



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
16.03.2005 Bulletin 2005/11

(51) Int Cl.7: **H05H 1/24, H01T 13/52**

(21) Numéro de dépôt: **04292189.0**

(22) Date de dépôt: **13.09.2004**

(84) Etats contractants désignés:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR
 Etats d'extension désignés:
AL HR LT LV MK

(71) Demandeur: **Renault s.a.s.**
92100 Boulogne Billancourt (FR)

(72) Inventeurs:
 • **Agneray, André**
92100 Boulogne (FR)
 • **Nouvel, Clément**
92210 Saint Cloud (FR)

(30) Priorité: **12.09.2003 FR 0310767**

(54) **Système de génération de plasma**

(57) L'invention propose un système de génération de plasma(1), comprenant:

- deux électrodes (103, 106);
- un matériau diélectrique (100) séparant les électrodes;
- un générateur de tension (102), connecté aux élec-

trodes appliquant sélectivement une tension alternative présentant une fréquence supérieure à 1 MHz et une amplitude entre crêtes supérieure à 5kV entre les électrodes.

L'invention porte aussi sur un procédé associé et permet notamment de générer aisément un plasma de volume ou un plasma ramifié.

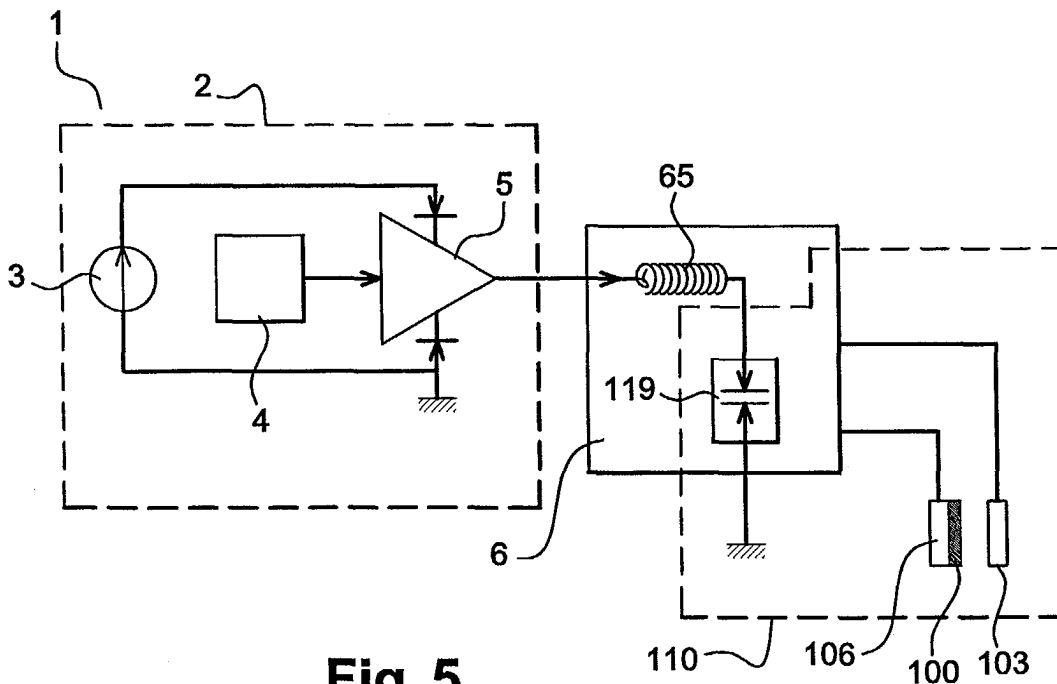


Fig. 5

Description

[0001] La présente invention concerne de façon générale la génération de plasma dans un gaz, et plus particulièrement les systèmes de génération de plasma entre deux électrodes. La génération de plasma est notamment utilisée pour l'allumage commandé de moteurs à combustion interne par les électrodes d'une bougie.

[0002] L'allumage des moteurs à combustion interne essence, consistant à initier la combustion d'un mélange air-essence dans une chambre de combustion dudit moteur, est relativement bien maîtrisé dans les moteurs actuels. Dans les moteurs à allumage commandé à injection indirecte, classiquement, une bougie et un dispositif électronique en amont permettent de générer une étincelle capable de transmettre au mélange une énergie suffisante à sa combustion. La formation de cette décharge nécessite des tensions de claquage élevées (de l'ordre de 30 kV par mm), si bien que l'on limite l'espace inter-électrodes des bougies à environ 1 mm, distance relativement peu favorable à l'initiation de la combustion.

[0003] Pour satisfaire les normes de dépollution, les constructeurs automobiles ont développé des moteurs à allumage commandé aptes à fonctionner avec des mélanges carburés pauvres, c'est-à-dire présentant un excès d'air par rapport à la quantité de carburant injectée. Ces développements ont été appliqués en particulier aux moteurs à injection directe, dans lesquels l'injection de carburant se fait directement dans la chambre de combustion.

[0004] Les dispositifs d'allumage classiques s'appliquent assez mal sur les moteurs à mélange pauvre et à injection directe. En effet, les dispositifs d'allumage sont alors très ardues à mettre au point. Un front de flamme se propage correctement dans un mélange très pauvre (richesse inférieure à 0,3) mais l'initiation de la combustion nécessite généralement des richesses supérieures à 0,7, et de préférence pour des richesses proches de la stoechiométrie. Il est donc primordial de maintenir une richesse suffisamment élevée au niveau de l'espace inter-électrode.

[0005] La génération de mélanges stratifiés a donc été développée. Par opposition à un mélange homogène où la richesse est globalement la même en tout point, un mélange stratifié présente une richesse qui décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la bougie. La stratification du mélange dans la chambre de combustion est par exemple obtenue en guidant le jet de carburant de sorte que le jet rencontre la bougie au moment de la production de l'étincelle. Le guidage du jet est notamment obtenu par des phénomènes aérodynamiques, générés par exemple par une forme appropriée du piston.

[0006] Les mélanges stratifiés posent plusieurs problèmes. Il est délicat de faire coïncider l'instant d'étincelle et la présence au voisinage de l'espace inter-électrodes d'un nuage de mélange présentant une richesse

proche de 1, dans un environnement de mélange globalement pauvre. De plus, le mélange situé autour de la bougie au moment de l'étincelle présente d'importantes inhomogénéités de richesse, variables dans le temps, qui ne garantissent pas l'initiation de la combustion au moment du développement de l'étincelle. La taille et la durée d'étincelle des bougies classiques impliquent alors un taux de ratés d'allumage incompatible avec les exigences de rendement et de pollution actuels. Par ailleurs, le jet de carburant frappe souvent directement la bougie, ce qui entraîne un encrassement de l'isolant de la bougie. Cet encrassement favorise les courants de fuites entre l'électrode centrale et la masse. La génération des étincelles est affectée car l'étincelle est court-circuitée par un chemin carboné de faible impédance qui réduit la différence de potentiel entre les électrodes de la bougie.

[0007] De nouvelles bougies à étincelle de surface produisent des étincelles plus grandes pour traiter le problème du rendez-vous spatio-temporel. On allume ainsi un volume de mélange supérieur. La probabilité d'initiation de la combustion est alors très largement augmentée dans un moteur à injection directe à allumage commandé et mélange stratifié. De telles bougies sont notamment décrites dans les demandes de brevet FR97-14799, FR99-09473 et FROO-13821. De telles bougies génèrent des étincelles de taille importante à partir de différences de potentiel réduites. Les bougies à étincelles de surface présentent un diélectrique séparant les électrodes dans la zone où la distance les séparant est la plus faible; on guide ainsi les étincelles formées entre les électrodes sur la surface du diélectrique. Ces bougies amplifient le champ inter-électrode à la surface du diélectrique. On charge pour cela progressivement les capacités élémentaires formées par le diélectrique et une électrode sous-jacente. Les bougies génèrent une étincelle se propageant le long de la surface de l'isolant dans les zones où le champ électrique dans l'air est le plus fort. Un dispositif d'allumage de moteur classique, couplé à de telles bougies génère typiquement des étincelles présentant une longueur de 4 mm avec des tensions de claquage comprises entre 5 et 25 kV. Lorsque la bougie présente globalement une symétrie de révolution autour de son axe principal, la décharge a une probabilité d'apparition sensiblement identique n'importe où autour de l'isolant. Au contraire, les bougies classiques génèrent un arc électrique se produisant systématiquement dans un même volume extrêmement réduit. Ce procédé d'allumage par génération de plasma présente encore des inconvénients. Il se produit notamment un passage à l'arc suivant une unique ligne. L'initiation de la combustion n'est ainsi pas optimale.

[0008] Il existe donc un besoin, que l'invention vise à satisfaire, pour un système de génération de plasma entre des électrodes résolvant un ou plusieurs de ces inconvénients.

[0009] L'invention porte ainsi sur un système de gé-

nération de plasma, comprenant:

- deux électrodes;
- un matériau diélectrique séparant les électrodes;
- un générateur de tension, connecté aux électrodes et appliquant sélectivement une tension alternative présentant une fréquence supérieure à 1 MHz et une amplitude entre crêtes supérieure à 5kV entre les électrodes.

[0010] L'invention porte également sur un procédé de génération de plasma entre deux électrodes séparées par un matériau diélectrique, le procédé comprenant une étape d'application d'une tension alternative présentant une fréquence supérieure à 1 MHz et une amplitude entre crêtes supérieure à 5 KV entre les électrodes.

[0011] Le terme plasma ramifié utilisé par la suite désigne la génération simultanée d'au moins plusieurs lignes ou chemins d'ionisation dans un volume donné, leurs ramifications étant en outre omnidirectionnelles.

[0012] Alors qu'un plasma de volume implique le réchauffement de tout le volume dans lequel il doit être généré, le plasma ramifié ne nécessite que le chauffage sur le trajet des étincelles formées. Ainsi, pour un volume donné, l'énergie requise pour un plasma ramifié est nettement inférieure à celle requise par un plasma de volume.

[0013] L'invention permet de générer aisément un plasma de volume ou un plasma ramifié. De tels plasmas peuvent notamment être utilisés pour initier une combustion de carburant dans un moteur à combustion. Le plasma ainsi généré peut également être utilisé dans d'autres applications, comme la dépollution de gaz d'échappements, la désinfection de circuits de climatisation, le décolmatage de filtre à air ou le traitement de surface.

[0014] De façon générale, on entendra par la suite par haute densité, toute densité molaire supérieure à $2,5 \cdot 10^{-3}$ mol/L. On appellera densité de combustion toute densité molaire de gaz supérieure à $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L. On désignera par streamer une pointe d'ionisation positive se propageant depuis l'anode.

[0015] D'autres particularités et avantages de l'invention apparaîtront clairement à la lecture de la description suivante qui est donnée à titre d'exemple non limitatif et en regard des figures. Ces figures montrent:

- Figure 1, un schéma de fonctionnement d'une bougie d'allumage à étincelle de surface;
- Figure 2, la représentation de champs appliqués et de l'étincelle générée entre les électrodes de la bougie durant l'initiation de l'allumage;
- Figure 3, un diagramme du champ électrostatique entre les deux électrodes de la bougie durant l'initiation de l'allumage;
- Figure 4, une représentation schématique du développement d'un streamer pour une unique montée

en tension (champ local et champ global);

- Figure 5, une représentation schématique d'un mode de réalisation du système de génération de plasma selon l'invention ;
- 5 - Figure 6, un modèle électrique utilisé pour le dimensionnement du résonateur série;
- Figure 7, une variante dans laquelle l'amplificateur comprend un transformateur à point milieu;
- Figure 8, une autre variante du système dans laquelle l'amplificateur comprend une commande de transistor de puissance par un transistor bipolaire;
- 10 - Figure 9, des chronogrammes de signaux durant l'excitation du résonateur de la figure 7;
- Figure 10, les différents éléments de l'alimentation de la figure 7 intégrés sur un même circuit;
- 15 - Figure 11, une représentation schématique d'une boucle d'asservissement incluse dans l'amplificateur;
- Figure 12, une variante du système comprenant une boucle d'asservissement et des circuits de génération des premières oscillations de tension;
- 20 - Figure 13, une autre variante de système comprenant une boucle d'asservissement et des circuits de génération des premières oscillations de tension;
- 25 - Figure 14, un exemple de transformateur formant une sonde de courant de l'amplificateur, réalisé sur un circuit imprimé;
- Figure 15, un mode de réalisation d'une inductance parallèle sur un circuit imprimé;
- 30 - Figure 16, un autre mode de réalisation d'une inductance parallèle sur un circuit imprimé;
- Figure 17, une variante d'un système présentant une alimentation et un amplificateur communs pour deux résonateurs;
- 35 - Figures 18 et 19, des représentations schématiques en coupe d'un exemple de bougie utilisable dans le système de génération de plasma;
- Figures 20 à 27, différentes configurations de têtes de bougie adaptées pour une excitation radiofréquence.
- 40

[0016] L'invention propose d'appliquer une tension alternative de fréquence supérieure à 1MHz et d'amplitude entre crêtes supérieure à 5 kV entre deux électrodes de génération de plasma, séparées par un élément en matériau diélectrique. Cette excitation sera désignée par la suite d'excitation radiofréquence. On génère ainsi un plasma de volume ou un plasma ramifié.

[0017] La figure 1 illustre des détails de la structure d'une bougie d'allumage à étincelle de surface pour laquelle l'application d'une excitation radiofréquence s'avère particulièrement avantageuse. On va préalablement détailler le fonctionnement d'une telle bougie.

[0018] La bougie à effet de surface 110 comprend une tête de bougie destinée à déboucher dans la chambre de combustion ménagée dans la paroi inférieure de la culasse d'un moteur. La bougie comprend une électrode cylindrique basse tension qui sert de culot métallique

103 destiné à se visser dans un évidement réalisé dans la culasse du moteur et débouchant à l'intérieur de la chambre de combustion. Le culot 103 est destiné à être connecté électriquement à la masse.

[0019] Le culot 103 entoure une électrode haute tension cylindrique 106 disposée en position centrale. L'électrode 106 est destinée à être reliée à un générateur d'une haute tension d'allumage. L'électrode 106 est isolée du culot 103 par l'intermédiaire d'un manchon isolant 100. Le manchon isolant est constitué d'une matière dont la permittivité relative est supérieure à 3, par exemple une céramique. La bougie présente un espace 105 séparant le diélectrique 100 et une extrémité de l'électrode 103.

[0020] L'électrode 106 et le manchon isolant 100 débouchent en saillie d'une longueur 1 à l'extérieur du culot 103. Cette longueur 1 correspond sensiblement à la longueur de l'étincelle générée lorsqu'une haute tension est appliquée entre les électrodes 106 et 103.

[0021] Le culot ou électrode basse tension 103 comprend de façon monobloc un corps et une pièce de liaison supportant une collerette rabattue 101. La collerette 101 présente un bord biseauté s'étendant à proximité immédiate de la surface de l'isolant 100.

[0022] Le diélectrique 100 crée une amplification de champ électrostatique dans l'air à son voisinage. L'étincelle générée entre le bord biseauté de la collerette 101 du culot 103 et une extrémité libre 104 de l'électrode centrale 106 se propage à la surface de l'isolant 100, là où le champ électrique dans l'air est le plus fort.

[0023] La formation d'une étincelle est initiée par l'arrachement au milieu de quelques électrons soumis à un champ électrique important. Lors de l'application d'une tension importante entre les électrodes, des électrons de la collerette sont accélérés par les forces électrostatiques générées et heurtent des molécules de l'air. L'extrémité de la collerette est la zone qui subit le champ électrostatique le plus important, et constitue donc le lieu de départ de la première avalanche. Les molécules de l'air libèrent un électron et un photon ionisant à leur tour d'autres molécules d'air. Une réaction en chaîne ionise l'air dans l'espace 105 entre l'électrode 103 et le diélectrique 100. L'espace de gaz 105 permet de réaliser une ionisation préalable avec une différence de potentiel entre les électrodes 103 et 106 relativement limitée.

[0024] Un canal conducteur est ainsi créé, comme illustré à la figure 2. Les lignes discontinues représentent des équipotentielles du champ électrostatique lorsqu'une tension élevée est appliquée entre les électrodes 103 et 106.

[0025] La figure 3 représente un exemple d'amplitude de champ électrostatique entre l'extrémité de la collerette 101 et l'extrémité de l'électrode 106, A désignant l'extrémité de la collerette, B désignant l'extrémité 104 de l'électrode 106. Une fois que l'air est ionisé au niveau de l'extrémité de la collerette, l'ionisation de l'air crée une charge d'espace présentant un potentiel proche de

celui de la collerette et qui se comporte donc comme un prolongement de celle-ci. Lors de la propagation du front d'avalanche, le champ électrique est amplifié en amont du front et favorise la création de nouvelles avalanches. Le phénomène s'auto-entretient le long du manchon 100, pour créer un canal ionisé conducteur jusqu'à l'extrémité 104 de l'électrode centrale.

[0026] Dans la bougie de la figure 1, l'isolant est séparé de l'électrode 103 par un espace d'air. Cet espace n'est pas essentiel pour le fonctionnement de la bougie mais facilite la fabrication de la bougie avec une collerette présentant un angle très vif à proximité de la surface de l'isolant. Il permet également de réduire l'influence des phénomènes d'encrassement.

[0027] Le phénomène physique mis en oeuvre grâce à l'excitation radiofréquence présente des similitudes avec la propagation décrite précédemment mais permet d'en améliorer considérablement les effets. La figure 4 représente schématiquement le champ électrostatique lors du départ d'une avalanche. On peut y remarquer que la propagation de l'avalanche est limitée par le champ local dû à la séparation des atomes et de leurs électrons. Ce champ local limite en particulier la propagation de la décharge sur des longueurs importantes. La présente invention propose, entre autres, une excitation électrique capable d'inverser la polarité du champ global imposé avant que les électrons n'aient pu se recombinaison avec les atomes présents dans le milieu. A chaque alternance de la polarité, les électrons sont de plus en plus accélérés en sens inverse. Une onde de polarisation se propage ainsi de manière oscillatoire à la fréquence de l'excitation, récupérant à chaque période les charges déposées à la période précédente. Chaque alternance produit alors une propagation de l'onde plus importante que la précédente; il est ainsi possible d'obtenir des étincelles de longueurs très importantes avec des amplitudes de tensions entre les électrodes relativement limitées. L'excitation radiofréquence supprime également les variations de tension de claquage entre des cycles successifs.

[0028] Pour une application à l'allumage automobile, l'homme de métier utilisera des électrodes et un isolant présentant des matériaux et une géométrie adéquats pour initier une combustion dans un mélange à une densité de combustion et pour résister au plasma ainsi formé.

[0029] Un plasma ainsi formé présente de nombreux intérêts dans le cadre de l'allumage automobile: diminution sensible du taux de ratés dans un système à mélange pauvre stratifié, réduction de l'usure des électrodes et adaptation du volume d'initiation de l'allumage en fonction de la densité. On constate que l'excitation décrite est adaptée pour réaliser l'allumage d'un mélange présentant une densité supérieure à $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L. Pour cette application d'allumage, le générateur applique l'excitation entre 1,5 et 200 fois par secondes, avec un rapport cyclique d'application compris entre 10 et 1000, et de préférence compris entre 72 et 720.

[0030] L'excitation radiofréquence décrite est également adaptée à une application de dépôt plasma, dans un gaz présentant une densité comprise entre 10^{-2} mol/L et $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L. Le gaz utilisé dans cette application peut typiquement être de l'azote.

[0031] L'excitation radiofréquence est encore adaptée à une application de dépollution d'un gaz présentant une densité comprise entre 10^{-2} mol/L et $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L.

[0032] L'excitation radiofréquence est en outre adaptée à une application d'éclairage faisant appel à un gaz présentant une densité molaire comprise entre 0,2 mol/L et 1 mol/L.

[0033] Un système de génération de plasma envisagé comprend principalement trois sous-ensembles fonctionnels:

- un générateur capable de faire résonner une structure L-C à une fréquence supérieure à 1MHz avec une tension aux bornes du condensateur supérieure à 5kV, de préférence supérieure à 6kV.
- un résonateur connecté en sortie du générateur et présentant un facteur de surtension compris entre 40 et 200 et présentant une fréquence de résonance supérieure à 1 MHz.
- une tête de bougie comprenant deux électrodes séparées par un isolant, permettant de générer un plasma lors de l'application de l'excitation radiofréquence.

[0034] La figure 5 représente un mode de réalisation d'un système de génération de plasma 1 et de son générateur de tension 2. Le générateur de tension comprend avantageusement :

- une alimentation basse tension 3 (générant une tension continue inférieure à 1000 V);
- un amplificateur radiofréquence 5, amplifiant la tension continue et générant une tension alternative à la fréquence commandée par la commande de commutation 4.

[0035] La tension alternative de l'amplificateur 5 est appliquée sur le résonateur LC 6. Le résonateur LC 6 applique la tension alternative selon l'invention entre les électrodes 103 et 106 de la tête de bougie.

[0036] La tension fournie par l'alimentation 3 est inférieure à 1000V et l'alimentation présente de préférence une puissance limitée. On peut ainsi prévoir que l'énergie appliquée entre les électrodes soit limitée à 300mJ par allumage, pour des raisons de sécurité. On bride ainsi également l'intensité dans le générateur de tension 2 et sa consommation électrique. Pour générer des tensions continues supérieures à 12 V dans une application automobile, l'alimentation 3 peut comprendre un convertisseur 12 Volt vers Y Volt, Y étant la tension fournie par l'alimentation à l'amplificateur. On peut ainsi générer le niveau de tension continue souhaitée à partir d'une tension de batterie. La stabilité de la tension con-

tinue générée n'étant a priori pas un critère déterminant, on peut prévoir d'utiliser une alimentation à découpage pour alimenter l'amplificateur, pour ses qualités de robustesse et de simplicité.

5 **[0037]** On peut également envisager, selon une variante, d'appliquer aux bornes de l'amplificateur une tension de 42 V prélevée sur le circuit électrique du véhicule. Il s'agit en effet du niveau de tension qui sera en vigueur dans de futures normes applicables aux futurs véhicules automobiles. Cette variante, évitant la conversion de tension par l'alimentation 3, réduit sensiblement le coût et la complexité du générateur de tension 2.

10 **[0038]** Ce générateur de tension permet de concentrer les tensions les plus élevées sur le résonateur 6. L'amplificateur 5 traite ainsi des tensions beaucoup plus réduites que les tensions appliquées entre les électrodes: on peut donc utiliser un amplificateur 5 d'un coût raisonnable et présentant des caractéristiques voisines de composants usuels pour la production automobile de masse, dont la fiabilité est en outre éprouvée. De plus, un tel générateur de tension présente un nombre de composants relativement réduit. On dispose ainsi d'un système de génération de tension présentant une fiabilité, un volume, un poids et une facilité de production intéressants, en particulier pour de grandes séries dans une application automobile.

20 **[0039]** L'amplificateur 5 permet d'accumuler de l'énergie dans le résonateur 6 à chaque alternance de sa tension. On utilisera de préférence un amplificateur 5 en classe E, tel que détaillé dans le brevet US-5 187 580. Un tel amplificateur permet de maximiser le facteur de surtension. Un tel amplificateur réalise des commutations déphasées par rapport à l'amplificateur décrit dans le brevet US-3 919 656 qui vise à réaliser des commutations à tension et/ou intensités nulles et n'optimise pas le facteur de surtension de l'amplificateur. L'homme de métier associera bien entendu un dispositif de commutation adapté à l'amplificateur choisi, pour supporter les exigences de montées en tension et présenter une vitesse de commutation adéquate.

30 **[0040]** L'amplificateur en classe E préférentiel comporte un résonateur parallèle 62. Ce résonateur parallèle 62 est de préférence réalisé sur la même carte que l'amplificateur 5 et sa commande 4 de commutation. Le résonateur parallèle 62 stocke temporairement de l'énergie fournie par l'amplificateur 5, et fournit périodiquement cette énergie au résonateur série 61. Avec les valeurs de tension d'alimentation précisées par ailleurs, on utilisera un amplificateur 5 présentant un coefficient de surtension de l'ordre de 3. Ce coefficient de surtension correspond au rapport entre la tension fournie par l'alimentation basse tension 3 et l'amplitude entre crêtes de la tension appliquée sur le résonateur série. Le coefficient de surtension du résonateur série 61 associé est alors de préférence compris entre 40 et 200. Le coefficient de surtension du résonateur série est notamment limité par son angle de perte.

55 **[0041]** On va exposer un dimensionnement préféren-

tiel des éléments inductifs et capacitifs du résonateur série 61. La figure 6 illustre un modèle électrique de ce résonateur. Ainsi, l'inductance série 65 présente en série une inductance L et une résistance Rs prenant en compte l'effet de peau dans le domaine radiofréquence. Le condensateur 119 présente en parallèle une capacité C et une résistance Rp. La résistance Rp correspond le cas échéant à la dissipation dans la céramique de la bougie. Lorsque le résonateur série 61 est alimenté par une tension à sa fréquence de résonance f_0 ($1/(2\pi\sqrt{L*C})$), l'amplitude aux bornes de la capacité C est amplifiée du coefficient de surtension Q défini par la formule suivante:

$$Q = \frac{1}{\frac{\sqrt{L}}{R_s} + \frac{R_p}{\sqrt{L}}}$$

[0042] De l'équation $\omega_0^2 = (2\pi*f_0)^2 = 1/(L*C)$, on déduit que l'équation suivante doit être vérifiée pour obtenir la valeur maximale de Q:

$$R_s * R_p = L/C$$

[0043] On va prendre en compte les conditions suivantes:

- f_0 est de l'ordre de 5MHz;
- les valeurs Rs et Rp sont constantes;
- Rp est principalement induite par l'encrassement de la tête de bougie et vaut en moyenne 50 k Ω ;
- Rs vaut approximativement 10 Ω en prenant en compte l'effet de peau.

[0044] On déduit alors

$$C \approx \frac{1}{\omega \sqrt{R_s * R_p}} \approx 45 \text{ pF}$$

et

$$L \approx \frac{\sqrt{R_s * R_p}}{\omega} \approx 22 \mu\text{H}$$

[0045] Une autre modélisation permet également de déterminer ces caractéristiques. La résistance de la capacité est modélisée par le facteur de dissipation diélectrique ($\tan(\delta) = 1/(R_p * C)$) dans le matériau isolant de la tête de bougie, que l'on considère constant et uniquement dépendant du matériau choisi.

[0046] Le coefficient de surtension est alors défini comme suit:

$$Q = \frac{1}{\frac{\sqrt{L}}{R_s} + \tan \delta}$$

[0047] La maximisation du coefficient de surtension Q est alors équivalente à la minimisation de

$$\frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}}$$

15 On choisit alors de préférence une capacité C élevée et une inductance L réduite.

[0048] Ces règles de détermination s'appliquent quel que soit le type de résonateur série utilisé et s'appliquent donc également à la bobine-bougie décrite ultérieurement.

[0049] Un compromis dans le choix des valeurs est cependant nécessaire pour la variante utilisant un transistor MOS de puissance comme interrupteur, comme décrit ci-après. En effet, le courant traversant l'interrupteur MOS croit alors avec la capacité C. La valeur de la capacité C doit donc être fixée en fonction du courant nominal de l'interrupteur MOS.

[0050] On va maintenant décrire plusieurs variantes d'amplificateurs 5. De façon générale, on utilisera de préférence un amplificateur présentant un transistor MOSFET de puissance comme interrupteur 51 commandant les commutations aux bornes du résonateur 6. Les figures 7 et 8 illustrent deux modes de réalisations d'amplificateurs 5 incluant des MOSFET M4, comme interrupteurs 51. Les contraintes d'amplitude et de fréquence concernant la tension à générer entre les électrodes peuvent être résolues avec un transistor MOSFET de puissance présentant les caractéristiques suivantes: une isolation supérieure à 500 V, une capacité en courant de drain supérieure à 30 A, un temps de commutation inférieur à 20 ns (et de préférence de l'ordre de 10ns en cas d'utilisation d'une boucle d'asservissement) et une capacité en courant de grille atteignant 10A.

[0051] Ce transistor MOSFET présentera également de préférence une inductance inférieure à 7 nH sur ses liaisons entre sa surface active de silicium et le circuit imprimé sur lequel il est implanté. On évite ainsi des transitoires lors de pics de tension élevés qui seraient préjudiciables aux commutations rapides du transistor.

[0052] La figure 7 représente un premier mode de réalisation d'un amplificateur 5 présentant un tel transistor de commande de commutation M4. Un transformateur à point milieu 56 est interposé entre la commande 4 et le MOSFET de puissance M4. Le MOSFET de puissance M4 peut ainsi être commandé très rapidement avec une tension symétrique capable de le bloquer efficacement. En effet, l'application d'une tension

négative sur la grille du transistor MOSFET M4 permet de compenser les surtensions causées par l'inductance de liaison de M4 avec le reste du circuit. Le blocage du transistor est ainsi facilité, d'autant qu'une tension négative permet de décharger la capacité grille-drain particulièrement rapidement.

[0053] L'amplificateur 5 représenté comprend deux transistors intermédiaires M1 et M2 disposés pour alimenter en alternance les bobines L1 et L2 du primaire du transformateur à point milieu. Un circuit de pilotage 57 applique des signaux de commande respectifs sur les transistors M1 et M2. Les signaux de commande ne se recouvrent pas temporellement pour éviter un court-circuit dans le primaire. Les signaux de commande présentent également avantageusement des durées d'activation sensiblement égales pour limiter le courant magnétisant dans le transformateur 56. On peut également compenser une inégalité des temps d'activation par une valeur élevée de l'inductance magnétisante du transformateur 56.

[0054] Le chronogramme de la figure 9 illustre différents signaux durant l'excitation du résonateur série 61. La courbe 91 représente le courant traversant le résonateur série 61. La courbe 92 illustre la tension de grille du MOSFET M4. La courbe 93 illustre la tension à l'entrée du résonateur série 61.

[0055] On intègre avantageusement l'amplificateur 5 sur un même circuit imprimé 8. On peut ainsi intégrer le transformateur 56, les transistors M1 à M4 et le circuit de pilotage 57 sur le même circuit imprimé, selon le schéma représenté à la figure 10. On obtient ainsi pour un coût réduit un amplificateur 5 très compact. On minimise également l'inductance de fuite du transformateur et les surtensions aux bornes des transistors intermédiaires M1 et M2.

[0056] La partie gauche de la figure 10 représente plusieurs éléments de l'amplificateur 5 et leurs connexions. La partie centrale de la figure 10 représente les transistors M1 et M2 et leur bobinage respectif L11 et L12. La partie droite de la figure 10 représente schématiquement les différents éléments intégrés sur le circuit imprimé 8. L'ensemble formé par les transistors M1 à M4, les bobines L11, L12 et L2, est de préférence disposé sur un bord du circuit imprimé 8. Les bobinages peuvent ainsi être disposés dans l'entrefer d'un tore fendu 81.

[0057] La figure 8 représente un second mode de réalisation d'un amplificateur 5 présentant un transistor de commande de commutation MOSFET M4. Les grilles des transistors M1 et M2 sont liées. Les transistors M1 et M2 commutent donc simultanément. Le transistor bipolaire M3 est donc monté en suiveur. Lorsque M1 et M2 conduisent, le transistor bipolaire M3 est bloqué, et par conséquent, le transistor MOSFET M4 est également bloqué. On utilisera de préférence des transistors intermédiaires M1 et M2 présentant les caractéristiques suivantes: Une tension de commande de 5V, une intensité nominale de 8A à cette tension, une résistance R_{on}

inférieure à 150 milliOhms et un temps de réponse inférieur à 20ns.

[0058] Comme représenté aux figures 11 à 13, on réalise avantageusement un asservissement de l'amplificateur 5 sur le courant de charge appliqué au résonateur 6. En pratique, on cherche à asservir un interrupteur 51 commandant les commutations aux bornes du résonateur 6. L'amplificateur 5 présente ainsi un dispositif de mesure 54 du courant appliqué à l'entrée du résonateur 6. La consigne est appliquée sur une entrée 58 d'un comparateur. Le signal de sortie du comparateur est appliqué sur un dispositif d'amplification 53 représenté schématiquement. On optimise ainsi le facteur de surtension de l'amplificateur 5 en pilotant le résonateur 6 à sa fréquence propre malgré les dérives de comportement des composants. On évite ainsi de recourir à des composants dont le coût et la complexité sont inappropriés à une production de masse. L'asservissement est par exemple réalisé en réinjectant dans l'amplificateur 5 une tension proportionnelle au courant circulant dans la charge. On peut également appliquer une correction de phase sur le signal mesuré par l'intermédiaire du module de déphasage 55.

[0059] Dans un tel transformateur 54, combiné à une boucle d'asservissement, la résistance parallèle R2 du secondaire du transformateur remplit préférentiellement deux fonctions de l'asservissement: la rétroaction d'un signal proportionnel au courant dans la charge, et le déphasage de l'intensité traversant la charge en fonction de sa valeur de résistance.

[0060] On utilise avantageusement un transformateur 54 présentant une valeur d'inductance très réduite (par exemple comprise entre 10 et 20 nH) et dont les enroulements supportent un courant de l'ordre de 10A. La figure 14 présente ainsi un exemple de transformateur réalisé sur un circuit imprimé, facilitant l'obtention de telles caractéristiques. La partie gauche de la figure 14 représente indépendamment les couches utiles du circuit imprimé. La partie droite de la figure représente ces couches superposées et assemblées. L'élément conducteur 151 forme le primaire d'un transformateur, et est disposé sur une première face du substrat 152. Cet élément conducteur 151 est dans l'exemple réalisé sous forme sensiblement filaire. Les éléments conducteurs 153 et 154 forment le secondaire du transformateur. Ces éléments conducteurs 153 et 154 sont disposés sur une deuxième face du substrat 152, en vis-à-vis de l'élément conducteur 152. Les éléments 153 et 154 sont reliés électriquement d'une part suivant la ligne pointillée, et d'autre part par la résistance 155. La résistance 155 peut ainsi être utilisée pour mesurer le courant traversant l'élément conducteur 151 et pour former le module de déphasage 55 décrit précédemment.

[0061] On adapte avantageusement l'asservissement de l'interrupteur 51 commandant les commutations aux bornes du résonateur 6 décrit précédemment aux modes de réalisations présentant un transistor de commande de commutation MOSFET de puissance

comme interrupteur. On peut ainsi commuter le transistor MOSFET M4 aux instants optimaux.

[0062] Afin que la structure d'asservissement produise rapidement des oscillations, malgré un courant de charge initial nul, on dispose de plusieurs variantes avantageuses du système.

[0063] Le résonateur LC 6 comprend un résonateur série 61 et un résonateur parallèle 62. Le résonateur série 61 présente une capacité série 119 et une inductance série 65. Selon une première variante, la structure d'asservissement comprend un oscillateur astable 52 (par exemple un générateur de créneaux) pour générer les premières alternances dans la capacité série 119 et stabiliser les oscillations en régime entretenu. On prévoit que la fréquence de l'oscillateur soit proche de la fréquence de l'excitation générée entre les électrodes. La structure d'asservissement additionne le signal de mesure de courant et le signal de l'oscillateur astable 52 et permet ainsi à l'amplificateur en classe E de réaliser les commutations aux moments les plus favorables.

[0064] Par ailleurs, le premier créneau généré par l'oscillateur 52 est approximativement deux fois plus court que les suivants : ainsi, on peut initialiser le courant dans l'inductance série 65 à la valeur de ce courant en régime entretenu. Le résonateur parallèle 62 comprend une inductance 621 et une capacité 622 disposées en parallèle. Toutes les impulsions aux bornes de l'inductance 621 et de la capacité 622 sont alors égales. On peut ainsi éviter de sur-dimensionner l'interrupteur 51 et l'exploiter de façon optimale.

[0065] La figure 12 représente une seconde variante. Le signal de commande appliqué sur l'interrupteur 51 génère un créneau de tension de faible durée, c'est-à-dire de l'ordre de $5\mu\text{s}$, initiant la première alternance dans le résonateur 6. Le signal d'asservissement commande ensuite l'interrupteur 51. La boucle de rétroaction de la structure d'asservissement présente un gain élevé. Ainsi, l'impulsion initiale rendant l'asservissement opérationnel est suffisamment courte, et le courant traversant l'interrupteur 51 reste raisonnable. Il n'est ainsi pas nécessaire de sur-dimensionner l'interrupteur 51 pour réaliser le démarrage de l'asservissement, en particulier lorsque l'interrupteur est formé d'un transistor MOSFET de puissance.

[0066] Une combinaison avantageuse du résonateur parallèle 62 et du résonateur série 61 optimise le fonctionnement du système lorsque la fréquence propre du résonateur parallèle 62 est légèrement supérieure à celle du résonateur série 61. Ainsi, l'impulsion de tension générée par la fermeture du transistor interrupteur M4 a une durée inférieure à la demi-période du résonateur série 61. Ainsi, l'impulsion lors de la fermeture du transistor interrupteur M4 est anticipée par la diode inverse interne du transistor M4 lorsque la tension de son drain repasse par une valeur nulle. On prévoit alors que le rapport entre les impédances caractéristiques respectives du résonateur parallèle 62 et du résonateur série

61 soit inférieure à 100 supérieure à 40. La valeur inférieure garantit un bon coefficient de surtension. La valeur supérieure limite les courants dans le transistor M4. On utilise typiquement une capacité de 1 nF et une inductance de 1 μH pour le résonateur parallèle 62. L'impédance caractéristique du résonateur parallèle 62 vaut alors approximativement 32 ohms.

[0067] Par ailleurs, dans le résonateur parallèle 62, on peut considérer que les capacités entre les spires de l'inductance 621 seront négligeables par rapport à la capacité du condensateur 622. On peut donc réaliser l'inductance 621 sous forme d'une superposition de pistes conductrices 623 sensiblement circulaires, réalisées sur les couches superposées d'un circuit imprimé. Des exemples de structures d'inductances 621 sur circuit imprimé sont représentés aux figures 15 et 16. Les modes de réalisation de ces figures permettent ainsi de réaliser une inductance 621 sans noyau de ferrite. On réduit ainsi le coût et on améliore les performances de l'inductance 621.

[0068] Sur les figures 15 et 16, les points épais représentent des plots de connexion des différentes pistes. Les traits verticaux joignant les plots de connexion représentent des liaisons conductrices entre les plots. Les pistes connectées forment ainsi une bobine. Avantageusement, chaque piste 623 est entourée d'une boucle fermée 625, afin de réduire le rayonnement de l'inductance 621 formée par les pistes.

[0069] Le schéma de la figure 15 représente une variante présentant une couche supérieure et une couche inférieure ne présentant pas de piste de bobine. La couche supérieure et la couche inférieure présentent chacune une borne de connexion 624 de l'inductance 621.

[0070] Le schéma de la figure 16 représente une variante, dans laquelle la couche inférieure et la couche supérieure présentent chacune une piste de bobine et une borne de connexion. Les lignes courbes 626 joignant un plot de connexion à une borne de connexion 624 représentent une liaison électrique rapportée sur ces couches de circuit imprimé.

[0071] Aux fréquences de travail du résonateur 6, les pertes sont importantes. Afin de limiter ces pertes, on limite de préférence au maximum la présence de matériau magnétique dans le résonateur série 61.

[0072] Il est à noter dans ce qui précède que la mention d'un résonateur série n'implique pas forcément que le résonateur inclut également un résonateur parallèle.

[0073] Comme illustré à la figure 17, on peut envisager une variante, dans laquelle on utilise une alimentation et un amplificateur communs pour deux résonateurs 6 disposés en parallèle. Cette variante permet de réduire le poids, le coût et la complexité globale du système de génération de tension 1 pour un moteur à allumage commandé. Chaque résonateur 6 correspond à une chambre de combustion respective 141 et 142, les deux chambres de combustion étant en opposition de phase. L'amplificateur 5 est commandé de sorte que la tension d'allumage soit générée à la fois lors de la com-

pression et lors de la détente pour chaque chambre de combustion. En effet, la compression dans une chambre 141 est synchronisée avec la détente 142 dans l'autre. Lors de la génération de la tension, le claquage dans la chambre en détente 142 est beaucoup plus rapide que dans la chambre en compression 141. En effet, la densité de gaz dans la chambre en détente est beaucoup plus faible que la densité dans la chambre en compression. La résistance de décharge équivalente de la chambre en détente 142 est ainsi beaucoup plus élevée que celle de la chambre en compression. La bougie présente dans la chambre en compression poursuit alors sa montée en tension jusqu'au claquage. La densité du gaz dans la chambre en détente est suffisamment faible pour ne pas modifier de façon gênante le coefficient de surtension dans la chambre en compression; la génération de l'étincelle dans la chambre en compression est ainsi peu perturbée par la génération de la tension dans l'autre chambre.

[0074] La figure 18 représente une vue en coupe d'une bougie intégrant avantageusement un résonateur série 61. La bougie 110 présente une borne de connexion 131, connectée à une première extrémité d'un bobinage inductif 112. La deuxième extrémité du bobinage inductif 112 est connectée à une extrémité interne de l'électrode haute tension 106. Cette extrémité est également en contact avec un élément isolant 111 formant le condensateur.

[0075] Les électrodes 103 et 106 sont dans cet exemple séparées par le matériau diélectrique 100 destiné au guidage des étincelles entre ces électrodes. Le résonateur série 61 intégré dans la bougie 110 comprend le bobinage inductif 112 et l'élément isolant 100 formant également le condensateur entre les électrodes 103 et 106. Le condensateur et le bobinage inductif 112 sont disposés en série. La capacité série du résonateur série 61 est formée du condensateur et des capacités parasites internes de la bougie. Cette capacité 119 est disposée en série avec une inductance 65 pour former le résonateur série 61. La longueur de la connexion entre l'inductance et le condensateur étant ainsi réduite, on réduit les capacités parasites dans la bougie. Il est ainsi aisé d'obtenir un coefficient de surtension du résonateur série compris dans la plage préférentielle de 40 à 200 décrite précédemment. La bougie 110 est ainsi utilisée pour entretenir la tension alternative entre les électrodes 103 et 106, dans le domaine de fréquence souhaité.

[0076] Le résonateur série intégré dans la bougie présente de préférence un bobinage unique 112, facilitant la fabrication d'une telle bougie.

[0077] Un nombre important de spires dans le bobinage unique 112 est nécessaire pour obtenir une inductance de l'ordre de 50 μ H (ordre de grandeur détaillé par la suite). Or, un nombre de spires important génère des capacités parasites. L'unique bobinage inductif 112 présente de préférence un axe (identifié par la ligne en trait mixte) et est constitué d'une pluralité de spires superposées suivant son axe. On entend ainsi que la pro-

jection d'une spire est identique à la projection de toutes les spires suivant cet axe. On limite alors les capacités parasites en ne superposant pas des spires radialement.

[0078] La bougie comprend en outre avantageusement un blindage 132 connecté à une masse et entourant le bobinage inductif 112. Les lignes de champ sont ainsi refermées à l'intérieur du blindage 132. Le blindage 132 réduit ainsi les émissions électromagnétiques parasites de la bougie 110. Le bobinage 112 peut en effet générer des champs électromagnétiques intenses avec l'excitation radiofréquence qu'il est envisagé d'appliquer entre les électrodes. Ces champs peuvent notamment perturber des systèmes embarqués d'un véhicule ou dépasser des seuils définis dans des normes d'émission. Le blindage 132 est de préférence constitué d'un matériau non ferreux à conductivité élevée, tel que le cuivre. On peut notamment utiliser une boucle conductrice comme blindage 132.

[0079] Pour un blindage 132 et un bobinage unique 112 présentant chacun une forme globalement cylindrique, le rapport optimal entre leur diamètre vaut le nombre d'Euler, soit approximativement 2,72, si l'on veut minimiser le champ électrique maximal, généré à la surface des spires. On évite ainsi des phénomènes de claquage à l'origine de dissipations d'énergie dans la bougie. On choisira alors de préférence un rapport entre leur diamètre compris entre 2,45 et 3.

[0080] L'utilisation de deux bobinages 112 enroulés l'un sur l'autre et connectés en parallèle permet de réduire la résistance du bobinage formé. L'effet de peau, augmentant de façon importante la résistance du bobinage dans le domaine radiofréquence, est minimisé par l'enroulement l'un sur l'autre de ces deux bobinages. Si l'on veut minimiser la longueur du bobinage 112 pour une inductance prédéterminée, le rapport optimal entre le diamètre du blindage 132 et le bobinage 112 vaut $\sqrt{2}$ en enroulant l'un sur l'autre deux bobinages 112 connectés en parallèle par leurs extrémités. Les deux bobinages enroulés l'un sur l'autre présentent des diamètres d'enroulement légèrement différents et donc des inductances légèrement différentes, ce qui peut perturber le fonctionnement de la bougie dans le domaine radiofréquence. On a déterminé que pour la valeur $\sqrt{2}$ citée précédemment, la différence des inductances ne perturbait pas le fonctionnement de la bougie dans le domaine radiofréquence. On choisira dans ce cas de préférence un rapport des diamètres compris entre 1,35 et 1,5.

[0081] Le bobinage 112 et le blindage 132 sont de préférence séparés par un manchon d'isolation 133 en un matériau diélectrique approprié, afin de réduire encore le risque de claquage ou d'effluve, à l'origine de dissipations d'énergie. Bien entendu, plus les dissipations d'énergie sont faibles, plus l'amplitude de la tension appliquée entre les électrodes est élevée et plus la durée de vie de la bougie est élevée. Le matériau diélectrique peut par exemple être une des résines silico-

nes commercialisées sous les références Elastosil M4601, Elastosil RTV-2 ou Elastosil RT622 (cette dernière présentant une tension de claquage de 25 kV/mm et une constante diélectrique de 2,8). On peut prévoir que la surface extérieure du manchon 133 soit métallisée pour constituer le blindage 132 précité.

[0082] De façon générale, on privilégiera un enroulement du bobinage 112 autour d'un élément plein 134 réalisé en matériau isolant et amagnétique. On réduit ainsi encore les risques de claquage et les capacités parasites.

[0083] L'ensemble des matériaux diélectriques est de préférence fortement débullé, afin de réduire encore les risques de claquage. L'ensemble des matériaux diélectriques de la bougie présente de préférence des températures de fusion supérieures à 150 °C.

[0084] De façon générale, lorsque la bobine-bougie comprend plusieurs éléments isolants accolés, il existe un risque non négligeable de créer des inclusions d'air à l'interface entre ces éléments, notamment lorsqu'ils sont réalisés en céramique. Or, pour des raisons constructives, il est envisagé que la bobine-bougie comprenne dans la plupart des cas plusieurs éléments isolants accolés. En particulier, la liaison entre l'isolant 134 de la bobine et l'isolant 111 de la tête de bougie constitue également, pour les mêmes raisons d'effluve, une source de dissipation très importante. La technique précédemment citée peut, selon un nouveau mode de réalisation, être mise à profit au niveau de la céramique pour créer des équipotentielles prévenant la formation de décharges électriques.

[0085] La figure 19 représente une section d'un élément isolant 111 de tête de bougie, résolvant également ce problème. Cet élément isolant 111 est prévu pour être associé à un élément isolant 133 sous forme de résine de silicone. Cet élément isolant 111 présente une section non circulaire et est inclus dans une pièce circulaire 136 appartenant à la cathode 103. Ainsi, cet élément forme des passages destinés à laisser fluer la résine silicone lors de son injection. La résine silicone peut ainsi éliminer la majeure partie des inclusions d'air de la surface des éléments isolants.

[0086] Le matériau diélectrique utilisé pour l'isolant 100 peut par exemple être une céramique à base d'alumine, de nitrure d'aluminium, d'oxyde d'aluminium ou de carbure de silicium.

[0087] Aux fréquences de travail du résonateur série, les pertes sont importantes. Afin de limiter ces pertes, l'homme de métier limitera au maximum la présence de matériau magnétique dans le résonateur série.

[0088] Selon une variante particulièrement avantageuse illustrée à la figure 18, la bougie 110 présente en outre un enroulement de mesure de courant 139 remplissant la fonction du module 54. Cet enroulement 139 comprend plusieurs spires entourant le bobinage 112. L'enroulement 139 est de préférence disposé à proximité du connecteur 131 et à distance de la tête de bougie, dans une zone où les tensions sont relativement

basses.

[0089] La bougie de l'invention peut intégrer un certain nombre d'autres caractéristiques, comme le joint de siège 130 de la figure 18 disposé contre un épaulement de la cathode 103, et destiné à assurer l'étanchéité de la culasse au niveau de la lumière de la bougie.

[0090] La tête de bougie est la partie de la bougie qui est placée dans le gaz dans lequel le plasma doit être formé. Cette tête de bougie comprend préférentiellement trois éléments: une électrode centrale 106, une électrode de masse 103 et un isolant 100. La géométrie de ces éléments est déterminante pour assurer la formation du plasma de volume ou du plasma ramifié à l'emplacement souhaité de la chambre, avec les propriétés optimales, notamment pour l'allumage (volume important, transfert d'énergie optimal vers le gaz, etc...).

[0091] Les figures 20 à 27 illustrent différentes configurations de têtes de bougies, avantageusement incluses dans des bougies adaptées pour générer un plasma entre leurs électrodes et adaptées pour être alimentées par une excitation radiofréquence.

[0092] La figure 20 présente un premier groupe de variantes de têtes de bougies, que l'on nommera bougies à propagation capacitive. Ces géométries de têtes de bougie présentent une cathode 103 partiellement recouverte par l'isolant 100 dans l'axe de la bougie. Cette géométrie génère une propagation capacitive de l'étincelle sur la surface de l'isolant 100.

[0093] La figure 20.I représente une géométrie de tête de bougie connue en soi. Sur cette figure, on constate que la cathode 103 fait saillie axialement au-delà de l'isolant 100. On constate également qu'il existe un trajet direct dans l'air entre l'anode 106 et la cathode 103. Un arc électrique peut se former suivant ce trajet direct.

[0094] Les géométries des figures 20.II et 20.III génèrent une meilleure répartition du plasma à la surface de l'isolant 100. En rallongeant le chemin d'air reliant les deux électrodes, on réduit la probabilité de formation d'un arc. On crée ainsi des décharges multidirectionnelles entre les électrodes. Le plasma se répartit plus uniformément autour de la bougie et le volume de gaz touché est augmenté. On diminue également l'effet de propagation capacitive entre les électrodes; le plasma peut ainsi être généré à une distance plus grande de la surface de l'isolant.

[0095] Dans la variante de la figure 20.II, la cathode 103 n'est plus saillante axialement par rapport à l'isolant 100. L'isolant 100, la cathode 103 et l'anode 106 forment sensiblement une surface plane, évitant la formation d'un arc électrique entre l'anode 106 et la cathode 103.

[0096] Dans la variante de la figure 20.III, l'isolant 100 est saillant axialement par rapport aux extrémités des électrodes 103 et 106. Ce qui permet encore de rallonger le chemin d'air entre les électrodes 103 et 106. La saillie de l'isolant 100 forme un bossage arrondi.

[0097] La variante de la figure 21 propose de réduire l'effet capacitif. Ainsi, dans la tête de bougie, la cathode 103 ne s'étend pas radialement sous l'isolant 100.

[0098] Pour rallonger le chemin d'air entre la cathode et l'anode, la cathode 103 de cette variante est disposée axialement en retrait par rapport à l'isolant. L'électrode centrale ou anode 106 est disposée affleurante avec l'isolant.

[0099] La figure 22 propose de réaliser une cavité ou un évidement 120 dans l'isolant afin d'amplifier le phénomène de dépolarisation. L'anode 106 présente également une section croissante à son extrémité, au niveau de l'évidement 120. Ainsi, dans l'évidement, la section finale de l'anode 106 est supérieure à sa section intermédiaire. On crée ainsi axialement un vide 121 entre l'extrémité de l'anode et l'isolant 100, qui amplifie localement le champ électrique.

[0100] De façon générale, les variantes visant à éviter la formation d'un arc direct entre les électrodes fonctionnent de façon optimale en combinaison avec l'excitation radiofréquence. L'excitation radiofréquence permet en effet de rallonger et de courber la trajectoire des étincelles.

[0101] Les figures 23 à 25 présentent des exemples de bougies à effet de pointe caractérisées par une partie d'anode pointue faisant saillie axialement par rapport à une extrémité axiale de l'isolant et par rapport à la cathode.

[0102] La figure 23 représente un mode de réalisation préférentiel d'une tête de bougie à effet de pointe. L'anode 106 est constituée d'une âme 1061 et d'une gaine 1062. L'âme 1061 est par exemple réalisée en cuivre afin de favoriser l'évacuation de la chaleur le long de l'anode 106. On réduit ainsi l'érosion électrochimique de l'extrémité de l'anode. La gaine 1062 peut être réalisée en tout matériau approprié, tel que du nickel.

[0103] La figure 24 représente plusieurs exemples de têtes de bougies à effet de pointe. Ces bougies présentent ainsi une électrode de masse 103 en retrait axial par rapport à l'isolant 100, afin de réduire l'effet capacitif. L'extrémité saillante de l'anode 106 présente également une forme pointue.

[0104] Les exemples 24.II à 24.IV présentent chacun une cathode 103 formant un retrait axial 122 à proximité de l'isolant 100. Ce retrait 122 présente en outre une forme arrondie. On augmente ainsi la capacité de la bougie à générer une étincelle ramifiée. On réduit en effet la probabilité qu'un plasma se propage uniquement à la surface de l'isolant. Le plasma a ainsi tendance à se répartir dans un volume distant de la surface de l'isolant 100.

[0105] Les exemples 24.III et 24.IV présentent un isolant 100 dont l'extrémité présente une forme arrondie 123, afin de réduire ses contraintes internes. Ces contraintes sont liées aux niveaux élevés des champs électriques et des gradients de température à proximité de l'extrémité de l'isolant 100.

[0106] L'exemple de la figure 24.IV comprend une anode 106 dont l'extrémité axiale 1063 présente plusieurs pointes. On génère ainsi un plus grand nombre d'étincelles lors de l'excitation et on répartit l'érosion de

l'anode 106 sur l'ensemble des pointes utilisées.

[0107] Les bougies à effet de pointe peuvent accidentellement générer des arcs électriques entre l'anode 106 et le piston, lorsque la distance entre le piston et la tête de bougie est faible. Ces arcs érodent prématurément la pointe de l'anode 106 et empêchent la formation du plasma de volume ou du plasma ramifié. La tête de bougie de la figure 25 présente ainsi une solution à ce problème. La pointe de l'anode 106 est ainsi disposée dans un lamage 124 ménagé dans l'isolant 100. Afin de réduire le champ électrique à l'interface entre l'anode 106 et l'isolant 100, on prévoit de préférence un lamage et une anode de formes cylindriques et présentant des diamètres dont le rapport est égal au nombre d'Euler. On prévoit ainsi de préférence que le rapport de leur diamètre soit compris entre 2,45 et 3. A la figure 25, on distingue également que l'isolant 100 fait saillie axialement par rapport à la pointe de l'anode 106. L'isolant 100 présente également un bord 125 saillant axialement par rapport à la cathode 103.

[0108] Les figures 26 et 27 illustrent des têtes de bougies à barrières diélectriques qu'on désignera par la suite par bougies borgnes. Au niveau de la tête de bougie, l'anode 106 est intégralement recouverte par l'isolant 100. De telles bougies permettent notamment d'éliminer la formation d'un arc électrique entre l'anode et un piston, et d'éliminer l'érosion de l'anode. La durée de vie de la bougie est ainsi très fortement augmentée, et peut égaler la durée de vie d'un moteur thermique sans nécessiter d'entretien. De telles bougies fonctionnent uniquement du fait du caractère capacitif de l'isolant 100.

[0109] Le fonctionnement d'une bougie borgne est rendu possible par l'utilisation de l'excitation radiofréquence. L'application d'une excitation radiofréquence entre les électrodes d'une bougie borgne est en outre particulièrement avantageuse. L'excitation des électrodes forme des charges d'espace sur la surface extérieure de l'isolant. L'isolant 100 se comporte alors comme une anode et un plasma de volume ou un plasma ramifié est généré à sa surface. Bien que l'isolant présente une charge relativement réduite, l'excitation radiofréquence permet de générer un très grand nombre d'étincelles à la surface de l'isolant en un temps très réduit. On peut prévoir dans cette variante que l'isolant 100 forme le condensateur du résonateur. On réduit ainsi l'énergie dissipée dans la bougie.

[0110] Selon une variante illustrée à la figure 27, on peut également envisager d'utiliser une culasse de moteur thermique comme électrode de masse. Le coût et la complexité de la bougie peuvent ainsi être fortement réduits. Dans la bougie borgne de la figure 27, la cathode est constituée par la culasse.

[0111] On peut également intégrer la bougie dans la culasse du moteur thermique, en utilisant encore la culasse comme cathode de la bougie. L'homme de métier prendra alors toute mesure adéquate pour que la durée de vie de la bougie soit au moins égale à la durée de vie du moteur thermique.

[0112] Par ailleurs, bien que les têtes des bougies représentées présentent une symétrie de révolution autour de leur axe, on peut également prévoir des têtes de bougie présentant d'autres géométries, dans le cadre de l'invention.

Revendications

1. Bougie (110) comprenant:
 - deux électrodes de génération de plasma (103, 106),
 - un résonateur série (61) présentant une fréquence de résonance supérieure à 1MHz et comprenant :
 - un condensateur (111) muni de deux bornes, les électrodes étant connectées aux bornes respectives du condensateur ; et
 - un bobinage inductif (112), le condensateur et le bobinage étant disposés en série ;
 - la bougie étant **caractérisée en ce que** :
 - parmi lesdites électrodes, une première électrode forme un culot de la bougie et est connectée à la masse, une deuxième électrode étant une anode;
 - la bougie comprend en outre une pièce en matériau diélectrique séparant les extrémités libres des électrodes.
2. Bougie selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** le résonateur série comprend un unique bobinage inductif (112).
3. Bougie selon la revendication 2, **caractérisée en ce que** le bobinage inductif présente un axe et est constitué d'une pluralité de spires superposées suivant cet axe.
4. Bougie selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce qu'**elle comprend en outre une sonde (139) de mesure du courant traversant le bobinage comprenant un enroulement entourant radialement le bobinage.
5. Bougie selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce qu'**elle comprend en outre un blindage (132) connecté à une masse et entourant le bobinage inductif (112).
6. Bougie selon la revendication 5, **caractérisée en ce que** le blindage et la bobine inductive ont globalement une forme cylindrique et **en ce que** le rapport entre leur diamètre respectif est compris entre 2,45 et 3.
7. Bougie selon la revendication 5 ou 6, **caractérisée en ce que** le blindage et la bobine inductive sont séparés par un manchon d'isolation (133) en un matériau présentant un coefficient diélectrique supérieur à 1.
8. Bougie selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, **caractérisée en ce que** la surface extérieure (132) du manchon d'isolation est métallisée et constitue le blindage.
9. Bougie selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, **caractérisé en ce que** le blindage comprend une boucle conductrice.
10. Bougie selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le bobinage inductif (112) est enroulé autour d'un élément plein (134) constitué d'un matériau présentant un coefficient diélectrique supérieur à 3.
11. Bougie selon la revendication 7 ou la revendication 10, **caractérisée en ce qu'**un desdits matériaux d'isolation présente une tension de claquage supérieure à 20 kV/mm.
12. Système selon les revendications 9 et 11, **caractérisé en ce que** ladite capacité série est formée par des capacités parasites et par un condensateur disposés à l'intérieur de la bougie.
13. Système selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** l'inductance série est disposée à l'intérieur de la bougie.
14. Système selon l'une des revendications 11 à 13, **caractérisé en ce que** l'amplificateur (5) est un amplificateur en classe E à commutation déphasée.
15. Système selon la revendication 14, **caractérisé en ce que** l'amplificateur présente un interrupteur (51) et une boucle d'asservissement de l'interrupteur sur l'intensité traversant le résonateur.
16. Système selon l'une quelconque des revendications 11 à 15, **caractérisé en ce que** l'alimentation (3) est une alimentation en tension continue à 42V.
17. Procédé de génération de plasma entre deux électrodes (106, 103) séparées par un matériau diélectrique (100), le procédé comprenant une étape d'application d'une tension alternative présentant une fréquence supérieure à 1 MHz et une amplitude entre crêtes supérieure à 5 KV entre les électrodes.
18. Procédé de génération de plasma selon la revendication

cation 17, **caractérisé en ce que** ladite tension est appliquée entre des électrodes plongées dans un mélange de carburant présentant une densité supérieure à $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L, entre 1,5 et 200 fois par secondes, avec un rapport cyclique d'application compris entre 10 et 1000. 5

19. Procédé selon la revendication 18, **caractérisé en ce que** la tension est appliquée entre les électrodes d'une bougie à étincelle de surface. 10

20. Procédé selon la revendication 19, **caractérisé en ce que** la tension est appliquée entre les électrodes d'une bougie à effet de pointe. 15

20

25

30

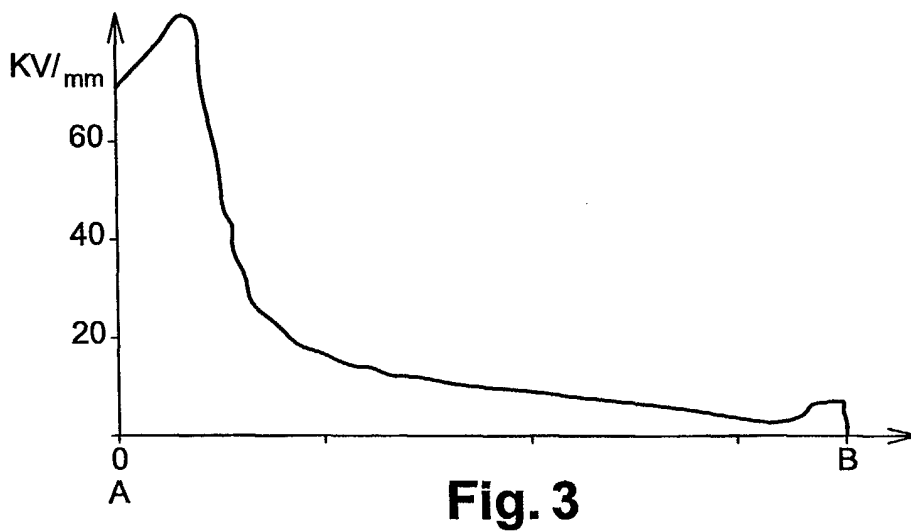
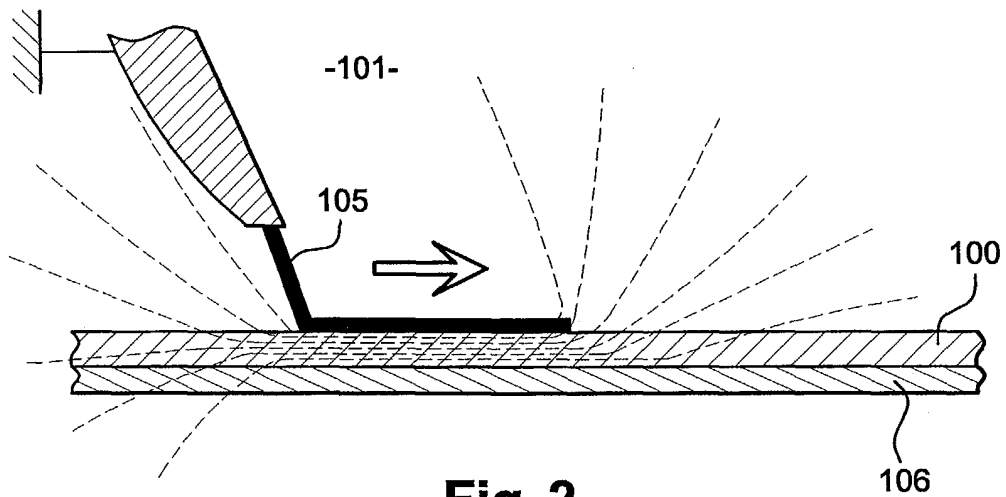
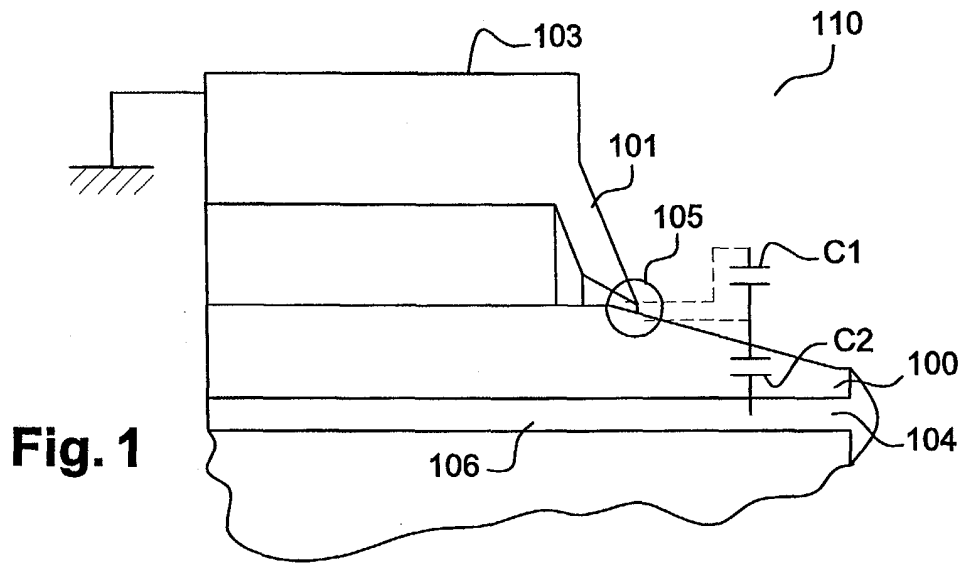
35

40

45

50

55



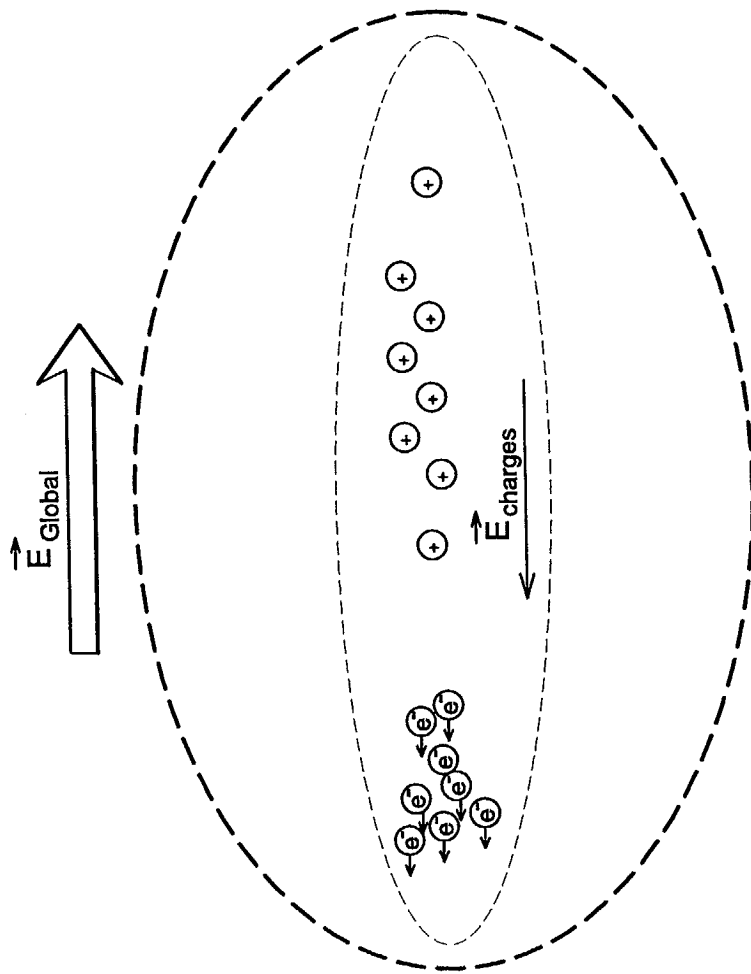


Fig. 4

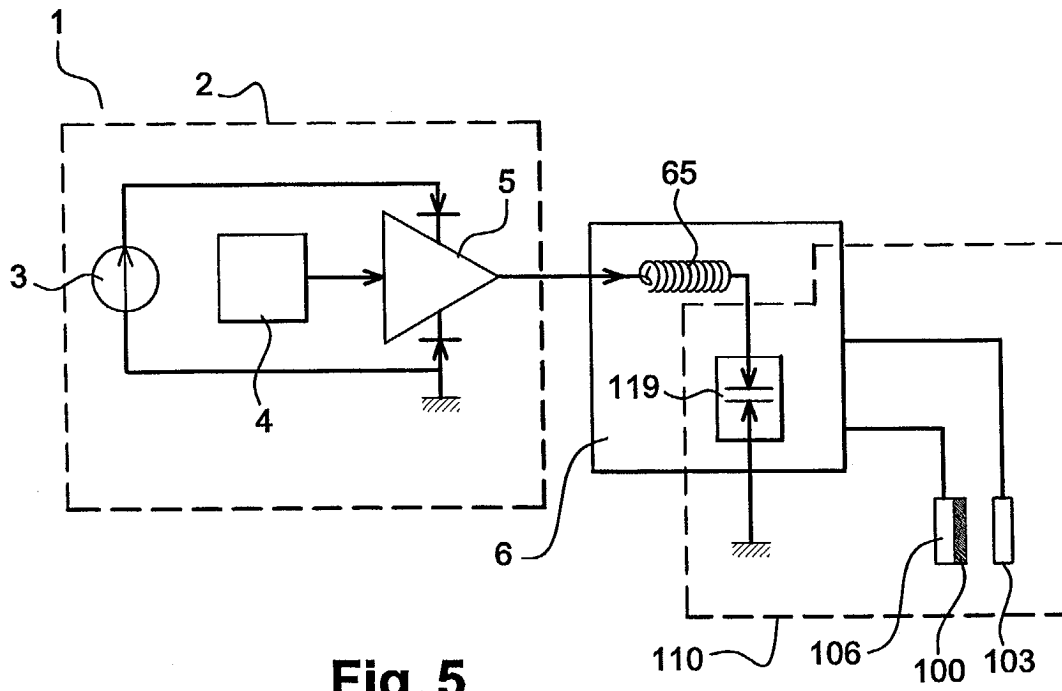


Fig. 5

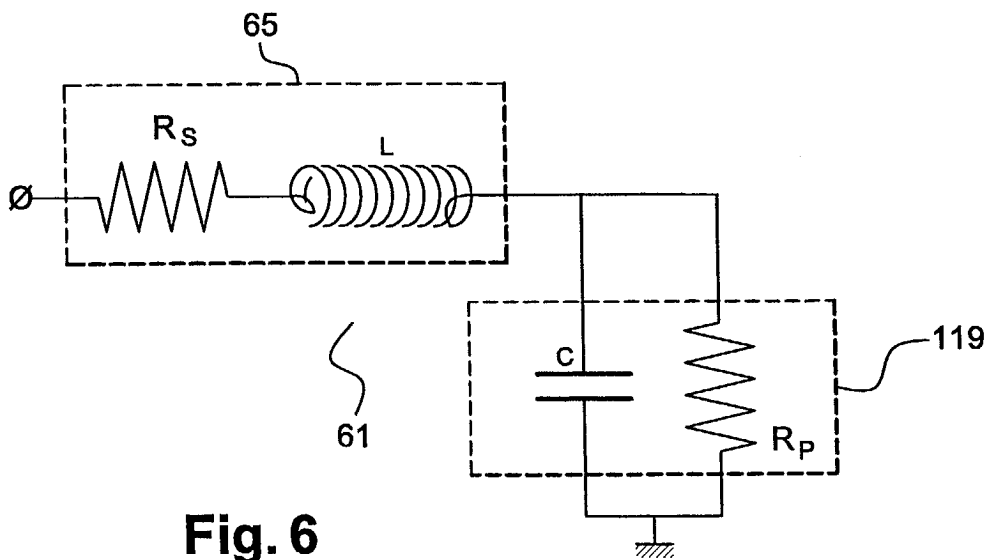


Fig. 6

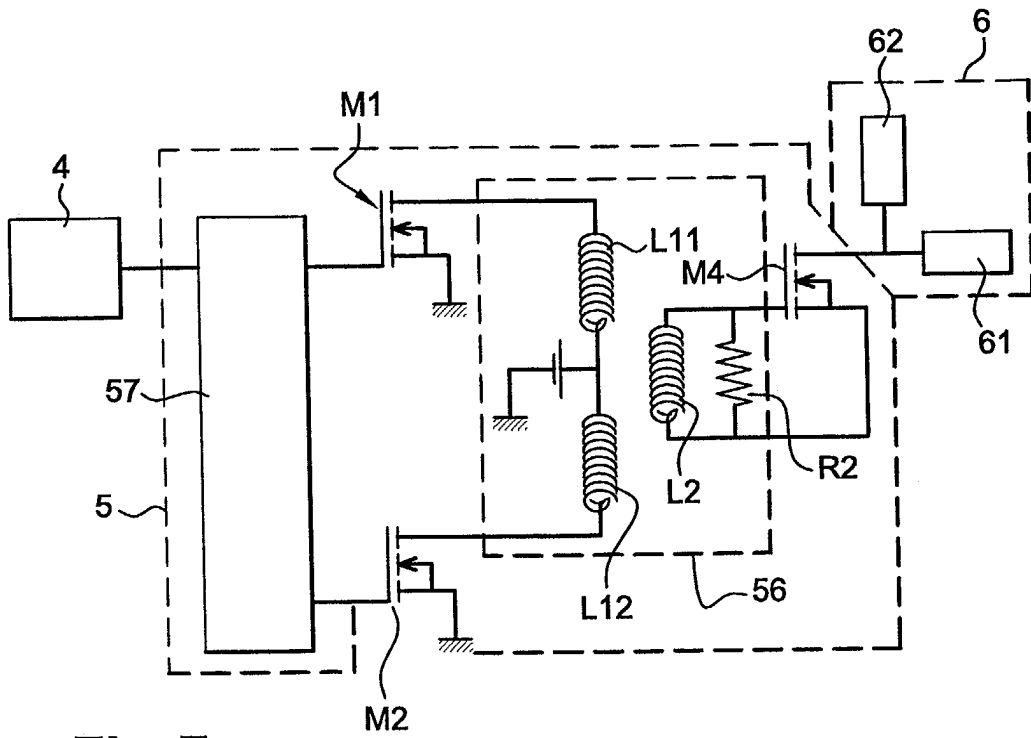


Fig. 7

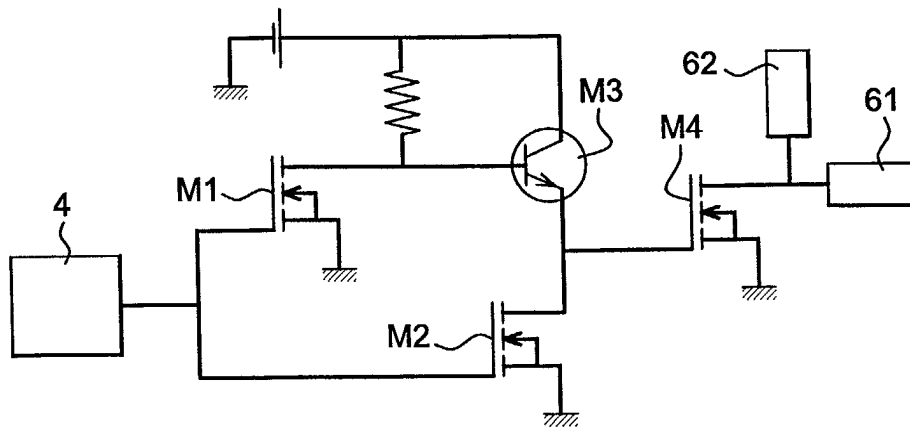


Fig. 8

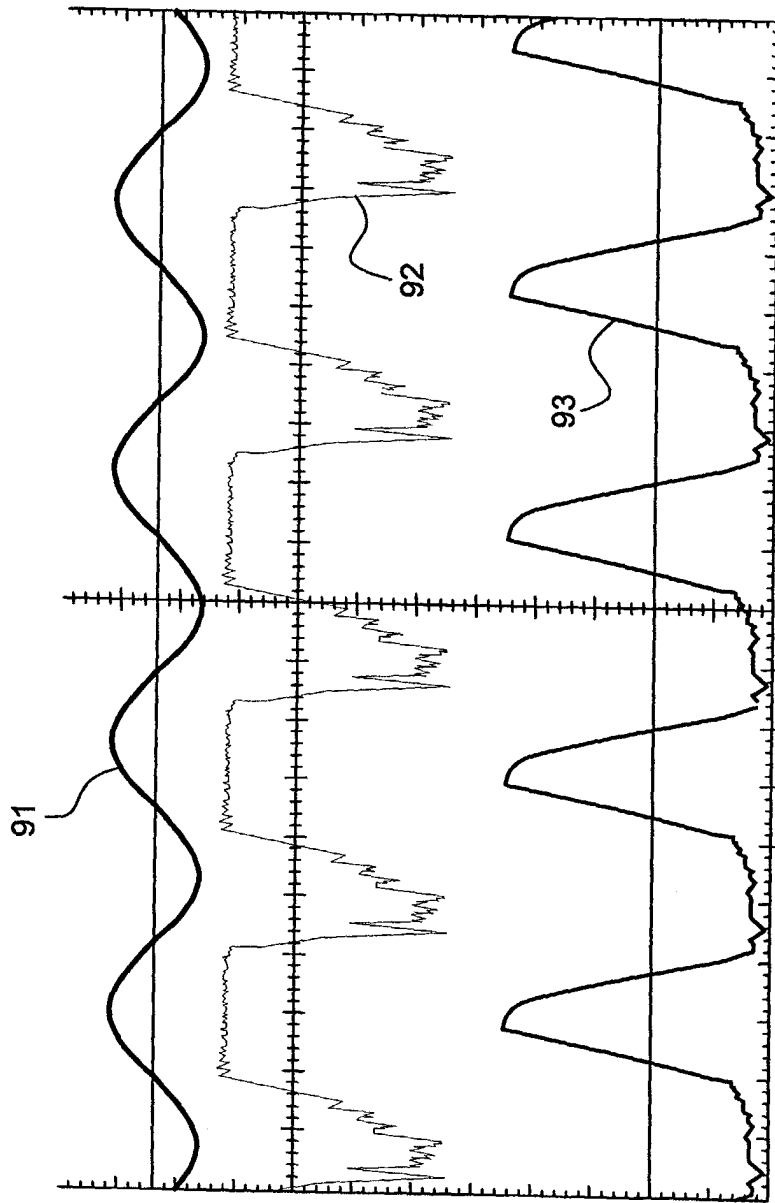


Fig. 9

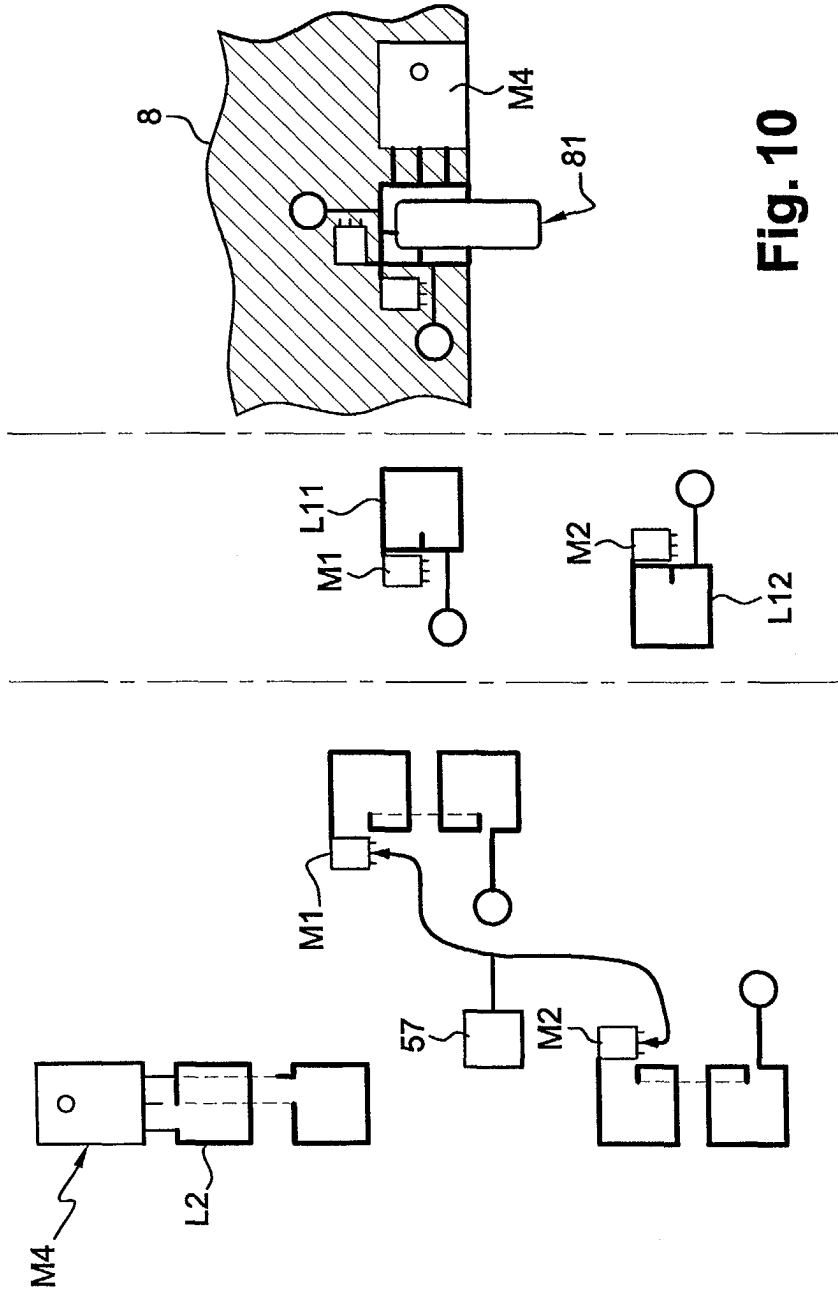


Fig. 10

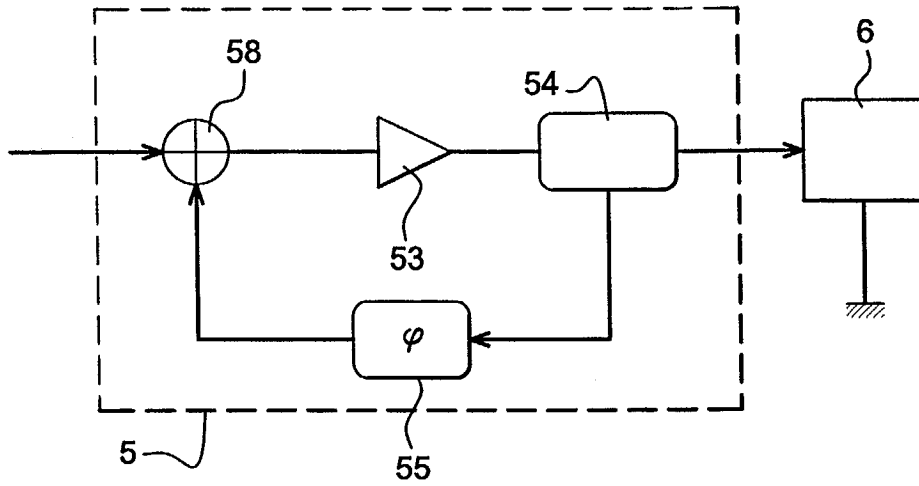


Fig. 11

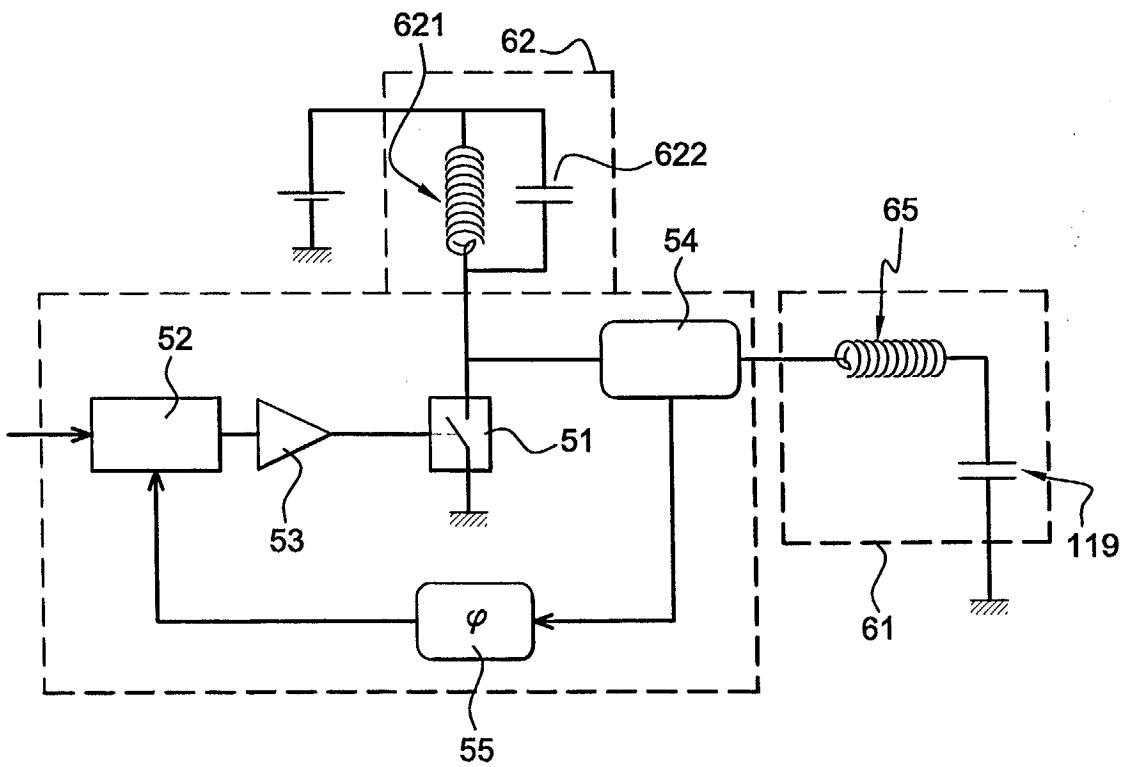


Fig. 12

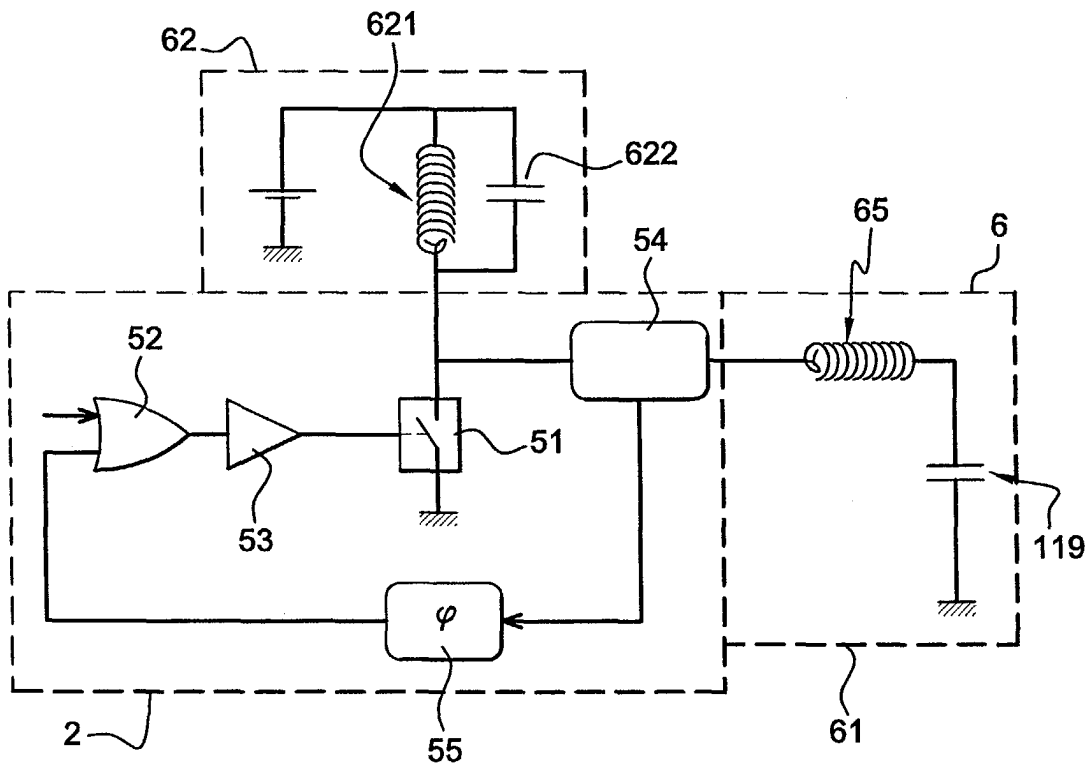


Fig. 13

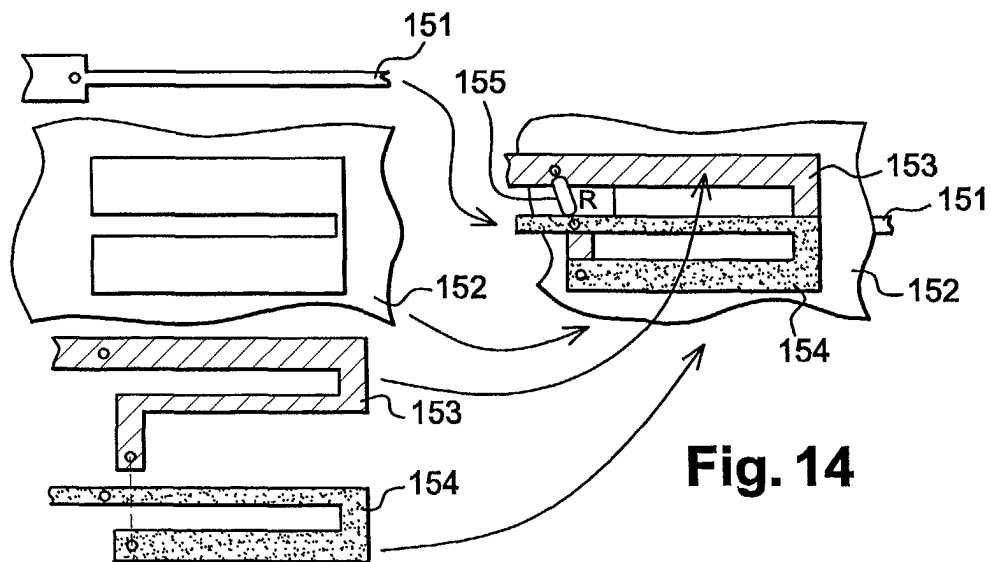
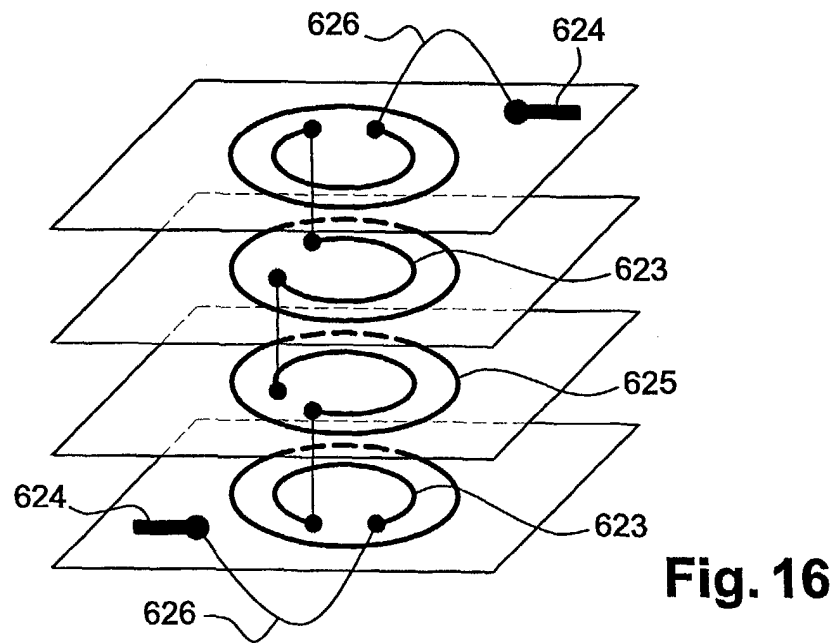
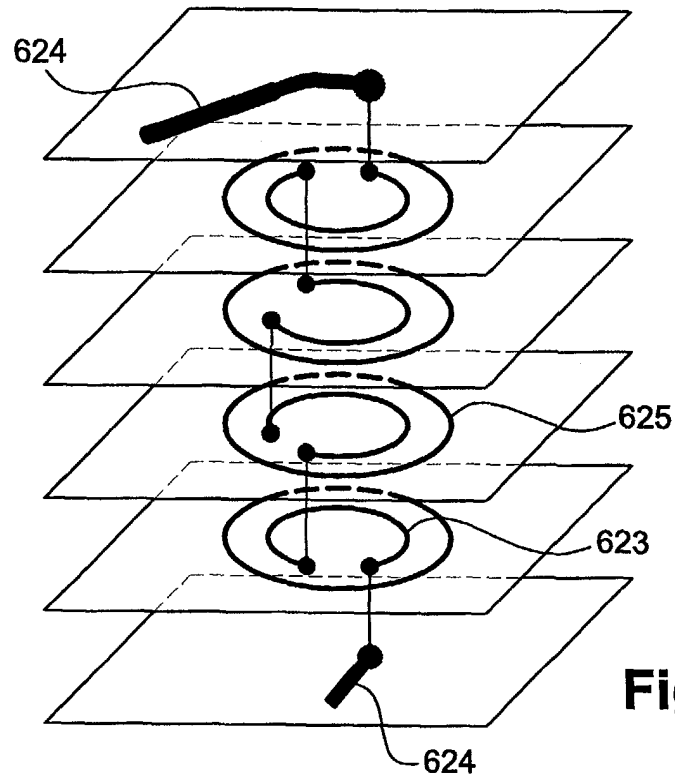


Fig. 14



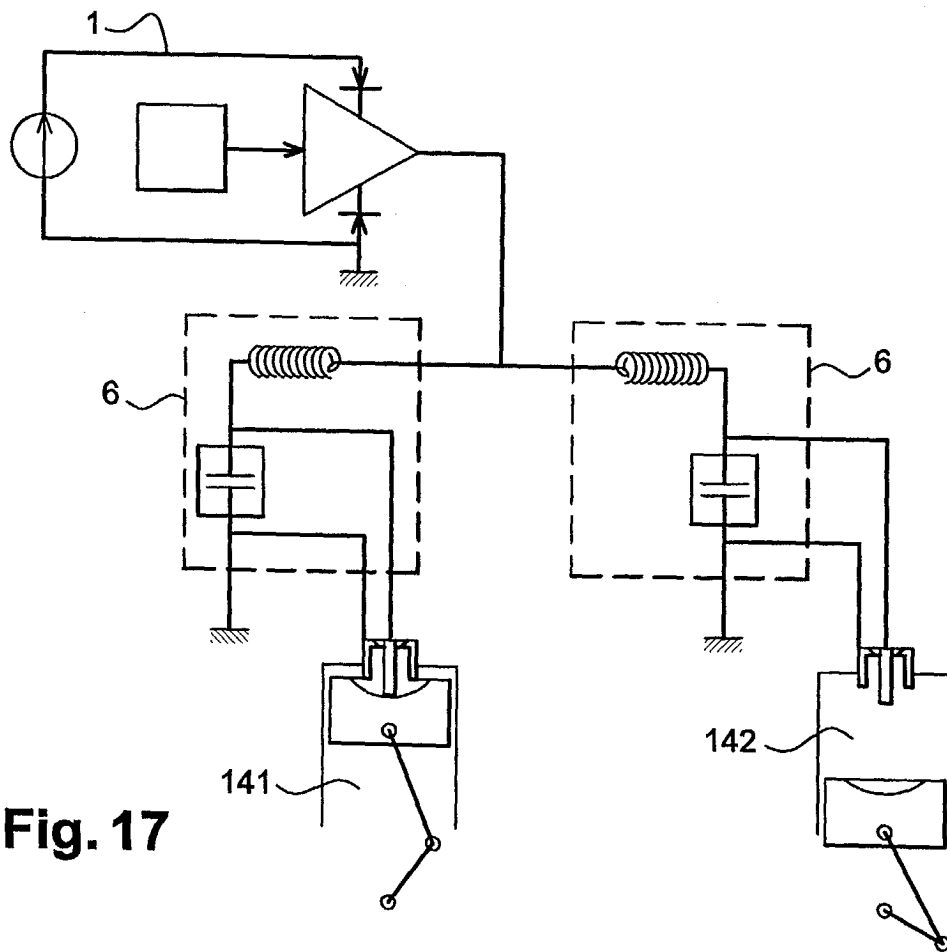


Fig. 17

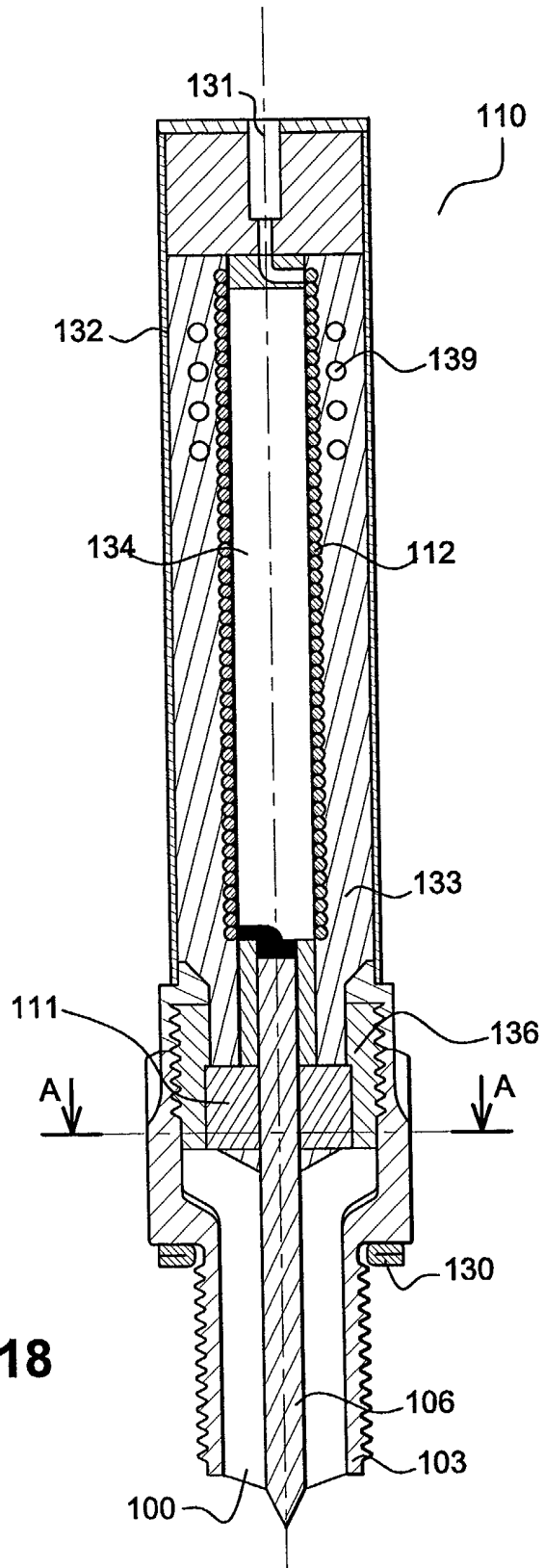


Fig. 18

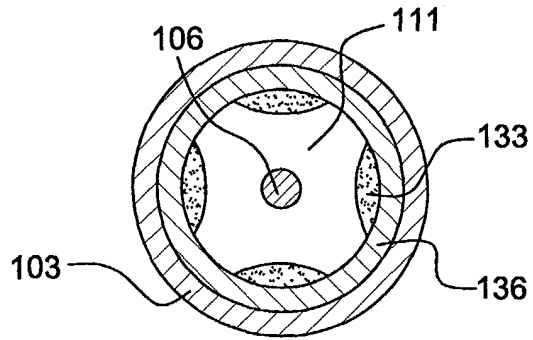


Fig. 19
COUPE A-A

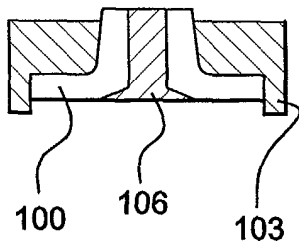


Fig. 20- I

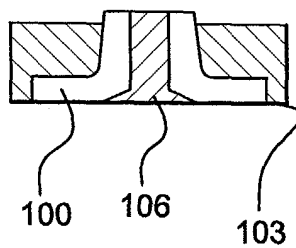


Fig. 20- II

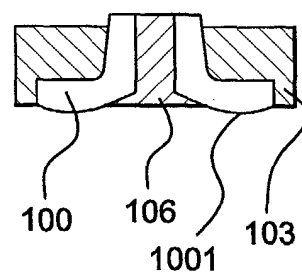


Fig. 20- III

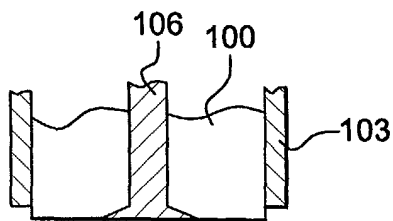


Fig. 21

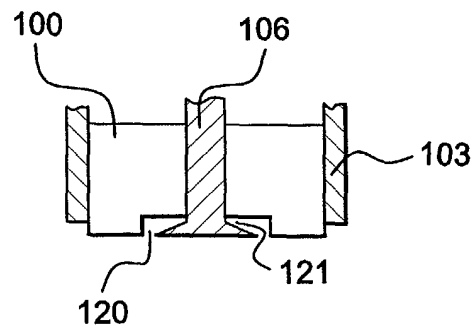


Fig. 22

