

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :
(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

2 504 727

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 81 08449

(54) Dispositif de traitement d'un échantillon par faisceau électronique impulsionnel.

(51) Classification internationale (Int. Cl. ³). H 01 J 37/30, 37/24; H 01 L 21/26.

(22) Date de dépôt..... 28 avril 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 43 du 29-10-1982.

(71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, établissement de caractère scientifique, technique et industriel, résidant en France.

(72) Invention de : Michel Bruel, Michel Floccari et Jean François Michaud.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Brevatome,
25, rue de Ponthieu, 75008 Paris.

La présente invention a pour objet un dispositif de traitement d'un échantillon par faisceau électronique impulsionnel. Elle s'applique en particulier dans le traitement des couches superficielles des matériaux semiconducteurs.

En effet, lorsque l'on plante par exemple dans un substrat semiconducteur, en effectuant un bombardement de celui-ci, des particules étrangères ou impuretés, on sait qu'il est nécessaire d'effectuer, après cette implantation, une étape connue sous le mot de recuit permettant de rendre électriquement actives les impuretés implantées et permettant de ré-arranger le réseau cristallin du substrat qui a été perturbé lors du bombardement.

L'une des techniques la plus utilisée pour effectuer cette étape de recuit est de porter à une température élevée (de l'ordre de 900 à 1200°C) le substrat implanté pendant un certain temps.

Une autre technique, plus récente, consiste à apporter à la surface, ou au niveau des premières couches implantées, une densité d'énergie élevée, pendant un temps très bref, de façon que de très hautes températures soient atteintes localement pendant ce temps. Dans certains cas, les températures atteintes permettent de liquéfier les premières couches du substrat, ce qui permet de guérir les dommages créés lors de l'implantation.

Etant donné que l'élévation de température est très localisée et de courte durée (inférieure à la milliseconde), le reste du substrat n'est pas affecté.

Cet apport d'énergie à la surface ou sur les premières couches du substrat peut être réalisé, soit à l'aide d'un tir d'énergie lumineuse au moyen, par exemple d'un laser ou d'un tube éclair, soit à l'aide

d'un faisceau intense de particules telles que des électrons. Ces faisceaux lumineux ou de particules peuvent être des faisceaux larges ou étroits pulsés ou non, et peuvent balayer le substrat de façon à "recuire" celui-ci en différents points.

Les dispositifs connus pour traiter des échantillons, au moyen d'un faisceau d'électrons intenses et pulsés, comprennent, en général une diode d'émission de champ et de plasma connue sous l'expression anglo-saxonne de "field-plasma emission diode". Un tel dispositif a été représenté sur la figure 1.

Ce dispositif comprend donc, une diode constituée d'une cathode 2, généralement en graphite et munie de plusieurs sillons, et d'une anode 4 constituée d'une anode proprement dite 4a et d'une grille 4b, ces deux éléments 4a et 4b étant portés au même potentiel. Cette diode est généralement placée dans une enceinte à vide 6.

De plus, ces dispositifs comprennent un générateur de haute tension 8, relié à un système de stockage d'énergie sous haute tension 10 pouvant être constitué par exemple d'une ligne coaxiale ou d'un condensateur, ainsi qu'un système 12 de déclenchement d'impulsions, relié à un interrupteur 14 par exemple du type éclateur connu sous l'expression anglo-saxonne de "Spark gap switch". Ces dispositifs comprennent, encore, un système d'amenée 16 permettant de présenter les échantillons à traiter 18 dans l'enceinte à vide 6, et des systèmes 20 permettant de mesurer la tension et le courant fournis par le générateur 6 au cours du temps. L'anode proprement dite 4a sert de support à l'échantillon 18.

De tels dispositifs ont été décrits, par exemple dans un brevet américain N° 3 950 187 de Kirkpatrick intitulé "Method and apparatus involving

pulsed-electron-beam processing of semiconductor devices" et dans un article du "Journal of Applied Physics", vol. 50, n° 2 de février 1979 intitulé "Pulsed-electron-beam annealing of ion implantation damage".

5 Dans ces dispositifs, l'application d'une tension importante entre la grille 4b de l'anode et la cathode 2 au moyen par exemple d'un condensateur 10, chargé au préalable par le générateur 8, permet de créer un champ électrique intense au voisinage de la cathode 2 de la diode. L'application de la tension de charge du condensateur 10 est assurée au moyen de l'éclateur 14 commandé par le système de déclenchement d'impulsions 12.

15 Le champ électrique créé est intensifié au voisinage de la cathode par la présence de microprotubérances, connues sous le mot anglo-saxon de "whiskers", provenant des sillons (non représentés) dont est munie la cathode. Ces microprotubérances permettent de créer l'émission d'un champ électrique. La puissance électrique ainsi fournie est telle que l'on assiste à une explosion de ces microprotubérances correspondant à une vaporisation explosive et à une ionisation de celles-ci. Les microboules de plasma ainsi formées deviennent à leur tour une source d'électrons favorisant l'augmentation rapide du courant qui favorise elle-même l'explosion. En quelques nanosecondes, chacune de ces microboules de plasma s'étend suffisamment pour que la cathode soit recouverte d'une gaine de plasma continue. Cette gaine voit alors, par effet de détente, son épaisseur augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne la grille de l'anode, produisant un court-circuit de la diode connue sous l'expression anglo-saxonne de "diode-closure".

30 Le condensateur 10 chargé par le générateur 8, continue à se décharger dans la diode. La tension

appliquée entre anode et cathode par le condensateur a permis, avant que n'intervienne le court-circuit, d'extraire et d'accélérer les électrons créés de façon à former un faisceau électronique intense et pulsé qui
5 peut par exemple servir à recuire l'échantillon 18.

Le fait d'utiliser dans un tel dispositif une anode proprement dite 4a servant de support à l'échantillon 18, conduisant donc à polariser positivement ledit échantillon, permet aux électrons de pénétrer aisément dans celui-ci, tandis que les ions
10 formés ne peuvent pas pénétrer dans l'échantillon, ceux-ci étant automatiquement repoussés. On obtient bien, ainsi, un faisceau d'électrons intense et pulsé.

En conséquence, le générateur de haute tension 8, par l'intermédiaire du condensateur 10, sert à
15 la fois à la création de la gaine de plasma qui sera la source des électrons et à l'extraction et accélération de ces derniers.

De tels dispositifs permettent de créer des faisceaux d'électrons dont l'énergie est comprise entre 10 et 50 kiloélectronvolts (KeV), dont l'intensité est de 100 à quelques milliers d'ampères par centimètre carré et dont la durée des impulsions est de quelques dizaines de nanosecondes à quelques microsecondes.
20
25

Pour de plus amples détails sur le principe de fonctionnement de tels dispositifs, on peut se référer à un article du "Journal of Applied Physics", vol. 45, N°6 de juin 1974 intitulé "Plasma-induced
30 field emission and the characteristics of high-current relativistic electron flow".

Ces dispositifs, de conception simple présentent un certain nombre d'inconvénients. Ces inconvénients sont, en particulier :

- 35 - la nécessité d'engendrer brusquement une haute tension dans l'espace compris entre l'anode et la

cathode dans des conditions telles que l'intensité doit être très importante, c'est-à-dire comprise entre 100 et 10 000 ampères ;

- 5 - les caractéristiques du faisceau d'électrons, c'est-à-dire son énergie et sa densité de courant ne peuvent pas être choisies indépendamment des conditions dans lesquelles est engendré le plasma. Par exemple, si l'on désire obtenir un faisceau d'électrons de faible énergie, c'est-à-dire
10 de l'ordre de 20 KeV, il n'est pas évident que le champ électrique correspondant suffira à engendrer la gaine de plasma ;
- l'utilisation d'un système à très forte puissance pour engendrer le plasma, alors que la création
15 de celui-ci ne l'exige pas.

L'invention a justement pour objet un dispositif de traitement d'un échantillon par faisceau électronique impulsif permettant de remédier à ces différents inconvénients.

- 20 Le dispositif de l'invention, utilisant les mêmes principes que ceux décrits précédemment permet de séparer les deux fonctions suivantes :

- la création de la gaine de plasma, et
- l'extraction et l'accélération des électrons
25 créés.

- De façon plus précise, l'invention a pour objet un dispositif de traitement d'un échantillon par faisceau électronique du genre de ceux décrits précédemment, mais dans lequel le tube à vide comporte
30 trois électrodes indépendantes. Ce dispositif se caractérise en ce qu'il comprend, de plus :

- A) - Un premier circuit pour créer de façon impulsif un plasma à partir de la cathode du tube à vide, ce premier circuit comprenant :

- a) - un condensateur de capacité C_1 chargé au moyen du générateur de haute tension continue, ledit condensateur étant muni d'une première et d'une deuxième armatures,
- 5 b) - un éclateur permettant d'initier la décharge du condensateur de capacité C_1 de façon à produire une impulsion de haute tension entre la cathode et la grille, ledit éclateur étant disposé en série avec ledit condensateur, et
- 10 c) - des moyens pour engendrer des impulsions commandant l'éclateur ; et
- B) - Un deuxième circuit pour créer entre l'anode proprement dite et la cathode un champ électrique
- 15 permettant d'accélérer et d'extraire les électrons produits de façon qu'ils viennent bombarder l'échantillon, ce deuxième circuit comprenant un condensateur de capacité C_2 très supérieure à la capacité C_1 , ce condensateur de capacité C_2 étant
- 20 chargé au moyen du générateur de haute tension continue et pouvant se décharger par le tube à vide lui-même.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, le premier circuit comprend, de plus,

25 deux résistances R_1 et R_2 , identiques reliées en série avec le condensateur de capacité C_1 , de façon que l'une des bornes de la résistance R_1 soit reliée à la première armature dudit condensateur et que l'une des bornes de la résistance R_2 soit reliée à la deuxième

30 armature dudit condensateur, l'éclateur étant, alors, relié d'une part à la première armature du condensateur de capacité C_1 et d'autre part à l'autre borne de la résistance R_2 et il comprend également le condensateur de capacité C_2 branché en parallèle avec le circuit

35 $R_1 C_1 R_2$.

Dans ce mode de réalisation, et du fait de la valeur élevée des résistances R_1 et R_2 par rapport à l'impédance du reste du premier circuit, la tension appliquée entre cathode et grille au moment du déclenchement de l'éclateur est la somme des tensions stockées dans les condensateurs de capacité C_1 et C_2 , soit deux fois la tension du générateur de tension continue.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre, donnée à titre explicatif mais nullement limitatif, en référence aux figures annexées dans lesquelles :

- la figure 1, déjà décrite, représente schématiquement un dispositif de traitement d'échantillons de l'art antérieur, et

- la figure 2 représente schématiquement un dispositif de traitement d'échantillons conforme à l'invention.

Le dispositif de l'invention, schématisé sur la figure 2, comprend entre autres un tube à décharge comportant, comme précédemment, une cathode 22 munie de plusieurs sillons (non représentés) et une anode 24 constituée d'une anode proprement dite 24a et d'une grille 24b. Ce tube permet la production d'un faisceau d'électrons intenses et pulsés susceptibles de bombarder un échantillon 26 placé sur l'anode proprement dite 24a qui lui sert de support. L'utilisation de l'anode proprement dite 24a en tant que support d'échantillon permet de polariser positivement celui-ci, ce qui produit la pénétration des électrons dans ledit échantillon et l'éloignement des ions aussi formés. Les électrodes et l'échantillon sont placés dans une enceinte à vide telle que 28. Des moyens sont prévus pour amener à l'intérieur de l'enceinte 28 l'échantillon 26 à traiter.

Ce dispositif comprend, aussi, un générateur de haute tension continue 32 servant à charger sous une tension V un condensateur de capacité C_1 et un condensateur de capacité C_2 branchés en parallèle.

- 5 Les capacités C_1 et C_2 sont telles que la capacité C_2 est très supérieure à la capacité C_1 , c'est-à-dire que la capacité C_2 est de 10 à 50 fois plus grande que la capacité C_1 .

- 10 Le condensateur de capacité C_1 est, de plus, relié en série avec deux résistances R_1 et R_2 identiques situées de part et d'autre dudit condensateur. En effet, la résistance R_1 a l'une de ses bornes connectée à la masse et l'autre borne à l'une des armatures du condensateur de capacité C_1 , tandis que la résistance 15 R_2 a l'une de ses bornes connectée à la borne positive du générateur haute tension 32 et l'autre borne à l'autre armature dudit condensateur.

- De plus, l'ensemble constitué des deux résistances R_1 et R_2 et du condensateur de capacité C_1 20 peut être relié en série avec une résistance r et le condensateur de capacité C_2 peut être relié en série avec une résistance R . La résistance R est très supérieure à la résistance r , comme on le verra ci-après dans un exemple de réalisation.

- 25 Ce dispositif comprend, encore, un éclateur 34 commandé par un générateur d'impulsions 36. Cet éclateur 34 est relié d'une part à la borne positive du générateur haute tension 32 par l'intermédiaire de la résistance R et d'autre part, à l'armature du condensateur de capacité C_1 reliée à la résistance R_1 . 30

- Dans le dispositif de l'invention, la cathode 22 de la diode est reliée à la masse, la grille 24b de l'anode est reliée à la borne de la résistance R_2 qui est reliée à l'une des armatures du condensateur de capacité C_1 , et l'anode proprement dite 24a à l'autre 35 borne de la résistance R_2 par l'intermédiaire de la résistance r .

Le circuit comprenant principalement le condensateur de capacité C_1 , le condensateur de capacité C_2 et l'éclateur 34, commandé par le générateur d'impulsions 36, constitue un circuit de faible puissance (C_1 étant inférieur à C_2) permettant d'engendrer un plasma en créant une vaporisation et une ionisation au voisinage de la cathode 22. La plasma est engendré par l'application aux bornes de l'espace grille-cathode de la somme des tensions stockées dans les condensateurs de capacités C_1 et C_2 sous la commande de l'éclateur 34.

Le circuit comprenant principalement le condensateur de capacité C_2 constitue un circuit de forte puissance permettant l'extraction et l'accélération des électrons produits en créant un champ électrique important entre l'anode proprement dite 24a et la cathode 22. Ce circuit, contrairement à ceux des dispositifs de l'art antérieur, ne comprend pas d'interrupteur ou d'éclateur, ce qui permet d'éviter les problèmes posés par la fermeture brusque du circuit de forte puissance.

Le dispositif de l'invention présente un autre avantage lié à l'indépendance des deux fonctions, c'est-à-dire d'une part la création du plasma et d'autre part, l'extraction et l'accélération des électrons. Ceci permet de choisir la tension d'extraction et d'accélération sans que cela n'ait d'incidence sur la création du plasma, la puissance nécessaire étant fonction de la tension fournie par le générateur de haute tension 32 et de la valeur de la capacité C_2 du condensateur correspondant.

Comme on l'a déjà dit, le fonctionnement du dispositif de l'invention est identique à celui de l'art antérieur, si ce n'est le fait que le circuit de forte puissance ne comprend pas d'interrupteur. De

plus, l'utilisation des deux résistances identiques R_1 et R_2 d'impédance très élevée par rapport à celles de l'éclateur 34 et des capacités C_1 et C_2 permet d'obtenir, lorsque le générateur d'impulsions 36 déclenche
5 l'éclateur 34 provoquant la décharge du condensateur de capacité C_1 , une impulsion entre la grille 24b de l'anode et la cathode 22 de la diode, dont la tension est double de celle fournie par le générateur haute tension 32. Ceci est lié à l'agencement des différents
10 composants constituant le circuit de faible puissance.

On va maintenant donner un exemple de réalisation ainsi que des exemples de traitement d'échantillons.

Le générateur haute tension permet de charger les condensateurs de capacités C_1 et C_2 respectivement de 1 et 40 nanofarads sous une tension de
15 30 kilovolts. Les résistances R et r sont respectivement deux résistances de 30 Mégohms ($M\Omega$) et 2Ω et les résistances R_1 et R_2 des résistances de 300 $M\Omega$.

Des essais de traitement d'échantillons ont été réalisés sur des plaquettes de silicium sur une surface d'environ 2,5 cm de diamètre au moyen d'une diode dont la cathode, de forme circulaire, présentait un diamètre de 2,5 cm, dont la distance entre la cathode et la grille était de 4 à 6 mm et dont celle
25 entre la grille et l'anode proprement dite de 0 à 3,5 cm.

L'énergie apportée pour recuire ces plaquettes peut être contrôlée, au moyen de la tension d'accélération, elle-même contrôlée, et au moyen de la distance entre l'anode proprement dite et la grille. Cette distance permet aussi de contrôler la durée de l'impulsion. De plus, l'énergie apportée dépend de la nature de la cathode. En effet, la nature de la cathode permet de contrôler la nature du plasma, donc la
35 vitesse d'expansion, donc la durée des impulsions et donc de l'énergie apportée.

Les essais ont été réalisés avec des cathodes de graphite, d'aluminium, d'antimoine et de silicium, correspondant respectivement à une vitesse d'expansion de $3\text{ cm}/\mu\text{s}$, de $2\text{ cm}/\mu\text{s}$, de $1\text{ cm}/\mu\text{s}$ et de $2\text{ cm}/\mu\text{s}$.

Les exemples de traitement d'échantillons décrits ci-dessus concernent un recuit d'échantillons ayant subi au préalable une implantation d'ions, mais bien entendu tout autre type de traitement peut être envisagé.

D'autre part on peut, sans sortir du cadre de l'invention, proposer des schémas différents de celui qui a été décrit ; par exemple le circuit de déclenchement apte à créer le plasma entre cathode et grille, circuit à faible puissance, et le circuit d'accélération des électrons vers l'anode, circuit à forte puissance, peuvent être indépendants, comporter des générateurs haute tension distincts et/ou des interrupteurs distincts.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de traitement d'un échantillon par faisceau électronique impulsif du genre de ceux qui comprennent situées dans une enceinte à vide
5 (28) une cathode (22) et une anode (24) constituée d'une anode proprement dite (24a) et d'une grille (24b), des moyens (30) pour amener dans ladite enceinte l'échantillon (26) à traiter et un générateur de haute tension continue (32), caractérisé en ce qu'il
10 comprend :

- A) - Un premier circuit pour créer de façon impulsif un plasma à partir de la cathode ;
- B) - Un deuxième circuit pour créer entre l'anode proprement dite (24a) et la cathode (22) un champ
15 électrique permettant d'accélérer et d'extraire les électrons produits de façon qu'ils viennent bombarder l'échantillon (26).

2. Dispositif de traitement selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit premier circuit comprend :
20

- a) - un condensateur de capacité C_1 chargé au moyen du générateur de haute tension continue (32), ledit condensateur étant muni d'une première et d'une deuxième armatures,
- 25 b) - un éclateur (34) permettant d'initier la décharge du condensateur de capacité C_1 de façon à produire une impulsion de haute tension entre la cathode (22) et la grille (24b), ledit éclateur étant disposé en série avec ledit condensateur,
- 30 c) - des moyens pour engendrer des impulsions commandant l'éclateur (34).

3. Dispositif de traitement selon l'une au moins des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que ledit deuxième circuit comprend un condensateur de capacité C_2 très supérieure à la capacité C_1 , ce condensateur C_2 étant chargé par un générateur de tension
35

continue (32) et pouvant se décharger par le tube à vide lui-même, de façon à produire entre l'anode et la cathode ledit champ électrique.

4. Dispositif de traitement selon la revendication 3, caractérisé en ce que le premier circuit comprend, de plus, deux résistances R_1 et R_2 , reliées en série avec le condensateur de capacité C_1 de façon que l'une des bornes de la résistance R_1 soit reliée à la première armature dudit condensateur et que l'une des bornes de la résistance R_2 soit reliée à la deuxième armature dudit condensateur, l'éclateur (34) étant, alors, relié d'une part à la première armature du condensateur de capacité C_1 et, d'autre part, à l'autre borne de la résistance R_2 et il comprend également le condensateur de capacité C_2 branché en parallèle avec le circuit $R_1 C_1 R_2$.

1,1

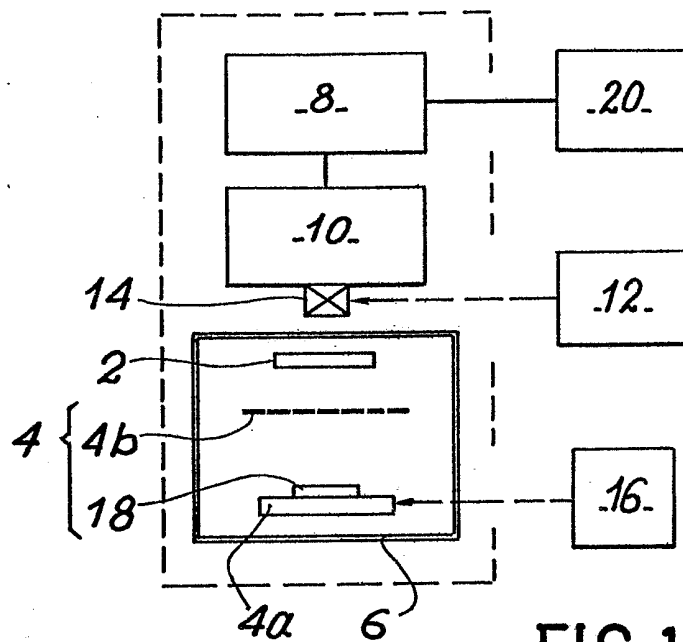


FIG. 1

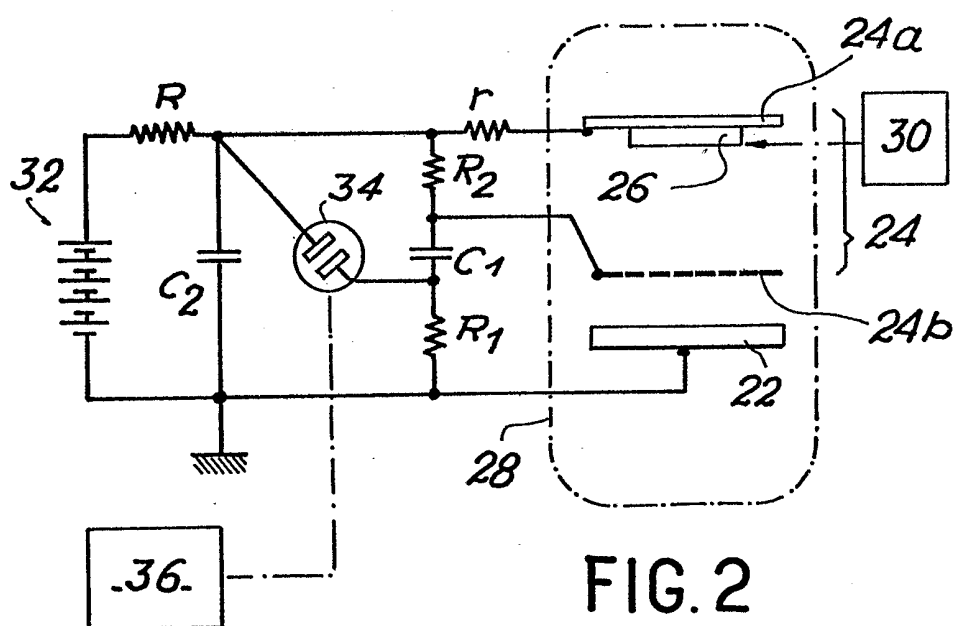


FIG. 2