

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 19256

(54) Dispositif du type cellule électrochimique à électrolyte solide et son procédé de fabrication.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). H 01 M 6/18; G 01 N 27/28.

(22) Date de dépôt..... 5 septembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 10 du 12-3-1982.

(71) Déposant : Société dite : THOMSON-CSF, SA, résidant en France.

(72) Invention de : Michel Croset, Gonzalo Velasco et Philippe Schnell.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire :

1

La présente invention se rapporte à un dispositif du type cellule électrochimique à électrolyte solide et à son procédé de fabrication ; notamment à un capteur électrochimique de concentration d'espèces dans un mélange fluide.

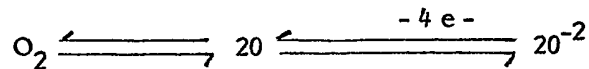
5 En effet une des familles bien connue de capteurs de composition d'espèces chimiques, par exemple de pressions partielles des espèces présentes dans un gaz, met en oeuvre une cellule électrochimique du type pile à concentration. Une telle cellule comprend une première électrode dite électrode de mesure, un électrolyte solide et une seconde électrode dite
10 électrode de référence en contact avec un milieu de référence. L'électrode de mesure est mise en contact avec le milieu à analyser, par exemple les gaz d'échappement d'un moteur à combustion interne. Ces gaz comprennent notamment de l'oxygène, du monoxyde de carbone, du gaz carbonique et différents hydrocarbures. L'électrolyte est un conducteur ionique sélectif de
15 l'espèce à analyser.

Selon une première approche de réalisation de capteurs de l'art connu, le milieu de référence est l'air ambiant ou du moins un réservoir d'un gaz approprié. La forme la plus courante d'un tel capteur est celle dite d'un "doigt de gant", la partie centrale étant constituée par un électrolyte solide,
20 dont les faces intérieures et extérieures sont recouvertes par des électrodes. L'intérieur du "doigt" communique en général avec l'atmosphère et l'extérieur avec le milieu à analyser. L'électrolyte devant en général assurer le maintien mécanique de l'ensemble, il s'agit d'un électrolyte épais. De tels capteurs sont couramment utilisés dans le domaine de l'électronique auto-
25 mobile pour la mesure de la pression partielle d'oxygène dans les gaz d'échappement. Un exemple d'un tel capteur est décrit dans le brevet français publié sous le numéro 2 224 043.

Une seconde approche de l'art connu propose l'utilisation d'un moyen combinant la fonction électrode et la fonction milieu de référence. On

utilise pour ce faire une électrode à base d'une combinaison du type : "M-MX" où M est un métal et X de l'oxygène ou un halogène à détecter, par exemple "M-MO" dans le cas de la détection de l'oxygène. Dans le cas des capteurs de pression partielle d'oxygène, comme il est bien connu des équations qui régissent ces capteurs sont :

- aux interfaces électrodes-électrolytes :



- la différence de potentiel ΔV en volts qui se développe alors entre les électrodes est donnée par la loi de NERNST :

$$\Delta V = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

avec

R = constante des gaz parfaits = 8,314 J (mole.K)

F = nombre de Faraday = 96490 C.mole⁻¹

T = température absolue en degrés Kelvin

P₁ et P₂ = pressions partielles dans les milieux en contact avec

les deux électrodes.

Pour les applications les plus courantes de ces capteurs, et c'est le cas de la mesure de la pression partielle d'oxygène dans les gaz d'échappement, les températures de fonctionnement sont généralement supérieures à 450°C. Dans ce cas, le temps de montée de la force électromotrice mesurée entre les électrodes en réponse à une variation de la pression partielle de l'espèce à mesurer, par exemple l'oxygène, est alors typiquement inférieure à une seconde. En dessous de cette température, le temps de réponse augmente de façon notable, ce qui limite l'utilisation de telle cellule à la mesure de phénomènes lents voir très lents. Cette dégradation des performances dynamiques de la cellule peut être attribuée à plusieurs causes : aux résistances et capacités de réaction d'électrode, à la résistance, à la conduction ionique de l'électrolyte et aux capacités du circuit électrique de mesure associé à la cellule. En effet l'impédance équivalente d'une telle cellule étant très élevée, les capacités des câbles de liaisons ou de l'appareil

qui mesure la force électromotrice interélectrode interviennent dans la dégradation du temps de réponse. Des valeurs typiques de ces capacités sont de l'ordre de 5 à 20pF.

Lorsqu'on descend en dessous d'une température d'environ 250°C, l'expérience montre que c'est la première cause, c'est à dire la constante de temps des réactions d'électrodes, qui devient prépondérante dans l'allongement du temps de réponse.

Il a été d'ailleurs proposé, à titre de perfectionnement aux deux approches de réalisation de capteur précitées, de mettre en oeuvre des techniques de dépôts en couches minces qui permettent d'optimiser, notamment, la résistance à la conduction ionique de l'électrolyte.

Toujours en se plaçant dans le cas de la mesure de la pression partielle d'oxygène dans un gaz, en ce qui concerne les réactions d'électrodes, plusieurs étapes peuvent être distinguées : 1°/ absorption de l'oxygène moléculaire à la surface de l'électrode de mesure ; 2°/ dissociation de cet oxygène moléculaire en deux atomes d'oxygène et 3°/ diffusion vers les points d'échange avec l'électrolyte et 4°/ échange proprement dit. Ces phénomènes sont décrits par exemple, dans l'article de SCHOULER et autres : "Application selon BAUERLE du tracé des diagrammes d'admittance complexe en électrochimie des solides", paru dans la revue française "JOURNAL DE CHIMIE PHYSIQUE", 1973, vol 70, no 6, pages 923-935. L'expérience permet de penser que le processus d'échange est la cause la plus importante de la limitation des performances dynamiques de la cellule. La diminution du temps de réponse est ainsi conditionnée par l'augmentation des courants d'échange à l'interface électrode-électrolyte.

L'invention se propose de répondre à ce besoin.

L'invention a donc pour objet un dispositif du type cellule électrochimique comportant un électrolyte solide ayant la structure d'un réseau cristallin constitué par un matériau dopé de façon à créer des lacunes dans le réseau ; l'électrolyte étant conducteur ionique d'une espèce chimique déterminée et en contact avec deux électrodes conductrices ; dispositif principalement caractérisé en ce que l'électrolyte comprend une première région présentant un premier pourcentage de dopage et une seconde région superficielle présentant un second pourcentage de dopage ; seconde région

4.

recouvrant au moins la surface de la première région sous-jacente à au moins l'une des électrodes et le second pourcentage étant choisi supérieur au premier de façon à augmenter le nombre de lacunes créées dans le réseau.

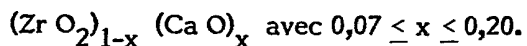
L'invention a encore pour objet le procédé de fabrication d'un tel
5 dispositif.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description ci-après en se référant aux dessins annexés parmi lesquels :

- les figures 1 à 4 sont des diagrammes explicatifs des phénomènes mis
10 en jeu dans l'invention ;
- la figure 5 est un exemple de capteur électrochimique réalisé conformément à une première variante de l'invention ;
- la figure 6 est un diagramme comparant le temps de réponse d'un capteur de l'art connu avec ceux d'un capteur réalisé conformément à
15 l'enseignement de l'invention ;
- la figure 7 est un exemple de capteur électrochimique réalisé conformément à une seconde variante de l'invention.

Dans ce qui suit, à titre d'illustration l'invention sera décrite dans le cadre de la mesure des concentrations relatives d'espèces réactives dans un
20 mélange fluide, ce sans entraîner aucune limitation dans la portée de la présente invention.

Plus précisément, si on se place dans le cadre de la détection de l'oxygène dans les gaz d'échappement d'un moteur à combustion interne, un exemple typique d'électrolyte solide conducteur de l'oxygène sous forme
25 ionique est la zircone stabilisée au calcium de formule :



Les valeurs précitées de x sont généralement admises par les différents auteurs d'articles scientifiques dans ce domaine et correspondent à une phase cristalline cubique de la zircone. Le réseau maillé présente des
30 lacunes acceptrices d'ions d'oxygène O^{--} et la zircone ainsi dopée est de ce fait conductrice ionique de l'oxygène. La conductivité ionique augmente avec la concentration de dopants jusqu'à $(\text{Zr O}_2)_{0,85} (\text{Ca O})_{0,15}$ mais décroît au-delà de cette composition, cette décroissance étant due à des mécanismes encore mal connus. Un dopage correspondant à la valeur

$x = 0,15$ permet donc une optimisation de la conduction ionique. Cependant, comme il a été rappelé, le temps de réponse est ralenti par la difficulté des échanges ioniques à l'interface "électrolyte solide-milieu extérieur".

Dans le cas présent, ce milieu extérieur peut être constitué par une
 5 électrode en platine au sein de laquelle se dissocie l'oxygène moléculaire pour produire des ions oxygènes. Le temps de réponse, lorsqu'un tel capteur est utilisé à de hautes températures ($> 400^{\circ}\text{C}$), est suffisamment rapide pour la plupart des applications. Il est inférieure à une seconde. Si on désire
 10 utiliser de tels capteurs à plus basse température, ce temps de réponse augmente notablement et limite l'application de ces capteurs à des phénomènes lents ou très lents.

La figure 1 illustre la variation de la conductivité ionique σ en fonction de X , cette conductivité passant par un maximum σ_M pour la valeur $x = 0,15$. Le livre britannique édité par J. HLADIK "Physics of
 15 Electrolytes" volume 2 : "Thermodynamics and Electrode Processes in Solid State Electrolytes" (Academic Press ; Londres), étudie notamment ces phénomènes.

Bien que cette valeur $x = 0,15$, généralement adoptée, permet l'optimisation de la conduction ionique, cette valeur n'est cependant pas optimale
 20 pour les échanges qui se produisent à l'interface "électrolyte solide-milieu extérieur". Ces échanges seraient facilités par une densité de lacunes d'oxygènes plus grande, donc une plus grande concentration en oxyde de calcium.

Pour optimiser simultanément ces deux paramètres, l'invention propose
 25 se d'utiliser des électrolytes solides comportant au moins deux régions :

- une première région constituant la plus grande partie de l'électrolyte et dont le dopage optimise la conduction ionique, ce dopage étant appelé dans ce qui suit dopage normal D_N , et une seconde région superficielle de faible épaisseur surdopée destinée à favoriser les échanges ioniques à
 30 l'interface. De façon idéale cette seconde région devrait avoir une épaisseur correspondant à quelques couches atomiques. Le dopage maximum est D_M .

La figure 2 illustre par la courbe A_2 la variation idéale du dopage en fonction de l'épaisseur e de l'électrolyte. L'épaisseur de l'électrolyte varie entre les valeurs 0 et e_M , la zone superficielle variant pour sa part entre les

valeurs 0 et e_1 . Dans la réalité, les procédés pouvant être utilisés pour obtenir ce surdopage ne permettent pas d'obtenir cette courbe idéale. Tous les procédés de fabrication généralement utilisés dans le domaine de la microélectronique peuvent être mis en oeuvre dans le cadre de l'invention, par exemple les procédés de diffusion ou d'implantation ionique. La courbe B_2 représente un profil typique de la variation superficielle du dopage de l'électrolyte. Il s'en suit que la zone surdopée a une épaisseur équivalente à e'_1 plus grande que la valeur théorique e_1 .

Si on désire se rapprocher des conditions idéales, plusieurs procédés peuvent être mis en oeuvre. La figure 3 illustre un premier procédé. Après la phase consistant en un surdopage de la région superficielle de l'électrolyte sur une profondeur e'_1 , l'électrolyte est érodé par exemple par attaque chimique de façon à retirer une couche Δe de matériau. Il s'en suit que la zone surdopée n'a plus qu'une épaisseur égale à $e_0 - e'_1$. Le dopage maximum passe de la valeur D_{M1} à la valeur D_{M2} , légèrement inférieure.

Un autre procédé consiste à recouvrir l'électrolyte d'une couche d'un autre matériau plus facilement attaquable que le matériau constituant l'électrolyte. Il peut s'agir dans le cas de la zircone d'une mince couche de métal tel que l'argent, ou d'un oxyde tel que l'oxyde niobium ($Nb_2 O_5$) ou de silicium ($Si O_2$). Ces oxydes peuvent être attaqués par l'acide fluorhydrique. Dans ce cas le surdopage sera réalisé par implantation ionique. Sur la figure 4, la courbe A_4 représente le profil de variation du dopage en forme de courbe de GAUSS obtenu par implantation ionique. L'épaisseur de la couche de matériau déposée sur l'électrolyte est égale à $\Delta e'$. Le surdopage s'étend dans l'électrolyte lui-même sur une profondeur égale sensiblement à $e_0 - e'_1$. Une fois le dopage réalisé, la couche de matériau superficielle est enlevée par attaque chimique et la région surdopée se réduit à une région de l'électrolyte de profondeur $e_0 - e''_1$. L'énergie communiquée aux ions de calcium dépend de l'épaisseur de la couche déposée $\Delta e'$ qui peut varier entre quelques centaines d'angströms à quelques milliers d'angströms. Les énergies correspondantes varieront typiquement dans la gamme 10 à 400 KeV. Un autre moyen de diminuer l'épaisseur de la couche surdopée est l'érosion ionique, l'attaque par plasma après implantation, ou encore l'érosion simultanée à l'implantation réalisée à faible énergie (< 30 KeV).

Enfin le surdopage peut être également obtenu par dépôt d'une couche superficielle de zircone fortement dopée par évaporation sous vide, ou pulvérisation cathodique ou toutes autres méthodes adaptées.

L'épaisseur du dépôt peut être de l'ordre de 50 Å. Dans ce cas, le
5 matériau déposé et le dopant peuvent être différents de ceux de la première région de l'électrolyte.

Pour illustrer l'invention, un capteur électrochimique mesurant les concentrations relatives d'oxygène dans un gaz va maintenant être décrit en relation avec la figure 5. Ce capteur, réalisé conformément à la présente
10 invention, a une structure générale du type de celle décrite notamment dans la demande de Brevet Européen publiée sous le numéro 12 647. Sur un substrat S_b isolant, en alumine monocristalline par exemple, assurant la tenue mécanique de l'ensemble, ont été déposées par pulvérisation cathodique, une électrode de référence E_1 du type "nickel-oxyde de nickel",
15 d'épaisseur 1 μ m en forme de languette et une bande constituée par de la zircone stabilisée de composition $(Zr O_2)_{0,85} (Ca O)_{0,15}$, d'épaisseur 1 μ m, chevauchant partiellement l'électrode de référence E_1 . Le contact électrique avec l'électrode en "nickel-oxyde de nickel" est réalisé à l'aide d'un fil de platine C_1 . Pour éviter l'oxydation du nickel par contact avec le milieu
20 extérieur dans lesquels circulent les gaz à analyser, un enrobage d'émail S protège toute la structure à l'exception d'une zone circulaire de surface 0,1 mm² environ. Par implantation ionique, une dose d'environ $2,6 \cdot 10^{16}$ atomes de calcium par cm² sous une énergie de 30 KeV, a été implantée dans l'électrolyte E_{11} pour former une région superficielle E_{12} d'électrolyte
25 surdopée. L'implantation ionique est suivie d'un traitement thermique de 10 mn à 800°C à l'air. Suite à ce traitement, il se forme une région surdopée de l'électrolyte de composition approximative $(Zr O_2)_{0,70} (Ca O)_{0,30}$ sur une profondeur d'environ 300 Å.

Une fine couche de laque de platine est déposée sur la surface restée
30 libre de la zircone ainsi que sur une partie de l'émail S, pour constituer l'électrode de mesure E_2 . Un second fil de platine constitue un second contact électrique C_2 . Le potentiel inter-électrode est recueilli entre ces deux conducteurs et les signaux ainsi recueillis sont transmis à des circuits électroniques non représentés. Ces circuits ne diffèrent en rien de l'art

connu.

Cette structure est conforme aux enseignements de la demande de Brevet Européen précitée sauf en ce qui concerne la création de la zone d'électrolyte surdopée E_{12} , conformément à la présente invention.

- 5 Une seconde cellule de même type que celle qui vient d'être décrite mais ne comportant pas cette zone E_{12} surdopée a été réalisée.

Les temps de montée de la force électromotrice inter-électrode de ces cellules en réponse à un échelon de variation de pression partielle de l'oxygène ont été comparées. Les résultats sont rassemblés sur le diagramme
10 de la figure 6 pour ces températures comprises entre 150 et 350°C, tous autres paramètres restant identiques.

Le temps de montée est défini de façon conventionnelle comme étant le temps mis pour passer de 10 à 90% de la différence entre l'ancienne et nouvelle valeur de la force électromotrice interélectrode.

- 15 La courbe A_6 concerne un capteur à électrolyte homogène et la courbe B_6 un capteur à électrolyte non homogène, c'est à dire conforme aux enseignements de l'invention. Les temps de montée de ces derniers capteurs sont dix fois plus courts que ceux d'un capteur à électrolyte homogène.

Outre la zircone, d'autres matériaux conviennent pour la réalisation
20 des deux régions de l'électrolyte, ainsi que divers procédés d'obtention. A titre d'exemples non limitatifs, les matériaux rassemblés dans le tableau placé en fin de la présente description sont utilisables. Les matériaux dopant sont des éléments des colonnes IIA et IIIB du tableau périodique.

Il est à noter qu'à chaque couple "matériau principal-dopant" corres-
25 pond un pourcentage du dopage spécifique apte à optimiser la conduction ionique dans la région E_{11} de l'électrolyte.

L'invention n'est pas non plus limitée aux électrolytes solides, conduc-
teurs ioniques de l'oxygène, mais également à tous électrolytes conducteurs ioniques d'un halogène. Un exemple d'un tel halogène est le fluor. Dans ce
30 cas le matériau principal peut être du fluorure de plomb ($Pb F_2$) ou une association fluorure de plomb/fluorure d'étain ($Pb F_2/Sn F_2$), ou encore les matériaux de formules chimiques : $Sr F_2$, $Ba F_2$, $Sr Br_2$, $Ca F_2$, $Ba Cl_2$. Le matériau dopant est un élément alcalin.

Selon une seconde variante de l'invention, il est possible d'augmenter

les courants d'échanges ioniques à l'interface "électrolyte solide-milieu extérieur" non pas en surdopant superficiellement l'électrolyte solide, mais en déposant sur celui-ci une couche mince d'un second matériau également dopé.

5 En effet, si on se replace dans le cas de la détection d'oxygène comme précédemment décrit, le travail de sortie d'un atome d'oxygène vers le milieu extérieur (électro de E_2) est grand. Par suite, seul un petit nombre d'atomes d'oxygène du réseau de la zircone seront dotés de suffisamment d'énergie pour échapper au réseau et participer aux courants d'échanges.

10 Par contre, si on considère la cérine dopée à l'yttrium de composition : $(\text{Ce O}_2)_{0,97} (\text{Y}_2 \text{O}_3)_{0,03}$, le travail de sortie d'un atome d'oxygène est beaucoup plus faible, d'où un courant d'échange plus grand avec le milieu extérieur.

Suivant une seconde variante de l'invention, on crée une seconde
15 région E_{12} superficielle de l'électrolyte, en déposant une mince couche sur la première région E_{11} , les matériaux de ces deux régions étant différents et le travail de sortie du matériau de la seconde région pour une espèce à détecter doit être plus faible que pour celui de la première région E_{11} .

La figure 7 décrit schématiquement un capteur réalisé conformément
20 à la seconde variante de l'invention. On retrouve les différents éléments déjà décrits : le substrat S_b et la première région de l'électrolyte E_{11} . Conformément à la seconde variante, la seconde région de l'électrolyte E_{12} est formée d'une couche mince d'un matériau dopé, formant également électrolyte solide. Enfin on retrouve l'électrode de mesure E_2 . L'électrode
25 de référence E_1 n'a pas été représentée sur cette figure.

En ce qui concerne le dépôt de la couche mince formant la seconde région E_{12} de l'électrolyte, les méthodes généralement utilisées pour la fabrication des circuits intégrés conviennent. A titre d'exemple, le dépôt peut être obtenu par évaporation sous vide ou par pulvérisation cathodique.

30 Si le procédé utilisé est trop rapide pour obtenir une couche suffisamment mince, le procédé décrit en relation avec la figure 3 peut à nouveau être utilisé. De façon préférentielle, la seconde zone a une épaisseur inférieure à 400 Å.

Le dépôt peut n'avoir lieu que dans certaines zones de la surface de

l'électrolyte principal E_{11} . Dans ce cas, on recourt aux techniques de masquages, bien connues de l'homme de métier.

L'invention n'est pas limitée aux seuls exemples de réalisations qui viennent d'être décrits à titre d'illustration.

5 On peut notamment créer une troisième région par surdopage de l'électrolyte principal E_{11} ou dépôt d'une couche mince dans la zone de contact "électrolyte-seconde électrode". C'est notamment nécessaire lorsque cette électrode n'est pas une électrode du type précédemment décrit "M-MX", combinant les fonctions électrode et milieu de référence.

10 Enfin l'invention s'applique à des dispositifs autres que les capteurs électrochimiques, tels que les dispositifs de production ou de stockage de l'énergie électrique à électrolyte solide.

TABLEAUElectrolyte solide :Région E_{11} :

matériau principal : $Zr O_2$, $Ce O_2$, $Hf O_2$, $Th O_2$

dopant : $Ca O$, $Yb_2 O_3$, $Sc_2 O_3$, $Y_2 O_3$, $Gd_2 O_3$, $Nd_2 O_3$,
 $La_2 O_3$

procédé de réalisation : frittage, évaporation, pulvérisation, implantation,...

Couche superficielle,Région E_{12} :

matériau principal : $Zr O_2$, $Ce O_2$, $Hf O_2$, $Th O_2$

dopant : $Ca O$, $Yb_2 O_3$, $Sc_2 O_3$, $Y_2 O_3$, $Gd_2 O_3$, $Nd_2 O_3$,
 $La_2 O_3$

procédé de réalisation : frittage, évaporation, pulvérisation, implantation

REVENDEICATIONS

1. Dispositif du type cellule électrochimique comportant un électrolyte solide ayant la structure d'un réseau cristallin constitué par un matériau dopé de façon à créer des lacunes dans le réseau ; l'électrolyte étant conducteur ionique exclusif d'une espèce chimique déterminée et en contact
5 avec deux électrodes conductrices ; dispositif caractérisé en ce que l'électrolyte comprend une première région (E_{11}) présentant un premier pourcentage de dopage (D_N) et une seconde région superficielle (E_{12}) présentant un second pourcentage de dopage (D_M) ; seconde région (E_{12}) recouvrant au moins la surface de la première région sous-jacente à au moins l'une des
10 électrodes (E_2) et le second pourcentage (D_M) étant choisi supérieur au premier (D_N) de façon à augmenter le nombre de lacunes créées dans le réseau.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le matériau est choisi parmi les suivants : zircone, thorine ou cerine, dopés à
15 un ou plusieurs éléments des colonnes IIA et IIIB du tableau périodique et l'espèce chimique déterminée est l'oxygène.

3. Dispositif du type cellule électrochimique comportant un électrolyte solide ayant la structure d'un réseau cristallin constitué par des matériaux dopés de façon à créer des lacunes dans le réseau ; l'électrolyte étant
20 conducteur ionique d'une espèce chimique déterminée et en contact avec deux électrodes conductrices ; dispositif caractérisé en ce que l'électrolyte comprend une première région (E_{11}) en un premier matériau dopé et une seconde région (E_{12}) en un second matériau dopé, seconde région (E_{12}) recouvrant au moins la surface de la première région sous-jacente à au
25 moins l'une des électrodes (E_2) ; le second matériau étant choisi pour que le travail de sortie que doit fournir un atome de l'espèce chimique déterminée soit plus faible que celui que doit fournir un atome de cette espèce pour le premier matériau.

4. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce que le premier
30 matériau est de la zircone dopée par du calcium et le second matériau de l'oxyde de cerium dopé par de l'yttrium ; l'espèce chimique déterminée étant

l'oxygène.

5. Procédé de fabrication d'un dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape pendant laquelle le pourcentage de dopage (D_N) de l'électrolyte est augmentée dans une région superficielle de l'électrolyte pour créer la seconde région (E_{12}) de l'électrolyte ; seconde région (E_{12}) recouvrant au moins la surface de l'électrolyte en contact avec au moins une des électrodes (E_2).

6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'augmentation du pourcentage de dopage est réalisé par implantation ionique d'un corps dopant.

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que ladite étape est précédée d'une étape préliminaire pendant laquelle une couche mince d'un matériau déterminé est déposée sur les zones de l'électrolyte dans lesquelles doit être formée la seconde région (E_{12}), l'implantation ionique s'effectuant au travers de la couche de matériau déposée ; et en ce que ladite étape est suivie d'une autre étape pendant laquelle la couche mince de matériau déterminé est enlevée par attaque chimique, usinage ionique ou attaque par plasma.

8. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'augmentation du pourcentage du dopage est réalisé par dépôt d'une couche mince de matériau sur les zones de l'électrolyte dans lesquelles doit être formée la seconde région (E_{12}) et en ce que le dépôt s'effectue par évaporation sous vide ou pulvérisation cathodique.

9. Procédé de fabrication d'un dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce que la première région (E_{11}) étant formée d'un premier matériau dopé, il comprend une étape pendant laquelle une couche mince d'un second matériau dopé est déposée sur le premier matériau pour créer la seconde région de l'électrolyte (E_{12}) ; seconde région recouvrant au moins la surface de l'électrolyte en contact avec au moins une des électrodes (E_2).

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que le dépôt est effectué par pulvérisation cathodique ou évaporation sous vide.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6, 8 ou 9, caractérisé en ce que ladite étape est suivie d'une autre étape pendant laquelle l'électrolyte subit une attaque chimique de façon à réduire l'épais-

seur de la seconde région (E_{12}), un usinage ionique ou une attaque par plasma.

1/3

FIG.1

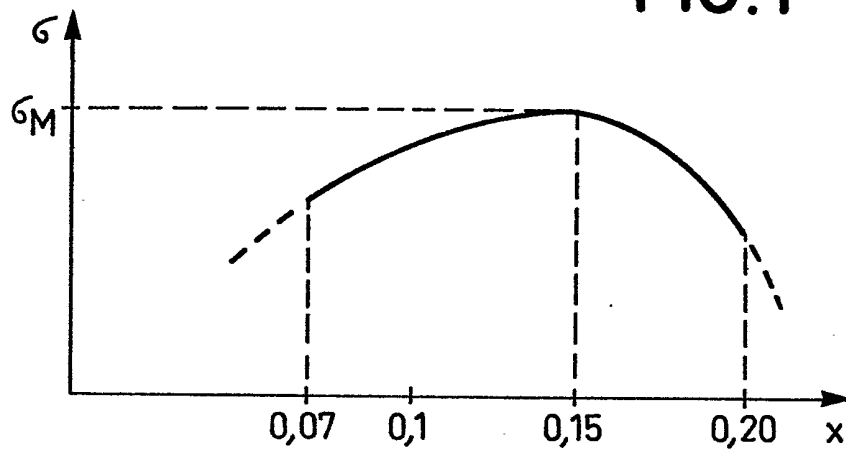


FIG.2

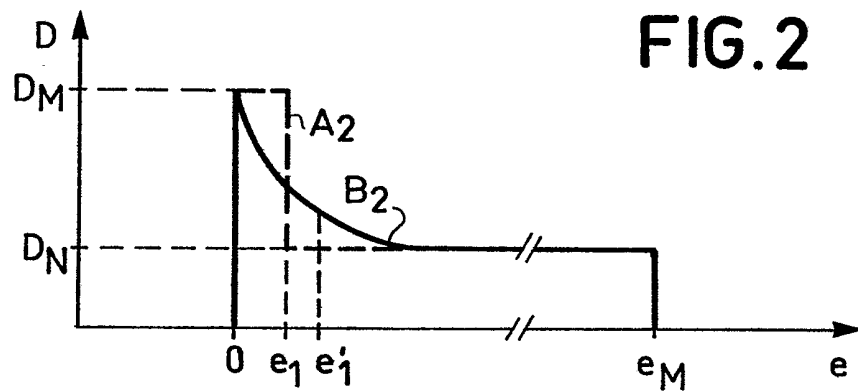
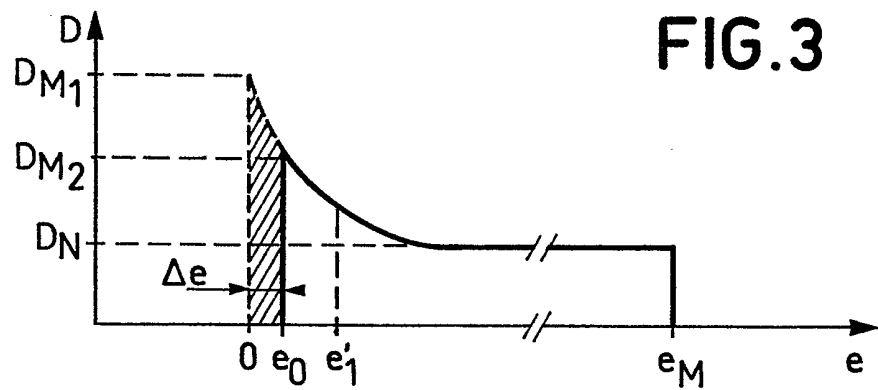


FIG.3



2/3

FIG. 4

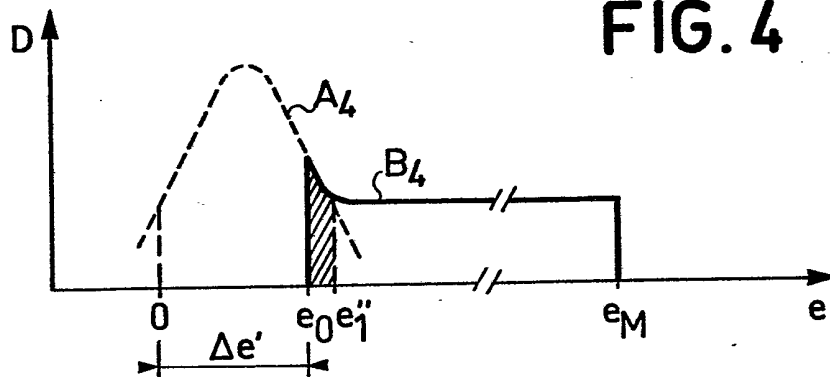


FIG. 7

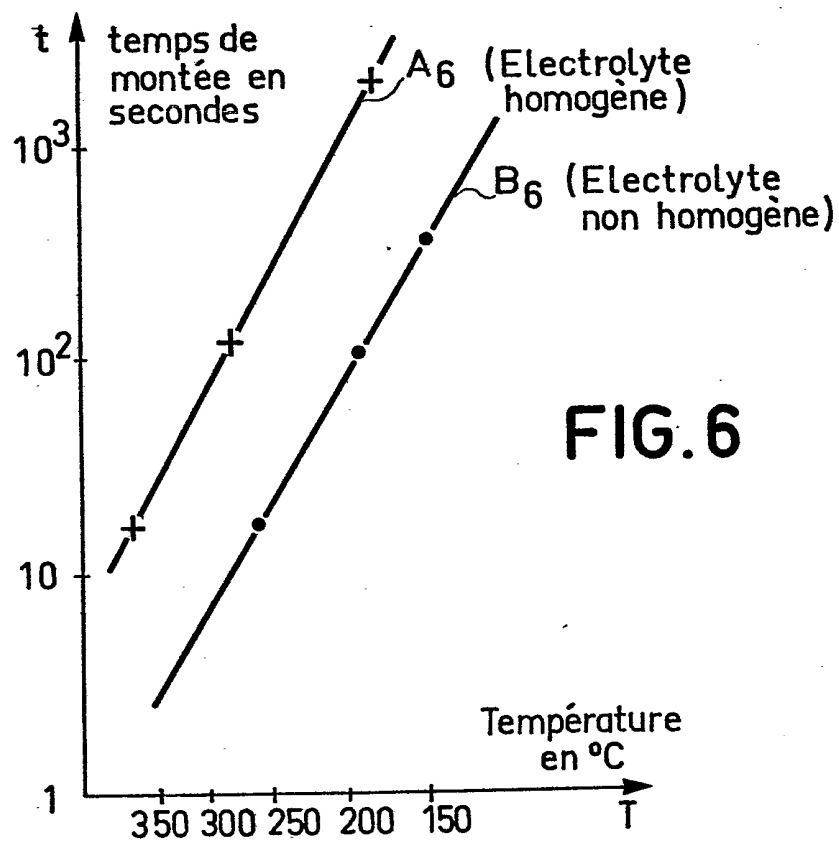
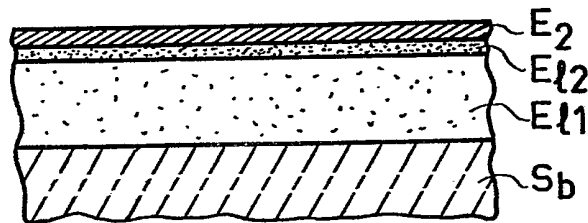


FIG. 6

3/3

FIG. 5

