche riscaldate e movimentate.

Tra i materiali possibili per il primo strato dielettrico, vi sono le termoplastiche note come poliarileterchetoni, caratterizzate da una buona resistenza alla temperatura.

Un altro esempio è costituito dal bis-benzociclobutene silossano (come citato ad esempio in *Appl. Phys. Lett.* 2004, vol. 84, n. 17, pagg. 3400-3402), che possiede ottime caratteristiche di stabilità termica e dielettrica.

Secondo una particolare forma realizzativa del metodo, il secondo strato dielettrico è composto da un secondo materiale polimerico, o polimerico-ceramico, avente una temperatura di reticolazione (laddove la "reticolazione" è anche detta formazione di cross-legami, o indurimento, o vulcanizzazione, o "curing") inferiore alla temperatura di fusione del primo materiale polimerico.

Le condizioni di reticolazione per il secondo materiale polimerico, in termini di temperatura utilizzata e tempo, tengono conto del fatto che, generalmente, il primo materiale, quando sia polimerico, può subire già a temperature inferiori a quella di fusione un aumento di viscosità (transizione vetrosa) che, pur non rappresentando una transizione di stato vera e propria, può portare a modifiche dei profili precedentemente incisi. Tenendo conto di ciò, per la reticolazione del secondo materiale sono preferiti processi di durata più lunga e temperature più basse. Qualora si sia verificato sperimentalmente che la reticolazione del secondo materiale modifichi comunque, almeno parzialmente, la superficie incisa del primo materiale, è possibile compensare anticipatamente tali modifiche, tenendone conto nella predisposizione del primo strato, ad

esempio producendo incisioni più profonde e/o di profilo parzialmente differente rispetto al risultato finale voluto (che risulterà successivamente, dopo la reticolazione del secondo materiale).

Un esempio di secondo materiale polimerico, per il secondo strato dielettrico, è il benzo-ciclobutene, in cui siano state disperse nanoparticelle di titanato di bario (come descritto ad esempio in *IEEE 2007 Electronic Components and Technology Conference*, pagg. 453-457).

La fase di depositare una regione di materiale dielettrico comprende inoltre: depositare, al di sopra ed in contatto con la superficie incisa del primo strato dielettrico, il secondo materiale polimerico in stato liquido; operare una reticolazione del secondo materiale polimerico alla rispettiva temperatura di reticolazione, per ottenere il secondo strato dielettrico.

Secondo un esempio realizzativo, la fase di depositare una regione di materiale dielettrico è realizzata mediante tecniche di "sputtering" (o spruzzamento).

In una possibile realizzazione, lo strato dielettrico inciso - polimerico oppure no - è inciso con la tecnica ablativa denominata Fascio Ionico

Focalizzato (cioè "Focused Ion Beam").

In accordo con una forma realizzativa del metodo, lo strato molecolare è un mono-strato molecolare planare, composto di molecole di uno stesso tipo, disposte in una griglia sostanzialmente regolare, aventi rispetto a tale griglia un orientamento spaziale sostanzialmente uniforme e stabile. La fase di depositare uno strato molecolare comprende: depositare il mono-strato molecolare attraverso immobilizzazione molecolare in ambiente liquido o secco, mediante tecniche "self-assembling".

Qualora il substrato scelto per la immobilizzazione non presenti di per sé caratteristiche convenienti per la deposizione delle molecole secondo la geometria cercata, è possibile depositare (ad esempio, tramite le summenzionate tecniche di "self-assembling"), prima dello strato molecolare con funzioni di computazione, uno o più strati molecolari intermedi, atti a creare una griglia di geometria adatta di siti reattivi, per la successiva immobilizzazione delle molecole. Sono altresì utilizzabili tecniche di assemblaggio di mono-strati ibridi o misti, comprendenti cioè, oltre alle unità molecolari per la computazione, altre molecole intercalate regolarmente alla prime, e atte

a distanziarle ed influenzarne vantaggiosamente l'orientamento.

Secondo un esempio realizzativo ulteriore, la fase di depositare uno strato molecolare comprende inoltre: indurre l'orientamento spaziale desiderato delle molecole del mono-strato molecolare, mediante applicazione di campi elettrici di controllo di orientazione.

In accordo con una forma realizzativa del metodo, la fase di depositare una ulteriore regione di materiale dielettrico comprende: depositare un ulteriore strato di materiale polimerico avente una temperatura di reticolazione inferiore ad una temperatura di danneggiamento dello strato molecolare; operare una reticolazione dell'ulteriore strato di materiale polimerico alla propria temperatura di reticolazione.

Nel caso del bis-benzo-ciclobutene silossano (citato come esempio di materiale per il primo strato dielettrico), condizioni adatte alla reticolazione sono ad esempio temperature comprese tra 230 e 290°C per tempi variabili tra pochi secondi e 12 minuti; il materiale reticolato ha temperatura di transizione vetrosa superiore a 250°C. Utilizzando il benzo-ciclobutene con dispersione di particelle di titanato

di bario come secondo materiale per il secondo strato dielettrico, la reticolazione avviene anche a temperature inferiori a 250°C con tempi dell'ordine di alcune ore.

In tali esempi, la costante dielettrica relativa del primo materiale è compresa tra 2 e 3; la costante dielettrica relativa del secondo materiale è superiore a 50. Entrambi i materiali resistono a campi dell'ordine di 300 MV/m , valore compatibile con quanto richiesto per le molecole.

Si osservi che, vantaggiosamente, gli strati di materiale dielettrico depositati successivamente, e sovrapposti ad altri strati di materiale dielettrico, presentano temperature di reticolazione via via decrescenti.

È infine compreso nell'invenzione un metodo di fabbricazione di un sistema di elaborazione elettronica integrato. Tale metodo comprende le fasi di: fabbricare un dispositivo secondo un metodo di fabbricazione in accordo con quanto descritto in precedenza; quindi, fabbricare una circuiteria integrata addizionale di controllo e di generazione ed elaborazione di segnali; poi, connettere il dispositivo e la circuiteria integrata addizionale, in modo da formare un unico circuito integrato;

infine, disporre il circuito integrato in un package per circuiti integrati.

Secondo un esempio realizzativo, la fase di fabbricare una circuiteria integrata comprende depositare uno o più strati di metallizzazione, e la fase di connettere comprende collegare mediante collegamenti metallici tali uno o più strati di metallizzazione della circuiteria integrata a regioni elettrodiche o elettrodi di ingresso o elettrometri presenti nel dispositivo.

Come si può constatare, lo scopo della presente invenzione è raggiunto dal dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali, nonché dal metodo di fabbricazione di tale dispositivo, dal sistema impiegante il dispositivo e dal metodo di computazione svolto dal dispositivo, precedentemente descritti, in virtù delle proprie caratteristiche.

Infatti, gli elementi funzionali del dispositivo, ed il relativo metodo computazionale, operano sulla base di principi fisici anche quantistici, su nano-scala, e tenendo conto, anzi traendo vantaggio, delle naturali caratteristiche di non perfetta simmetria delle molecole, su tale scala.

Inoltre, la struttura funzionale basilare del dispositivo è uno strato molecolare non plasmato da

tecniche litografiche, dal momento che la funzionalità degli elementi funzionali costituiti da una o più molecole dello strato è determinata e differenziata da un profilo della regione dielettrica adiacente allo strato molecolare. Questo aspetto, peculiare dell'invenzione, fa sì che il dispositivo dell'invenzione possa realizzare reti logiche complesse, e diventare il cuore nano-elettronico di un processore elettronico complesso ad alte prestazioni, predisponendo la profilatura della regione dielettrica.

Inoltre, la profilatura del dielettrico può caratterizzare la funzionalità dello strato molecolare sulle due dimensioni su cui esso si sviluppa, fornendo notevole e vantaggiosa flessibilità nel progetto della rete logica.

Il correlato metodo di fabbricazione del dispositivo, secondo l'invenzione, permette inoltre di spostare l'applicazione di tecniche litografiche dalla conformazione su nano-scala dello strato molecolare (molto critica) alla semplice profilatura, ad esempio mediante incisione, della regione dielettrica, su una scala di variazione corrispondente ad un gruppo di molecole, e non ad una singola molecola, il che può essere fatto mediante

tecniche relativamente semplici, mantenendo limitate la complessità di fabbricazione ed il costo del dispositivo.

Infine, il dispositivo secondo l'invenzione è perfettamente compatibile con l'applicazione di tecnologie di micro-elettronica integrata standard per la realizzazione di ogni tipo di circuiteria addizionale necessaria per costruire un qualsivoglia sistema di elaborazione elettronica intorno al dispositivo elettronico secondo l'invenzione.

Alle forme di realizzazione del dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali, del metodo di fabbricazione di tale dispositivo, del sistema impiegante il dispositivo e dal metodo di computazione svolto dal dispositivo, sopra descritte, un tecnico del ramo, per soddisfare esigenze contingenti, potrà apportare modifiche, adattamenti e sostituzioni di elementi con altri funzionalmente equivalenti anche congiuntamente all'arte nota, creando anche implementazioni ibride, senza uscire dall'ambito delle seguenti rivendicazioni. Ognuna delle caratteristiche descritte come appartenente ad una possibile forma di realizzazione può essere realizzata indipendentemente dalle altre forme di realizzazione descritte.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo elettronico (1) per la realizzazione di funzioni digitali comprendente:

- una prima regione elettrodica (2) ed una seconda regione elettrodica (3), separate da una regione di interposizione (4) comprendente una regione dielettrica (40), in cui dette prima (2) e seconda regione elettrodica (3) comprendono rispettivamente almeno un primo elettrodo (20) ed almeno un secondo elettrodo (30), configurati per generare nella regione di interposizione (4) un campo elettrico elettrodico (E) dipendente da una differenza di potenziale elettrico (ΔV) ad essi applicata;

caratterizzato dal fatto che:

- il dispositivo (1) comprende inoltre, entro la regione di interposizione (4), uno strato molecolare (5) comprendente una pluralità di molecole (50), ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in dipendenza di un campo elettrico avvertito (E1);

- detta regione dielettrica (40) presenta un profilo dielettrico spazialmente variabile, per determinare un rispettivo profilo di campo di detto campo elettrico elettrodico (E) e per modulare

spazialmente detto campo elettrico avvertito (E1) in corrispondenza dello strato molecolare (5).

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1 in cui lo strato molecolare (5) è uno strato molecolare localmente planare, composto di molecole (50) di uno stesso tipo, disposte in una griglia (500) sostanzialmente regolare, aventi rispetto a tale griglia (500) un orientamento spaziale sostanzialmente uniforme e stabile, detto strato molecolare (5) essendo un mono-strato, avente uno spessore di una singola molecola.

3. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui dette molecole (50) sono molecole elettricamente bistabili, aventi cariche confinabili in modo controllabile, mediante interazione elettrostatica, in dipendenza del campo elettrico avvertito.

4. Dispositivo secondo la rivendicazione 3, in cui ciascuna molecola è in grado di assumere alternativamente uno stato neutrale e l'uno o l'altro di due stati polarizzati, aventi livelli energetici differenti rispetto a quello dello stato neutrale, ciascuno stato polarizzato presentando una rispettiva polarizzazione delle cariche.

5. Dispositivo secondo la rivendicazione 2 in cui:

- il primo (20) ed il secondo elettrodo (30) sono disposti su due piani elettrodici tra loro paralleli;

- la regione dielettrica (40) si sviluppa tra i due piani elettrodici;

- lo strato molecolare (5) è planare e sostanzialmente parallelo ai piani elettrodici;

- lo strato molecolare (5) è disposto tra la regione dielettrica (40) e la prima regione elettrodica (2),

ed in cui il dispositivo (1) comprende ulteriormente una ulteriore regione dielettrica (45) interposta tra lo strato molecolare (5) e la prima regione elettrodica (2).

6. Dispositivo secondo la rivendicazione 5, in cui:

- lo strato molecolare comprende una pluralità di porzioni di strato molecolare, ciascuna comprendente almeno una molecola;

- la regione dielettrica comprende una pluralità di porzioni dielettriche, corrispondenti a rispettive porzioni di strato molecolare, ciascuna porzione dielettrica essendo lateralmente delimitata da una superficie laterale, sostanzialmente perpendicolare allo strato molecolare, e la cui intersezione con esso coincide con il perimetro dalla

corrispondente porzione di strato molecolare;

- il campo elettrico avvertito in ognuna delle porzioni di strato molecolare dipende da una costante dielettrica effettiva della corrispondente porzione dielettrica.

7. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 2 a 6, in cui la regione dielettrica (40) comprende:

- un primo strato dielettrico (41), caratterizzato da un primo valore di permittività elettrica (ϵ_1), ed avente, rispetto ad una direzione perpendicolare allo strato molecolare planare (5), un primo spessore dielettrico (d1);

- un secondo strato dielettrico (42), sovrapposto al primo strato dielettrico (41), caratterizzato da un secondo valore di permittività elettrica (ϵ_2), diverso dal primo valore di permittività elettrica (ϵ_1), ed avente, rispetto ad una direzione perpendicolare allo strato molecolare planare (5), un secondo spessore dielettrico (d2);

detti primo spessore dielettrico (d1) e secondo spessore dielettrico (d2) essendo variabili spazialmente in modo da definire il profilo dielettrico spazialmente variabile.

8. Dispositivo secondo le rivendicazioni 6 e 7 in cui la costante dielettrica effettiva di una porzione

dielettrica dipende dal primo valore di permittività elettrica (ϵ_1) e dal secondo valore di permittività elettrica (ϵ_2), ed inoltre dal primo spessore dielettrico (d1) e dal secondo spessore dielettrico (d2) in corrispondenza di detta porzione dielettrica.

9. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 6, in cui la regione dielettrica (40) comprende uno strato dielettrico (41), in cui una superficie dello strato dielettrico presenta una pluralità di cavità o incisioni, di forma, dimensioni e posizione prestabilite;

ed in cui il profilo dielettrico spazialmente variabile della regione dielettrica (40) dipende dalla forma, dimensioni e posizione di detta pluralità di cavità o incisioni.

10. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la prima regione elettrodica (2) comprende una pluralità di primi elettrodi (20), e la seconda regione elettrodica (3) comprende una pluralità di secondi elettrodi (30), in modo da definire una pluralità di coppie di elettrodi, in cui ciascuna coppia di elettrodi è configurata per determinare, in una porzione della regione di interposizione (4) tra essi interposta, un campo elettrico dipendente da una rispettiva

differenza di potenziale applicata alla coppia di elettrodi.

11. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui le molecole (50) dello strato molecolare (5) sono logicamente raggruppate a formare unità funzionali (6) ed in cui:

- ciascuna unità funzionale (6) comprende una porzione uniforme dello strato molecolare (5) formato di molecole (50) dello stesso tipo;

- ciascuna unità funzionale (6) è configurata per realizzare una funzione digitale.

12. Dispositivo secondo la rivendicazione 11, in cui la funzione digitale svolta dall'unità funzionale (6) dipende dall'interazione elettrostatica tra le molecole dell'unità funzionale, dal reciproco orientamento e/o posizionamento delle molecole e dal profilo dielettrico spazialmente variabile.

13. Dispositivo secondo la rivendicazione 12, in cui l'unità funzionale (6) comprende:

- almeno una porzione di ingresso (61) comprendente una o più molecole di ingresso, sensibili ad almeno un segnale di ingresso dell'unità funzionale (6);

- almeno una porzione di elaborazione (63) comprendente una o più molecole di elaborazione,

sensibili alla polarizzazione delle dette molecole di ingresso;

- almeno una porzione di uscita (62) comprendente una o più molecole di uscita, sensibili alla polarizzazione delle dette molecole di elaborazione, dette molecole di uscita essendo atte ad influenzare almeno un segnale di uscita dell'unità funzionale (6);

ed in cui:

- l'almeno un segnale di ingresso dell'unità funzionale ed il campo elettrico elettrodico cooperano per determinare lo stato di polarizzazione delle molecole di ingresso;
- lo stato di polarizzazione determinato delle molecole di ingresso ed il campo elettrico elettrodico cooperano per determinare lo stato di polarizzazione delle molecole di elaborazione;
- lo stato di polarizzazione determinato delle molecole di elaborazione ed il campo elettrico elettrodico cooperano per determinare lo stato di polarizzazione delle molecole di uscita;
- l'almeno un segnale di uscita dell'unità funzionale dipende dallo stato di polarizzazione determinato delle molecole di uscita.

14. Dispositivo secondo la rivendicazione 13 in cui:

- l'almeno un segnale di ingresso è un segnale di ingresso del dispositivo (1) oppure è il segnale di uscita di un'altra unità funzionale;

- l'almeno un segnale di uscita è un segnale di uscita del dispositivo (1) oppure è veicolato nell'unità funzionale in modo da essere segnale di ingresso di un'altra unità funzionale.

15. Dispositivo secondo una delle rivendicazione 13 o 14, in cui il cambiamento di stato, dall'uno all'altro dei due stati polarizzati, in una molecola dello strato molecolare, avviene attraverso una transizione da uno stato polarizzato iniziale allo stato neutrale, ed una ulteriore transizione dallo stato neutrale all'altro stato polarizzato,

ed in cui la transizione allo stato neutrale dipende dal campo elettrico elettrodico (E), mentre la transizione dallo stato neutrale all'altro stato polarizzato dipende sia dal campo elettrico elettrodico (E) che da interazioni elettrostatiche con molecole adiacenti.

16. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 10 a 15, comprendente ulteriormente:

- almeno un elemento di ingresso (80), configurato per ricevere l'almeno un segnale di ingresso del dispositivo e generare conseguentemente

un campo elettrico di ingresso atto ad influenzare lo stato di polarizzazione delle molecole di ingresso;

- almeno un elemento di uscita (90), configurato per rilevare lo stato di polarizzazione delle molecole di uscita e conseguentemente generare il segnale di uscita del dispositivo;

in cui l'elemento di ingresso (80) comprende almeno una coppia di elettrodi di ingresso (81, 82), disposti sul medesimo substrato planare dello strato molecolare (5), configurata per generare il campo elettrico di ingresso, avente direzione sostanzialmente parallela allo strato molecolare (5),

ed in cui l'elemento di uscita (90) è un elettrometro miniaturizzato, disposto sul medesimo substrato planare dello strato molecolare.

17. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 10 a 16, in cui la prima (2) e la seconda regione elettrodica (3) sono configurate per fornire un segnale di orologio e/o sincronizzazione alle unità funzionali (6) del dispositivo, e per fornire un segnale di neutralizzazione diretto alle molecole dello strato molecolare, per controllarne la transizione da o verso lo stato neutrale.

18. Dispositivo secondo la rivendicazione 17, in cui la prima (2) e la seconda regione elettrodica (3)

sono ulteriormente configurate per fornire uno o più ulteriori segnali di ingresso delle unità funzionali (6) del dispositivo.

19. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 10 a 18, in cui ciascuna unità funzionale (6) svolge una funzione corrispondente ad una o a una combinazione di funzioni del seguente gruppo:

- porta logica AND;
- porta logica OR;
- porta logica NOT o inverter;
- linea binaria;
- cella di memoria.

20. Sistema di elaborazione elettronica (100) comprendente un dispositivo elettronico per la realizzazione di funzioni digitali (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti.

21. Sistema (100) secondo la rivendicazione 20, comprendente inoltre una circuiteria addizionale (101) di controllo e di generazione ed elaborazione di segnali, operativamente collegata a detto dispositivo (1).

22. Sistema secondo la rivendicazione 21, in cui il dispositivo elettronico (100) per la realizzazione di funzioni digitali e la circuiteria addizionale (101)

sono integrati in forma di circuito integrato contenuto in un rispettivo package.

23. Sistema (100) secondo la rivendicazione 21, in cui la circuiteria addizionale (101) comprende un generatore di tensione (7), collegato mediante primi mezzi di collegamento (111) al primo (20) ed al secondo elettrodo (30) del dispositivo (1), e configurato per generare la differenza di potenziale (ΔV) tra detti primo e secondo elettrodo.

24. Sistema (100) secondo la rivendicazione 21, in cui la circuiteria addizionale (101) comprende una pluralità di generatori di tensione, collegati mediante una pluralità di primi mezzi di collegamento ad una rispettiva pluralità di coppie di elettrodi del dispositivo, e configurati per generare rispettive differenze di potenziale tra ciascuna coppia di detta pluralità di coppie di elettrodi, in cui ciascuna di dette differenze di potenziale è continua o variabile nel tempo.

25. Sistema (100) secondo la rivendicazione 21, in cui la circuiteria addizionale (101) comprende:

- almeno un modulo di ingresso (102), collegato, mediante secondi mezzi di collegamento (112), all'almeno un elemento di ingresso (80) del dispositivo (1), per fornire uno degli uno o più

segnali di ingresso del dispositivo;

- almeno un modulo di uscita (103), collegato, mediante terzi mezzi di collegamento (113), all'almeno un elemento di uscita (90) del dispositivo (1), per ricevere ed elaborare uno degli uno o più segnali di uscita del dispositivo.

26. Sistema (100) secondo la rivendicazione 21, in cui la circuiteria addizionale (101) comprende un modulo di controllo (104), collegato, mediante quarti mezzi di collegamento (114) al dispositivo (1).

27. Sistema (100) secondo la rivendicazione 21, in cui la circuiteria addizionale comprende sesti mezzi di collegamento (116) tra l'elemento di uscita (95) di un'unità funzionale del dispositivo (1) e l'elemento di ingresso (85) di un'altra unità funzionale del dispositivo (1), per realizzare funzioni complesse mediante cooperazione di diverse unità funzionali dello stesso dispositivo (1).

28. Sistema (100) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 23 a 27, in cui almeno uno di detti primi, secondi, terzi, quarti e sesti mezzi di collegamento è realizzato mediante metallizzazioni, disposte su uno o più livelli di metallizzazione del sistema.

29. Metodo per la computazione elettronica mediante

realizzazione di funzioni digitali, comprendente:

- prevedere un dispositivo elettronico (1) comprendente una prima regione elettrodica (2) ed una seconda regione elettrodica (3), separate da una regione di interposizione (4) comprendente una regione dielettrica (40) avente un profilo dielettrico spazialmente variabile, in cui dette prima (2) e seconda regione elettrodica (3) comprendono rispettivamente almeno un primo elettrodo (20) ed almeno un secondo elettrodo (30);

- prevedere ulteriormente, nel detto dispositivo (1), entro la regione di interposizione (4), uno strato molecolare (5) comprendente una pluralità di molecole (50), ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in dipendenza di un campo elettrico avvertito (E1);

- applicare una differenza di potenziale (ΔV) tra detti primo elettrodo (20) e secondo elettrodo (30), per generare un campo elettrico elettrodico (E) nella regione di interposizione (4);

- influenzare lo stato delle molecole (50) dello strato molecolare (5) mediante una modulazione spaziale del campo elettrico presente in corrispondenza dello strato molecolare (5), detta

modulazione spaziale dipendendo da un profilo di campo spazialmente variabile determinato dal profilo dielettrico spazialmente variabile della regione dielettrica (40).

30. Metodo secondo la rivendicazione 29, in cui la differenza di potenziale (ΔV) applicata tra il primo (20) e secondo elettrodo (30) varia nel tempo, in modo da determinare una variazione temporale del campo elettrico (E) generato nella regione dielettrica e del campo elettrico avvertito (E_1) in corrispondenza dello strato molecolare (5).

31. Metodo di fabbricazione di un dispositivo elettronico (1) per la realizzazione di funzioni digitali, detto metodo comprendendo le fasi di:

- depositare una regione elettrodica, comprendente uno o più elettrodi metallici;
- depositare una regione di materiale dielettrico sopra detta regione elettrodica;
- depositare, su una superficie superiore della regione di materiale dielettrico, in prime posizioni prestabilite, uno o più elementi di ingresso, ciascuno comprendente una coppia di elettrodi di ingresso;
- depositare, su detta superficie superiore della regione di materiale dielettrico, in seconde

posizioni prestabilite, uno o più elementi di uscita, ciascuno comprendente un elettrometro;

- depositare, su detta superficie superiore della regione di materiale dielettrico, su una zona prestabilita in dipendenza di dette prime posizioni prestabilite e seconde posizioni prestabilite, uno strato molecolare comprendente una pluralità di molecole, ciascuna delle quali in grado di assumere uno o più stati elettrici, in modo controllabile, in dipendenza di un campo elettrico avvertito;

- depositare una ulteriore regione di materiale dielettrico al di sopra di detto strato molecolare, detto almeno un elemento di ingresso, e detto almeno un elemento di uscita;

- depositare una ulteriore regione elettrodica, comprendente uno o più elettrodi metallici, al di sopra della detta ulteriore regione di materiale dielettrico;

in cui almeno una delle dette fasi di depositare una regione di materiale dielettrico e depositare una ulteriore regione di materiale dielettrico comprende la fase di determinare un profilo dielettrico spazialmente variabile, in almeno una delle rispettive regione dielettrica ed ulteriore regione dielettrica.

32. Metodo di fabbricazione secondo la rivendicazione 31, in cui la fase di depositare una regione dielettrica comprende:

- depositare almeno un primo strato dielettrico, con un primo valore di permittività dielettrica;

- incidere detto primo strato dielettrico ricavando cavità e/o incisioni di forma, dimensioni e posizione prestabilite, in modo da determinare un profilo spaziale variabile in modo controllato di detto primo strato dielettrico;

- depositare almeno un secondo strato dielettrico con un secondo valore di permittività dielettrica, sovrapposto al primo strato dielettrico, e posto in stretto contatto con esso così da riempirne dette cavità e/o incisioni, in modo da ottenere nella regione di materiale dielettrico un profilo dielettrico spazialmente variabile.

33. Metodo di fabbricazione secondo la rivendicazione 32, in cui il primo strato dielettrico è composto da un primo materiale polimerico o polimerico-ceramico, ed in cui la fase di incidere è realizzata secondo una delle seguenti tecniche:

- soft lithography
- incisione con punte nanometriche riscaldate e

movimentate.

34. Metodo di fabbricazione secondo la rivendicazione 32, in cui il secondo strato dielettrico è composto da un secondo materiale polimerico, o polimerico-ceramico, avente una temperatura di reticolazione inferiore alla temperatura di fusione del primo materiale polimerico, o polimerico-ceramico;

ed in cui la fase di depositare una regione di materiale dielettrico comprende ulteriormente:

- depositare, al di sopra ed in contatto con la superficie incisa del primo strato dielettrico, secondo materiale polimerico in stato liquido;

- operare una reticolazione del secondo materiale polimerico alla rispettiva temperatura di reticolazione, per ottenere il detto secondo strato dielettrico.

35. Metodo di fabbricazione secondo la rivendicazione 31, in cui lo strato molecolare è un mono-strato molecolare localmente planare, composto di molecole di uno stesso tipo, disposte in una griglia sostanzialmente regolare, aventi rispetto a tale griglia un orientamento spaziale sostanzialmente uniforme e stabile, ed in cui la fase di depositare uno strato molecolare comprende:

- depositare il mono-strato molecolare attraverso immobilizzazione molecolare in ambiente liquido o secco, mediante tecniche "self-assembling";

- indurre l'orientamento spaziale desiderato delle molecole del mono-strato molecolare, mediante applicazione di campi elettrici di controllo di orientazione.

36. Metodo di fabbricazione di un sistema di elaborazione elettronica integrato, comprendente:

- fabbricare un dispositivo secondo un metodo di fabbricazione in accordo con una qualsiasi delle rivendicazioni da 31 a 35;

- fabbricare una circuiteria integrata addizionale di controllo e di generazione ed elaborazione di segnali;

- connettere detto dispositivo e detta circuiteria integrata addizionale, in modo da formare un unico circuito integrato;

- disporre detto circuito integrato in un package per circuiti integrati.

CLAIMS

1. An electronic device (1) for implementing digital functions comprising:

- a first electrode region (2) and a second electrode region (3), separated by an interposing region (4) comprising a dielectric region (40), wherein said first (2) and second (3) electrode regions comprise at least one first electrode (20) and at least one second electrode (30), respectively, that are configured to generate an electrode electric field (E) in the interposing region (4) depending on an electric potential difference (ΔV) applied thereto;

characterized in that:

- the device (1) further comprises, within the interposing region (4), a molecular layer (5) comprising a plurality of molecules (50), each of which being capable of assuming one or more electric states, in a controllable manner, according to a sensed electric field (E1);
- said dielectric region (40) has a spatially variable dielectric profile, to determine a respective field profile of said electrode electric field (E) and to spatially modulate said sensed electric field (E1) at the molecular layer (5).

2. The device according to claim 1, wherein the molecular layer (5) is a locally planar molecular layer, composed of molecules (50) of a same type, arranged in a substantially regular grid (500), said molecules having, with reference to said grid (500), a substantially uniform and stable spatial orientation, said molecular layer (5) being a monolayer, having a thickness of a single molecule.

3. The device according to any one of the preceding claims, wherein said molecules (50) are electrically bistable molecules, having charges that can be confined in a controllable manner, by electrostatic interaction, depending on the sensed electric field.

4. The device according to claim 3, wherein each molecule is capable of alternatively assuming a neutral state and one or the other of two polarized states, having different energy levels compared to that of the neutral state, each polarized state having a respective polarization of the charges.

5. The device according to claim 2, wherein:

- the first (20) and the second (30) electrodes are arranged on two mutually parallel electrode planes;
- the dielectric region (40) extends between the two electrode planes;

- the molecular layer (5) is planar and substantially parallel to the electrode planes;
- the molecular layer (5) is arranged between the dielectric region (40) and the first electrode region (2),

and wherein the device (1) further comprises a further dielectric region (45) interposed between the molecular layer (5) and the first electrode region (2).

6. The device according to claim 5, wherein:

- the molecular layer comprises a plurality of molecular layer portions, each comprising at least one molecule;
- the dielectric region comprises a plurality of dielectric portions, corresponding to respective molecular layer portions, each dielectric portion being laterally delimited by a side surface, substantially perpendicular to the molecular layer, and the intersection of which therewith coincides with the perimeter of the corresponding molecular layer portion;
- the sensed electric field in each of the molecular layer portions depends on an effective dielectric constant of the corresponding dielectric portion.

7. The device according to one of the claims 2 to 6, wherein the dielectric region (40) comprises:

- a first dielectric layer (41), characterized by a first electric permittivity value (ϵ_1), and having, relative to a direction perpendicular to the planar molecular layer (5), a first dielectric thickness (d1);

- a second dielectric layer (42), overlying the first dielectric layer (41), characterized by a second electric permittivity value (ϵ_2), which is different from the first electric permittivity value (ϵ_1), and having, relative to a direction perpendicular to the planar molecular layer (5), a second dielectric thickness (d2);

said first dielectric thickness (d1) and second dielectric thickness (d2) being spatially variable so as to define the spatially variable dielectric profile.

8. The device according to claims 6 and 7, wherein the effective dielectric constant of a dielectric portion depends on the first electric permittivity value (ϵ_1) and the second electric permittivity value (ϵ_2), and furthermore on the first dielectric thickness (d1) and the second dielectric thickness (d2) at said dielectric portion.

9. The device according to any one of the claims 2 to 6, wherein the dielectric region (40) comprises a dielectric layer (41), wherein a surface of the dielectric layer has a plurality of cavities or engravings, having preset shape, dimensions, and position;

and wherein the spatially variable dielectric profile of the dielectric region (40) depends on the shape, dimensions and position of said plurality of cavities or engravings.

10. The device according to any one of the preceding claims, wherein the first electrode region (2) comprises a plurality of first electrodes (20), and the second electrode region (3) comprises a plurality of second electrodes (30), so as to define a plurality of electrode pairs, wherein each electrode pair is configured to determine, in a portion of the interposing region (4) interposed therebetween, an electric field depending on a respective potential difference applied to the electrode pair.

11. The device according to any one of the preceding claims, wherein the molecules (50) of the molecular layer (5) are logically grouped to form functional units (6), and wherein:

- each functional unit (6) comprises a uniform portion of the molecular layer (5) made of molecules (50) of the same type;
- each functional unit (6) is configured to implement a digital function.

12. The device according to claim 11, wherein the digital function performed by the functional unit (6) depends on the electrostatic interaction between the functional unit molecules, the mutual orientation and/or position of the molecules, and the spatially variable dielectric profile.

13. The device according to claim 12, wherein the functional unit (6) comprises:

- at least one input portion (61) comprising one or more input molecules, sensitive to at least one input signal of the functional unit (6);
- at least one processing portion (63) comprising one or more processing molecules, sensitive to the polarization of said input molecules;
- at least one output portion (62) comprising one or more output molecules, sensitive to the polarization of said processing molecules, said output molecules being suitable to affect at least one output signal of the functional unit (6);

and wherein:

- the at least one input signal of the functional unit and the electrode electric field cooperate to determine the polarization state of the input molecules;
- the determined polarization state of the input molecules and the electrode electric field cooperate to determine the polarization state of the processing molecules;
- the determined polarization state of the processing molecules and the electrode electric field cooperate to determine the polarization state of the output molecules;
- the at least one output signal of the functional unit depends on the determined polarization state of the output molecules.

14. The device according to claim 13, wherein:

- the at least one input signal is an input signal of the device (1), or it is the output signal of another functional unit;
- the at least one output signal is an output signal of the device (1), or it is conveyed within the functional unit so as to be the input signal of another functional unit.

15. The device according to one of the claims 13 or 14, wherein the change of state, from one to the

other of the two polarized states, in a molecule of the molecular layer, occurs through a transition from an initial polarized state to the neutral state, and a further transition from the neutral state to the other polarized state,

and wherein the transition to the neutral state depends on the electrode electric field (E), while the transition from the neutral state to the other polarized state depends on both the electrode electric field (E) and on electrostatic interactions with adjacent molecules.

16. The device according to one of the claims 10 to 15, further comprising:

- at least one input element (80), configured to receive the at least one input signal of the device and to consequently generate an input electric field suitable to affect the polarization state of the input molecules;

- at least one output element (90), configured to detect the polarization state of the output molecules and consequently generate the output signal of the device;

wherein the input element (80) comprises at least one pair of input electrodes (81, 82), arranged on the same planar substrate of the molecular layer (5),

configured to generate the input electric field, having a direction substantially parallel to the molecular layer (5),

and wherein the output element (90) is a miniaturized electrometer, arranged on the same planar substrate of the molecular layer.

17. The device according to any one of the claims 10 to 16, wherein the first (2) and the second (3) electrode regions are configured to provide a clock and/or synchronization signal to the functional units (6) of the device, and to provide a neutralization signal to the molecules of the molecular layer, in order to control the transition thereof from or to the neutral state.

18. The device according to claim 17, wherein the first (2) and the second (3) electrode regions are further configured to provide one or more further input signals of the functional units (6) of the device.

19. The device according to any one of the claims 10 to 18, wherein each functional unit (6) performs a function corresponding to one or a combination of functions of the following group:

- logic gate AND;
- logic gate OR;

- logic gate NOT or inverter;
- binary line;
- memory cell.

20. An electronic processing system (100) comprising an electronic device for implementing digital functions (1) according to any one of the preceding claims.

21. The system (100) according to claim 20, further comprising an additional circuitry (101) for signal control, generation and processing, operatively connected to said device (1).

22. The system according to claim 21, wherein the electronic device (100) for implementing digital functions and the additional circuitry (101) are integrated in the form of an integrated circuit contained in a respective package.

23. The system (100) according to claim 21, wherein the additional circuitry (101) comprises a voltage generator (7), connected through first connection means (111) to the first (20) and the second (30) electrodes of the device (1), and configured to generate the potential difference (ΔV) between said first and second electrodes.

24. The system (100) according to claim 21, wherein the additional circuitry (101) comprises a plurality

of voltage generators, connected by means of a plurality of first connection means to a respective plurality of electrode pairs of the device, and configured to generate respective potential differences between each pair of said plurality of electrode pairs, wherein each of said potential differences is continuous or variable over time.

25. The system (100) according to claim 21, wherein the additional circuitry (101) comprises:

- at least one input module (102), connected, through second connection means (112), to the at least one input element (80) of the device (1), to provide one of the one or more input signals of the device;
- at least one output module (103), connected, through third connection means (113), to the at least one output element (90) of the device (1), to receive and process one of the one or more output signals of the device.

26. The system (100) according to claim 21, wherein the additional circuitry (101) comprises a control module (104), connected, through fourth connection means (114), to the device (1).

27. The system (100) according to claim 21, wherein the additional circuitry comprises sixth connection means (116) between the output element (95) of a

functional unit of the device (1) and the input element (85) of another functional unit of the device (1), to implement complex functions by cooperation of different functional units of the same device (1).

28. The system (100) according to any one of the claims 23 to 27, wherein at least one of said first, second, third, fourth, and sixth connection means is implemented by metallizations arranged on one or more metallization layers of the system.

29. A method for electronic computation through implementation of digital functions, comprising:

- providing an electronic device (1) comprising a first electrode region (2) and a second electrode region (3), separated by an interposing region (4) comprising a dielectric region (40) having a spatially variable dielectric profile, wherein said first (2) and second (3) electrode regions comprise at least one first electrode (20) and at least one second electrode (30), respectively;
- further providing, in said device (1), within the interposing region (4), a molecular layer (5) comprising a plurality of molecules (50), each of which being capable of assuming one or more electric states, in a controllable manner, according to a sensed electric field (E1);

- applying a potential difference (ΔV) between said first electrode (20) and second electrode (30), to generate an electrode electric field (E) in the interposing region (4);
- affecting the state of the molecules (50) of the molecular layer (5) by means of a spatial modulation of the electric field at the molecular layer (5), said spatial modulation depending on a spatially variable field profile determined by the spatially variable dielectric profile of the dielectric region (40).

30. The method according to claim 29, wherein the potential difference (ΔV) applied between the first (20) and the second (30) electrodes varies over time, so as to determine a temporal variation of the electric field (E) generated in the dielectric region and of the sensed electric field (E1) at the molecular layer (5).

31. A method for manufacturing an electronic device (1) for implementing digital functions, said method comprising the steps of:

- depositing an electrode region, comprising one or more metal electrodes;
- depositing a dielectric material region onto said electrode region;

- depositing, on an upper surface of the dielectric material region, in preset first positions, one or more input elements, each comprising a pair of input electrodes;
- depositing, on said upper surface of the dielectric material region, in preset second positions, one or more output elements, each comprising an electrometer;
- depositing, on said upper surface of the dielectric material region, on an area preset according to said preset first positions and preset second positions, a molecular layer comprising a plurality of molecules, each of which being capable of assuming one or more electric states, in a controllable manner, according to a sensed electric field;
- depositing a further dielectric material region above said molecular layer, said at least one input element, and said at least one output element;
- depositing a further electrode region, comprising one or more metal electrodes, above said further dielectric material region;

wherein at least one of said steps of depositing a dielectric material region and of depositing a further dielectric material region comprises the step of determine a spatially variable dielectric profile,

in at least one of the respective dielectric region and further dielectric region.

32. The manufacturing method according to claim 31, wherein the step of depositing a dielectric region comprises:

- depositing at least one first dielectric layer, with a first dielectric permittivity value;
- etching said first dielectric layer, thus obtaining cavities and/or engravings with preset shape, dimensions and position, so as to determine a spatial profile, variable in a controlled manner, of said first dielectric layer;
- depositing at least one second dielectric layer with a second dielectric permittivity value, overlying the first dielectric layer, and placed in direct contact therewith so as to fill said cavities and/or engravings thereof, so as to obtain a spatially variable dielectric profile in the dielectric material region.

33. The manufacturing method according to claim 32, wherein the first dielectric layer is composed of a first polymer or polymer-ceramic material, and wherein the etching step is implemented according to one of the following techniques:

- soft lithography;

- engraving with heated and mobile nanometric tips.

34. The manufacturing method according to claim 32, wherein the second dielectric layer is composed of a second polymer or polymer-ceramic material having a curing temperature below the melting temperature of the first polymer or polymer-ceramic material; and wherein the step of depositing a dielectric material region further comprises:

- depositing, onto the etched surface of the first dielectric layer, a second polymer material in a liquid state;
- curing the second polymer material to the respective curing temperature, to obtain said second dielectric layer.

35. The manufacturing method according to claim 31, wherein the molecular layer is a locally planar molecular monolayer, composed of molecules of a same type, arranged in a substantially regular grid, said molecules having, with reference such a grid, a substantially uniform and stable spatial orientation, and wherein the step of depositing a molecular layer comprises:

- depositing the molecular monolayer through molecular immobilization in a liquid or dry environment, by self-assembling techniques;

- inducing the desired spatial orientation of the molecules of the molecular monolayer, by applying orientation control electric fields.

36. A method for manufacturing an integrated electronic processing system, comprising:

- manufacturing a device according to a manufacturing method in accordance with any of the claims 31 to 35;
- manufacturing an additional integrated circuitry for signal control, generation and processing;
- connecting said device and said additional integrated circuitry, so as to form a single integrated circuit;
- arranging said integrated circuit in a package for integrated circuits.

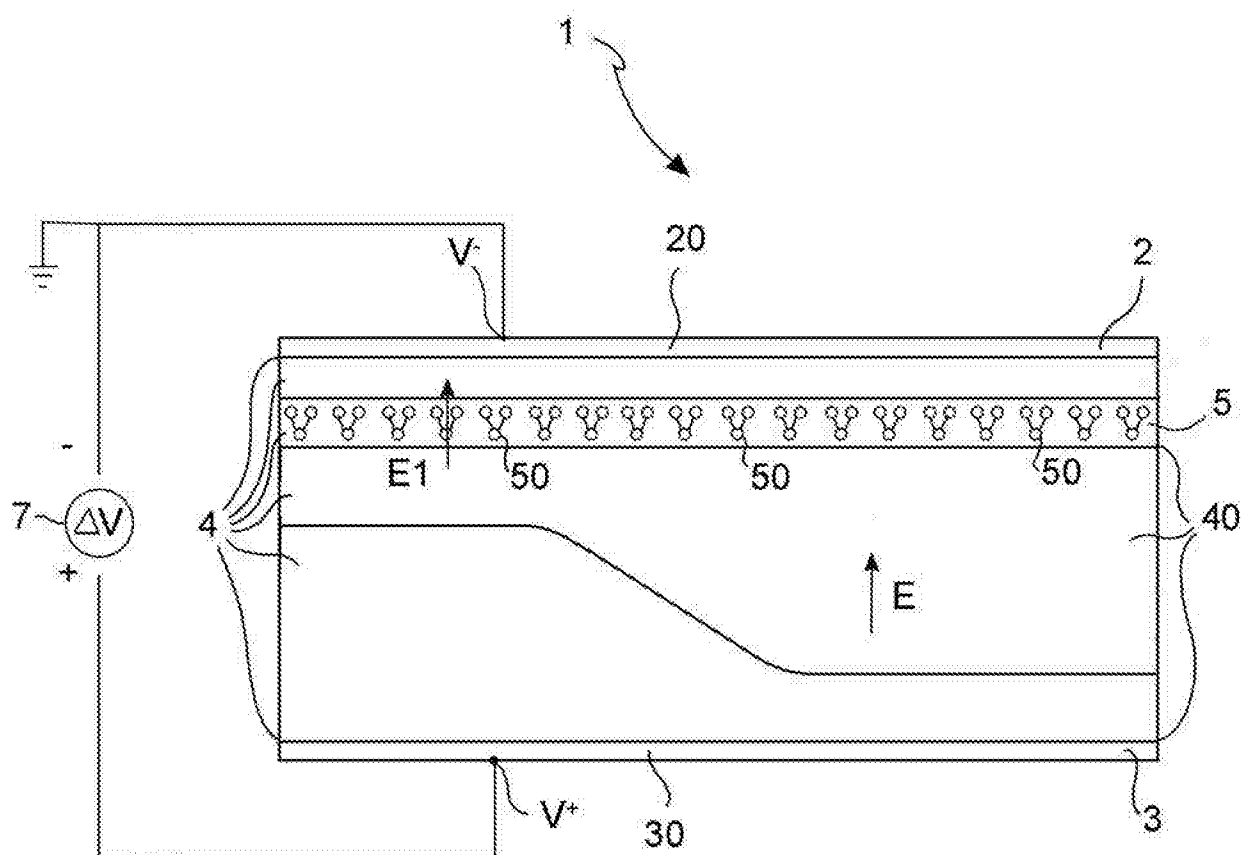


FIG. 1

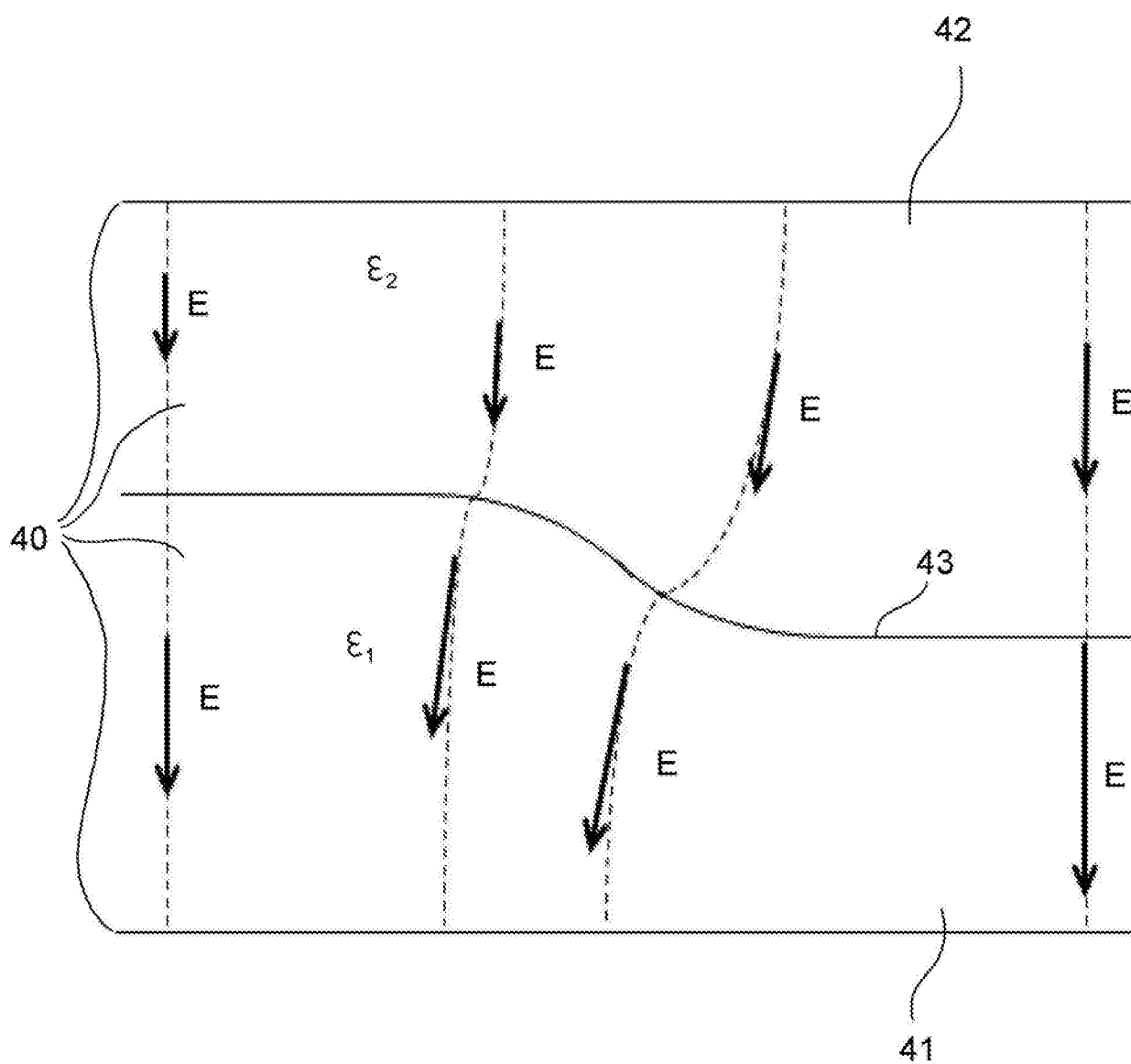


FIG. 2

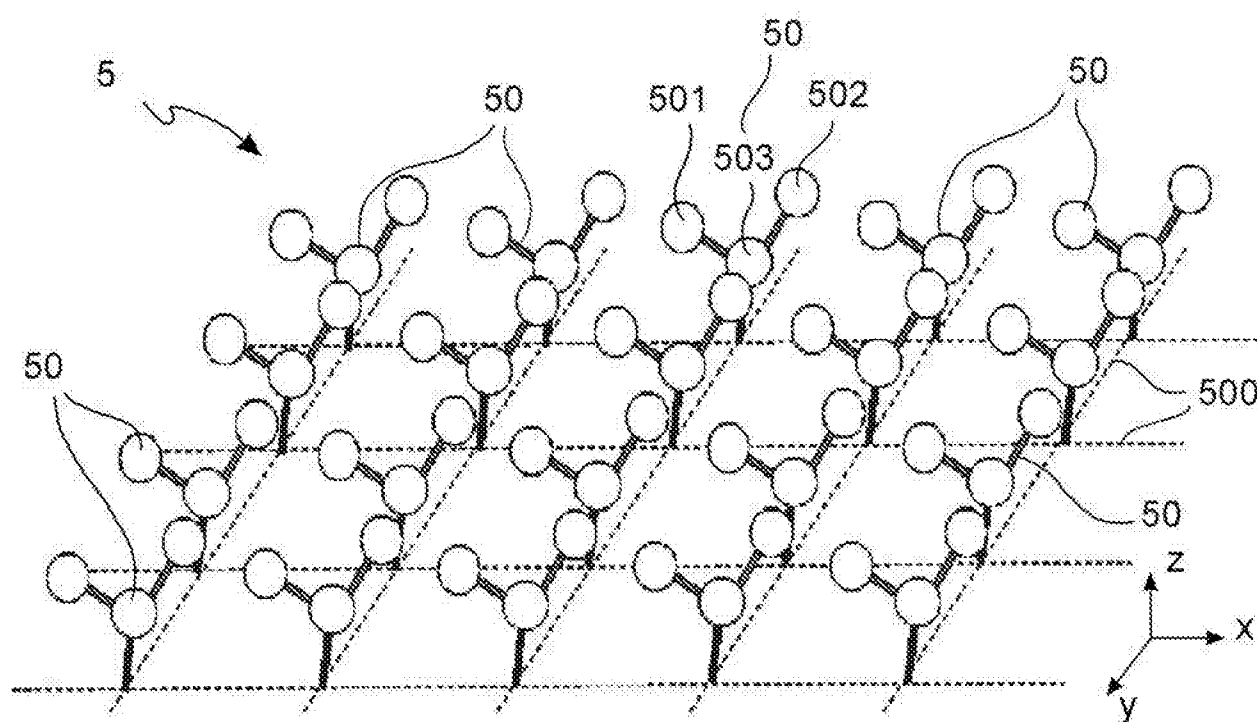


FIG. 3A

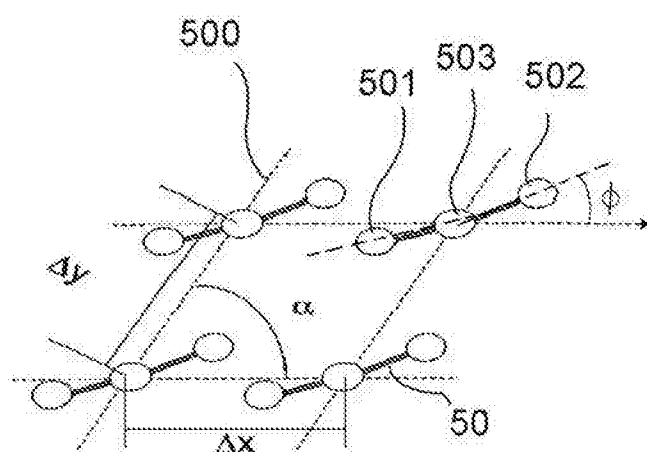


FIG. 3B

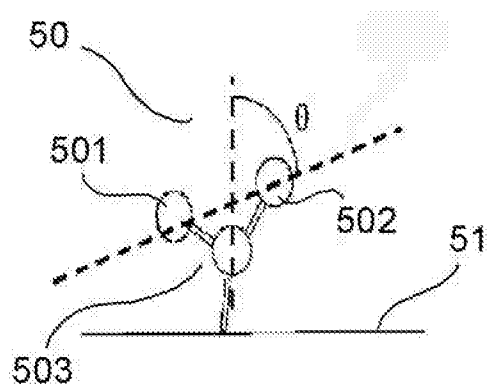


FIG. 4

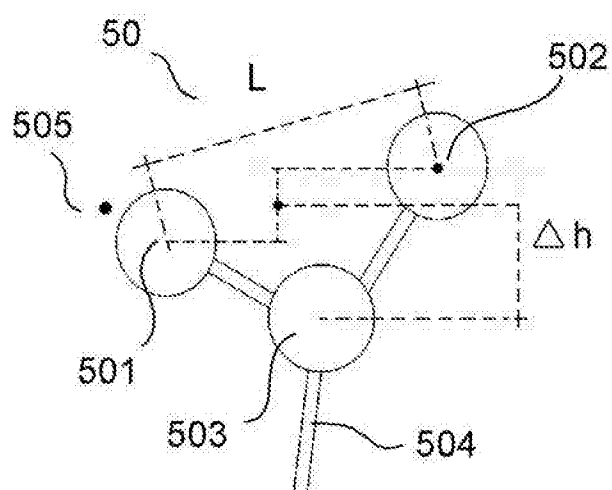


FIG. 5A

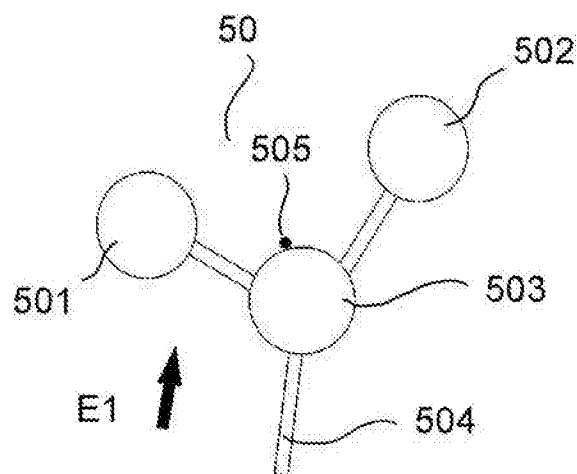


FIG. 5B

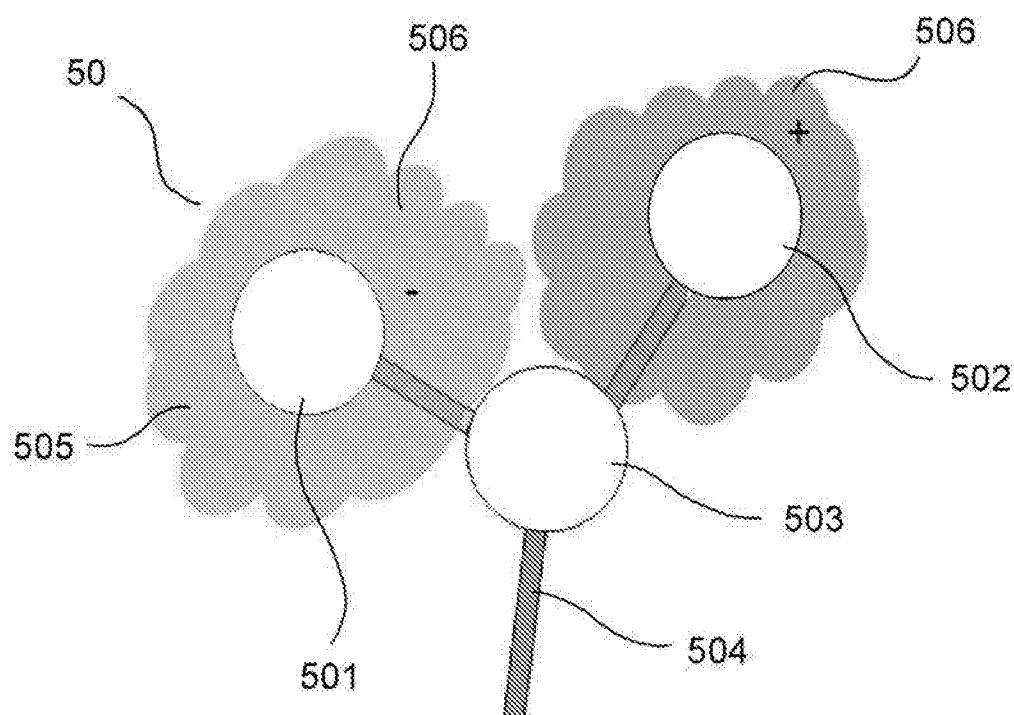


FIG. 6

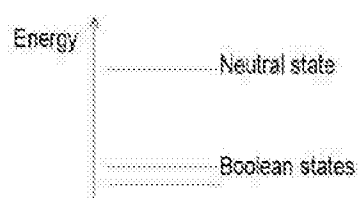


FIG. 7A

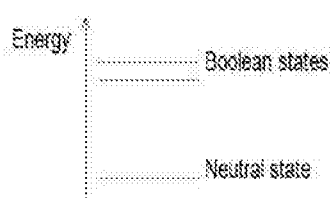


FIG. 7B

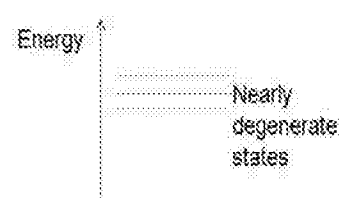


FIG. 7C

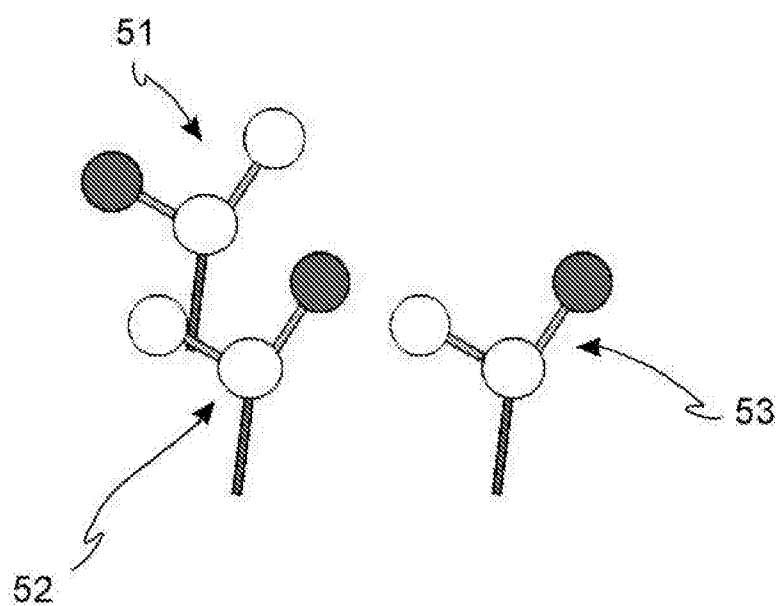


FIG. 8

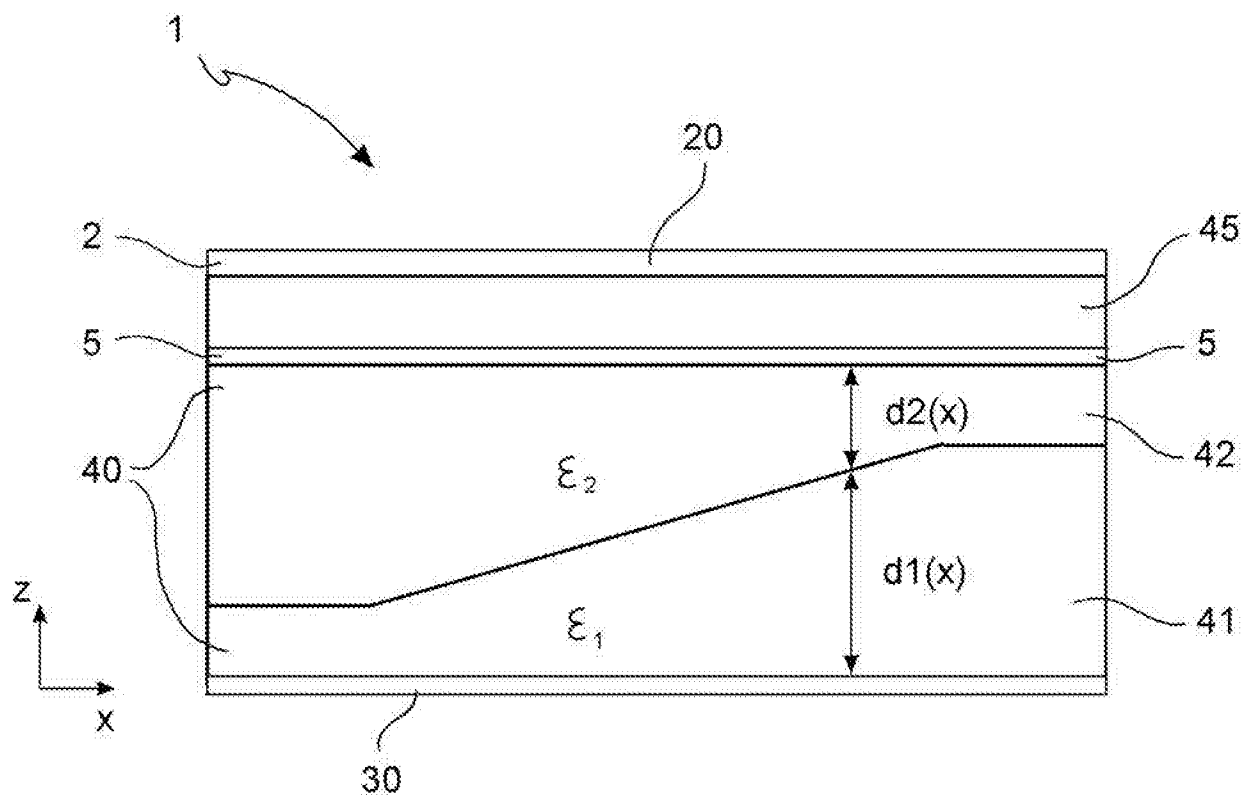


FIG. 9

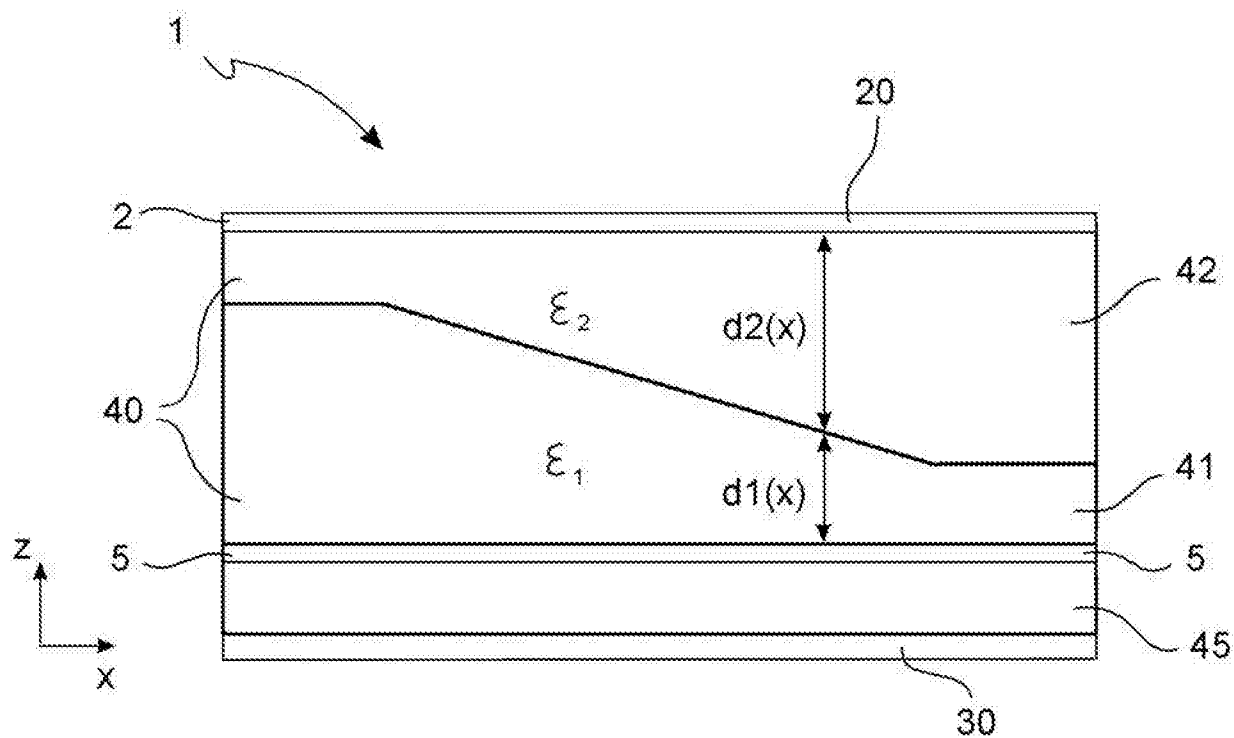
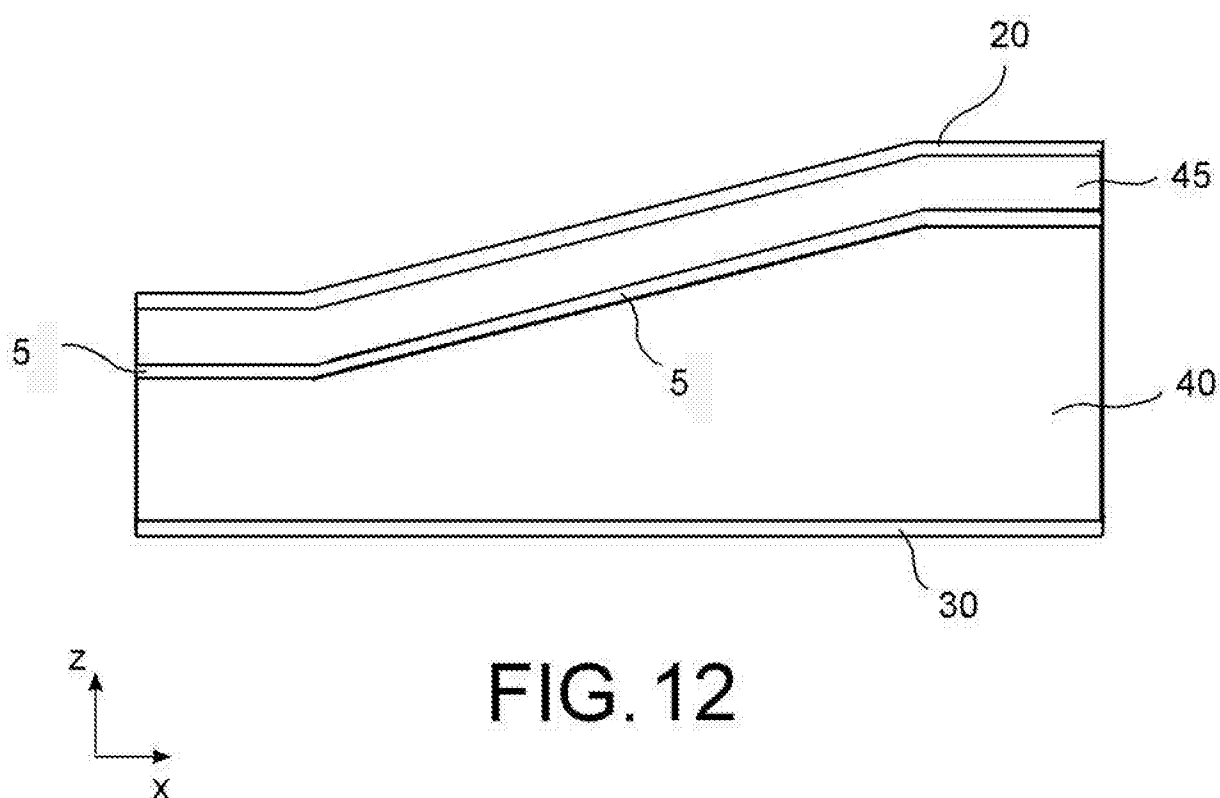
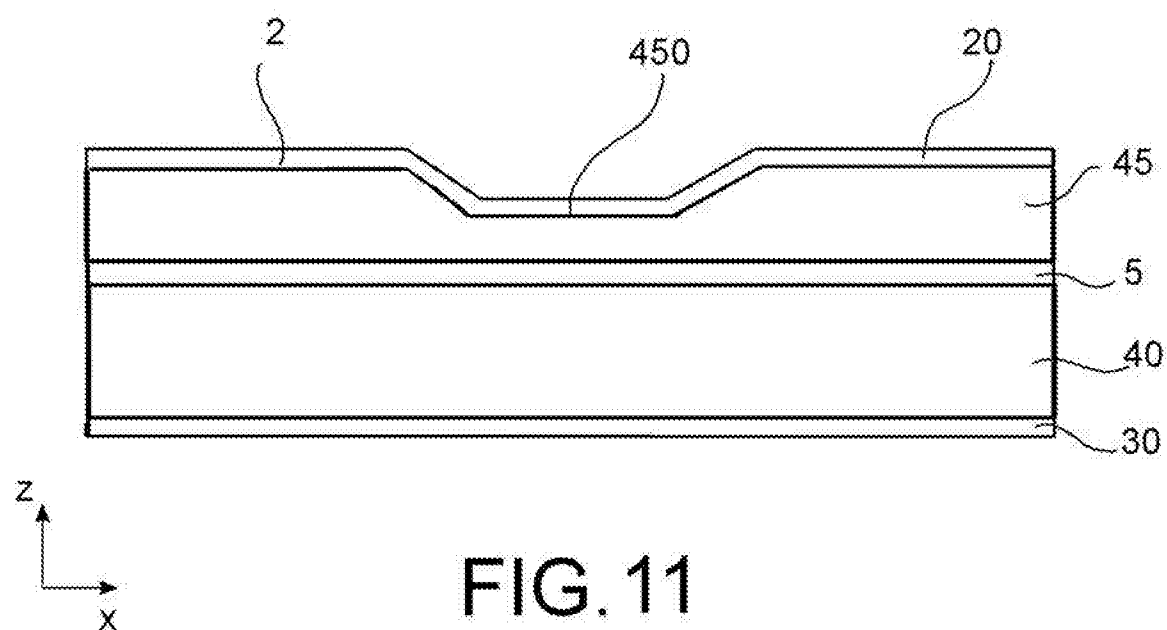


FIG. 10



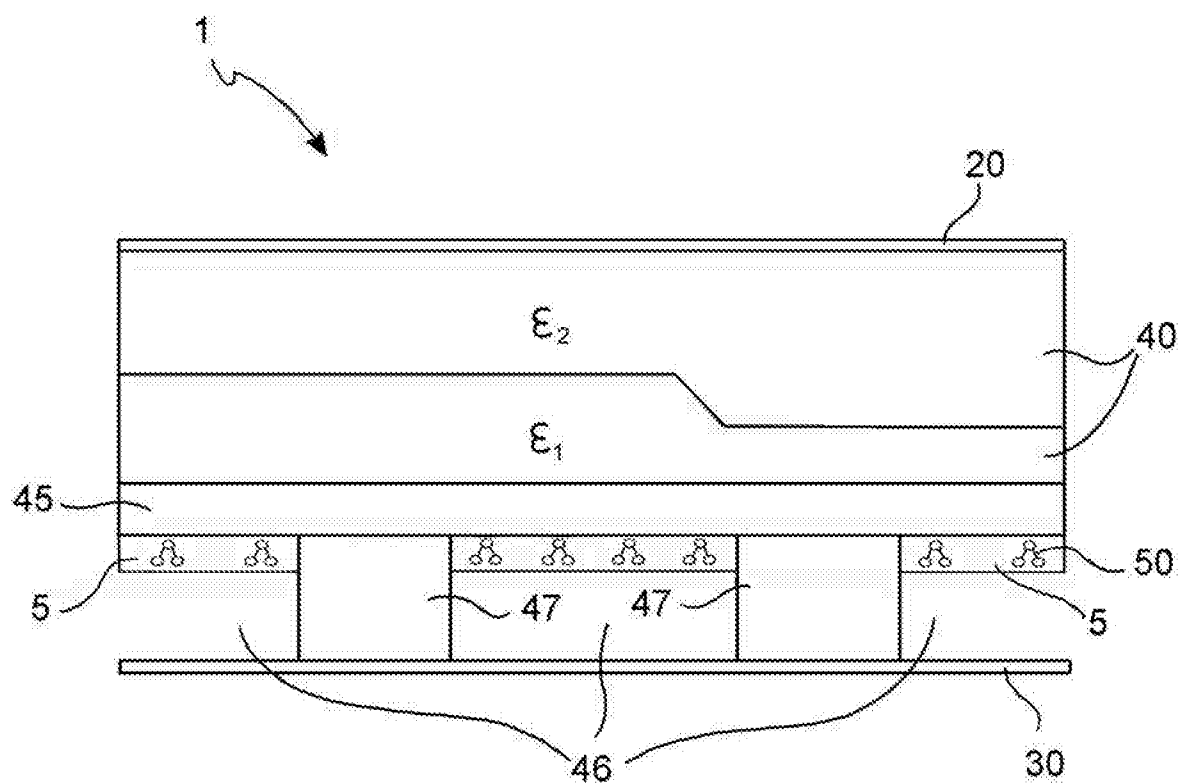


FIG. 13

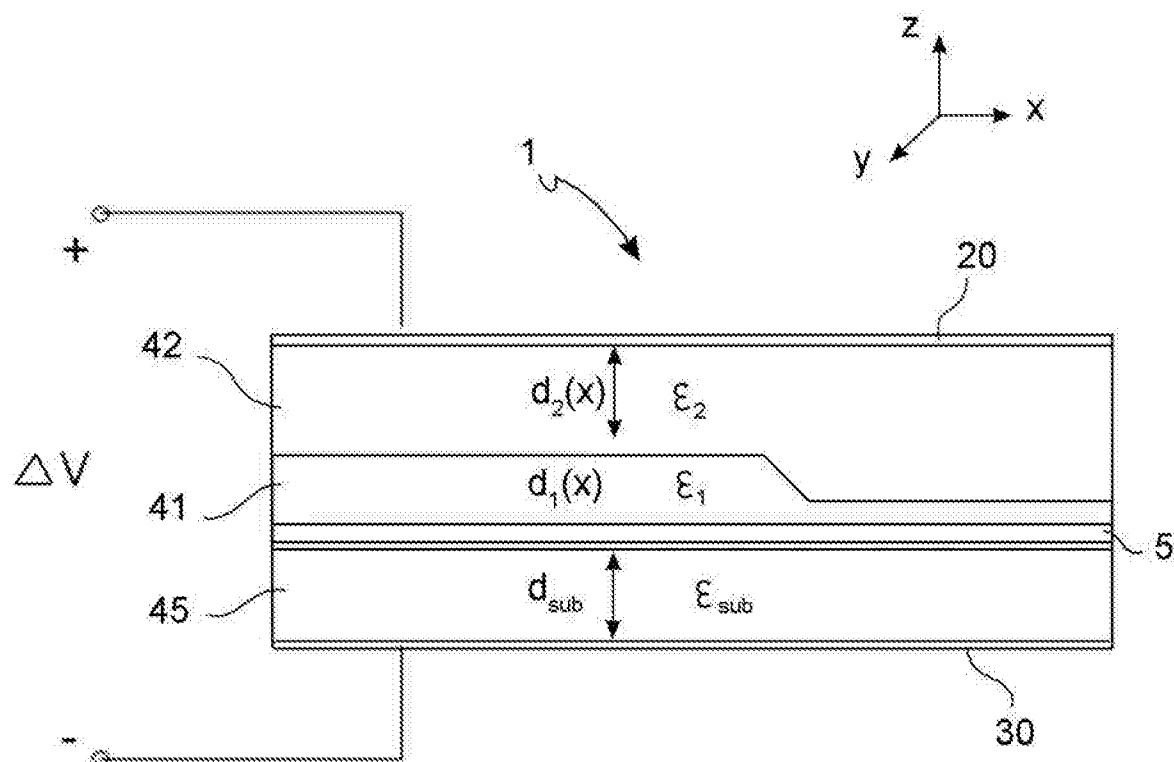


FIG. 14A

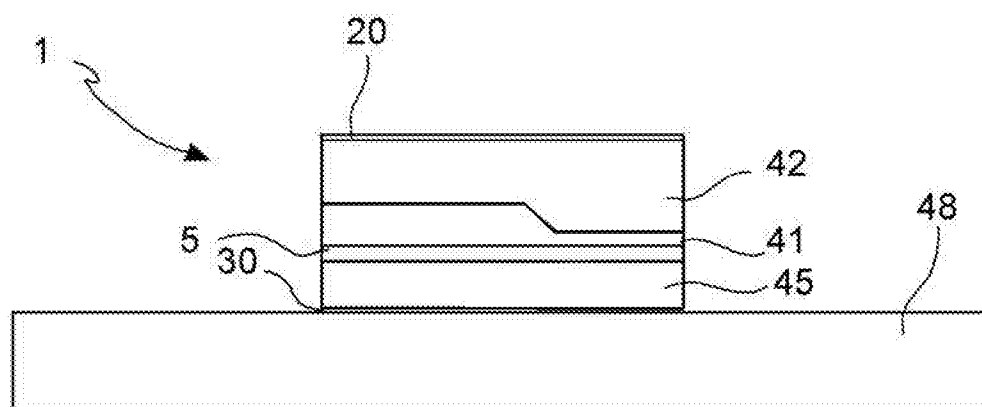


FIG. 14B

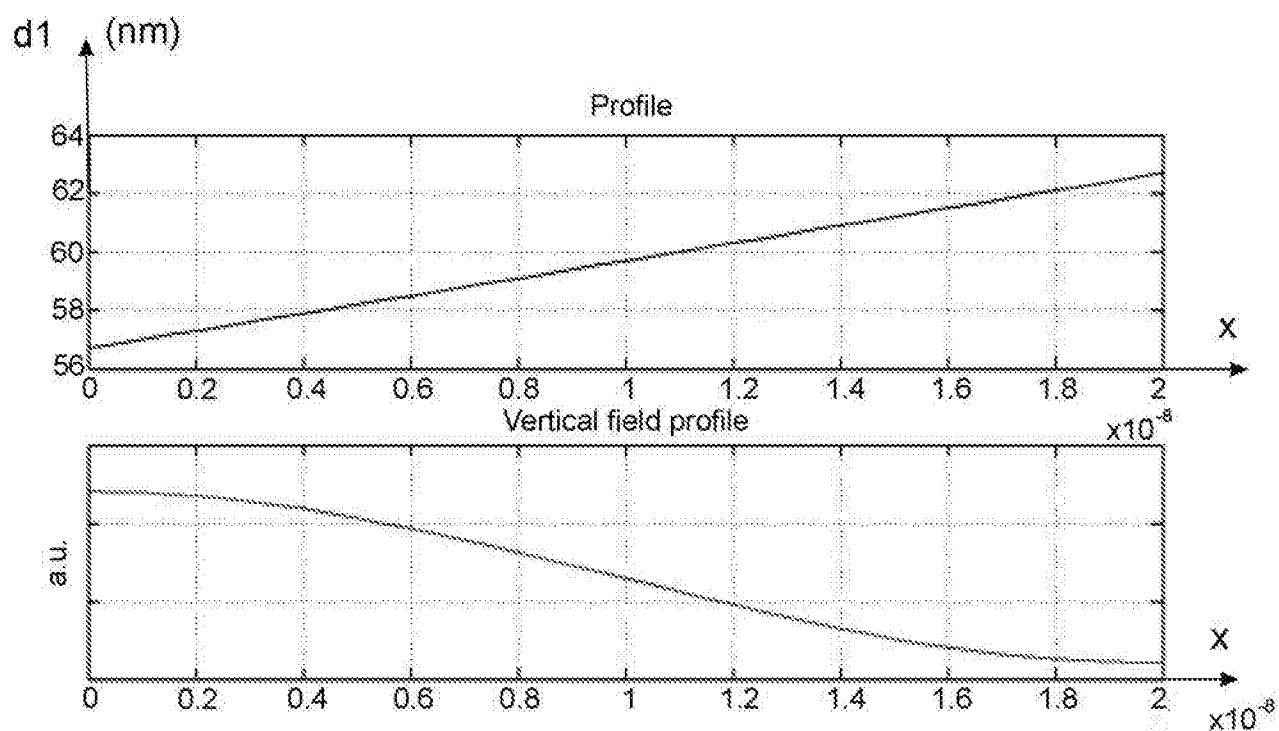


FIG. 15

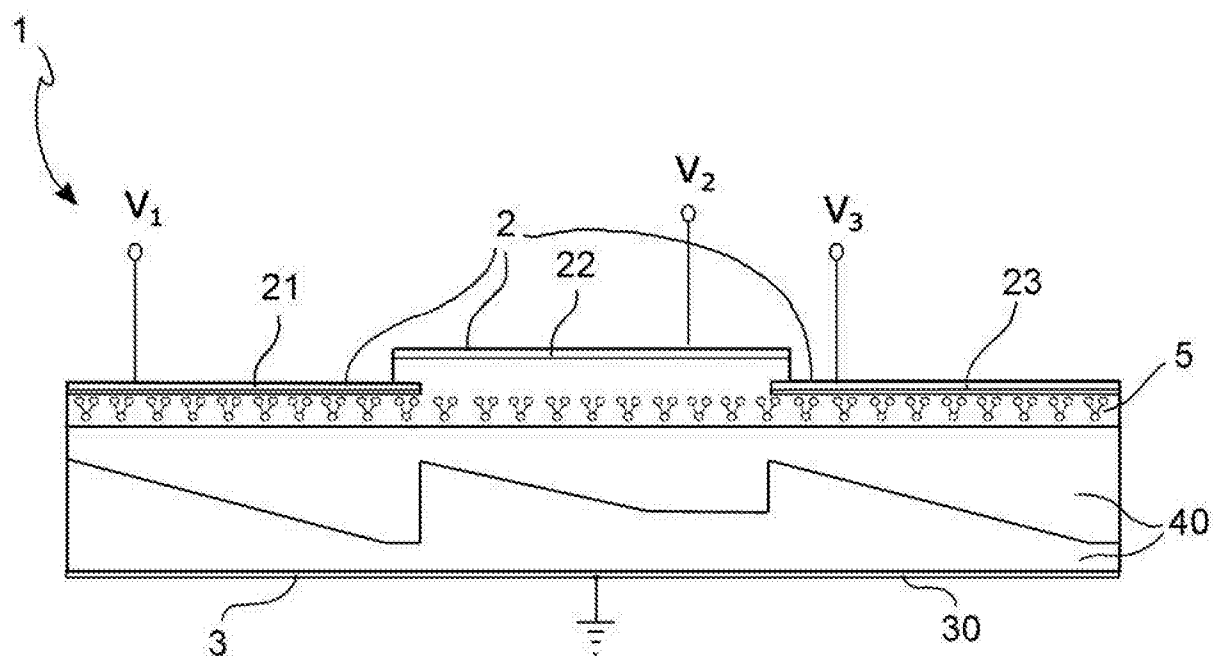


FIG. 16

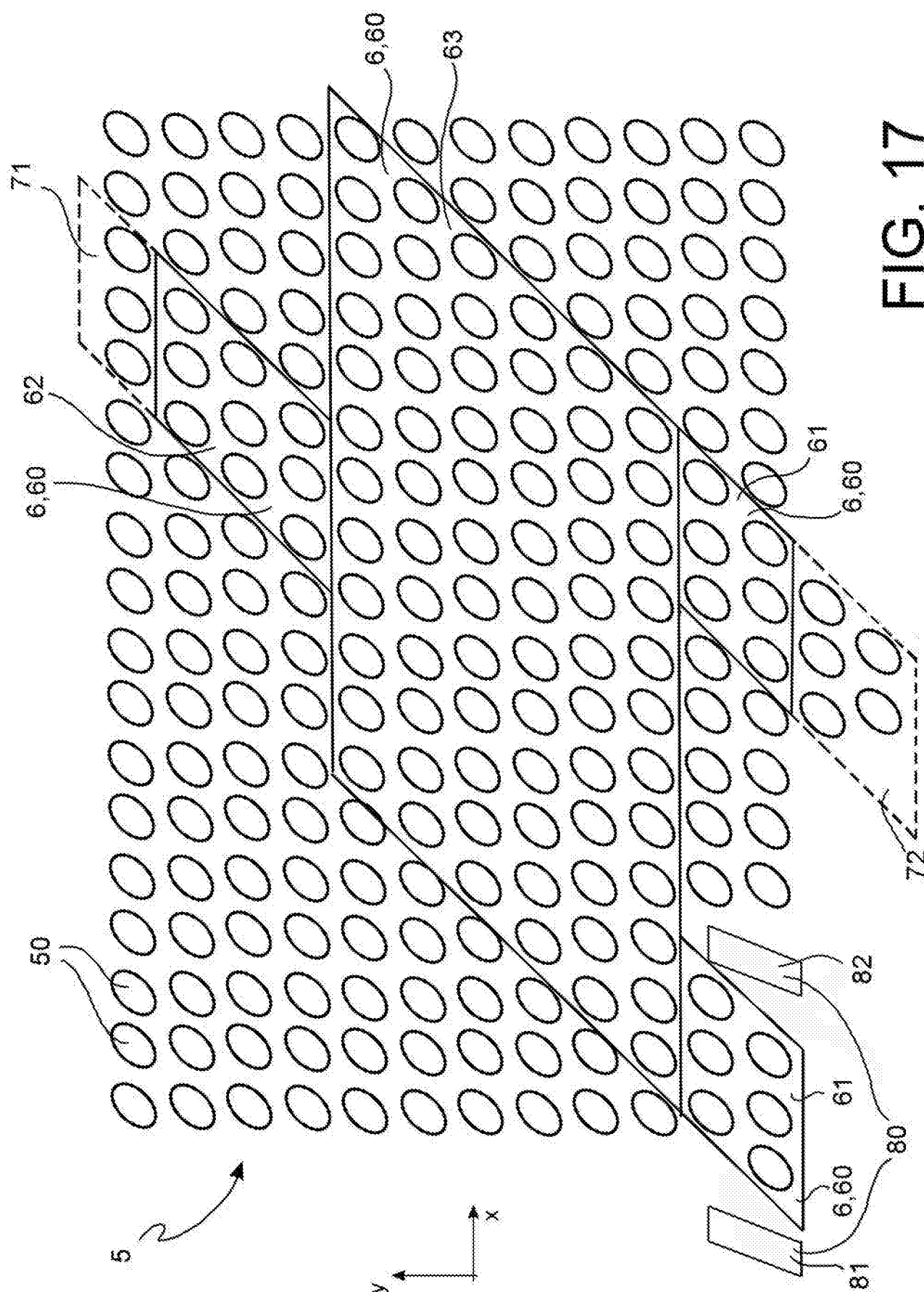


FIG. 17

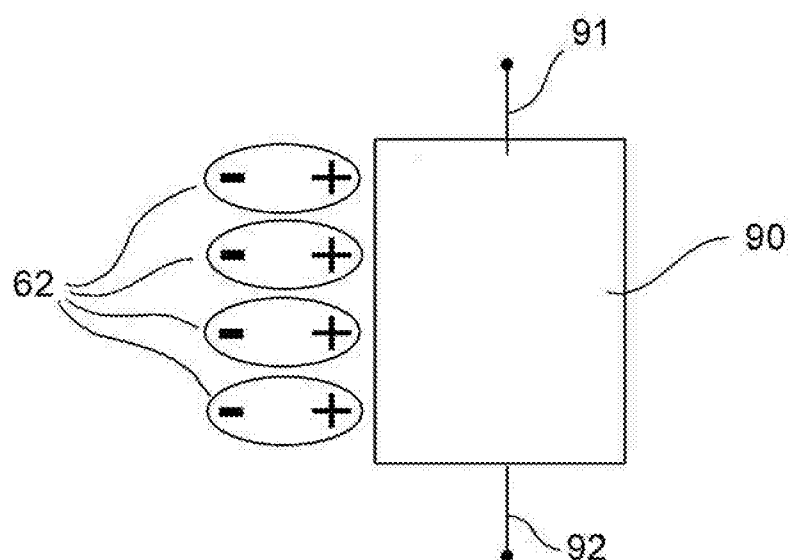


FIG. 18

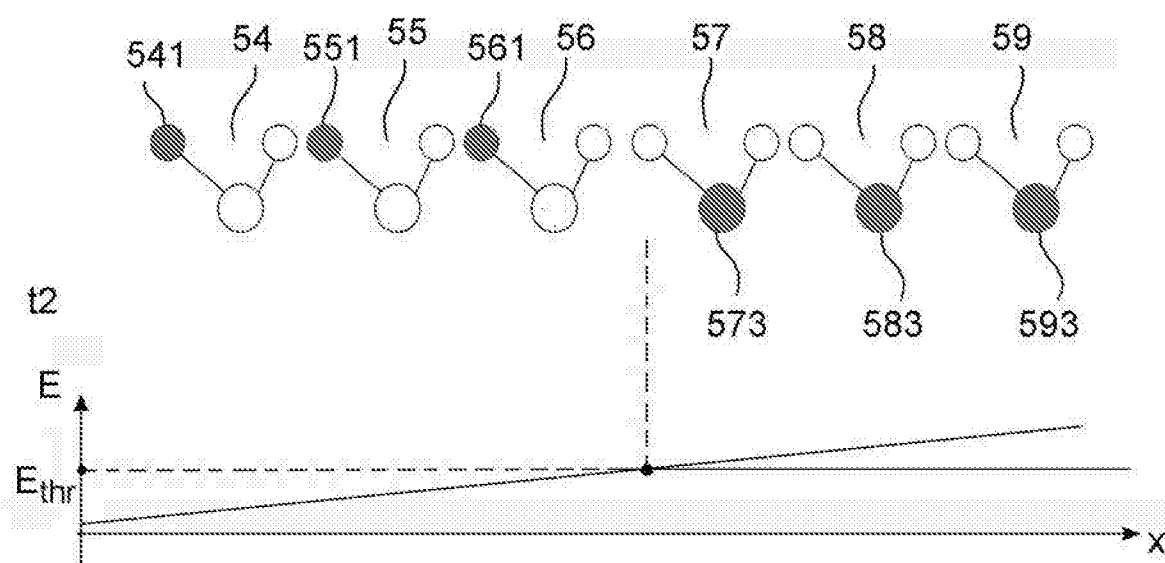
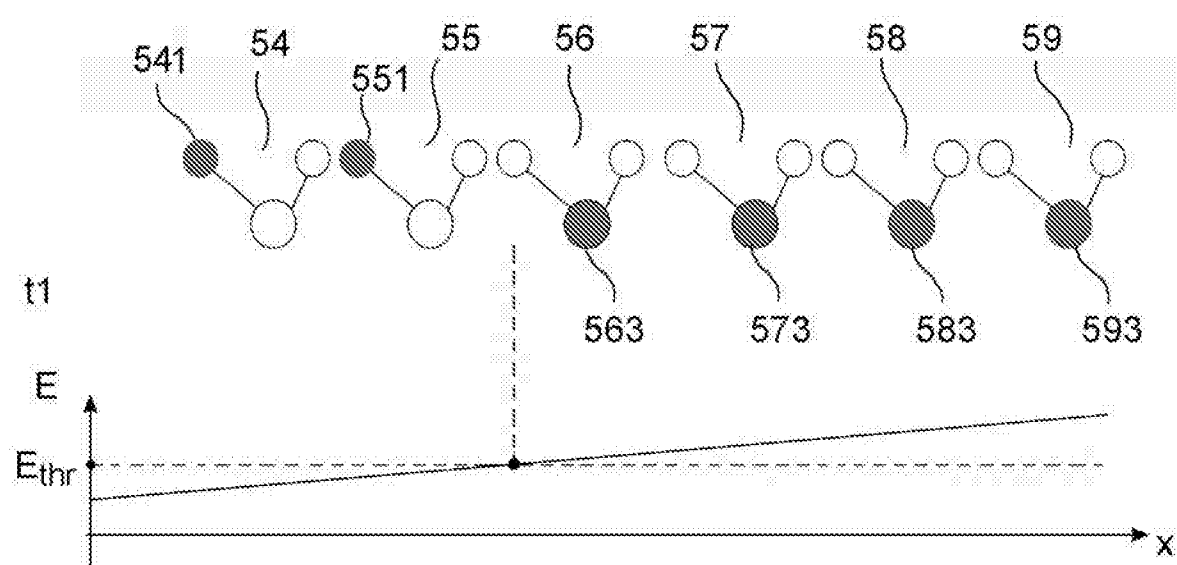
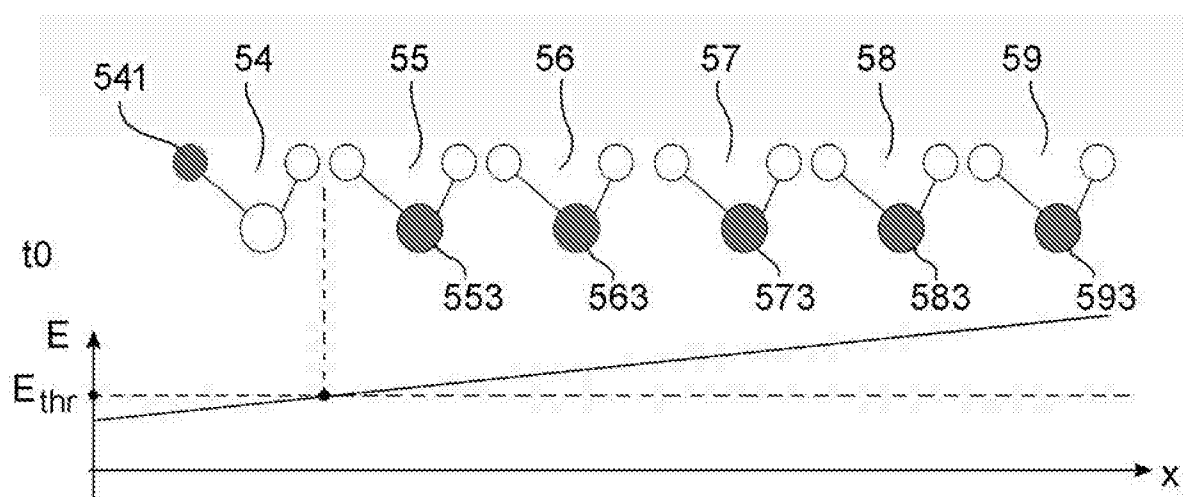


FIG. 19

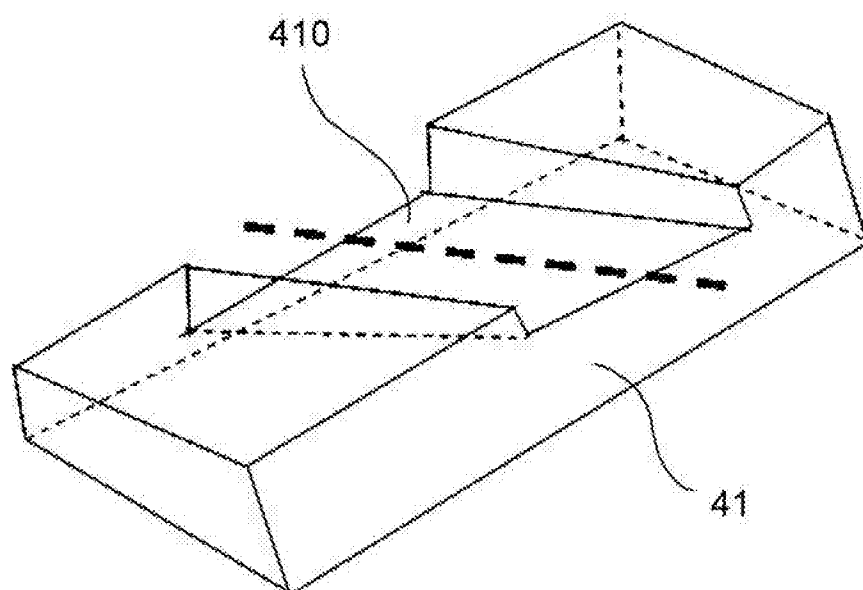


FIG. 20A

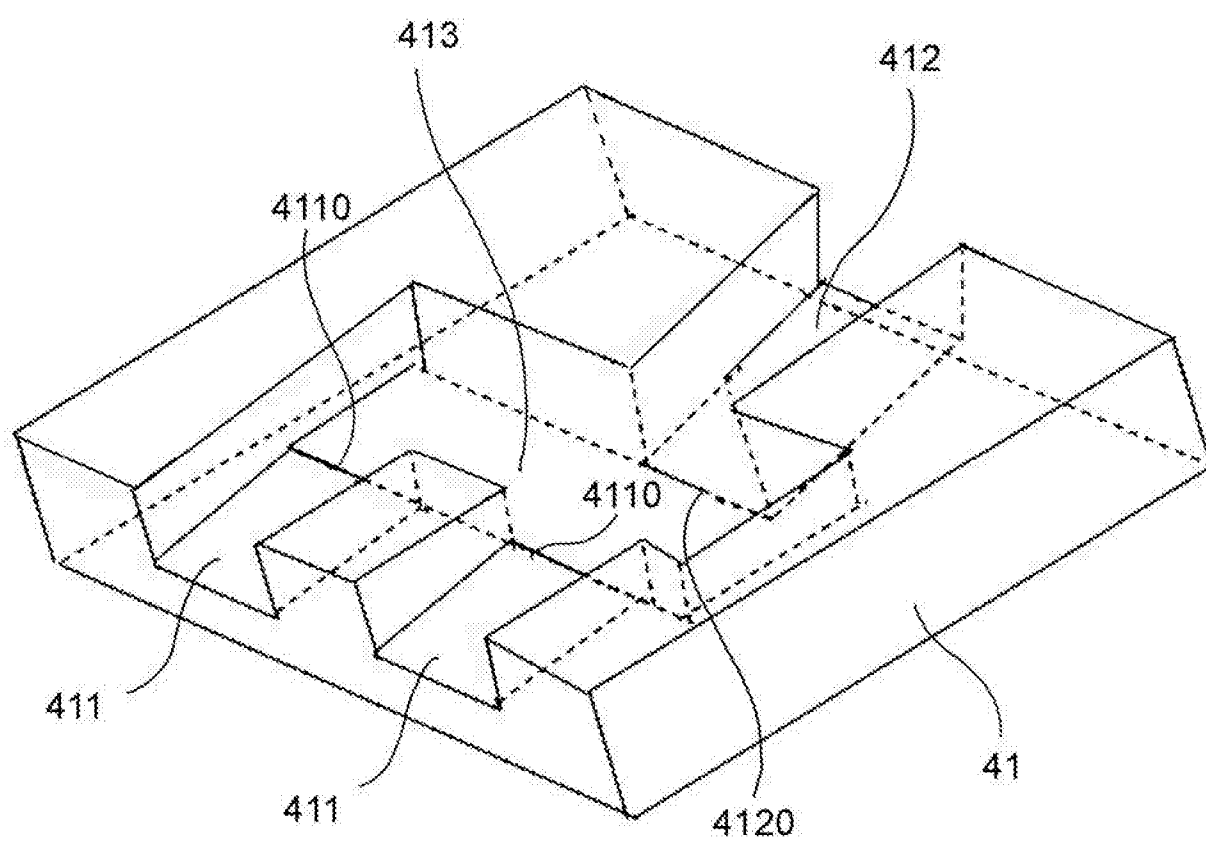


FIG. 20B

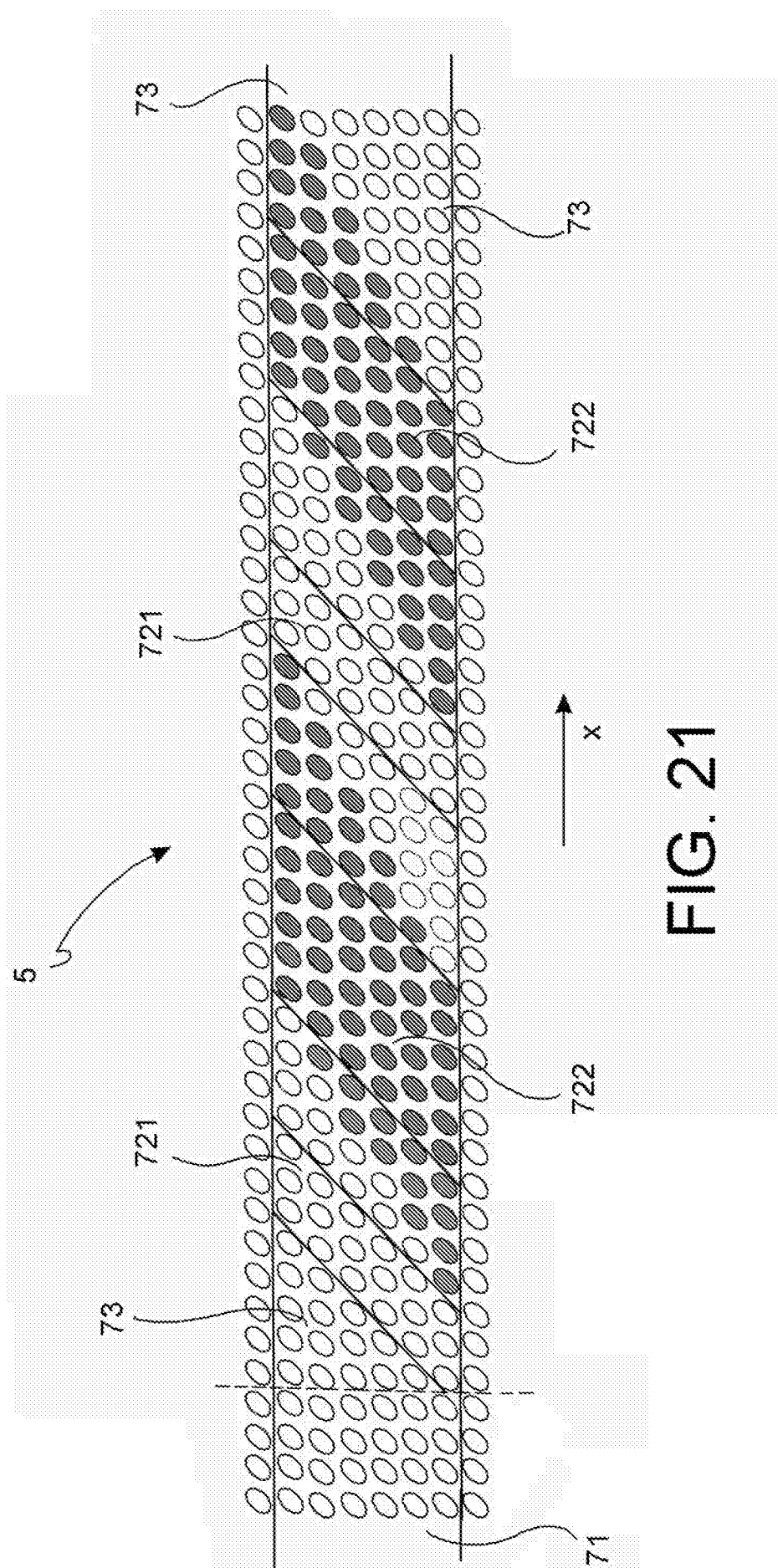


FIG. 21

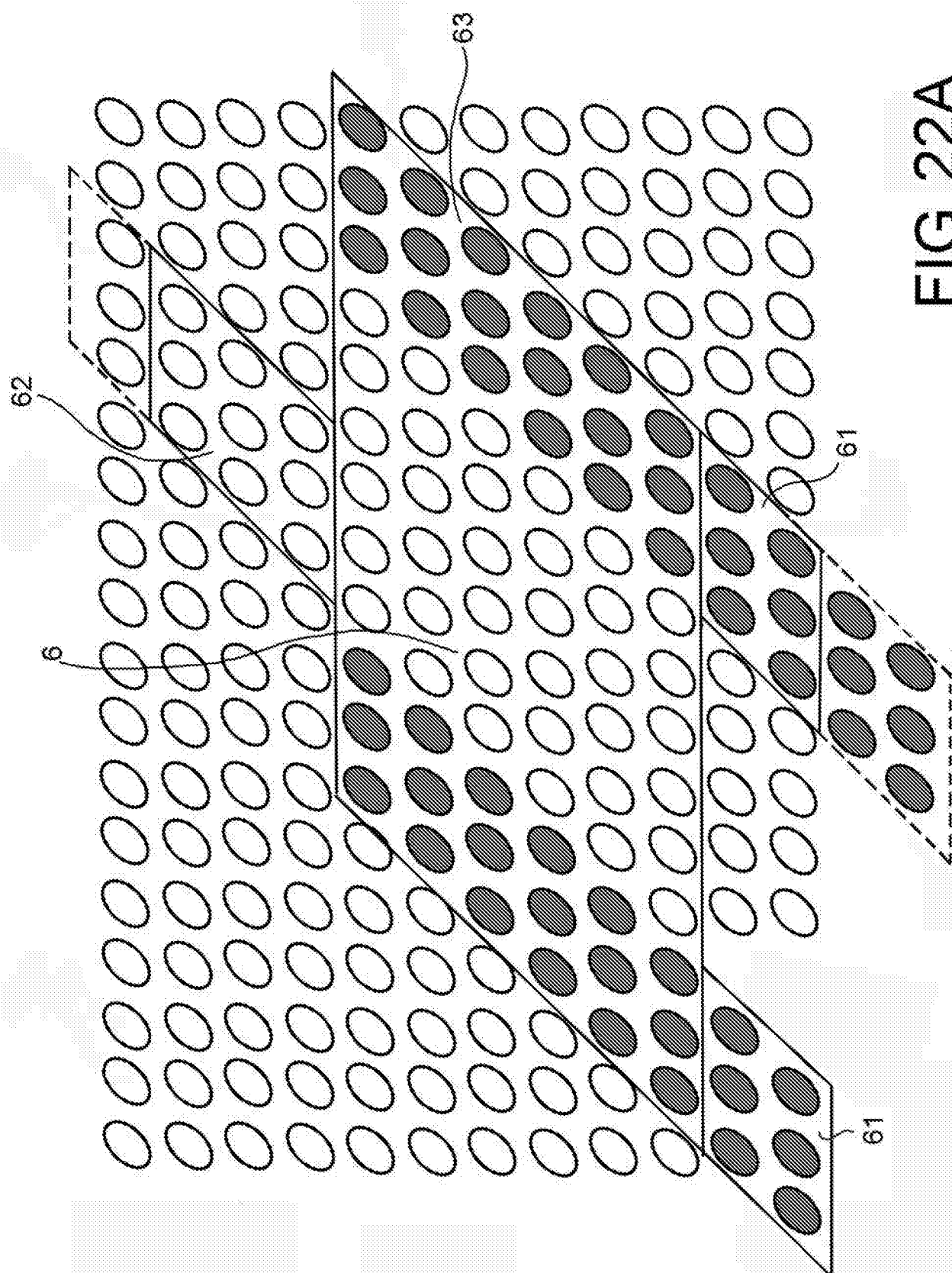


FIG. 22A

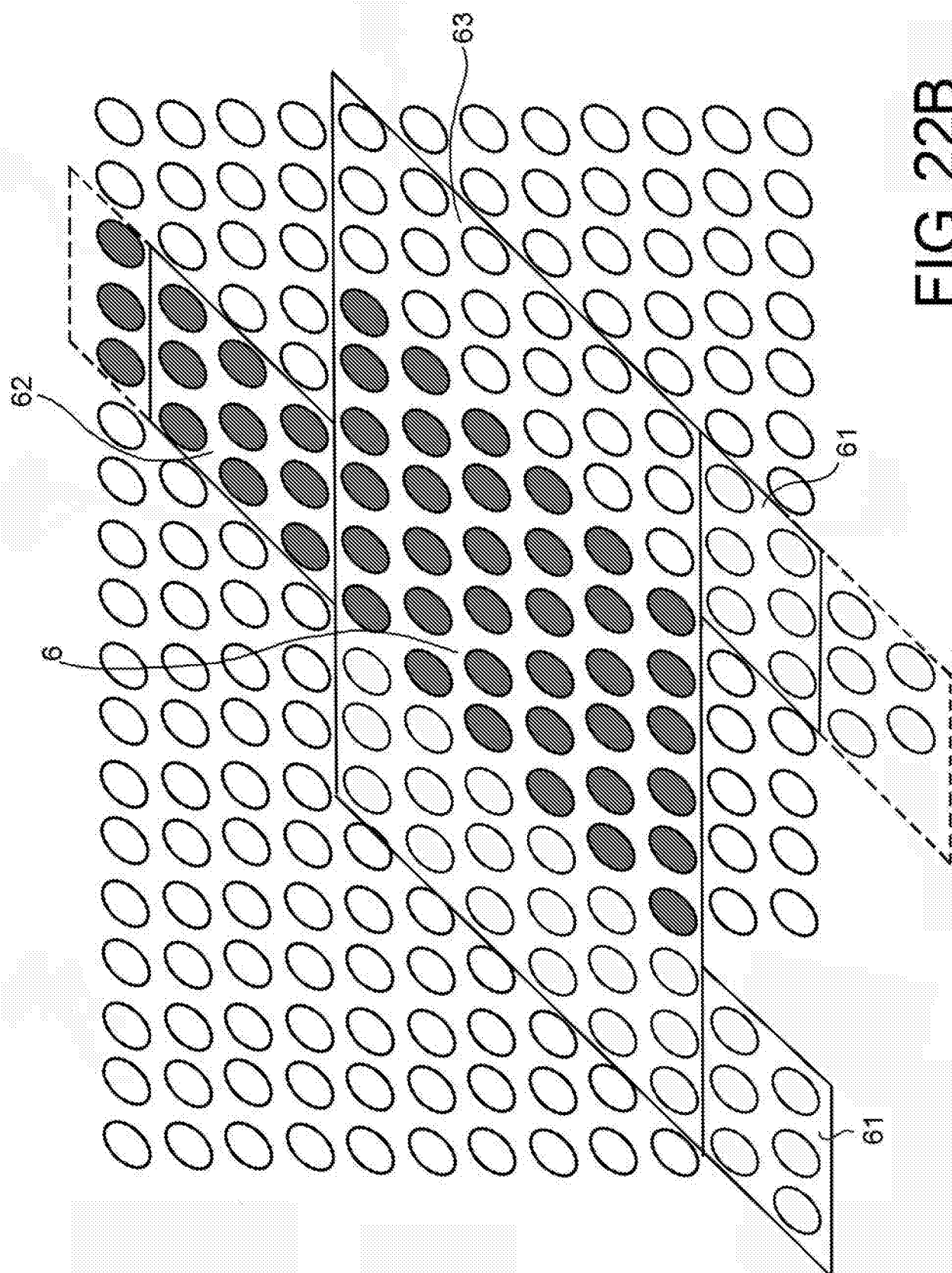


FIG. 22B



FIG. 22C

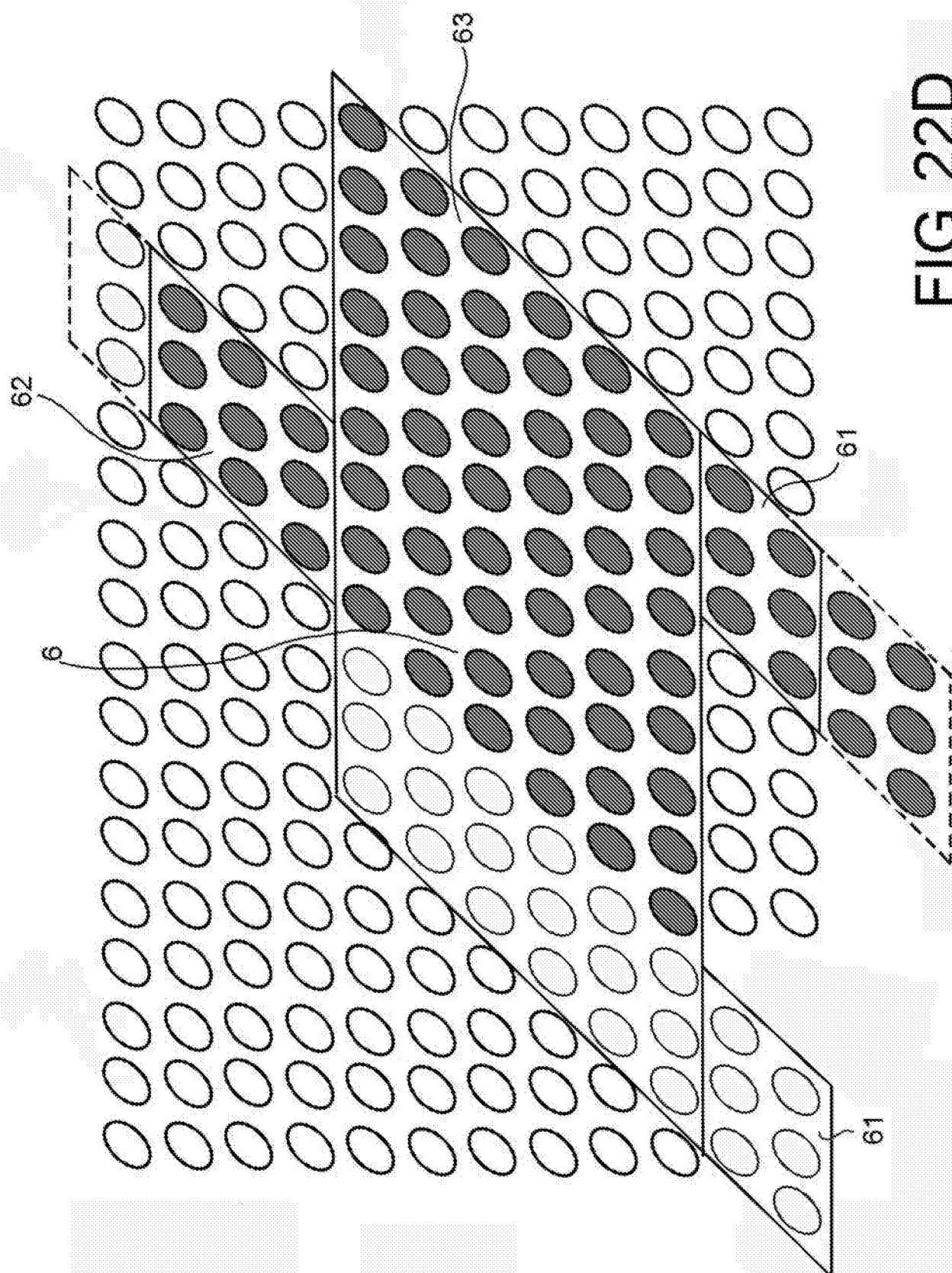


FIG. 22D

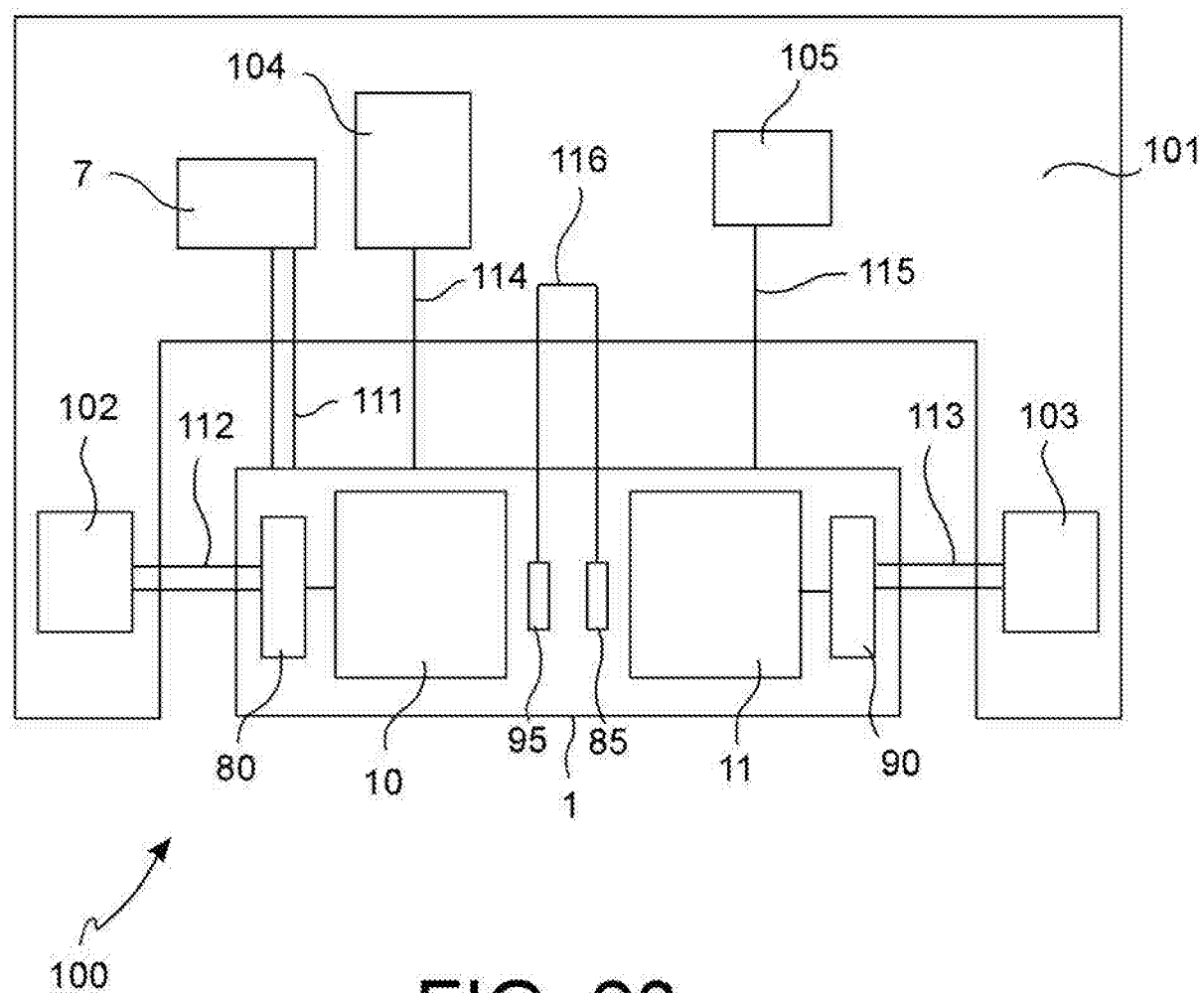


FIG. 23