



## (12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 35083 B1** (51) Cl. internationale : **H01J 1/32; H01J 49/14**
- (43) Date de publication : **02.05.2014**

- 
- (21) N° Dépôt : **35317**
- (22) Date de Dépôt : **22.10.2012**
- (71) Demandeur(s) : **RACHID ZAKARIA, ASSIF C N°260 MARRAKECH 46001 (MA)**
- (72) Inventeur(s) : **RACHID ZAKARIA**

---

(54) Titre : **IMPLANTATION IONIQUE PAR MULTIPLICATION D'IONS SECONDAIRES**

- (57) Abrégé : Un implanteur ionique dans lequel le courant ionique fourni par une source d'ions à metal liquide est amplifié à l'aide de plusieurs dynodes jetables hautement purifiées utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, les ions issus du processus d'amplification seront accélérés pour implanter une cible, la pénétration des ions dépend de la différence de potentiel entre la dernière dynode et la cible, un électroaimant génère un champ magnétique qui bloque la multiplication des électrons secondaires, pour multiplier et implanter les ions positifs chaque dynode est portée à une valeur de potentiel moins importante que la précédente, ce dispositif offre aussi la possibilité de neutraliser les charges qui se créent durant le processus d'implantation, il suffit de changer les paramètres du dispositif pour que seuls les électrons secondaires soient multipliés, ces électrons vont bombarder la cible, les deux modes de fonctionnement sont répétés avec une fréquence assez élevée.

## Implantation ionique par multiplication d'ions secondaires

### Abrégé

Un planteur ionique dans lequel le courant ionique fournit par une source d'ions à métal liquide est amplifié à l'aide de plusieurs dynodes jetables hautement purifiées utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, les ions issus du processus d'amplification seront accélérés pour planter une cible, la pénétration des ions dépend de la différence de potentiel entre la dernière dynode et la cible, un électroaimant génère un champ magnétique qui bloque la multiplication des électrons secondaires, pour multiplier et planter les ions positifs chaque dynode est portée à une valeur de potentiel moins importante que la précédente, ce dispositif offre aussi la possibilité de neutraliser les charges qui se créent durant le processus d'implantation, il suffit de changer les paramètres du dispositif pour que seuls les électrons secondaires soient multipliés. ces électrons vont bombarder la cible, les deux modes de fonctionnement sont répétés avec une fréquence assez élevée.

Rachid Zakaria 

**Domaine Technique auquel se Rapporte l'invention.**

02 MAI 2014

La présente invention concerne un dispositif d'implantation ionique, ce genre de dispositif est utilisé principalement dans l'industrie des semi-conducteurs et plus précisément le dopage des semi-conducteurs.

**Indication de l'état de la technique antérieure.**

L'implantation ionique est un procédé d'ingénierie des matériaux qui consiste à implanter les ions d'un matériau dans un autre solide.

L'implantation ionique est utilisée dans la fabrication des dispositifs à semi-conducteurs et pour le traitement de surface des métaux. Les ions permettent à la fois de changer les propriétés physiques et chimiques de la cible, un équipement d'implantation ionique se compose d'une source d'ions, d'un accélérateur de particules et d'une chambre pour la cible.

Les implanteurs ioniques actuellement utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs sont des implanteurs à source de plasma, dans la plupart des cas ce type d'implanteur est composé d'une source à cathode chaude capable de produire une grande variété d'ions monochargés, voire multichargés, sous la forme d'un faisceau. Une fois produit, ce faisceau d'ions est pré-accélééré par un champ électrique pour atteindre un aimant de déflexion permettant de séparer les isotopes d'une même variété d'ions. On applique un champ magnétique permettant de sélectionner la variété d'ion à implanter. Ces ions sont alors accélérés à l'énergie voulue par un deuxième champ électrique. Le faisceau obtenu est alors focalisé par un triplé électrostatique. Enfin, un système de balayage électrostatique permet d'implanter des cibles de grande surface de façon homogène.

Les implanteurs conventionnels utilisent diverses méthodes pour résoudre les problèmes de la charge d'espace et de la charge électrique qui se génère dans la couche en  $\text{SiO}_2$  des wafers, les techniques utilisées ont comme principe la neutralisation du faisceau d'ions, mais ces techniques sont difficiles à maîtriser.

Un implanteur moderne peut coûter plus de 2 millions de dollars et peut fournir des intensités de courant de quelques mA, le prix élevé des implanteurs à source de plasma augmente le coût de fabrication des dispositifs à semi-conducteurs et le coût de traitement des surfaces métalliques.

Le but principal de l'invention est de fournir un dispositif d'implantation ionique ayant un coût largement inférieur à celui des implanteurs conventionnels et en même temps capable de fournir des intensités de courant de quelques mA.

De plus, le dispositif proposé sera capable de résoudre les problèmes de la charge d'espace et de la charge électrique qui se génère sur la surface des wafers.

**Exposé de l'invention.**

Un implanteur ionique par multiplication d'ions secondaires amplifie le courant ionique fourni par une source primaire d'ions à l'aide d'une ou plusieurs dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, les ions résultant du processus d'amplification par émission d'ions secondaire seront utilisés pour implanter une cible, les cibles à implanter sont généralement des cibles métalliques ou semi-conductrices, mais d'autres cibles de diverses natures peuvent être utilisées.

D'une façon générale, les ions secondaires issus d'éléments électronégatifs (ayant une grande affinité électronique) ont une charge négative, et les ions secondaires issus d'éléments électropositifs (ayant un faible potentiel d'ionisation) ont une charge positive.

Le courant généré par la source primaire d'ions est amplifié en utilisant une série de dynodes dont le but est de transformer un ion initial issu de la source primaire d'ions en un paquet d'ions, chaque dynode est maintenue à une valeur de potentiel moins importante que la précédente dans le cas d'amplification d'ions positifs, la différence de potentiel entre une dynode et la dynode suivante produit un champ électrique qui accélère les ions et leur transmet suffisamment d'énergie pour générer un certain nombre d'ions secondaires sur la dynode suivante, ce mécanisme se poursuit de dynode en dynode, Finalement, chaque ion incident sera remplacé par un nombre très important d'ions au niveau de la dernière dynode .

Pour amplifier les ions négatifs, il faut que chaque dynode soit maintenue à une valeur de potentiel plus importante que la précédente, la multiplication d'ions négatifs peut être utilisée dans des applications comme l'implantation de l'azote, mais un tel dispositif présentera beaucoup d'inconvénients et n'offrira pas la possibilité de fonctionner en mode neutralisation de charge, de plus la majorité des éléments implantés ont une électronégativité relativement faible.

Afin d'éviter la multiplication des électrons secondaires, il est indispensable d'appliquer un champ magnétique ayant un sens presque parallèle à la surface des dynodes, ce champ modifiera fortement la trajectoire des électrons et bloquera leurs passages de dynode en dynode, par contre la trajectoire des ions ne sera que faiblement modifiée à cause de leurs masses, ce champ magnétique peut être obtenu à l'aide d'un aimant ou d'un électroaimant ou bien à l'aide d'une ou plusieurs bobines parcourues par un courant électrique.

L'amplification du courant ionique rendra les implanteurs par émission secondaire moins coûteux et plus facile à manipuler comparés aux implanteurs conventionnels, car ils rendent possible l'utilisation de sources d'ions produisant un faible courant comme les sources d'ions à métal liquide nommée LMIS ,de plus la charge d'espace au long de la trajectoire des ions sera partiellement compensée par la charge des électrons secondaires .

Toutes les composantes de l'implanteur proposé doivent être placées dans un vide poussé ou partiel pour ne pas freiner le mouvement des ions.

Pour assurer l'amplification du courant fournit par la source primaire d'ions, il est indispensable d'utiliser des matériaux dont le rendement de pulvérisation est supérieur à un quand ces

derniers sont bombardés par des ions dont l'énergie cinétique en électrons volt est égale à la différence de potentiel entre deux dynodes successives.

La différence de potentiel entre deux dynodes peut être réglée pour obtenir le rendement de pulvérisation voulu, mais cette différence de potentiel aura une limite maximale à cause de l'échauffement des dynodes.

les dernières dynodes doivent être faites du ou des matériaux qu'on veut implanter dans la cible.

Il est préférable que toutes les dynodes soient faites du matériau ou des matériaux qu'on veut implanter dans la cible pour éviter de la contaminer.

Contrairement aux implanteurs conventionnels les implanteurs par émission d'ions secondaire n'ont pas besoins d'un aimant de déflexion pour sélectionner les espèces à implanter, le coût de fabrication sera alors réduit, mais les dynodes doivent être hautement purifiées pour ne pas contaminer la cible.

Il est nécessaire de remplacer les dynodes par des nouvelles dynodes de façon périodique, car les atomes qui constituent les dynodes sont arrachés continûment soit pour participer dans le processus d'amplification par émission secondaire soit pour être directement implanté dans la cible.

Chaque dynode doit être maintenue à un potentiel moins important que celui de la précédente, ainsi la dynode qui en face de la source primaire d'ions sera portée à un potentiel supérieur au potentiel de la dynode qui la suit. (dans le cas de multiplication d'ions positifs) .

Les ions issus de la source primaire d'ions doivent avoir une énergie suffisante pour générer des ions secondaires sur la première dynode, pour avoir ce résultat, il est préférable de porter la première dynode à une valeur de potentiels inférieurs au potentiel utiliser pour extraire les ions dans le cas d'ions positifs , ou une valeur de potentiel supérieur au potentiel utiliser pour extraire les ions négatifs .

Les dynodes seront branchées à un ou plusieurs générateurs de tension, si un seul générateur alimente toutes les dynodes, il est obligatoire d'utiliser un diviseur de tension pour assurer la présence d'une différence de potentiel entre les différentes dynodes.

Les ions issus du processus d'amplification seront accélérés à l'aide d'un champ électrique pour bombarder la cible avec une énergie donnée.

Les implanteurs par multiplication d'ions secondaires offrent la possibilité de neutraliser la charge électrique qui se génère sur les surfaces isolantes des wafers, pour avoir cette possibilité, il est nécessaire que le champ magnétique soit généré à l'aide d'un électroaimant (ou toute source de champ magnétique variable).

Pour neutraliser la charge des ions, il suffit de couper le courant qui alimente l'électroaimant et de changer le potentiel appliqué sur les dynodes pour multiplier les électrons secondaires, dans ce cas de fonctionnement chaque dynode sera maintenue à une valeur de potentiel plus

importante que la précédente et chaque ion issu de la source primaire sera remplacé par un paquet d'électrons, on devra également changer l'orientation et le module du champ électrique chargé d'accélérer les ions pour pouvoir accélérer les électrons de façon à ce qu'ils neutralisent la charge générée sur les surfaces isolantes du wafer à implanter.

Il existe donc deux modes de fonctionnement pour un implantateur par multiplication d'ions secondaires le premier consiste à implanter des ions dans la cible et l'autre consiste à neutraliser la charge générée par l'implantation des ions en bombardant la cible par des électrons, pour implanter des wafers, on va alterner les deux modes de fonctionnement, ainsi dans un premier temps on va implanter une dose d'ions dans la cible et après on va bombarder la cible avec des électrons pour neutraliser la charge générée durant le fonctionnement en mode implantation, et ainsi de suite, (l'ordre des deux modes n'est pas important).

Pour alterner le fonctionnement de l'implanteur les dynodes seront alimentées par un générateur de tension rectangulaire, la tension varie de façon à ce que l'orientation et le module du champ électrique entre les dynodes changent en fonction du mode de fonctionnement voulu.

Il est aussi possible de neutraliser la charge générée durant le fonctionnement en mode implantation à l'aide d'une source d'électrons, les électrons générés par cette source seront utilisés pour bombarder la cible dans le mode neutralisation de charge.

Il est évident qu'on n'aura pas besoin de neutraliser la charge des ions pour des cibles métalliques ou semi-conductrices non protégées par des couches isolantes, car celle-ci sera neutralisée directement par les électrons de la cible et de la masse.

Afin de protéger les dynodes des champs électriques extérieurs ces dernières seront placées à l'intérieur d'un conducteur creux ouvert du côté de la source primaire d'ions et du côté de la cible, ce conducteur sera préférablement relié avec la dernière dynode l'aide d'un fil électrique.

La cible à implanter est soit déposée sur une plaque métallique reliée à un générateur soit directement reliée à un générateur si la cible est conductrice.

Pour des matériaux ayant une conductivité électrique intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, il est possible que la série de dynodes soit remplacée par une dynode continue, la dynode continue sera parcourue par un courant électrique afin de créer une différence de potentiel le long de la dynode, les dynodes continues sont généralement sous forme de cylindre creux, mais ils peuvent avoir d'autres géométries.

Contrairement aux dynodes discrètes une dynode continue s'alimente seulement en deux points (+ et -).

Quand la différence de potentiel entre les deux extrémités d'une dynode continue est assez importante chaque ion issu de la source primaire d'ions sera remplacé par un paquet d'ions à la sortie de la dynode continue par un processus similaire à celui utilisé dans le cas des dynodes discrètes sauf qu'ici l'émission d'ions secondaires se produit sur les parois de la dynode continue.

### Brève description des dessins.

On décrira dans l'exposé détaillé, à titre d'exemples non limitatifs, trois formes d'exécution de la présente invention, en référence aux dessins annexés sur lesquels :

-La **figure 1** présente un schéma simplifié du premier mode de réalisation proposé pour l'invention.

-La **figure 2** est une vue simplifiée en 3D d'un bloc comprenant 15 dynodes.

-La **figure 3** présente une vue de haut simplifiée du bloc contenant les dynodes et de l'électroaimant (ou de l'aimant permanent).

-La **figure 4** illustre le mouvement relatif entre le bloc générant les ions à implanter et le support de la cible.

-La **figure 5** présente une source d'ions à métal liquide.

-La **figure 6** présente le schéma d'alimentation électrique dans le cas où la cible à implanter est de surface conductrice.

- Les figures **7,8 et 9** présentes les schémas d'alimentation électrique dans le cas où la surface de la cible à implanter est isolante.

-La **figure 10** donne des exemples de la variation de plusieurs grandeurs en fonction du temps dans le cas où la surface de la cible à implanter est isolante.

La courbe **(A)** donne un exemple de la variation de la tension appliquée sur la deuxième et la troisième dynode avec  $\Delta v = V(Dy2) - V(Dy3)$ , dans le mode implantation  $\Delta v > 0$  alors que dans le mode neutralisation de charge  $\Delta v < 0$ .

La courbe **(B)** donne un exemple la variation de la tension appliquée sur le support de la cible.

La courbe **(C)** donne un exemple la variation du courant électrique alimentant l'électroaimant.

-La **figure 11** présente une surface avant pulvérisation **(A)** et après pulvérisation **(B)**.

-La **figure 12** donne la trajectoire des ions et des électrons d'une dynode **(A)** vers une dynode **(B)** quand le dispositif fonctionne en mode implantation, (les échelles ne sont pas proportionnelles).

-La **figure 13** présente le schéma d'un autre mode de réalisation de l'invention qui utilise une dynode continue.

-La **figure 14** présente le schéma d'un mode de réalisation comprenant un accélérateur électrostatique et un système de neutralisation de charge.

### Exposé détaillé de différents Modes de réalisation de l'invention.

#### Premier mode de réalisation

La **figure 1** présente un schéma simplifié du mode de réalisation le plus évident de l'invention, le dispositif proposé comprend un aimant ou un électroaimant (5), un support métallique pour la cible (9), un support mobile (6) actionné à l'aide d'un moteur électrique (7), une source d'ions à métal liquide (1), plusieurs dynodes discrètes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires (3), une cage protectrice (4), (10) est le flux des particules chargées (ions ou électrons), (2) présente la cathode d'extraction du LMIS, (8) présente la cible à implanter.

Dans ce mode de réalisation, on ne discutera que le cas de multiplication d'ions positifs.

La source d'ions à métal liquide joue ici le rôle de la source primaire d'ions, la source primaire d'ions est tout objet ou dispositif pouvant fournir des ions, il est possible d'utiliser d'autres sources d'ions comme les sources à plasma, le courant généré par la source primaire d'ions sera amplifiés à l'aide des dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires.

Une dynode utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires est une électrode sur laquelle un faisceau d'ions peut tomber, provoquant l'émission d'un certain nombre d'ions par le phénomène d'émission d'ions secondaires.

Les dynodes sont numérotées de la façon suivante, la première dynode est la dynode qui est en face de la source primaire d'ions et la dernière dynode est la dynode qui est en face de la cible.

Les dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires et la source primaire d'ions constituent la partie générant les ions à implanter.

La cage protectrice est un objet métallique creux, les dynodes sont placées à l'intérieur de ce conducteur pour les protéger des champs électriques indésirables.

Les dynodes peuvent avoir diverses formes géométriques par exemple La **figure 2** donne une description simple d'un bloc comprenant 15 dynodes discrètes, les premières dynodes sont des quarts de cylindre creux tandis que la dernière dynode est un demi-cylindre creux.

Dans la **figure 3** (11) présente le bloc contenant les dynodes et (12) présente un aimant ou un électroaimant en U.

Contrairement aux implanteurs conventionnels qui utilisent un système de balayage électrostatique pour implanter de façon homogène les cibles de grande surface, le dispositif proposé balaye la cible en bougeant le bloc produisant les ions et les électrons (13) par un mouvement d'aller vient par rapport à la cible, et en tournant le support de la cible (14) et en même temps la cible avec, le support de la cible est actionné à l'aide d'un moteur électrique.

La partie générant les ions à implanter peut être actionnée à l'aide de plusieurs types d'actionneur comme les moteurs électriques et les actionneurs électromagnétiques.

La **figure 5** présente une source d'ions à métal liquide, ces sources sont basées essentiellement sur la présence d'une goutte de métal liquide qui prend la forme d'un cône (17) nommé cône de Taylor et d'un champ électrique très intense.

Pour extraire les ions positifs(18) du cône de Taylor(17) il faut appliquée une tension -EXTR sur la cathode d'extraction(16).

Les sources d'ions à métal liquide sont industrialisées et commercialisées depuis plusieurs décennies, la plupart des sources à métal liquide utilisent des métaux à faible point de fusion et à tension de vapeur relativement peu élevée, comme l'indium le césium et principalement le gallium, la durée de vie de ce genre de dispositifs dépend principalement de deux facteurs, la quantité de métal présente dans le réservoir(15) et l'intensité du courant émis par la source, par exemple, une Source de gallium peut fonctionner 4000 h si elle débite un courant de 1  $\mu$ A, la



même source ne fonctionnera que 2000 h si elle débite un courant de  $2 \mu\text{A}$ , c'est pour cette raison qu'on exprime la durée de vie des sources d'ions à métal liquide en  $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ .

On a intérêt à choisir des sources pouvant fournir des faibles intensités de courant et ayant des durées de vie en  $\mu\text{A}\cdot\text{h}$  assez importante, car l'intensité du courant initiale sera amplifiée pour éteindre des valeurs permettant de faire une implantation rapide des cibles.

Les sources les plus réponsus sont ceux du gallium, ces sources peuvent avoir des durées de vie allant jusqu'à  $5000 \mu\text{A}\cdot\text{h}$ , malheureusement ils ne peuvent pas fournir des intensités de courant inférieur à  $400 \text{ nA}$ .

Par contre, les sources à mercure ou à césium peuvent fournir respectivement des intensités de  $10 \text{ nA}$  et  $42 \text{ nA}$ , une source de césium ayant une durée de vie de  $1000 \mu\text{A}\cdot\text{h}$  peut fonctionner presque 1000 jours sans arrêt.

Les ions issus du LMIS sont accélérés par la cathode extractrice pour éteindre une énergie comprise entre 5 et 10 Kev.

Le dispositif proposé procède deux modes de fonctionnement différents, un mode « implantation » dans lequel une dose d'ions  $\sigma$  est implantée dans la cible, et un mode « neutralisation de charge » dans lequel la charge positive générée sur les surfaces isolantes de la cible à implanter est neutralisée à l'aide d'un bombardement électronique.

Si la cible à implanter est une cible métallique ou semi-conductrice non protégée par des couches isolantes, le dispositif ne fonctionnera que dans le mode « implantation », on peut utiliser un aimant permanent pour générer le champ magnétique, les dynodes et la cible seront alimentées par une source de tension constante capable de fournir des tensions élevées, pour assurer la présence d'une différence de potentiel entre les dynodes, on utilise un diviseur de tension **Figure 6**, les valeurs des résistances  $R_i$  et  $R_{\text{cible}}$  doivent être réglées pour que la première dynode ait un potentiel inférieur au potentiel d'extraction, pour assurer la présence d'une différence de potentiel suffisante entre deux dynodes et pour assurer la pénétration des ions dans la cible .

Si on veut implanter un wafer ou toute cible ayant une surface isolante, La première dynode **Dy1** sera portée à un potentiel négatif constant  $-(V + EXTR)$  **Figure 7**, où  $EXTR$  est la valeur absolue du potentiel d'extraction utilisée dans le LMIS et  $V$  une valeur de potentiel positif.

Les autres dynodes seront alimentées par un générateur d'onde rectangulaire reliée avec un diviseur de tension **Figure 8**, la différence de potentiels entre deux dynodes change de signe en fonction du mode de fonctionnement **Figure 10-A**.

Le support de la cible **S-cible** sera alimenté par un deuxième générateur d'onde rectangulaire capable de fournir des tensions élevée **Figure 9**, la **Figure 10-B** donne un exemple de la variation de la tension appliquée sur le support de la cible.

Pour assurer la pénétration des ions dans la cible durant le fonctionnement en mode « implantation », il faut que la différence de potentiel entre la dernière dynode et le support de la cible soit assez élevée.

Pour assurer la neutralisation de la charge dans le mode « neutralisation de charge », il faut que la différence de potentiel entre la dernière dynode et la cible soit presque nulle pour que les électrons secondaires générés au niveau de la dernière dynode bombardent la cible avec une faible énergie.

Pour faire alterner le fonctionnement du dispositif, on utilisera un électroaimant en U, l'intensité du champ magnétique générée par l'électroaimant est donnée par la relation:

$$B = Cte \times I$$

Où Cte est une constante qui dépend de l'électroaimant et  $I$  est l'intensité de courant qui traverse les enroulements de l'électroaimant.

La **figure 10-C** décrit la variation du courant d'alimentation de l'électroaimant, dans le mode de fonctionnement « implantation » l'électroaimant sera alimenté en électricité (19), mais le courant d'alimentation sera coupé dans le fonctionnement en mode « neutralisation de charge »(20), il faut aussi ajouter un courant de désaimantation (21) au début du mode « neutralisation de charge ».

Si on a besoin d'une fréquence de répétition élevée des deux modes de fonctionnement, il est préférable d'utiliser deux bobines « de Helmholtz » à la place de l'électroaimant, car les électroaimants peuvent avoir des temps de réponse relativement lents .

Si la cible à implanter est un wafer, il faut changer le mode de fonctionnement du dispositif avant que le champ électrique appliqué sur les couches isolantes présentes sur la surface du wafer éteint le seuil de rigidité diélectrique de l'une des couches présentes sur la surface de ce wafer .

A titre d'exemple, une dose d'environ  $3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ( $1.9 \times 10^{13} \text{ ions}/\text{cm}^2$ ) est suffisante pour avoir la rupture de la couche en  $\text{SiO}_2$  présente sur la surface des wafers, supposant que la partie fournissant les ions destinés à la procédure d'implantation est immobile par rapport à la cible et que le dispositif fournit une densité de courant ionique de  $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$  dans le fonctionnement en mode « implantation », Dans ce cas, il ne faut pas faire fonctionner le dispositifs en mode « implantation » pour plus de  $3 \text{ ms}$  (trois milliseconde) de façon continue, si d'autres couches isolantes sont déposées sur la surface des wafers à implanter, il faut régler les paramètres du dispositif (fréquence de répétition des deux modes de fonctionnement) pour que les wafers ne soient pas endommagés par le claquage des couches isolantes .

La fréquence de répétition des modes de fonctionnement sera limitée à quelques KHZ à cause du temps de transition des ions.

Quelques soit la charge créée au niveau des couches isolantes présentes dans la surface des wafers, la différence de potentiel entre la cible et la dernière dynode est imposée par les différents générateurs électriques alimentant le dispositif . (phénomène d'influence électrostatique).

La neutralisation de charge avec ce dispositif est beaucoup plus simple à contrôler comparée aux méthodes actuellement utilisées dans les implantateurs conventionnels, en effet l'intensité du courant et l'énergie des électrons peut être contrôlée en jouant sur les tensions fournies par les générateurs.

Pour des raisons techniques la distance entre la cible et la cage sera de quelques mm, de même pour la distance entre les dynodes successives.

Dans tous les cas discutés, la cage métallique sera reliée à la dernière dynode à l'aide d'un fil conducteur pour éviter que les particules chargées soient accélérées vers cette cage.

**Fonctionnement en mode implantation :**

Dans ce mode de fonctionnement chaque dynode sera portée à une valeur de potentiel moins importante que la précédente.

Quand la première dynode est bombardée par un ion primaire(22), un certain nombre d'ions secondaires(23) sera généré, ce nombre dépend de plusieurs facteurs les plus importants sont d'une part le matériau qui constitue la surface de la dynode, et d'autre part l'énergie, la nature, et l'angle d'incidence des ions initiaux.

Le rendement de pulvérisation Y est le nombre moyen d'ions secondaires(22) généré par un ion primaire(23) il est obtenu par la relation suivante :

$$Y = \frac{\text{Nombre d'ions secondaires}}{\text{Nombre d'ions primaires}}$$

Le **Tableau 1** donne le rendement de pulvérisation de sept éléments bombardée par différents ions ayant une énergie de 1 KeV et une incidence de 0° « 500 eV pour l'arsenic et l'antimoine ».

cible	Ga <sup>+</sup>	Al <sup>+</sup>	Ne <sup>+</sup>	Ar <sup>+</sup>	Kr <sup>+</sup>
Al	1.565	1.37	1.13	1.94	1.53
B	0.82	1.212	1.174	1.12	0.683
Fe	2.04	1.39	0.84	1.34	1.44
Cu	3.497	2.264	2.75	3.64	3.62
Pb	3.257	1.825	1.425	4.2	3.442
As	-	-	-	4.40	-
Sb	-	-	-	2.83	-

**Tableau 1**

Le **Tableau 2** donne le rendement de pulvérisation a une incidence 0° de l'aluminium bombardé par des ions d'aluminium **Al+** ayant des énergies cinétiques allant de 250 eV à 2000 eV .

Énergie Cinétique en (eV)	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$Y_0$	0.563	0.941	1.188	1.370	1.511	1.626	1.722	1.804

Tableau 2

Le rendement de pulvérisation varie fortement en fonction de l'angle d'incidence des ions primaires, le rendement de pulvérisation avec un angle d'incidence  $\theta \neq 0$  est généralement supérieur au rendement avec une incidence de  $0^\circ$ , le rapport  $\frac{Y(\theta)}{Y(0)}$  Peut-être supérieur à cinq pour des angles d'incidences spécifiques.

Les dynodes sont bombardées avec des angles incidences aléatoires, le rendement de pulvérisation moyen  $Y_m$  sera supérieur au rendement de pulvérisation avec une incidence de  $0^\circ$ .

Les ions secondaires générer au niveau de la première dynode seront accélérés pour générer un nombre plus grand d'ions secondaire sur la deuxième dynode, les ions secondaires générer sur la deuxième dynode seront à leur tour accéléré pour générer un nombre encore plus grand sur la troisième dynode et ainsi de suite, on parle alors d'un processus d'amplification par émission d'ions secondaires nommée aussi processus de multiplication par émission d'ions secondaires.

Si le rendement de pulvérisation moyen est le même sur toutes les dynodes le courant ionique fournit par la source primaire d'ions sera amplifié par un facteur  $G$  appelée le gain d'amplification ce gain est donnée par la relation :

$$G = Y_m^n$$

Où  $n$  est le nombre de dynodes

L'intensité du courant ionique utilisée pour implanter la cible est donnée par la relation

$$I_{ions} = I_p \times G$$

Où  $I_p$  est l'intensité du courant fournie par la LMIS

Les ions résultants seront accélérés pour finalement être implanté dans la cible, la différence de potentiel entre la dernière dynode et la cible détermine la profondeur de pénétration des ions.

Afin de résoudre le problème de l'échauffement des dynodes causé par la multiplication d'électrons secondaires, un aimant ou électroaimant en U est utilisé pour créer un champ magnétique dont les lignes de champ sont presque parallèles à la surface des dynodes.

Le champ magnétique courbera la trajectoire des particules chargées, le rayon de courbure est proportionnel à la masse des particules, ainsi si on néglige les vitesses initiales, le rayon de courbure d'un ion d'aluminium  $Al^+$ , sera environ 50 000 fois supérieur à celui d'un électron.

Le mouvement des électrons de dynode en dynode sera alors impossible, chaque électron secondaire fera un demi-tour et retournera à la dynode où il a été générer **Figure 12**, l'intensité

minimale du champ magnétique utilisé dépend de plusieurs facteurs comme la différence de potentiel entre deux dynodes successives et la distance qui sépare les dynodes.

Il est aussi possible d'utiliser des bobines pour générer le champ magnétique au lieu de l'électroaimant.

### Fonctionnement en mode neutralisation :

Dans ce mode de fonctionnement chaque dynode sera portée à une valeur de potentiel plus importante que la précédente et la cible sera portée à un potentiel proche ou égal à celui de la dernière dynode, Le courant alimentant l'électroaimant sera coupé de façon à ce que le champ magnétique soit nulle à l'intérieur du bloc contenant les dynodes, le mouvement des électrons ne sera plus bloqué .

Chaque ion issu de la source primaire sera remplacé par un paquet d'électrons au niveau de la dernière dynode, ces électrons bombarderont la cible avec une énergie de quelques eV dans le but de neutraliser la charge créée durant le fonctionnement en mode implantation.

L'intensité du courant électrique généré pour neutraliser la charge est donnée par la relation suivante :

$$I = Y_e^n \times I_p$$

$Y_e$  : est le nombre moyen d'électrons secondaires générés par chaque électron primaire

((On suppose que  $Y_e$  est le même sur toutes les dynodes))

La différence de potentiel entre les dynodes est réglée pour obtenir un courant pouvant neutraliser la charge générée durant le fonctionnement en mode implantation.

Il est aussi possible de neutraliser la charge générée durant le fonctionnement en mode implantation à l'aide d'une source d'électrons, les électrons générés par cette source vont bombarder la cible durant le fonctionnement en mode neutralisation de charge, plusieurs types de source d'électrons peuvent être utilisés.

### Deuxième mode de réalisation

La **figure 13** présente un autre mode de réalisation possible de l'invention comprenant une source d'ions à métal liquide (24), une dynode continue utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires (25), un support métallique pour la cible (27) et un générateur électrique (28) ,(26) est la cible à implanter, pour bloquer la multiplication des électrons secondaires le dispositif est doté d'une source de champ magnétique .

Les dynodes continues peuvent avoir une infinité de géométries possibles, mais la forme la plus répandue de ces dynodes est le cylindre creux.

Seulement quelques matériaux et alliages peuvent être utilisés dans la fabrication d'une dynode continue.

Le processus d'amplification utilisé dans la dynode continue est similaire à celui utilisé dans le cas des dynodes discrètes, la seule différence, c'est qu'ici l'émission d'ions secondaires se produit sur les parois de la dynode continue.

La dynode continue est alimentée par un générateur électrique, si on veut multiplier les ions positifs alors le potentiel électrique à l'entrée de la dynode (IN) sera supérieur au potentiel appliqué sur la sortie de la dynode (OUT), par contre pour multiplier les ions négatives l'entrée de la dynode aura un potentiel électrique inférieur à la sortie.

Ce mode de réalisation offre aussi la possibilité de fonctionner en mode neutralisation de charge.

### **Troisième mode de réalisation**

Dans ce mode de réalisation les ions résultant du processus d'amplification par émission d'ions secondaires (30) seront accélérés à l'aide d'un accélérateur électrostatique constitué de plusieurs électrodes accélératrices (31) pour finalement implanter une ou plusieurs cibles (33), le faisceau d'ions positifs sera neutralisé par un système de neutralisation de charge (32).

Les ions utilisés pour implanter la cible sont générés dans un bloc (29) comprenant une ou plusieurs dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires et une source primaire d'ions.

Plusieurs systèmes de neutralisation de charge sont actuellement utilisés dans l'implantation ionique comme les systèmes à injection de plasma et les systèmes à injection d'électrons secondaires.

### **Application industrielle.**

Supposons qu'on a un dispositif comprenant 16 dynodes discrètes d'aluminium hautement purifié et une source d'ions à métal liquide de césium générant un courant de 50 nA.

Les procédés actuellement utilisée dans l'industrie permettent d'obtenir des plaques d'aluminium ayant une pureté supérieure à 99.999 %.

La dernière dynode est un demi-cylindre creux ayant les dimensions suivantes. (À température ambiante).

-Grand rayon : 10 mm

-Petit rayon : 9 mm

-Hauteur : 50 mm

Cette dynode aura une masse de 4.03 g. ( $\rho = 2.6988 \text{ g/cm}^3$ ).

On applique une différence de potentiel de 1 KV entre deux dynodes successives, le rendement de pulvérisation à une incidence de  $0^\circ$  est d'environ 1.37, il est difficile de prévoir le rendement moyen de pulvérisation de façon théorique car les ions bombardent les dynodes avec des angles d'incidence aléatoires, seul l'expérience peut donner la valeur du rendement moyen de pulvérisation.

Dans la suite, on supposera que le rendement moyen de pulvérisation est égal à 2, on prendra deux exemples d'utilisation de ce dispositif, dans le premier exemple la cible à implanter et une plaque de cuivre, dans le deuxième la cible à implanter est un wafer, on supposera également que la dernière dynode est remplacée dès que le tiers de sa masse est pulvérisé par le phénomène d'émission d'ions secondaires, les autres dynodes seront aussi remplacées, mais leurs durée de vie sera supérieure à celle de la dernière dynode.

### Exemple 1

Notre but est d'implanter des ions  $\text{Al}^+$  dans le cuivre pour améliorer la résistance à la fatigue de ce dernier (durée de vie multipliée par 3 à 30), puisque le cuivre est conducteur le dispositif ne fonctionnera qu'en mode implantation, le courant ionique total fourni par ce dispositif est :

$$I(\text{imp}) = 2^{16} \times 50 \text{ nA} = 3.28 \text{ mA}$$

Dans ce cas, il faut changer la dernière dynode après environ 406 heures de fonctionnement.

### Exemple 2

Ici il faut alterner le fonctionnement du dispositif, la fréquence de changement des deux modes est choisie en fonction de l'épaisseur de la couche en  $\text{SiO}_2$  et de la tension de rupture des différentes couches déposés sur le wafer, si la moitié du temps de fonctionnement du dispositif est en mode implantation alors le courant fourni par le dispositif, est :

$$I(\text{imp}) = 2^{16} \times 50 \text{ nA} \times 0.5 = 1.64 \text{ mA}$$

Dans ce cas, il faut changer la dernière dynode après environ 812 heures de fonctionnement.

## Revendications

Les réalisations de l'invention, au sujet desquelles un droit exclusif de propriété ou de privilège est revendiqué, sont définies comme suit :

1. Un dispositif d'implantation ionique comprenant :

- Au moins une source primaire d'ions ;
- Une ou plusieurs dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires ;

Le courant ionique généré par la source primaire d'ions est amplifié à l'aide de la dynode ou des dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, les ions résultant du processus d'amplification par émission d'ions secondaires seront utilisés pour implanter une ou plusieurs cibles.

2. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant au moins deux dynodes discrètes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires.

3. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant au moins une dynode continue utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires.

4. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant :

- Un accélérateur électrostatique ;
- Un système de neutralisation de charge ;

5. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant plusieurs dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, dans lequel pour multiplier les ions positifs chaque dite dynode est maintenue à un potentiel inférieur au potentiel appliqué sur la dynode précédente.

6. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant plusieurs dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, dans lequel pour multiplier les ions négatifs chaque dite dynode est maintenue à un potentiel supérieur au potentiel appliqué sur la dynode précédente.

7. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 3, dans lequel le potentiel appliqué sur l'entrée de chaque dynode continue utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires est supérieur au potentiel appliqué sur la sortie de ladite dynode continue pour multiplier les ions positifs, ou bien dans lequel le potentiel appliqué sur l'entrée de chaque dynode continue utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires est inférieur au potentiel appliqué sur la sortie de ladite dynode continue pour multiplier les ions négatifs.

8. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, dans lequel la source primaire d'ions est une source d'ions à métal liquide.

9. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant :

Rachid Zakaria 



Une source de champ magnétique, le champ magnétique créé par cette source bloque le processus de multiplication des électrons secondaires mais ne bloque pas le processus d'amplification par émission d'ions secondaires.

10. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant :

Un conducteur creux appelé cage protectrice, les dynodes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires sont placées à l'intérieur de la cage protectrice pour les protéger des champs électriques indésirables.

11. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, dans lequel la cible à implanter est électriquement reliée à un générateur électrique ou à une masse électrique.

12. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant un support conducteur conçu pour maintenir les wafers, ce support est relié à un générateur électrique ou à une masse électrique.

13. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant un actionneur utilisé pour faire bouger la partie générant les ions à implanter par rapport à la cible.

14. Un dispositif d'implantation ionique selon la Revendication 1, comprenant un actionneur utilisé pour faire mouvoir la cible à implanter.

15. Un procédé d'implantation ionique utilisant un dispositif qui comprend une source primaire d'ions et plusieurs dynodes discrètes utilisant le phénomène d'émission d'ions secondaires, caractérisé en ce qu'il comprend la répétition des étapes suivantes:

- L'implantation d'une dose d'ions dans la cible, ce résultat est obtenu en faisant fonctionner le dispositif en mode implantation,


- Le bombardement de la cible avec des électrons, ce résultat est obtenu en faisant fonctionner le dispositif en mode neutralisation de charge.

16. Un procédé d'implantation ionique selon la revendication 15, dans lequel chaque dite dynode est portée à un potentiel inférieur au potentiel appliqué sur la dynode précédente dans le fonctionnement en mode implantation, le courant fournit par la source primaire d'ions est amplifiée par le processus de multiplication par émission d'ions secondaires.

17. Un procédé d'implantation ionique selon la revendication 15, dans lequel chaque dite dynode est portée à un potentiel supérieur au potentiel appliqué sur la dynode précédente dans le fonctionnement en mode neutralisation de charge, dans ce mode de fonctionnement les électrons sont multipliés par le processus de multiplication par émission d'électrons secondaires.


18. Un procédé d'implantation ionique selon la revendication 15, dans lequel le dispositif utilisé comprend une source d'électrons, les électrons générés par ladite source d'électrons seront utilisés pour bombarder la cible dans le fonctionnement en mode neutralisation de charge.

19. Un procédé d'implantation ionique selon la revendication 15, dans lequel le dispositif utilisé comprend une source de champ magnétique générant un champ magnétique variable, ce champ bloque le processus de multiplication des électrons secondaires dans

Rachid Zakaria 

le fonctionnement en mode implantation, mais ne bloque pas ce processus dans le fonctionnement en mode neutralisation de charge.

20. Un procédé d'implantation ionique selon la revendication 15, dans lequel la cible à implanter est un wafer, le wafer à implanter est fixé sur un support métallique et les deux modes de fonctionnement sont répétés de façon permettant d'éviter la rupture des couches isolantes présentes sur la surface du wafer.

Rachid Zakaria.  


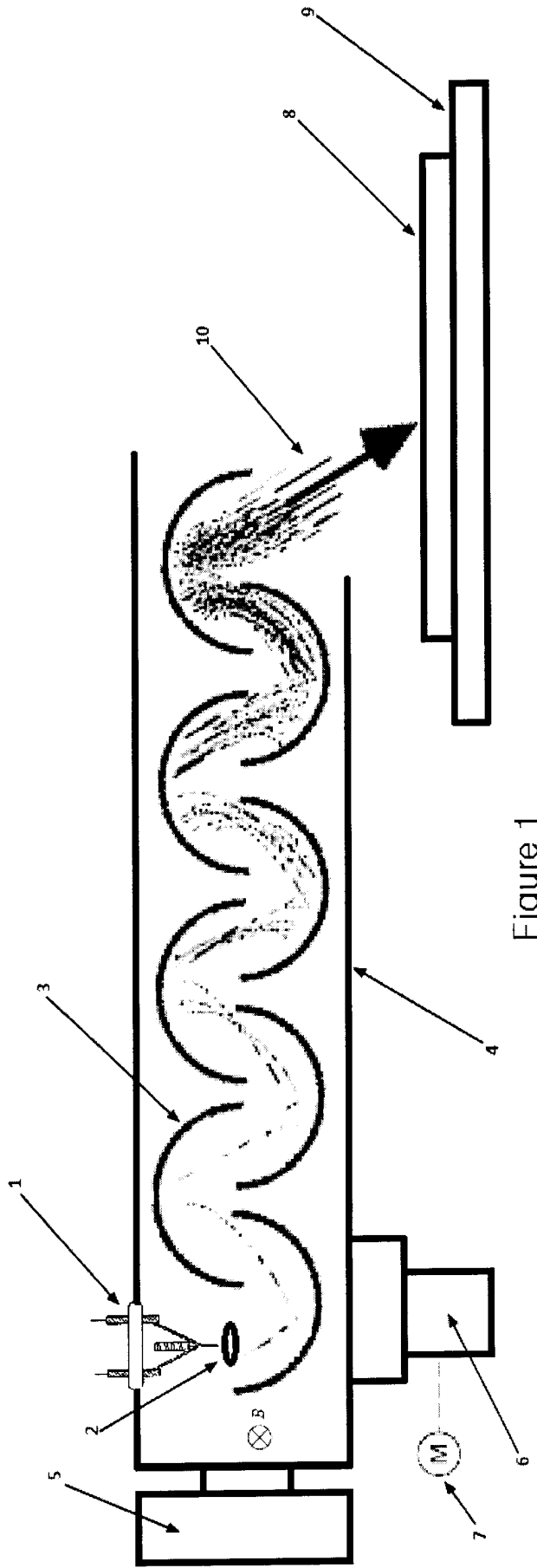


Figure 1

Rachid Zakaria

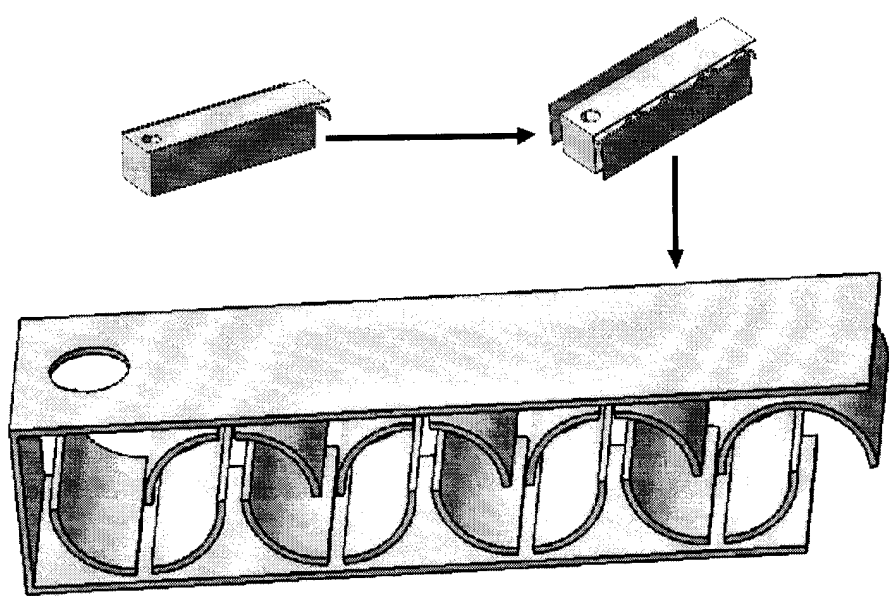


Figure 2

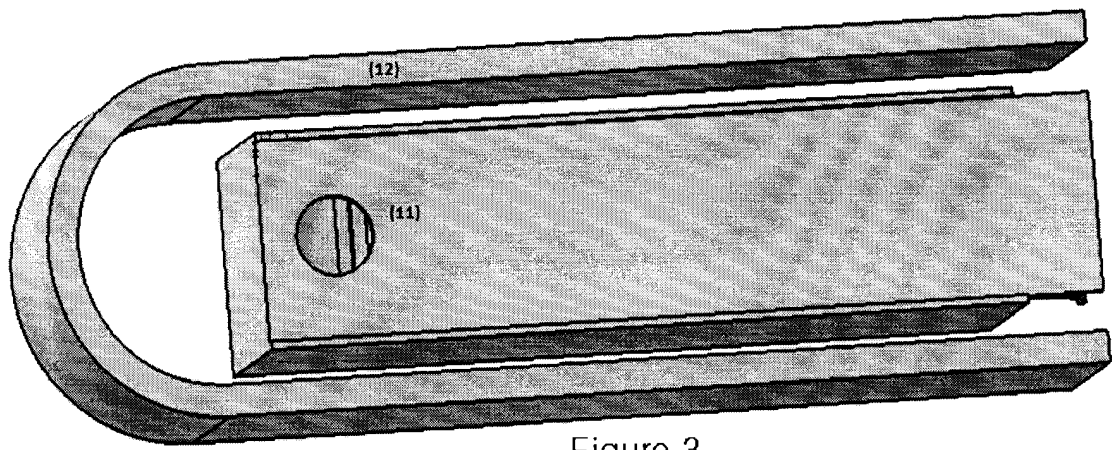


Figure 3

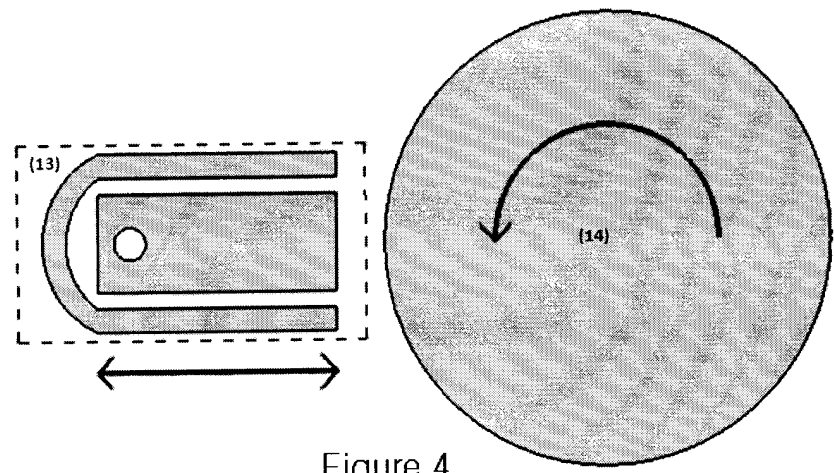


Figure 4

Rachid Zokana

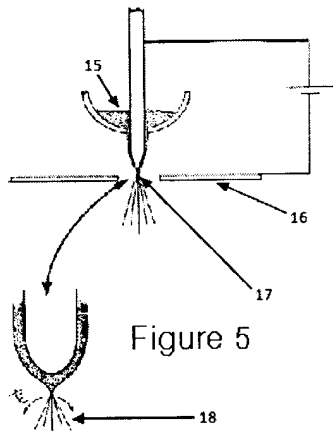


Figure 5

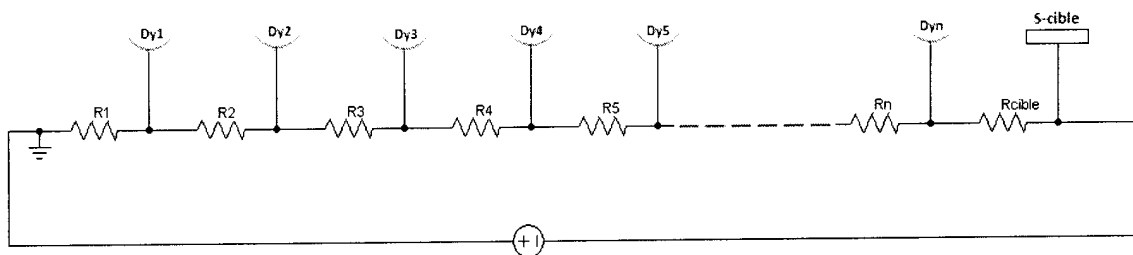


Figure 6

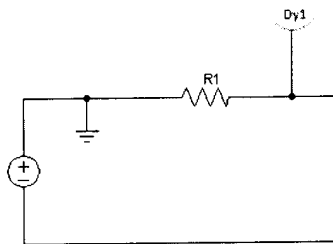


Figure 7

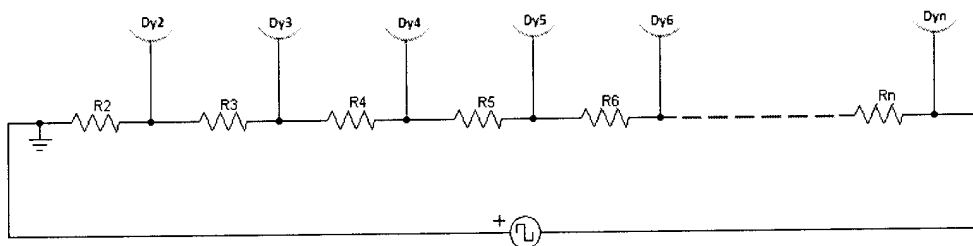


Figure 8

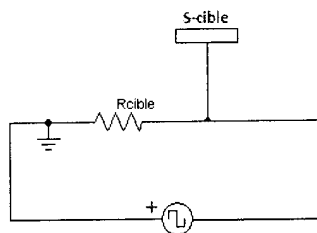


Figure 9

Rachid Zakaria

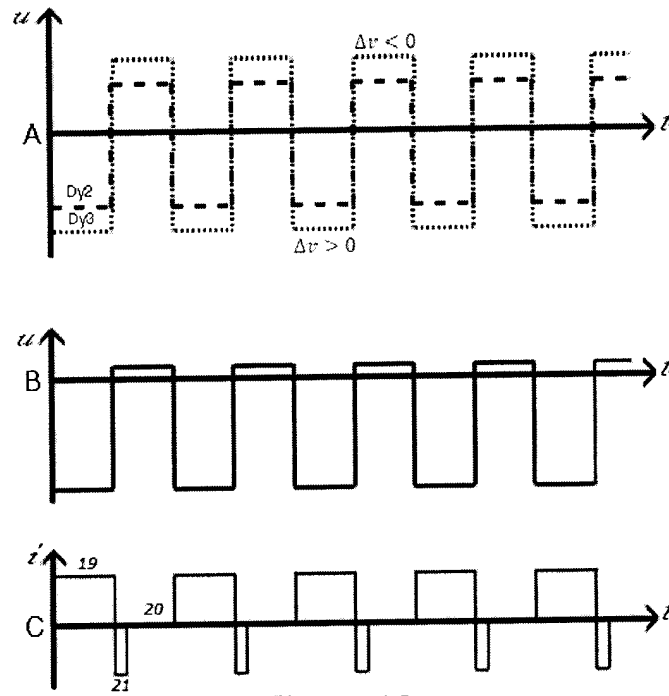


Figure 10

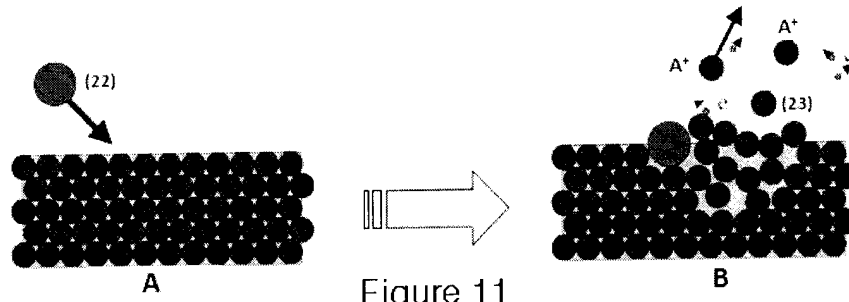


Figure 11

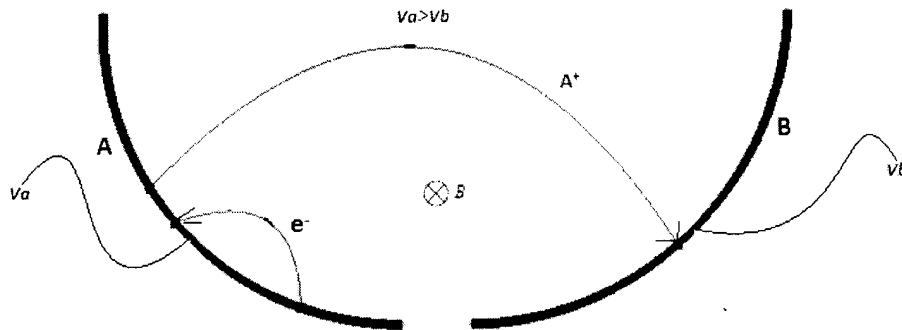


Figure 12

Rachid Zakaria

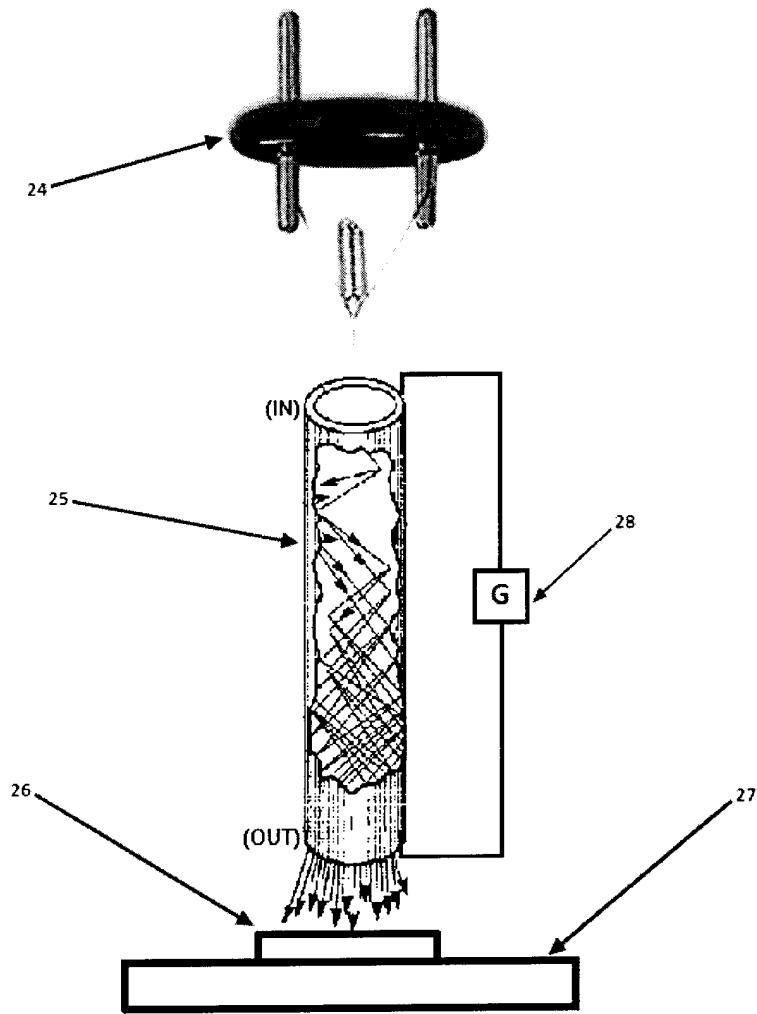


Figure 13

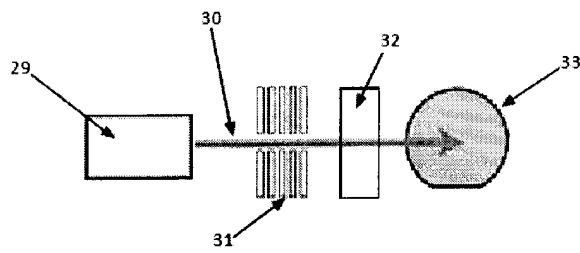


Figure 14

Rachid Zakaria