



12

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

21 Numéro de dépôt : **91402222.3**

51 Int. Cl.⁵ : **H01J 49/06**

22 Date de dépôt : **09.08.91**

30 Priorité : **24.08.90 FR 9010632**

43 Date de publication de la demande :
04.03.92 Bulletin 92/10

84 Etats contractants désignés :
DE GB NL

71 Demandeur : **CAMECA**
103, Boulevard Saint-Denis
F-92400 Courbevoie (FR)

72 Inventeur : **Chambost de, Emmanuel**
THOMSON-CSF SCPI Cédex 67
F-92045 Paris la Défense (FR)
Inventeur : **Rasser, Bernard**
THOMSON-CSF SCPI Cédex 67
F-92045 Paris la Défense (FR)

74 Mandataire : **Lincot, Georges et al**
THOMSON-CSF SCPI
F-92045 PARIS LA DEFENSE CEDEX 67 (FR)

54 **Spectromètre de masse stigmatique à haute transmission.**

57 Le spectromètre de masse selon l'invention comporte disposé entre une fente d'entrée (W_{1y} , W_{1z}) et une fente de sortie (W_{4y} , W_{4z}) traversées par des particules émises par un échantillon, un système optique de couplage (1) placé entre deux secteurs électrostatique (2) et magnétique (3). Son système optique de couplage comprend au moins deux lentilles (L_y) et (L_z) à fente orientées respectivement selon une première direction (Y) suivant laquelle la trajectoire des ions est incurvée par les secteurs électrostatique (2) et magnétique (3) et selon une direction perpendiculaire (Z) au plan de la trajectoire. Les positions des deux lentilles (L_y) et (L_z) sur l'axe optique du spectromètre sont déterminées pour obtenir une compensation des dispersions chromatiques sur tout l'axe en aval du spectromètre, une image stigmatique de la fente d'entrée dans le plan de sortie du spectromètre et une image stigmatique en aval du spectromètre de la fente d'entrée, d'un plan non conjugué avec la fente d'entrée, dans un plan distinct du plan de sortie.

Application : spectromètre de masse stigmatique à haute transmission.

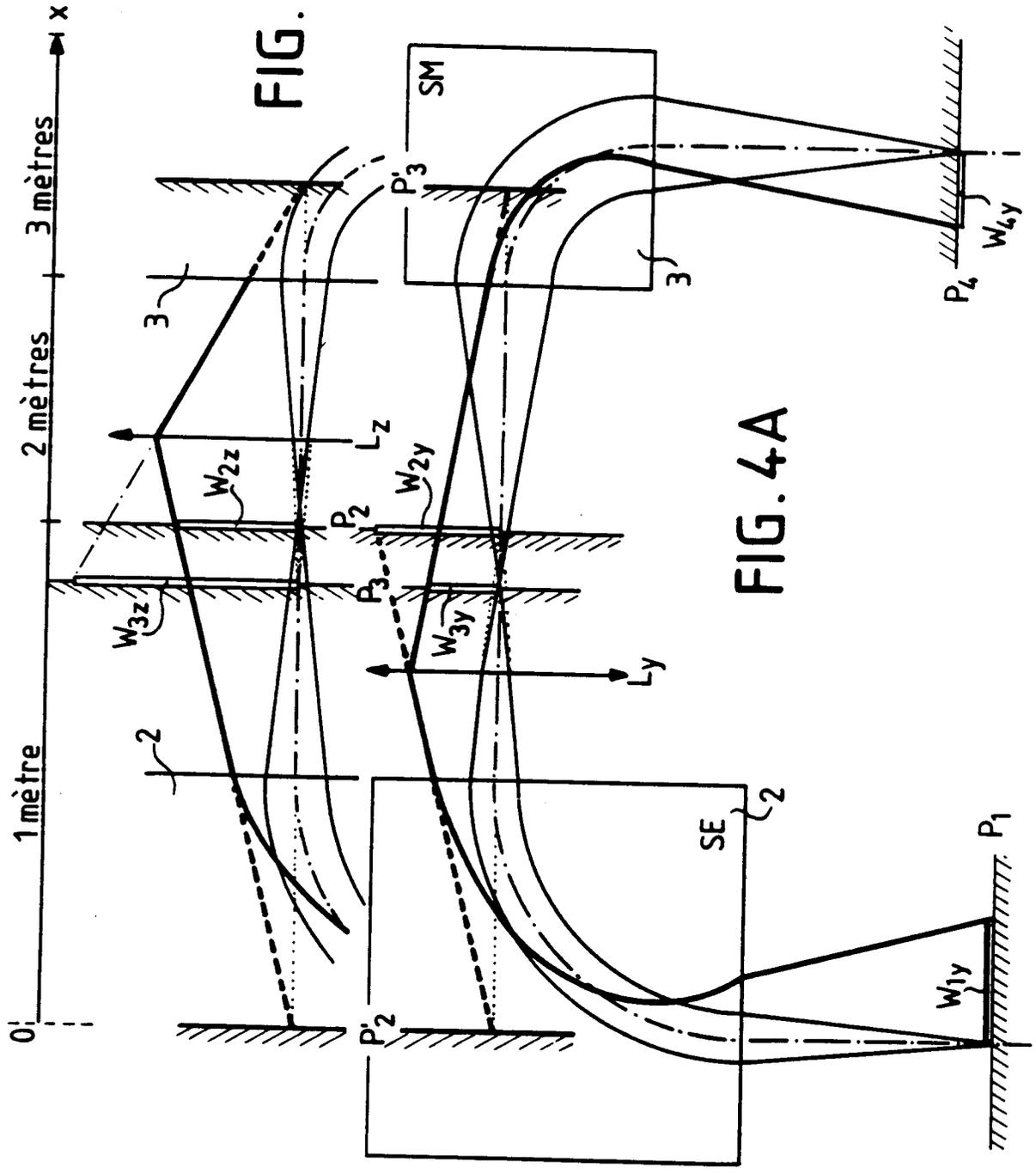


FIG. 4B

FIG. 4A

La présente invention concerne un spectromètre de masse stigmatique à haute transmission du type connu sous l'abréviation anglo saxonne SIMS et dont des descriptions peuvent être trouvées dans le livre Chemical Analysis vol. 86 intitulé "Secondary ion mass spectrometry" de A. Benninghoven et al et publié par John Wiley and sons à la section 4 pages 329 à 664.

5 Dans un appareil SIMS la partie de l'appareil qui est située en aval de l'échantillon et des dispositifs d'extraction des ions secondaires forme un spectromètre de masse dont la spectrométrie diffère beaucoup de celle des spectromètres à thermoionisation par le fait que les ions secondaires émis présentent généralement une dispersion en énergie beaucoup plus appréciable pouvant aller typiquement jusqu'à 20 eV. Dans ces condi-
10 tions il est avantageux dans ces appareils de ne pas filtrer le faisceau des particules en énergie de façon à conserver tout le signal ionique disponible, une des performances attendue d'un spectromètre étant d'avoir une bonne transmission pour une résolution en masse déterminée, le terme transmission désignant la partie du faisceau secondaire qui est acceptée par le spectromètre et le terme résolution en masse désignant l'écart de masse le plus petit entre deux masses qui sont mesurées séparément. Cependant comme dans tout spectro-
15 mètre il est nécessaire de diaphragmer le faisceau de particules pour obtenir une résolution en masse fixée, il est intuitif de penser que plus la résolution en masse exigée sera importante, plus la transmission du faisceau sera limitée et plus le signal disponible pour effectuer la mesure sera faible.

La dispersion en masse s'obtient en faisant traverser au faisceau de particules un champ magnétique créé par l'aimant d'un secteur magnétique "SM". Chaque particule non relativiste qui traverse l'aimant est alors déviée suivant une trajectoire circulaire de rayon de courbure R_m défini par une relation de la forme :

$$20 \quad R_m = mv/qB = (1/B) \cdot (2mV/q)^{1/2} \quad (1)$$

suivant laquelle B désigne le champ magnétique, m la masse de la particule, V la tension d'accélération de la particule, q sa charge électrique et v sa vitesse. Cependant la relation (1) met en évidence un phénomène de dispersion chromatique du secteur magnétique qui peut limiter sérieusement la résolution en masse par le fait que, le rayon de courbure R_m dépend aussi bien de la tension d'accélération V que de la masse m et que, les
25 dispersions énergiques dans les analyses SIMS sont relativement importantes.

Comme cela est encore expliqué dans le livre de M. Benninghoven ce problème est habituellement résolu en compensant la dispersion chromatique du secteur magnétique par celle d'un champ électrique créé par une tension appliquée entre deux électrodes entre lesquelles passe la particule. Dans ces conditions la particule est encore déviée suivant une autre trajectoire circulaire dont le rayon de courbure R_e vérifie une relation de
30 la forme :

$$R_e = 2V/qE \quad (2)$$

dans laquelle V représente la tension d'accélération de la particule, E le champ électrique régnant entre les deux électrodes et q la charge électrique de la particule. La relation (2) montre que le rayon R_e dépend de la tension d'accélération mais pas de la masse. Cela permet de dire qu'un champ électrique disperse chromatiquement, mais qu'il ne disperse pas en masse. De ce fait pour réaliser un dispositif à la sortie duquel les trajectoires présentent une déviation dépendant de la masse mais non de l'énergie de la particule, il est habituel d'associer un secteur électrostatique SE qui crée un champ électrique sur le parcours de la particule à un secteur magnétique SM qui crée un champ magnétique. Bien entendu dans cette association, les caractéristiques des secteurs électriques et magnétiques et leur agencement doivent être tels que les dispersions chromatiques
40 se compensent exactement pour que le spectromètre ainsi obtenu soit achromatique. Toujours suivant l'art connu deux types de spectromètre peuvent habituellement être considérés suivant que l'achromatisme a lieu en un point unique de l'axe de sortie du spectromètre ou qu'il a lieu sur tout l'axe de sortie du spectromètre. Dans ces spectromètres le plan achromatique de sortie d'un secteur électrique ou magnétique est le plan où est situé le point d'où semblent issues les trajectoires dispersées en énergie. Le plan achromatique d'entrée est symétrique de celui de sortie si le secteur est symétrique. Egalement dans ces spectromètres toute trajectoire de particules présentant un écart en énergie ΔE et convergeant vers le plan achromatique sort toujours
45 sur l'axe, et l'achromatisme sur l'axe implique que le plan achromatique de sortie du secteur électrostatique SE et le plan achromatique d'entrée du secteur magnétique SM soient conjugués.

Un agencement pour réaliser l'achromatisme sur tout l'axe d'un spectromètre est par exemple connu de
50 l'appareil IMS3F commercialisé et fabriqué par la Société Demanderesse CAMECA dont une description correspondante peut être trouvée dans un article de M. Lepareur intitulé "le micro-analyseur de seconde génération CAMECA module 3F" publié dans la revue THOMSON CSF Vol. 12 n°1, mars 1980.

L'intérêt de cette disposition est qu'elle permet en plus de réaliser l'achromatisme sur tout l'axe, de projeter sur un intensificateur d'image, l'image ionique de l'échantillon filtrée en masse.

55 Cependant comme les secteurs électrostatiques ou magnétiques, possèdent en plus de leurs propriétés de déviation des propriétés de focalisation qui dépendent de la forme qui est donnée aux électrodes du SE ou aux pièces polaires du SM, ceux-ci ne possèdent généralement pas de symétrie de révolution, et la convergence selon les deux directions Oy et Oz , normales à l'axe optique n'est pas identique. Toutefois dans l'appareil

IMS3F, les électrodes en forme de sphère du secteur électrostatique SE, ont une focale f_e égale dans les directions Oy et Oz et les plans situés de part et d'autre du secteur électrostatique SE, à une distance des faces d'entrée égale au rayon du secteur électrostatique SE sont conjugués. En outre, la forme donnée aux faces d'entrée du secteur magnétique SM donne à celui-ci un schéma optique équivalent à celui formé par un doublet de lentilles. De la sorte les lentilles ont des focales égales f_m pour les deux directions Oy et Oz, et l'espace qui les sépare n'est pas identique dans les deux directions. Une fente d'entrée est disposée à une distance f_e en amont de la face d'entrée du secteur électrostatique SE ; une fente de sortie est disposée à une distance f_m en aval du secteur magnétique SM. Ces deux fentes sont conjuguées optiquement et ont un rôle à peu près équivalent. C'est le réglage de la fente d'entrée qui détermine la résolution en masse. Pour sélectionner selon un critère chromatique les particules à prendre en compte par l'analyse, une fente "d'énergie" est disposée à une distance f_e de la face de sortie du secteur électrostatique SE. Dans un fonctionnement normal, la pupille d'illumination de l'émission secondaire appelé également "cross-over" est imagée sur la fente d'entrée et donc sur la fente de sortie. Le plan de l'échantillon est imagé sur un diaphragme situé juste à l'entrée du secteur électrostatique SE. A cause de la disparité dans les directions Oy et Oz des espaces séparant les lentilles en doublet du schéma équivalent du secteur magnétique SM, un stigmatiseur est nécessaire dans un plan proche de la fente de sortie pour permettre de projeter une image stigmatique du plan de l'échantillon.

Dans cet appareil, une optique de couplage est placée entre le secteur électrostatique SE et le secteur magnétique SM pour compenser, d'une part, la dispersion chromatique du secteur électrostatique par celle du secteur magnétique et d'autre part, pour conjuguer les plans de la fente d'entrée et de la fente de sortie. Comme cela est également décrit dans l'article de M. Lepareur cité précédemment, l'optique de couplage peut être réalisé au moyen d'une seule lentille. Une fois défini les caractéristiques optiques des deux secteurs électrostatique et magnétique SE et SM, il existe une seule configuration de paramètres suivants, (distance entre les deux secteurs, position de la lentille, et excitation de la lentille) qui permet à la fois de compenser les dispersions chromatiques et de conjuguer la fente de sortie avec la fente d'entrée.

Dans cette configuration, le plan achromatique de sortie du SE et le plan achromatique du SM sont conjugués.

Cependant comme dans tout spectromètre, la résolution en masse $\Delta M/M$ vis-à-vis de la largeur de la fente d'entrée et des caractéristiques des secteurs est déterminée par une relation de la forme :

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{W_{ys}}{K_M} + \frac{K_y}{K_M} \theta_{ys}^2 + \frac{K_z}{K_M} \theta_{zs}^2 \quad (3)$$

où - $\Delta M/M$ est la résolution en masse.

- W_{ys} est la largeur de l'image gaussienne de la fente d'entrée au niveau du plan de sortie du spectromètre
- K_M est le coefficient de dispersion en masse de l'aimant défini par $dy = K_M dM/M$
- K_y et K_z sont les coefficients d'aberration du second ordre du spectromètre.
- θ_{ys} et θ_{zs} sont les ouvertures angulaires du faisceau au plan de sortie.

La relation (3) exprime que les ouvertures angulaires suivant les directions orthogonales OY et OZ dans le plan des fentes produisent des aberrations du second ordre dans la direction OY qui est la direction de la dispersion en masse.

Comme la quantité d'ions prise en compte par l'analyse est proportionnelle au produit $W_{ys} \times \theta_{ys}$, il doit exister certainement un optimum du couple (W_{ys}, θ_{ys}) qui minimise la résolution en masse. Cependant il y a tout intérêt à réduire par des moyens optiques l'ouverture θ_{zs} , étant entendu qu'en contrepartie l'image W_{zs} est agrandie, mais ce dernier effet n'a aucun effet sur la résolution en masse.

Une tentative pour réduire l'ouverture du faisceau en Z a été réalisée sur un appareil Australien appelé SHRIMP où une lentille quadrupolaire disposée avant le secteur électrostatique SE écrase le faisceau en Z. Une description de cet appareil est décrite dans un article de S. Clément, W. Compston, G. Newstead intitulé "Design of a large, high resolution ion micro-probe" in Proceeding of International Conference on SIMS and ion microprobes. A. Benninghoven editor, Springer Verlag 1977. Mais dans cet instrument, il n'y a pas de possibilité de projeter après le spectromètre l'image de l'échantillon analysé.

Le but de l'invention est de pallier les inconvénients précités.

A cet effet, l'invention a pour objet un spectromètre de masse stigmatique à haute transmission à double focalisation du type comportant, disposés entre une fente d'entrée et une fente de sortie traversées par des particules émises par un échantillon, un système optique de couplage placé entre deux secteurs respectivement électrostatique et magnétique, caractérisé en ce que le système optique de couplage comprend au moins deux lentilles à fente orientées respectivement selon une première direction suivant laquelle la trajectoire des ions est incurvée par les secteurs électrostatique et magnétique et selon une direction perpendiculaire au plan de la trajectoire, les positions des deux lentilles sur l'axe optique du spectromètre étant déterminées pour obtenir une compensation des dispersions chromatiques sur tout l'axe en aval du spectromètre, une image stig-

matique de la fente d'entrée dans le plan de sortie du spectromètre et une image stigmatique en aval du spectromètre, d'un plan non conjugué avec la fente d'entrée, dans un plan distinct du plan de sortie.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'aide de la description qui suit faite en regard des dessins annexés qui représentent :

5 La figure 1 la construction des images de la fente d'entrée dans un appareil de type IMS3F.

La figure 2 les positions des images du plan de l'échantillon dans un appareil de type IMS3F.

La figure 3 les positions des plans achromatiques des secteurs électrostatique et magnétique d'un appareil IMS3F.

10 Les figures 4A et 4B un mode de réalisation d'un couplage optique selon l'invention au moyen de deux lentilles L_y et L_z disposées entre les deux secteurs SM et SE.

Les figures 5A et 5B un mode de réalisation d'un couplage optique selon l'invention au moyen d'une lentille L_y et deux lentilles L_{1z} et L_{2z} .

La figure 6A un mode de réalisation d'un couplage optique au moyen seulement d'une seule lentille L_y .

La figure 6B un mode de réalisation d'un couplage optique au moyen de deux lentilles L_{1y} et L_{2y} .

15 L'invention tire partie du fait que les aberrations d'ouverture dans la direction de l'axe OZ sont beaucoup plus importantes dans un secteur magnétique SM que dans un secteur électrostatique SE. Elle permet la réalisation d'un couplage optique entre les deux secteurs permettant de conserver les avantages de l'appareil IMS3F. Le spectromètre représenté à la figure 1 comporte, disposés de part et d'autre d'un système optique 1 de couplage L_y dans une direction Y située dans le plan de la figure 1 perpendiculairement à la direction X de l'axe optique du spectromètre, un secteur électrostatique 2 et un secteur magnétique 3. Une fente d'entrée W_{1y} disposée dans un plan d'entrée P1 a pour image au travers du secteur électrostatique 2 une fente W_{2y} disposée dans le plan P2 image du plan P1.

Sur la figure 2, S_{2y} est l'image virtuelle de l'échantillon fournie par le secteur électrostatique dans le plan P'2.

25 Sur la figure 1 le système optique L_y transforme la fente W_{2y} en une image W_{3y} disposée, figure 1, dans un plan P3 et sur la figure 2 il transforme l'image virtuelle de l'échantillon S_{2y} en une image S_{3y} dans un plan P'3.

De la sorte, les couples de plans (P2, P3) et (P'2, P'3) apparaissent conjugués par rapport au système optique 1. Les dispositions des plans achromatiques des secteurs électrostatique et magnétique sont montrés à la figure 3.

30 En désignant par K_M et K_E les coefficients de dispersion en énergie des secteurs 2 et 3 l'achromatisme sur l'axe X impose que soit vérifiés, en plus de la conjugaison des plans achromatiques, une condition sur le grandissement telle que la relation :

$$W_{3y}/W_{2y} = K_M/K_E \quad (4)$$

35 soit vérifiée.

Suivant la direction normale au plan des figures 1 et 2, un même système de couplage optique matérialisé par une lentille L_z , non représenté, est utilisé pour conjuguer les mêmes couples de plan (P2, P3) et (P'2, P'3). De façon similaire au fonctionnement de la lentille L_y la lentille L_z transforme la fente W_{2z} en une fente W_{3z} située dans le plan P3 et transforme l'image S_{2z} , non représentée, en une image S_{3z} , non représentée, au plan 40 P'3 à la condition cette fois que la relation suivante

$$W_{3z}/W_{2z} = \lambda (K_M/K_E) \quad (5)$$

soit vérifiée où λ est un coefficient proche de 5.

Dans ces conditions le coefficients de multiplication appliqué sur les grandissements permet d'obtenir une réduction de $1/\lambda$ sur les ouvertures.

45 Toutefois il n'est pas absolument indispensable de réaliser une image isotropique de la fente d'entrée dans le plan de la fente de sortie car, pour opérer une discrimination en masse, il suffit d'assurer seulement cette condition dans la direction Y. Mais l'expérience montre que les réglages sont simplifiés de façon tout à fait intéressante lorsqu'on dispose au niveau du plan de sortie d'une image isotropique de la fente d'entrée. Etant données les deux couples de plans (P2, P'2), (P3, P'3) positionnés sur l'axe optique X aux points de coordonnées 50 (X_2, X'_2) et (X_3, X'_3) , la lentille permet de conjuguer simultanément les 2 paires de plans si son abscisse X vérifie l'équation :

$$55 \quad X^2 \left(\frac{1}{x_2 - x'_2} - \frac{1}{x_3 - x'_3} \right) - X \left(\frac{x_2 + x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 + x'_3}{x_3 - x'_3} \right) + \frac{x_2 x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 x'_3}{x_3 - x'_3} = 0 \quad (6)$$

et sa focale f est donnée par

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{X-x_2} - \frac{1}{X-x'_2} \quad (7)$$

Les relations (4), (6) et (7) suggèrent que les deux racines de l'équation peuvent représenter les positions respectives d'une lentille L_y et d'une lentille L_z conjuguant chacune les deux couples de plans (P2, P'2) et (P3, P'3). L_y désigne une lentille à fente ou une lentille rectangulaire qui est active dans la direction Y et pratiquement neutre dans la direction Z. L_z désigne une lentille à fente ou une lentille rectangulaire qui est active dans la direction Z et pratiquement neutre dans la direction Y.

Les figures 4A et 4B où les éléments homologues à ceux des figures 1, 2 et 3 sont représentés avec les mêmes références illustrent cet arrangement. Plus particulièrement cet arrangement correspond à un mode de réalisation où le secteur électrostatique 2 est un secteur sphérique de un mètre de rayon ; par conséquent $K_E = 2$ mètres et P2 est à un mètre de la sortie du secteur électrostatique 2 SE. Sur la figure 4A, comme sur la figure 4B, l'origine des abscisses est au plan achromatique du secteur électrostatique 2. Le plan achromatique P'2 est à un mètre en amont de la sortie du secteur électrostatique. Le secteur magnétique 3 est flanqué de deux espaces tels que le plan d'entrée soit conjugué avec le plan de sortie, sa dispersion chromatique $K_M = 1, 2$ m au plan de sortie P4 et son plan achromatique d'entrée est distant de 1,6 m du plan d'entrée P3.

La relation (5) impose que L_y réalise un grandissement $W_{3y}/W_{2y} = 0, 6$. Cette relation jointe à la condition de conjugaison entre les plans achromatiques des secteurs détermine la position de la lentille $X_y = 1,449$ m, sa focale $f_y = 0,827$ m et par suite les abscisses du plan images P3 ($X_3 = 1,780$ m) et du plan achromatique d'entrée du secteur magnétique SM soit 3,380m.

Sur la figure 4A, P'2 est pris à l'origine, comme dans le cas de l'IMS3F. P'2 est par suite le plan achromatique de sortie du secteur électrostatique 2 et par conséquent, P'3, plan conjugué de P'2, est le plan achromatique d'entrée du secteur magnétique SM.

Pour trouver la position et la focale de la lentille L_z figure 4B, il faut résoudre l'équation (6) avec $x_2 = 2$ m, $x'_2 = 0$ m, $x_3 = 1,780$ m, $x'_3 = 3,380$ m. Les deux racines de l'équation sont d'une part, l'abscisse X_y qui est déjà connue et d'autre part l'abscisse de la lentille L_z soit $X_z = 2, 306$ m. La focale f_z est dans ces conditions égale à 0,732m.

Le grandissement en Z, W_{3z}/W_{2z} est alors de 1,716 soit 2,86 fois plus que le grandissement en Y.

Cet arrangement permet de mettre une fente de discrimination en énergie au plan P3 où l'on trouve une image réelle de la fente d'entrée. Cependant, il se trouve limité dans ses applications pratiques au sens que pour obtenir un rapport de grandissement appréciable selon les directions Y et Z, il est nécessaire que le grandissement selon Y soit plus petit que 1 ce qui, d'après la relation (4) correspond forcément à un rapport K_E/K_M supérieur à 1 et donc comme les dispersions chromatiques dépendent très fortement des rayons, à un rayon de SE du secteur électrostatique 2 supérieur à celui du secteur magnétique 3 et cela d'autant plus que l'on cherche à créer un rapport de grandissement important entre les directions Z et Y. Ainsi dans le cas des figures 4A et 4B le rapport de 2,86 ne peut être obtenu que si le rayon du secteur électrostatique SE fait un mètre, le rayon du secteur magnétique SM étant imposé à 0,585 m. Une telle dimension peut être tout à fait excessive, par l'encombrement auquel elle conduit et par la difficulté technologique de réalisation du secteur électrostatique.

Selon une deuxième variante de réalisation de l'invention l'arrangement montré aux figures 5A et 5B permet de s'affranchir de cette contrainte : il comprend une lentille L_y (figure 5A) située en aval du plan P2 et deux lentilles actives en Z, L_{1z} et L_{2z} (figure 5B). La lentille L_{1z} image la fente W_{2z} avec un grandissement voisin de 1 et la lentille L_{2z} agit en loupe pour réaliser une image avec un grandissement de l'ordre de 5 en respectant la relation (6). Avec un secteur électrostatique ayant la forme d'un secteur sphérique de 0,585 mètre de rayon, $K_E = 1,17$ mètres et le plan P2 est à 0, 585 mètre de la sortie du secteur électrostatique 2. Le plan achromatique est à 0,585 mètre en amont de la sortie du secteur électrostatique. Le secteur magnétique 3 est identique à celui de l'exemple précédent.

Comme précédemment l'origine des abscisses est située au plan achromatique du secteur électrostatique 2. La relation (4) impose que la lentille L_y réalise un grandissement $W_{3y}/W_{2y} = 1, 03$. Cette relation jointe à la condition de conjugaison entre les plans achromatiques des secteurs, détermine la position de la lentille X_y à 1,190m et sa focale f_y est égale à 0,679 m. Par suite les abscisses du plan image P3 et du plan achromatique du secteur magnétique 3 sont disposées respectivement à 1,169m et 2,769m,

A partir du moment où L_{1z} est fixée en position et en convergence, la position de la lentille L_{2z} et sa focale sont déterminées en reportant dans les équations (6) et (7) les valeurs $X_2 = 1, 17$ m, $X'_2 = 0$ m, $X_3 = 1, 169$ m et $X'_3 = 2, 769$ m. A titre d'exemple un arrangement possible pour obtenir un grandissement $W_{3z}/W_{2z} = 5, 3$ fois plus fort que le grandissement $W_{3y}/W_{2y} = 1,03$ peut être obtenu avec les caractéristiques suivantes =

Positions de L_{1z} =	1, 336 m
Focale de L_{1z} =	0,1 m
Position de L_{2z} =	1, 760 m

Focale de L_{1z} = 0,241 m

avec cette configuration le grandissement intermédiaire W_{21z}/W_{2z} est de -1, 538. Cet arrangement permet de mettre une fente de discrimination en énergie au plan P2 où l'on trouve une image réelle de la fente d'entrée.

Enfin, selon un troisième mode de réalisation de l'invention, il peut être avantageux de remplacer la lentille L_Y par deux lentilles L_{1y} et L_{2y} situées de part et d'autre du plan P2. Comme déjà montré aux figures 5A et 5B, la position et la convergence de la lentille L_Y sont imposés très strictement par les caractéristiques optiques des secteurs électrostatiques 2 et magnétiques 3. Or ceux-ci ne sont pas forcément connus avec précision au moment du montage de l'appareil et s'il est évidemment aisé de régler la focale de la lentille L_Y , il n'en est pas de même de sa position. Dans ces conditions le remplacement de la lentille L_Y par deux lentilles L_{1y} et L_{2y} réalise un effet de zoom qui donne à l'opérateur une latitude de réglage qu'il n'a pas avec une seule lentille. Cet arrangement permet de mettre une fente de discrimination en énergie au plan intermédiaire P21 où l'on trouve une image réelle de la fente d'entrée. Ceci présente un avantage, dans le cas où le grandissement W_{3y}/W_{2y} doit être proche de 1.

Les figures 6A et 6B illustrent comment la lentille L_Y de l'exemple des figures 5A et 5B peut être remplacée par deux lentilles L_{1y} et L_{2y} positionnées comme suit

Position de L_{1y} = 0,900 m

Focale de L_{1y} = 2,250 m

Position de L_{2y} = 1,250 m

avec une distance focale de L_{1y} = 0, 820 m

Le secteur magnétique 3 étant un dispositif qui n'a pas en général les mêmes propriétés de focalisation en Y et en Z il est nécessaire de compenser son astigmatisme. Comme indiqué précédemment la forme donnée aux faces d'entrée du secteur magnétique 3 donne à celui-ci un schéma optique équivalent constitué d'un doublet de lentilles. Les lentilles ont alors une focale égale pour les deux directions Oy et Oz , soit f_m , mais l'espace qui les sépare n'est pas identique dans les deux directions.

Pour permettre de supprimer un stigmatiseur placé juste en amont de la fente de sortie de façon à pouvoir projeter sur un intensificateur une image stigmatique de l'échantillon, il suffit dans l'équation (6) de modifier le paramètre X'_3 de façon à prendre en compte la disparité des espaces selon les directions Y et Z dans le schéma équivalent de l'aimant pour qu'en aval de l'aimant, à la fois l'image de la fente d'entrée et celle de l'échantillon soient stigmatiques.

L'avantage qu'il y a à supprimer le stigmatiseur situé avant la fente d'entrée est de libérer complètement l'espace à ce niveau et donc de permettre, par exemple la collection en parallèle de plusieurs masses différentes.

35 Revendications

1. Spectromètre de masse stigmatique à haute transmission à double focalisation du type comportant disposés entre une fente d'entrée (W_{1y} , W_{1z}) et une fente de sortie (W_{4y} , W_{4z}) traversées par des particules émises par un échantillon, un système optique de couplage (1) placé entre deux secteurs respectivement électrostatique (2) et magnétique (3), caractérisé en ce que le système optique de couplage comprend au moins deux lentilles (L_y) et (L_z) à fente orientées respectivement selon une première direction (Y) suivant laquelle la trajectoire des ions est incurvée par les secteurs électrostatique (2) et magnétique (3) et selon une direction perpendiculaire (Z) au plan de la trajectoire, les positions des deux lentilles (L_y) et (L_z) sur l'axe optique du spectromètre étant déterminées pour obtenir une compensation des dispersions chromatiques sur tout l'axe en aval du spectromètre, une image stigmatique de la fente d'entrée dans le plan de sortie du spectromètre et une image stigmatique, en aval du spectromètre, d'un plan non conjugué avec la fente d'entrée dans un plan distinct du plan de sortie.

2. Spectromètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que le plan de la fente d'entrée est conjugué ou proche de l'être avec l'angle d'ouverture du faisceau d'ions émis par l'échantillon et en ce que le plan de l'échantillon est l'autre plan dont l'assemblage réalise l'image stigmatique.

3. Spectromètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que la première lentille (L_y) et la deuxième lentille (L_z) sont situées de part et d'autre d'un plan (P2) conjugué de la fente d'entrée par le secteur électrostatique (2) et en ce que la position de la lentille (L_y) et sa focale sont déterminées d'une part, pour conjuguer l'image (W_{2y}) de la fente (W_{1y}) obtenue dans le plan (P2) par une image dans un plan (P3) avec un grandissement (W_{3y}/W_{2y}) égal au rapport des coefficients de dispersion en masse respectivement (K_M) et (K_E) du secteur magnétique (3) et du secteur électrostatique (2), et d'autre part, pour conjuguer l'image virtuelle

de l'échantillon (S_{2y}) donnée par le secteur électrostatique (2) dans un plan ($P'2$) en une image (S_{3y}) dans un plan ($P'3$) achromatique du secteur magnétique (3).

- 5 4. Spectromètre selon la revendication 3, caractérisé en ce que la position et la focale de la lentille (L_z) sont déterminées d'une part, pour conjuguer les plans (P_2, P_3) ou les plans ($P'2$ et $P'3$) pour transformer l'image (W_{2z}) de la fente (W_{1z}) par le secteur électrostatique (2) en une image (W_{3z}) dans le plan P_3 avec un grandissement (W_{3z}/W_{2z}) proportionnel au rapport des coefficients de dispersion en masse (K_M) et (K_E) du secteur magnétique (3) et du secteur électrostatique (2) et d'autre part, pour conjuguer l'image virtuelle de l'échantillon (S_{2z}) donnée par le secteur électrostatique (2) dans le plan ($P'2$) en une image (S_{3z}) dans le plan ($P'3$) achromatique du secteur magnétique (3).
- 10
5. Spectromètre selon l'une quelconque des revendication 3 et 4, caractérisé en ce que la position de la lentille (L_z) est déterminée par les racines d'une équation de la forme :

15

$$X^2 \left(\frac{1}{x_2 - x'_2} - \frac{1}{x_3 - x'_3} \right) - X \left(\frac{x_2 + x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 + x'_3}{x_3 - x'_3} \right) + \frac{x_2 x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 x'_3}{x_3 - x'_3} = 0 \quad (6)$$

20

dans laquelle (x_2, x'_2) et (x_3, x'_3) désignent les positions des couples de plan ($P_2, P'2$) et ($P_3, P'3$) et sa focale f est déterminée par la relation

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{X - x_2} - \frac{1}{X - x'_2} \quad (7)$$

25

6. Spectromètre selon les revendications 1 et 3, caractérisé en ce qu'il comprend une fente en énergie disposée entre les lentilles (L_y) et (L_z) dans un plan conjugué avec la fente d'entrée pour la lentille (L_y).
7. Spectromètre selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'il comprend un système optique actif dans la direction z formé par l'assemblage de deux lentilles, une première lentille (L_{1z}) et une deuxième lentille (L_{2z}), en ce que la première lentille (L_{1z}) inverse l'image de la fente d'entrée produite par le secteur électrostatique (2) avec un rapport voisin de -1 et en ce que la deuxième lentille (L_{2z}) agit en loupe sur l'image inversée de la fente fourni par la première lentille (L_{1z}).
- 30
8. Spectromètre selon la revendication 7, caractérisé en ce que la position de la lentille (L_{2z}) est déterminée par les racines d'une équation de la forme
- 35

40

$$X^2 \left(\frac{1}{x_2 - x'_2} - \frac{1}{x_3 - x'_3} \right) - X \left(\frac{x_2 + x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 + x'_3}{x_3 - x'_3} \right) + \frac{x_2 x'_2}{x_2 - x'_2} - \frac{x_3 x'_3}{x_3 - x'_3} = 0 \quad (6)$$

45

dans laquelle (x_2, x'_2) et (x_3, x'_3) désignent les positions des couples de plan ($P_2, P'2$) et ($P_3, P'3$) et en ce que sa focale f est déterminée pour une relation de la forme

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{X - x_2} - \frac{1}{X} \quad (7)$$

50

9. Spectromètre selon les revendication 1 ou 5, caractérisé en ce que la première lentille (L_y) est unique.
10. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1, 8 et 9, caractérisé en ce qu'une fente en énergie est disposée entre la sortie du secteur électrostatique (2) et la première lentille (L_y) dans le plan (P_2) conjugué de la fente d'entrée (W_{1y}) par le secteur électrostatique (2).
- 55
11. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 et 7, caractérisé en ce que les deux lentilles (L_{1y}) et (L_{2y}) sont situées de part et d'autre d'un plan (P_2) conjugué de la fente (W_{1y}) d'entrée par le secteur électrostatique (2).

12. Spectromètre selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'une fente en énergie est disposée entre les deux lentilles (L_{1y}) et (L_{2y}) au plan conjugué de la fente (W_{1y}) par la lentille (L_{1y}).
- 5 13. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que le réglage des première et deuxième lentilles (L_{1z}) et (L_{2z}) est utilisé pour compenser les défauts de stigmatisme du secteur magnétique (3).
14. Utilisation du spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 13 dans un appareil SIMS.
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

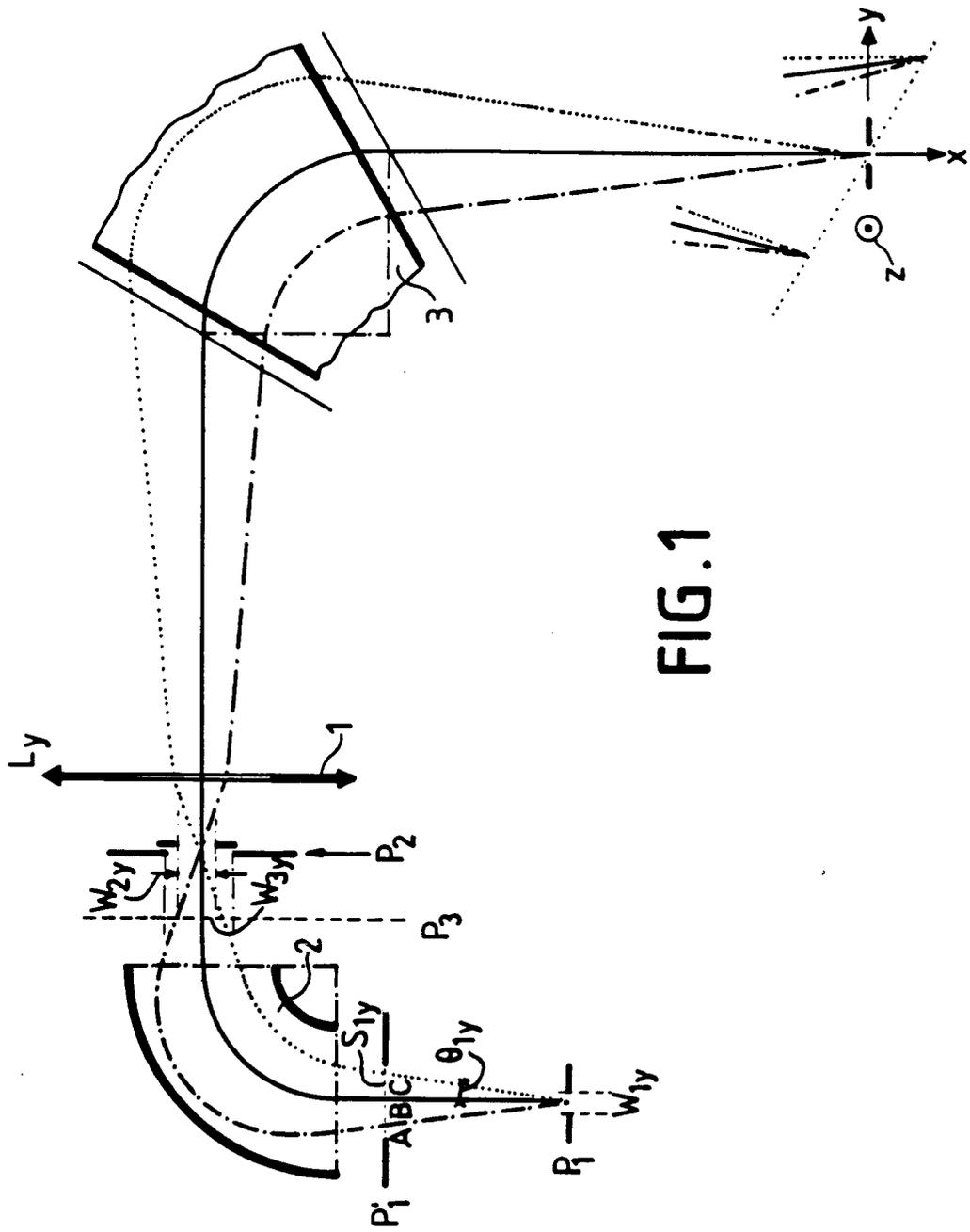


FIG.1

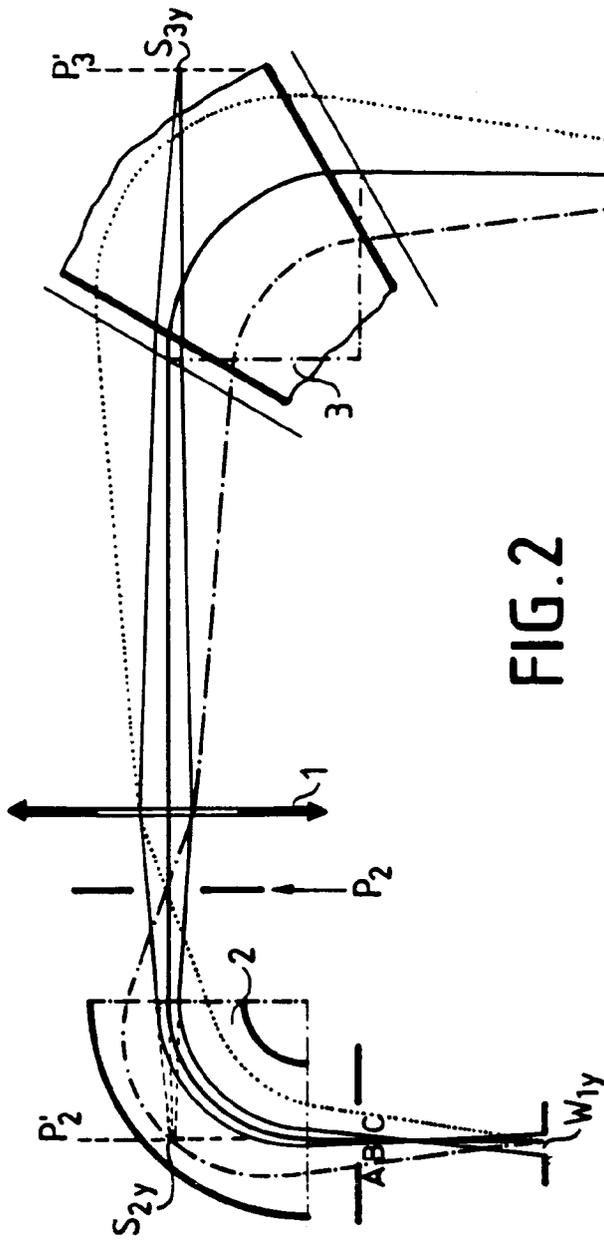


FIG. 2

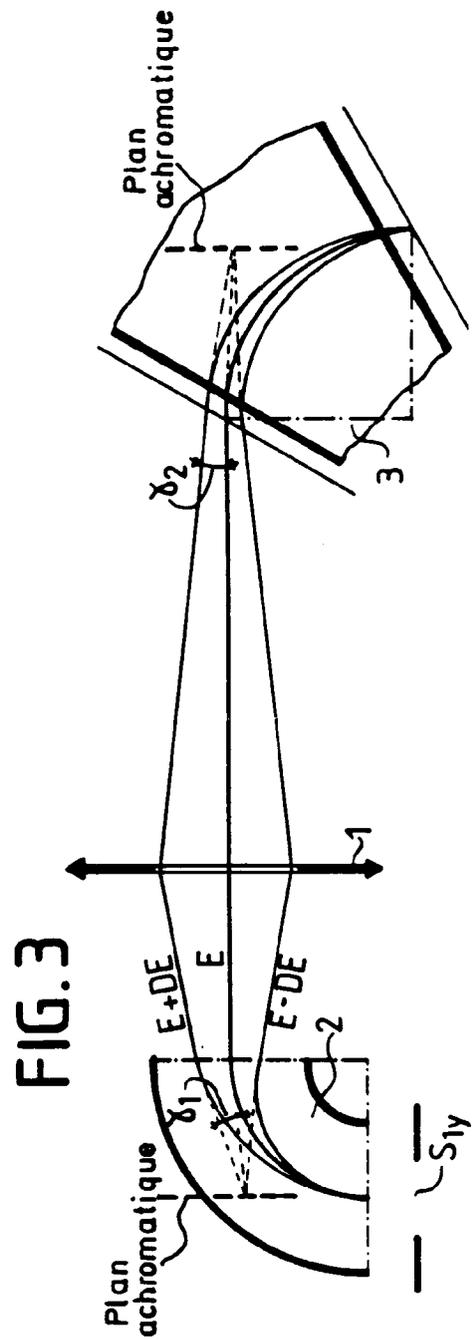
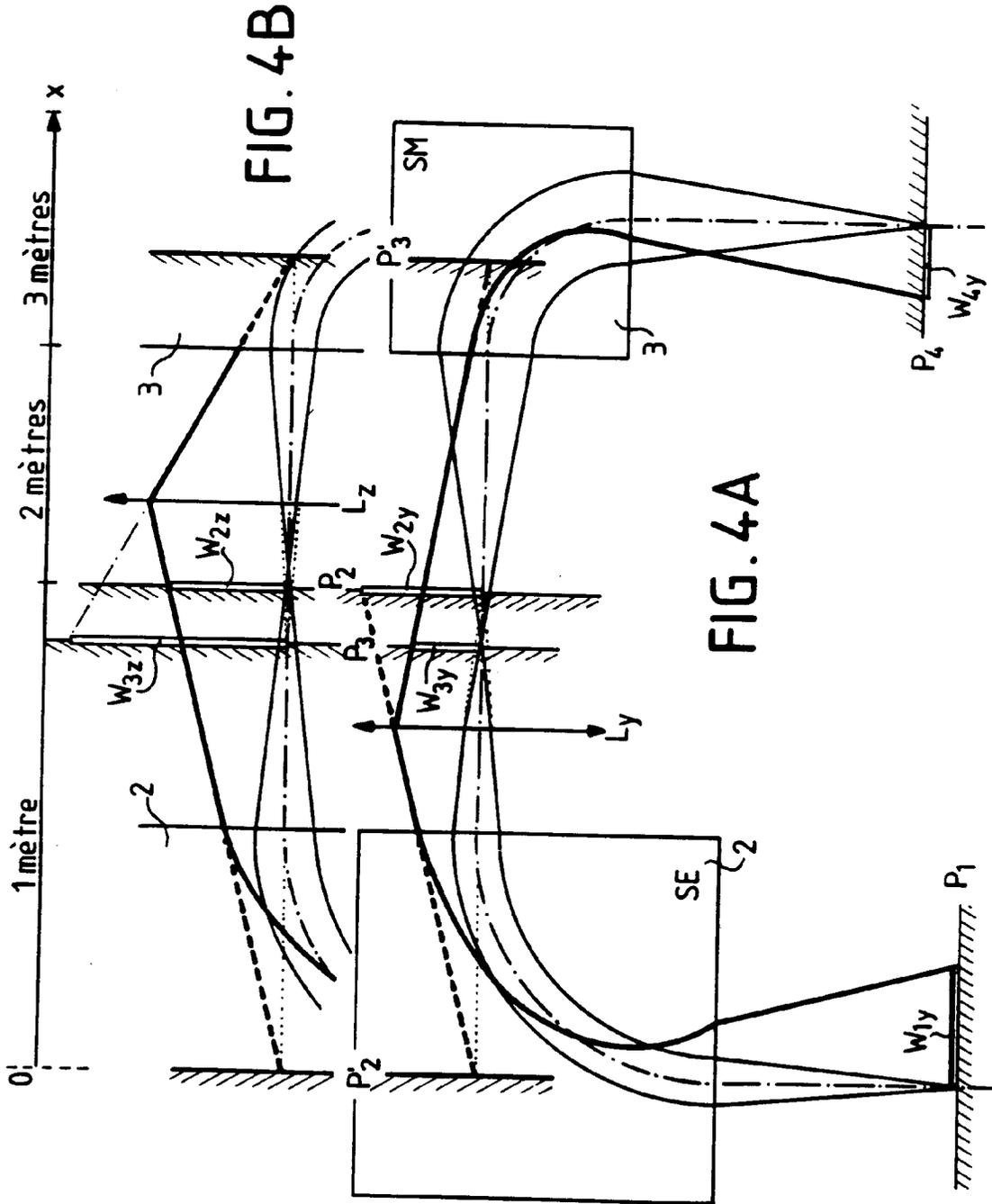


FIG. 3



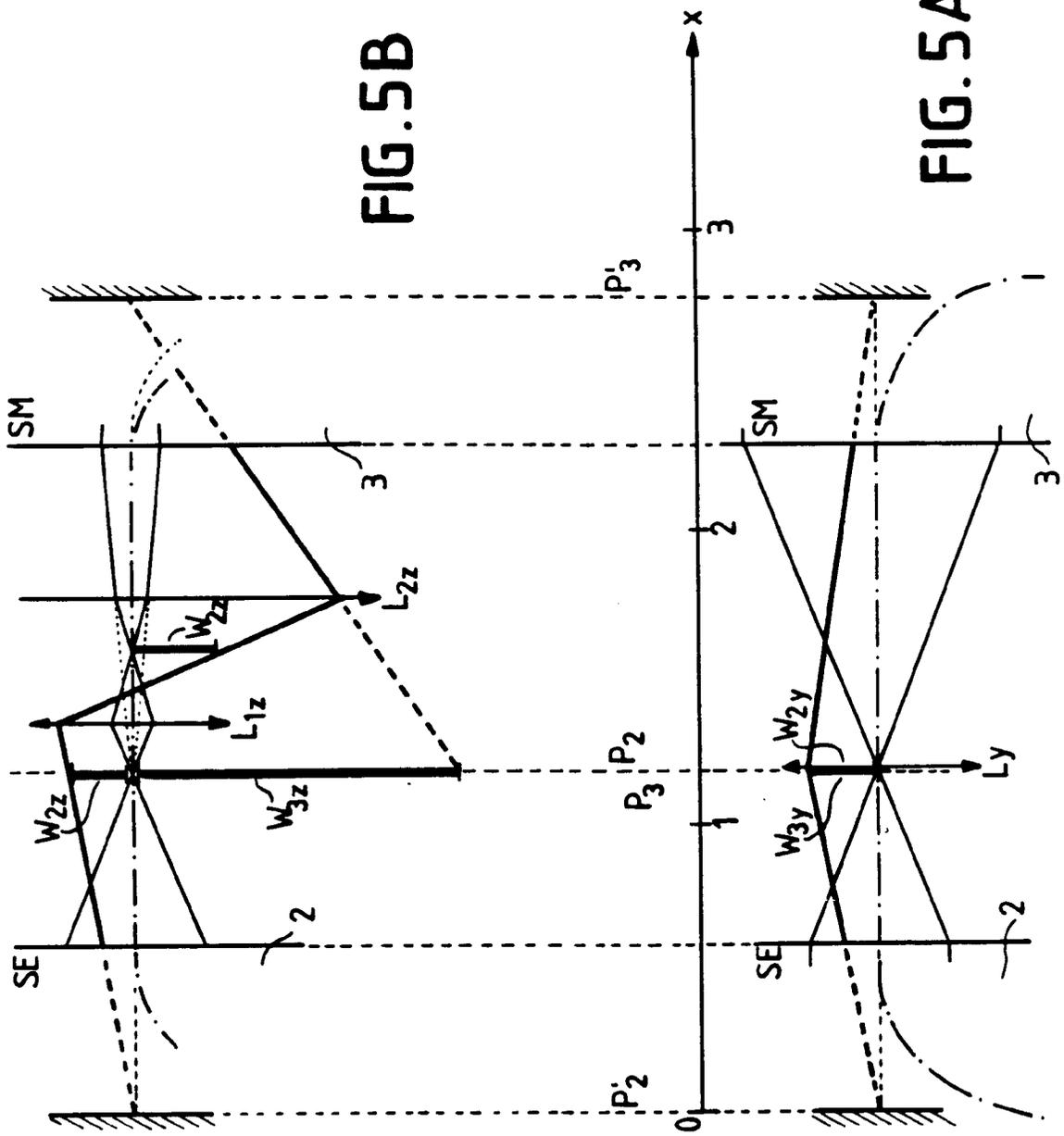


FIG. 5B

FIG. 5A

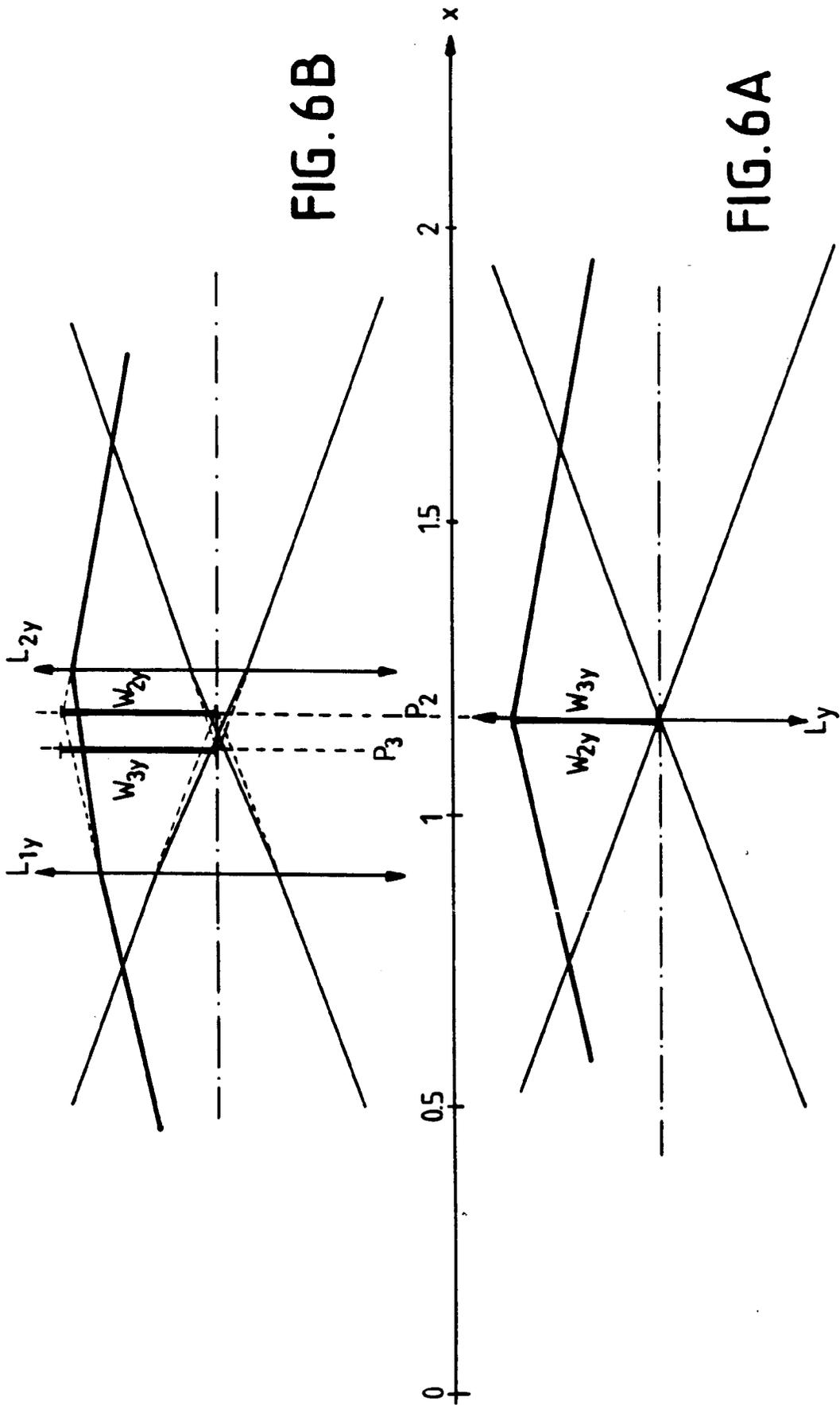


FIG. 6B

FIG. 6A