



(11) **EP 1 531 267 A2**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
18.05.2005 Bulletin 2005/20

(51) Int Cl.7: **F04B 37/06**, F04B 49/06,
F04B 43/04

(21) Numéro de dépôt: **04292591.7**

(22) Date de dépôt: **02.11.2004**

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

(72) Inventeurs:
• **Bernard, Roland**
74540 Viuz-la-Chiesaz (FR)
• **Kambara, Hisanori**
74350 Villy-le-Pelloux (FR)

(30) Priorité: **04.11.2003 FR 0312894**

(74) Mandataire: **Sciaux, Edmond**
COMPAGNIE FINANCIERE ALCATEL
Département Propriété Industrielle
54, rue La Boétie
75008 Paris (FR)

(54) **Dispositif de pompage par micropompes à transpiration thermique**

(57) Un dispositif de pompage par micropompes à transpiration thermique selon l'invention comprend une pluralité de micropompes élémentaires à transpiration thermique qui sont réparties, sur un substrat (5) en une pluralité de lignes (A, B, C ... D) composées chacune d'une pluralité de micropompes (1, 6 ... 7, 8, 9) constituant ainsi une pluralité de colonnes (a, b ... c, d). Les

éléments chauffants (4) respectifs de chaque micropompe à transpiration thermique sont pilotés chacun par la commande appropriée d'un conducteur de commande de ligne (10A) et d'un conducteur de commande de colonne (11a). On réalise ainsi une grande simplification par la commande multiplexée d'un grand nombre de micropompes élémentaires, permettant d'adapter les capacités de pompage.

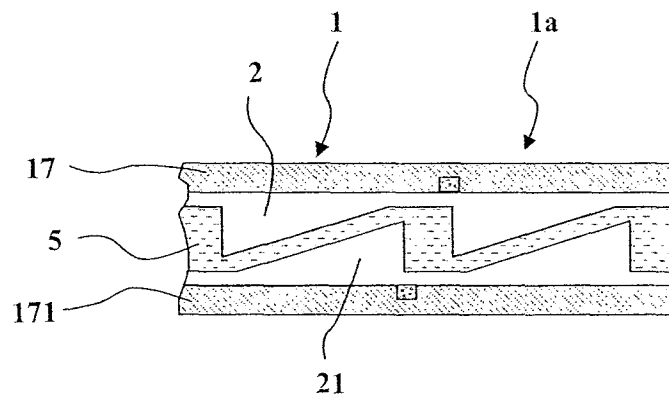


FIG. 12

Description

[0001] La présente invention concerne les dispositifs de pompage par micropompes à transpiration thermique permettant de générer et de maintenir des pressions gazeuses faibles dans des enceintes de faible volume.

[0002] Dans l'industrie du semi-conducteur, par exemple, des systèmes de manutention de substrats sont actuellement utilisés pour isoler ces substrats et éviter leur contact avec des agents contaminants qui, même en faible quantité, sont encore présents dans les salles blanches. On a notamment imaginé d'introduire chaque substrat dans un boîtier dont l'atmosphère intérieure est maintenue à faible pression par une micropompe, réalisant un ensemble autonome portable.

[0003] Ces micropompes doivent être de très petite taille, et elles doivent présenter une capacité appropriée de génération de vide, ou au moins de conservation de vide. C'est-à-dire qu'elles doivent être capables de produire un taux de compression suffisant, et un débit gazeux suffisant.

[0004] On a également imaginé d'utiliser, comme micropompe, un réseau de micropompes fonctionnant par effet de transpiration thermique.

[0005] Selon l'effet de transpiration thermique, mis en évidence par Knudsen dans les années 1900, lorsque deux grands volumes sont reliés par un canal de dimension transversale très faible, dont le rayon est inférieur au libre parcours moyen des molécules gazeuses présentes, et lorsque les extrémités du canal sont à des températures différentes, une différence de pression s'établit entre les deux grands volumes. Dans le canal de petite dimension, les molécules se déplacent selon un régime moléculaire, et il en résulte que les pressions diffèrent aux deux extrémités du canal par suite de la différence des températures. En régime moléculaire, lorsque l'équilibre thermique est atteint, les pressions aux deux extrémités du canal sont telles que le rapport est égal à la racine carrée du rapport des températures correspondantes.

[0006] Lorsque les molécules atteignent le grand volume adjacent à l'extrémité chaude du canal, leur déplacement ne suit plus le régime moléculaire, mais suit le régime d'un milieu visqueux. De la sorte, à l'extrémité chaude du canal, les molécules s'échappent du canal et pénètrent dans le grand volume adjacent, et ne retournent pas dans le canal. Cela produit un effet de pompage, selon le taux de compression pouvant atteindre la racine carrée du rapport des températures.

[0007] On sait qu'un taux de compression significatif peut être réalisé en connectant aérauliquement un grand nombre d'étages de micropompes à transpiration thermique. En théorie, le taux de compression globale de N étages est le produit des N taux de compression individuels.

[0008] Ces micropompes nécessitent de réaliser des canaux dont les dimensions sont suffisamment petites

pour être comparables avec le libre parcours moyen des molécules gazeuses à comprimer. Le libre parcours moyen des molécules augmentant lorsque la pression diminue, on comprend que les canaux pourront être d'autant plus gros que la pression régnant à l'intérieur de la pompe est faible. Dans le domaine des pressions que l'on rencontre dans l'industrie des semi-conducteurs pour la manutention de substrats, le libre parcours moyen des molécules est de l'ordre de quelques microns. Il devient alors possible de réaliser des canaux de dimension satisfaisante grâce à la technologie des systèmes mécaniques microélectroniques (MEMS). Les canaux et cavités peuvent être réalisés par une gravure profonde sur la surface d'une plaquette de semi-conducteur. Les cavités sont ensuite fermées par une plaque de verre appliquée de manière étanche sur la surface de la plaquette de semi-conducteur.

[0009] Mais on rencontre plusieurs problèmes pour obtenir des taux de compression suffisants, et des débits suffisants, compatibles avec les applications envisagées. En effet, il faut pour cela combiner un grand nombre de micropompes à transpiration thermique connectées aérauliquement les unes aux autres, et alimentées électriquement pour échauffer l'une des extrémités de chaque canal reliant les cavités successives. Or on a besoin d'adapter les capacités de pompage en fonction des conditions d'utilisation.

[0010] A cet égard, de façon classique, la pression dans une chambre ou dans une enceinte de mini-environnement est commandée en prévoyant une vanne de régulation mécanique à l'entrée de la pompe, pour adapter la conductance de la canalisation en fonction de conditions de pompage que l'on veut obtenir. Cette structure a l'inconvénient d'ajouter un élément au système, et les pièces mécaniques en mouvement qui composent la vanne peuvent générer des contaminations néfastes à cause de la friction entre les pièces mécaniques.

[0011] Un dispositif de pompage par micropompes à transpiration thermique permet alors d'éviter ces inconvénients, à condition de pouvoir commander les capacités de pompage du dispositif.

[0012] Un premier problème est alors d'alimenter et de piloter de façon simple et efficace les cellules élémentaires de micropompes à transpiration thermique, d'une façon qui permette de commander les capacités de pompage sans ajout d'une vanne de régulation.

[0013] La multiplication du nombre de micropompes élémentaires connectées dans le dispositif nécessite des moyens particuliers de commande, permettant la gestion aisée de l'ensemble des micropompes élémentaires.

[0014] L'invention vise pour cela à réaliser une commande particulièrement simple et efficace d'un dispositif composé d'un grand nombre de micropompes, afin de piloter la fonction générale de pompage des micropompes élémentaires sans ajout d'une vanne de régulation.

[0015] Il faut à la fois piloter le débit des micropompes,

et le taux de compression du dispositif, de façon à piloter la pression d'un mini-environnement auquel est raccordé le dispositif de pompage.

[0016] Un second problème est lié à la réalisation de la source chaude à l'une des extrémités de chaque canal reliant deux cavités successives. On comprend que le taux de compression est directement lié à l'efficacité de cette source chaude, qui détermine le rapport des températures aux deux extrémités du canal.

[0017] Dans une configuration habituelle, la source chaude d'une micropompe à transpiration thermique est réalisée en intégrant, dans la plaque de verre supérieure, un élément chauffant en forme de barreau parallélépipédique de matériau résistif, constituant une résistance électrique que l'on peut alimenter par une source d'énergie extérieure.

[0018] Le problème est que, pour obtenir une température appropriée à l'entrée du canal, c'est-à-dire à la frontière avec la cavité adjacente de la micropompe, l'élément chauffant en forme de barreau doit réaliser une température nettement supérieure dans la zone centrale du barreau, car la température décroît lorsqu'on s'approche de l'extrémité du barreau qui est adjacente à l'entrée du canal.

[0019] Il en résulte non seulement une augmentation excessive de la consommation d'énergie, mais également un risque de dégradation des matériaux au voisinage de la zone centrale de l'élément chauffant.

[0020] A l'inverse, si l'on veut réduire le risque de dégradation dans la zone centrale de l'élément chauffant, la température de la source chaude à la frontière entre le canal et la cavité adjacente de la micropompe est insuffisante, et l'efficacité de la pompe se trouve diminuée.

[0021] Un autre aspect de l'invention est ainsi d'augmenter l'efficacité des micropompes tout en réduisant le risque de dégradation dû à un excès de température dans la zone centrale des sources chaudes de la micropompe.

[0022] Simultanément, selon cet autre aspect, l'invention vise à réaliser une efficacité optimale de la micropompe tout en réduisant la consommation d'énergie.

[0023] Un troisième problème est que la multiplication nécessaire du nombre des micropompes élémentaires conduit à augmenter proportionnellement le volume total occupé par le dispositif de pompage.

[0024] Avec des cavités de forme parallélépipédique, telles qu'imaginées jusqu'à présent, le volume total du dispositif de pompage peut devenir excessif par rapport à la place disponible dans les applications envisagées.

[0025] Selon un autre aspect, l'invention vise donc à réduire le volume global du dispositif de pompage, pour un nombre donné de micropompes élémentaires à transpiration thermique.

[0026] Pour piloter de façon simple et efficace un dispositif de pompage à grand nombre de micropompes élémentaires à transpiration thermique, l'invention propose un dispositif de pompage par micropompes à

transpiration thermique, dans lequel :

- les micropompes à transpiration thermique comprennent chacune au moins une cavité ayant une entrée raccordée à un canal d'entrée de petite section transversale, et ayant une sortie raccordée à un canal de sortie, et comprennent un élément chauffant pour chauffer le tronçon de canal d'entrée adjacent à la cavité, une pluralité de telles micropompes étant connectées aérauliquement en série,
- les micropompes sont réparties, sur un substrat, en une pluralité de lignes composées chacune d'une pluralité de micropompes constituant ainsi une pluralité de colonnes,
- les éléments chauffants respectifs des micropompes sont pilotés chacun par la commande appropriée d'un conducteur de commande de ligne et d'un conducteur de commande de colonne.

[0027] En pratique, on peut prévoir que les conducteurs de commande de ligne sont accessibles pour la connexion électrique selon un premier bord du substrat, et les conducteurs de commande de colonne sont accessibles pour la connexion électrique selon un second bord du substrat.

[0028] Grâce à cette disposition en matrice des micropompes élémentaires, on peut avantageusement prévoir des moyens de commande qui pilotent sélectivement les conducteurs de commande de ligne et les conducteurs de commande de colonne, de façon à piloter individuellement chaque micropompe individuelle du réseau de micropompes.

[0029] Divers circuits d'interface peuvent être utilisés entre les conducteurs de commande de ligne et les conducteurs de commande de colonne pour alimenter de façon distincte un élément chauffant de la micropompe placée à l'intersection de la ligne et de la colonne.

[0030] Par exemple, dans le cas où chaque élément chauffant est de type résistance électrique, l'élément chauffant peut être connecté aux bornes d'une alimentation électrique en série avec un transistor lui-même piloté par une porte ET dont les entrées sont connectées respectivement à un conducteur de commande de ligne correspondant et à un conducteur de commande de colonne correspondant. L'alimentation simultanée du conducteur de commande de ligne et du conducteur de commande de colonne assure le déblocage du transistor pour alimenter l'élément chauffant.

[0031] En alternative, on peut avantageusement prévoir que chaque élément chauffant est commandé par une bascule bistable elle-même agencée pour basculer à réception simultanée de signaux impulsionnels de commande provenant d'un conducteur de commande de ligne correspondant et d'un conducteur de commande de colonne correspondant.

[0032] Pour obtenir un fort taux de compression, on peut connecter toute les micropompes élémentaires en série les unes derrière les autres.

[0033] Il peut toutefois être avantageux d'obtenir simultanément un débit volumique suffisant. Dans ce cas, on peut prévoir qu'une ou plusieurs lignes de micropompes sont connectées aérauliquement en série pour constituer un sous-ensemble série, et plusieurs sous-ensembles série peuvent être connectés aérauliquement en parallèle.

[0034] Dans le but d'augmenter l'efficacité des micropompes individuelles tout en réduisant le risque de dégradation thermique, et tout en réduisant la consommation d'énergie, un dispositif de pompage selon l'invention peut utiliser des micropompes individuelles à transpiration thermique dans lesquelles l'élément chauffant est agencé pour éviter une surchauffe de certaines zones du tronçon de canal devant être chauffé, en réalisant une distribution de température sensiblement régulière selon la longueur du tronçon de canal devant être chauffé.

[0035] En pratique, on peut prévoir que certaines au moins des micropompes ont un élément chauffant agencé pour répartir de manière équitable l'échauffement selon la longueur du tronçon de canal devant être chauffé, de façon à réaliser une distribution de température sensiblement régulière selon la longueur de tronçon de canal devant être chauffé.

[0036] Selon un premier mode de réalisation, l'élément chauffant est de type résistance électrique et comprend au moins deux zones conductrices du courant électrique placées en deux zones successives longitudinalement espacées l'une de l'autre dans le tronçon de canal devant être chauffé.

[0037] Selon un second mode de réalisation, l'élément chauffant de type résistance électrique est une plage résistive comportant un trou central.

[0038] Selon un troisième mode de réalisation, l'élément chauffant est de type résistance électrique en forme de cordon chauffant enroulé en double spirale plate.

[0039] En alternative ou en complément de tous ces modes de réalisation, l'élément chauffant peut avantageusement être la zone chauffante d'un élément à effet Peltier.

[0040] Pour résoudre le troisième problème, c'est-à-dire dans le but de réduire le volume total du dispositif de pompage à micropompes à transpiration thermique, l'invention propose d'augmenter l'intégration des cavités.

[0041] Une première idée consiste alors à donner aux cavités une forme plus aisément intégrable, et à placer les cavités les unes par rapport aux autres d'une façon qui réduit leur encombrement total.

[0042] L'intégration peut tout d'abord être horizontale, par plusieurs lignes de micropompes côte à côte.

[0043] L'intégration peut, en alternative ou en complément, être verticale, par plusieurs couches de micropompes élémentaires.

[0044] Ainsi, l'invention propose de prévoir, dans le dispositif de pompage, que certaines au moins des micropompes ont une cavité dont la section va en se ré-

duisant depuis l'entrée vers la sortie, et en prévoyant que des cavités de formes similaires sont imbriquées tête bêche pour réduire leur encombrement commun en section transversale.

[0045] Avec de telles cavités à section variable, il faut toutefois s'assurer que la section transversale de la cavité, à son entrée, soit suffisamment grande pour que les molécules gazeuses perdent leur régime de déplacement de type moléculaire à la température élevée assurée par l'élément chauffant adjacent, et adoptent alors un régime de déplacement en milieu visqueux, et il faut s'assurer simultanément que les molécules conservent encore leur régime de déplacement en milieu visqueux à l'autre extrémité de la cavité dont la section est plus réduite mais dont la température est plus basse. L'invention met ainsi à profit la réduction progressive du libre parcours moyen des molécules lorsque la température décroît de l'entrée vers la sortie de la cavité, et réduit en conséquence la section transversale de la cavité, en s'assurant que la section transversale de la cavité reste en tout point considéré le long de sa longueur, suffisamment grande pour que les molécules gazeuses aient un régime de déplacement en milieu visqueux.

[0046] Selon un premier mode de réalisation, les cavités ont une épaisseur constante et une largeur qui va en décroissant depuis leur entrée vers leur sortie, et les cavités sont imbriquées côte à côte tête bêche pour réduire leur encombrement global dans la direction transversale.

[0047] En alternative ou en complément, l'épaisseur des cavités peut aller en décroissant depuis leur entrée vers leur sortie.

[0048] Une intégration multicouche peut être réalisée en prévoyant qu'une tranche de substrat est traitée sur ses deux faces pour réaliser deux couches de cavités.

[0049] De préférence, on prévoit alors que les deux couches de cavités ont des épaisseurs qui vont en décroissant depuis leur entrée vers leur sortie, et que les cavités sont imbriquées tête bêche dans l'épaisseur du substrat.

[0050] On comprendra que les moyens particuliers de commande, visant à réaliser un pilotage simple et efficace d'un grand nombre de micropompes, constituent une première invention qui peut être utilisée soit en combinaison, soit indépendamment des autres moyens décrits dans la présente demande de brevet.

[0051] De même, les moyens visant à augmenter l'efficacité des micropompes en réduisant le risque de dégradation thermique constituent une seconde invention qui peut être utilisée soit en combinaison, soit indépendamment des autres moyens décrits dans la présente demande de brevet.

[0052] Et enfin, les moyens visant à diminuer le volume total du dispositif de pompage constituent une troisième invention qui peut être utilisée soit en combinaison, soit indépendamment des autres moyens décrits dans la présente demande de brevet.

[0053] D'autres objets, caractéristiques et avantages

de la présente invention ressortiront de la description suivante de modes de réalisation particuliers, faite en relation avec les figures jointes, parmi lesquelles:

- la figure 1 illustre quatre micropompes élémentaires à transpiration thermique ;
- la figure 2 illustre un réseau de micropompes plus étendu, disposé selon une configuration matricielle sur un même substrat ;
- la figure 3 illustre un mode de réalisation possible d'une commande d'éléments chauffants de type résistance électrique pour une commande matricielle dans un réseau de la figure 2 ;
- la figure 4 illustre la répartition sinusoïdale de la température le long d'un tronçon de canal chauffé par un barreau parallélépipédique de matériau résistif ;
- la figure 5 illustre la répartition de température pour une structure de source chaude en forme de trois barreaux parallèles ;
- la figure 6 illustre une autre forme de source chaude à barreau parallélépipédique comportant un évidement central ;
- la figure 7 illustre une autre structure de source chaude en forme de cordon chauffant enroulé en double spirale plate ;
- la figure 8 illustre un mode de réalisation dans lequel les cavités ont une épaisseur constante mais une largeur qui va en décroissant depuis leur entrée vers leur sortie, avec une disposition tête bêche ;
- la figure 9 illustre les cavités de la figure 1, vues en coupe verticale selon le plan I-I de la figure 8 ;
- la figure 10 illustre, en coupe verticale, un mode de réalisation à substrat traité sur ses deux faces pour réaliser deux couches de cavités ;
- la figure 11 illustre un autre mode de réalisation dans lequel la profondeur des cavités varie de façon régulière en se réduisant depuis l'entrée vers la sortie ; et
- la figure 12 illustre l'imbrication possible de deux couches de cavités à profondeurs variables.

[0054] La figure 1 illustre quatre micropompes élémentaires, désignées par les références numériques respectives 1, 1a, 1b et 1c, qui sont constituées chacune, comme la micropompe 1, d'une cavité 2, d'un canal 3, et d'un élément chauffant 4 disposé au contact du canal 3 au voisinage de son raccordement à la cavité 2.

[0055] Le canal 3 constitue le canal d'entrée de la micropompe élémentaire 1, et se raccorde à l'entrée 2a de la cavité 2.

[0056] La cavité 2 comporte une sortie 2b qui est raccordée à un canal de sortie 3a qui constitue lui-même le canal d'entrée de la seconde micropompe élémentaire 1a.

[0057] Le canal d'entrée 3 présente une section transversale suffisamment petite pour que les molécules gazeuses qui le parcourent se déplacent selon un régime

moléculaire. Par contre, la cavité 2 présente une section transversale suffisamment grande pour que les molécules qu'elle contient se déplacent selon un régime de milieu visqueux.

[0058] Aux basses pressions auxquelles sont destinées à fonctionner les micropompes à transpiration thermique, le canal doit avoir une section de l'ordre de quelques microns. La cavité 2 peut avoir une section transversale de quelques dizaines de microns. De telles formes peuvent être réalisées dans un substrat en semi-conducteur par gravure, puis fermeture au moyen d'une plaque de verre appliquée sur le substrat gravé.

[0059] L'élément chauffant 4 peut être réalisé par exemple par un dépôt de nitrate de silicium avec des thermo oxydations, réalisé sur la plaque de verre.

[0060] La figure 2 illustre un réseau de micropompes plus étendu, réalisé dans un substrat 5 commun en semi-conducteur, par gravure du nombre satisfaisant de cavités et de canaux associés, avec des éléments chauffants correspondants placés à des endroits appropriés, c'est-à-dire adjacents aux entrées des cavités telles que la cavité 2.

[0061] On retrouve ainsi la micropompe 1, constituée de la cavité 2, du canal 3 et de l'élément chauffant 4.

[0062] Dans le substrat 5, on dispose le réseau de micropompes selon une multiplicité de lignes A, B, C ... D constituées chacune d'une série de plusieurs micropompes élémentaires telles que les micropompes 1, 6, 7, 8 et 9 de la ligne A, constituant ainsi des colonnes a, b ... c et d.

[0063] Chaque ligne A, B, C ... D est associée à un conducteur de commande de ligne respectif 10A, 10B, 10C ... 10D. Chaque colonne a, b ... c, d est associée à un conducteur de commande de colonne respectif 11a, 11b ... 11c, 11d.

[0064] Chaque élément chauffant tel que l'élément chauffant 4 de la micropompe 1 située à l'intersection de la ligne A et de la colonne a est commandé par la sollicitation simultanée du conducteur de commande de ligne 10A et du conducteur de commande de colonne 11a correspondants.

[0065] De préférence, les conducteurs de commande de ligne 10A, 10B, 10C, ... 10D sont accessibles pour une connexion selon un premier bord du substrat 5. De même, les conducteurs de commande de colonne 11a, 11b ... 11c et 11d sont accessibles pour une connexion selon un second bord du substrat 5.

[0066] Un dispositif de commande, non représenté sur les figures, peut alimenter sélectivement les conducteurs de commande de ligne 10A, 10B, 10C, ... 10D et les conducteurs de commande de colonne 11a, 11b ... 11c et 11d, pour piloter à volonté les éléments chauffants qui se situent aux intersections de chaque ligne et de chaque colonne. Cela permet de commander individuellement chaque micropompe élémentaire, de façon à donner au réseau de micropompes des propriétés voulues de taux de compression et de débit ou vitesse de pompage.

[0067] On peut envisager une commande multiplexée des éléments chauffants, en prévoyant par exemple, associé à chaque élément chauffant tel que l'élément chauffant 4, un circuit électronique de bascule bistable dont le basculement est commandé par l'alimentation impulsionnelle simultanée de la ligne de commande de ligne 10A et de la ligne de commande de colonne 11a. La bascule bistable commande alors l'alimentation électrique de l'élément chauffant 4 à partir d'une source extérieure d'énergie électrique.

[0068] Un mode de commande simplifié est illustré sur la figure 3. Dans ce cas, l'élément chauffant 4 est connecté en série, entre les bornes positive 12 et négative 13 d'une alimentation électrique, en série avec un transistor 14 dont la base 15 est connectée à la sortie d'une porte ET 16 dont les deux entrées sont connectées respectivement au conducteur de commande de ligne 10A et au conducteur de commande de colonne 11a. Le transistor 14 devient passant, pour alimenter l'élément chauffant 4, lorsque l'un et l'autre des conducteurs de commande de ligne 10A et de colonne 11a sont à un potentiel approprié pour produire le basculement de la porte ET 16 qui débloque le transistor 14.

[0069] La description qui précède, en relation avec les figures 1 à 3, a concerné les moyens de commande permettant de piloter de manière simple et efficace un réseau de nombreuses micropompes élémentaires à transpiration thermique.

[0070] On se réfère maintenant aux figures 4 à 7, qui illustrent les moyens pour améliorer l'efficacité des micropompes élémentaires.

[0071] La figure 4 illustre la distribution de température dans une source chaude de micropompe à transpiration thermique constituée d'un barreau 4 résistif parallélépipédique. La courbe en pointillés illustre la variation de la température, en ordonnées, en fonction de la position longitudinale considérée le long du canal, en abscisses.

[0072] Il apparaît que la température varie en fonction de la zone considérée du barreau de matériau résistif le long du canal 3 (figure 1) : la température n'est pas uniforme mais présente une distribution sinusoïdale, avec une augmentation lente au voisinage de l'extrémité amont 4a du barreau 4, puis une augmentation rapide jusqu'à un maximum M au centre 4c du barreau 4, suivie d'une diminution rapide elle-même suivie d'une diminution plus progressive au voisinage de l'extrémité aval 4b du barreau 4.

[0073] Cette répartition de température sinusoïdale résulte notamment d'une répartition généralement inégale du courant électrique qui se propage dans le barreau 4 selon une direction généralement perpendiculaire à l'axe longitudinal du canal. Le courant électrique choisit le chemin le plus court pour aller d'une borne à l'autre, et ce chemin le plus court passe essentiellement par le centre 4c du barreau 4, ce qui maximise la température centrale au sommet M.

[0074] Par contre, cette structure traditionnelle de

barreau parallélépipédique à section rectangulaire produit une température relativement réduite au voisinage de l'extrémité aval 4b du barreau 4, extrémité qui se trouve la plus proche de la cavité 2 qui suit.

[0075] Or l'élément déterminant pour obtenir un taux de compression maximum d'une pompe à transpiration thermique réside dans le rapport des températures à l'extrémité aval du canal 3, ou orifice d'entrée dans la cavité 2, et la température dans la cavité 2. On comprend donc que le barreau résistif à section rectangulaire de l'élément chauffant 4 illustré sur la figure 4 ne permet pas d'obtenir un rapport de température optimal, ou nécessite alors d'augmenter excessivement la température du sommet M au centre 4c du barreau 4.

[0076] L'idée selon l'invention est alors de modifier la répartition de température le long de l'élément chauffant, de façon que la température au voisinage de l'extrémité aval 4b de l'élément chauffant soit peu inférieure à la température en partie centrale et dans les autres parties de l'élément chauffant. On s'attend ainsi à ce que l'élément chauffant puisse produire une température plus élevée au voisinage de l'extrémité aval du canal 3, sans que cela nécessite d'augmenter pour autant la température dans les autres parties de l'élément chauffant. La consommation de puissance électrique peut ainsi être minimisée, et on évite les risques de dégradation des éléments par une température excessive au centre de l'élément chauffant.

[0077] Un premier mode de réalisation est illustré sur la figure 5 dans laquelle l'élément chauffant est formé par trois éléments chauffants successifs 41, 42, 43, placés en travers du canal 3 et décalés longitudinalement le long du canal. La figure 5 montre la répartition de température en présence des trois éléments chauffants 41, 42 et 43. On constate une meilleure régularité de la température en fonction de la zone longitudinale considérée du canal. Une variante peut consister à prévoir seulement deux éléments chauffants, réalisant un tronçon chauffant plus court dans le canal 3.

[0078] La figure 6 illustre un autre mode de réalisation d'élément chauffant 4, comportant une cavité centrale 4e dépourvue d'élément résistif, et favorisant ainsi le passage de courant électrique au voisinage des extrémités amont 4a et aval 4b de l'élément chauffant 4. On réduit ainsi la température atteinte au centre de l'élément chauffant 4.

[0079] La figure 7 montre une autre réalisation de l'élément chauffant 4, constitué d'une bande de matériau résistif enroulée en double spirale plate. On évite ainsi de favoriser le passage du courant électrique au centre de l'élément chauffant 4, ce qui réduit l'effet de surchauffe au centre de l'élément chauffant 4.

[0080] Dans tous ces modes de réalisation, l'élément chauffant 4 doit produire un échauffement sur une longueur suffisante du canal 3, afin d'assurer un contact satisfaisant avec les molécules de gaz qui transitent dans le canal. Il faut en effet que l'élément chauffant 4 puisse échauffer suffisamment les molécules pour

qu'elles s'agitent et présentent la température élevée appropriée avant d'entrer dans la cavité 2 qui suit. C'est la raison pour laquelle l'élément chauffant 4 ne peut pas avoir lui-même une longueur réduite, concentrée au voisinage immédiat de l'orifice d'entrée de la cavité 2, mais qu'il doit au contraire s'étendre en amont dans le canal 3 selon une longueur suffisante.

[0081] Dans la description qui précède, l'élément chauffant 4 a été décrit comme une résistance électrique.

[0082] En alternative, on peut prévoir que l'élément chauffant 4 est la partie chaude d'un couple à effet Peltier, tandis que l'élément refroidissant du couple à effet Peltier peut être placé en regard de la cavité 2 de la micropompe, ou en regard de la partie amont du canal 3.

[0083] On se réfère maintenant aux figures 8 à 12, qui illustrent les moyens permettant de réduire le volume global du dispositif de pompage à micropompes à transpiration thermique.

[0084] La figure 8 illustre un premier mode de réalisation dans lequel les cavités ont une épaisseur constante mais une largeur qui va en décroissant depuis leur entrée vers leur sortie. La figure montre ainsi quatre micropompes élémentaires 1, 1a, 1b et 1c, dans lesquelles on retrouve, comme dans le mode de réalisation de la figure 1, une cavité 2, un canal d'entrée 3, un élément chauffant 4, et un canal de sortie 3a, la cavité étant raccordée aux canaux respectifs par son entrée 2a et par sa sortie 2b.

[0085] La figure 9 illustre l'ensemble de la figure 8, représenté vu de côté en coupe selon le plan I-I. On trouve sur les deux figures les deux cavités 2 et 2c côte à côte.

[0086] Comme on le voit mieux sur la figure 9, les cavités 2 et 2c sont réalisées par gravure dans un substrat 5, et les cavités sont ensuite fermées par une plaque de verre 17 rapportée sur le substrat 5 gravé. Dans cette réalisation, les cavités 2 et 2c ont une épaisseur constante.

[0087] Comme on le voit sur la figure 8 dans ce mode de réalisation, les cavités telles que la cavité 2 ont une largeur qui va en décroissant depuis leur entrée 2a vers leur sortie 2b. La réduction progressive de largeur peut être régulière, pour former une cavité 2 généralement triangulaire comme illustré sur la figure 8. L'adoption d'une telle forme de cavité 2 est rendue possible par le fait que la température des gaz décroît progressivement depuis l'entrée 2a de la cavité 2 vers la sortie 2b de la même cavité 2, le libre parcours moyen des molécules décroissant simultanément avec la température, de sorte que la largeur de la cavité 2 reste, en toutes positions longitudinales considérées, nettement supérieure au libre parcours moyen des molécules, ce qui garantit que les molécules se déplacent dans la cavité 2 selon un régime de déplacement en milieu visqueux.

[0088] Sur la figure 8, on voit simultanément que les cavités 2 et 2c sont imbriquées tête bêche, ce qui, grâce à leur forme triangulaire, réduit leur encombrement en

section transversale.

[0089] La figure 10 illustre, en coupe transversale, un perfectionnement du mode de réalisation précédent. Selon ce perfectionnement, le substrat 5 est gravé sur ses deux faces opposées, pour constituer, sur une première face, les cavités 2 et 2c précédentes, et pour constituer, sur la face opposée, deux cavités 21 et 21c. Les deux faces sont fermées par des plaques de verre 17 et 171 respectives. Cela double le nombre de micropompes élémentaires par unité de surface du substrat 5.

[0090] Ce mode de réalisation conduit toutefois à une augmentation de l'épaisseur du dispositif.

[0091] Le mode de réalisation de la figure 11, illustré en coupe longitudinale, consiste à modifier non pas la largeur de la cavité, mais sa profondeur pour réaliser une cavité 2 à section transversale variable.

[0092] On retrouve ainsi une cavité 2 constituée par gravure d'un substrat 5 recouvert d'une plaque de verre 17, avec sa profondeur qui va en décroissant de son entrée 2a vers sa sortie 2b. On voit également, sur cette figure, le canal d'entrée 3 et le canal de sortie 3a. On voit en outre l'élément chauffant 4.

[0093] Enfin, sur la figure 12, on a illustré un mode de réalisation qui combine à la fois l'idée de la variation de profondeur selon la figure 11 avec des micropompes élémentaires 1 et 1a en série, l'idée de la superposition de deux couches selon la figure 10 avec un substrat 5 gravé sur ses deux faces et engagé entre deux plaques de verre 17 et 171, et l'idée de l'imbrication des cavités selon la figure 8. Ainsi, les cavités 2 et 21 sont imbriquées tête bêche, ce qui réduit l'épaisseur globale de l'ensemble par rapport au mode de réalisation de la figure 10.

[0094] Grâce à l'imbrication des cavités, on augmente la densité, c'est-à-dire le nombre de micropompes élémentaires dans une surface donnée du substrat 5, et également dans un volume donné de substrat 5. Le nombre de micropompes peut être augmenté d'un facteur proche de 4, ce qui conduit à augmenter proportionnellement la vitesse de pompage.

[0095] La présente invention n'est pas limitée aux modes de réalisation qui ont été explicitement décrits, mais elle en inclut les diverses variantes et généralisations qui sont à la portée de l'homme du métier.

Revendications

1. Dispositif de pompage par micropompes à transpiration thermique, les micropompes à transpiration thermique (1) comprenant chacune au moins une cavité (2) ayant une entrée (2a) raccordée à un canal d'entrée (3) de petite section transversale et ayant une sortie (2b) raccordée à un canal de sortie (3a), et comprenant un élément chauffant (4) pour chauffer le tronçon de canal d'entrée (3) adjacent à la cavité (2), une pluralité de telles micropompes (1, 1a, 1b, 1c) étant connectées aérauliquement en sé-

rie, **caractérisé en ce que** :

- les micropompes (1, 1a, 1b, 1c) sont réparties, sur un substrat (5), en une pluralité de lignes (A, B, C ... D) composées chacune d'une pluralité de micropompes (1, 6 ... 7, 8, 9) constituant ainsi une pluralité de colonnes (a, b ... c, d),
 - les éléments chauffants (4) respectifs des micropompes sont pilotés chacun par la commande appropriée d'un conducteur de commande de ligne (10A, 10B, 10C, ... 10D) et d'un conducteur de commande de colonne (11a, 11b ... 11c et 11d).
2. Dispositif de pompage selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les conducteurs de commande de ligne (10A, 10B, 10C, ... 10D) sont accessibles pour la connexion électrique selon un premier bord du substrat (5), et les conducteurs de commande de colonne (11a, 11b ... 11c et 11d) sont accessibles pour la connexion électrique selon un second bord du substrat (5).
3. Dispositif de pompage selon l'une des revendications 1 ou 2, **caractérisé en ce que** des moyens de commande pilotent sélectivement les conducteurs de commande de ligne (10A, 10B, 10C, ... 10D) et les conducteurs de commande de colonne (11a, 11b ... 11c et 11d), de façon à piloter individuellement chaque micropompe individuelle du réseau de micropompes.
4. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** chaque élément chauffant (4) est de type résistance électrique, connecté aux bornes d'une alimentation électrique (12, 13) en série avec un transistor (14) lui-même piloté par une porte ET (16) dont les entrées sont connectées respectivement à un conducteur de commande de ligne correspondant (10A) et à un conducteur de commande de colonne correspondant (11a).
5. Réseau de micropompes selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** chaque élément chauffant (4) est commandé par une bascule bistable elle-même agencée pour basculer à réception simultanée de signaux impulsifs de commande provenant d'un conducteur de commande de ligne correspondant (10A) et d'un conducteur de commande de colonne correspondant (11a).
6. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** une ou plusieurs lignes de micropompes sont connectées aérauliquement en série pour constituer un sous-ensemble série, plusieurs sous-ensemble série étant connectés aérauliquement en parallèle.
7. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** certaines au moins des micropompes ont un élément chauffant (4) agencé pour répartir de manière équitable l'échauffement selon la longueur du tronçon de canal (3) devant être chauffé, de façon à réaliser une distribution de température sensiblement régulière selon la longueur de tronçon de canal (3) devant être chauffé.
8. Dispositif de pompage selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'élément chauffant (4) est de type résistance électrique et comprend au moins deux zones conductrices du courant électrique (41, 42, 43) placées en deux zones successives longitudinalement espacées l'une de l'autre dans le tronçon de canal (3) devant être chauffé.
9. Dispositif de pompage selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'élément chauffant (4) de type résistance électrique est une plage résistive comportant un trou central (4e).
10. Dispositif de pompage selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'élément chauffant (4) est de type résistance électrique en forme de cordon chauffant enroulé en double spirale plate.
11. Dispositif de pompage selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'élément chauffant est la zone chauffante d'un élément à effet Peltier.
12. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** certaines au moins des micropompes ont une cavité (2) dont la section va en se réduisant depuis l'entrée (2a) vers la sortie (2b), et **en ce que** des cavités (2, 2c) de formes similaires sont imbriquées tête bêche pour réduire leur encombrement commun en section transversale.
13. Dispositif de pompage selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** la section transversale de la cavité (2) reste, en tout point considéré le long de sa longueur, suffisamment grande pour que les molécules gazeuses aient un régime de déplacement en milieu visqueux.
14. Dispositif de pompage selon l'une des revendications 12 ou 13, **caractérisé en ce que** les cavités (2) ont une épaisseur constante et une largeur qui va en décroissant depuis leur entrée (2a) vers leur sortie (2b), et les cavités (2, 2c) sont imbriquées côte à côte tête bêche pour réduire leur encombrement global dans la direction transversale.

15. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 12 à 14, **caractérisé en ce que** l'épaisseur des cavités (2) va en décroissant depuis leur entrée (2a) vers leur sortie (2b).

5

16. Dispositif de pompage selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, **caractérisé en ce que** le substrat (5) est traité sur ses deux faces pour réaliser deux couches de cavités (2, 2c ; 21, 21c).

10

17. Dispositif de pompage selon la revendication 15 et la revendication 16, **caractérisé en ce que** les cavités (2, 21) sont imbriquées tête bêche dans l'épaisseur du substrat (5).

15

20

25

30

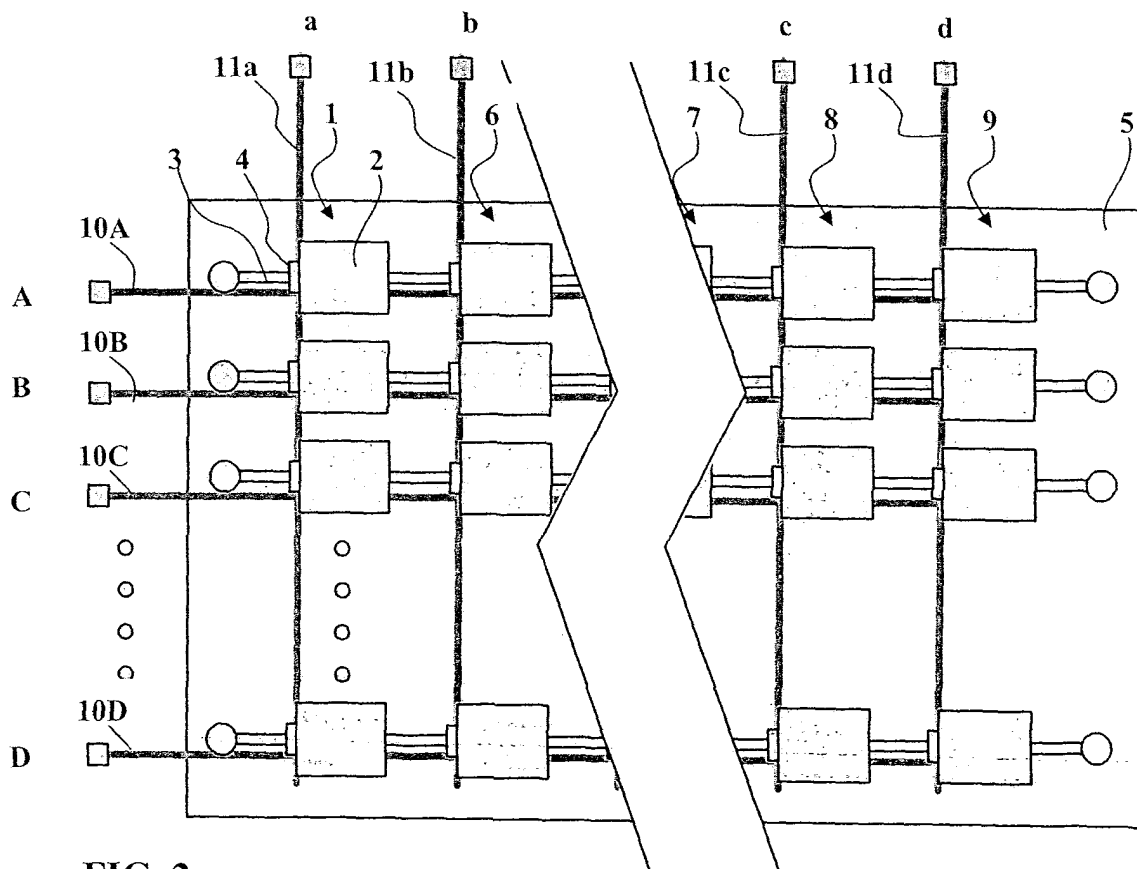
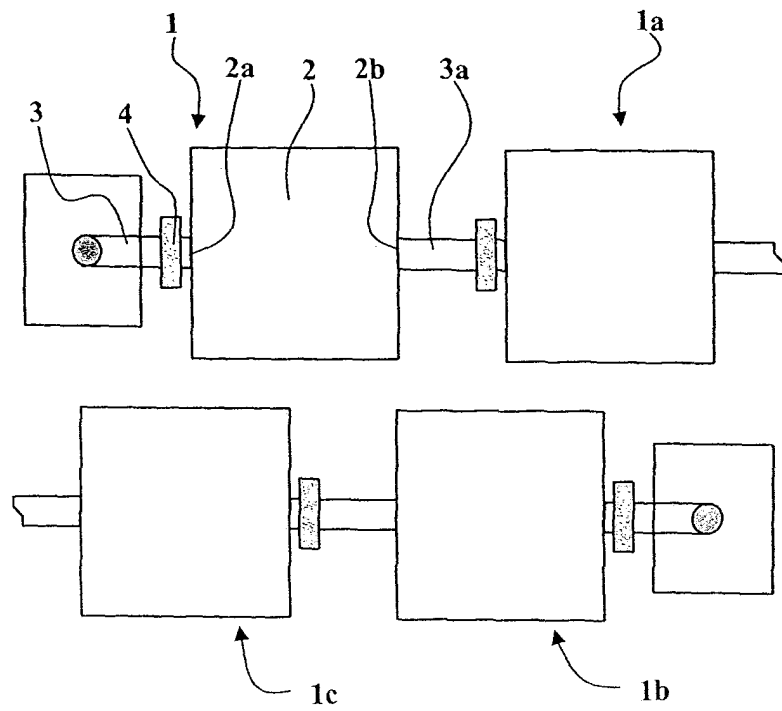
35

40

45

50

55



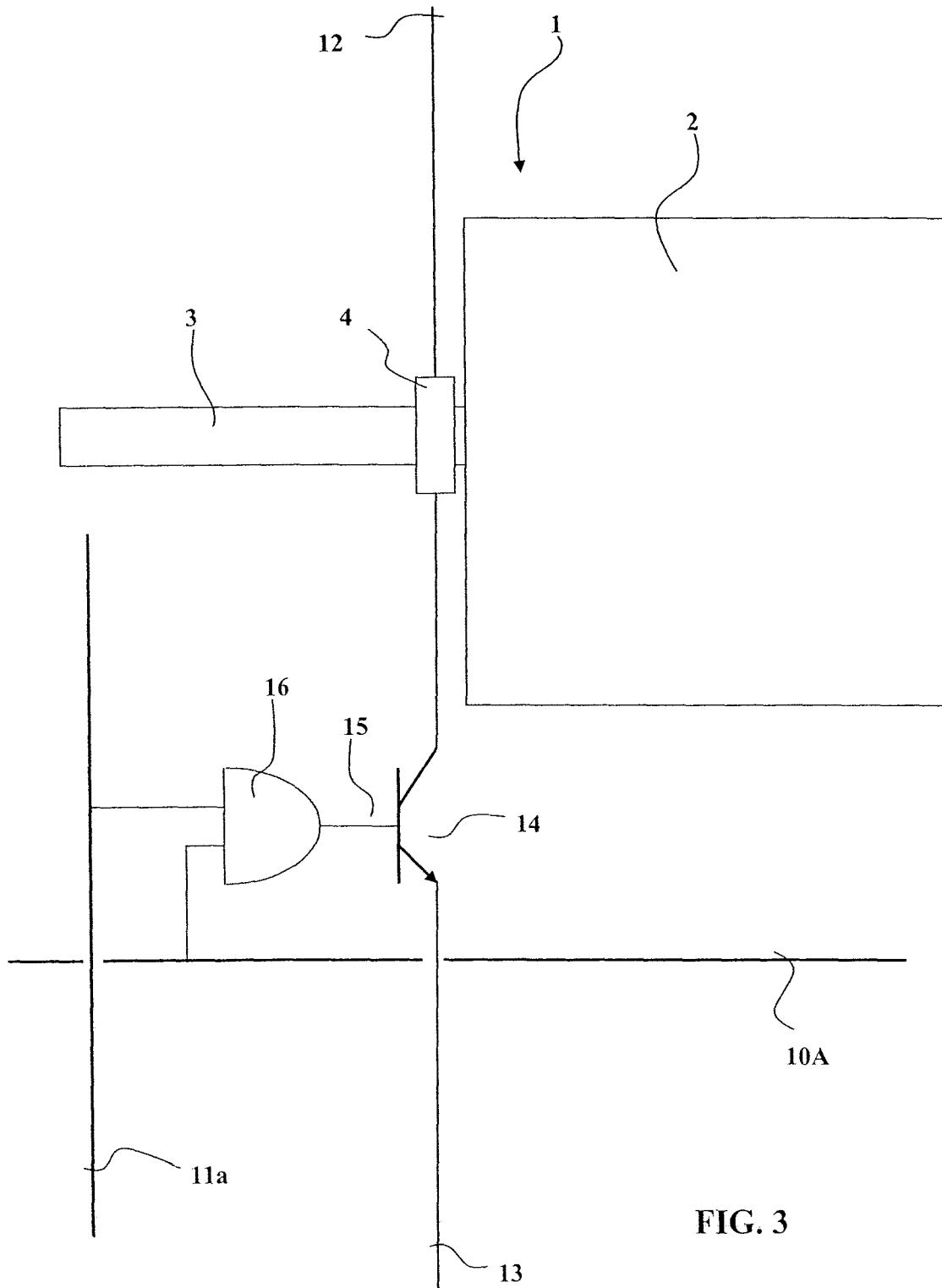
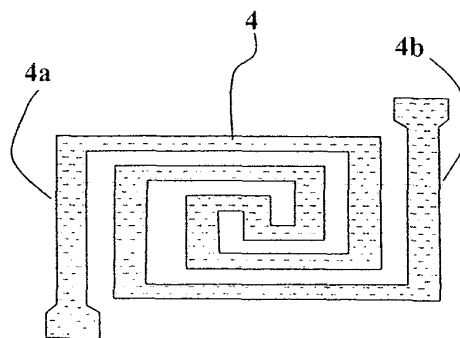
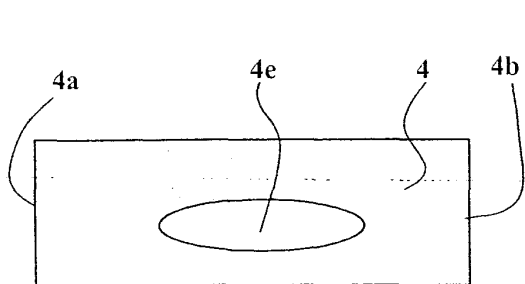
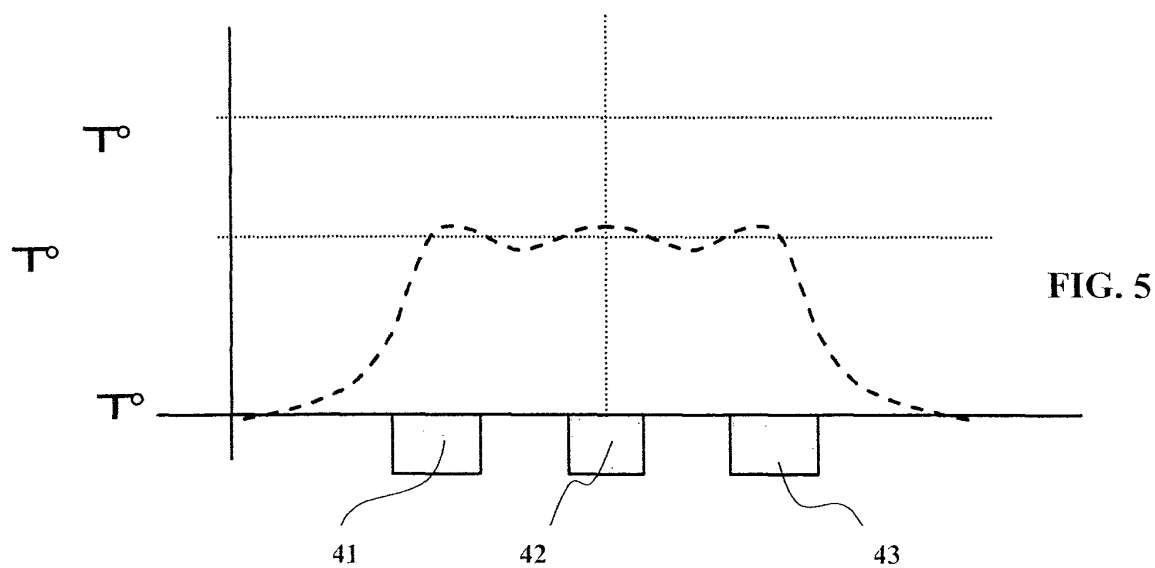
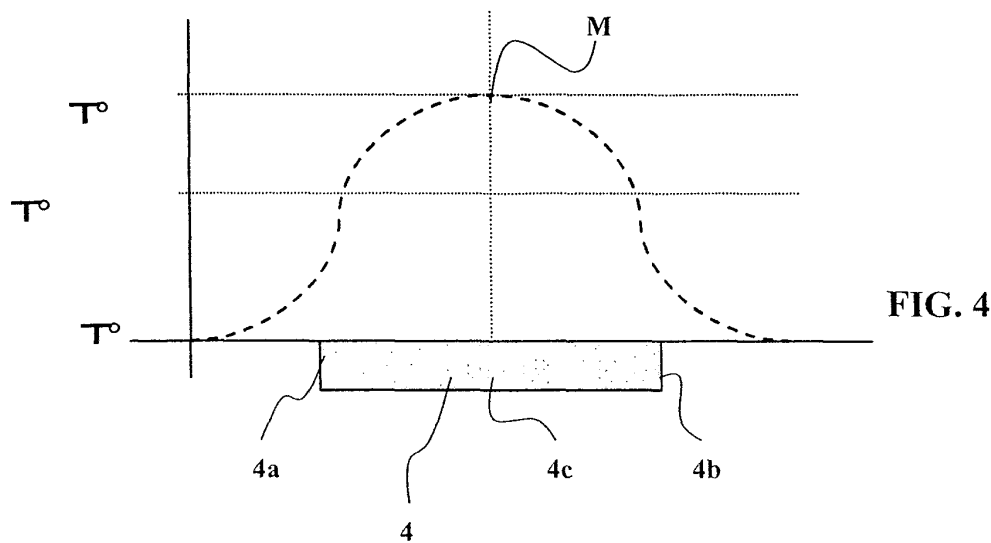


FIG. 3



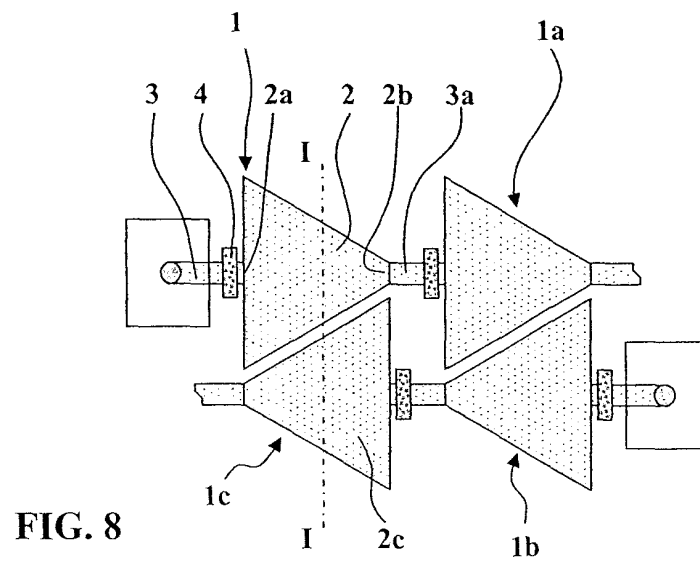


FIG. 8

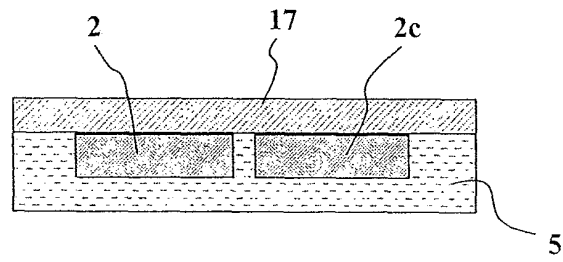


FIG. 9

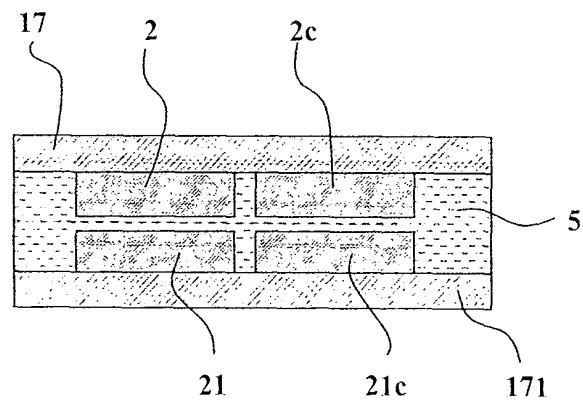


FIG. 10

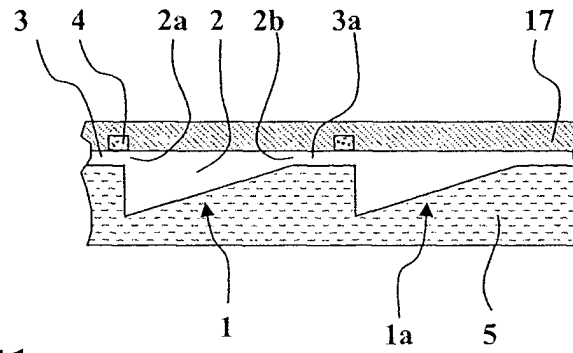


FIG. 11

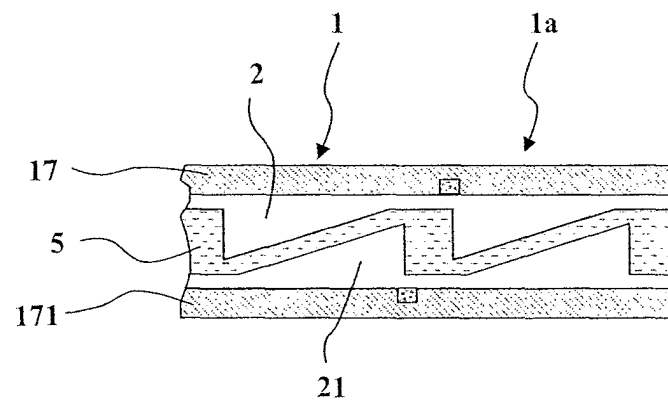


FIG. 12