



SEQUENÇAGE AUTOMATIQUE D'OPERATIONS DE FOCALISATION DE
FAISCEAUX IONIQUES

5

La présente invention concerne un système à faisceau d'ions focalisé (FIB, Focused Ion Beam en anglais) pour enlever un matériau ou déposer un matériau d'une manière automatisée, en particulier lors d'une modification d'un
10 dispositif semi-conducteur.

Un dispositif semi-conducteur est constitué de couches de matériaux différents. Les couches supérieures de la structure du dispositif, jusqu'à 5 couches ou plus, sont en relation avec les interconnexions entre les
15 cellules. Les interfaces au niveau desquelles ces couches se rencontrent sont appelées les frontières entre matériaux ; la figure 1 présente un exemple d'une structure 100 ayant une couche supérieure 105 et une couche inférieure 110 qui se rencontrent au niveau d'une
20 frontière 115. Lorsqu'un faisceau d'ions focalisé est utilisé pour enlever un matériau d'un dispositif semi-conducteur par fraisage, il est nécessaire de déterminer lorsque la frontière entre matériaux souhaitée a été atteinte de sorte que le procédé de fraisage puisse être
25 arrêté à la profondeur de fraisage souhaitée. La figure 2 présente la structure de la figure 1 dans laquelle une ouverture 100 a été fraisée de cette manière. Les présents procédés s'appuient sur une intervention manuelle pour arrêter le procédé de fraisage lorsque la frontière entre
30 matériaux a été atteinte.

Une autre raison pour laquelle on a besoin de détecter la frontière entre matériaux concerne l'utilisation d'une gravure à injection de gaz de la technique antérieure. Des gaz sont injectés à proximité de
35 la surface du dispositif semi-conducteur pendant le

procédé de fraisage pour augmenter l'efficacité de l'enlèvement d'un type de matériau spécifique. Lorsque les frontières entre des matériaux différents sont traversées, le type de gaz injecté est modifié pour se conformer aux exigences du nouveau matériau ; c'est-à-dire, qu'un gaz différent est utilisé pour chaque matériau ou classe de matériaux.

On connaît des systèmes servant au traitement de circuits intégrés et analogue, qui ont un faisceau d'ions focalisé (FIB). Voir par exemple le brevet US N° 5 140 164 dont le contenu est incorporé ici à titre de référence. Un système FIB disponible dans le commerce sous le nom de "IDS P2X FIBStation", Schlumberger Technologies, Inc., San Jose, Californie, possède un collecteur de gaz et a la capacité de passer d'un type de gaz d'injection à un autre.

Des frontières entre matériaux, entre différentes couches d'un semi-conducteur, peuvent être détectées pendant le procédé de fraisage ionique à l'aide de toute une gamme de procédés connus. L'un de ces procédés consiste à caractériser le procédé de fraisage puis à estimer le temps qu'il faut pour atteindre le point limite souhaité. Le procédé est caractérisé par les étapes qui consistent à vérifier manuellement le fraisage d'échantillons représentatifs d'un dispositif, noter des paramètres tels que le courant du faisceau, les gaz utilisés et la durée de fraisage nécessaire pour traverser chaque couche. Le procédé est ensuite répété sur une structure analogue à l'aide des mêmes paramètres, en tenant compte de la durée de fraisage pour atteindre une couche souhaitée de la structure. Si les propriétés de concentration des ions dans une zone donnée et de vitesse de gravure du matériau fraisé sont connues, le temps nécessaire pour fraiser au travers d'une couche constitué d'un matériau connu et ayant une épaisseur connue, pour

atteindre une couche située sous elle, peut être prédite de manière mathématique. La figure présente par exemple une source 300 produisant un FIB 305 pour fraiser au travers d'une couche 310, dans une région 315, pour
5 exposer une couche 320. Le procédé de fraisage du matériau de la couche 310 peut être caractérisé, de telle sorte que le temps t de fraisage au travers d'une couche de ce matériau d'une épaisseur donnée puisse être prédit.

Un autre procédé de détection du changement de la
10 frontière entre matériaux pendant un procédé de fraisage consiste à surveiller visuellement les changements du nombre d'électrons secondaires et à terminer manuellement l'opération lorsqu'un changement est observé. Voir le brevet US N° 5 140 164 intitulé "IC modification with
15 focused ion beam system". Lorsque le faisceau d'ions primaire heurte la surface d'un dispositif, des ions et des électrons secondaires à faible énergie sont émis. Chaque matériau assure une émission secondaire d'électrons différente : par conséquent, les transitions entre les
20 couches sont indiquées par un changement dans la production d'électrons secondaires. Les électrons secondaires sont détectés et utilisés pour produire une image FIB de la zone fraisée. Des changements du nombre d'électrons secondaires se manifestent dans l'image sous
25 la forme de changements de luminosité ou de contraste. En surveillant les changements de contraste dans l'image FIB, on peut quelquefois détecter les transitions entre matériaux. Par exemple, la figure 4 présente une source 400 émettant un FIB 405 pour fraiser une couche 410 dans
30 une région 415, pour exposer une couche 420, tandis que les électrons secondaires 425 sont détectés par un détecteur 430. Le détecteur 430 produit un signal qui est utilisé pour générer l'image FIB.

Un autre procédé de détection de frontières entre
35 matériaux consiste à surveiller visuellement les

changements du nombre d'ions secondaires et à terminer manuellement l'opération lorsqu'un changement est observé. Ce procédé de détection d'un point limite utilise une douche à faisceau d'électrons pour neutraliser le
5 chargement du dispositif, et un détecteur qui est polarisé électriquement de façon à détecter les ions secondaires chargés positivement. Les transitions entre matériaux sont détectées grâce au fait de tracer le graphique de l'intensité des ions secondaires détectés par rapport au
10 dosage d'ions par unité d'aire (nanocoulombs par micron carré). La courbe obtenue peut être interprétée de façon à déterminer le moment où la transition entre matériaux se produit.

Encore un autre procédé de détection de frontières
15 entre matériaux consiste à surveiller les changements de composition atomique, à l'aide de techniques de détection connues telles que les techniques SIMS, Auger ou EDX. Ces techniques permettent de déterminer la composition du matériau fraisé grâce à l'analyse du matériau de chute
20 enlevé pendant le procédé de fraisage. Les transitions entre matériaux sont détectées par la détermination du moment où la composition du matériau fraisé change.

Un autre procédé de détection de frontières entre matériaux consiste à surveiller le courant qui traverse
25 l'étage sur lequel le dispositif est maintenu pendant le fraisage. Un dispositif semi-conducteur est électriquement mis à la terre sur un étage X-Y du système FIB pendant le fraisage. Lorsque le faisceau d'ions primaires heurte la surface du dispositif, une charge électrique s'accumule
30 sur des surfaces non conductrices. Lorsqu'on atteint un matériau conducteur, un trajet vers la terre devient disponible pour cette charge accumulée. Ce phénomène produit un courant depuis l'étage vers la terre. Grâce à la surveillance et à la mesure de ce courant pendant le
35 fraisage d'une couche non conductrice, il est quelquefois

possible de déterminer le moment où un matériau conducteur a été atteint. La figure 5 présente une source 500 envoyant un FIB 505 qui fraise au travers d'une couche non conductrice 510, dans une région 515, pour exposer une
5 couche conductrice 520. Lorsque la couche conductrice 520 est exposée, la charge qui s'accumule sur la couche 510 pendant le fraisage se décharge vers la terre sous la forme d'un courant 525, ce qui indique que la couche conductrice a été atteinte.

10 On sait également détecter des frontières entre matériaux en réalisant, à l'intérieur de la structure du semi-conducteur, une couche de marquage qui possède des propriétés optiques différentes de celles des couches gravées ou protégées, de façon à être détectable par un
15 moyen optique lorsque elle est exposée par fraisage. Voir le brevet US N° 5 395 769, "Method for controlling silicon etch depth". Le procédé dépend de la conception de la couche supplémentaire dans la structure du semi-conducteur et n'a pas de rapport avec le fraisage au FIB de
20 dispositifs qui ne possèdent pas une telle couche de marquage.

Un objectif global réside dans l'automatisation complète du fonctionnement d'un système de fraisage FIB pour des opérations telles que la création d'un point
25 sonde (fraisage d'une ouverture au travers d'une ou de plusieurs couches pour exposer une couche enterrée, comme sur la figure 2) ou de la microchirurgie sur dispositifs (enlèvement et déposition de matériau pour modifier un dispositif). Pour automatiser le fonctionnement, il est
30 nécessaire de recueillir des informations qui peuvent être utilisées par le logiciel de commande pour déterminer qu'une transition entre matériaux a été atteinte, sans nécessiter l'intervention de l'utilisateur.

Selon des modes de réalisation de l'invention, un
35 procédé de traitement d'un dispositif semi-conducteur

comprend les étapes qui consistent à : appliquer un faisceau d'ions focalisé sur une structure d'un dispositif semi-conducteur à traiter ; produire un signal de détection en direct en détectant les électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure ; comparer le signal de détection en direct à une courbe de référence ayant une région indiquant une frontière entre matériaux attendue et un marqueur d'arrêt à l'intérieur de cette région ; et arrêter ou modifier une opération FIB sur la structure du dispositif semi-conducteur lorsque le signal de détection en direct présente une caractéristique correspondant à ladite région de la courbe de référence. La courbe de référence peut être générée selon l'invention par le fait d'appliquer un faisceau d'ions focalisé sur une structure de référence d'un dispositif semi-conducteur ; produire un signal de détection de référence en détectant les électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure de référence ; et préparer à partir du signal de référence une courbe de référence définissant ladite région indiquant ladite frontière entre matériaux attendue et ledit marqueur d'arrêt dans la région.

La courbe de référence et le signal de détection en direct sont de préférence normalisés par la compensation de leurs niveaux de contraste moyens, par exemple par application d'une commande de gain automatique. Des courbes de point final de référence normalisées sont divisées en régions à pente monotone distinctes en fonction des transitions entre les pentes de la courbe. L'une des régions monotones joue le rôle d'une "région d'arrêt" sur une courbe de point final de référence, et un marqueur d'arrêt est affecté à la région d'arrêt. Le procédé de fraisage FIB peut être arrêté ou modifié automatiquement, par exemple par commutation entre des gaz

de gravure augmentée, en fonction de la comparaison du temps d'exécution d'un signal de détection en direct (courbe en direct) par rapport au modèle de courbe de point final de référence pour lequel les régions monotones et le marqueur d'arrêt ont été affectés. Une courbe de point final de référence préparée pendant qu'un procédé FIB est effectué sur une structure de dispositif semi-conducteur peut être utilisée en tant que référence pour la commande automatique des opérations suivantes sur des structures de dispositifs semi-conducteurs analogues.

Ces particularités ainsi que d'autres de l'invention vont devenir évidentes à l'homme de métier à la lecture de la description ci-après et des figures des dessins ci-joints.

La figure 1 illustre une structure de la technique antérieure ayant une couche supérieure et une couche inférieure qui se rencontrent au niveau d'une frontière entre matériaux ;

la figure 2 présente la structure de la figure 1, dans laquelle le fraisage FIB d'une ouverture a été arrêté après être passé au travers d'une frontière entre matériaux, suivant la technique antérieure ;

la figure 3 présente une source produisant un FIB pour fraiser au travers d'une couche de matériau afin d'exposer une couche de matériau sous-jacente grâce à l'estimation du temps du point limite de fraisage souhaité, suivant la technique antérieure ;

la figure 4 présente une source émettant un FIB pour fraiser au travers d'une couche de matériau afin d'exposer une couche de matériau sous-jacente tout en surveillant les changements du nombre d'électrons secondaires pour déterminer un point limite de fraisage, suivant la technique antérieure ;

la figure 5 présente une source envoyant un FIB pour fraiser au travers d'une couche non conductrice afin

d'exposer une couche conductrice, tout en surveillant le courant d'étage pour déterminer un point final de fraisage, suivant la technique antérieure ;

les figures 6A, 6B et 6C présentent une structure en
5 couche à des instants respectifs t_1 , t_2 et t_3 pendant un fraisage FIB d'une ouverture dans la structure ;

la figure 7 présente un graphique du niveau de contraste en fonction de la durée, pendant la séquence de fraisage FIB des figures 6A à 6C ;

10 la figure 8A est un exemple d'une courbe de point final non régulée, avant la normalisation ;

la figure 8B est un exemple d'une courbe de point final normalisée ;

la figure 9A illustre de manière schématique le
15 concept de compensation du niveau de contraste moyen selon l'invention ;

la figure 9B présente un schéma d'un système FIB 914, comprenant des processeurs et une mémoire, qui peut être utilisé pour la mise en oeuvre de l'invention ;

20 la figure 10 est un exemple d'une courbe de référence divisée en régions monotones à l'aide d'une haute sensibilité aux changements de pente ;

la figure 11 est un exemple d'une courbe de référence divisée en régions monotones à l'aide d'une faible
25 sensibilité aux changements de pente ;

la figure 12 illustre la mise en place d'un marqueur d'arrêt sur une courbe de référence par rapport à un changement de contraste ;

la figure 13 illustre la relation entre le marqueur d'arrêt de la figure 12 et les frontières des régions
30 monotones de la courbe de référence ;

la figure 14 présente la relation temporelle entre le marqueur d'arrêt de la figure 12 et une frontière entre régions monotones de la courbe de référence ;

35 la figure 15 présente des exemples dans lesquels le

fraisage est arrêté d'après la comparaison de courbes de point final en direct et d'une courbe de référence, selon l'invention ;

les figures 16A et 16B illustrent l'optimisation automatisée d'un procédé de fraisage FIB augmenté au gaz, selon l'invention ;

la figure 17A est un organigramme à haut niveau d'un algorithme d'analyse de point limite automatisé selon l'invention ;

la figure 17B est un organigramme à haut niveau présentant la préparation d'une courbe de référence selon l'invention ;

la figure 18 est un organigramme plus détaillé d'un algorithme d'analyse de point final automatisé, à réparation séquentielle, selon l'invention ;

la figure 19 est un organigramme d'un algorithme de mise en correspondance de régions pour le procédé de réparation séquentielle de la figure 18 ;

la figure 20 est un organigramme d'un algorithme de calcul de pente pour le procédé de mise en correspondance de régions de la figure 19 ; et

la figure 21 est un organigramme d'un algorithme de comparaison de pentes pour le procédé de mise en correspondance de régions de la figure 19.

Des procédés de la présente invention peuvent être mis en oeuvre à l'aide d'un système "FIBStation" de Schlumberger ou d'un autre système FIB approprié. Des exemples de ces systèmes sont décrits dans le brevet US N° 5 140 164, au nom de Talbot et al., et dans le brevet US N° 5 675 499, au nom de Lee et al., qui sont incorporés ici à titre de référence.

Détection de frontières entre matériaux pendant un fraisage FIB

Les procédés de la technique antérieure servant à générer des courbes de point final mettent en jeu la

surveillance du niveau de contraste de l'image de la zone fraisée. Lorsque les frontières entre matériaux sont atteintes pendant le procédé de fraisage, le niveau de contraste de l'image FIB en cours d'affichage change, et
5 devient plus lumineux ou plus sombre. L'intervalle de contraste consiste typiquement en des niveaux de gris allant de 0 (noir) à 255 (blanc).

Selon un aspect de l'invention, ce changement de contraste est tracé comme sous la forme du niveau de
10 contraste en fonction du temps de fraisage nécessaire pour produire une "courbe de point final". Grâce à l'examen de la forme des courbes du niveau de contraste qui sont produites par ce procédé, il est possible de détecter les points de transition entre les frontières entre matériaux.
15 Considérons l'exemple des figures 6A à 6C et 7. La figure 6A présente l'état d'une structure 600 ayant des couches 605 et 610 à un instant t1, lorsque le fraisage commence. La figure 7 est une courbe de point final (un graphique représentant le contraste en fonction de la durée de
20 fraisage) présentant un niveau de contraste sombre à l'instant t1. La figure 6B présente l'état de la structure 600 à un instant t2, lorsque le fraisage a partiellement avancé au travers de la couche 605 dans la région 615. La figure 7 montre que le niveau de contraste reste sombre à
25 l'instant t2. La figure 6C présente l'état de la structure 600 à l'instant t3, après le fraisage au travers de l'interface 620 entre les couches 605 et 610. Le niveau de contraste de la figure 7 à l'instant t3 est lumineux par comparaison aux instants t1 et t2, la transition entre le
30 sombre et le lumineux se faisant au voisinage de l'instant tx lorsque le fraisage a traversé l'interface 620.

Il convient d'observer que les procédés de la technique antérieure ne génèrent pas de courbes de point final de référence destinées à être utilisées en tant que
35 guide pour la détermination manuelle lorsqu'une frontière

entre matériaux a été atteinte ; au lieu de cela, une image contrastée est surveillée visuellement dans ces procédés pour détecter un changement du niveau de contraste qui indiquerait qu'une frontière entre matériaux a été atteinte. Si le niveau de contraste n'est pas régulé, il peut atteindre des valeurs qui empêchent l'identification visuelle de particularités de la zone fraisée. Par exemple, lors d'un fraisage au travers d'un oxyde, la transition avec le métal peut produire un changement de contraste qui crée une image très lumineuse. Pour continuer la surveillance visuelle de l'opération de fraisage dans les procédés de la technique antérieure, il est nécessaire de réajuster manuellement le contraste à un niveau plus raisonnable.

Les inventeurs ont trouvé que ce réajustement du niveau de contraste dans les procédés de la technique antérieure produit des déviations remarquables de la courbe de point final du niveau de contraste par rapport au temps, ce qui rend la courbe inutilisable en tant que référence pour des réparations ultérieures sur des structures en matériaux analogues. Un exemple est présenté sur la figure 8A. La courbe de point final 800 commence à un niveau de contraste sombre lorsqu'une couche d'oxyde est fraisée, s'élève à un niveau lumineux en 805 lorsqu'une partie de la couche métallique sous-jacente est exposée. Le niveau de contraste est réajusté à l'instant t_1 de telle sorte que le fraisage de la couche métallique puisse être surveillé visuellement. Lorsque le fraisage traverse la couche métallique pour pénétrer dans une couche non métallique sous-jacente, le niveau de contraste baisse brusquement en 810. Puisque le niveau de contraste devient rapidement sombre, un autre réglage est nécessaire à l'instant t_2 pour maintenir le niveau de contraste dans un intervalle qui permet la surveillance visuelle du procédé de fraisage.

Utilisation du contraste automatique pour générer des courbes de point final de référence

Selon un aspect de l'invention, le niveau de contraste est maintenu automatiquement de telle sorte que des courbes de point final puissent être utilisées en tant que courbes de référence. Une courbe de point final de référence utilisable et valable est obtenue grâce au fait de maintenir le niveau de contraste constant et de tracer le graphique des changements que subit le contraste (par exemple dans le registre de contraste d'un système FIBStation de Schlumberger), afin de maintenir le niveau de contraste moyen en cours. Cette opération peut être effectuée selon l'invention grâce à l'utilisation d'une capacité de maintien de contraste automatique dans laquelle l'utilisateur règle le niveau de contraste initial souhaité (par exemple dans l'outil d'affichage d'image FIB du système FIBStation de Schlumberger). Le niveau de contraste moyen dans la fenêtre d'image FIB est surveillé en continu pendant l'opération de fraisage. Lorsque des changements du niveau de contraste moyen sont détectés, ils sont automatiquement compensés par l'application du réglage approprié au registre de contraste. (La compensation du niveau de contraste peut être effectuée manuellement dans l'exploitation du système FIBStation de la technique antérieure, bien qu'avec des mises à jour intermittentes plutôt que continues). La figure 8B illustre le type de courbe de point final normalisée 850 qui doit être produit selon l'invention grâce au maintien du niveau de contraste dans un intervalle de niveaux de gris compris entre 0 et 255 lorsque le FIB fraise une structure de semi-conducteur en couches.

La compensation du niveau de contraste moyen est automatisé selon l'invention. La figure 9A illustre le concept de manière schématique. Un détecteur 900 détecte

des particules secondaires lorsqu'un FIB 902 provenant d'une source 904 fraise un composant en essai DUT (Device Under Test en anglais) 906. Le détecteur 900 envoie un signal de détection en direct 908 à une commande automatique de gain (AGC) 910, qui envoie quant à elle un signal de détection normalisé 912. Dans la pratique, il est commode d'avoir dans un système FIB un moyen de traitement de signaux numériques, comme un système FIBStation de Schlumberger, pour effectuer la fonction de commande automatique de gain par surveillance des changements et application de ces derniers au registre de contraste selon la nécessité, pour compenser les changements du niveau de contraste moyen. Les changements qui sont appliqués au registre de contraste sont affichés sous la forme d'une courbe de point final. Puisque tous les ajustements de contraste sont limités pour maintenir le niveau de contraste dans l'intervalle de niveaux de gris compris entre 0 et 255, les courbes de point final qui sont produites sont de ce fait normalisées. Les données du registre de contraste et de la courbe de point final normalisée peuvent être de quelconques parties de mémoire appropriées dans le système.

La figure 9B présente un schéma d'un système FIB, comprenant des processeurs et un mémoire, qui peut être utilisé pour mettre en oeuvre les procédés de la présente invention. Une chambre à vide 916, dans laquelle le vide est créé par des pompes 918, renferme une colonne FIB 920, un étage de spécimen 922 pour supporter un DUT 925, un détecteur 926 et un injecteur de gaz 928. La colonne 920 comprend une source d'ions 930, et des éléments optiques de contrôle des ions 932 pour commander l'alignement et la déviation du faisceau d'ions 934. Le détecteur 926 peut comprendre un scintillateur 936 et un tube photomultiplicateur 938 pour détecter des particules secondaires 940 émises lorsque le FIB 934 heurte un

spécimen 924. Le système comprend une station de travail 950 ayant une unité de traitement (CPU) 954, un moniteur 956 et des dispositifs d'entrée/sortie (I/O) 958 tels qu'un clavier et/ou une souris. La station de travail 950 est reliée par un bus 960 à une unité de commande système 962 comprenant une unité centrale de commande, une unité de traitement d'image et des registres de mémoire. L'unité de commande système 962 communique par l'intermédiaire d'un bus 964 avec une unité de commande de pompes à vide 966 pour commander les pompes à vide 918, avec une unité de commande d'injecteur de gaz 968 pour commander l'injecteur de gaz 928, avec une unité de commande de haute tension de FIB 970 pour commander la source d'ions 930, avec l'unité de commande d'alignement & de déviation du FIB 972 pour commander les éléments optiques de contrôle des ions 932, avec des circuits électroniques de traitement de signaux de détection 974 qui reçoivent un signal de détection provenant du détecteur 926, et avec une unité de commande d'étage de spécimen 976 pour commander un étage de spécimen 922 afin de positionner le spécimen 924. L'unité de commande système 962 envoie des informations de commande de faisceau à l'unité de commande d'alignement et de déviation du FIB 972. En fonctionnement, un DUT 924 est placé dans une chambre à vide 916. Le vide est fait dans la chambre 916. Sous la commande de l'unité de commande système 962, le FIB 934 est balayé sur une région choisie du DUT pour effectuer un fraisage. Pendant le fraisage, un gaz approprié est injecté à la surface du spécimen 924 à partir d'un injecteur de gaz 928, sous la commande de l'unité de commande système.

Le procédé de production d'une courbe de point final de référence à l'aide du maintien de contraste automatique est appelé ici "normalisation" de la courbe de point final. Une courbe de point final de référence, générée par

ce procédé, peut être utilisée en tant que recette pour l'exécution d'opérations de fraisage analogues. Plus précisément, les courbes de point final sont normalisées pour fournir des courbes de référence pouvant être
5 utilisées pour effectuer la même opération de manière répétitive. Les courbes de référence peuvent être utilisées par exemple en tant que gabarit pour déterminer l'instant d'arrêt d'une opération de fraisage sur des structures composées de couches de matériaux analogues, du
10 fait que les courbes de référence sont cohérentes les unes avec les autres lorsqu'elles sont générées à partir de structures en matériaux analogues. De ce fait, elles peuvent être utilisées en tant que courbes de référence. La reproductibilité de la production de la courbe de
15 référence avec un maintien de contraste automatique permet une détermination automatique selon l'invention du moment où le procédé de fraisage doit être arrêté, sans nécessiter d'intervention manuelle.

Mise en correspondance de courbes de point final de
20 référence avec des courbes de point final en direct

Dans un autre aspect, la présente invention permet une comparaison automatique d'une courbe de point final de référence à une courbe de point final en direct. Lorsque une opération de fraisage en direct est en cours, la
25 courbe de point final en direct est comparée à une courbe de référence choisie. Cette comparaison est effectuée grâce à la division de la courbe de référence en régions distinctes. Les régions sont déterminées par l'estimation de la pente de la courbe de référence sur un segment de
30 largeur choisie, comme par exemple sur plusieurs pixels de l'écran. (La courbe est obtenue dans un système FIBstation grâce à l'acquisition de valeurs du niveau de contraste à des instants discrets, et est affichée grâce à la conversion de ces échantillons en pixels à l'écran, ayant
35 une position d'affichage x,y et une certaine valeur de

niveau de contraste. La pente sur la pluralité de pixels d'écran peut être déterminée par calcul de la vitesse de changement de la valeur du niveau de contraste sur un nombre choisi de pixels d'écran). Des changements
5 distincts de la pente sont utilisés pour définir des frontières entre régions. Le nombre de régions distinctes qui est généré peut être modifié grâce à l'ajustement du réglage de sensibilité.

Le réglage de la sensibilité à un niveau élevé divise
10 la courbe en beaucoup de régions. Un exemple est présenté sur la figure 10. Avec la sensibilité réglée à un niveau élevé, la courbe de référence 1000 est divisée en un grand nombre de régions, indiquées sur la figure 10 par des pointillés verticaux au niveau des frontières entre
15 régions. Le réglage de la sensibilité à un niveau bas divise la courbe en un plus petit nombre de régions. Un exemple est présenté sur la figure 11. Avec la sensibilité réglée à un niveau bas, la courbe de référence 1000 est divisée en un petit nombre de régions correspondant aux
20 changements principaux des courbes de référence. Les régions sont indiquées sur la figure 11 par les lignes verticales en pointillés 1105, 1110, 1115 et 1120 au niveau des frontières entre régions. Lorsqu'une courbe de point final en direct est générée pendant le fraisage, les
25 changements de région sont surveillés et comparés à la régions correspondante de la courbe de référence.

Détection d'erreur pendant la mise en correspondance des régions avec des régions obtenues en direct

Selon un autre aspect de l'invention, la courbe de
30 point final en direct, produite pendant une opération de fraisage, est comparée en continu (ou fréquemment) à une courbe de référence pendant que le fraisage a lieu. Dans ce but, des régions monotones de la courbe de point final en direct sont comparées à des régions monotones de la
35 courbe de référence pour déterminer si les régions

monotones des deux courbes correspondent. Si une différence de pente entre les deux régions est détectée, un message d'erreur peut être généré et le procédé de fraisage est arrêté automatiquement.

5 Arrêt automatique du procédé de fraisage en fonction de la courbe de point final de référence

Dans encore un autre aspect, l'invention met à disposition un procédé de réglage d'un point d'arrêt de fraisage en fonction d'une courbe de référence. Un exemple
10 est présenté sur la figure 12, sur laquelle un marqueur d'arrêt 1205 a été placé sur une courbe de référence 1200 à la position d'arrêt souhaitée. La figure 13 présente la même courbe et le même marqueur d'arrêt avec les frontières entre région 1305, 1310, 1315 et 1320
15 définissant des régions 1325, 1330 et 1335. La région dans laquelle le marqueur d'arrêt est placé, la région 1330, est appelée "région d'arrêt".

Lorsque le fraisage a lieu, les régions monotones de la courbe en direct sont comparées aux régions monotones
20 de la courbe de référence. Lorsqu'il est détecté que la courbe de point final en direct est passée dans la "région d'arrêt", un minuteur commence à compter le temps qui s'écoule entre la frontière de la région d'arrêt sur la courbe de référence et la position du marqueur d'arrêt. La
25 figure 14 présente la durée t entre la frontière entre régions 1310 et le marqueur d'arrêt 1205, qui doit être mesurée lorsque le fraisage a lieu au-delà de la frontière entre régions 1310.

La durée peut également être mise à l'échelle à
30 l'aide de rapport entre la densité ionique utilisée pour créer la courbe de référence (idd_{ref}) et la densité ionique utilisée pour recueillir la courbe en direct (idd_{live}), c'est-à-dire avec un facteur d'échelle de temps égal à idd_{ref}/idd_{live} . Plus précisément, puisque la durée de
35 fraisage est proportionnelle à la densité ionique, des

différences entre la densité ionique utilisée dans l'opération de fraisage à partir de laquelle la courbe de référence a été créée et la densité ionique utilisée dans l'opération de fraisage à partir de laquelle la courbe en direct est obtenue peuvent être facilement compensées à l'aide de rapports entre les densités ioniques (c'est-à-dire $t_{live} = t_{ref}(idd_{ref}/idd_{live})$). Le procédé de fraisage peut être terminé automatiquement lorsque la durée appropriée est écoulée.

Si les régions de la courbe en direct et de la courbe de référence ne correspondent à tous les instants pendant le fraisage, le procédé peut être arrêté automatiquement. La comparaison des régions monotones rend la comparaison entre les courbes de point final et les courbes de référence indépendante des variations d'échelle et de décalage. Des exemples sont présentés sur la figure 15. La comparaison de la courbe en direct 1500 à la courbe de référence 1200 aboutit à un arrêt automatique du fraisage en 1505 lorsque la pente de la courbe 1500 correspond à la pente de la courbe de référence 1200 dans la région 1300. D'une manière analogue, la comparaison de la courbe en direct 1510 à la courbe de référence 1200 aboutit à l'arrêt automatique du fraisage en 1515 lorsque la pente de la courbe 1510 correspond à la pente de la courbe de référence 1200 dans la région 1330. Il convient d'observer que la durée absolue du point final diffère dans chaque cas, mais que l'utilisation des pentes des courbes rend possible la comparaison des courbes.

Commutation entre des gaz de gravure augmentée en fonction de la courbe de point final de référence

La capacité à terminer une opération de fraisage d'après la comparaison entre une courbe en direct et une courbe de référence permet également au système de commuter automatiquement entre des gaz de gravure choisis lorsqu'un point final est atteint et de continuer le

fraisage avec un gaz de gravure différent jusqu'à ce qu'un deuxième point final soit atteint. L'opération de fraisage peut ensuite avoir lieu avec un nouveau gaz, de façon à optimiser la vitesse de gravure au matériau fraisé, à

5 chaque étape de l'opération. Par exemple, la figure 16A montre un dispositif semi-conducteur 1600 ayant une première couche 1605 de matériau A et une deuxième couche 1610 de matériau B. Un FIB 1615 provenant d'une source 1620 est utilisé pour graver une ouverture 1625 pendant

10 qu'un courant 1630 de gaz A' est envoyé d'une source 1635 pour optimiser la gravure du matériau A. Lorsque la gravure au travers de la couche 1605 est terminée et que la couche 1610 est exposée, comme on le voit sur la figure 16B, un gaz différent B' est utilisé pour optimiser la

15 gravure du matériau B. Afin d'automatiser le procédé de commutation entre le gaz A' et le gaz B', il est nécessaire de déterminer automatiquement le point auquel la transition entre le matériau A et le matériau B est atteinte. Des procédés selon la présente invention

20 permettent de déterminer le point de transition par comparaison d'une courbe en direct à une courbe de référence, comme on le décrit dans la présente description, de sorte que le type de gaz envoyé puisse être changé lorsque la transition est identifiée.

25 La figure 17A est un organigramme à haut niveau d'un algorithme d'analyse de point final automatisé selon l'invention, pouvant être utilisé dans le traitement d'un dispositif semi-conducteur. A l'étape 1710, un FIB est appliqué sur une structure d'un dispositif semi-conducteur

30 à traiter. A l'étape 1720, un signal de détection en direct est produit par la détection des électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure. A l'étape 1730, le signal de détection en direct est comparé à une courbe de référence

35 ayant une région indiquant une frontière entre matériaux

attendue et un marqueur d'arrêt à l'intérieur de ladite région. A l'étape 1740, le fonctionnement du FIB est arrêté lorsque le signal de détection en direct présente une caractéristique correspondant à ladite région de la

5 courbe de référence. L'arrêt peut mettre en jeu l'arrêt de l'application du FIB sur la structure, ou le changement de paramètres de fonctionnement du FIB par exemple par passage de l'application d'un premier gaz à l'application d'un deuxième gaz alors que le fraisage au FIB continue.

10 La figure 17B est un organigramme à haut niveau présentant la préparation d'une courbe de référence selon l'invention. A l'étape 1750, un signal de détection de référence est produit par la détection des électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est

15 appliqué sur la structure de référence. A l'étape 1760, une courbe de référence est produite à partir du signal de référence. A l'étape 1770, la courbe de référence est divisée en régions monotones. A l'étape 1780, une région monotone de la courbe de référence, qui représente une

20 frontière entre matériaux dans la structure de référence, est définie comme une région d'arrêt. La courbe de référence et le signal de détection en direct sont de préférence normalisés par compensation de leurs niveaux de contraste moyen respectifs, par exemple à l'aide d'une

25 commande de gain automatique.

La figure 18 est un organigramme d'un algorithme d'analyse de point final automatisé, à réparation séquentielle, selon l'invention. Le fonctionnement FIB commence à l'étape 1800. Un FIB est appliqué sur une

30 structure d'un DUT et un signal de détection en direct (courbe de point final en direct) est produit par la détection des particules secondaires. Une courbe de référence préalablement mémorisée est chargée à l'étape 1810 pour permettre la comparaison avec une courbe en

35 direct. Si le chargement échoue, un message d'erreur est

génééré, indiquant qu'une courbe de référence ne peut pas être trouvée. Si le chargement réussi, un contrôle est effectué à l'étape 1820 pour vérifier si la courbe de référence a une région d'arrêt, comme par exemple la
5 région 1330 de la figure 13. Si aucune région d'arrêt n'est trouvée, un message d'erreur est généré, indiquant qu'aucun marqueur d'arrêt n'est affecté à la courbe de référence. Si une région d'arrêt est trouvée, un contrôle est effectué à l'étape 1830 pour vérifier si le procédé en
10 direct a déjà passé la région d'arrêt. Si oui, un message d'erreur est généré, indiquant que la région d'arrêt a été passée. Si non, la comparaison de régions entre la courbe de point final en direct et la courbe de référence commence à l'étape 1840.

15 A l'étape 1840, la dernière région générée de la courbe de point final en direct est comparée à la région correspondante de la courbe de référence. Cette opération de comparaison est décrite plus en détail ci-après, par référence à l'organigramme de la figure 19. A l'étape
20 1850, la comparaison avance à la région suivante et continue en boucle de la manière illustrée, tant que la région en cours n'est pas la région d'arrêt. Lorsque la région d'arrêt est rencontrée, la commande passe à l'étape 1860, où le temps est mesuré entre le commencement de la
25 région d'arrêt et le moment où le marqueur d'arrêt est rencontré, comme par exemple la durée t sur la figure 14 entre la frontière 1310 entre régions monotones et le marqueur d'arrêt 1205. Lorsque le marqueur d'arrêt est rencontré, l'opération de fraisage au FIB en cours est
30 arrêtée à l'étape 1870. L'arrêt de l'opération de fraisage au FIB peut mettre en jeu l'arrêt de l'application du FIB sur la structure, ou, si le fraisage doit continuer avec l'application d'un gaz de gravure différent, l'arrêt de l'application d'un premier gaz et le commencement de
35 l'application d'un deuxième gaz pendant que le fraisage

continue.

La figure 19 est un organigramme d'un algorithme de mise en correspondance de régions pour le procédé de réparation séquentielle auquel il est fait référence à l'étape 1840 de la figure 18. La comparaison de régions commence à l'étape 1900. A l'étape 1910, la mise en correspondance de la courbe de point final en direct avec la courbe de référence est de préférence différée par ignorance de la première région monotone du fait qu'un temps d'établissement est nécessaire pour que la pente de la courbe de point final en direct se stabilise. A l'étape 1920, la comparaison passe à la région suivante. A l'étape 1930, la comparaison est surveillée pour déterminer si une transition entre régions a été atteinte. Lorsqu'une transition entre régions est atteinte, deux calculs sont effectués : à l'étape 1940, la pente de la région qui est actuellement traversée sur la courbe en direct est calculée et désignée comme MONTANTE, PLATE ou DESCENDANTE ; à l'étape 1950, la pente de la région qui est actuellement traversée sur la courbe en direct est calculée et désignée comme MONTANTE, PLATE ou DESCENDANTE. Un procédé de calcul de pente qui peut être utilisé dans les étapes 1940 et 1950 est décrit par référence à la figure 20. En tant qu'alternative au calcul simultané des pentes des régions aux étapes 1940 et 1950, les pentes de régions de la courbe de référence peuvent être préparées à l'avance.

A l'étape 1960, la pente de région calculée pour la courbe de point final en direct est comparée à la pente de région de la courbe de référence. Un procédé de comparaison de pentes qui peut être utilisé dans l'étape 1960 est décrit par référence à la figure 21. Si les pentes ne correspondent pas, un message d'erreur est généré, indiquant la non correspondance des régions et, si cela est souhaité, l'opération de fraisage est arrêtée

automatiquement de telle sorte que la raison de la non correspondance puisse être recherchée manuellement. Si les pentes correspondent, un contrôle est effectué à l'étape 1970 pour vérifier si la région d'arrêt a été rencontrée.

- 5 Si les pentes ne correspondent pas, la commande retourne à l'étape 1920 et traite la région suivante. Si les pentes correspondent, alors la région d'arrêt a été rencontrée, et la commande retourne à l'étape 1860 de la figure 18.

La figure 20 est un organigramme d'un algorithme de calcul de pente pour le procédé de mise en correspondance de régions de la figure 19. Le calcul de pente commence à l'étape 2000. A l'étape 2010, la pente réelle de la courbe est comparée à des limites de transition entre pentes prédéterminées. Par exemple, les limites de transition entre pentes définissent une limite supérieure d'une pente à considérer comme PLATE et une limite inférieure d'une pente à considérer comme PLATE. Une pente située au dessus de la limite PLATE supérieure est jugée MONTANTE, comme l'indique l'étape 2020. Une pente comprise entre les limites PLATE supérieure et inférieure est jugée plate, comme l'indique l'étape 2030. Une pente située en dessous de la limite PLATE inférieure est jugée DESCENDANTE, comme l'indique l'étape 2040. Lorsque la pente a été catégorisée comme MONTANTE, PLATE ou DESCENDANTE, la catégorie de la pente est renvoyée à l'étape 2050 pour être utilisée dans une comparaison ultérieure. Le calcul de pente prend fin à l'étape 2060.

La figure 21 est un organigramme d'un algorithme de comparaison de pente pour le procédé de mise en correspondance de régions de la figure 19. La comparaison de pente commence à l'étape 2100. A l'étape 2110, la pente de la courbe de point final en direct est déterminée et est catégorisée comme MONTANTE comme l'indique l'étape 2120, PLATE comme l'indique l'étape 2130 ou DESCENDANTE comme l'indique l'étape 2140. La pente de la courbe de

- point final en direct est ensuite comparée à la pente de la courbe de référence, qui est MONTANTE, PLATE ou bien DESCENDANTE, comme l'indiquent respectivement les étapes 2150, 2160 et 2170. Si les pentes ne correspondent pas, un
- 5 message d'erreur est généré à l'étape 2180. Si les pentes correspondent (c'est-à-dire, que les deux sont MONTANTES, que les deux sont PLATES ou bien que les deux sont DESCENDANTES), la comparaison de pentes prend fin à l'étape 2190.
- 10 L'homme de métier comprendra que ces modifications ainsi que d'autres peuvent être effectuées dans l'esprit et l'objet de l'invention telle que définie dans les revendications ci-après.

Revendications

1. Procédé de traitement d'un dispositif semi-conducteur, comprenant les étapes qui consistent à :

5 a. appliquer un faisceau d'ions focalisé sur une structure d'un dispositif semi-conducteur à traiter ;

b. produire un signal de détection en direct en détectant les électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure ;

10 c. comparer le signal de détection en direct à une courbe de référence ayant une région indicatrice d'une frontière entre matériaux attendue et un marqueur d'arrêt à l'intérieur de cette région ; et

d. terminer l'application du faisceau d'ions focalisé sur la structure du dispositif semi-conducteur lorsque le
15 signal de détection en direct présente une caractéristique correspondant à ladite région de la courbe de référence.

2. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre la production de ladite courbe de référence par :

20 e. application d'un faisceau d'ions focalisé sur une structure de référence d'un dispositif semi-conducteur ;

f. production d'un signal de détection de référence grâce à la détection des électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure de référence ; et

25 g. préparation, à partir du signal de référence, d'une courbe de référence définissant ladite région indiquant ladite frontière entre matériaux attendue et ledit marqueur d'arrêt dans la région.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel
30 l'étape g. comprend la normalisation de la courbe de référence par la compensation du niveau de contraste moyen.

4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel
35 l'étape b. comprend la normalisation du signal de détection en direct par compensation du niveau de

contraste moyen.

5. Procédé selon la revendication 2, dans lequel l'étape g. comprend la division de la courbe de référence en régions à pente monotone.

5 6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel l'étape g. comprend en outre la définition, en tant que région d'arrêt, d'une région de la courbe de référence qui représente une frontière entre matériaux à l'intérieur de la structure de référence.

10 7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel l'étape g. comprend en outre l'affectation d'un marqueur d'arrêt à la région d'arrêt.

8. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape c. comprend la comparaison de la pente du signal
15 de détection en direct à la pente de la courbe de référence.

9. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre l'étape qui consiste à appliquer un gaz sur la structure lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué
20 sur la structure.

10. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre l'étape qui consiste à arrêter l'application du gaz sur la structure lorsque le signal de détection en direct affiche une caractéristique correspondant à ladite région
25 de la courbe de référence.

11. Procédé selon la revendication 7, dans lequel l'étape c. comprend les opérations qui consistent à : récupérer une courbe de référence (1810) ; déterminer si la courbe de référence comprend une région d'arrêt
30 (1820) ; déterminer si la comparaison a dépassé la région d'arrêt (1830) ; et comparer la pente du signal de détection en direct avec la pente de chaque région de la courbe de référence (1840).

12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel
35 l'étape c. comprend en outre les opérations qui consistent

à déterminer le moment où la région d'arrêt a été atteinte (1840) et, lorsqu'elle a été atteinte, mesurer le temps qui s'écoule entre le commencement de la région d'arrêt et le moment où le marqueur d'arrêt est rencontré.

5 13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel l'étape d. comprend l'arrêt de l'application du faisceau d'ions focalisé sur la structure après que le marqueur d'arrêt a été rencontré.

10 14. Procédé selon la revendication 11, dans lequel la comparaison de la pente du signal de détection en direct à la pente d'une région de la courbe de référence comprend les opérations qui consistent à : détecter le moment où une transition entre régions est rencontrée sur le signal de détection en direct (1930) ; calculer la pente d'une
15 région actuellement traversée sur le signal de détection en direct et la désigner comme étant MONTANTE, PLATE ou DESCENDANTE (1940) ; calculer la pente d'une région actuellement traversée sur la courbe de référence et la désigner comme étant MONTANTE, PLATE ou DESCENDANTE
20 (1950) ; et déterminer si la désignation de la pente du signal de détection en direct correspond à la désignation de la pente de la courbe de référence.

25 15. Procédé selon la revendication 14, dans lequel le calcul de la pente d'une région comprend : l'affectation de limites de transition entre pentes pour définir des désignations de pente MONTANTE, PLATE et DESCENDANTE, et déterminer si la pente d'une région tombe à l'intérieur, au-dessus ou en dessous des limites de transition entre pentes.

30 16. Procédé de traitement d'un dispositif semi-conducteur, comprenant les étapes qui consistent à :

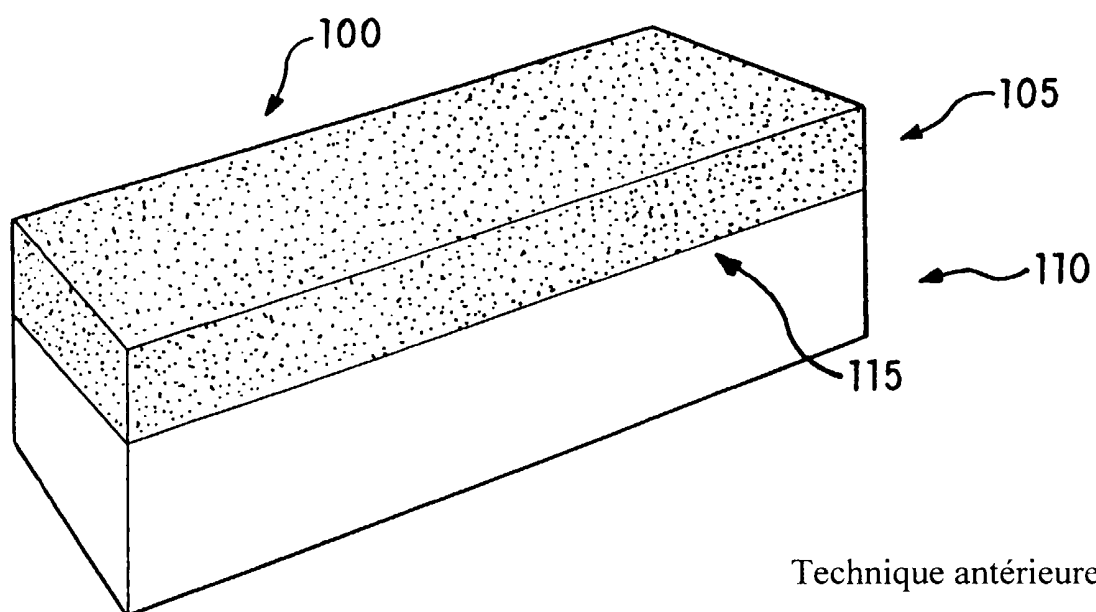
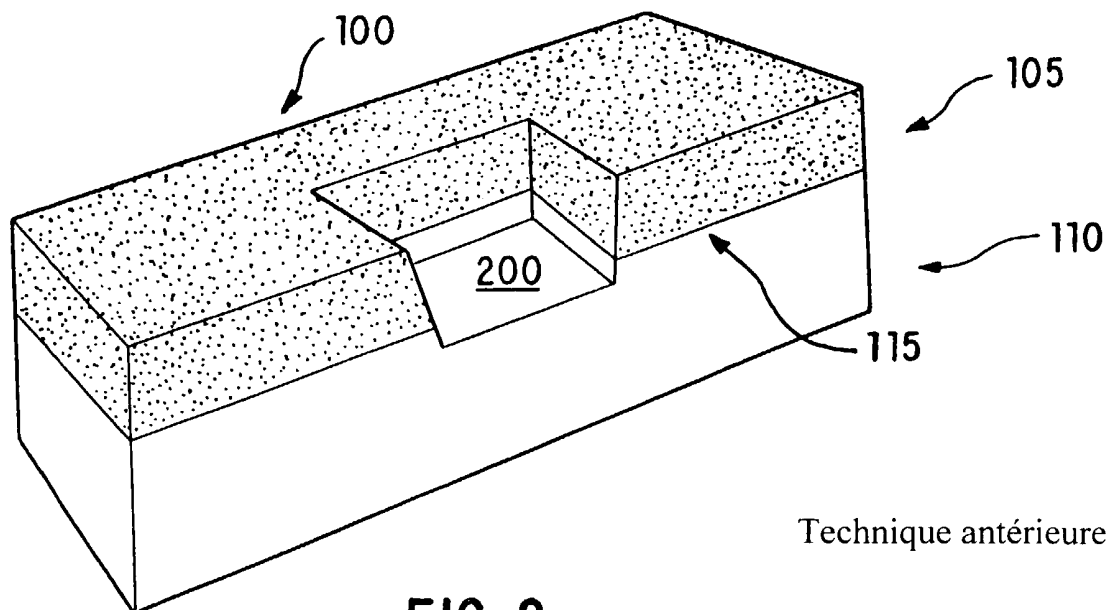
 a. appliquer un faisceau d'ions focalisé et un premier gaz sur une structure d'un dispositif semi-conducteur à traiter ;

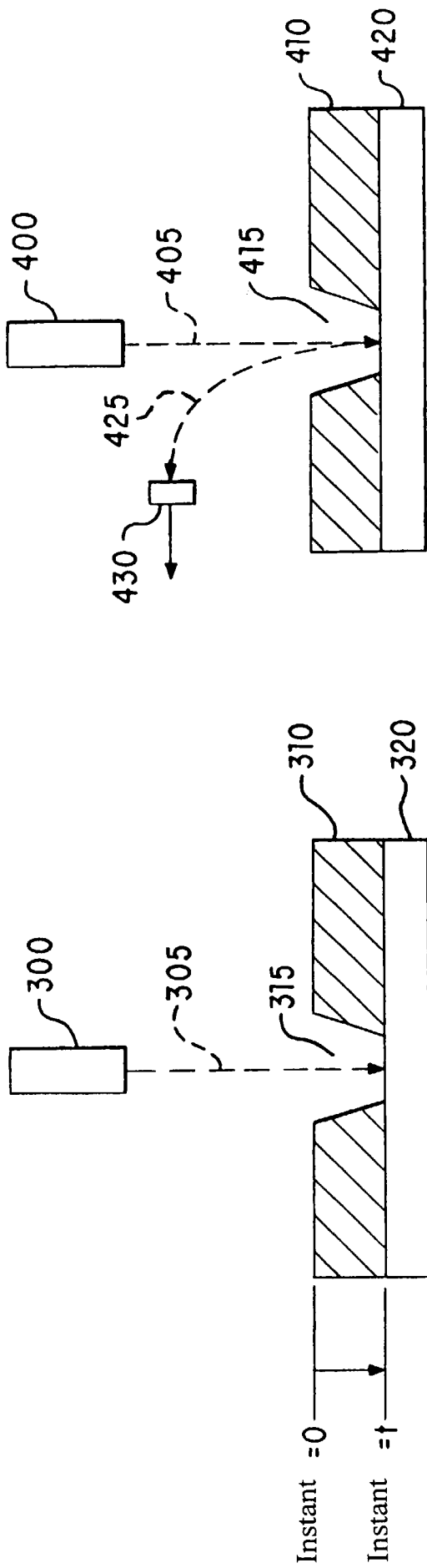
35 b. produire un signal de détection en direct en

déTECTANT les électrons secondaires émis lorsque le faisceau d'ions focalisé est appliqué sur la structure ;

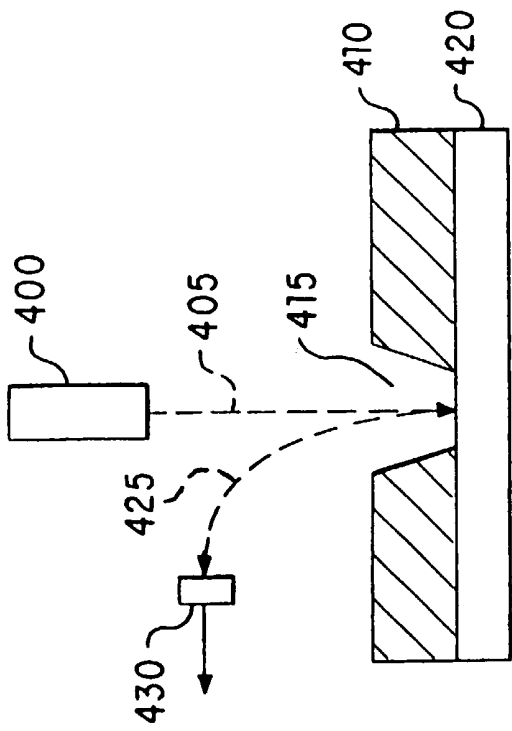
5 c. comparer le signal de détection en direct à une courbe de référence ayant une région indiquant une frontière entre matériaux attendue et un marqueur d'arrêt à l'intérieur de cette région ; et

10 d. lorsque le signal de détection en direct présente une caractéristique correspondant à ladite région de la courbe de référence, appliquer un faisceau d'ions focalisé et un deuxième gaz sur ladite structure.

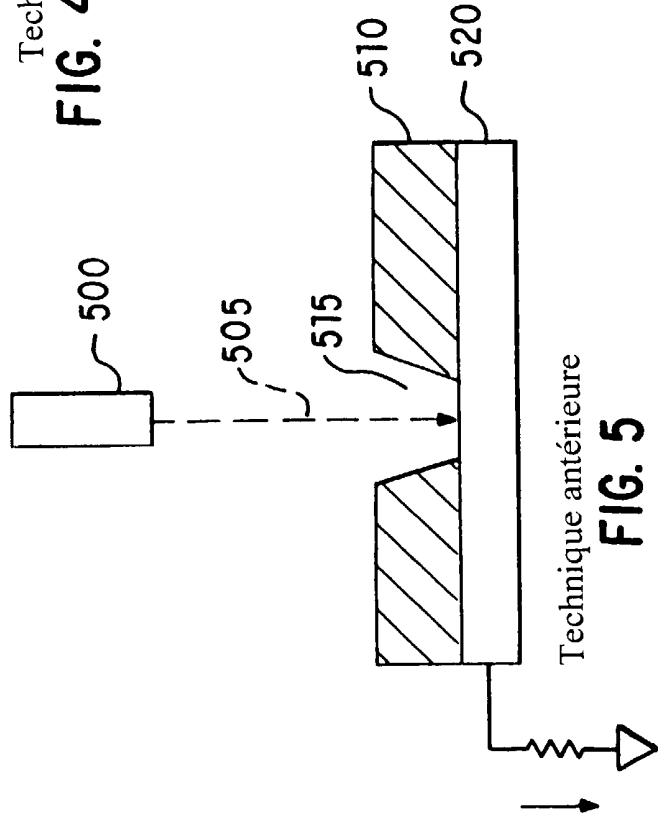
**FIG. 1****FIG. 2**



Technique antérieure
FIG. 3



Technique antérieure
FIG. 4



Technique antérieure
FIG. 5

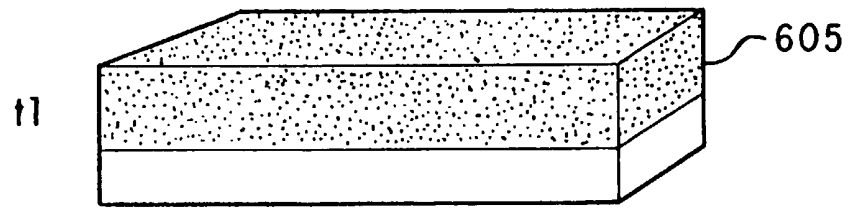


FIG. 6A

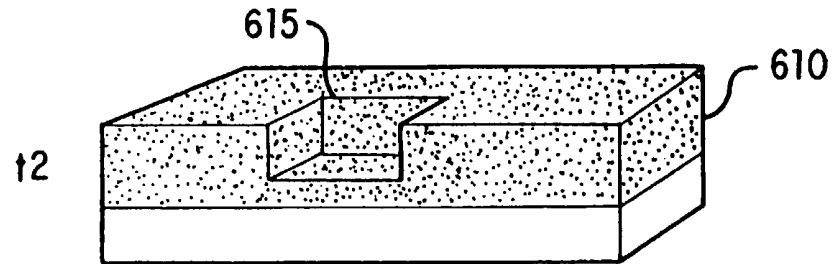


FIG. 6B

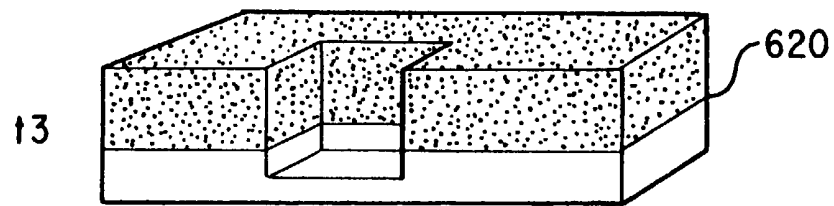


FIG. 6C

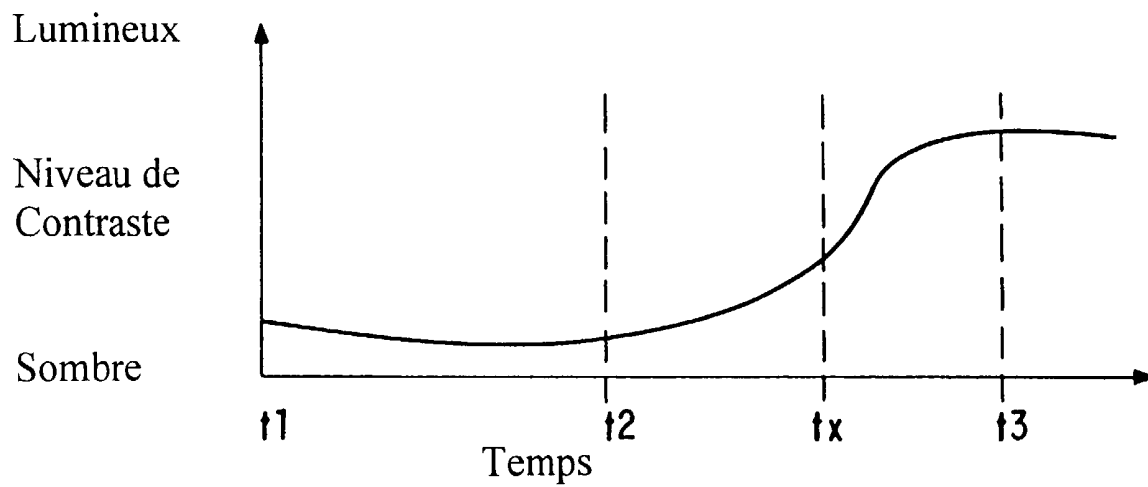


FIG. 7

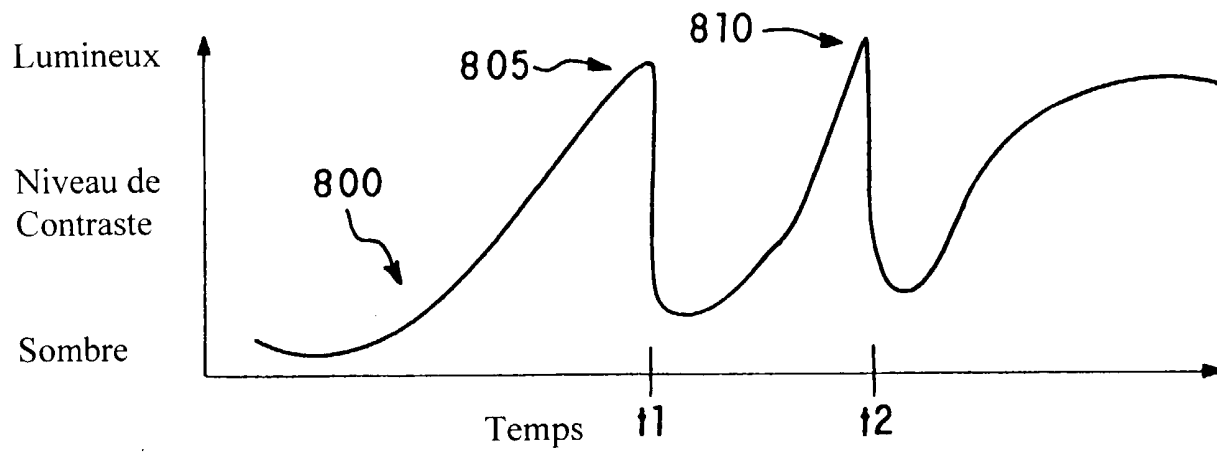


FIG. 8A

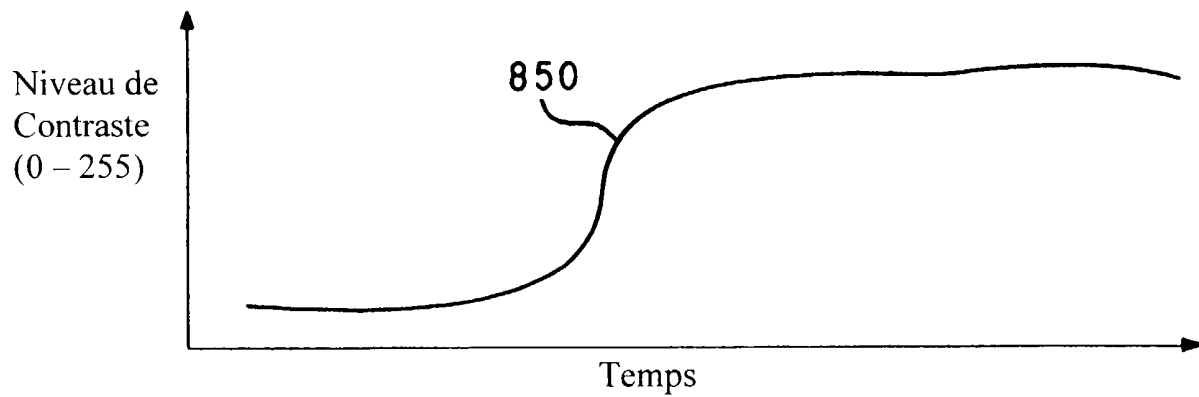


FIG. 8B

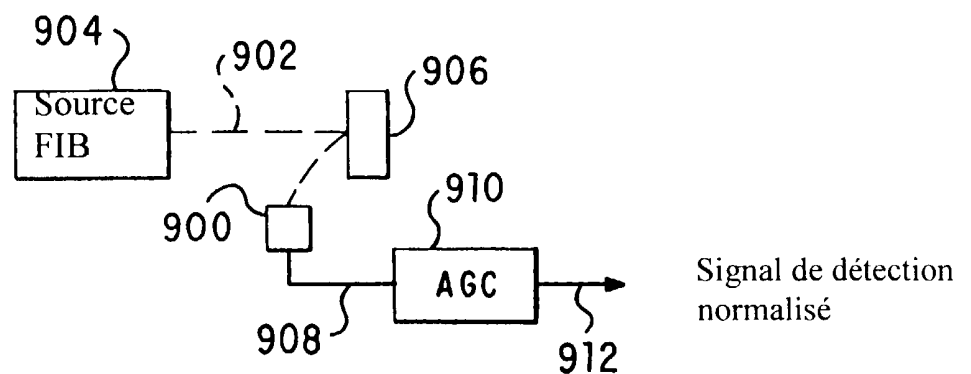


FIG. 9A

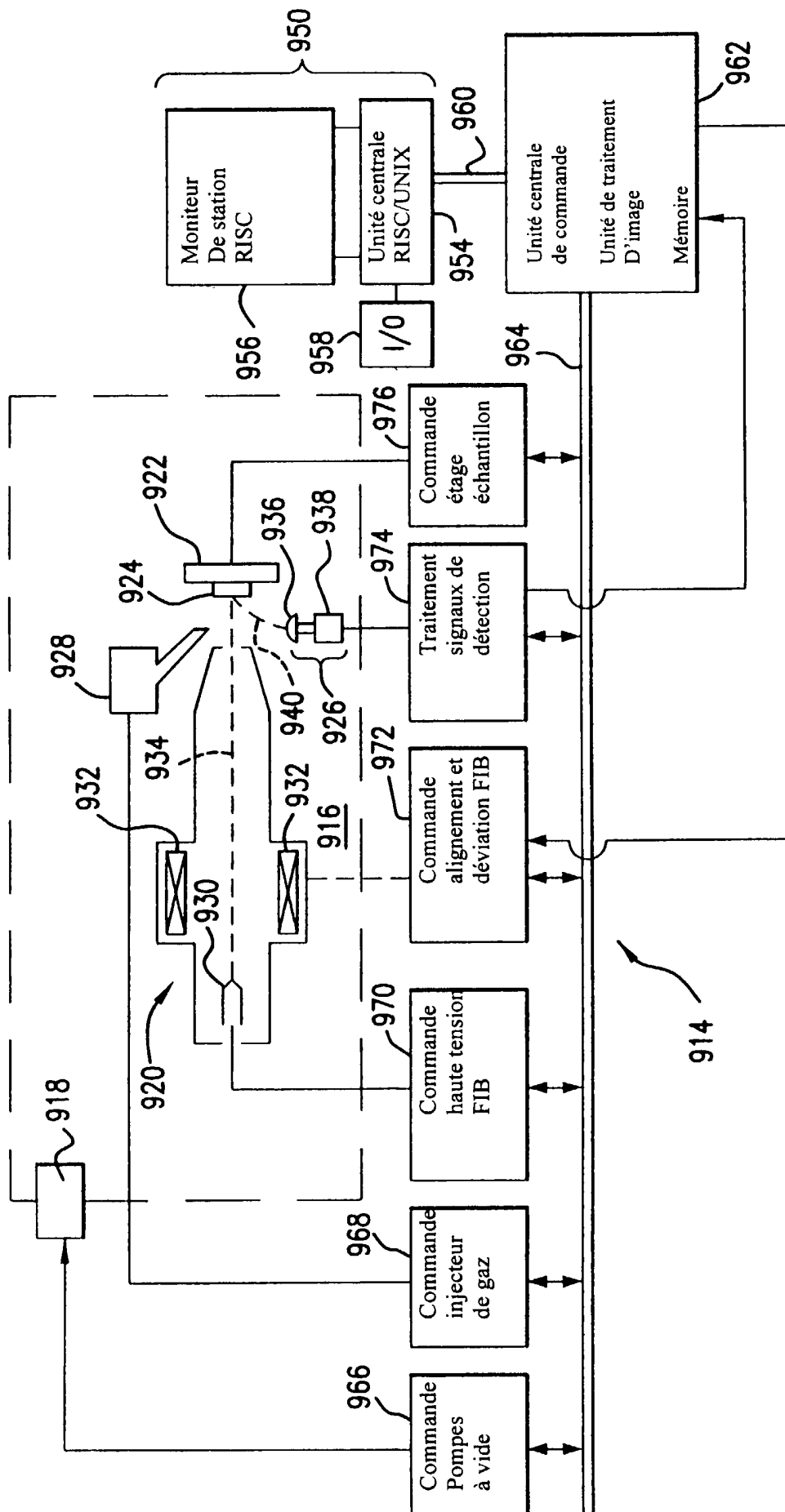


FIG. 9B

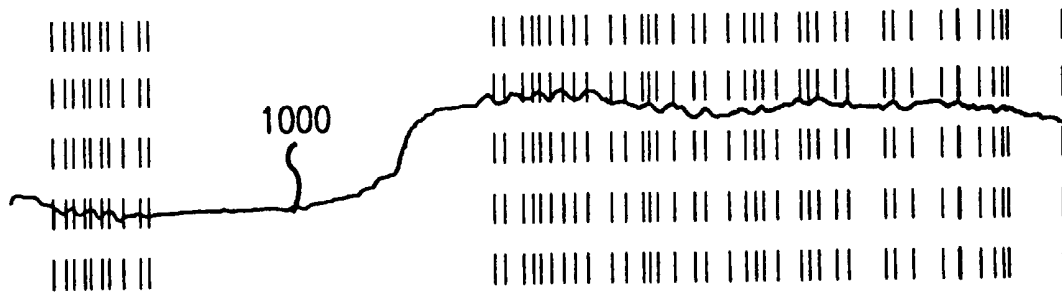


FIG. 10

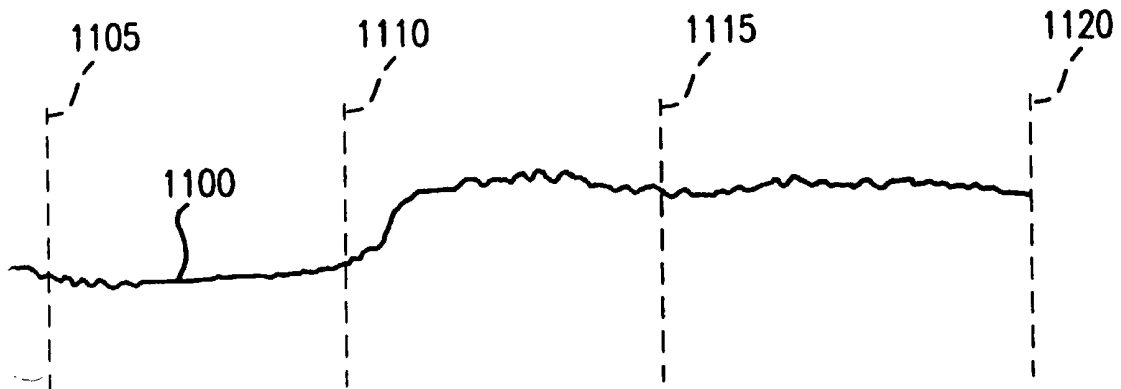


FIG. 11

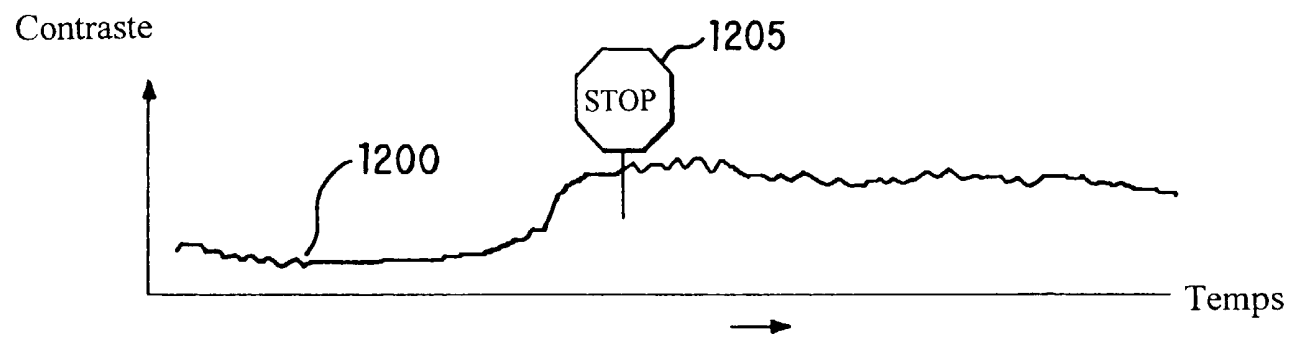


FIG. 12

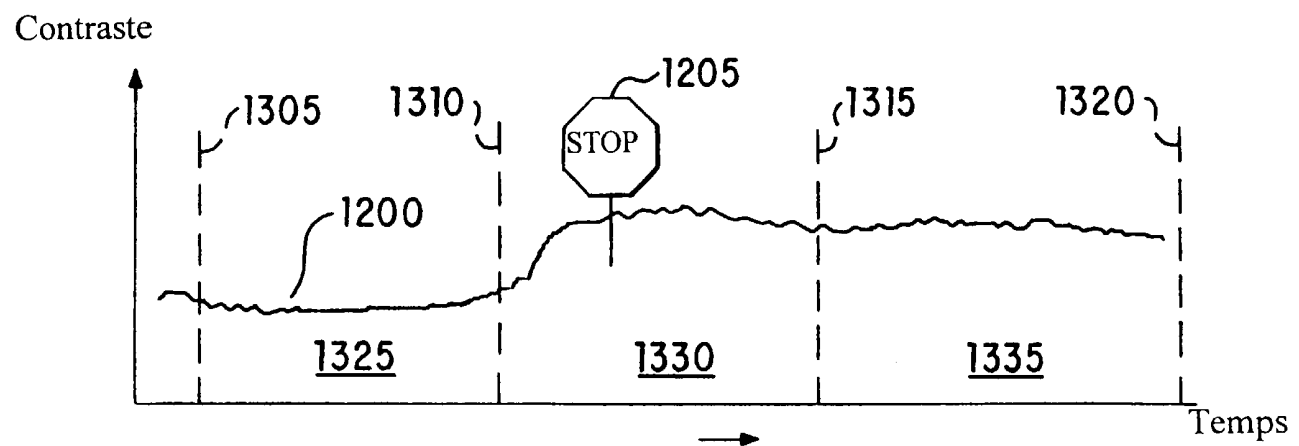


FIG. 13

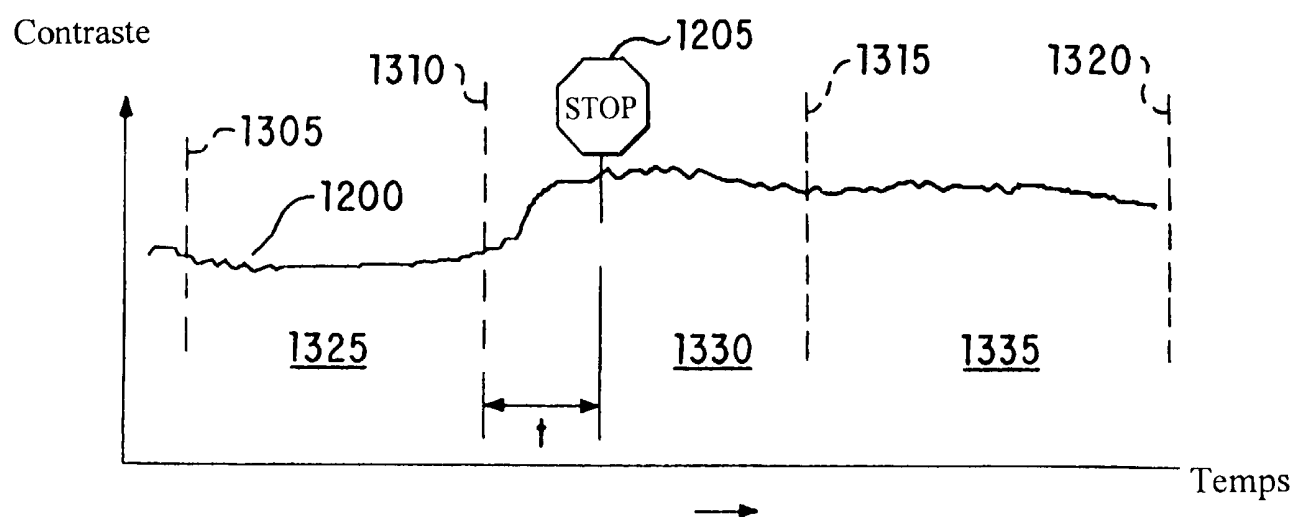


FIG. 14

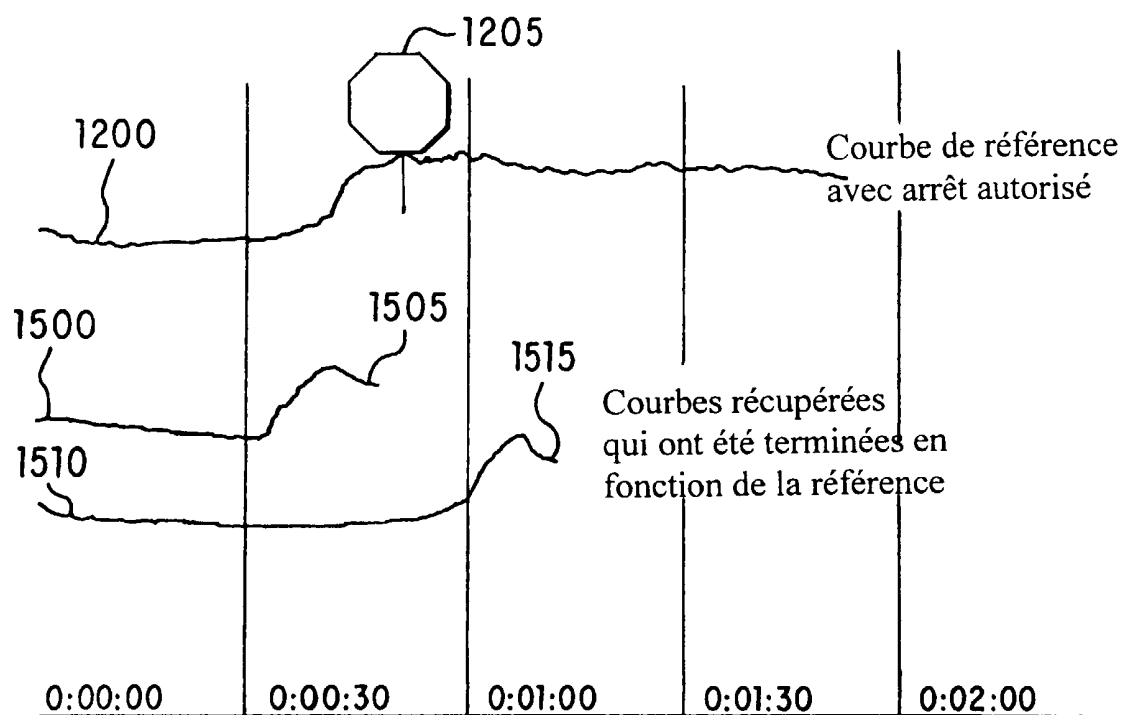


FIG. 15

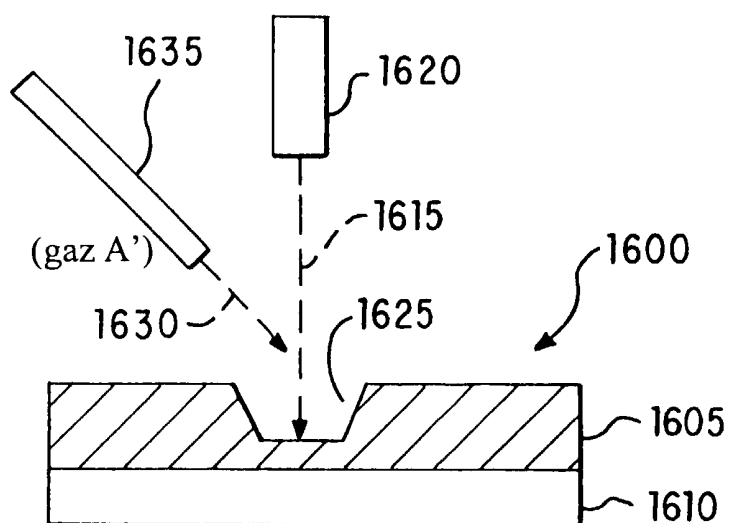


FIG. 16A

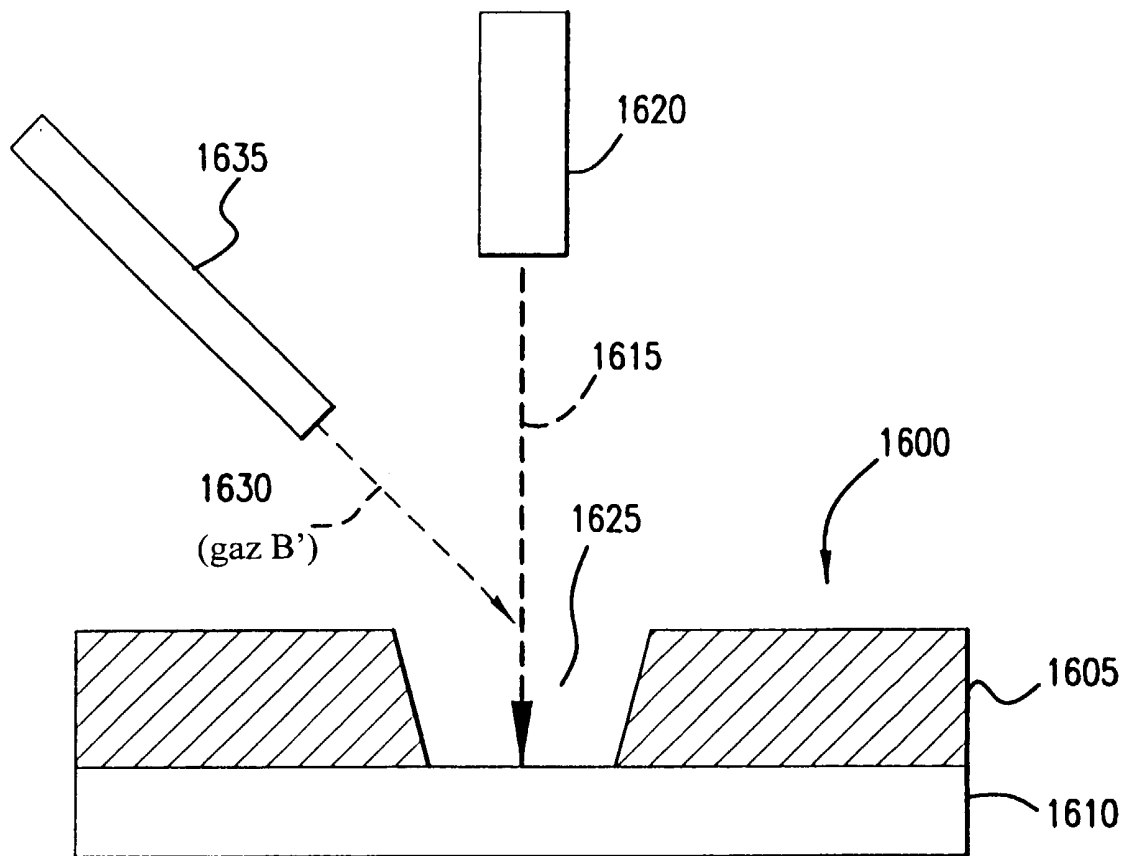


FIG. 16B

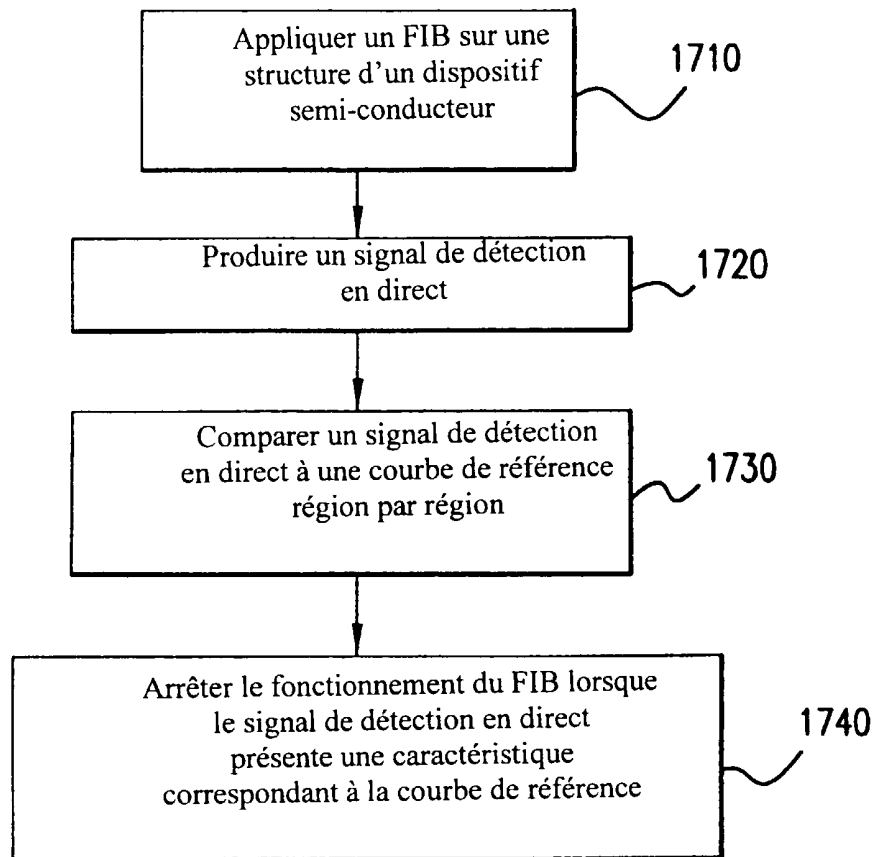


FIG.17A

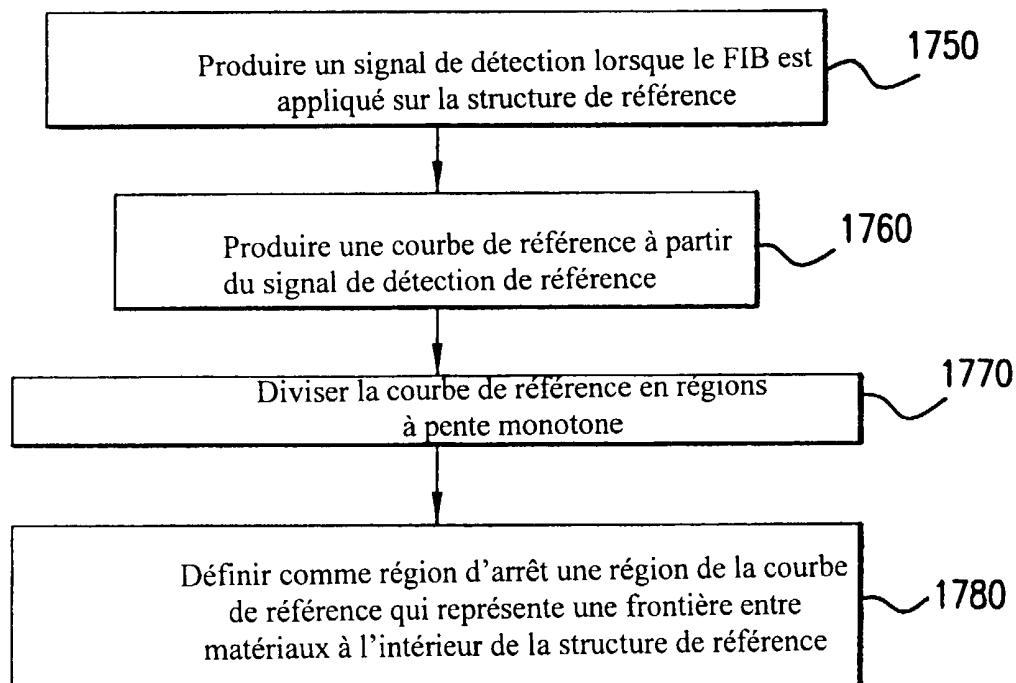


FIG.17B

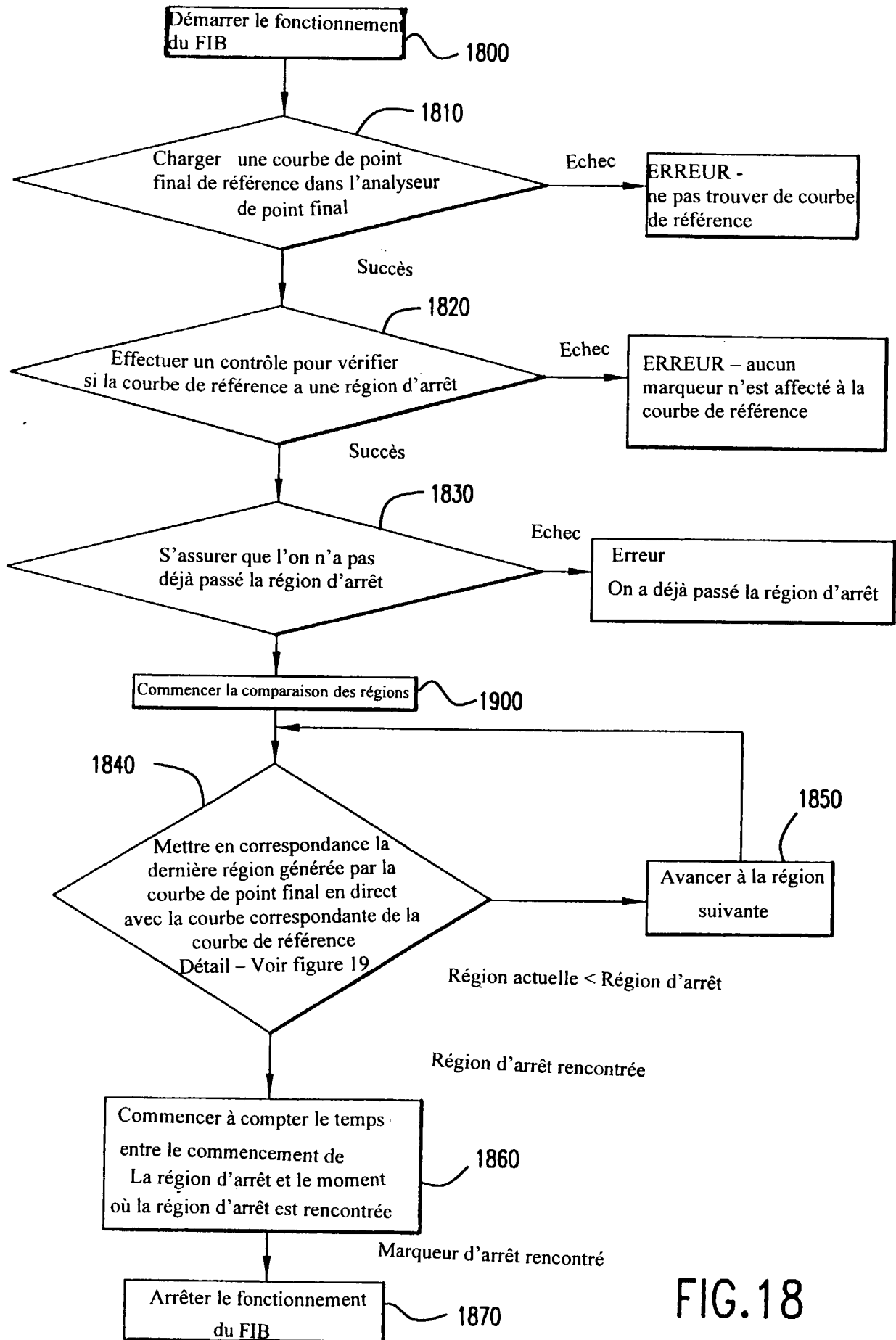


FIG.18

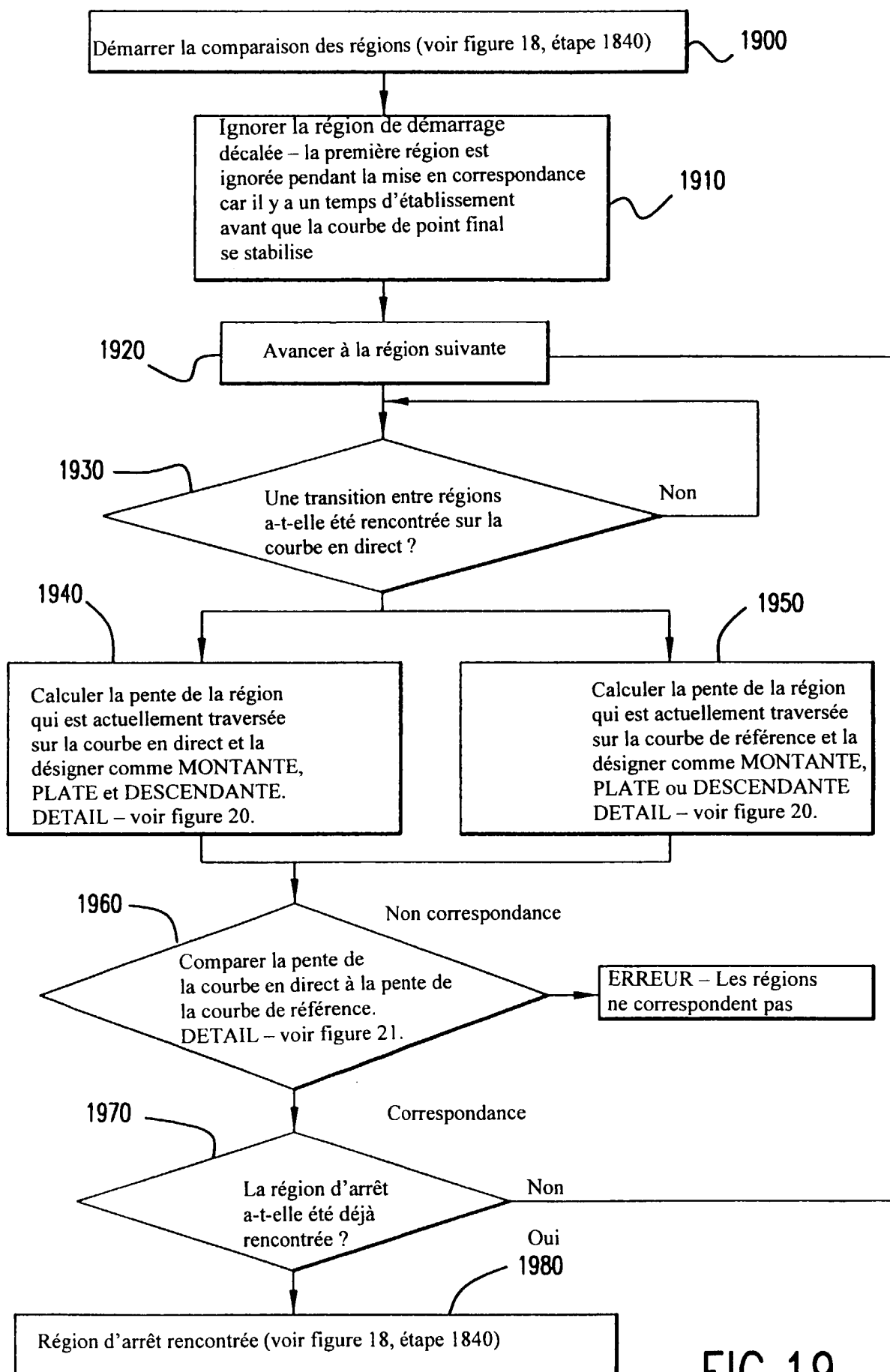


FIG.19

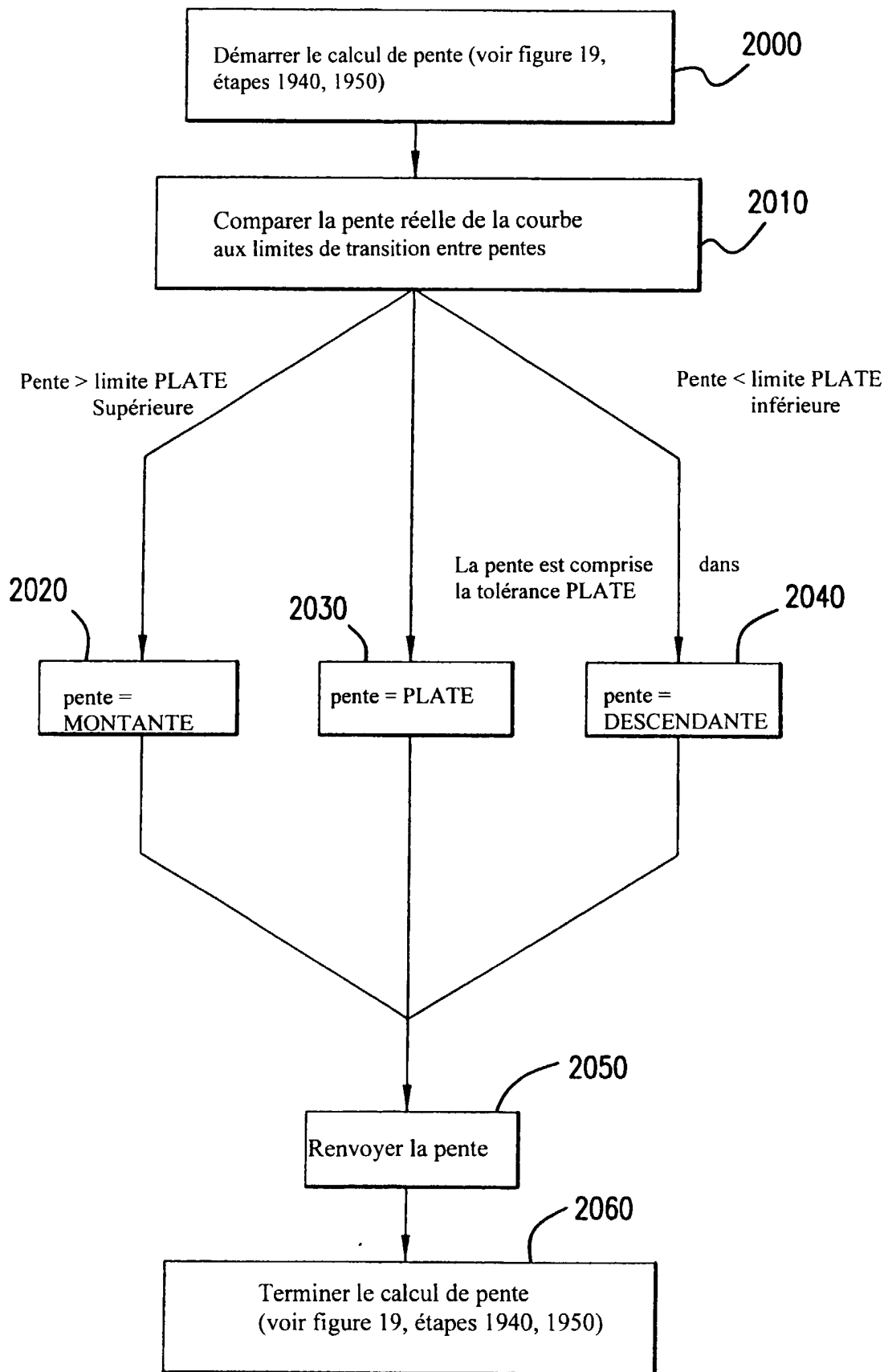


FIG.20

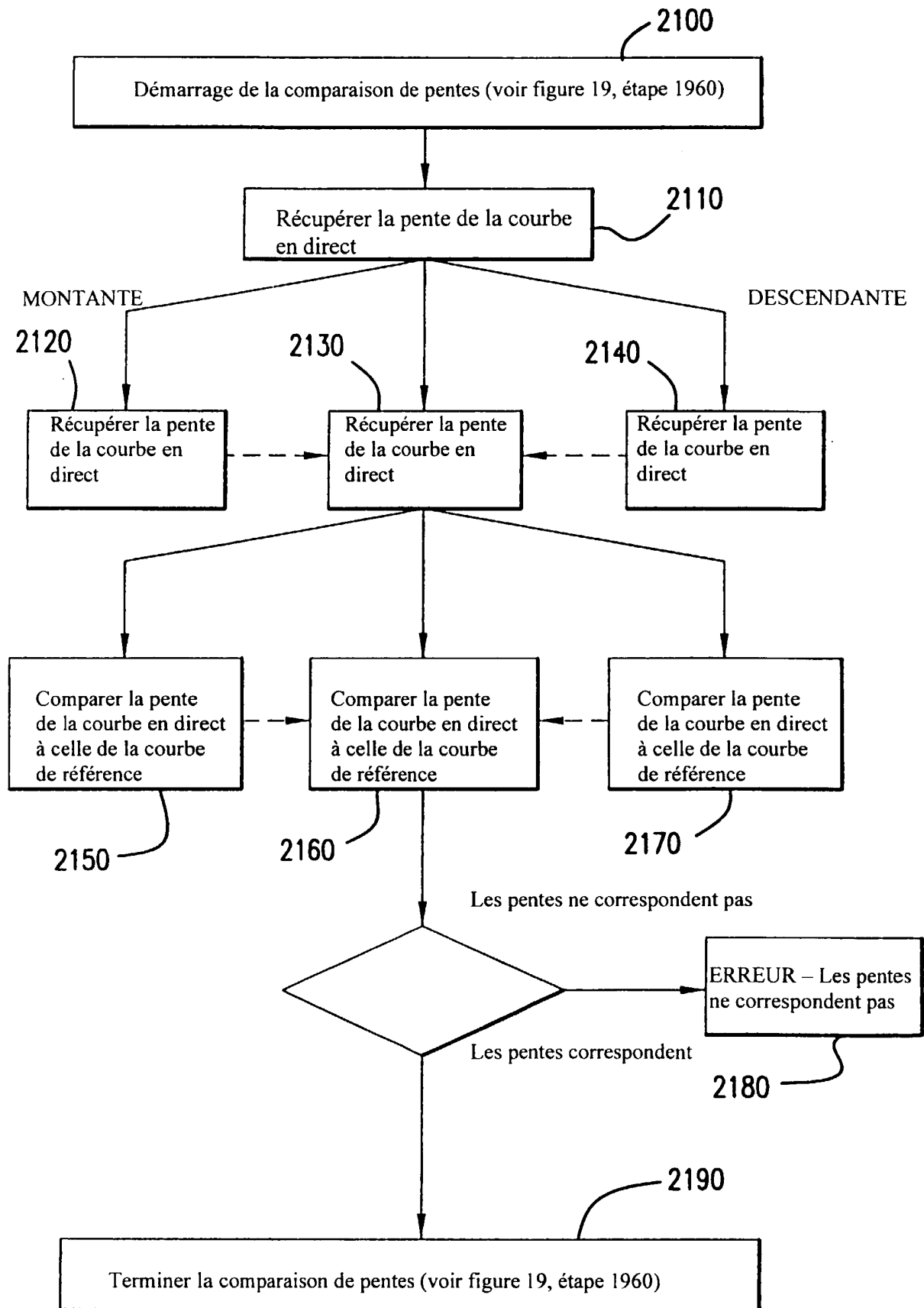


FIG.21