



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 93114495.7

[45]授权公告日 1998年7月8日

[11] 授权公告号 CN 1039061C

[22]申请日 89.3.16 [24]颁证日 98.4.23

[21]申请号 93114495.7

分案原申请号 89101512.4

[30]优先权

[32]88.3.16 [33]US[31]168,724

[73]专利权人 得克萨斯仪器公司

地址 美国得克萨斯州

[72]发明人 拉里J·霍恩贝克

[74]专利代理机构 上海专利商标事务所

代理人 陈亮

[56]参考文献

SU81296133 1981. 3.31 G02B26/08

US81131227 1981. 8. 6 G02B26/08

US84646399 1984. 8.31 G02B26/08

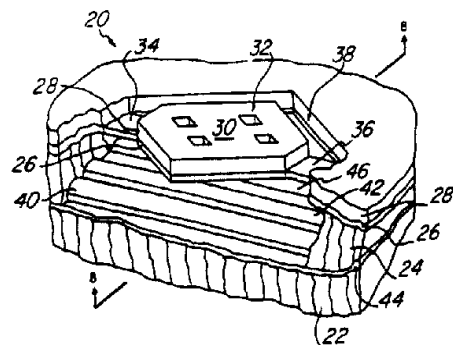
审查员 焦丽宁

权利要求书 1 页 说明书 40 页 附图页数 64 页

[54]发明名称 空间光调制器的象素的复位方法

[57]摘要

本发明提供一种空间光调制器的象素的复位方法。在一种有“软着陆”电极的空间光调制器中，存在着偏转片附着在着陆电极上的可能。本发明提供的方法包括（1）施加一个电压以存储能量于偏转片的铰链里，然后（2）去除电压以释放所存储的能量。



权 利 要 求 书

1.一种使偏转片式空间光调制器的象素复位的方法,包括下列步骤:

(a)施加电压以把能量存储偏转片的铰链里,然后

(b)去除电压以释放所存储的能量。

2.按照权利要求 1 所述的方法,其特征在于:

(a)上述每一个偏转片由两个扭转铰链支承,上述能量是通过将上述扭转铰链绕其转轴弯扭而存储的。

3.一种使偏转片式空间光调制器的象素复位的方法,其中第一个象素具有对置的寻址电极,它包括下列步骤:

(a)施加一电压脉冲到上述第一寻址电极,上述脉冲调周期小于偏转片的时间常数。

4.一种寻址具有两个方向的片的偏转片式空间光调制器的方法,其特征在于,它包括下列步骤:

(a)施加信号电压到偏转片下方的寻址电极;然后

(b)加一偏压到上述偏转片。

5.按照权利要求 4 所述的方法,其特征在于:

(a)上述偏压的幅值大于上述信号电压的最大幅值。

6.按照权利要求 4 所述的方法,其特征在于:

(a)上述空间光调制器包括邻近上述片的着陆电极;以及

(b)上述偏压还施加到上述着陆电极上。

说 明 书

空间光调制器的像素的复位方法

本申请是申请号为 8901512.4, 申请日为 89 年 3 月 16 日、名称为“空间光调制器和方法”的分案申请。

本发明涉及空间光调制器(光阀管)的像素的复位方法, 尤其涉及具有由电子寻址偏转片形成的像素的空间光调制器的像素的复位方法。

空间光调制器(SLM)是一种以空间形式, 根据电或光的输入调制入射光的变换器。入射光可以以相位、亮度、偏振度、或方向调制。光调制可以用呈现各种电光或磁光效应的多种材料来完成, 也可用通过表面形变来调制光的材料完成。各种 SLM 在光信息处理、投影显示和静电复印领域中有着广泛的应用。请参见“L.Hornbeck, 128×128 可变形镜面器件(Deformable Mirror Device), 30IEEE Tran.Elec.Dev.539 (1983)”。

一种众所周知的用于高亮度电子显示的 SLM 是埃德富(Eidophor)光调制器。它是一种把静电式表面和微凹的油膜用作有源光学元件的系统。请看“E.Baumann, 富士(Fischer)大屏幕投射系统(Eidophor), 20J.SMPTE 351 (1953)”。在这系统中, 一个连续的油膜用电子束以光栅形式来对其进行扫描。该电子束被调制得可以在油膜上的每个可分辨的像素面积内产生存储电荷的空间周期分布。通过油膜表面和支承底片之间的静电吸引力, 该电荷分布在每个像素中建立了相位光栅。支承底片具有一个不变的电位。这种吸引力使得油膜表面产生形变, 其形变量与存储电荷量成正比。被调制后的油膜用氙弧灯的空间相干光来照射。入射到已被调制的油膜的像素之上, 通过局部相位光栅衍射成为一组空间有规则地间隔的离散序列, 该序列通过部分光学系统落在由交替透明和不透明的栅条周期阵列组成的纹影挡板上。纹影挡板栅条的间隔选择得与挡板平面上的衍射信

号序列的间隔相匹配，以使能得到高的光通量效率。入射到光阀管未调制区域的光，通过纹影挡板的不透明栅条，阻止其到达投射透镜，因此，光阀管上的未调制区由纹影成像系统在投影屏幕上形成的象是暗的。而由受调制的电子束引入的相位微扰由纹影投射仪在屏幕上转变成明亮的光点。尽管存在着由于电子轰击产生油的聚合作用以及有机物蒸发对阴极造成污染等许多技术困难，但这种类型的油膜系统已成功地发展到可广泛应用于总光通量要求为几千流明的屏幕上。然而这种系统昂贵、笨重、有些部件的寿命又较短。

许多非油膜 SLM 也已发展起来，它们包括偏转元件型的、偏振平面旋转型的、和光散射型等。这些 SLM 类型采用种种效应，如金属反射层的形变、弹性体或弹性光导体和铁电体的散射及偏振、PLZT 陶瓷和液晶等。例如，“R. Sprague et al, 用于激光复印的线性总内反射空间光调制器, 299 Proc. SPIE 68 (1981)”和“W. Turner 和 R. Sprague, 用于激光复印的集成总内反射 (TIR) 空间光调制器, 299 Proc. SPIE 76 (1982)”和“美国专利 No. 4380373”描述了在光敏介质上的非撞击式复印系统。在这系统中，激光形成线性照明，通过光调制器线性阵列，在光敏介质上成像。该阵列通过电极及驱动电路制作在集成驱动元件上而形成一个总内反射空间光调制器。驱动元件与电光晶体（如铌酸锂）总内反射表面相对放置。每两电极间的散射场发生的折射系数的局部变化由使 TIR 交界面在光敏介质上成像的纹形读出光学装置读出。这是个一维图像，光敏介质在位于线性阵列的图像下的鼓筒上旋转，从而产生二维图像（如一页文稿）作复印之用。然而，SLM（光阀管）由于它的混合特性，易于产生制造困难。散射场的场强，从而已调制光象素所衍射的光的大小易受寻址电极和不到十分之一微米的电光晶体表面之间的气隙厚度变化的影响。于是陷在晶体和电极结构之间的即

使很小的微粒也会在光敏介质上引起照度不一致性的问题。光阀管调制和未调制区之间边界上的象素的系统光学响应，由于寻址技术的性质，也比已调制区中间附近的象素的响应低得多，根据这种技术已制成的印刷机，目前市场上已不再见到。

“M. Little et al., 可寻址 CCD 液晶光阀管, Proc. SID Symp. 250 (April 1982)”描述了一种在硅片的正面具有 CCD 面阵，在硅片的反面具有液晶阵的 SLM。电荷输入 CCD 直到整个的模拟电荷数据都装入为止，然后电荷转入硅片反面，在那儿再调制液晶。这种器件由于电荷从前面转移到背面，具有较严重的固定型式的噪声以及分辨率力下降的缺点。

另一种可以做成一维和二维阵列的 SLM 是一种可形变的反射镜。形变镜可细分为三类：弹性体类，膜片类及悬臂片式形变镜。在弹性体类中，一金属化的弹性体的寻址是通过一个空间变化的电压实现的，这种电压通过压缩弹性体产生表面形变。因为寻址电压需要约一至二百伏电压，因此这种弹性体对于高集成密度的硅寻址电路不是一种良好的选择对象。参看“A. Lakators 和 R. Bergen, 使用非晶体 Se 型 RUTICON 光阀管的电视投影显示, 24 IEEE Tran. Elec. Dev. 930 (1977)”。

薄膜形变镜有多种类型。一种类型基本上是上述埃德富 (Eidophor) 油膜的替代品。在这系统中，一个薄的反射膜利用支撑栅格结构架安装到阴极射线管 (CRT) 的荧光屏上。寻址方式和埃德富 (Eidophor) 一样，是通过光栅扫描电子来实现的。用电子束在 CRT 的玻璃荧光屏上存储的电荷通过静电感应吸引具有恒定电压的薄膜。这种吸引力使得薄膜陷入栅格结构的网孔中，因此在每个受调制的象素位置上形成一个微型球面镜。从这种类型受调象素衍射的光被集中进入比较窄的锥体中，该锥体围绕镜面反射束旋转对称。这种

类型的光阀管与一纹影挡板一起使用，这种纹影挡板包含一个中心模糊区，其位置及尺寸恰好能挡住从光阀管未调制区镜面反射后光学系统所形成的光源的像。已调象素在纹影挡板的平面上产生一个比中心模糊区更大的圆形光斑，但集中在它上面。一般而言，形变薄膜投影器的挡板效率或越过纹影挡板的已调光素的能量的百分比比油膜埃德富 (Eidophor) 投影器的稍低一些。此外，这些薄膜可形变镜系统至少存在两个主要问题。为了对较硬的反射薄膜进行寻址，需要高压。电子束光栅和象素支撑栅格结构之间稍不对准就会产生寻址问题。这种不对准会使成像模糊及显示的亮度不一致。在“L. Hornbeck, 30 IEEE Tran. Elec. Dev. 539 (1983)”和“美国专利 No.4441791”中描述了另一种类型的薄膜形变镜，它是一个由与硅寻址电路粘接在一起的金属化聚合物镜阵组成的混合集成电路。其下的、通过空气隙与镜阵元件隔开的模拟寻址电路，通过静电吸引力使镜的阵列在所选定的象素中移位，这种二维移位图形产生一个相应的反射光相位调制图形。这种反射光相位调制图形可通过纹影投影技术转化为模拟量的强度变化，或可用作光信息处理器的输入变换器。由于极微小的微粒陷入薄膜和其底部的支撑结构之间也会产生缺陷，从而使薄膜形变镜遇到了制造工艺性问题。薄膜会在这些陷入的微粒上形成篷状物，这些篷状物横向扩展得比这些微粒自身尺寸大得多，这些篷状物又会由纹影成像系统形成一个个亮点的像。

悬臂片式的形变镜是一种可形变的悬臂片的微机械阵列，藉助于某些寻址方式可以被静电感应而一个一个地产生形变，从而调制线性阵列或平面阵列图形中的入射光。这种悬臂片式形变镜与适当的投影光学电路一起使用，能用于显示，作光信息处理，和电子照像印刷。一种早期的悬臂片式形变镜是通过真空蒸发技术制造在玻璃上的，具体情况可参见美国专利 No.3600798。这种器件存在制造上的问题，

这些问题包括正面和背面衬底玻璃不能集成化而产生的对准问题。

在“R.Thomas et al, 镜阵管 (The Mirror-Matrix Tube: 一种新颖的用于投影显示的光阀管, 22 IEEE Tran. Elec.Dev.765 (1975)”和“美国专利 Nos.3886310 和 3896388”中描述了一种悬臂片式可形变镜器件。该器件制造如下: 在蓝宝石衬底的硅层上生长一层热二氧化硅层; 该氧化物上制成在中间连接的四个悬臂的四叶交叉阵列图形。对硅层进行各向同性的均匀湿蚀刻, 直到氧化层凹蚀, 在每个像素中留下, 由中心硅支柱支撑的四根二氧化硅悬臂片。然后, 四叶交叉阵列用铝金属化, 以形成反射性能。沉积在蓝宝石衬底上的铝, 形成一个基准 (参考) 栅极, 该栅极上加直流偏压。该器件通过电子束扫描寻址, 电子束在四叶交叉片上存储电荷图形, 这样使这些片通过静电引力朝着基准栅极方向产生形变。通过对相距极近的外部栅板加负偏压, 且用低能电子注射器件, 就可以对器件进行擦除。用一种纹影投影仪来把这种片的形变转变为在投影屏幕上的亮度变化。这种器件的一个重要特征是该器件具有四叶形的几何结构, 这种结构导致片从这些片间的开口处发生旋 45 度角的偏转, 这种特征允许使用一个简单交叉形状的纹影挡板, 以便阻止固定的衍射背景信号, 而不会对已调制的信号衍射产生衰减。曾经制造出片能偏转 4 度、具有每英寸 500 个像素的像素密度的器件。光路上采用的是 150 瓦的氙弧灯, 反射式纹影结构和具有 5 倍增益的 2.5×3.5 英尺的屏幕。曾制造出具有线 (电视光栅线) 分辨率的器件, 它具有 35 英尺-流明的屏幕亮度, 对比度为 15 比 1 和片衍射效率达 48%。写入时间低于 1/30 秒, 而擦除时间是写入时间的 1/10。然而这种器件还是有问题, 如由于扫描误差使分辨率下降, 产量低 (合格率低) 和常用的投影式阴极射线管相比没有优点等, 也就是说扫描之间的定位精确度不够高, 不能再现在一个个像素上的写入。分辨力的下降迫使至少增

加四倍象素数，才能维持与对等的写入荧光物质相同的分辨率。由于没有用于四叶支撑柱的阻止蚀刻的办法，对片的湿法蚀刻会导致片的断裂，以及必须在零应力状态下在氧化物片上蒸发通常的有张力的铝等等困难，这种器件的产量受到了限制。此外，这种器件在造价上或者在功能上并不比常用的投影管 CRTs 优越。

“K. Petersen, 在硅片上制造的微型结构的光调制器阵列, 31 Appl. Phys. Lett. 521 (1977)”和“美国专利 No. 4229732”中描述了一种与寻址电路一起集成在硅片上的悬臂片形变镜，因此消除了前述悬臂片式器件用高压电路进行电子束寻址及真空封装。这些参考资料第一次描述了一个 16×1 阵列的跳水板形状的悬臂片，它的制造步骤如下：在 P 衬底（或隐埋层）上生长一层约 12 微米厚度的（100）定向硅（P 或 n）的外延层，该外延层被氧化到大约 0.5 微米厚，且用厚度约为 500 Å 的 Cr-Au 薄膜覆盖。Cr-Au 被蚀刻掉以便形成焊接点和地址线，以及跳水板的金属化。氧化物在第二次形成掩模步骤中在金属化周围进行梳形图形蚀刻。最后，硅本身放在 120 °C 的邻苯二酚和二胺溶液中进行蚀刻。如果能维持掩模相对于晶体轴线的正确取向，则金属覆盖的氧化物跳水板通过蚀刻将被凹蚀而从硅中脱离出来。因为蚀刻是各向异性的，进一步的横向蚀刻通过由矩形覆盖的梳状板（111）受到限制。此外，通过 P 材料防止蚀刻剂扩散，所以由这一外层的厚度使跳水板下面的阱深受到限制。当在衬底材料和金属化的跳水板之间加上直流电压时，较薄的二氧化硅跳水板将会因静电作用向下偏转进入蚀刻的阱中。跳水板长度 106 微米，宽 25 微米，这表明有一个约 66 伏的门槛电压。

第二个参考资料（Hartstein 和 Petersen, U. S. Pat. No. 4229732）描述的器件，其制造方法与跳水板器件相类似（一个 P 淹埋层作为在金属化的二氧化硅悬臂片下形成阱时的蚀刻挡板），但是

有一个不同的结构。即悬臂片处在一个正方形片状物在一角上成转动连接的形状中，正方形片形成二维阵列取代了跳水板的一维排列，且正方片下的阱没有连接，以致正方片的寻址线可以在处于正方片的行与列之间的硅材料的顶部表面上形成。虽然具有角转动的正方片是来自于叶式交叉结构（见“U. S. Pat. Nos. 3886310和3896338”），但是，因为叶式片转动连接到与硅表面绝缘的中心柱，这影响到表面寻址线，使叶式交叉结构不能被采用。进一步看，这些器件都存在问题，包括有：因密度限制使分辨率低，效率亦低；由于来自寻址线路的衍射效应，使得有效面积小，产品质量差，对比度低；由于氧化物片的带电效应、产生余象。尤其是，通过向下蚀离外层直到P蚀刻挡板，使得寻址线无可选择地安置在有效面积下，结果寻址线路被挤压在有效面（片状物）周围。于是有效面积减小，随之衍射效率下降。这意味着对于同样的屏幕亮度，确实需要大功率的灯头。由于寻址线路需附加面积，致使象素尺寸增大远超过叶片面积，随之分辨率减低。为了形成阱，需要湿选蚀刻，这样导致低质量的电和机械结构的产品；确实，由于在漂洗/干燥的离心旋转循环期间，片下面的积水因自旋离开表面使片断裂，这种湿选净化，如在切成小块之后会损坏叶片和跳水板。如果代之用蒸发清除表面水，会残留表面杂质，这种杂质能增加表面漏电电流，使器件工作不稳定。同样，处于硅表面的寻址线路易受入射光影响而产生调制，且产生了来自晶体管门的不需要的衍射作用，使对比度更低。此外，泄漏进寻址结构的光产生光生电荷，且减低了存储时间。最后，氧化物/金属片有面对着阱的绝缘边，由于阱上存在较强的电场而使其充电，这会产生余象（“burn-in”）。为了排除这余象问题需要交流激励，而这一交流激励不能用于所述的NMOS电路。进而，如果片状物偏转超过最大稳定偏转，那么它会损坏且跌落在阱的底部。于是超过极限的电压绝对要避免。

悬臂片的变化研究在“K. Petersen, 硅扭转扫描镜, 24 IBM J. Res. Devp. 631 (1980)”和“M. Cadman et al, 使用薄金属片的微型显示, 4 IEEE Elec. Dev. Lett. 3 (1983)”中。这些研究形成金属化覆盖的硅片或金属片, 它们以两个扭转铰链连接到周围的反射面上, 且沿着由两铰链形成的轴, 把这些片绞合起来工作。这些片不能与其下面的寻址基片制在单片上, 而是用与上面提到的可形变膜片器件相类似的方法, 把它粘合到寻址基片上。

“Cade, U. S. Pat. No. 4356730”综合了前述各种情况, 在硅衬底基片上装有金属涂覆二氧化硅悬臂跳水板, 角转动片和扭转片。寻址电极(每个跳水板或片状物带有两个电极, 作为x-y寻址, 像存储器阵列中一样)位于表面, 一个跳水板或一片状物可象一个开关或存储器的一位一样工作。通过加上一门槛电压, 使其陷落进硅衬底上蚀刻阱的底部。然后通过一个较小的维持电压, 使跳水板或片状物保持在阱底部中。

依据上面悬臂片的讨论, 建议使用带有悬臂片器件的纹影投影光学系统。但是这种系统就所获得的光学功能而言有一定的限制。首先, 成像透镜的孔径必须比仅仅通过必要的信号能量的口径更大。因此相应的透镜速度必须要高(或等效地说透镜的 f 数必须相应地低), 以便将中心纹影挡板模糊区周围的所有信号能量都通过去。此外, 信号通过该成像图中透镜瞳孔的外层部分。从任一给定点射向SLM的光线, 及通过透镜瞳孔最外层区的光线, 要进行很好地正确聚焦, 对任何成像透镜的光学设计来说都是最困难的。当外层光线处于良好的控制之下, 通过成像透镜中心的光线会自动正确对焦。因此, 这种成像透镜对光学设计的复杂性的要求高出一个级别。其次, 视场角也受到限制, 在这角度范围内成像透镜应能够在SLM悬臂片上形成清晰的轴旁像素, 任何透镜设计任务在透镜速度和用良好成像质量覆盖的视场角之

间进行折衷处理。快的透镜在较小的场角上工作，然而宽场角透镜，其速度趋于降低。因为纹影成像仪必须在它的整个孔径区调校十分良好，且这孔径在直径上比通过成像光要求的直径大，所以由透镜覆盖的视场角比本来设想的场角更小，如果按本来的设计，一个不同的成像结构只要使信号通过一个较小直径的中间清晰的中心。最后，一个成像仪透镜具有给定的速度，纹影挡板结构的使用也限制了所采用的光源尺寸。这也就限制了能发送到投影屏幕或送到偏转成像上面的光感受器的辐照度。这辐照度大小或单位面积上的发送功率取决于光源的光亮度，光学系统的透射率，及光线成像的锥形立体角三者的乘积。光源的光亮度仅取决于所使用的特定灯头。光学系统的透射率取决于特定的 SLM/纹影挡板结构的挡板效率和表面的传输损耗。而成像光的锥体角，直接正比于填满信号能量的成像仪透镜瞳孔面积。那种使得成像仪透镜瞳孔中心区模糊的纹影挡板的使用限制了有用瞳孔的面积，因此也限制了给定速度的透镜和给定光亮度的灯源所可能得到的成像平面的辐照度水平；除了基本的辐照度限制之外，最大可使用的光锥体还有一个等于片偏转角的开放角。

所知的 SLMs 片存在的问题包括有：片绝缘体的充电效应，为防止片的超过极限的陷落缺少过压保护，小角度而又不均匀的片偏转（它导致光学效率低和不一致性），和高压象寻址。

在本分案申请的原始申请中揭示了一种可偏转的空间光调制器，这种调制器每个片均有寻址和着陆电极。对于一个精密的结构所决定的偏转角而言，允许片“软着陆(soft-landing)”。而不会使其过极限陷落。该发明解决了小角度和片偏转不一致性的问题，且

由于增大了超压陷落的承受力而使偏转循环工作的寿命和光学对比度得到增加。

所介绍的具体实例也给出了差分偏压技术，这种技术允许低压寻址而不会在常规偏压下使对比度下降。并且还介绍了对片偏转具有两个或三个静态稳定状态的两种工作方式，这种偏转不需要连续的寻址电压就可维持它们的状况。尽管该空间光调制器中偏转片和着陆电极是电气连接的，并且在工作时偏转片软着陆在着陆电极上，但偏转片的可能附着在陆电极上。

因此，本发明的目的在于提供一种空间光调制器的象素的复位方法，使偏转片脱离着陆电极。

本发明的一种使偏转片式空间光调制器的象素复位的方法，包括下述步骤：

- (a)施加电压以把能量存储偏转片的铰链里，然后
- (b)去除电压以释放所存储的能量。

本发明的另一种使偏转片式空间光调制器的象素复位的方法，其中每一个象素具有对置的寻址电极，它包括下列步骤：

- (a)施加一电压脉冲到上述第一寻址电极，上述脉冲调周期小于偏转片的时间常数。

本发明还提供一种寻址具有两个方向的片的偏转片式空间光调制器的方法，它包括下列步骤：

- (a)施加信号电压到偏转片下方的寻址电极；然后
- (b)加一偏压到上述偏转片。

图 1A - C，用透视图横切面图和俯视图说明了所得到的第一个具体象素实施例；

图 2 说明了第一个实施例的象素片的偏转；

图 3A—C 显示了第一个实施例的象素的偏转片的偏转与所加电压的关系曲线；及象素简化模型的俯视图；

图 4 是简化模型象素的横切面简图，它定义了各分析项；

图 5 说明了简化型象素中片的扭转情况；

图 6 说明了一个简化型象素的片偏转度作为控制电压函数的情况；

图 7 是第一个所述实施例的横切面略图；

图 8 说明了第一个实施例中的片扭转情况；

图 9 表明了第一个实施例分析中所定义的各项；

图 10—13, 说明了第一个实施例的两种工作形式中片扭转情况

图 14 说明了第一个实施例的不同工作形式的电势能函数；

图 15 表明了第一个实施例的差分偏压情况；

图 16 说明了第一个实施例在外加差分偏压时的扭转情况；

图 17 是第一个实施例在双稳态工作时的时间关系图；

图 18—23 分析了第一个实施例工作时的扭转和偏转情况；

图 24—26 说明了第一个实施例的噪声范围的分析；

图 27 是一个加到第一个实施例上的平衡电极的横切面简图；

图 28 说明了噪声的相互作用；

图 29 是第一个实施例的第一种复位方法的时间图；

图 30A—B 是第一实施例的第二种复位方法的时间图和横切面图

图 31 是第二个实施例线性阵列的顶视图；

图 32A—C 简略地说明了第二个实施例用于电子照像印刷的使用情况；

图33说明了第二个实施例象素在横切面图中沿着控制极的寻址情况；

图34说明了第二个实施例象素在俯视图中的寻址情况；

图35 A—E说明了在横切面图中，第一个实施例的制造方法的工艺步骤；

图36 A—C和图37 A—C进一步说明了第一个实施例的制造方法的最后一道工序的情况；

图38说明了第三个实施例的俯视图；

图39 A—D在俯视图中表明了相应的几何结构及布置；

图40 A—E说明了在横切面图中第二个实施例的制造方法的工艺步骤；

图41 A—C说明了在俯视图中第二个实施例的制造方法的工艺步骤；

图42 A—B是第四个实施例象素排列的俯视图和原理图；

图43 A—D和图44 A—C是第四个实施例象素的各级平面图和横切面图。

上述的偏转片空间光调制器(SLM)的典型实施例是由象素的线阵或面阵组成的，每个象素可单独寻址且包含至少一个可偏转的反射片，这些象素制造在单晶硅的基片上。基片是通过硅晶片的加工制成的，首先把晶片切割成小(基)片，接着对这些基片一个个地处理。这些基片大小随用途而定；如一个 2400×1 的线阵象元(它可能是每英寸300个点的印刷机的部件)可以制造在一片1300密耳(0.001英寸) \times 250密耳的基片上，每个象素约为12微米(1/2密耳)平方大小。SLM通过象素对光的反射而工作，该反射光通过改变偏转片的偏转度而得到调制。因此这样的SLM也称作为可变形镜面器件

(DMD),且偏转片称为镜元件。下面主要描述DMD的单个象素,所有图形是为便于说明而作的简图。

第一个最佳实施例的DMD单个象素由第一种最佳实施方法制造,表明在透视图1A、横切面图1B及俯视图1C中。象素(一般用号码20标注)主要是一块覆盖在一浅阱上的一片状物,此外还包括硅衬底22、绝缘隔层24、金属铰链层26、金属片层28、在层26-28中形成的片30和它上面的等离子蚀刻(出入)孔32。没有被层28覆盖的铰链层26的34、36两部分形成可扭动的铰链片(扭动杆),该铰链将片30与由隔层24支承的层26-28的一部分相连。电极40、42、46和41布置在隔层24和衬底22之间,且通过二氧化硅层44与衬底绝缘。图1B是沿如图1A和1C中所示的线B-B的横切面图。

象素20的典型尺寸如下:片30是每边长12.5微米的正方形,隔层24为4.0微米厚(图1B中的垂直方向上),铰链层26是800 Å厚,片层28为3600 Å厚,铰链片34和36每个长4.6微米宽1.8微米,等离子蚀刻(出入)孔32为2.0微米的方形,且等离子蚀刻(通道)缝38(即片30和片层28剩余部分之间的空间)为2.0微米宽。

产生最大片偏转角约10度的另一组典型象素的尺寸如下:片30是一个边长19微米的正方形,隔层24为2.3微米厚(图1B中的垂直方向),铰链层26为750 Å厚,片层28为3000 Å厚,扭动铰链34和36每个长4.6微米宽1.0微米,等离子蚀刻孔32为1.5微米的正方形孔,且等离子蚀刻缝(片30和片层28之间的空间)为1.0微米宽。

衬底22由电阻率约10欧姆-厘米的(100)硅材料制成,其表面通常形成寻址线路,并含有外围器件和电极40、41、42及46。隔层24是一种正性光致抗蚀剂的绝缘体,铰链层26和片层28都是含有0.2%钛和1%硅的铝、钛、硅合金。这种合金具有的热膨胀系数与隔层24相差不大。因此在下述制造过程中,金属层与隔层24之间所产生的应力最小,

层26和28两者都是同样的金属，应力也最小。注意：在片层或铰链层之间的任何应力会使片和铰链产生卷曲变形；在金属层和隔层之间的任何应力能使阱上的自由金属部分产生卷曲或皱折。

图 1 A—C 的结构同时使两条规范得到满足：(1) 可以使片金属如所要求的那样厚，铰链金属如所要求的那样薄，且不存在在片金属上涂覆铰链金属的问题；(2) 片金属下面的隔层表面不容易受到边缘加工的影响，如果隔层上的矩形铰链在片金属层镀覆之前形成的话本来会产生这种影响。

通过在金属层 26—28 和衬底 22 上的电极 42 或 46 之间施加一个电压使得象素 20 动作。片 30 和这些电极形成一个空气隙电容器的两个极板，通过所施加的电压，在两个极板上感生的相反的电荷使得静电力将片 30 吸向衬底 22 上。而电极 40 和 41 保持处于与片 30 相同的电压下。这个吸引力引起片 30 在铰链 34 和 36 处扭转，并向着衬底 22 偏转。参见图 2，它是这种偏转的示意图，图 2 同时还显示了对于一个正电压加到电极 42 上，聚集在最小间隙区域的电荷。对于在 20 V 至 30 V 范围内的电压，偏转在 2° 范围内。当然，如果铰链 34 做得更长或更薄或更窄，偏转就增大，因为铰链 34 的柔性随着其宽度的倒数线性地变化，并且与其长度的平方成正比，与其厚度的三次方成反比。注意，片 30 的厚度应能防止片 30 由于加工期间产生的表面应力而显著地翘曲，然而铰链 34 的厚度允许有大的依顺性。图 2 还显示光从偏转片 30 的偏转，就象在 DMD 工作时可能发生的那样。

片 30 的偏转是所施加的电压的一个高度非线性的函数，因为通过铰链 34 的扭绞所产生的回复力近似为偏转的线性函数，但是静电吸引力作为片 30 的最靠近衬底 22 的一角与衬底 22 之间距离的倒数的函数而增加（当距离减小时电容量增大，所以感生的正负电荷量都增大，从而彼此更靠近）。图 3a 表示象素 120 的偏转对电压的近似的关系曲线，

象素120是象素20的一种简化了的型式，将电极42和40接合在一起作为寻址电极142(并且电极41和46连接在一起作为寻址电极146)。见图3b，它是用号码100标示的象素元件120的俯视图，该元件高于相应的象素元件20。使象素120的扭转片130变得不稳定并向所有方向弯曲而接触衬底122的电压叫做极限电压。对于稍许低于极限电压的电压，偏转度近似为电压的线性函数(见图3的虚线)，这是模拟工作区域。注意，模拟工作使用的电压(40 V—50 V)比通常用于集成电路的电压大得多。

在分析象素20的工作之前，先介绍简化的象素120的定性分析。图4是象元120的横截面图(与图1b和2类似)，它表示了所含变量的定义，图3b是关于两个相邻的象素120的俯视图。

如图4所示，寻址电极146和扭转片130接地，一个电压 ϕ_a 施加到寻址电极142上，它引起扭转片130转过一个角度 θ 。扭转片的旋转可以用扭转片130的尖端偏移的距离 Z_T 来表示，或者表示成对于未偏转的扭转片尖端131与寻址电极间距离 Z_0 的标称距离 α ，即

$$\alpha = \frac{Z_T}{Z_0}$$

对于小的旋转角，并将 θ 用弧度表示，则 θ 和 α 的关系为

$$\theta = \frac{Z_T}{L/\sqrt{2}} = \frac{\alpha Z_0 \sqrt{2}}{L}$$

这里 L 是在对角135和137上铰接的正方形扭转片130的边长。

通过施加电压 ϕ_a 到寻址电极142上所产生的在扭转片130上环绕通过角135和137的轴的转矩计算如下。首先考虑扭转片130的位于距旋转轴的距离为 x 、宽度为 dx 的小(无穷小的)面积(见图4中上图)。在扭转片130与寻址电极142上的小面积之间的垂直体积内的静电能近似地(假设为一个均匀电场，忽略边缘电场)等于

$$dU = \frac{1}{2} \bar{D} \cdot \bar{E} (z_0 - z) 2(L/\sqrt{2} - z) dz$$

这里 \bar{E} 是电场强度, \bar{D} 是在小的竖直体积里的电位移。注意, $Z_0 - Z$ 是小的竖直体积的高度, $2(L/\sqrt{2} - x)$ 是在扭转片 130 上的小面积的长度。当然, 静电的 \bar{D} 和 \bar{E} 是通过介质的介电常数相联系的: $\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E}$; 而电场强度的大小正好是电压差除以间距:

$$|\bar{E}| = \frac{\phi_0}{z_0 - z}$$

在小面积的垂直 (Z) 方向的由电场作用的分力正好是 dU 在 Z 方向的偏导数:

$$dF_z = \frac{\partial(dU)}{\partial z}$$

所以

$$dF_z = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{\phi_0^2}{(z_0 - z)^2} 2(L/\sqrt{2} - z) dz$$

并且这个力作用在扭转片 130 上的转矩等于 $x dF_z$, 因为该力的力臂等于 x 。这样, 通过将 ϕ_0 施加于寻址电极 142, 作用在扭转片 130 上的总的吸引转矩 T_a 由下式给出:

$$\tau_a = \int x dF_z = \frac{1}{2} \epsilon_0 \phi_0^2 \int_0^{L/\sqrt{2}} \frac{2x(L/\sqrt{2} - z)}{(z_0 - x\theta)^2} dz$$

这里小角近似法 $\theta = \tan(\theta)$ 用于设置 $Z = x\theta$ 。

求积分得出

$$\tau_a = \frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 \phi_0^2 L^3}{z_0^2} \frac{1}{\alpha^2 \sqrt{2}} [(\alpha - 2) \log(1 - \alpha) - 2\alpha]$$

其中 θ 已经用标称化的偏转 α 表示, 图 5 表示对于三个不同的寻址电压 ($V_1 < V_2 < V_3$) T_a 对于 α 的关系曲线。由扭转铰链的扭转产生的回复转矩由下式给出:

$$\tau_r = \frac{-\theta}{C} = -\alpha \left(\frac{z_0 \sqrt{2}}{CL} \right)$$

其中 c 是扭转铰链的扭转系数。回复转矩的大小在图5中由短划线表示。

通过分析初始合成转矩的点可以找到扭转片130的稳定平衡点。在图5中，对于 $\phi_a = V_1$ 在标以“P”和“Q”的点有零合成转矩。点“P”（对于 $\alpha = \alpha_1$ ）代表一个稳定平衡，因为对于 α 沿任何方向的小的偏移，合成转矩使 α 回复到 α_1 。反之，对于点“Q”， α 离开 α_2 的小偏移的合成转矩起增大偏移的作用，或者回复到 α_1 ，或者使尖端131着陆在电极142上（ $\alpha = 1$ ）。对于在0和 V_2 之间的任意 ϕ_a 得到同样的情况。

对于 $\phi_a = V_2$ ，点“P”和“Q”合并成位于曲线 T_a 和 T_r 相切处的单个的点“R”。点“R”（其 $\alpha = \alpha_c$ ）代表一个准稳定平衡：对于偏移小于 α_c 的 α ，合成转矩使 α 回复到 α_c ，但是对于偏移大于 α_c 的 α ，合成转矩导致尖端131落到寻址电极142（ $\alpha = 1$ ）。对于比 V_2 更大的 ϕ_a ，比如图5里的 V_3 ，不存在初始合成转矩。因此 V_2 是极限电压，用 V_c 代表。图6概述如下： ϕ_a 从0增加到 V_c ，导致稳定偏转平衡 α_1 增大，在 $\phi_a = V_c$ 时，稳定平衡达到 α_c ，在此场合，它就消失了。如果包括极限偏转（ $\alpha = 1$ ），则象素120在 $\phi_a < V_c$ 时可看作具有两个稳定平衡：一个是模拟平衡（偏转度取决于 ϕ_a ）而另一个是与 ϕ_a 无关的数字（ $\alpha = 1$ ）。对于 $\phi_a > V_c$ ，模拟平衡消失，象素只是数字的。

注意，在极限情况下，扭转片尖端131接触寻址电极142，一个大电流将穿过尖端131到电极142，并且尖端被熔焊到电极142上。因此，对于这一特殊的结构，达到极限是一种有害的现象。对于非常薄的扭转铰链来说，铰链作为易熔连接件，当扭转片处于极限时会被熔断。

象素20克服了象素120高压工作和扭转片有害地陷落到下面的电极上的问题。象素20具有附加的着陆电极41和42，它们与扭转片30电

气连接，并且与寻址电极42以及寻址电极46连接，但这是通过逻辑信号 ϕ_a 的逻辑“非”连接的。参见图7，象素20的工作在下面的段落里描述。

首先对于一个固定的寻址信号电压 ϕ ，把在片30和寻址电极46之间产生的转矩 T_+ 看作片30的标称化偏转 α 的函数，最初假定片30以及着陆电极40和41接地 ($V_g = 0$)，并且，电压 ϕ 也加到寻址电极42上。不同于简化象素120的转矩，当 α 趋向于1时，转矩 T_+ 不趋向于无穷大，因为片30的尖端碰上着陆电极41而保持片30与寻址电极46分开。与象素120里尖端碰撞电极142的有害特性相反，着陆电极41被尖端31碰撞不会导致一个大的电流脉冲以及将尖端熔焊到着陆电极41上，因为，片30与着陆电极41是电气连接的。另一方面由于片30是沿朝着着陆电极40的相反方向偏转，因为片30和寻址电极46之间的距离增大，所以 α 趋向于-1， T_+ 减小，见图7。

通过寻址电极42在片30上产生的转矩 T_- 显而易见是与 T_+ 对称相关的： $T_-(\alpha) = -T_+(-\alpha)$ 。因此对于加到寻址电极42以及46上的一个固定电压 ϕ 和一个标称化偏转 α ，合成吸引转矩 T_a 正好是 $T_+ + T_-$ 之和，对于电极46的吸引为正转矩，而对于电极42的吸引为负转矩。合成吸引转矩作为 α 的函数示于图8； $T_+(\alpha)$ 和 $T_-(\alpha)$ 的曲线是以类似于在与象素120的讨论有关的 T_a 的推导的方式导出的。图9表示所用的变量；这些变量与图4中的变量是相同的，只是加了一个 L' 以测量在扭转片30下方的寻址电极42和46的长度。将 L' 表示为一个标称化的间距 β 是方便的， β 定义为：

$$\beta = \frac{L'}{L/\sqrt{2}}$$

这样，对于象素120， L' 就等于 $L/\sqrt{2}$ ，而 β 就等于1。根据这一定义以及积分变量的变化， T_+ 的计算是：

$$\begin{aligned} \tau_+ &= \int x dF_x = \frac{1}{2} \epsilon_0 \phi^2 \int_0^{L'} \frac{2x(L/\sqrt{2} - x)}{(z_0 - x\theta)^2} dx \\ &= \frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 \phi^2 L^3}{z_0^2} \frac{1}{\alpha^2 \sqrt{2}} \int_0^{1-\beta} \frac{w(\alpha - w)}{(1-w)^2} dw \end{aligned}$$

这是通过部分分式的直接积分，得到

$$\begin{aligned} \tau_+ &= \frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 \phi^2 L^3}{z_0^2} \frac{1}{\alpha^2 \sqrt{2}} \left[(\alpha - 2) \log(1 - \alpha\beta) + \frac{\alpha\beta(\alpha\beta + \alpha - 2)}{1 - \alpha\beta} \right] \\ &= \frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 \phi^2 L^3}{z_0^2} g(\alpha, \beta) \end{aligned}$$

其中 $g(\alpha, \beta)$ 是由方程式规定的无量纲函数。设 $\beta=1/2$ ，则导出图 8 的曲线。

为了分析象素 20 的工作，首先考虑升高施加于片 30 和着陆电极 40 与 41 上的正差偏压 V_0 的作用，这时候，寻址电极 42 和 46 保持为零电位。（当然，这样产生的转矩与将 V_0 施加到两个寻址电极而片 30 和两个着陆电极接地所产生的转矩是相同的，负的 V_0 也给出对称的结果，但为了符号的简化仅考虑正的 V_0 。正如对于象素 120 的分析那样，具有零合成转矩（吸引转矩 T_a 加上回复转矩 T_r ）的点的计算确定了平衡点。现在 T_r 与象素 120 的相同，因为 T_r 仅取决于扭转片偏转和扭转铰链的扭转系数；然而，象素 20 的吸引转矩 T_a 是弯曲的、对称的，并在 $\alpha=0$ 的情况下通过零点（见图 8），与象素 120 在 $\alpha=1$ 的情况下为不弯曲的转矩而在 $\alpha=0$ 的情况下为正转矩（见图 5）形成对照。这就导致如下所述与先前所讨论的象素 120 的工作性质上很大的不同。

图 10 显示象素 20 在小电压 V_0 和寻址电极 42 及 46 接地的状况下的 T_a 和 T_r ，在 $\alpha=0$ 的情况下，合成转矩为零，片 30 保持不偏转。注意，对于任意非零的 α （包括 $\alpha=1$ ，那时片 30 落到着陆电极 42 和 46 中的一个上），合成转矩使片 30 回复到不偏转状态（ $\alpha=0$ ），这是唯一的稳定平衡。

因此这是一个单稳态工作模式。

当差偏压从 $V_B - V_1$ (图10) 升高到 $V_B - V_2$ (图11), 出现零合成转矩的两个附加点: 除了 $\alpha=0$ 处的点以外的靠近 $\alpha = \pm 1$ 处的点“P”和“- P”。 $\alpha=0$ 仍然是稳定平衡, 然而点“P”和“- P”则是不稳定的, 类似于象素120 在图5 中的点Q。对于较小的 $|\alpha|$, 在“P”或“- P”附近的小的偏移提供一个合成转矩, 使片30回复到不偏转状态 $\alpha=0$, 对于较大的 $|\alpha|$, 在“P”或“- P”附近的小的偏移提供一个合成转矩, 使片30落到着陆电极40或41上 ($\alpha = \pm 1$), 因此, 对于这个差偏压, 片30有三个稳定平衡状态: $\alpha=0, \pm 1$ 。因而这是一个三稳态的工作模式。

再将差偏压 $V_B - V_2$ 升高到 $V_B - V_0$ (见图12) 使得 T_a 和 T 曲线在 $\alpha=0$ 处相切, $\alpha=0$ 不再成为一个稳定平衡状态。确实, 在 α 为零左右的情况下, 任何小的偏移都会有 $|T_a| > |T_r|$, 而片30会落到一个着陆电极上 ($\alpha = \pm 1$)。对于比 V_0 更大的差偏压 V_B , 象素20继续有两个稳定点: $\alpha = \pm 1$, 因而这是一个双稳态工作模式。见图13。

总之, 对于两个连接成相同电位的寻址电极, 象素20在小的差偏压下是单稳态的 ($\alpha=0$), 升高差偏压, 它就变成三稳态 ($\alpha=0; \pm 1$), 而对于等于和大于 V_0 的差偏压, 它将处在双稳态 ($\alpha = \pm 1$)。这个随着差偏压的升高出现的动作变化过程可以通过绘制对于差偏压 V_B 的不同值作为片偏转函数的片30的势能曲线来图示说明: 见图14。对于小的差偏压值 (在图14中 $V_B = 0$), 势能从 $\alpha=0$ 起沿两个方向增加, 而片30是单稳态的, 只有零偏转一个稳定点。当 V_B 升高到 V_1 , 势能曲线的斜率在 $\alpha = \pm 1$ 处变成0, 在这些点, 合成转矩为零。对于 $V_B > V_1$, 在 $\alpha = \pm 1$ 处势能减小, 而在 $\alpha=0$ 和 $\alpha = \pm 1$ 之间的势垒增高, 片30现在是三稳态的。再将 V_B 升高到 V_0 , 导致在 $\alpha=0$ 处势垒合并和消失, 对于 $V_B \geq V_0$, 片30变成双稳态的。

使得象素30成为双稳态所需要的最低差偏压 V_0 推导如下。

将 V_B 施加到片30和着陆电极40与41上，并使寻址电极42和46接地，通过寻址电极在片30上产生的合成转矩为：

$$\begin{aligned}\tau_a &= \tau_+ + \tau_- = \frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 V_B^2 L^3}{z_0^3} (g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta)) \\ &= \tau_0 \Delta g(\alpha, \beta)\end{aligned}$$

其中， $\Delta g(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta)$ ， $g(\alpha, \beta)$

是先前关于象素120的分析中已定义的无量纲的函数， T_0 是有量纲

的量 $\frac{\frac{1}{2} \epsilon_0 V_B^2 L^3}{z_0^3}$ 。图18表示这个函数。于是， V_0 是使得 T_a 和 T_r 相切于 $\alpha=0$ 的这样一个 V_B 值。

$$\left. \frac{\partial \tau_a}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} = \left. \frac{\partial \tau_r}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$$

使用以前给出的定义，这可表示为：

$$\frac{\epsilon_0 C V_0^2 L^4}{z_0^3} = \frac{2\sqrt{2}}{\left. \frac{\partial \Delta g}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}}$$

如果铰链扭转系数 c 是已知的，则对于 V_0 可解出前面的方程式，这个 V_0 正是使象素成为双稳态的差偏压，如果 c 是未知的，那末 V_0 可以表示为在模拟型式里用于象素工作的极限电压 V_c 的百分率，并用实验测定。

为了使一个双稳态的象素可寻址，必需确定一个较好的旋转方向。如果两个寻址电极42和46都接地，当施加差偏压 ($V_B > V_0$) 到片30和着陆电极40与41上时，在 $\alpha=0$ 附近的微小振动会使片30随机旋转并落到一个着陆电极上。然而，如果在施加差偏压之前，使寻址电极置于电位 $\phi_+ = -\gamma V_B$ ，这时 γ 是一个远小于1的正数，然后再施加差偏压 V_B 到片30和着陆电极40与41上（见图15），就会产生一个合成转矩使片

30朝着着陆电极41旋转。这在图16中用 T_a 曲线表示。事实上，扭转片因 ϕ_+ 的符号与 V_B 的符号相反而被触发进入 $\alpha=+1$ 的稳定状态。注意， ϕ_+ 和 V_B 的符号相反意味着一旦施加了差偏压，即使片30仍不偏转，对于寻址电极46的吸引却比对于寻址电极42的吸引大。此外，小数值 γ 意味着在施加 V_B 之前，片30要达到一个类似于图5中的点“P”的稳定平衡点仅需转过一个小距离。对称地，施加一个触发电位 ϕ_- 到寻址电极42上，因差偏压的施加，将使片板30旋转到着陆电极40上。也就是说，如果触发电位 ϕ_+ 的符号与 V_B 的符号相同，那末这近似地等效于在施加差偏压的情况下将一个符号相反的触发电位施加到对立的寻址电极上。

只要维持 V_B ，即使去除触发电位 $\phi_+ = -\gamma V_B$ 并且寻址电极恢复接地，处于稳定状态 ($\alpha = \pm 1$) 的片30仍保持在该稳定状态。为了触发片30从一个稳定态到另一个稳定态，差偏压必需瞬间断开。当差偏压重新施加时，两个寻址电极的电位被“采样”，片30被触发到合适的稳定状态。图17是片30在一个 $-V_B$ 的情况下在 $\alpha=1$ 和 $\alpha=-1$ 之间交替变换。

γ 的大小刚好是寻址电压与差偏压之比；象素20的工作电压较低能够使 γ 较小。对于 γ 的分析是根据当差偏压 $-|V_B|$ 施加到片30和着陆电极40与41上而电极42接地时考虑由电位为 $\phi_+ = \gamma |V_B|$ 的电极46产生的吸引转矩来着手的（假定寻址电压为正，差偏压为负），由于电位差为 $\phi_+ + |V_B|$ ，

$$\begin{aligned} \tau_+ &= \frac{\frac{1}{2}\epsilon_0(V_B + \gamma V_B)^2 L^3}{z_0^2} g(\alpha, \beta) \\ &= (1 + \gamma)^2 \tau_0 g(\alpha, \beta) \end{aligned}$$

由接地的电极42产生的吸引转矩与先前导出的相同：

$$\tau_- = -\tau_0 g(-\alpha, \beta)$$

因而合成吸引转矩是

$$\tau_a = \tau_0 [(1 + \gamma)^2 g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta)]$$

图19表示 $\gamma=0$ 和 $\gamma=0.1$ 的 T_a , 并显示了对于 $\gamma=0$, 象素20是双稳态的, 在 $\alpha=0$ 没有一个占优势的旋转方向。反之, 对于 $\gamma=0.1$, 在标以“P”的点合成转矩为零, 对于 $\alpha > -|\alpha_p|$, 片30朝着着陆电极41旋转, 而对于 $\alpha < -|\alpha_p|$, 片30朝着着陆电极40旋转。现在, 通过使用差偏压, γ 还与在 $\alpha=0$ 处的转矩增益有关, 该增益定义为在施加寻址电压 $\phi_+ = -\gamma V_B$ 加上施加差偏压 V_B 的情况下在 $\alpha=0$ 处的合成吸引转矩与在施加寻址电压 $\phi_+ = -\gamma V_B$ 但不施加差偏压的情况下在 $\alpha=0$ 处的合成吸引转矩的比率。因此

$$\begin{aligned} G &= \frac{\tau_a(0, \beta) V_B}{\tau_a(0, \beta)_0} \\ &= \frac{(V_B + \gamma V_B)^2 g(0, \beta) - V_B^2 g(0, \beta)}{(\gamma V_B)^2 g(0, \beta)} \\ &= \frac{(1 + \gamma)^2 - 1}{\gamma^2} \\ &= 1 + \frac{2}{\gamma} \end{aligned}$$

例如, 如果 $V_B = -50$ V, $\gamma = 0.1$ (所以寻址电压 $\phi_+ = +5$ V), 那末 $G = 21$ 。这意味着当 5 V 寻址电压与一个 50 V 的差偏压相结合时在 $\alpha=0$ 处的转矩比当单独使用 5 V 寻址电压时在 $\alpha=0$ 处的转矩大 21 倍。这个转矩增益的概念有助于说明差偏压的性能: 提供由一个小寻址电压产生的转矩以一个增益, 当它单独作用时却并不产生一个净转矩。

在 $\beta < 1$ 的条件下在象素20里使用寻址电极的优点是: 在相同的工作条件下, 当片30碰撞着陆电极40或41时, 它所作的着陆比起当象素120的片130碰撞电极142或146时片130所作的着陆来是软着陆。

首先考虑象素120。图20说明在寻址电极146上施加一极限电压，然而电极146的宽度减小到片130的半宽度乘 β 倍（这个 β 与在象素20里的 β 相同，并且如果片130碰撞电极146，则必需避免吸引转矩无穷大的特性）这样的情况下象素120的吸引转矩和回复转矩。着陆转矩正好是在着陆偏转时（ $\alpha=1$ ）吸引转矩和回复转矩之差，而标称化到回复转矩的着陆转矩是这个差值除以在着陆偏转时的回复转矩：

$$\begin{aligned} \tau_L &= \frac{\tau_a(1, \beta) - \tau_r(1, \beta)}{\tau_r(1, \beta)} \\ &= \frac{g(1, \beta) \alpha_c}{g(\alpha_c, \beta) 1} - 1 \end{aligned}$$

用20的几何图形用以代替 $T_T(1, \beta) = T_0 g(\alpha_c, \beta) / \alpha_c$ 因此，如果 β 能够选择得使极限偏转（ α_c ）近似等于1，那末 T 趋近于零。对于 $\beta=0.5$ ，极限偏转 $\alpha_c=0.9$ ，计算得 T_L 为0.011，所以在着陆时着陆转矩仅为回复转矩的1%。

在电极146上加一层电介质层，就有可能使用 $\beta=1$ 的宽电极，因为这可防止片130碰撞电极146和毁坏（实际上 α 局限于一个略小于1.0的值）。因此，着陆偏转 α_L 可小于1，而趋近于1的乘积 $\alpha\beta$ 是 $g(\alpha, \beta)$ 里的对数奇点。对于 $\beta=1$ 和 $\alpha_L=0.987$ （这相当于在空气中工作的具有覆盖以2000 Å的二氧化硅层以及一个4 μm厚的隔层的多晶硅电极146的象素120）计算得标称化着陆转矩约为3.06，极限偏转 $\alpha_c=0.54$ 。因此， $\beta=1$ 的标称化着陆转矩与 $\beta=0.5$ 的标称化着陆转矩的比率为约278，这就表明了 β 在标称化着陆转矩上的作用之大。

在鉴定软着陆的效用时要考虑两个效应。第一个效应为动态效应，它涉及由运动的片碰撞电极（无论是着陆电极还是在寻址电极上的电介质）的冲击作用产生的机械损耗。第二个效应是静电效应，它涉及在片和电极之间产生的由一个持续的着陆转矩所造成的冷熔焊作用。

静电效应可如同刚才讨论过的那样通过减小着陆转矩使之减小，而动态效应可通过减小在着陆时的动能（速度）来减小。

着陆时的动能可以在取决于机械阻尼程度的两种极端情况下作计算。阻尼是通过当片快速旋转（ ≈ 1 微秒）向碰撞电极时在片和电极之间的空隙里空气的移动而造成的。两种极端情况是过阻尼和无阻尼。

在过阻尼的情况下，在不存在一个持续的吸引转矩时，片的速度迅速下降至零。因此，对于选择 β 以减小标称化着陆转矩的情况，着陆时的速度便下降到接近为零。

在无阻尼情况下，动能不断地增大，直至片碰撞电极，它可以通过从 $\alpha=0$ 到 $\alpha=1$ 对 $T_a - T_r$ 求积分来计算。对于 $\beta=0.5$ 的这个积分与对于 $\beta=1.0$ 的这个积分之比甚至于比先前所考虑的标称化着陆转矩的比率更小。因此，软着陆对于象素120 在减小静电效应以及动态着陆效应方面是有效的。

在差偏压的大小处于正好使得象素20成为双稳态（ $V_B = V_0$ ）的情况下，对象素20的软着陆分析如下。图21显示 $\gamma=0$ 的 T_a （曲线序号1）和 $\gamma=0.1$ 的 T_a （曲线序号2）。现在条件 $V_B = V_0$ 意味着吸引转矩曲线和回复转矩曲线在 $\alpha=0$ 处相切：

$$\tau_0 \frac{\partial}{\partial \alpha} (g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta))_{\alpha=0} = \tau_r$$

双稳态象素20的标称化着陆转矩是：

$$\begin{aligned} \tau_L &= \frac{\tau_a(1, \beta) - \tau_r(1, \beta)}{\tau_r(1, \beta)} \\ &= \frac{(1 + \gamma)^2 g(1, \beta) - G(-1, \beta)}{\frac{\partial}{\partial \alpha} (g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta))_{\alpha=0}} \end{aligned}$$

对于 $\beta=0.5$ 和 $\gamma=0.1$ ，标称化着陆转矩是0.74，亦即，着陆转矩是回复转矩的74%。反之，对于 $\beta=1.0$ ， $\alpha=0.987$ ， $\gamma=0.1$ ，标称化着陆

转矩是15.8，所以着陆转矩的比率是21.4。

标称化着陆转矩能够通过测量保持电压 V_H 用实验方法测定。如图22所示。上面的曲线代表在差偏压取得使象素20处于双稳态的最小值和寻址电压 $\phi_a - \gamma V_B$ 以及片借助着陆转矩 T_L 着陆的情况下的吸引转矩，现在假定 γ 是固定的，而 V_B 的幅值缓慢地减小到 V_0 之下。在 $V_B = V_H$ ， $T_a(1)$ 的大小已经减小到 $T_T(1)$ ，而着陆转矩已经减小到零。对于较小的 $|V_B|$ ，合成转矩是朝着使片30回复到在图22中标以“P”的模拟平衡位置。因此，当 V_B 的幅值缓缓地减小而变得略小于 V_H 时，片30突然从其着陆位置释放而回到小得多的偏转模拟平衡状态。

象素在双稳态模式下的工作能够利用如图23中的滞环曲线来描述，图23是对于一个固定的 γ ， α 作为差偏压 V_B 的函数的曲线图。在点(0)， $V_B = 0$ ，所以 $\phi_a - \gamma V_B$ 也为零，片30不偏转 ($\alpha = 0$)。从点(0)到点(1)，象素是处于模拟型式，在寻址电极46上施加寻址电压 ($\phi_a - \gamma V_B$)，将寻址电极42接地，结果是片30偏转到稳定平衡态 $\alpha(V)$ ，它小于1。当 V_B 升高， α 增大，直至 $V_B = V_0$ ，在点 P(1) 达到双稳态工作，这时偏转度为 α_c ，而在点(2)，片30落到着陆电极41上。现在片30停留在着陆电极41上，当 V_B 的幅值减小，直至在点(3)减小到 $V_B = V_H$ ，片30从电极41释放，被释放的片30以类似方式回复到对应于 V_H 的偏转，见图23的点(4)。

正如任何数字式装置的情况一样，如果象素20某些参数从预期的工作点偏移大于一定的量，则工作在双稳态模式的象素将不转换到合适的稳定状态。允许偏差的量叫做噪声容限。如果象素的任一参数的变化大于噪声容限，那末象素就转换到不正常状态。而且，任何噪声或者一个参数从预期的工作点偏移都减小象素其它参数的噪声容限。

可能导致象素20不正常的双稳态工作的两个最重要的参数偏差是 (i) 扭转片30偏离平面度，以及 (ii) 寻址电极42和46不对准扭转铰链

34、36和片30。首先考虑片30偏离平面度的容限。用 $\Delta \alpha$ 表示。图24显示了对于寻址电极为电极46的象素20的吸引转矩 T_a ($\alpha=+1$ 时将片30偏转到着陆电极41)还显示了片30对于平面度的三个不同偏差的回复转矩 T_r (标以(1),(2)和(3)的虚线)。对于线(1),片30是平的,合成转矩使片30朝着 $\alpha=+1$ 旋转。对于线(2),片30有一个固定的初始偏转 $-\alpha_m$ (朝着着陆电极40),由于该固定的初始偏转的存在,在寻址电极46上施加差偏压外加寻址电压,并使寻址电极42接地,就产生零合成转矩。对于线(3),固定的初始偏转是如此大,以至在寻址电极46上施加差偏压外加寻址电压,并使寻址电极42接地,产生一个使片30朝着 $\alpha=-1$ 旋转片30的合成转矩,亦即,导致错误的稳定态。因此

$|\alpha_m|$ 是来自片平面度的最大可允许的偏差,称为角偏差容限。
 $|\alpha_m|$ 可通过简单地求解下列方程式计算。

$$\tau_a(\alpha) = \tau_0[(1+\gamma)^2 g(\alpha, \beta) - g(-\alpha, \beta)] = 0$$

对于 $|\alpha_m| \ll 1$, 函数 g 容易作近似, 解为

$$\alpha_m \approx \frac{1/2 - 1/3\beta (1+\gamma)^2 - 1}{2/3\beta - 1/2\beta^2 (1+\gamma)^2 + 1}$$

当然, 沿着着陆电极46方向的角容限对称相等。

对于 $\beta=0.5$ 和 $\gamma \ll 1$, α 的表示式约简为

$$\alpha_m = \pm 1.6 \gamma$$

如所预料的那样角偏差容限随同 γ 增大, 当平面度下降时, 要正常工作, 需要一个就差偏压而言是大的寻址电压。例如, 对于 $\gamma=0.1$ 和着陆角为 10° , $|\alpha_m|=0.16$ 这对应于平面度的角偏差为 1.6° (注意 α 是标称化偏转度) 一个 0.5° 的平面度在实际中能常规地获得。

寻址电极42和46不对准片30和扭转铰链34和36的一种类型在图25的平面图里表示。亦即, 电极42和46不沿着对角线对准, 而是朝着着

陆电极40和离开着陆电极41的方向移动间距 ϵ ，但是其它所有的排列都是正确的。为了简便起见，仅分析这样一种不对准情况。首先，如图25所示，这种不对准形成了片30和电极42与46间差离的阴影区域，这些区域导致由差偏压和寻址电压产生的转矩的改变。来自区域 $\pm \Delta A_2$ 的转矩的变化由于它们的力矩臂小而忽略不计，并且假定电极46有寻址电压 $\phi_a = \gamma V_B$ ，电极42接地。这样，区域 $-\Delta A_1$ 减小正转矩 T_+ ，而区域 ΔA_1 增大负转矩 T_- 。图26表示对于三种不对准的情况在吸引转矩上的影响。对于曲线(1)，不对准度 ϵ 为零，合成转矩是正的，所以片30旋转到合适的着陆电极上。对于曲线(2)，不对准度等于 ϵ_m 在 $\alpha=0$ 附近的吸引转矩接近于回复转矩，合成转矩为零，所以片30的扰动决定片30是旋转到着陆电极40上还是旋转到着陆电极41上。对于不对准度 $\epsilon > \epsilon_m$ 的曲线(3)，合成转矩在 $\alpha=0$ 处是负的，片旋转到着陆电极40上而不是着陆电极41上，亦即，导致错误的稳定状态。为了测定容限 ϵ_m ，简单地估计不对准度 ϵ 对 T_+ 和 T_- 的影响，并在 $\alpha=0$ 处使 T_a 为零求解 ϵ 。当然， ϵ 的不对准正如同一个不同宽度的电极，所以

$$T_+(\alpha) = \tau_0(1+\gamma)^2 g(\alpha, \beta - \epsilon\sqrt{2}/L)$$

$$T_-(\alpha) = -\tau_0 g(-\alpha, \beta + \epsilon\sqrt{2}/L)$$

对于非常小的 α ， $g(\alpha, \beta)$ 的渐近形式可从 g 的定义容易地推导出：

$$g(\alpha, \beta) \approx \frac{\beta^2(3-2\beta)}{6\sqrt{2}} + O(\alpha)$$

对于小的 ϵ ， T_a 在 $\alpha=0$ 处变为零的条件正是

$$(1+\gamma)^2(\beta - \epsilon\sqrt{2}/L)^2 - (\beta + \epsilon\sqrt{2}/L)^2 = 0$$

所以

$$\frac{\epsilon_m}{L} \approx \frac{\beta\gamma}{2\sqrt{2}}$$

例如，在 $\gamma=0.1$ 和 $\beta=0.5$ 的情况下，不对准容限是 $\epsilon_m=0.02L$ ；对于 $L=12.5 \mu\text{m}$ 的象素20，这时 $\epsilon_m=0.25 \mu\text{m}$ ，它超过一般的电流分档器

不对准度。当然 γ 增大使 ϵ_{eff} 也增大。

寻址电极的不对准也能如图27最佳实施例象素220的横截面图所示通过使用平衡电极来补偿。象素220具有寻址电极242和246,着陆电极240和241,外加插入寻址电极和着陆电极之间的平衡电极243和245。如果不存在不对准,那末平衡电极被加偏压到差偏压的电压,如果存在寻址电极沿着着陆电极240方向的不对准(就象先前所讨论的)那末平衡电极245的偏压就向接地点移动,以提供一个附加的转矩(增加 T_+)来抵消不对准。如果不对准是在另一个方向,那末,平衡电极243的偏压向接地点移动。

上面的噪声容限的计算不是独立的,各种作用相互影响。使容限减小。例如,图28表示在不对准度为零和等于容限的一半($\epsilon=1/2 \epsilon_{\text{eff}}$)的情况下对于两个双稳态寻址状态(寻址+电极46或-电极42)的吸引转矩。对于对准和不对准两种情况显示了角偏差 α_{eff} 的容限,显然,不对准情况下角偏转的容限对应于+电极为对准情况的容限的一半,对应于-电极则比对准情况的容限大50%。当然,理由是在角偏转容限里的对称和非平面度使不对准容限减小,而增大 γ 会扩大容限。

尽管片30和着陆电极40与41是电气连接的,并且在工作时片30软着陆在着陆电极40和41上,但片30仍可能附着到着陆电极40或41上。因此,下面的电复位方法可用于象素20以增大由扭转铰链34和36提供的回复转矩将片30拉离着陆电极40或41并且使片30复位到一个不偏转的位置。第一个方法使用寻址电极42作为复位电极,而寻址电极46用于寻址,象素20工作于单稳态或双稳态模式,并仅有一个方向的旋转(转向着陆电极41)。复位方法包括在差偏压和寻址电压都接地时将一个高电压脉冲(1微秒宽90伏特高)加到复位电极42上。见图29的时间图。它显示差偏压 ϕ_b 加到片30和着陆电极40和41上,在 ϕ_b 为零的时候将复位脉冲 ϕ_r 加到电极42上,将一系列相对于偏转、不偏转、偏转

的寻址电压 ϕ_A 加到电极46上，结果使片偏转 α 。如果片30是附着在着陆电极41上，那末在复位电极42上的脉冲提供一个短期转矩以帮助扭转铰链34和36的回复转矩拉片30离开着陆电极41。然而，如果片30不附着在着陆电极41，相反，却是不偏转的，则在复位电极41上的脉冲将使片30转向着陆电极40。但是脉冲的短时间(1微秒)小于片30的时间常数(约12微秒)片30不会到达着陆电极40，扭转铰链34和36的回复转矩使片30回到不偏转状态。沿着着陆电极40的方向的短期扰动在图29里用下降到负 α 值来表示。同样，如果片30不附着于电极，那末扭转铰链34和36的回复力促使片30回到 $\alpha=0$ ，如同在图29的 α 曲线图里用虚线表示的那样。在一单片的集成电路芯片上的象素20阵列的所有复位电极可在芯片上连在一起，由芯片外的一个高压脉冲驱动器供给复位脉冲。

第二种复位方法示于图30a-B，利用扭转铰链34和36的非旋转弯曲帮助将附着(于电极)的片30拉离着陆电极40或41。在这种方法里，复位脉冲加到着陆电极40和41及片30上，而寻址电极42和46接地。在一个象素20的阵列里，一根差偏压总线可用于将所有的着陆电极连接在一起，并且该总线被连接到包含扭转片30的反射层26-28上，所以复位脉冲恰被加到差偏压总线上。与第一种复位方法相反，采用第二种复位方法，象素20可工作于任意模式。在寻址电极接地的情况下，加到片30上的复位脉冲(一般为1微秒宽60伏特高)使片30向着衬底22偏转。而不管片30是未偏转的还是附着于一个着陆电极上。扭转铰链34和36的非旋转弯曲存储该偏转的势能。见图30a的时间图，和图30B用于说明该偏转。在图30a中，片和着陆电极偏压 ϕ_b 有一个与差偏压 $(-|V_b|)$ 极性相反的复位脉冲 $(+|V_R|)$ ，不过复位脉冲也能有相同的极性；寻址电压(对于电极46为 $\phi_A(+)$ ，对于电极42为 $\phi_A(-)$)使片30作一顺序偏转，先到着陆电极41，再到着陆电极40，最后回着到

陆电极41。在复位脉冲的末端，该存储的势能被释放，提供一个冲力推片30笔直向上。这样，一个未偏转片30仅呈现在未偏转状态周围的垂直的阻尼振荡，而一个附着片30被拉离着陆电极，回复转矩使它回到未偏转状态，外加也呈现垂直的阻尼振荡。由于这两个复位方法使片复位而不管它的着陆方向怎样，由于由接触所造成的静电放电引起的片的任何偶然的阱落和附着作用在加上一个复位脉冲以后立刻就被自动地校正。参见图30 B，它是用以说明垂直偏移片30的沿着位于寻址电极42和46之间的扭转铰链轴向的横截面剖视图。

图31是第二个实施例象素320, 320', 320'' ……的线性阵列310的一部分的平面图，每一个象素都与象素20相同。对于象素320显示了片330, 扭转铰链334和336, 着陆电极340和341, 以及寻址电极342和346, 与象素320'是相同的。注意，着陆电极全部连接到一中心金属线343上。线性阵列310能用于电子照相印刷，如图32 A- C所说明的。图32 A是一个透视图，图32 B- C是剖视图和平面图，它们显示了包括光源和光学装置352 阵列310, 成象透镜354 和光电导转筒356。从光源352 发出的光呈光排形358 并照射到线阵310, 从转片330, 330', 330'' ……之间的区域反射的光形成光排360, 从负的偏转片反射的光形成光排361 而从正的偏转片反射的光在光排362 内，通过成象透镜354 并聚焦在转筒356 上的由一系列光点组成的线区364 里，每一个偏转片对应一个光点。由于线性阵列310 实际上是两行象素，在转筒356 上所成的象是在两行里的点，并且寻址两象素中的一行的电子延迟与转筒的旋转一起使象点回到一条线364 里。因此，已被数字化的和处于光栅扫描形式的一页文本或一帧图象信息能这样印刷：每次馈送一条线的信息到阵列310 上，同时随着转筒356 旋转，在转筒356 上形成一条线364 的光点。这些点象通过一般技术，诸如静电印刷术转印到纸上。如果 θ 是片30朝向着陆电极341 的偏转角，那末当光排35

8 的入射角与线性阵列310 的法线成 2θ 时，光排362 是垂直于线性阵列310 。这个几何图形示于图32 B，它使成象透镜354 定向于线性阵列310 的法线。每一个正偏转片在成象透镜354 产生光源的一个象，如图32 C示意地显示了三个片的成象。

工作在双稳态模式的象素的线性阵列310 优于悬臂片式象素的线性阵列，因为 (i) 双稳态象素在一个大的偏转角下工作，所以光源的角的对边能增大以在转筒上产生一个更明亮的光点；(ii) 关闭的象素的扭转片向相反方向偏转，而不是象悬臂片那样仅仅是不偏转，这使来自关闭的象素的反射角增大一位，并减小了由于片曲面造成的光反差下降，还消除了施加电压为零时的角度偏差的影响；(iii) 亮度的均匀性得到改善，因为偏转角是隔层厚度的线性函数而与工作的非线性区域无关，对于悬臂片来说，在工作的非线性区域，偏转的均匀度对于隔层厚度和铰链柔性是非常灵敏的。

在线性阵列310 里的单个象素的寻址在图33和34里以简化形式说明。图33是一单个象素420 沿着寻址电极446 的横截面图，它显示一输入和一选通门450，图34是表示象素420 和420' 以及寻址电路的平面图。Ti: Si: Al 电极446 通过二氧化硅层444 与 P型硅衬底422 绝缘，偏转片430 的电压施加到电极446 上，对于所有象素的金属层426 —428 加一公共偏压，衬底422 接地，着陆电极441 和440 (合用象素420' 里的着陆电极441') 被连接到金属层426 —428，这样也就连接到片430 。选通门450 是多晶硅，并通过栅氧化层与衬底422 绝缘。n 掺杂区域452, 456, 456' …… 和462, 466, 462', 466' …… 分别形成漏极和源极。对于M O S F E T (金属氧化物半导体场效应晶体管) 用选通门450 作为公共门。寻址电极442 和446 的输入加到M O S F E T 的漏极452 和456，当M O S F E T 由选通门450 导通时，它们便连接到寻址电极上。

制造包括在衬底322 上的寻址电极的象素320 的第一个最佳实施例方法的工艺步骤在图35 A- E的横截面图中说明。

(a) 首先在(100) 硅衬底322 上生长2000 Å热氧化层344, 然后, 在氧化层344 上溅射淀积3000 Å Ti: Si: Al (0.2% Ti 和1% Si), 并构图和等离子蚀刻以形成电极, 见图35a。

(b) 分三次操作使正极性光致抗蚀剂旋涂和烘烤到总厚度为4 μm, 以形成隔层324; 抗蚀剂的三次施加是用来建立厚度, 以便避免抗蚀剂表面当旋涂非常薄的单层时可能发生的起伏。在每一次旋涂抗蚀剂以后, 180°C左右的烘烤是需要的, 为的是防止先前的层溶解在抗蚀剂溶剂中, 以及排出隔层中过量的溶剂。最后的烘烤避免了在片图形光刻法中光致抗蚀剂烘烤的时候在铰链金属下面形成溶剂气泡。注意, 光致抗蚀剂呈平面形覆盖已在衬底表面形成的任一电路。正性光致抗蚀剂最好选择不溶解于氯苯的, 例如酚醛基抗蚀剂, 然后在衬底温度尽可能接近室温的情况下溅射淀积800 Å的 Ti: Si: Al (0.2% Ti 和1% Si)以形成铰链层326。衬底温度尽可能接近室温, 为的是使有机隔层324 和金属层326 之间的热膨胀的不匹配减到最小。而且, 这种铝的合金使在纯铝淀积中出现的突起减到最小。接着, 通过

PEVCD淀积一层1500 Å的二氧化硅。然后对氧化层构图和蚀刻以形成扭转铰链蚀刻挡块348(在平面图中蚀刻挡块348 所占区域形成扭转铰链334 和336 外加每个铰链端部的微小延伸部分), 用于构图和蚀刻的光致抗蚀剂是完全电离的等离子体。见35 B。

(c) 还是在接近室温的温度下溅射淀积一层3600 Å的 Ti: Si: Al (0.2% Ti 和1% Si)以形成片层328, 并旋涂光致抗蚀剂50。金属的淀积是在与铰链层326 的淀积相同的条件下进行的, 因此在金属层之间不产生应力。光致抗蚀剂50被构图以限定等离子蚀刻出入孔332 和等离子蚀刻间隙338 外加铰链334 和336。接着被构图的光致抗蚀

剂作为掩膜用来等离子蚀刻金属层326和328,而铰链蚀刻挡块348阻止了部分铰链层326被蚀刻,这部分就变成铰链334和336。铝合金的等离子蚀刻可以使用氯/三氯化硼/四氯化硼腐蚀气混合物。另一个方法是使用二氧化硅掩膜,比如在步骤(b)中用2000 Å的二氧化硅层构图以代替光致抗蚀剂,在这种替换中,铝合金腐蚀可以用四氯化硅的活性离子腐蚀。注意,铰链的厚度是由层326的厚度决定的,铰链的宽度是由蚀刻挡块348的宽度决定的,因此,铰链334和336的扭转系数可以通过三个不同的工艺过程参数来调整。见图35 C。

(d) 旋涂一薄层正性光致抗蚀剂用作粘附层,下一步是旋涂1.5 μm的PMM A(聚甲基丙烯酸酯)作为一个保护层,将衬底322切割成基片(每一基片变成一个空间光调制器)切割的碎片位于PMM A上面,示于图35 D。

(e) 通过喷涂氯苯使PMM A溶解并立即分离;注意,抗蚀剂(或氧化物)和隔层24不溶于氯苯。因此切割的碎片便被除去,而不使片330直接受到碎片的影响。最后,用一个百分含量小的氟(诸如来自 CF_4 或 NF_3)在氧中对抗蚀剂50和隔层324作各向同性的等离子蚀刻,以除去蚀刻挡块348的暴露部分。该蚀刻是在低温下进行,并控制成仅除去足够的隔层324以在片330下面形成阱。参见图35 E,它类似于图1 B,但是沿着不同的横截面。注意,图35 E显示了蚀刻挡块348的残余,它在图1 A和1 C中省略,因为第二个实施例的制造方法(在下面描述)避免了这些残余,也使图1 A和图2更加清楚。图36a-c和图37a-c分别以平面图和横截面图的形式说明隔层324的蚀刻步骤。

图38以平面图的形式说明包含象素520、520'、520''的第三个实施例的线性阵列的一部分。片530、530'、530''是八角形的,分别带有等离子蚀刻孔532、532'、532''和等离子蚀刻间隙538、538'、

538''；注意，等离子蚀刻间隙538和538'在片530和530'之间有一个公共部分，其它间隙在相邻的象素之间同样如此。在片530、530'、530''下方隔层524里的阱都联在一起形成一个长形阱，如图38中虚线所示。寻址电极542、546、542'、546'…和着陆电极540、541、540'、541'…在图38里也用虚线表示。注意，相邻的着陆电极是合在一起用的，例如，541和540'。为了清楚起见，在图38中扭转铰链534、536…表示成与片530、530'、530''…由同一层做成。

图39a-d用平面图的形式表示另一种片的几何图形。特别是，图39a显示一个具有悬臂铰链572、等离子蚀刻孔574、等离子蚀刻间隙576、寻址电极578和着陆电极579的悬臂偏转片570。悬臂片仅朝一个方向偏转，它有与图5的曲线相同的转矩曲线，但有界限。所以仅可用于单稳态和双稳态（一个稳定偏转点加之落到着陆电极579上）工作。

图39b显示具有扭转铰链581和582、等离子蚀刻孔584、等离子蚀刻间隙586、寻址电极588和着陆电极589的扭转片580。片580仅朝一个方向偏转，它与悬臂片570有相同的工作状态。

图39c显示排列成每四个悬臂片一组的、相邻悬臂反置的悬臂片590、590'、590''…的线性阵列。正如线性阵列510的情况一样，在悬臂片590、590'、590''…下方的阱联接而形成单个的延长了的阱，如虚线所示。为了清楚起见，悬臂铰链592、592'、592''…显示成与片由同一层做成，并且未显示寻址电极和着陆电极。

图39d显示了通过悬臂铰链562、562'、562''…支承于支柱561、561'、561''…上的每四个悬臂片一组的悬臂片560、560'、560''…阵列的部分区域。片的着陆电极可连接成行，诸如电极563，而片通过导电的支柱连接到成行电极564。寻址电极565、565'、565''…通过图中未显示的安装在电极下方的层次里的电路寻址。为了清楚起见，图

中省略了某些电极。

掩埋铰链制造方法的第二个实施例表明在横切面图 (图40 A- E) 和俯视图 (图41 A- C) 中, 俯视图表明铰链不是安置在偏转片的角上而是安置在片的边上。横切面图是在铰链轴的横截方向上作的 (图41 C中的 A A切割)。第二实施例的工艺依赖于将某些金属搬走以便确定铰链的金属区, 代替了掩埋 Si O₂ 的蚀刻挡板。正如第一个实施例的工艺一样, 仅需一次等离子蚀刻就可完成对铰链和薄片金属外层的蚀刻处理。

该工艺首先用阴极真空喷镀法在隔层182(图40 A) 上沉积一薄的铰链层180。三层抗蚀处理用来构成其后成为薄金属区的轮廓, 铰链图形最后就蚀刻在这金属区内。所选定的三层抗蚀处理是“Y. C. Lin, et al, J. Vac. Sci. Technol., B1(4), 1215(1983).” 的 Sesterotious 处理的改进。

改进的 Sestertious 处理首先在铰链金属层180 上旋涂一隔层184(即 PMMA层)。该层厚度 (约5000 Å) 选的比偏转片金属厚度稍大些。与标准处理过程相比, PMMA184 在较低的温度上烘干, 以便在光抗蚀覆层的连续刻蚀期间在显影液中保持较高的溶解速度。接着, 抗反射涂层 (ARC)186旋涂在 PMMA184 上并烘干。

ARC186 涂层用来防止在光致抗蚀剂188 和 PMMA184 之间形成界面层。在连续光刻曝光期间, 它也减低了从铰链金属180 的反射光量。

ARC186 上用正性光致抗蚀剂188 涂覆。光致抗蚀剂188 暴露着且在所要求的铰链光刻图形中冲洗, 最终形成的深度 UV 变硬且烘干。与光致抗蚀剂188 形成的同时 ARC180 也被冲洗。接着, PMMA184 形成暴露的深 UV 淹没, 以致没有被光致抗蚀剂188 所覆盖的 PMMA184 的区域, 其平均分子量下降且变得在氯苯中更易

溶解。PMM A184 上的氯苯冲洗液，迅速溶解着 PMM A184 的披露部分，且过度的氯苯冲洗如图40 A中所示，将在光抗蚀覆层产生约一微米的刻蚀。一粒尘埃足以带走在 PMM A184 冲洗之后的干燥期间抛出的软化的 PMM A的纤维。之后，烘干硬化使光致抗蚀剂188和 PMM A184 中所包含的易挥发成分减少。这些易挥发成分是在 PMM A形成期间吸收了氯苯产生的。

在三层抗蚀图型（光致抗蚀剂188、ARC186、和 PMM A184)形成后，将片金属190 溅射沉积。PMM A184 上的突出的光抗蚀覆盖使得溅射成的片金属190 分裂为两层，如图40 B中所示。然后，通过在氯苯或1-甲基、2-吡咯烷溶液中浸泡和溶解，使片金属190 分离出来。结果（表明在横切面图40 C和俯视图41 A中）形成由一个厚金属区190(该区在其图型边缘192 处形成斜削形)包围着的薄金属区180。

接着，通过光刻形成对应于铰链和偏转片的图型，如图40 D（横切面图）和图41 B（俯视图）中所示。光刻胶的开口部分用图中的194 表示。露着的金属仅仅是用于图41 B中开口部分194 的两个短水平部分的铰链金属，其它地方是片金属190。请注意：这个图型包括铰链和偏转片两个几何结构，与第一个实施例的工艺不同。鉴于此，第二个实施例的工艺是自校准的。铰链金属180 和片金属190 的暴露部分同时进行等离子蚀刻形成铰链和偏转片的几何结构。光刻胶处理掉之后，工艺过程也就完成，且偏转片如图40 E（横切图）和图41 C（俯视图）中所出现的那样。

图42 A是第四个实施例象素620 的阵列610 一部分的顶视图，每个象素620 包括扭转片630,它由扭转铰链634 和636 支撑着，这些铰链依次与柱624,624',624''...，相连接。阵列610 的寻址线路在图42 A中没有表示出来。但阵列610 的全部寻址简略地图示在图42 B中。

每个象素用两个可变电容来表示（一个地址电极对应一个）。且两个M O S F E T（金属氧化物场效应晶体管）控制电容的通道；每一行的所有象素共用一个M O S F E T的栅极，一列中的所有象素共用一个M O S F E T的漏极。阵列610是线寻址；即在某一时刻透过栅极译码器选通相应字线（栅极）的同时，数据送到阵列的某一行象素中，于是该数据加到位线上（漏极），这些位线给悬置的源极充电且相应使偏转片偏转。如图42 B中所示那样，数据可以串行格式输入，且通过串并转换器（“S/P转换器”）也可转变为并行格式输入。这些数据可保持在存储寄存器中（“寄存器”）直到将它加到位线上为止；栅极译码器顺序地选通阵列的行。

图43 A- D是俯视图，逐级说明了某个象素的平面，且图44 A- C是在图42 A和43 A- D中沿着线A- A、B- B和C- C横切的正视图。尤其，图43 A显示了P硅衬底622中的 n^+ 扩散区660,661,662,666,666'……和P⁺沟道分隔区670,672,670',……。扩散线660和661是位线及M O S F E Ts的漏极线，且区662和666是象素620中的M O S F E Ts的悬置的源极。请注意，其它器件与阵列610一样，同样能制造在这一基片上，且阵列610在CM O S片的P阱中形成。图43 B是栅极层，显示了多晶硅字线680和686'，它们与栅极线682,686,682',686',…相连接，为了说明更清楚，图43 C仅说明了具有字线、栅极和悬置源极的电极情况，寻址电极642和646分别经过通道663和667垂直地与悬置源极662和666相连接；然而“着陆”电极640和641与邻接的象素共享并通过反射层中的转片和铰链相互连接。图43 D是隔层且显示了金属柱624,624',624'',…，它们代替了象素20中的隔层24，是用来支撑反射层626和628的，在这反射层中形成了偏转片630,630',630''……。金属柱624,624',624''……，在电气上把片630,630',630''……与“着陆”电极642,646……相连通。

对比一下象素20，在象素20中，隔层24把转片与寻址和“着陆”两电极隔离开来了。图42 A是反射层的俯视图。

图44 A- C是图42 A中的沿线A- A、B- B和C- C的横截面的象素620的正视图。它说明了柱624,624',624''……支撑反射层（铰链金属626加上偏转片金属628）的情况，且它们是从铰链和偏转片金属沉积中制造出来的。绝缘的二氧化硅（氧化物）644约为8000 Å厚，但是已经逆流斜向孔洞的侧壁向下流进悬置源极662,666,662'，……，在沉积形成金属电极642,646,642'，……期间，有助于形成涂层厚度。栅极氧化物643约为800 Å厚，且在对沉积的多晶硅进行蚀刻时保护字线和栅极682,686,682'……的形成。

除了隔层（第一种方法的324和第二种方法的182）是在铰链和片金属沉积形成之前，被模制形成柱624,624',624'',……的孔洞外，阵列610的制造方法与第一个和第二个所述实施例相类似。之后，通过对铰链和薄片金属的沉积而形成柱，隔层统统蚀刻离开象元。电极下面的电路用标准的硅处理工艺来制造。

只要保持把寻址电极和“着陆”电极分开（在所述实施例中该“着陆”电极导致“软着陆”），就可对所述实施例进行多方面改进。进而言之，例如对称的偏转片可采用差分偏压。寻址电极可移至“着陆”电极的外侧，尽管这样做由于边缘场是引力的基础须对引力矩作出比先前更仔细的分析。此外尺寸和形状也可改变，例如铰链长度、宽度和厚度（即使铰链是由片金属做成的），薄片的大小和厚度，隔层的厚度等等。甚至片和铰链的几何形状也可改变，如图39中所示。事实上，在偏转片中可做出各种厚、薄部分的样式，且用每层中具有蚀刻挡板的三层或更多层的金属层可做出各种偏转片结构。材料也可改变，如用作金属层的Cu:Al、Ti:W、铬等，不同的保护层或绝缘体象用于隔层或复合隔层包括导电底层的聚酰亚胺、隔层的辐射硬化，其它

用于衬底、电极或金属电极的半导体材料等等。埋藏的铰链蚀刻挡板可以是不同材料，如钨金属；且处理后不会在铰链金属和片金属间留下残物。“着陆”电极用层薄的二氧化硅涂覆，或用其它能防止转片与“着陆”电极相粘结的材料来涂覆；或“着陆”电极用不同于转片的材料来制作，以便阻止片与“着陆”电极粘结；或“着陆”电极的外轮廓做得虽与片接触，但又远离片的边缘和角端。各种寻址线路可做电极下面，包括通向衬底背面的通道。

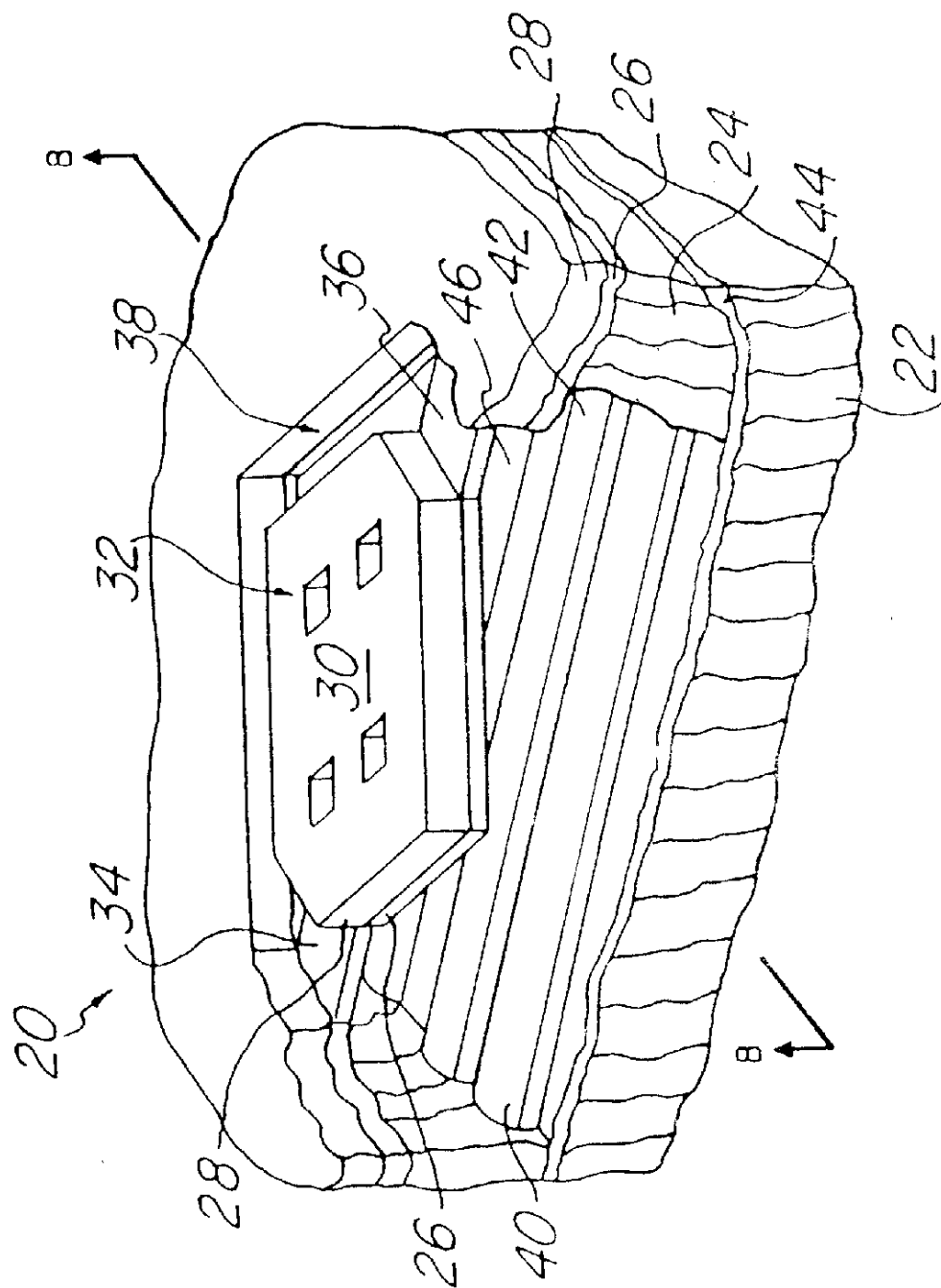


图 10

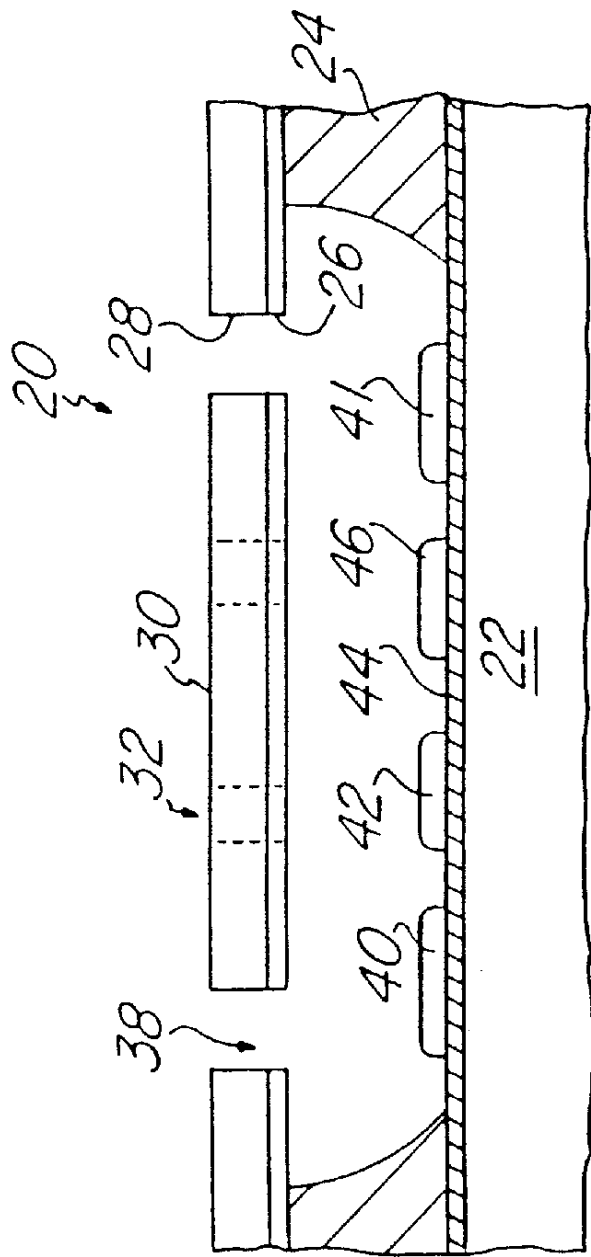
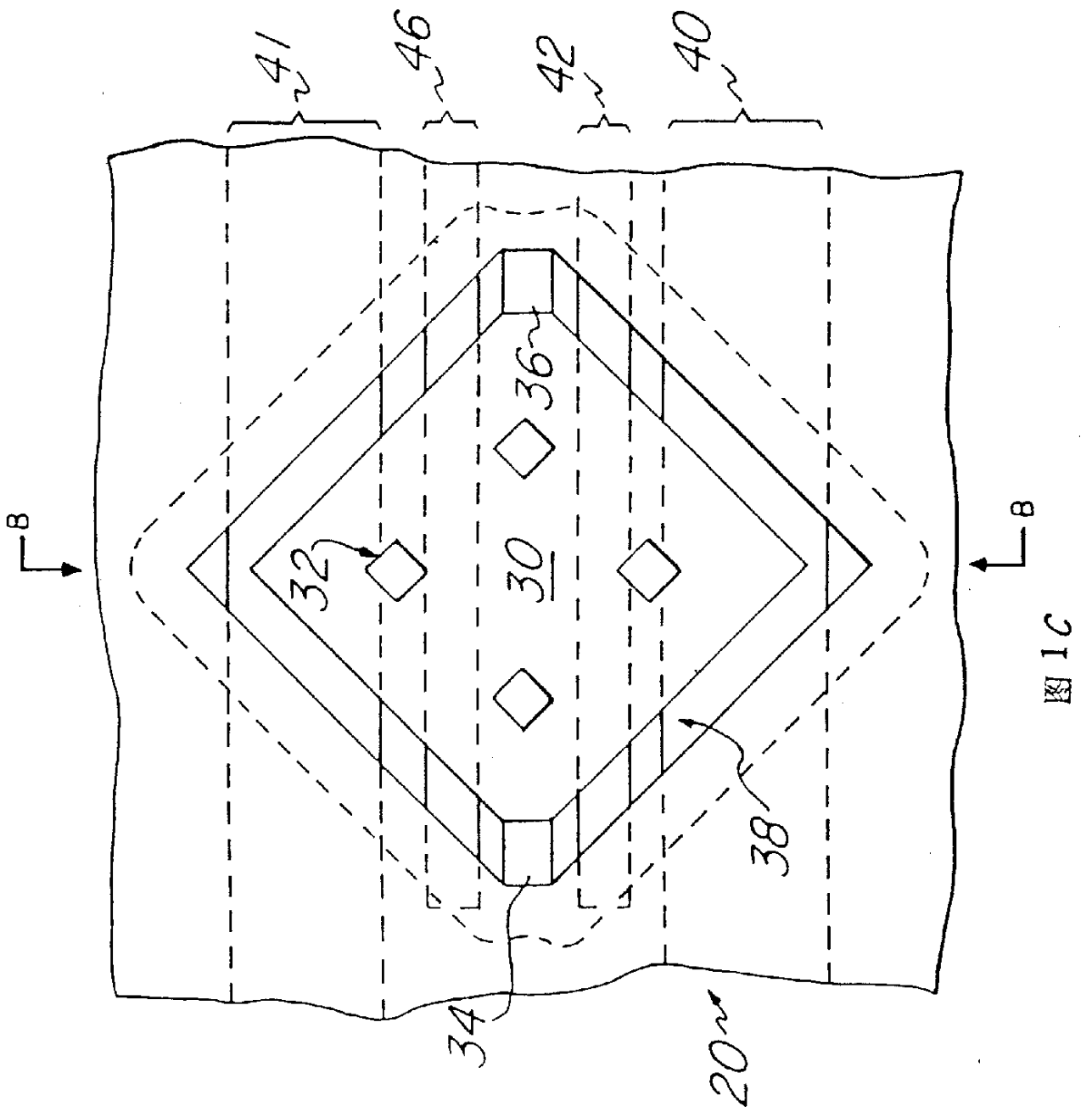


图 10



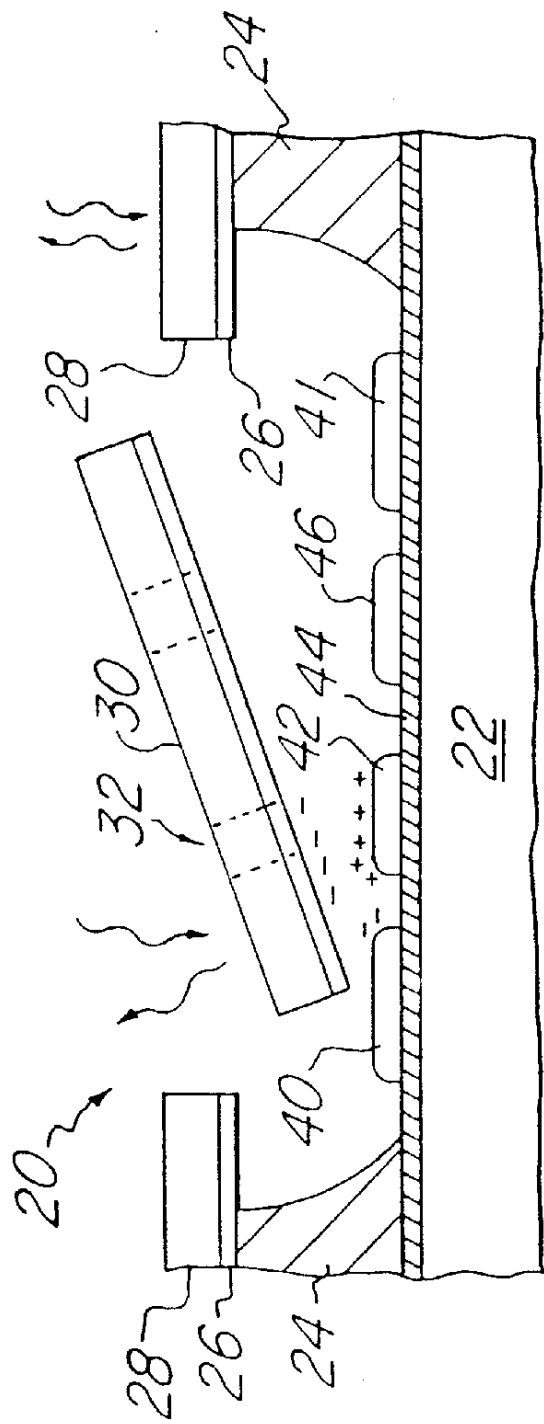


图2

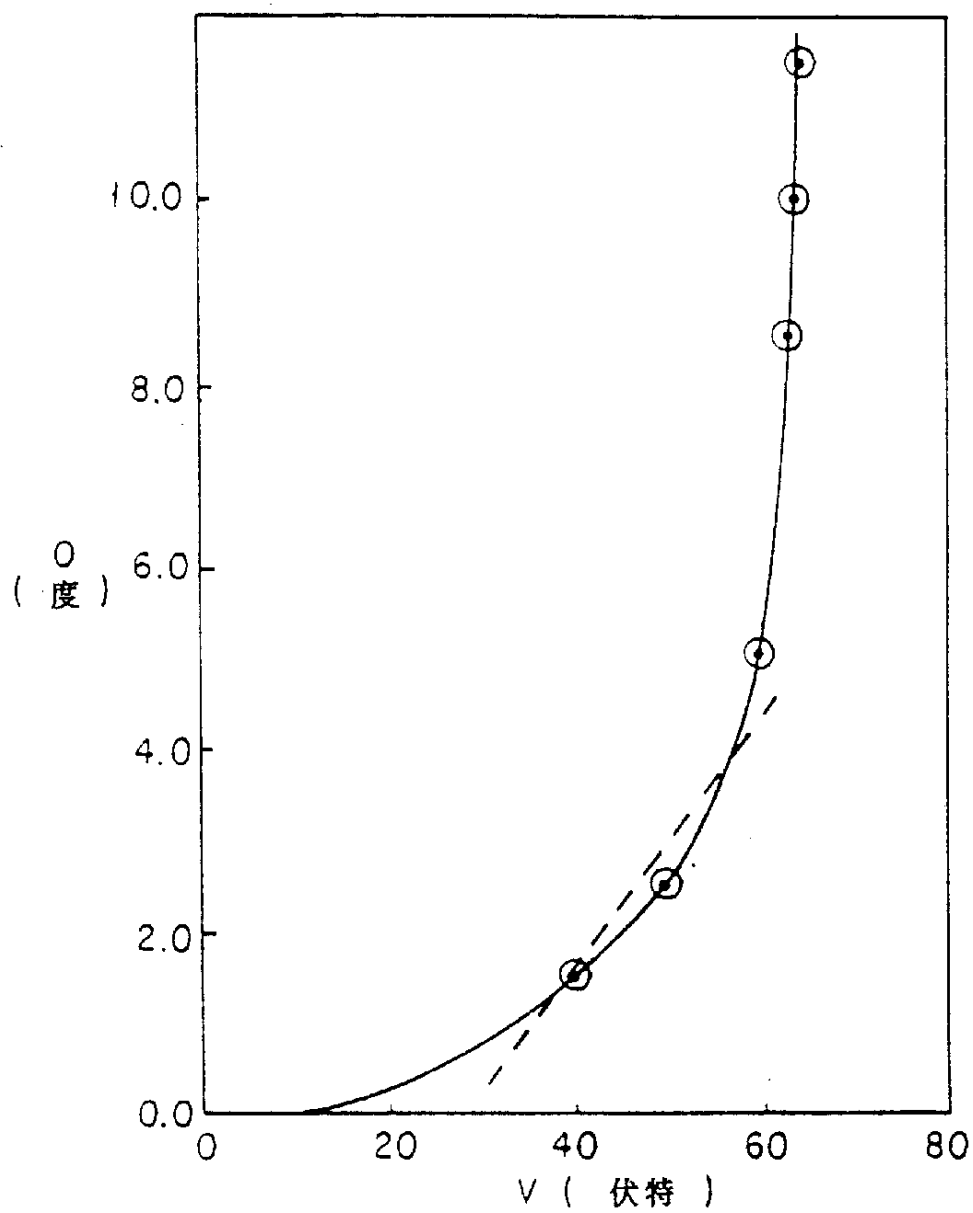
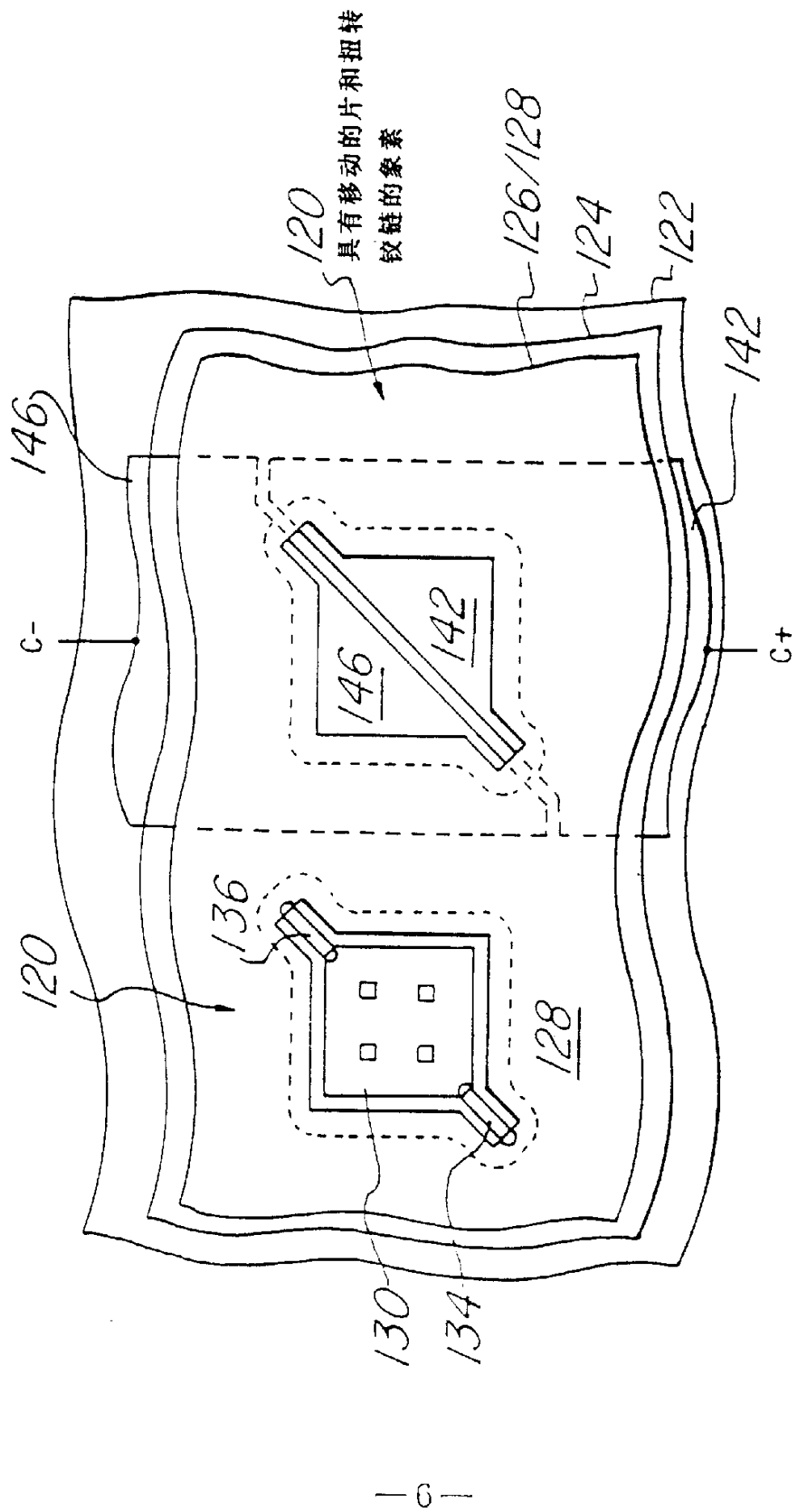


图3a



具有移动的片和扭转
铰链的像素

图 3 b

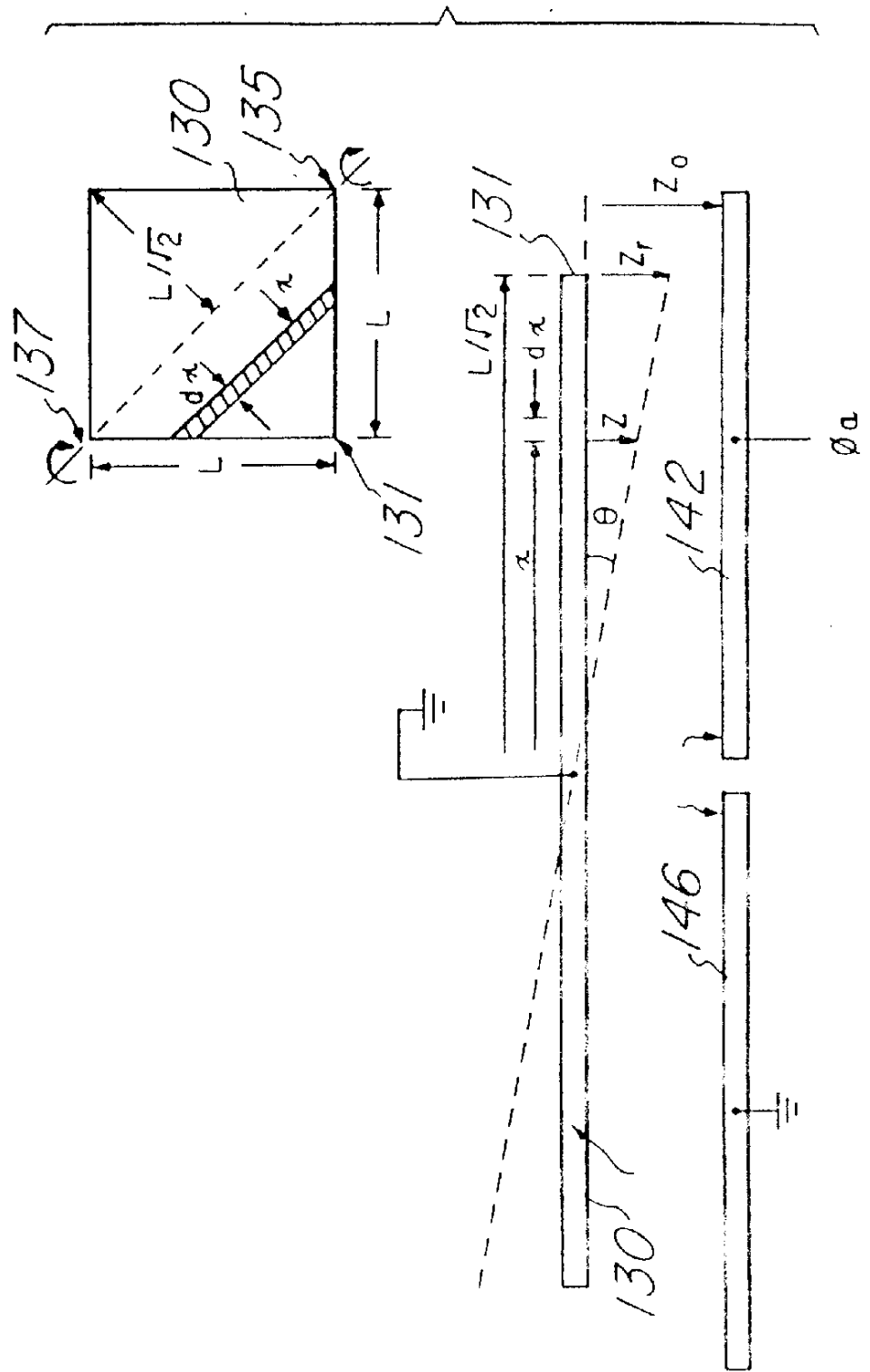


图 4

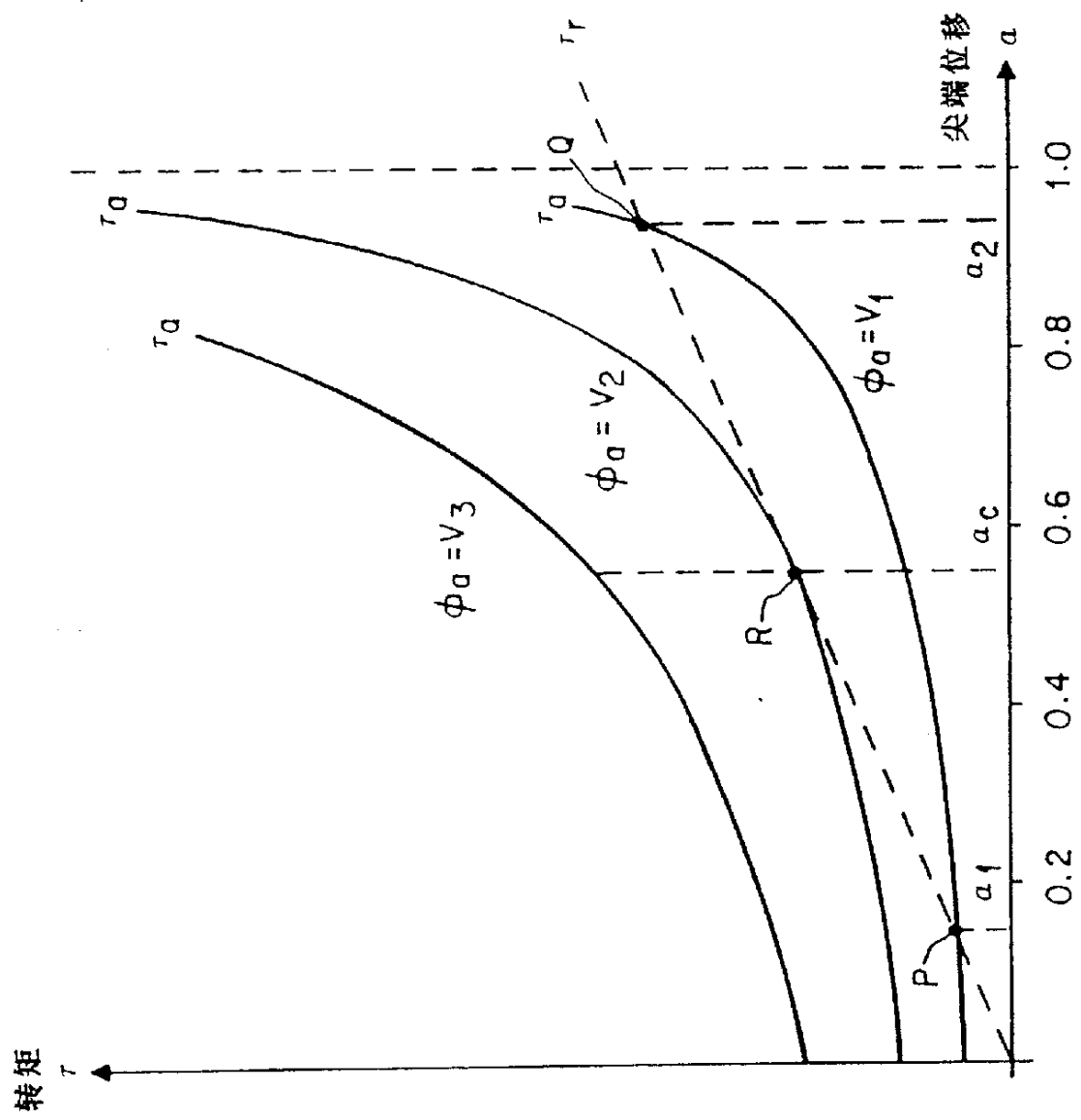


图 5

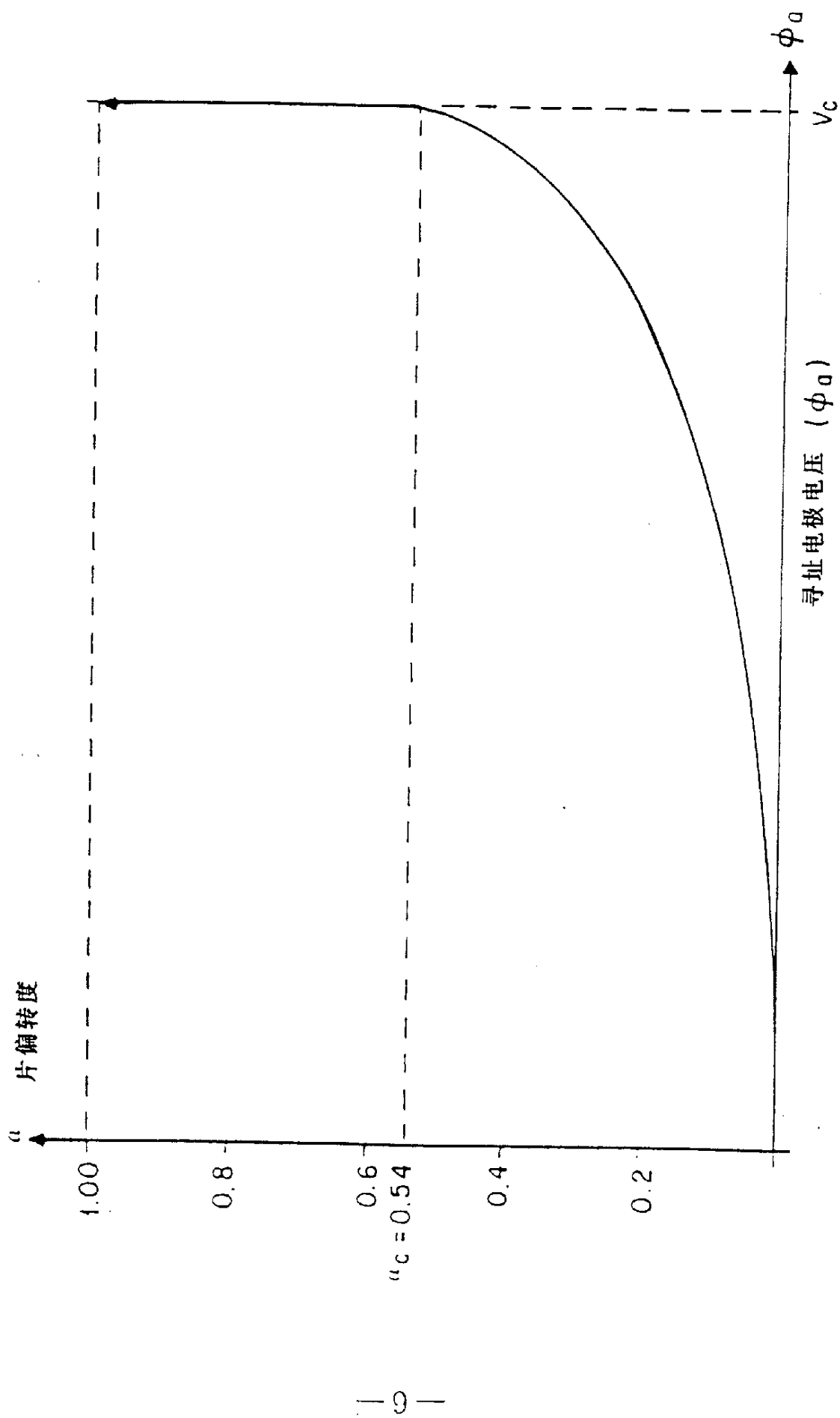
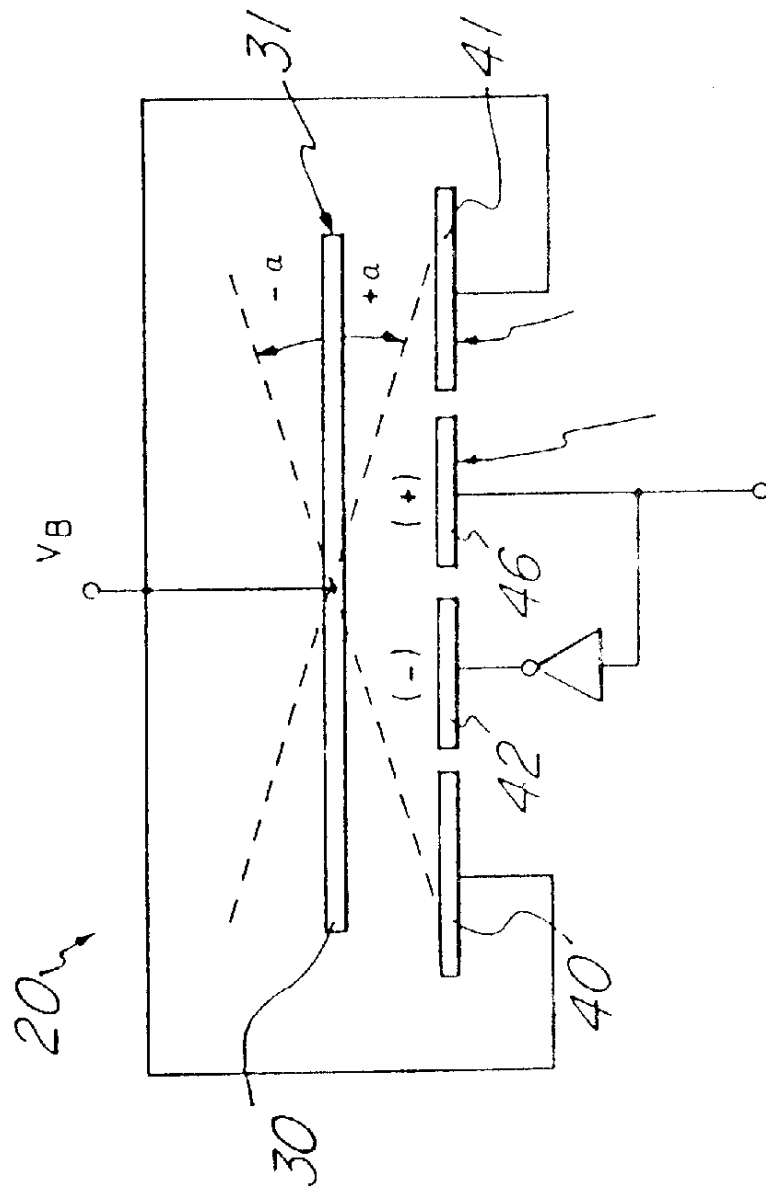


图 6



ϕa

图 7

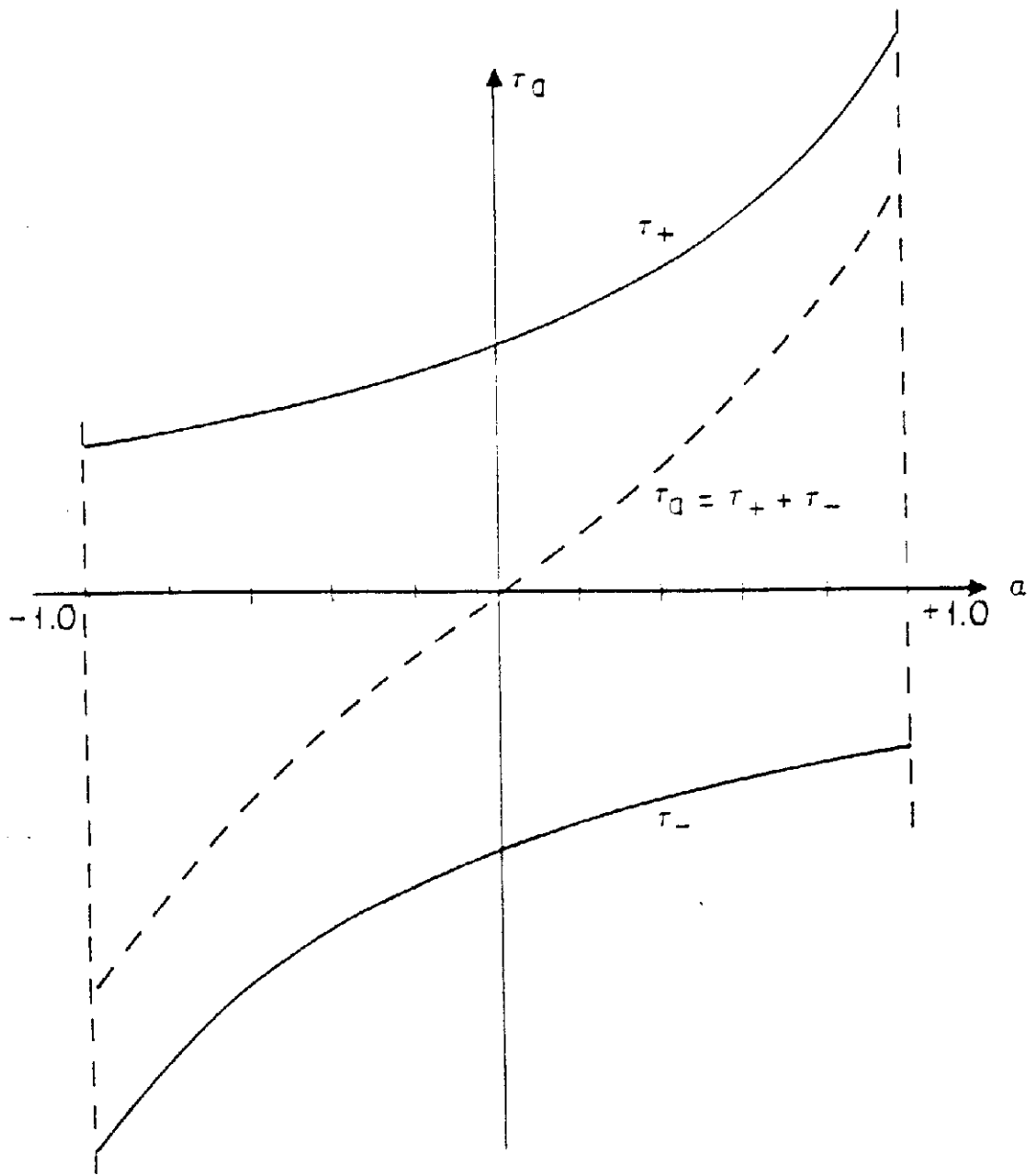


图 8

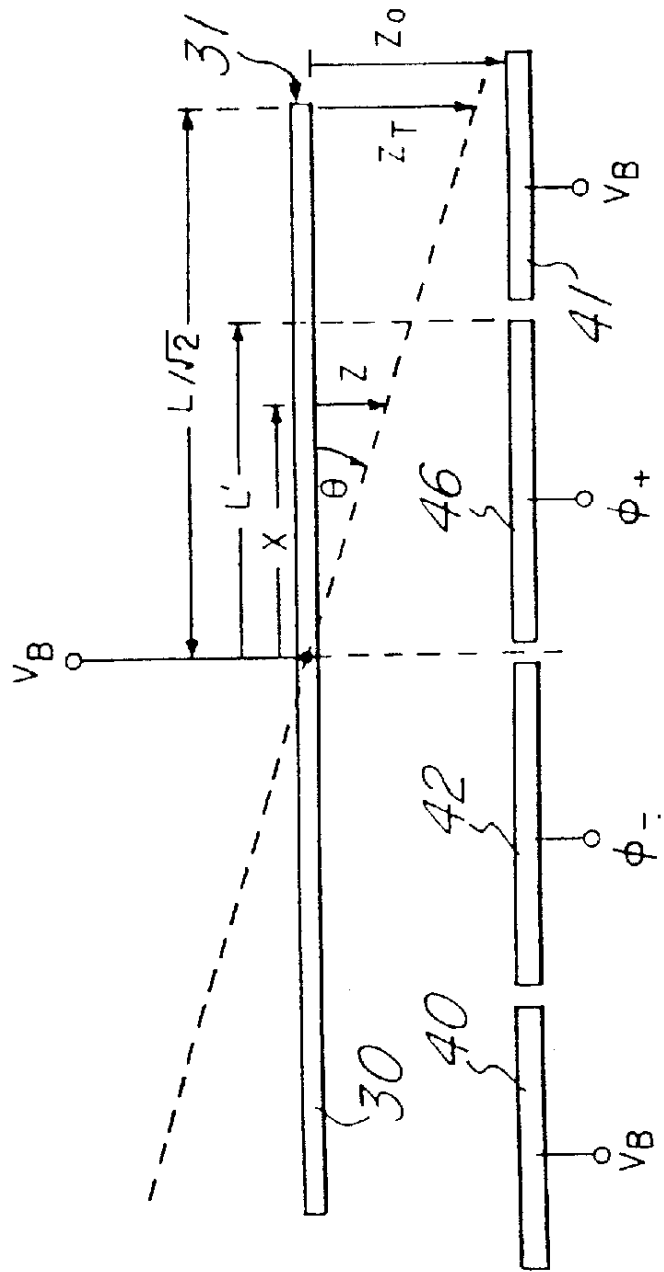


图9

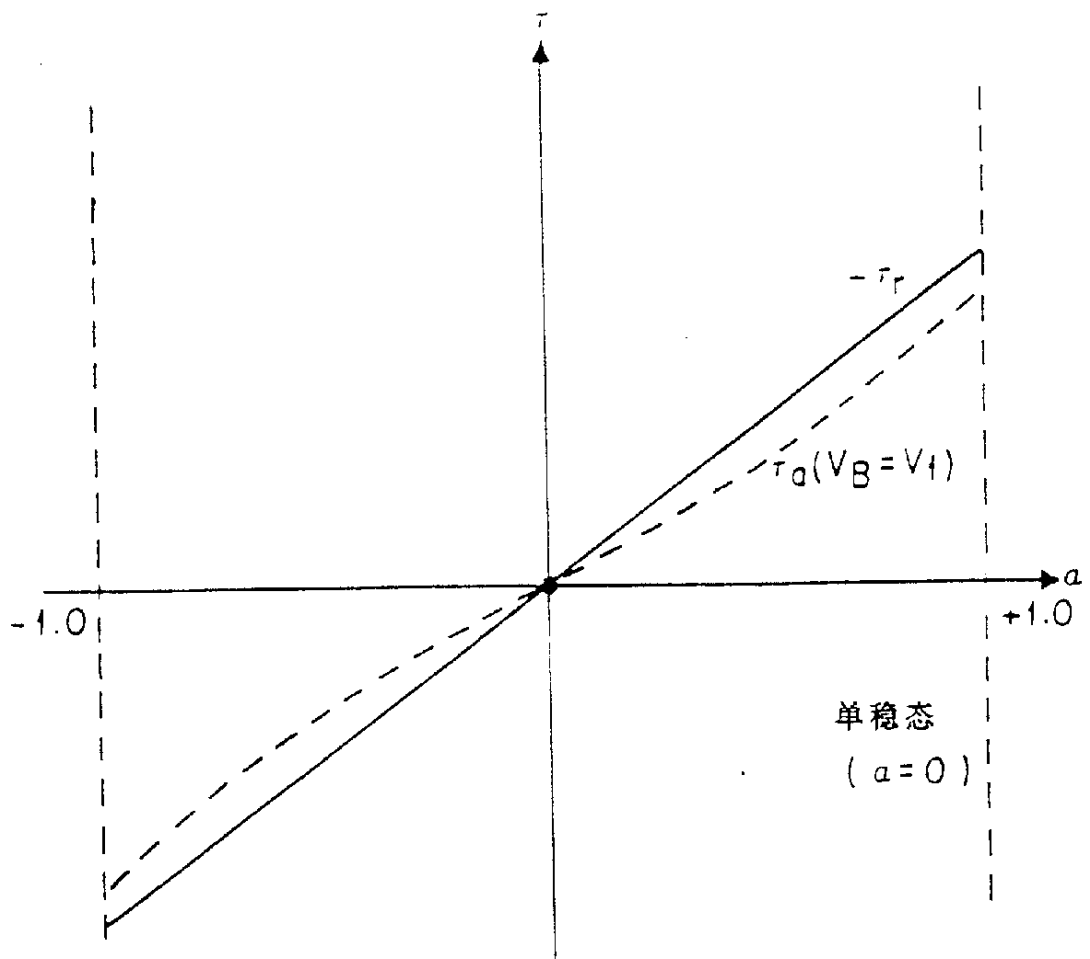


图 10

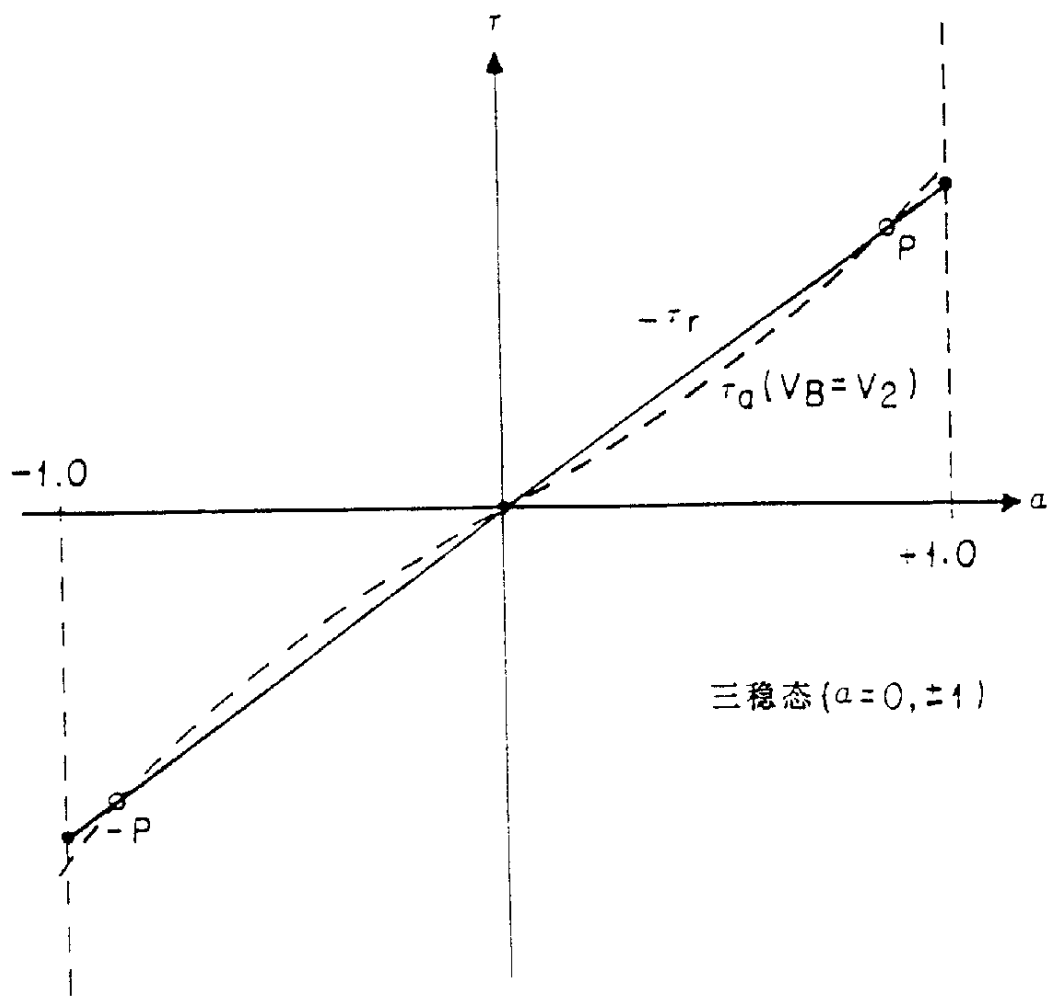


图 11

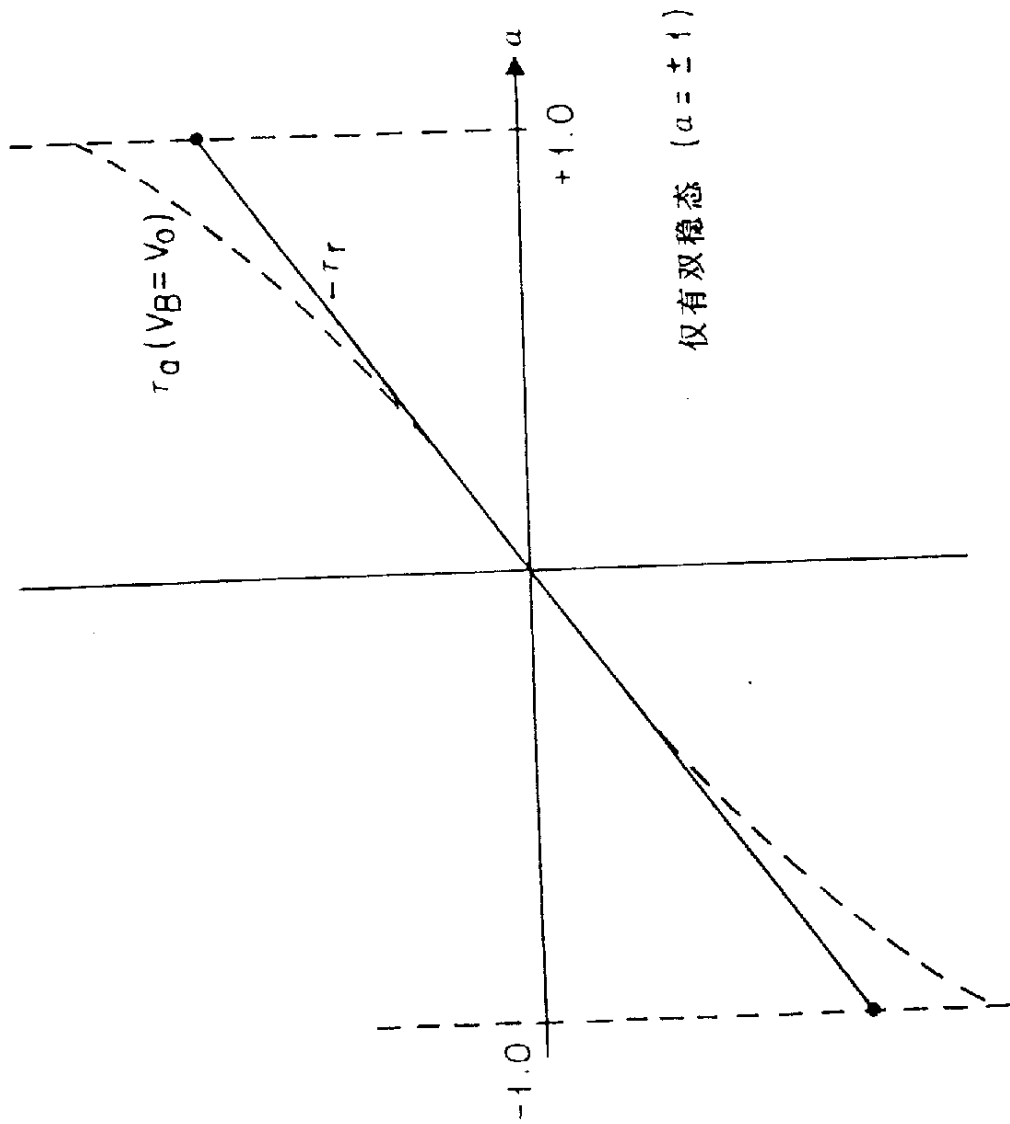


图 12

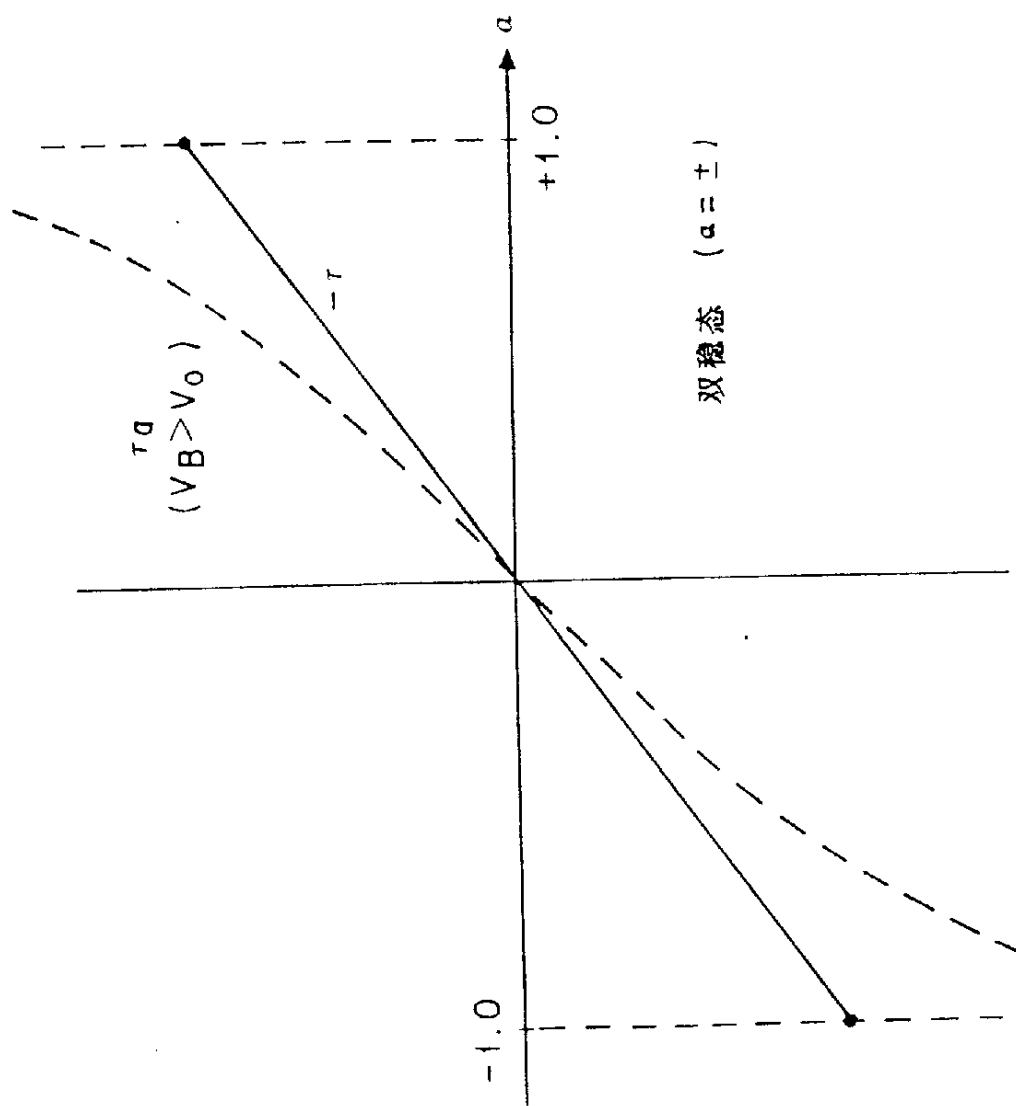


图 13

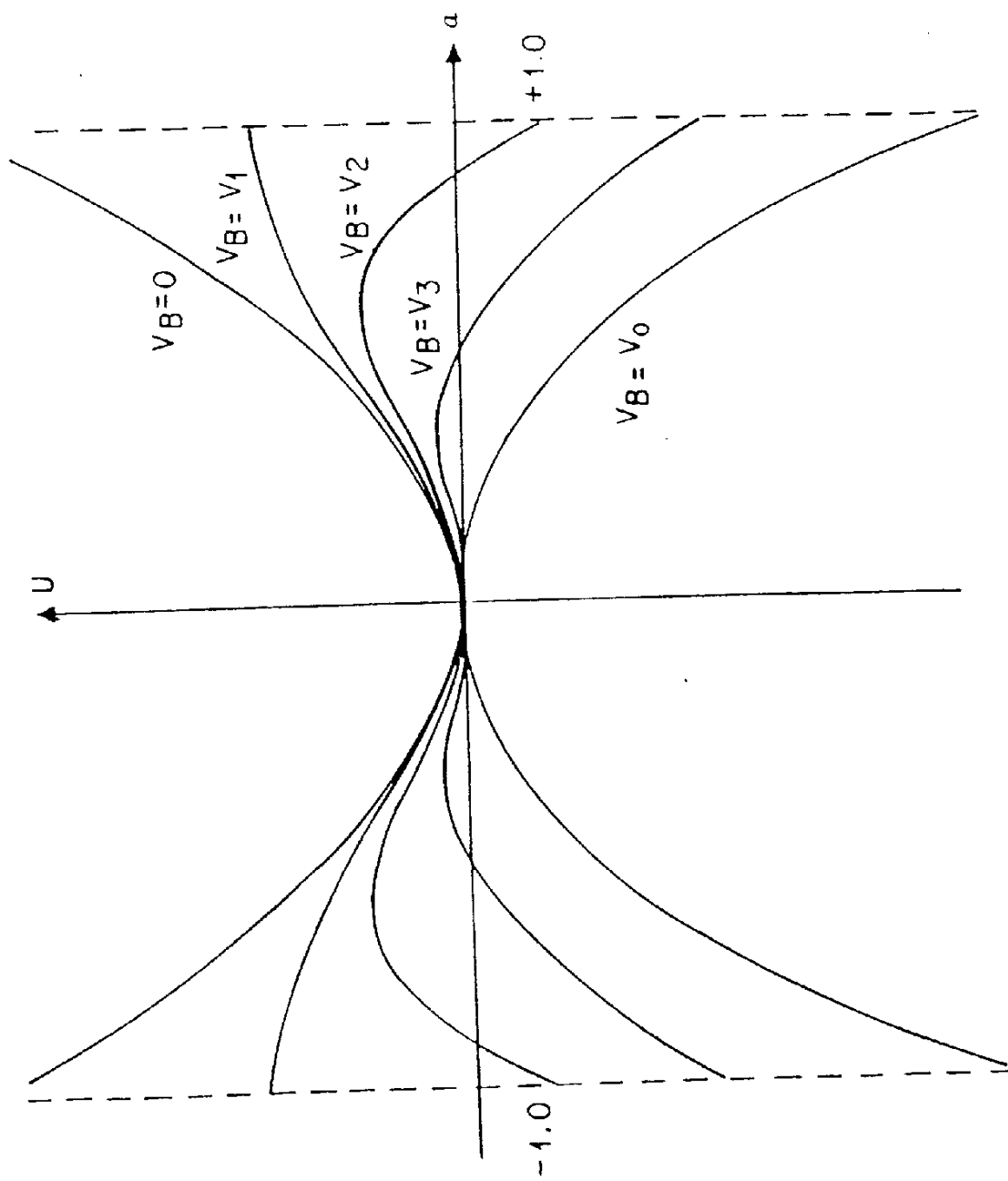


图 14

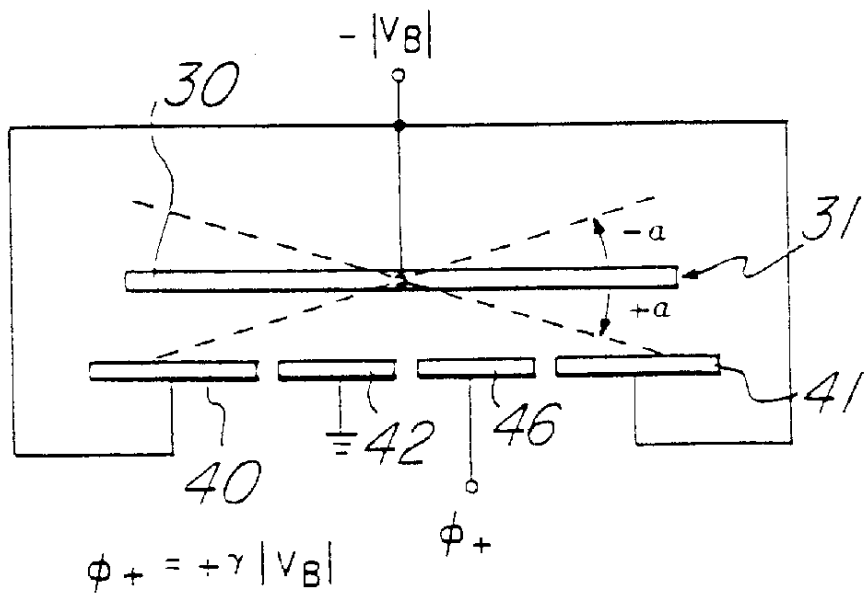


图 15

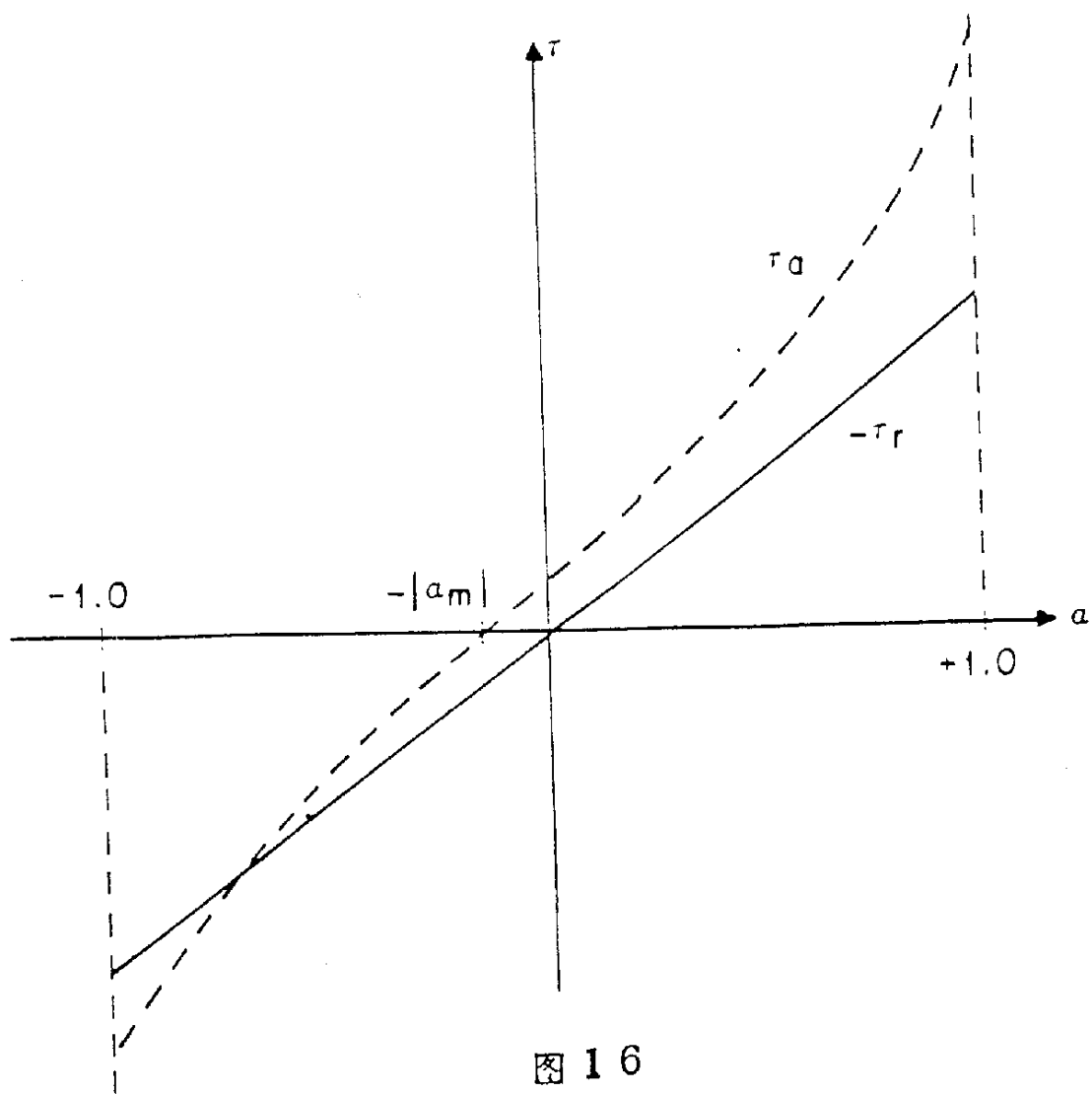


图 16

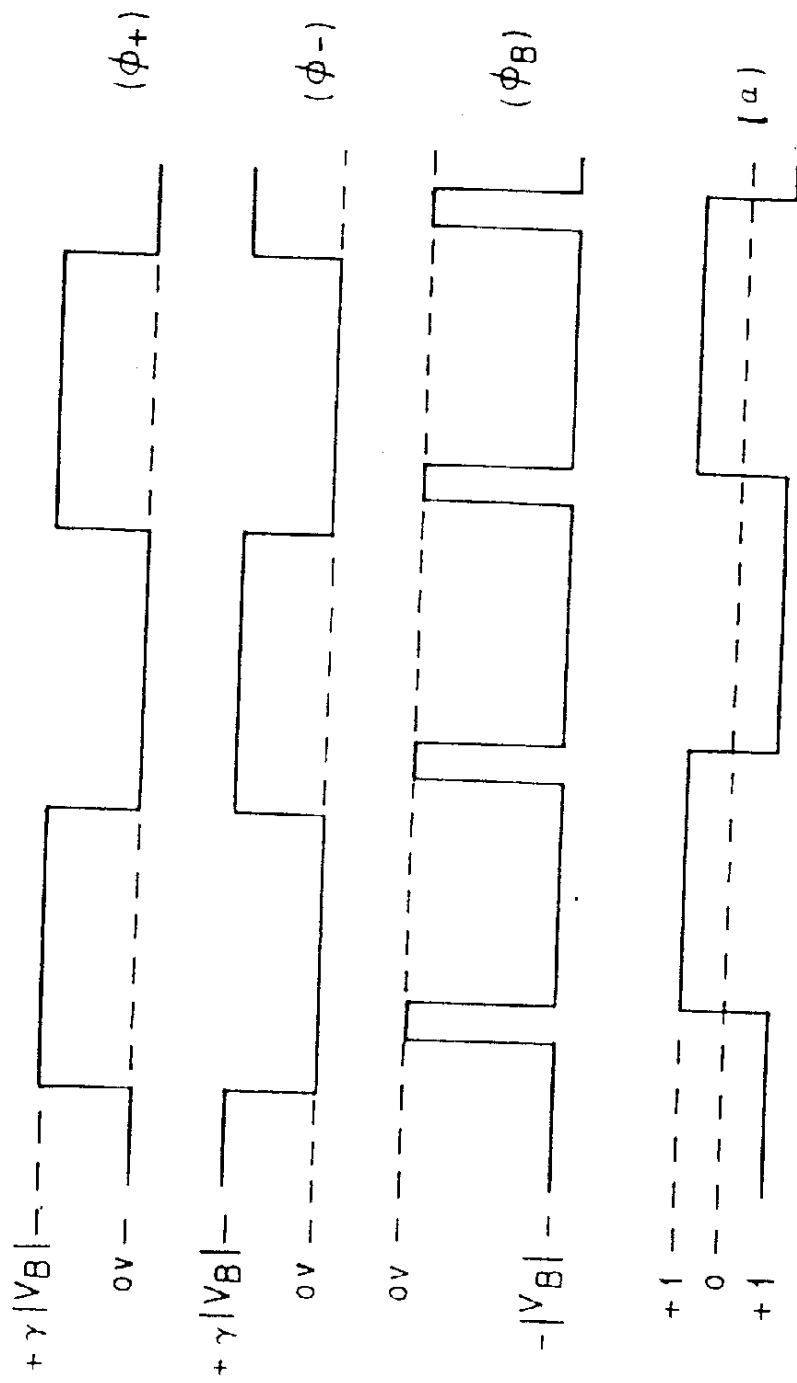


图 17

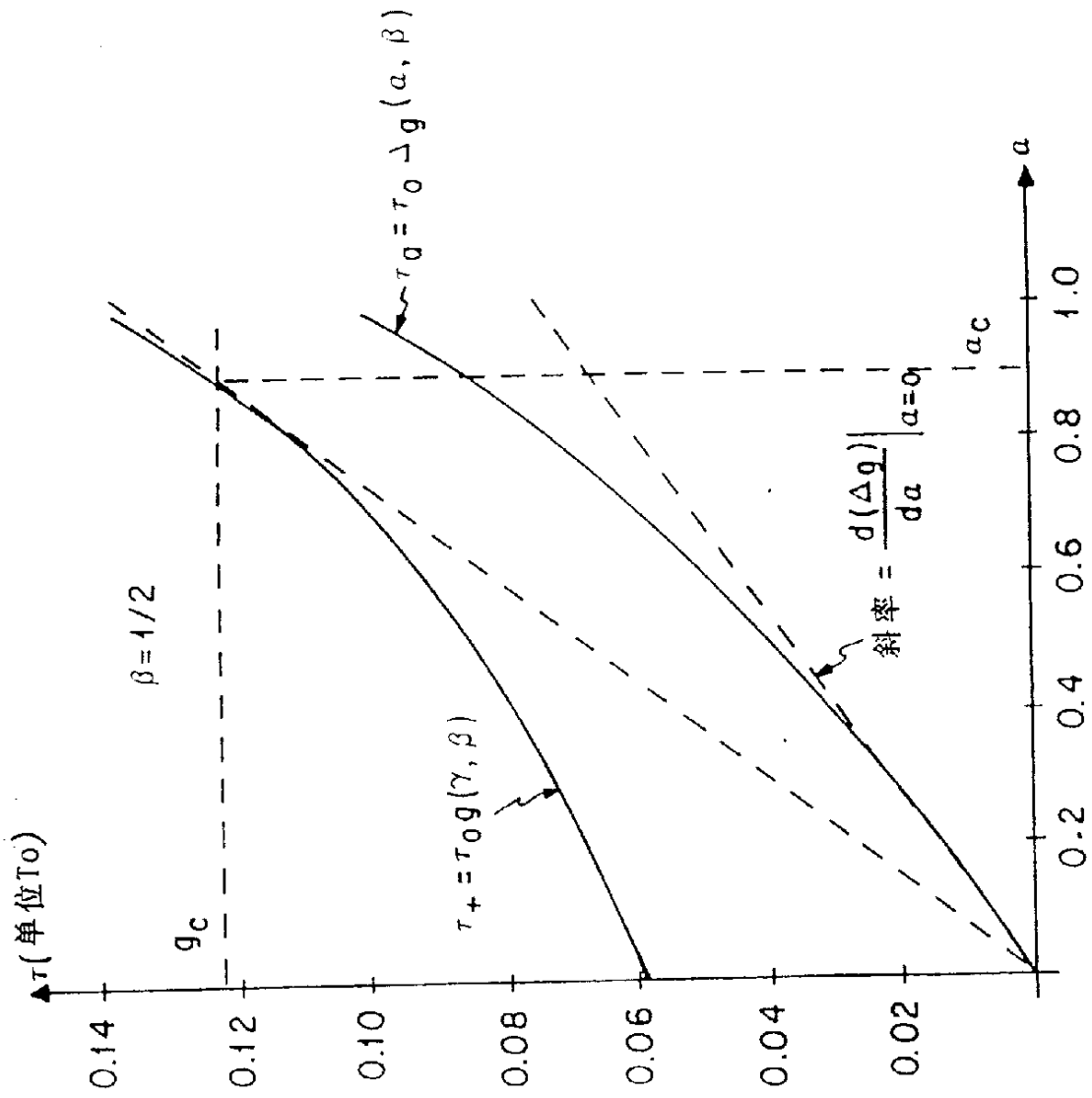


图 18

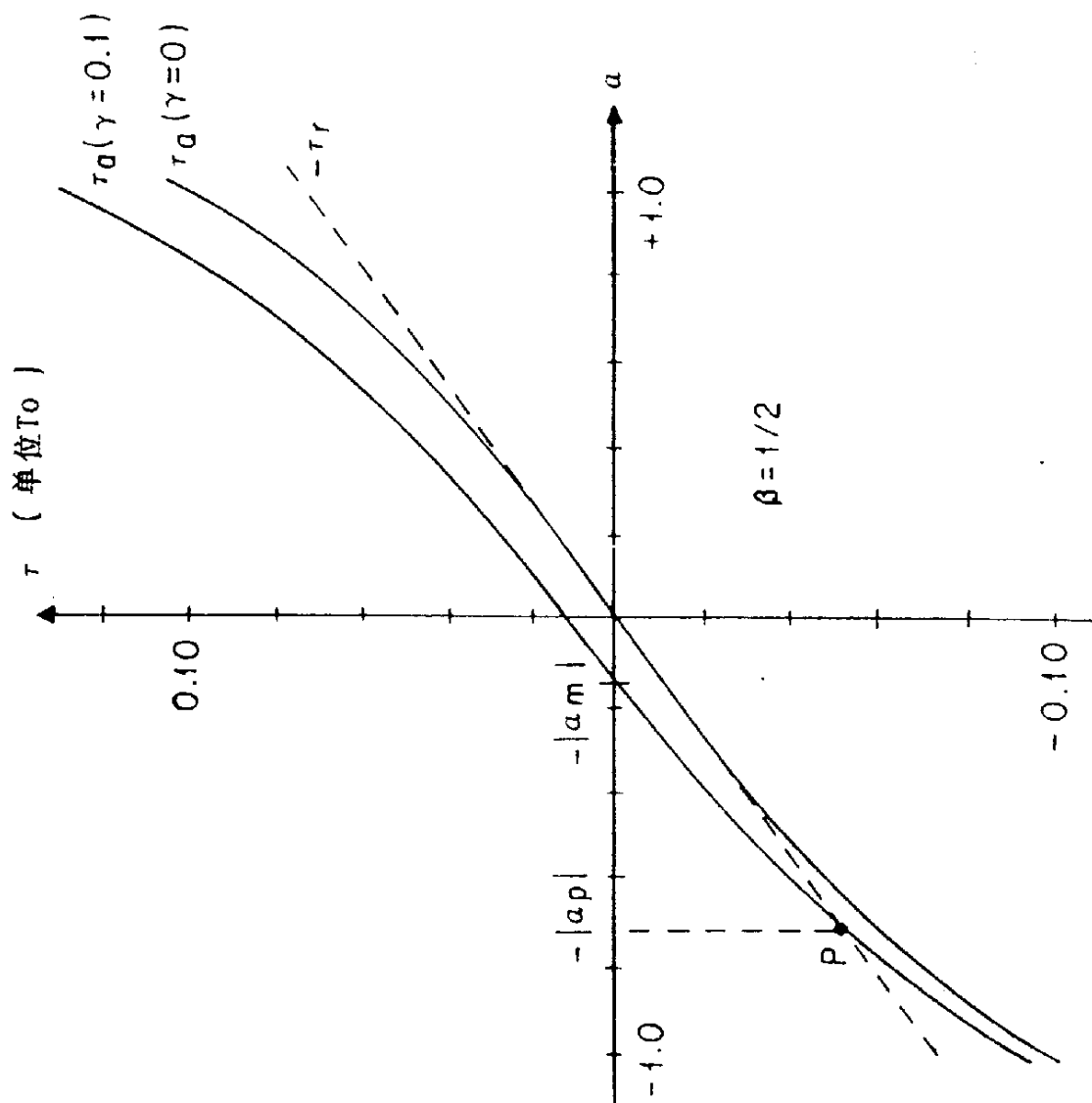


图 19

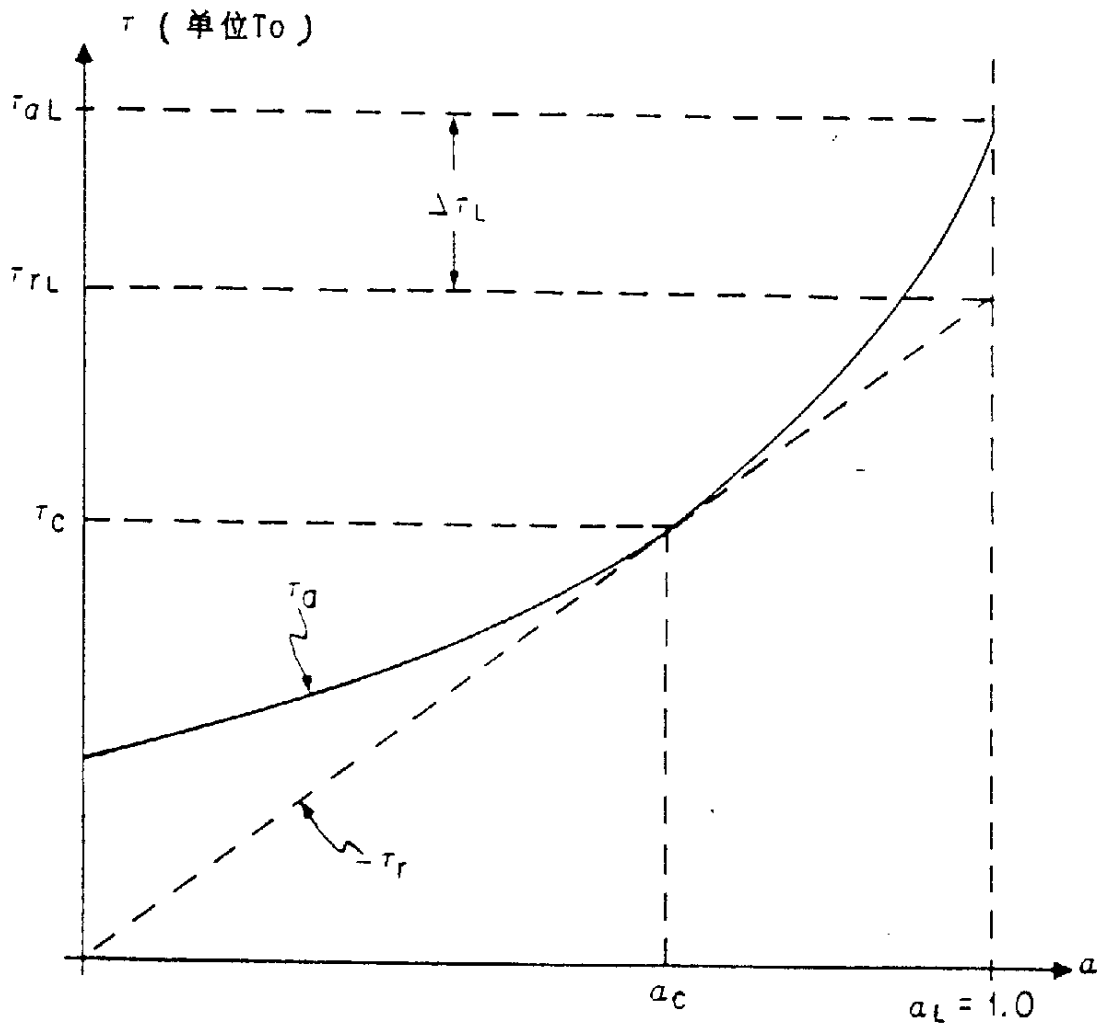


图 20

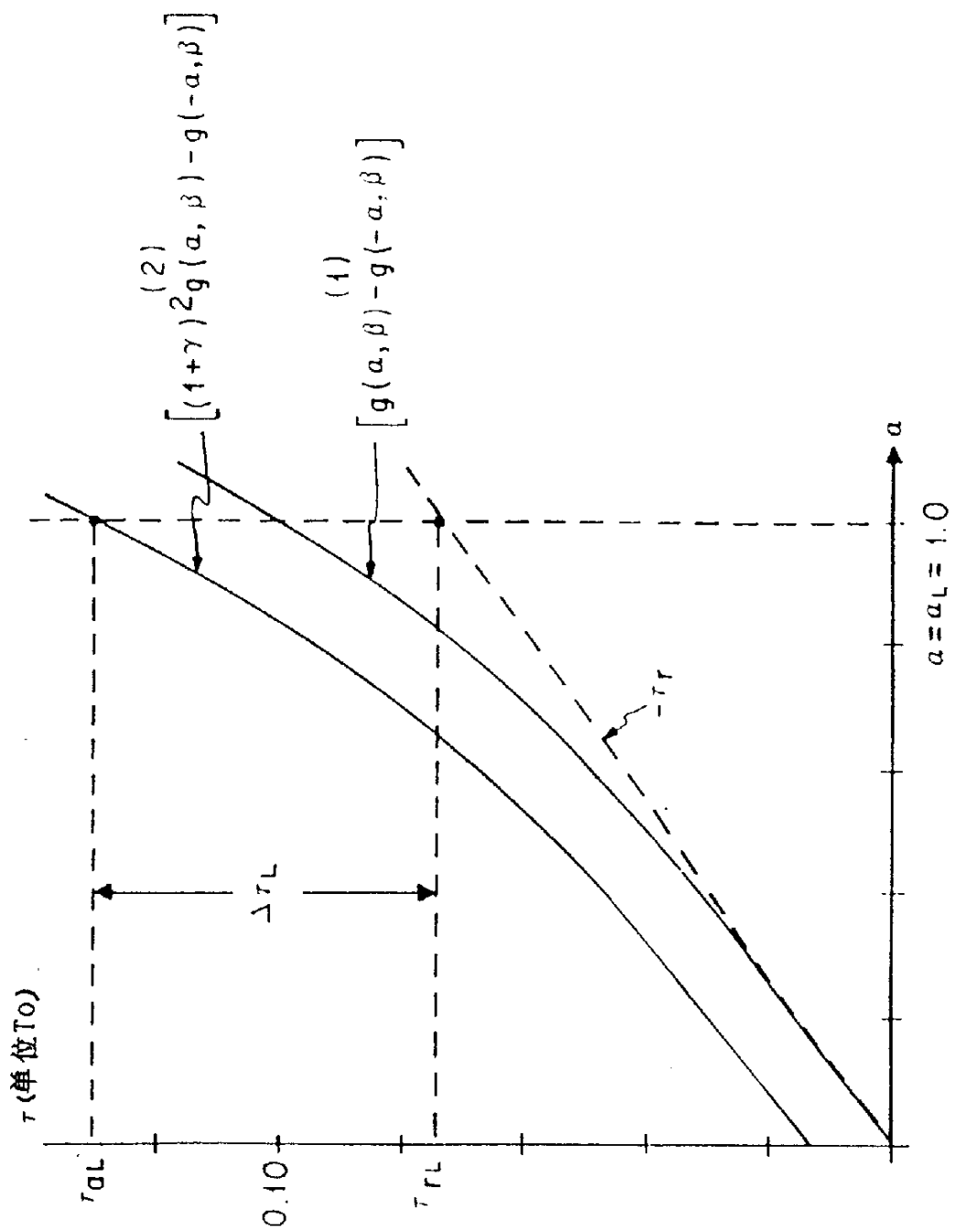


图 2 1

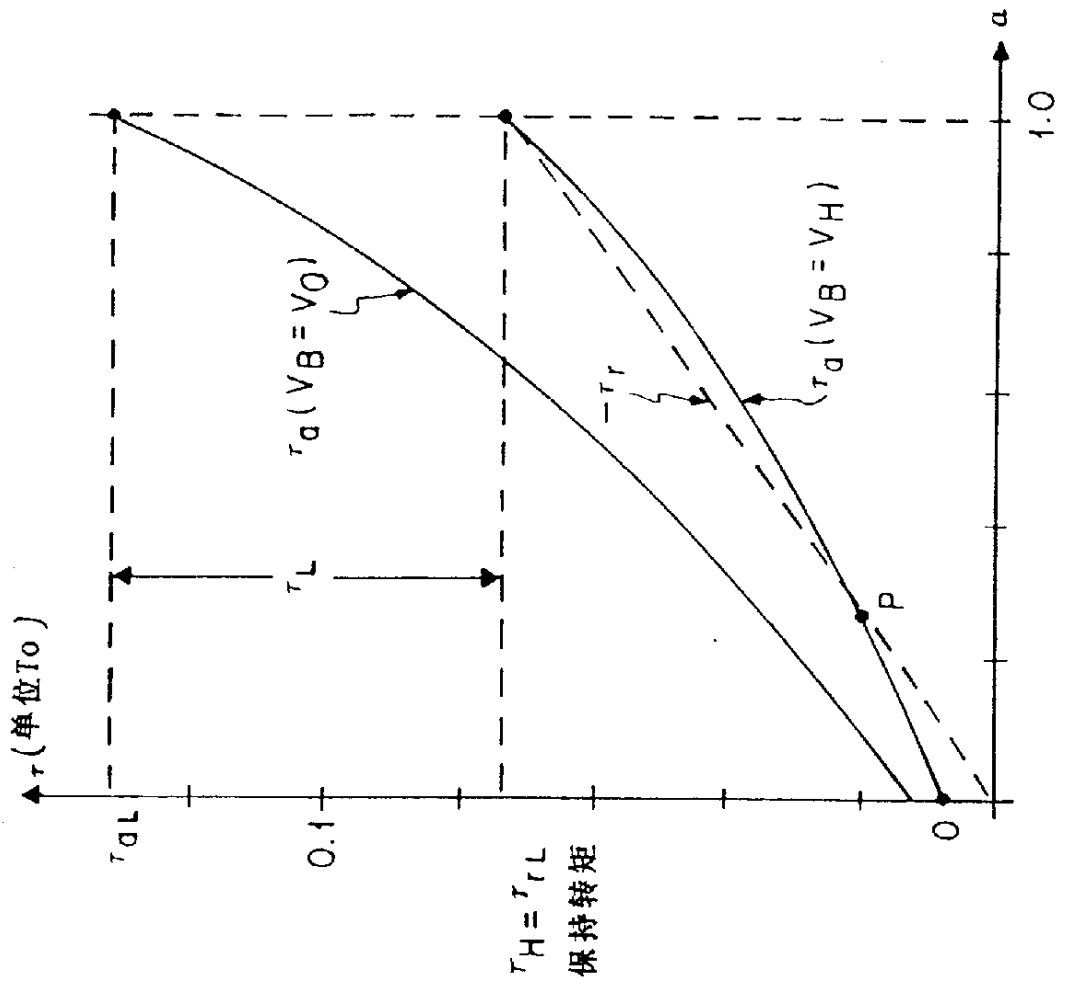


图 2 2

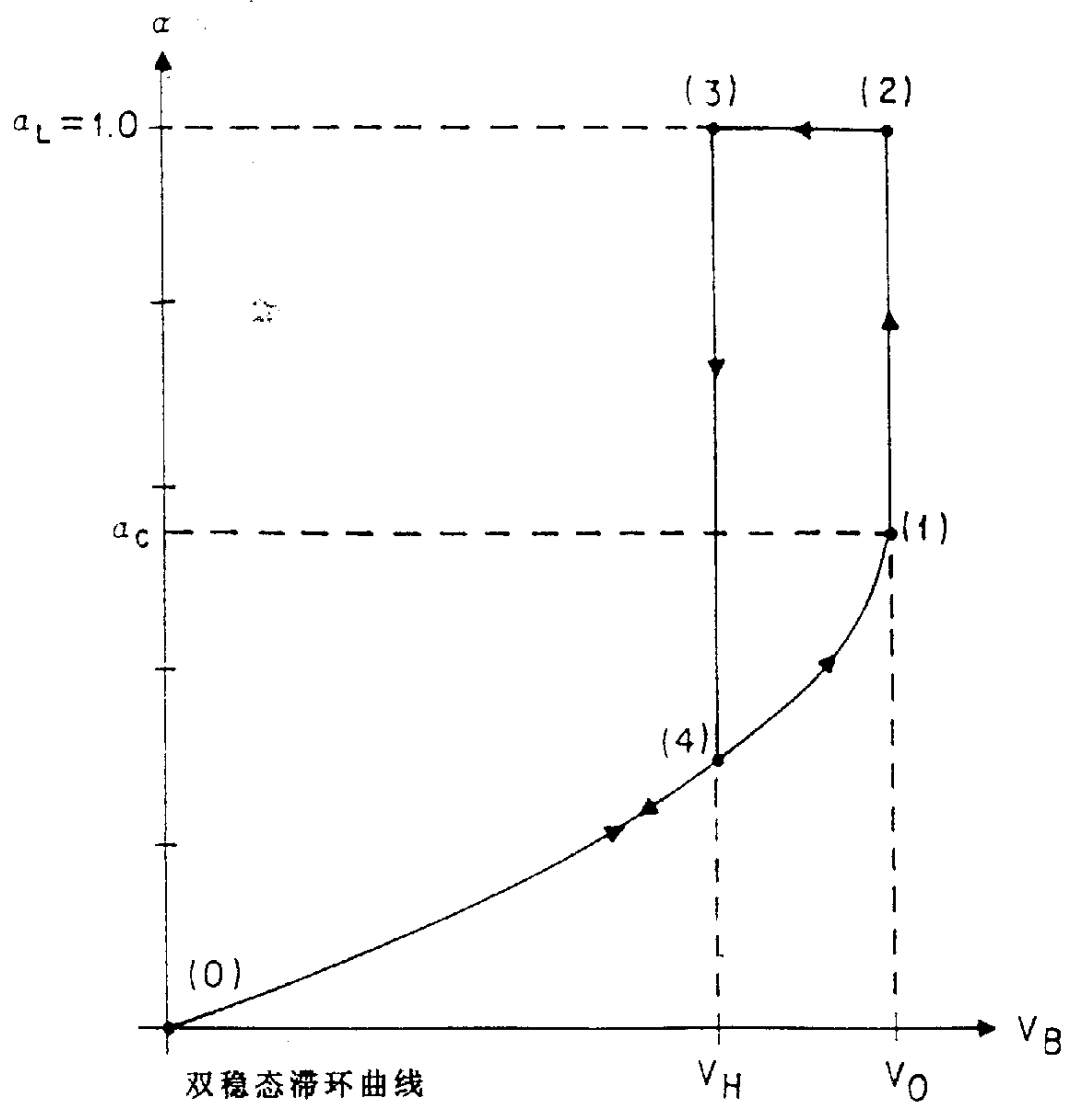


图23

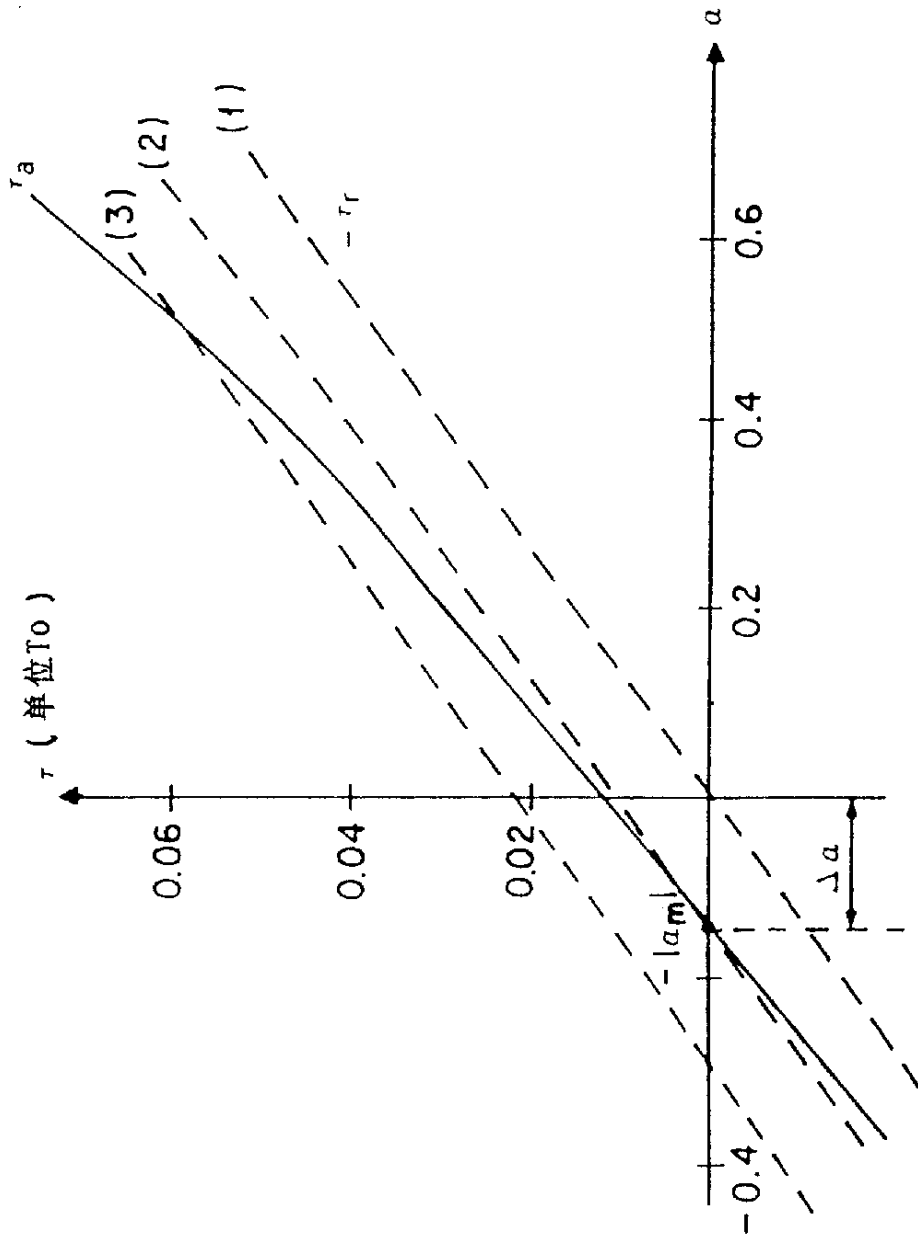
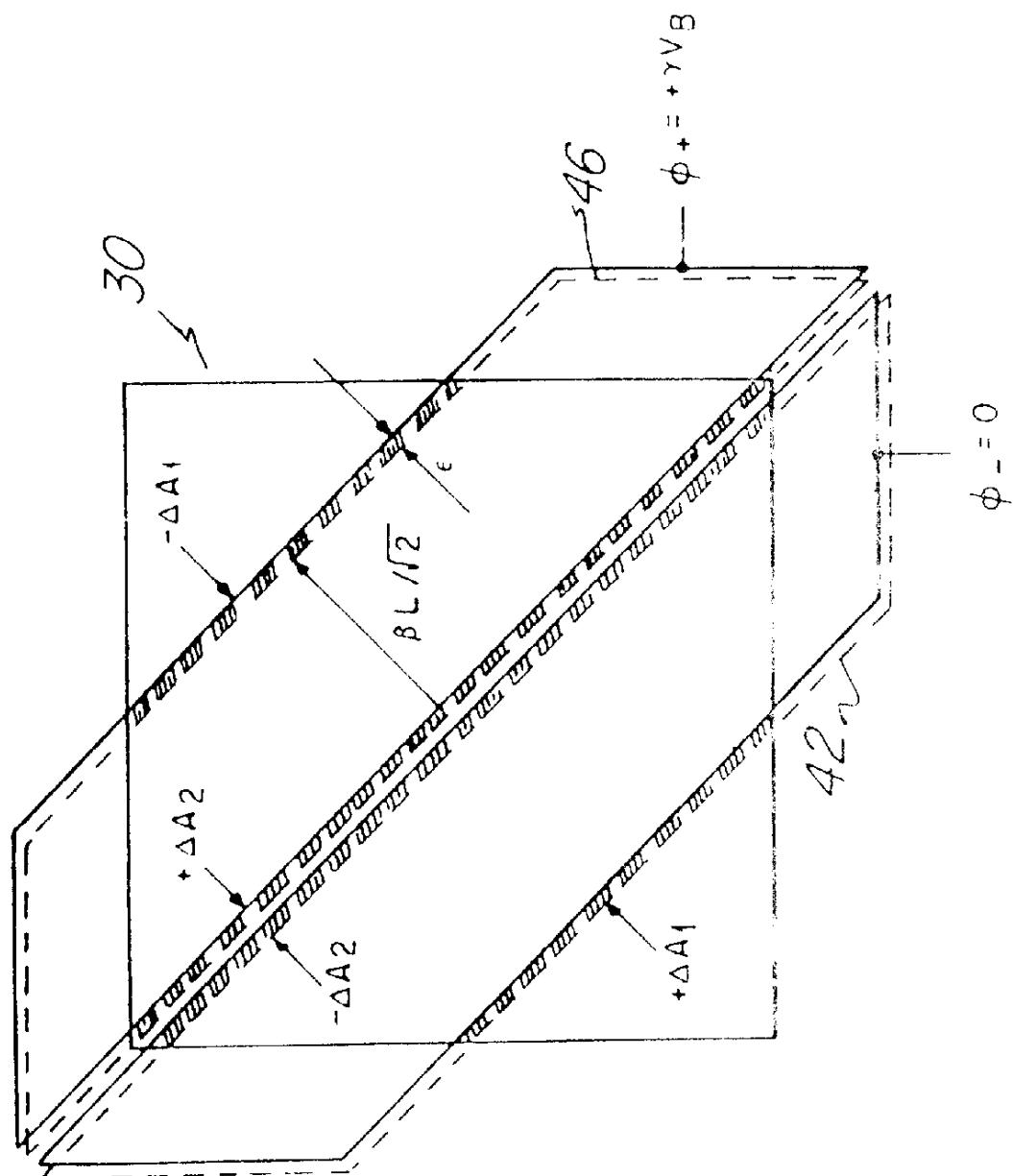


图24



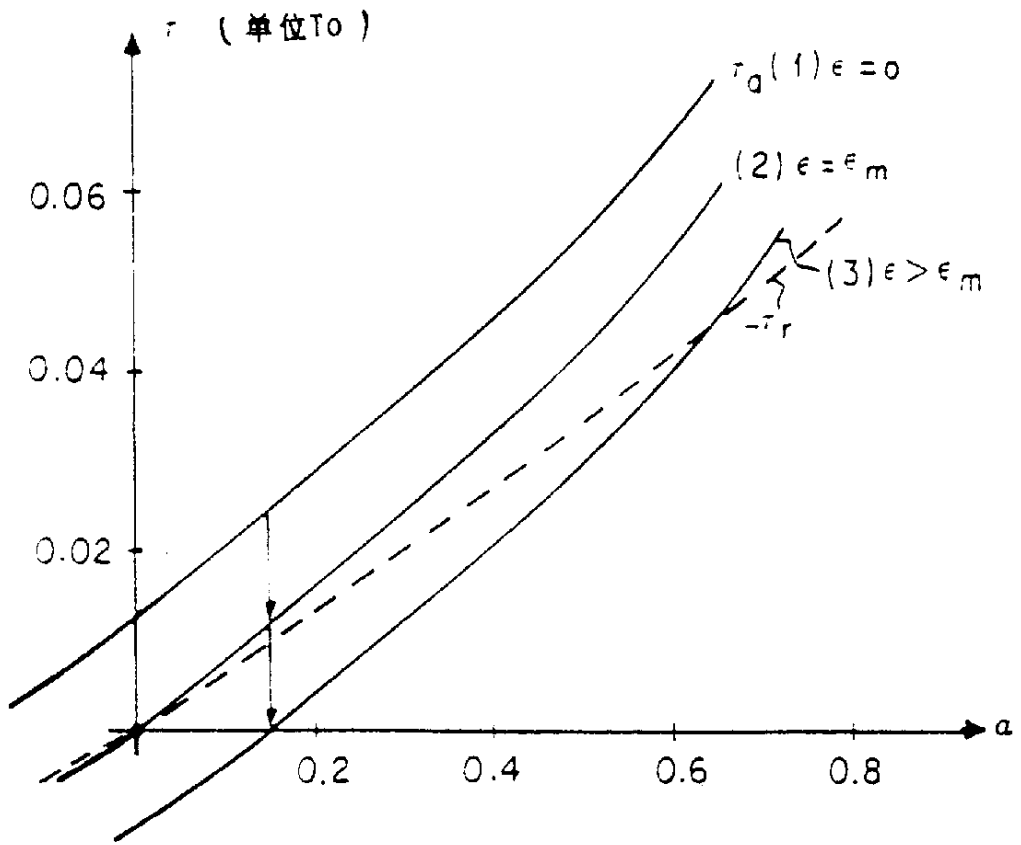


图26

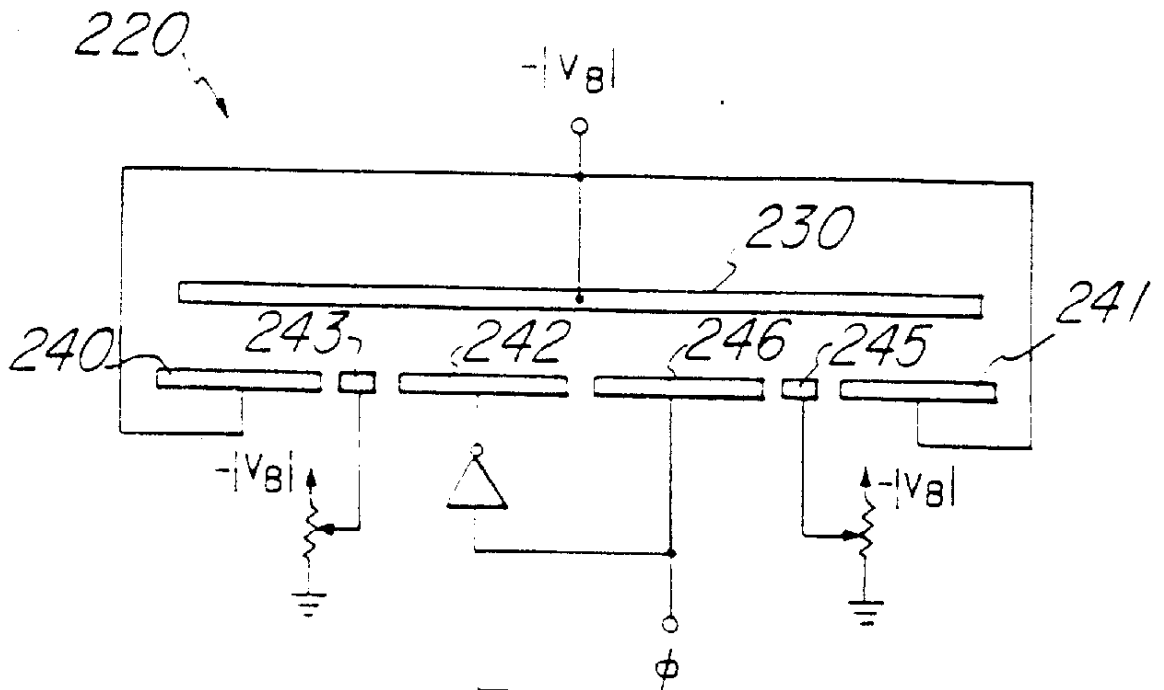


图27

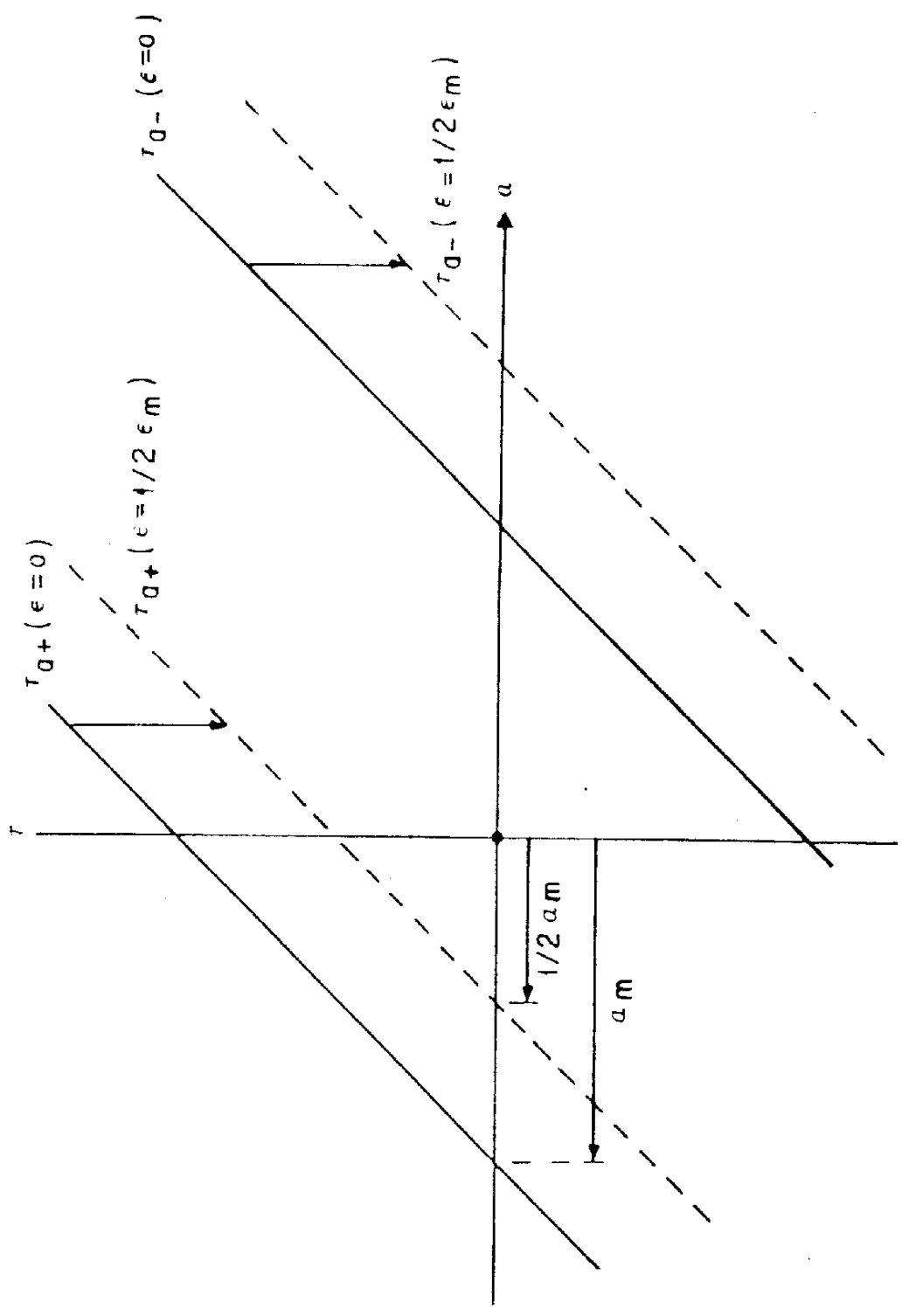


图28

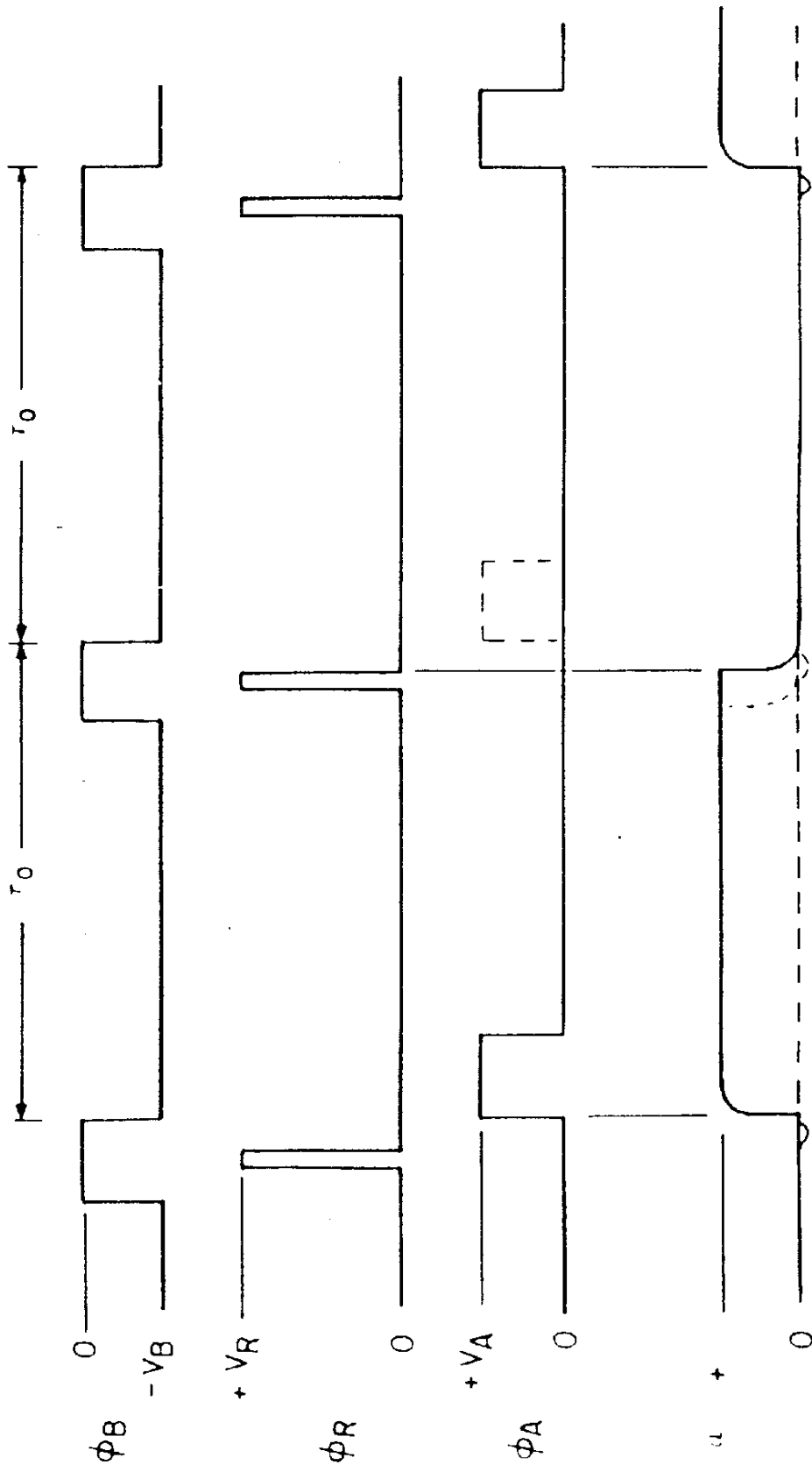


图29

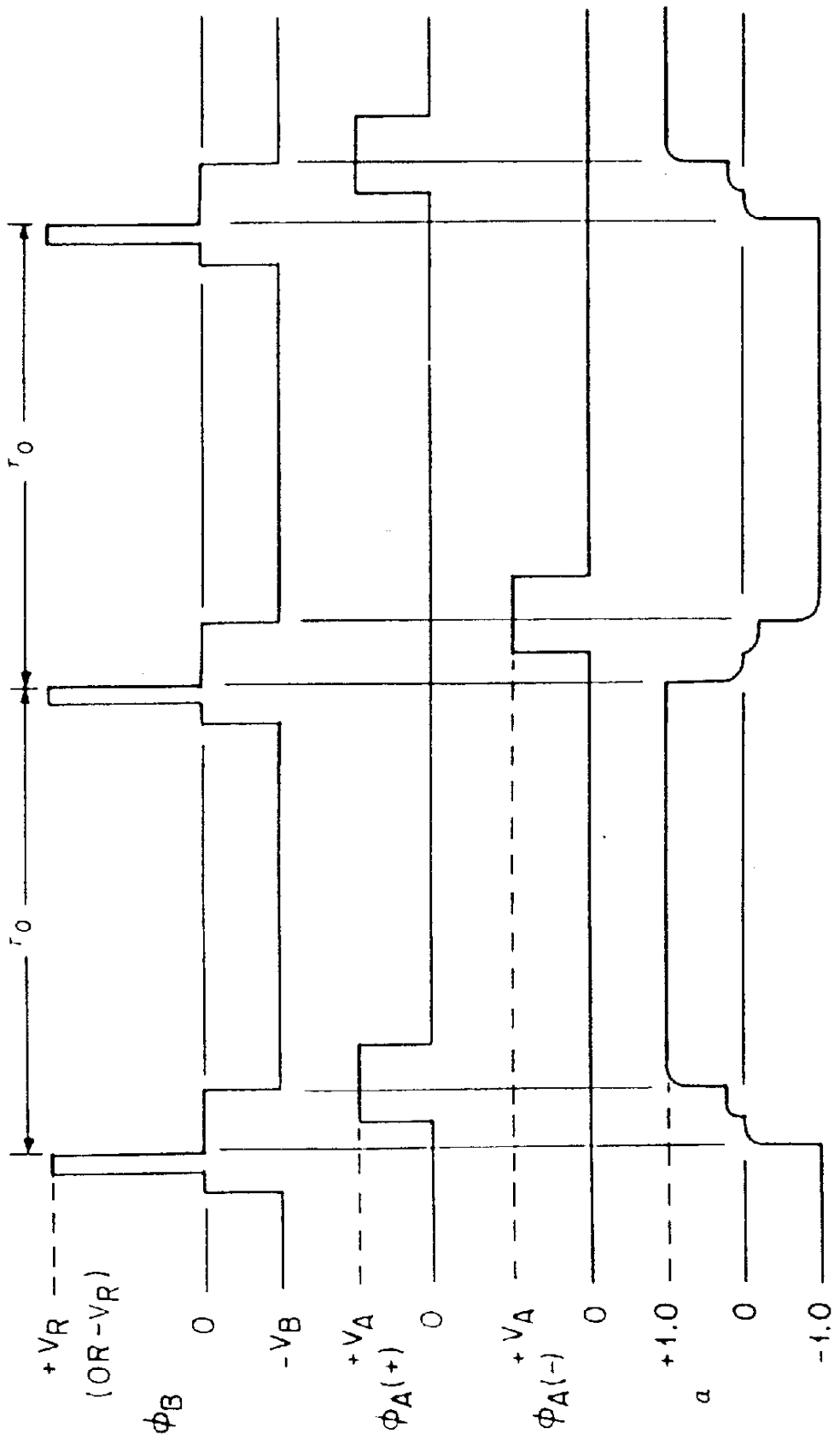


图 30 D

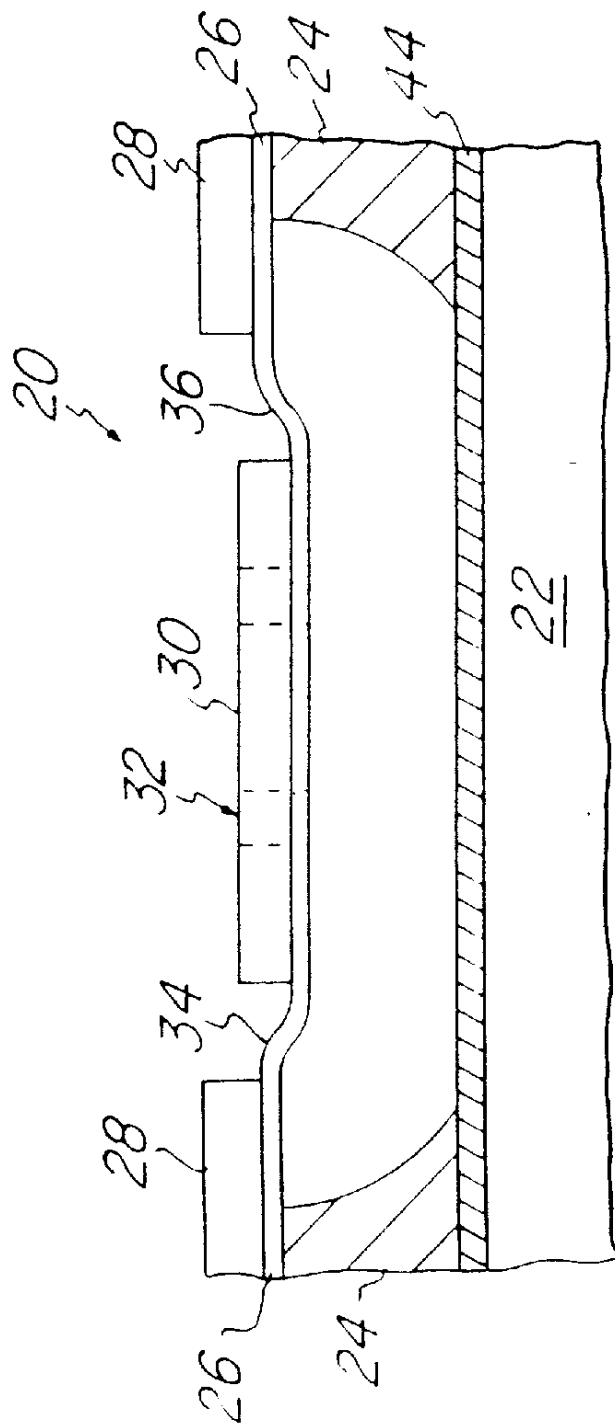


图 30b

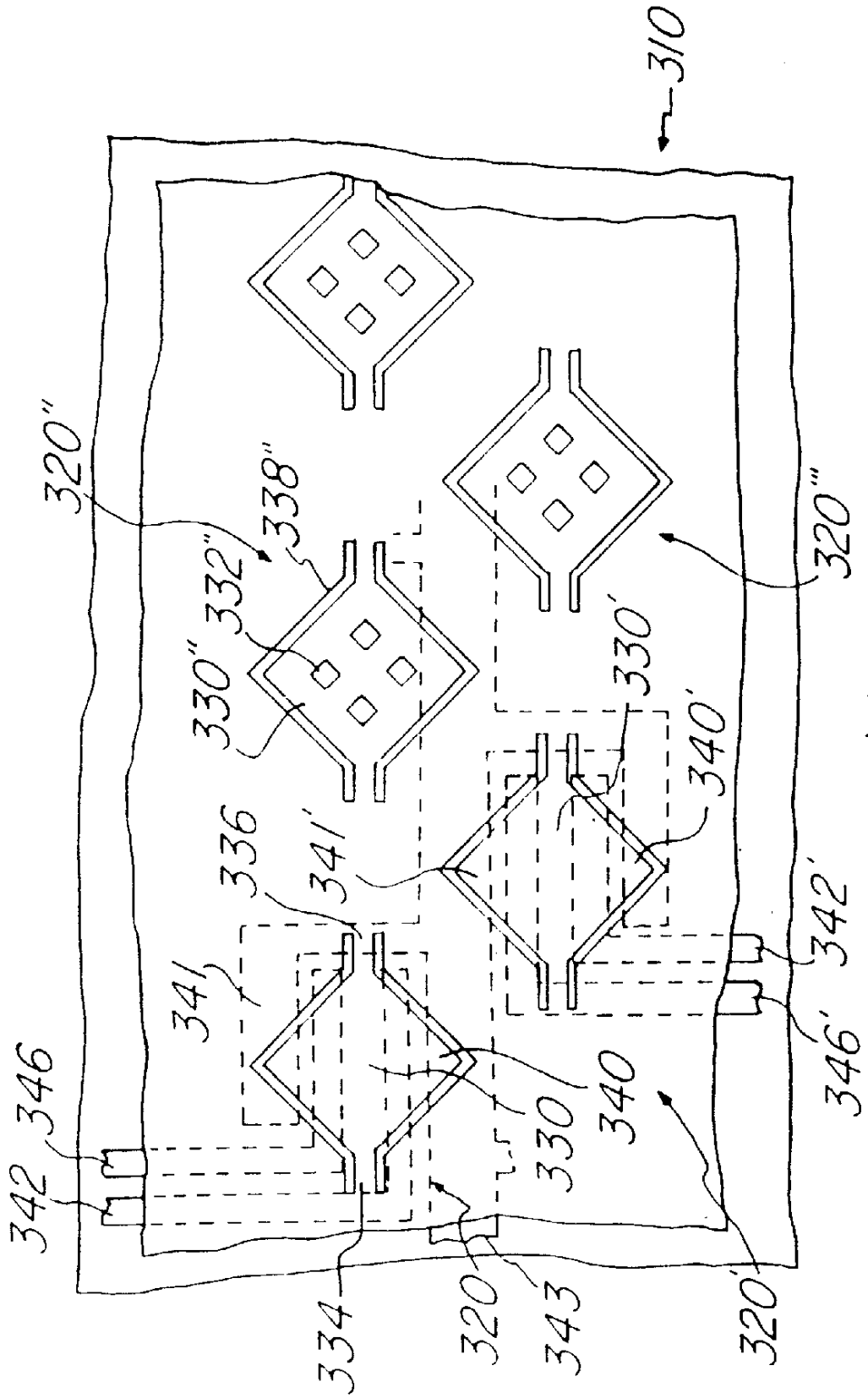


FIG 31

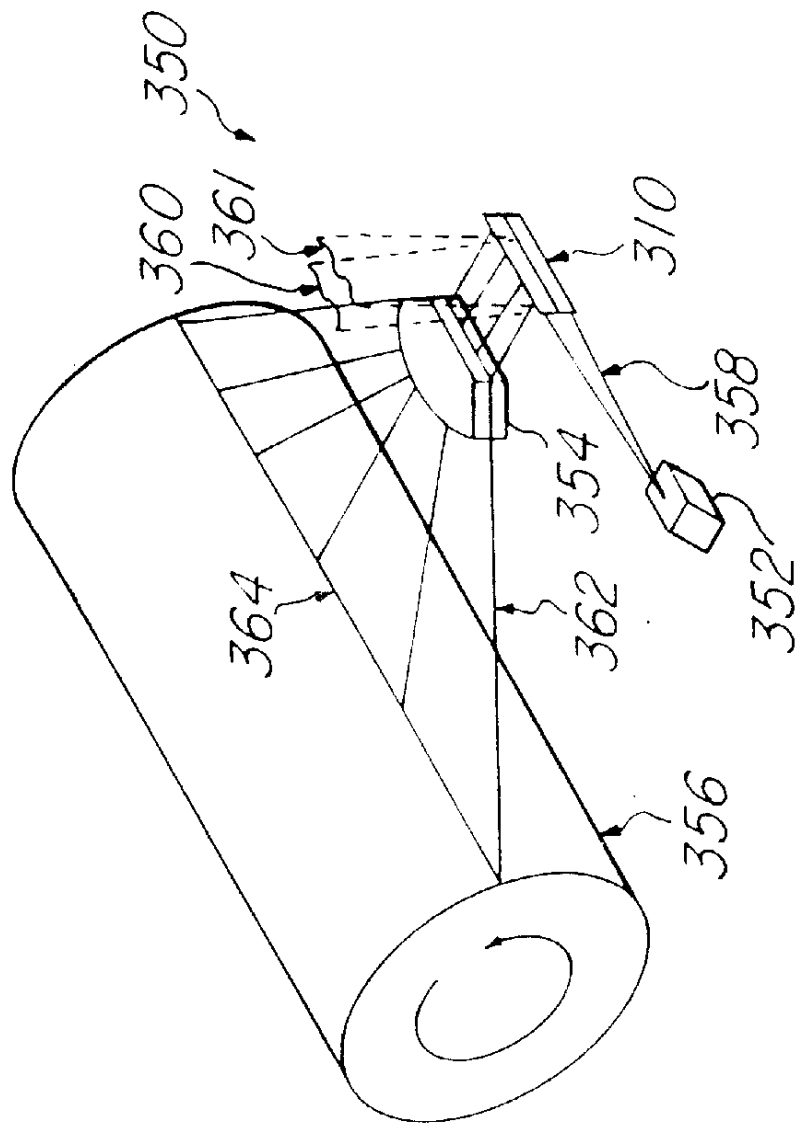


FIG. 320

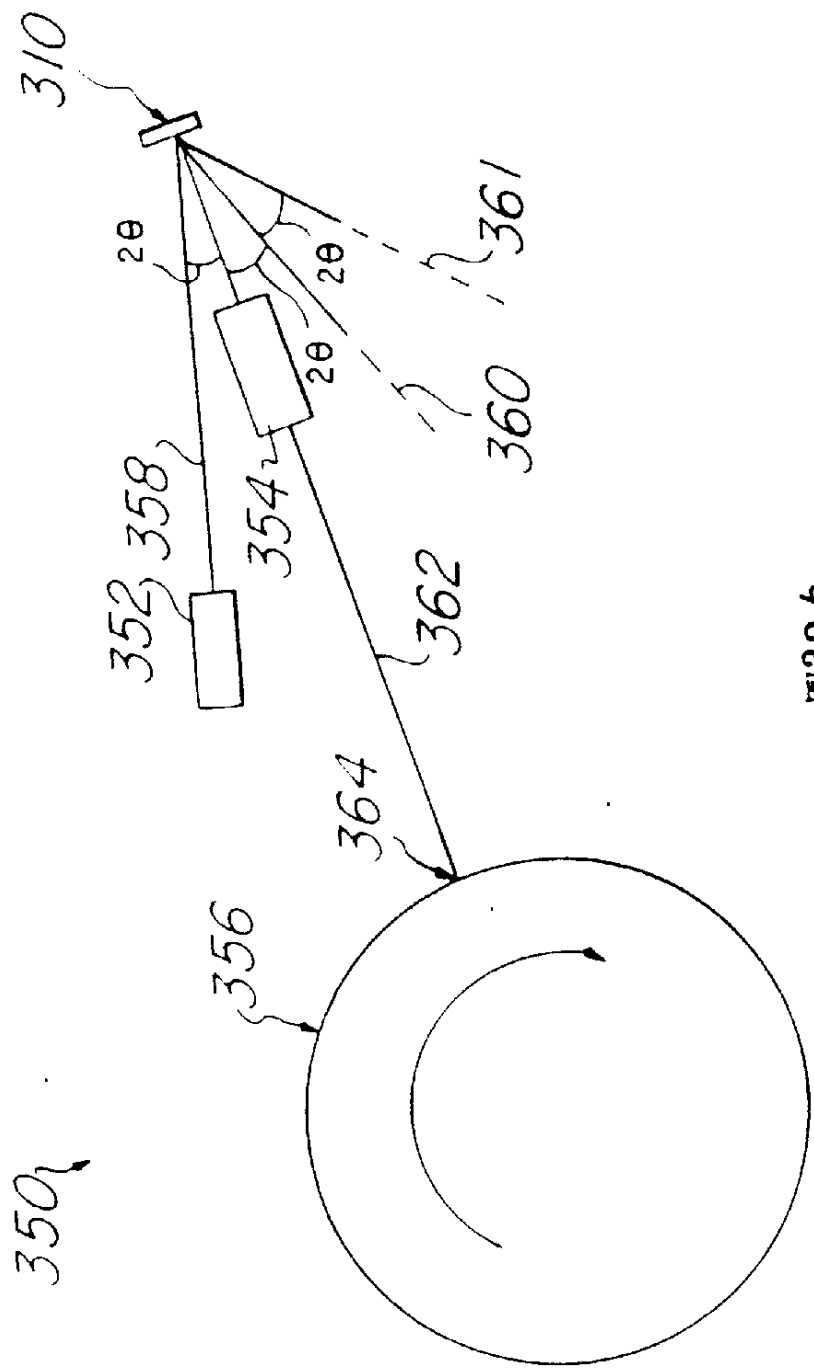


FIG. 32b

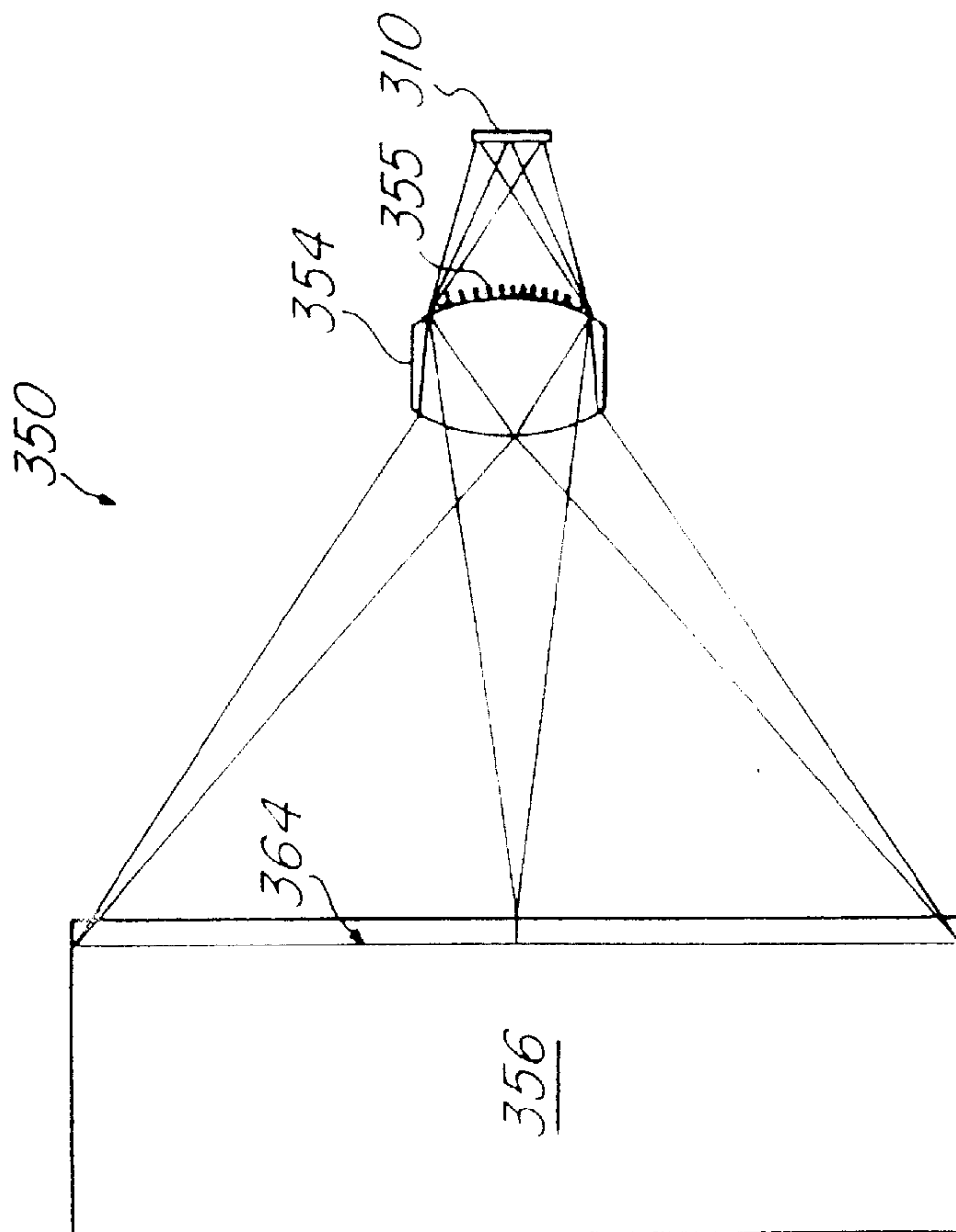


图32C

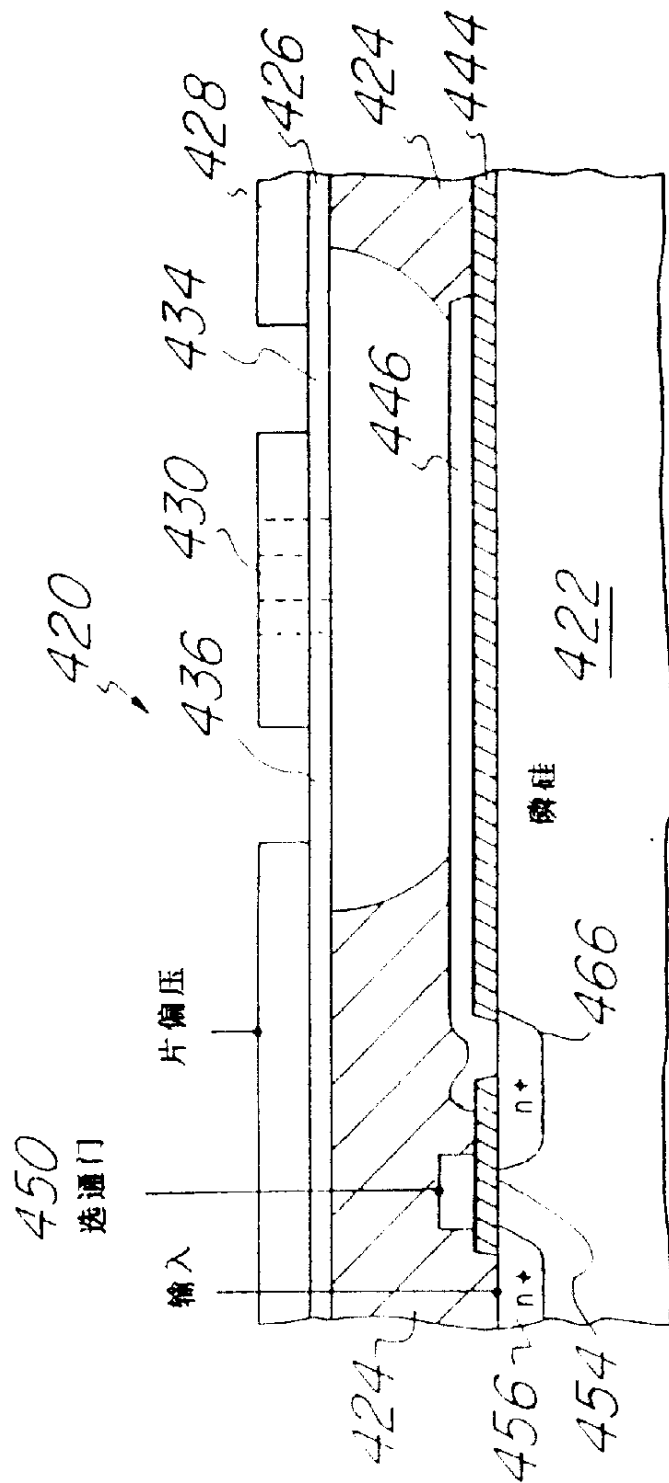


图33

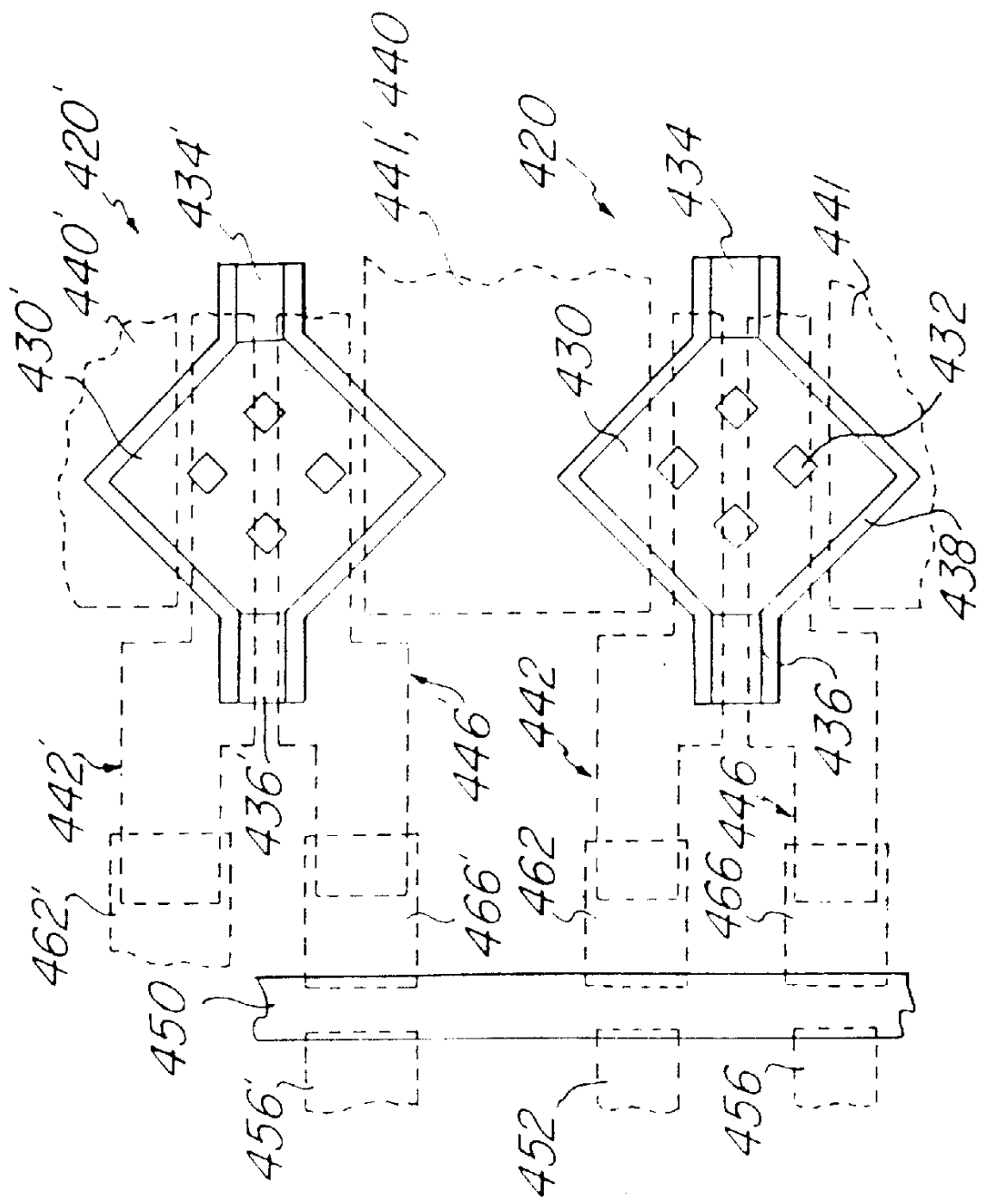


图34

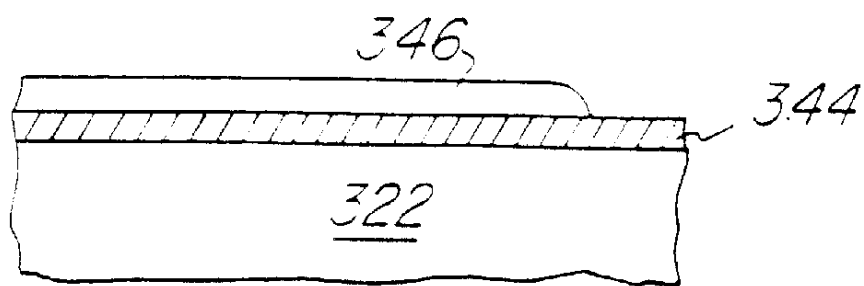


图35a

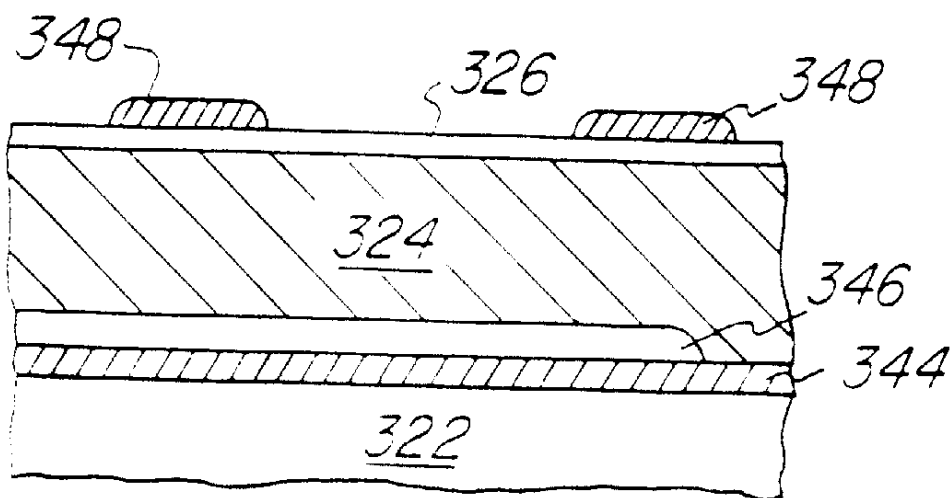


图35b

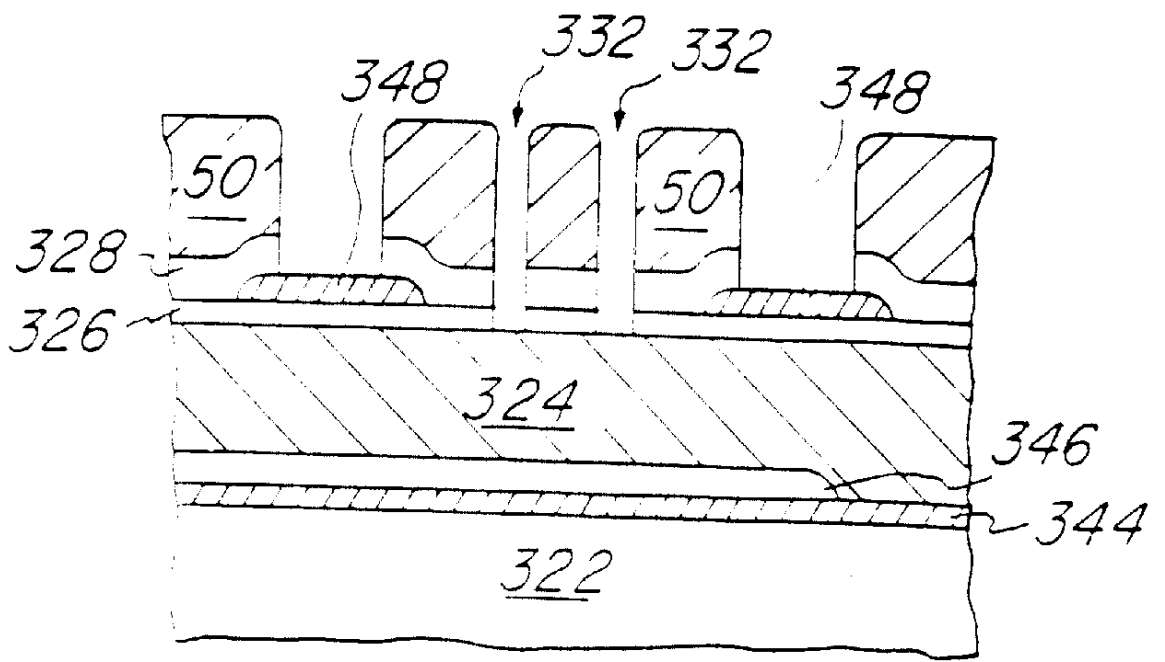


图35c

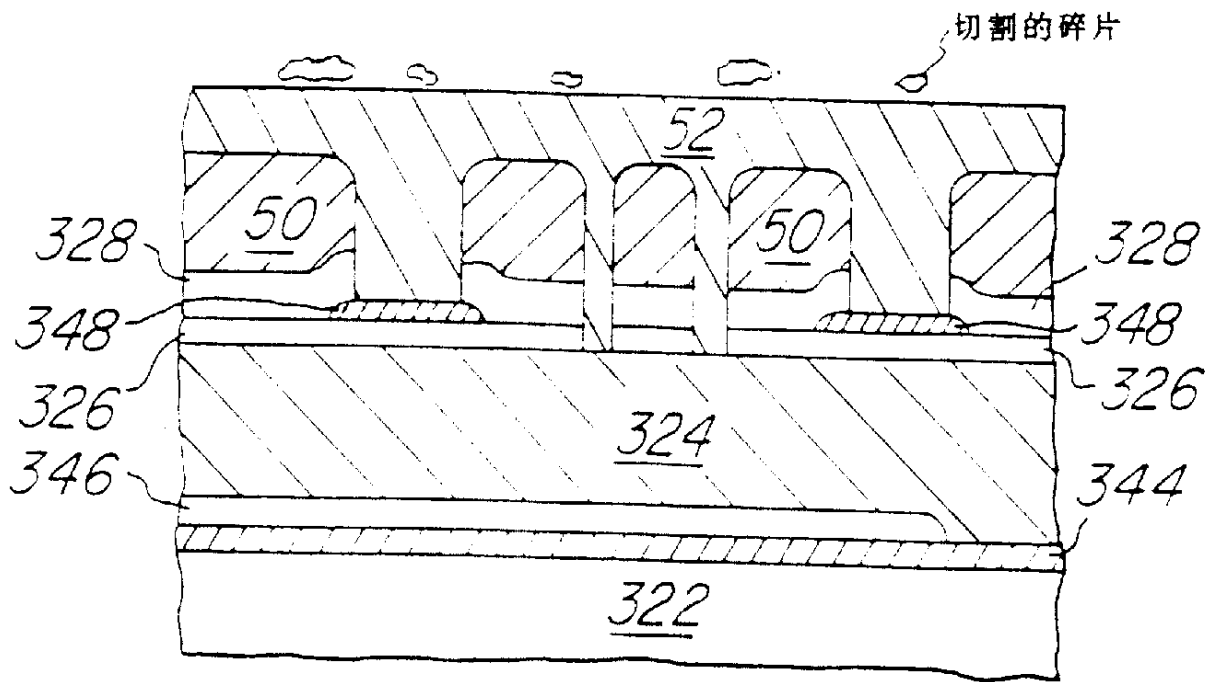


图35d

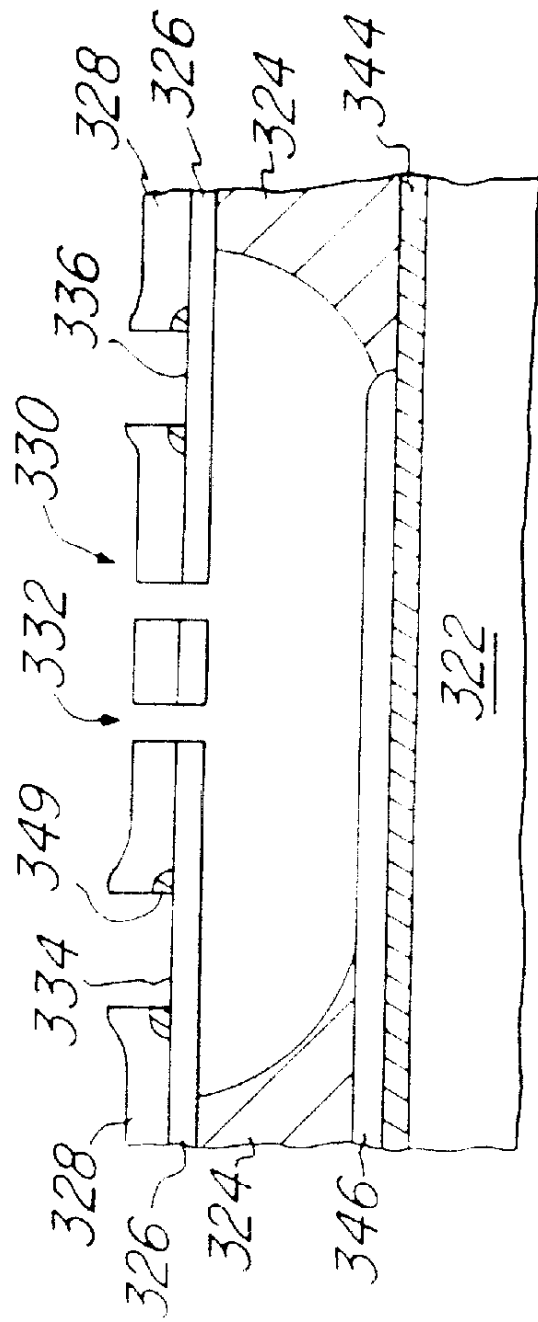


图35e

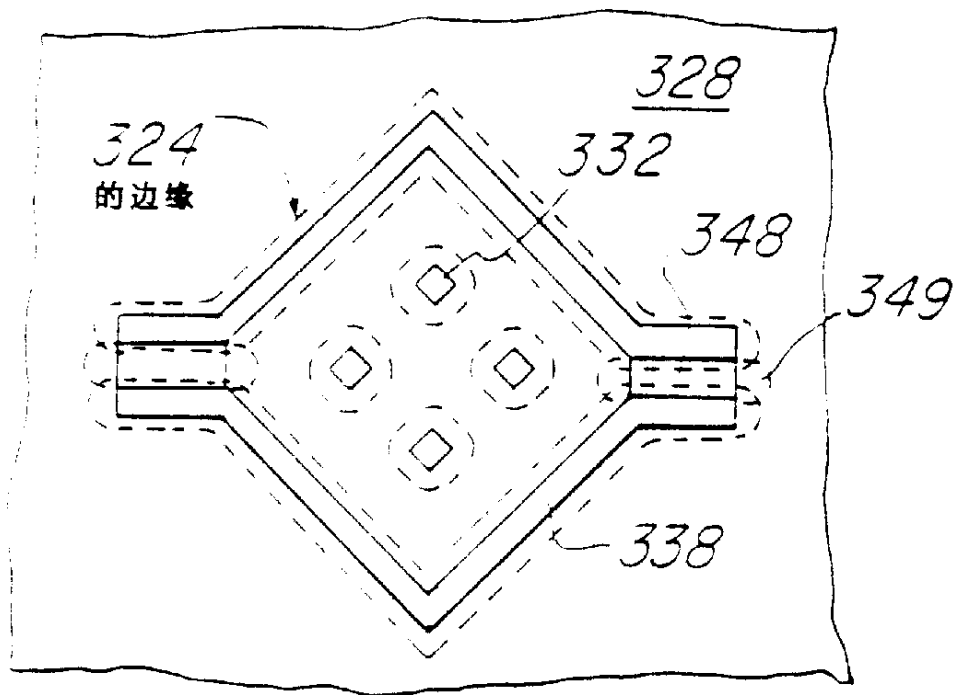


图360

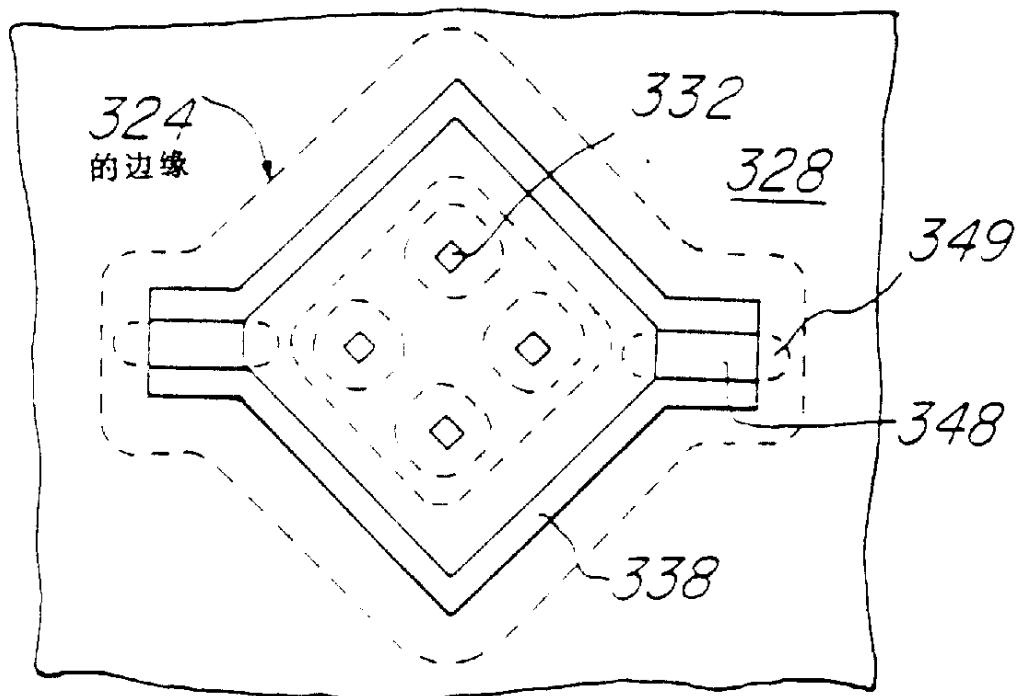


图36b

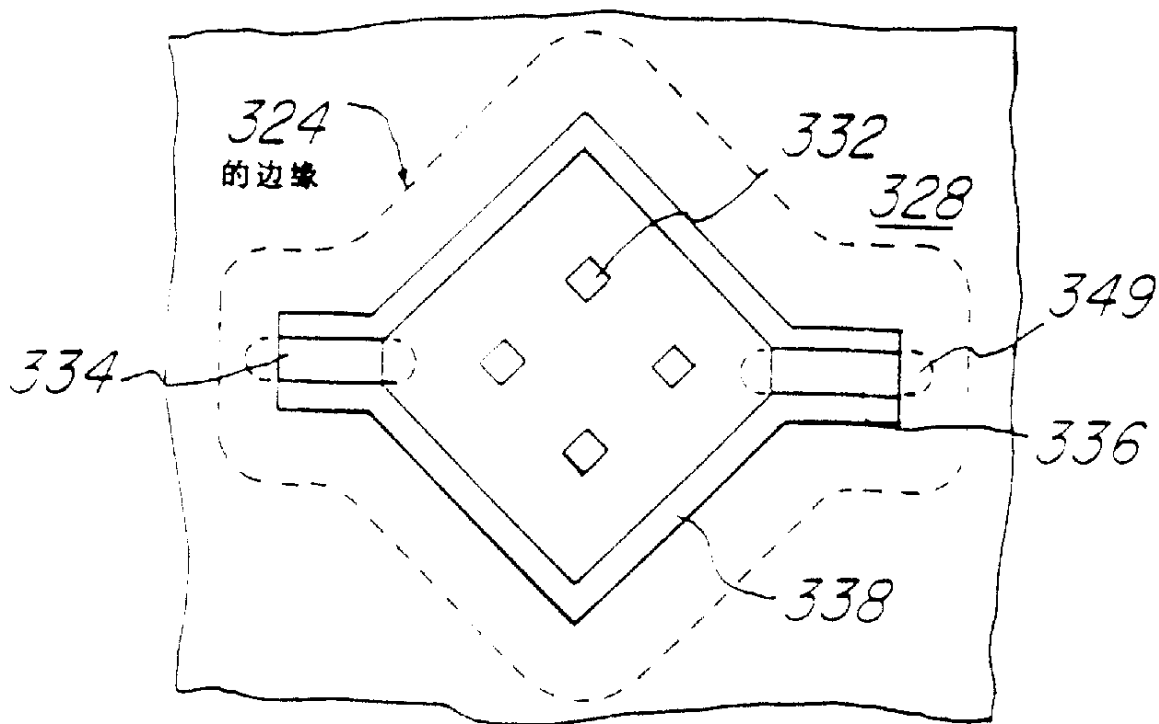
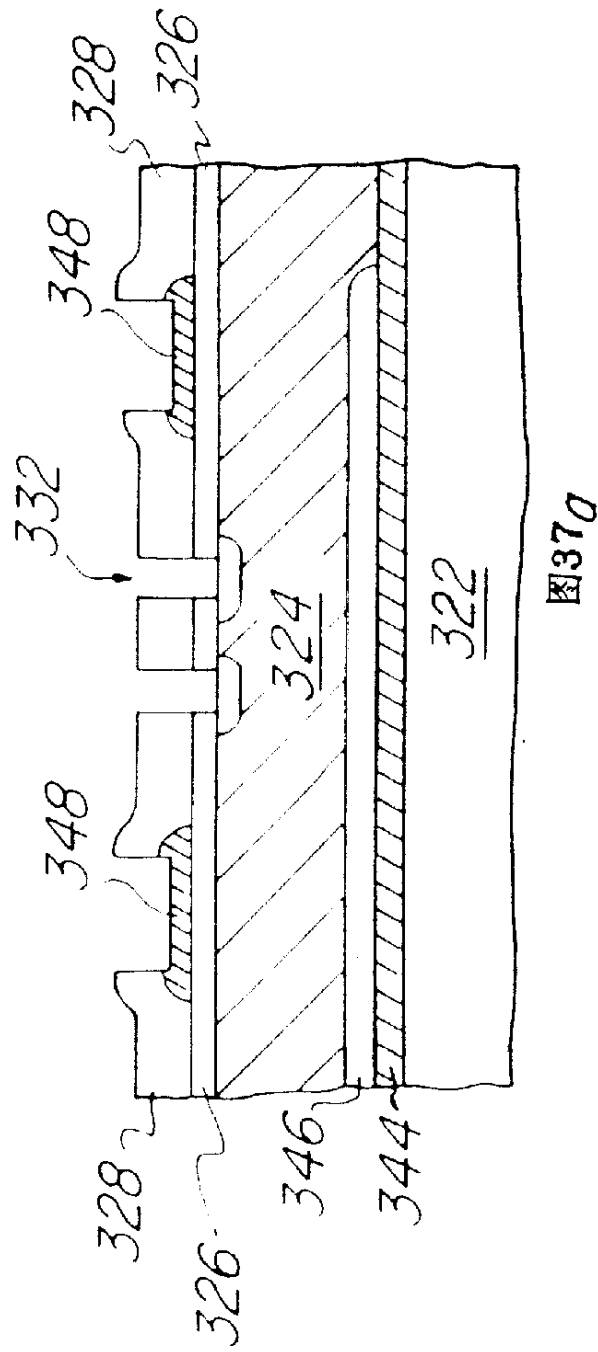


图36 C



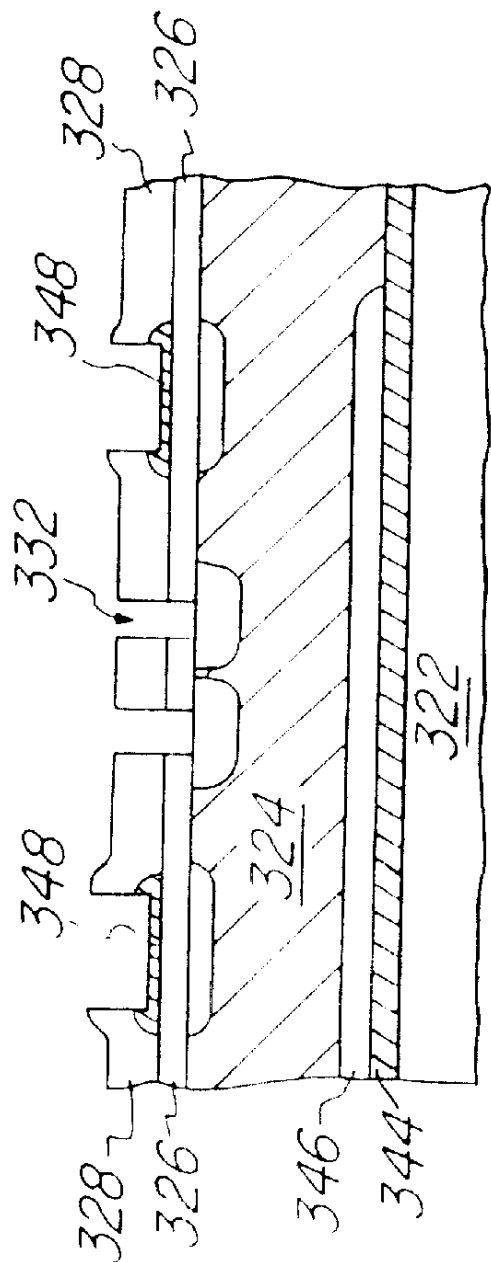


图37b

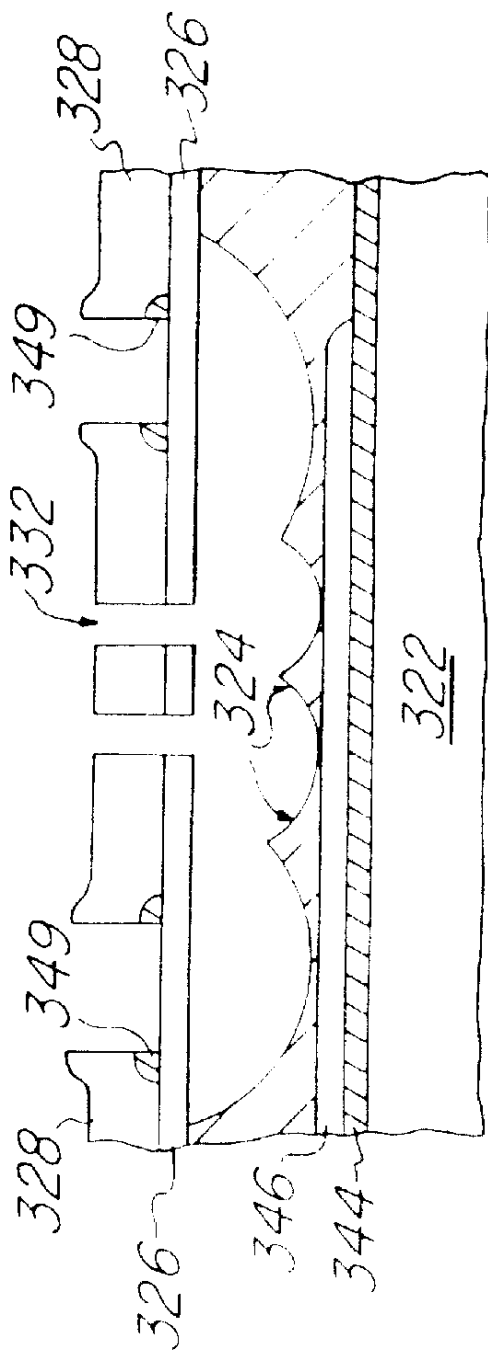


图37C

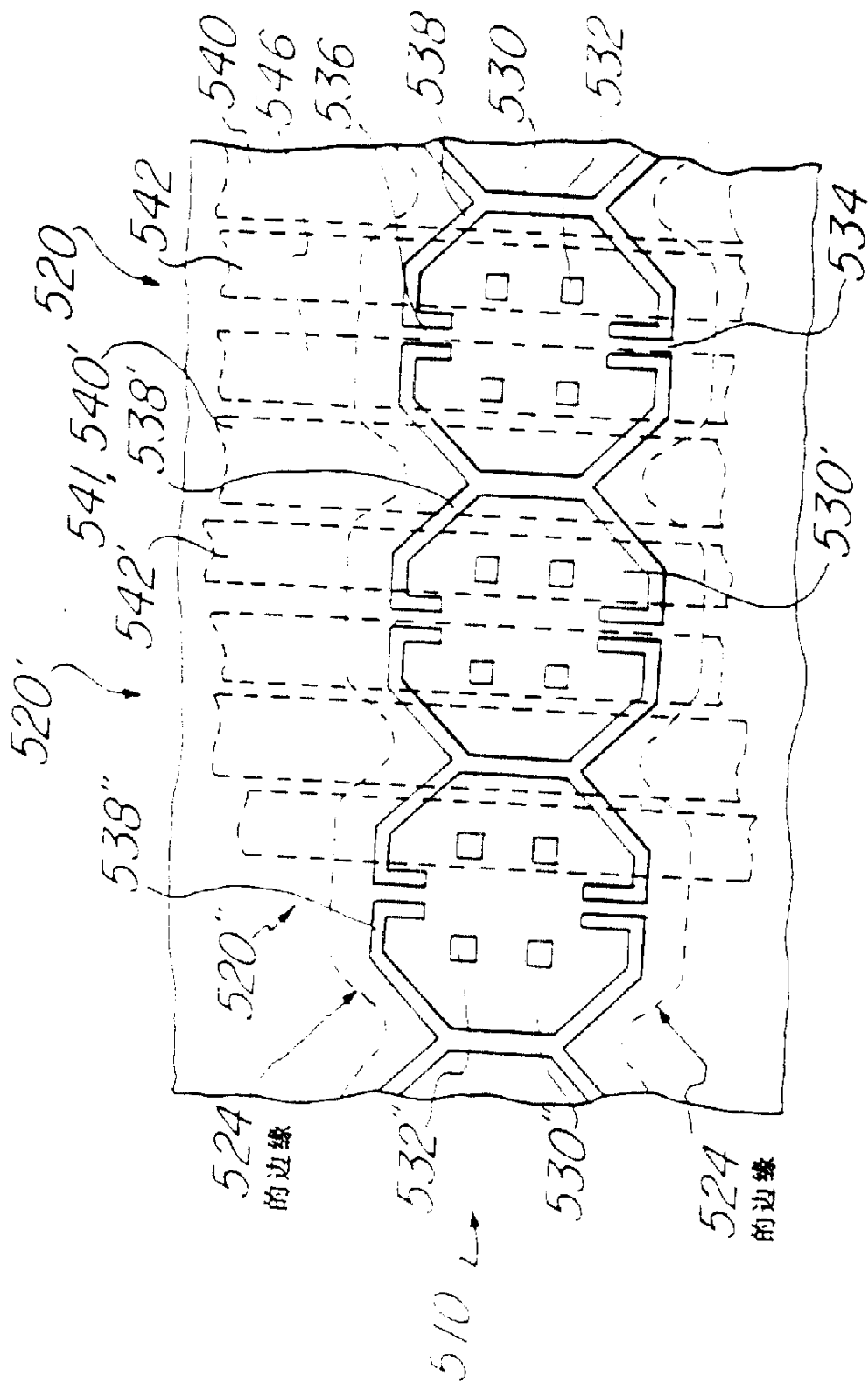


图38

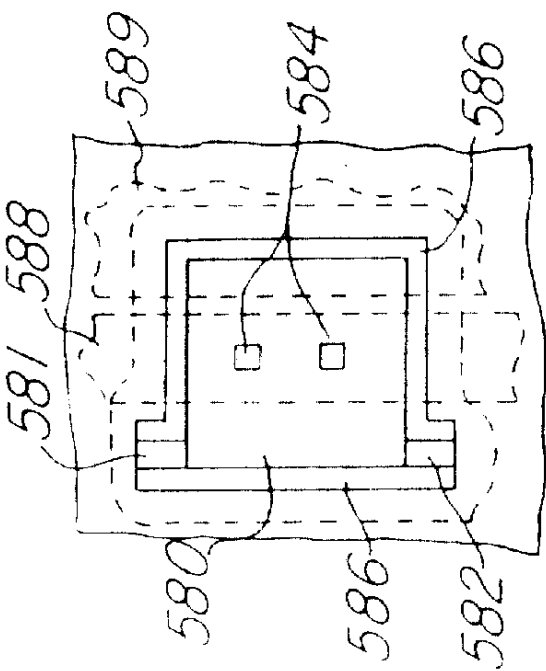


图39b

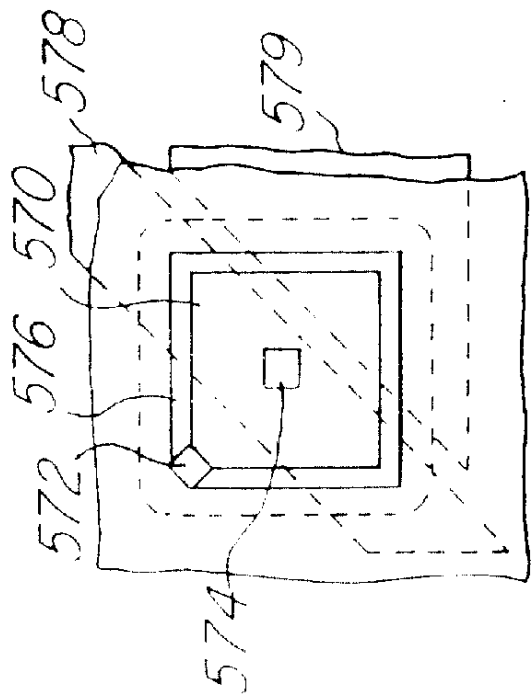


图39a

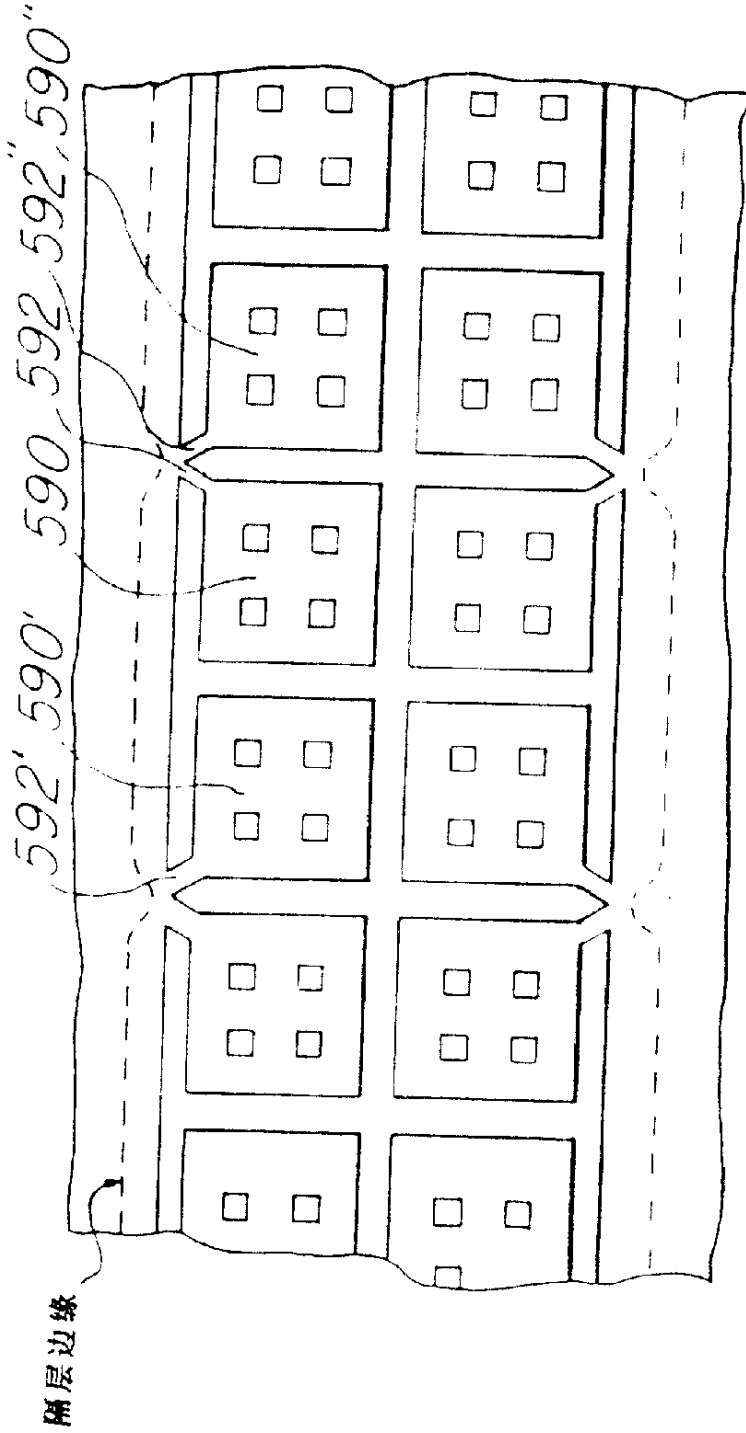


图39C

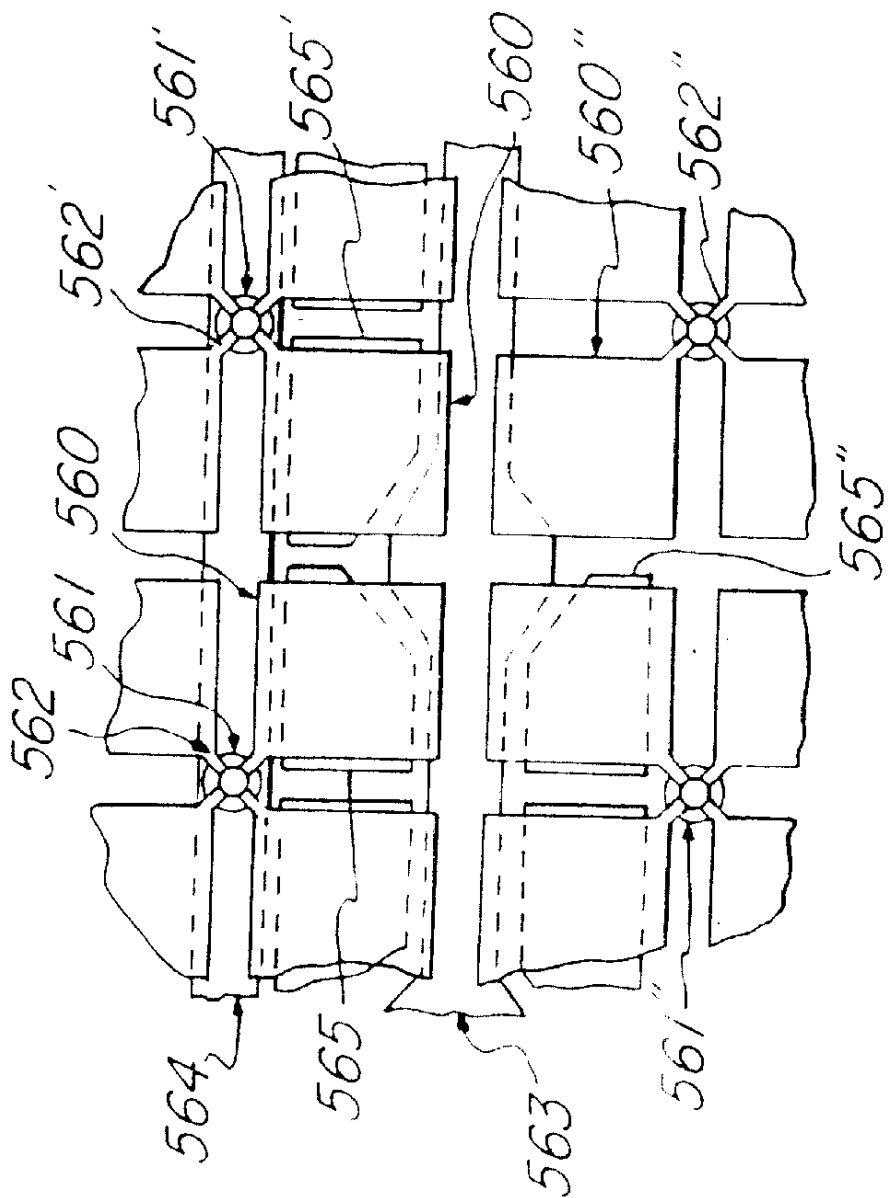


图 39D

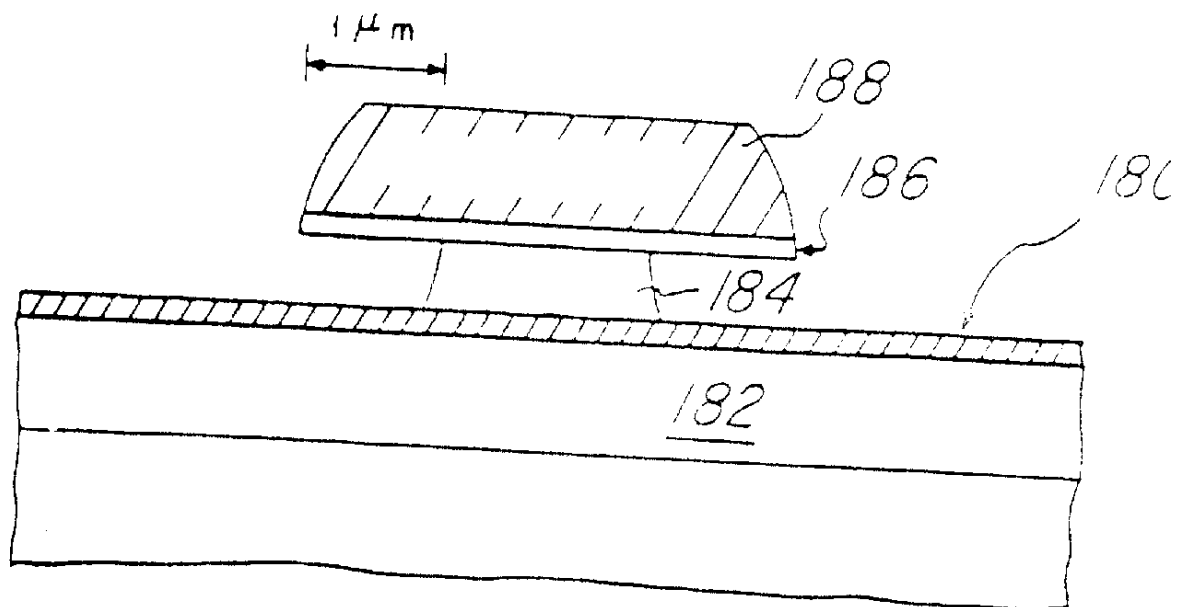


图40a

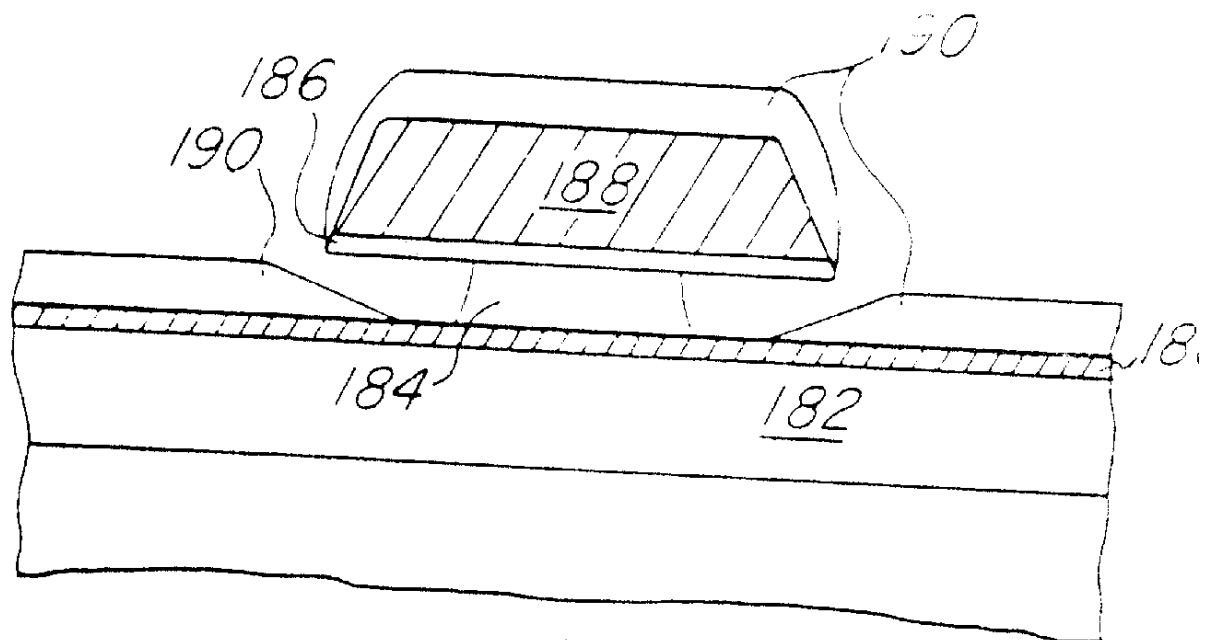


图40b

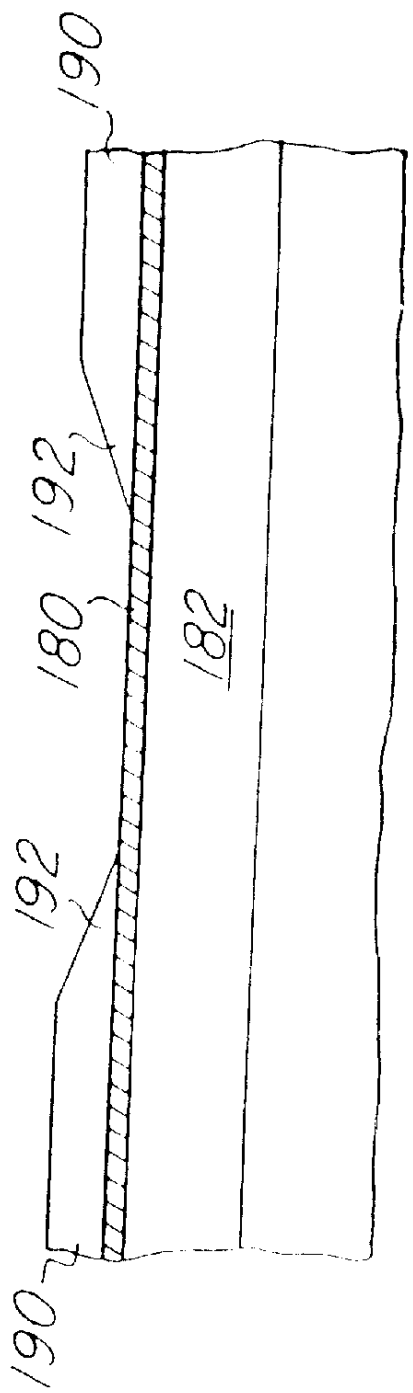


图40C

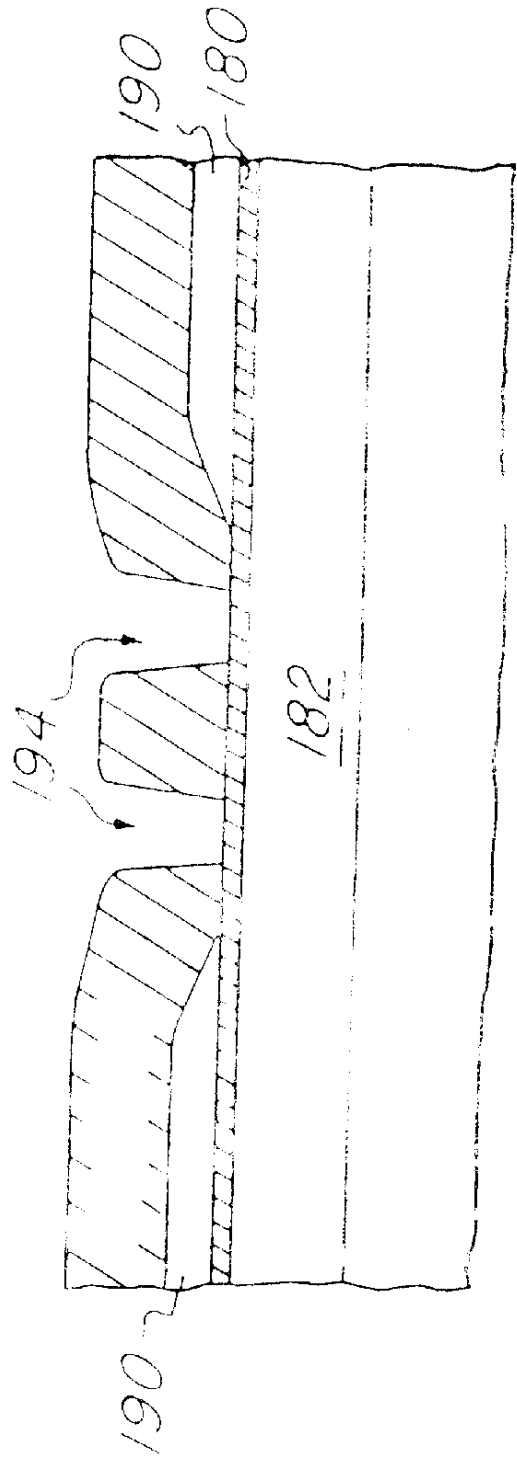


图40D

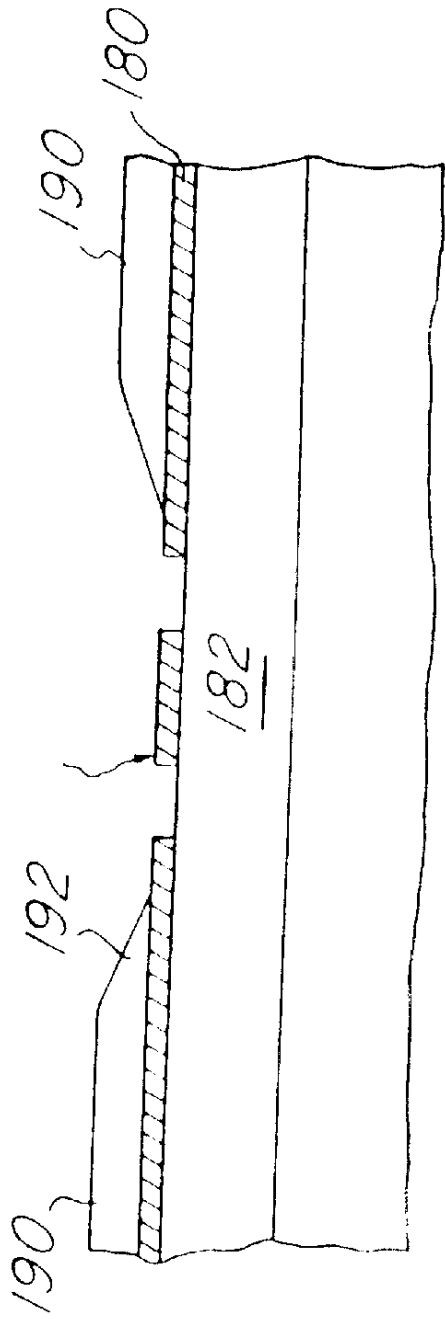


FIG. 40e

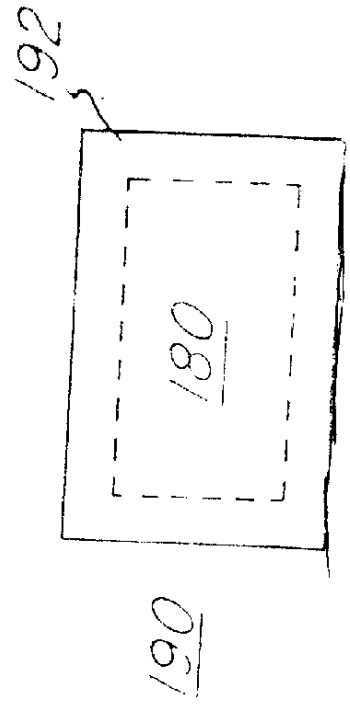
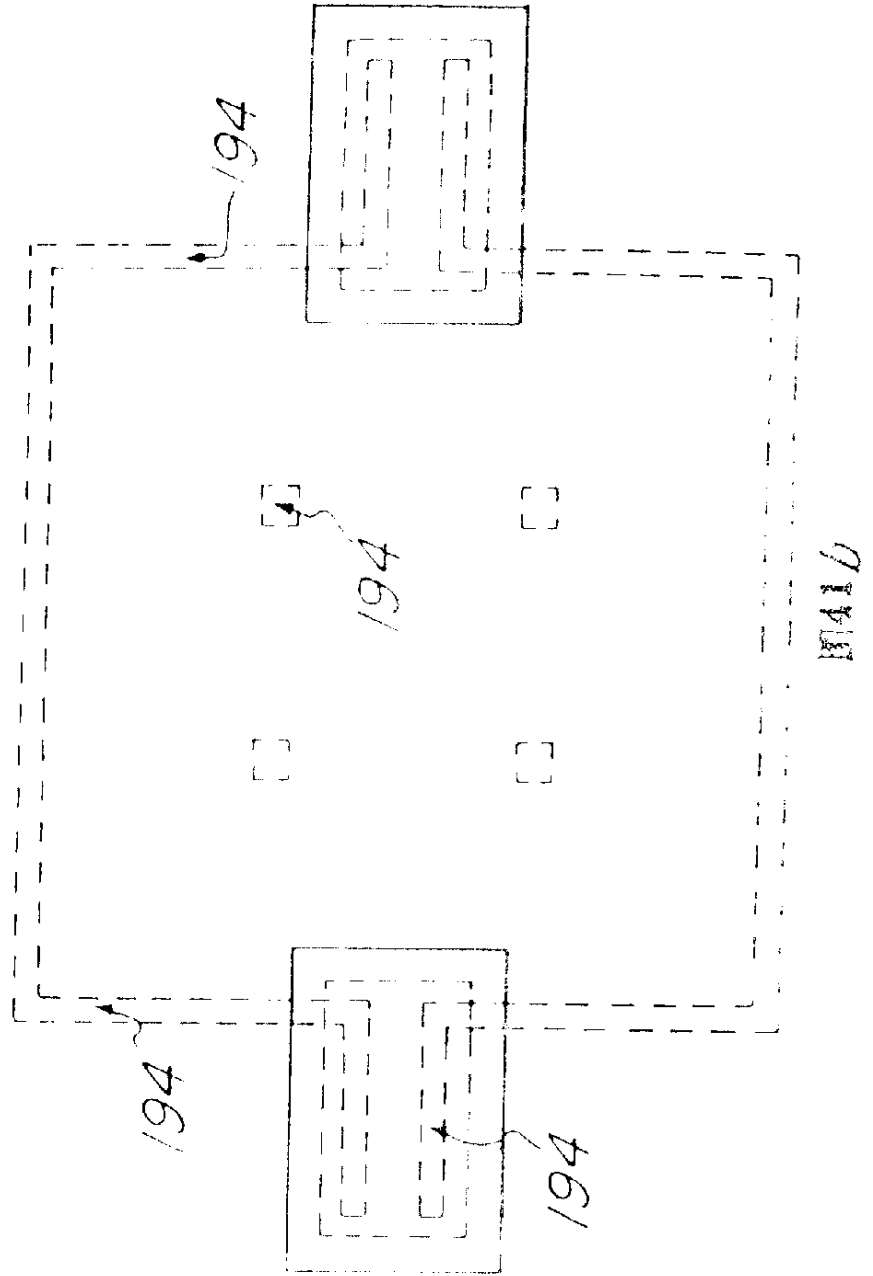


FIG. 41a



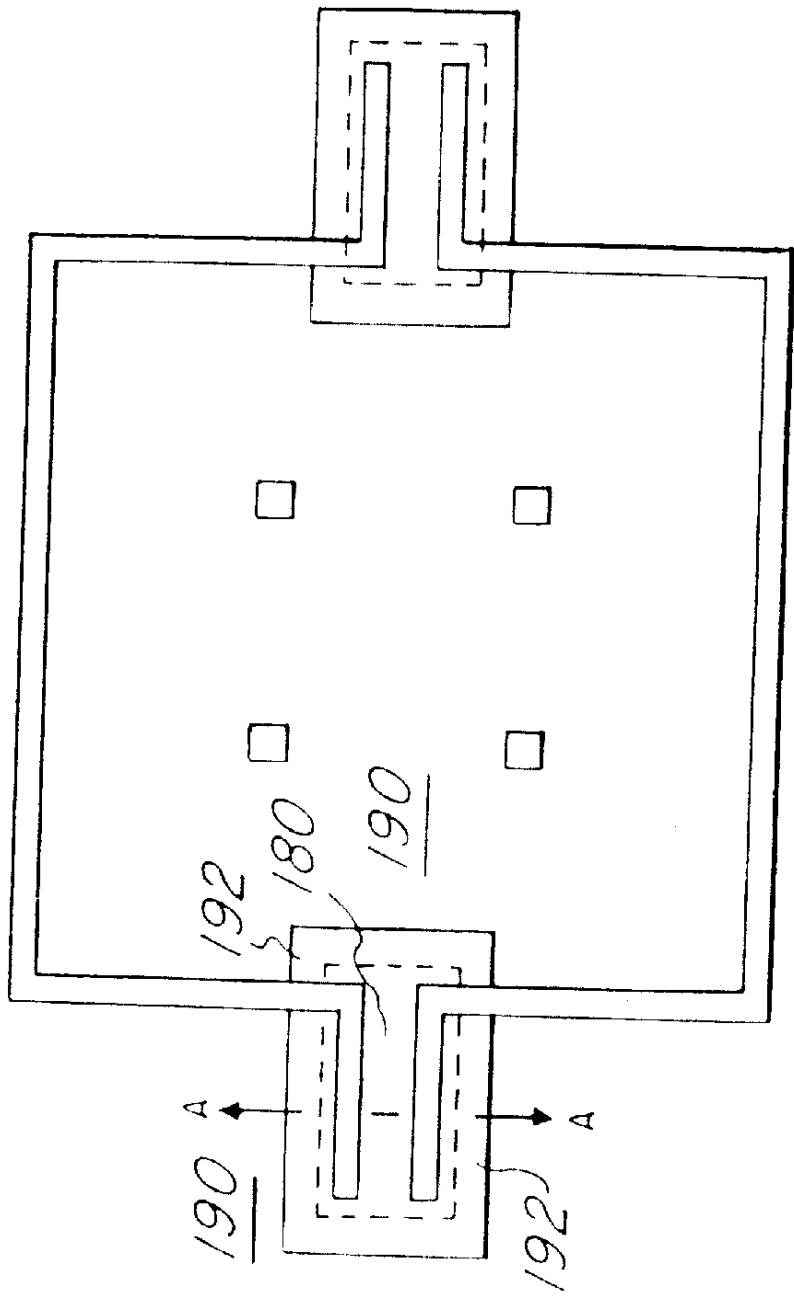


FIG. 1C

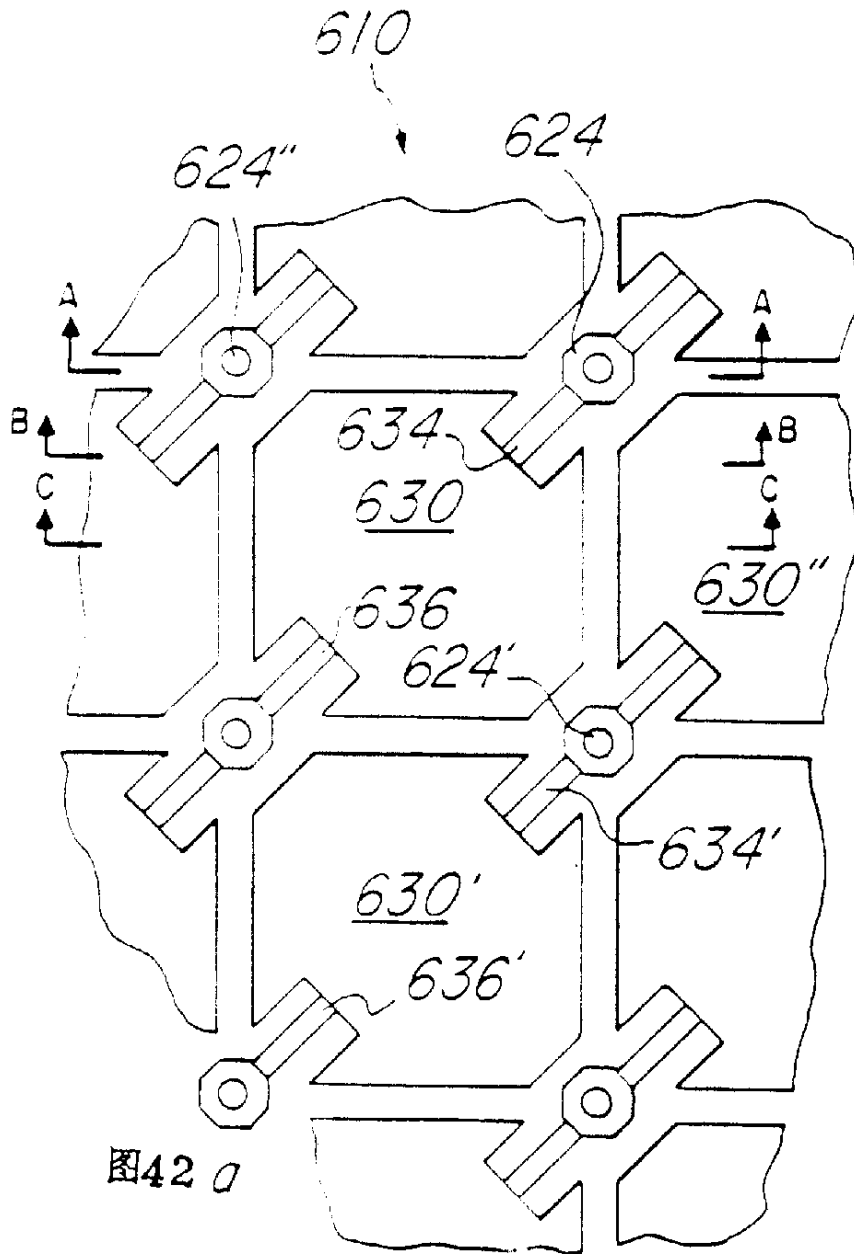


图42 a

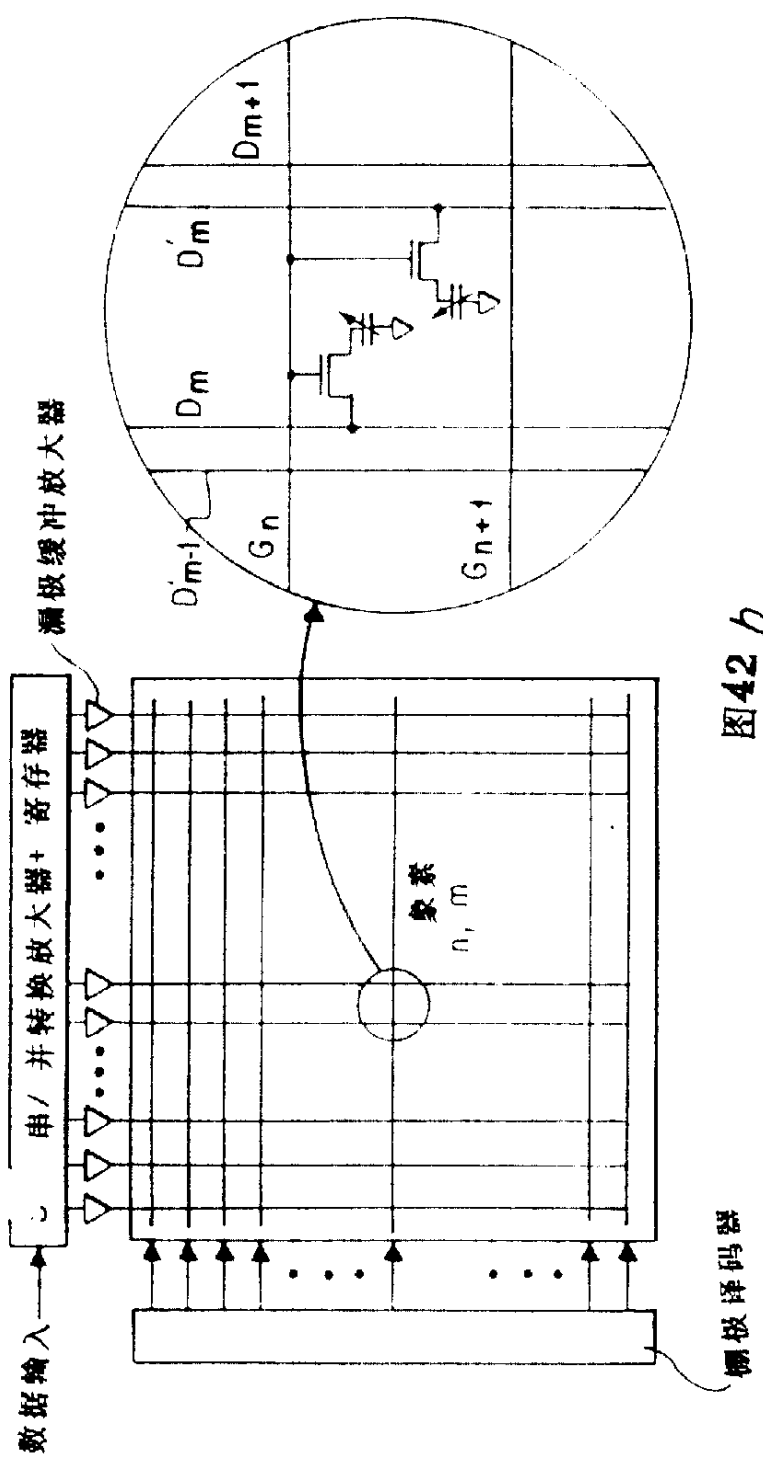


图42 b

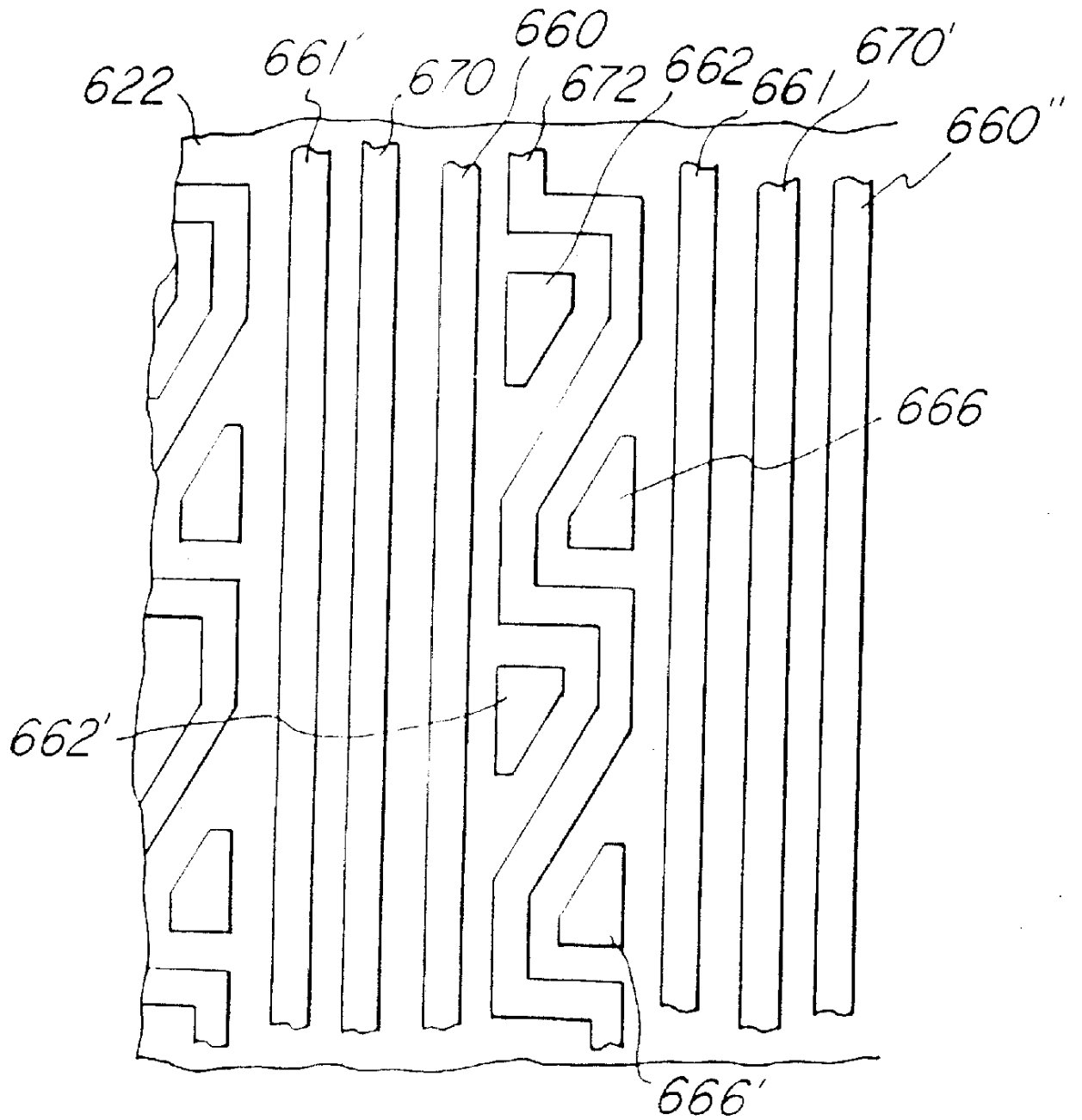


图43 a

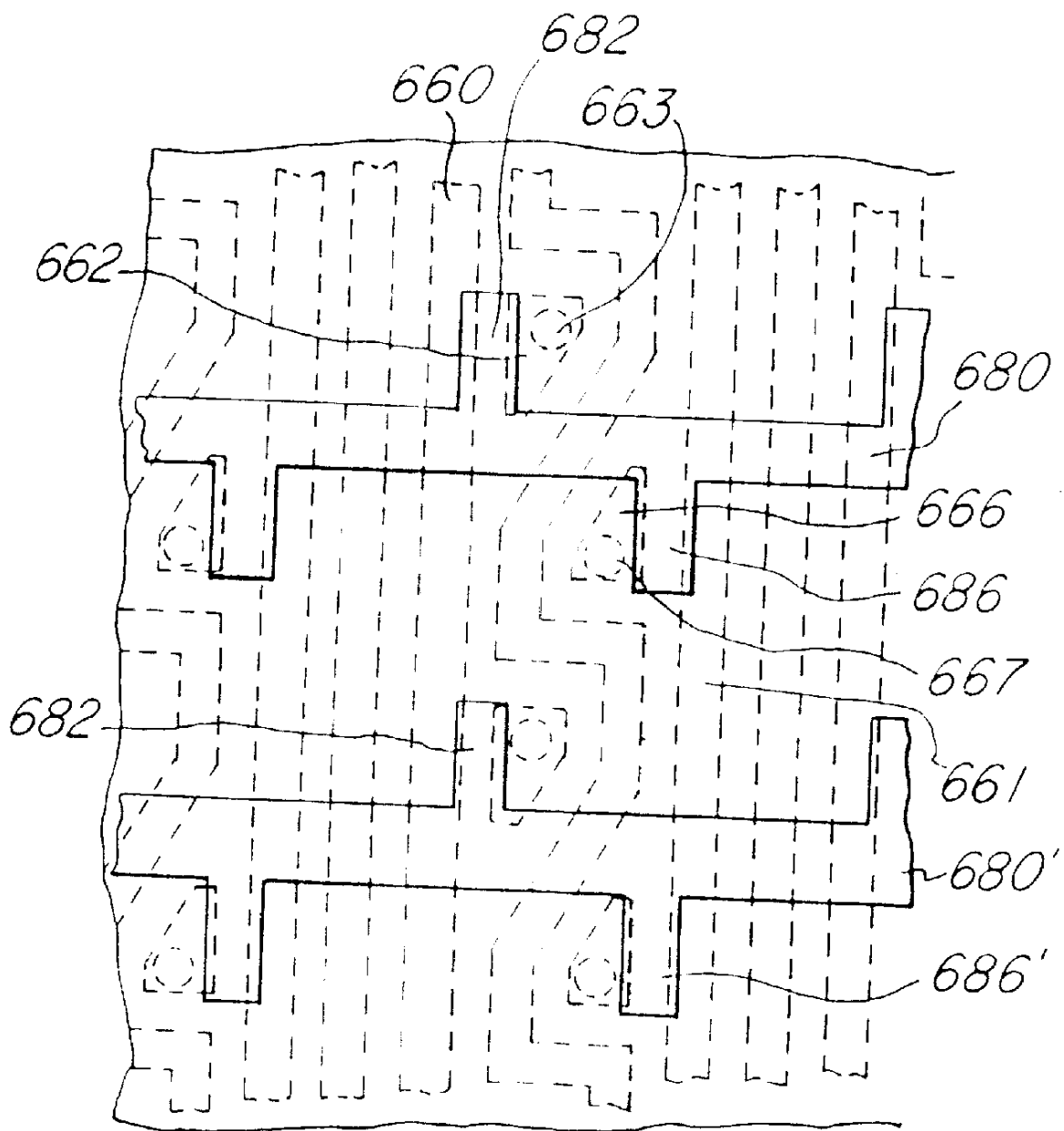


图43 b

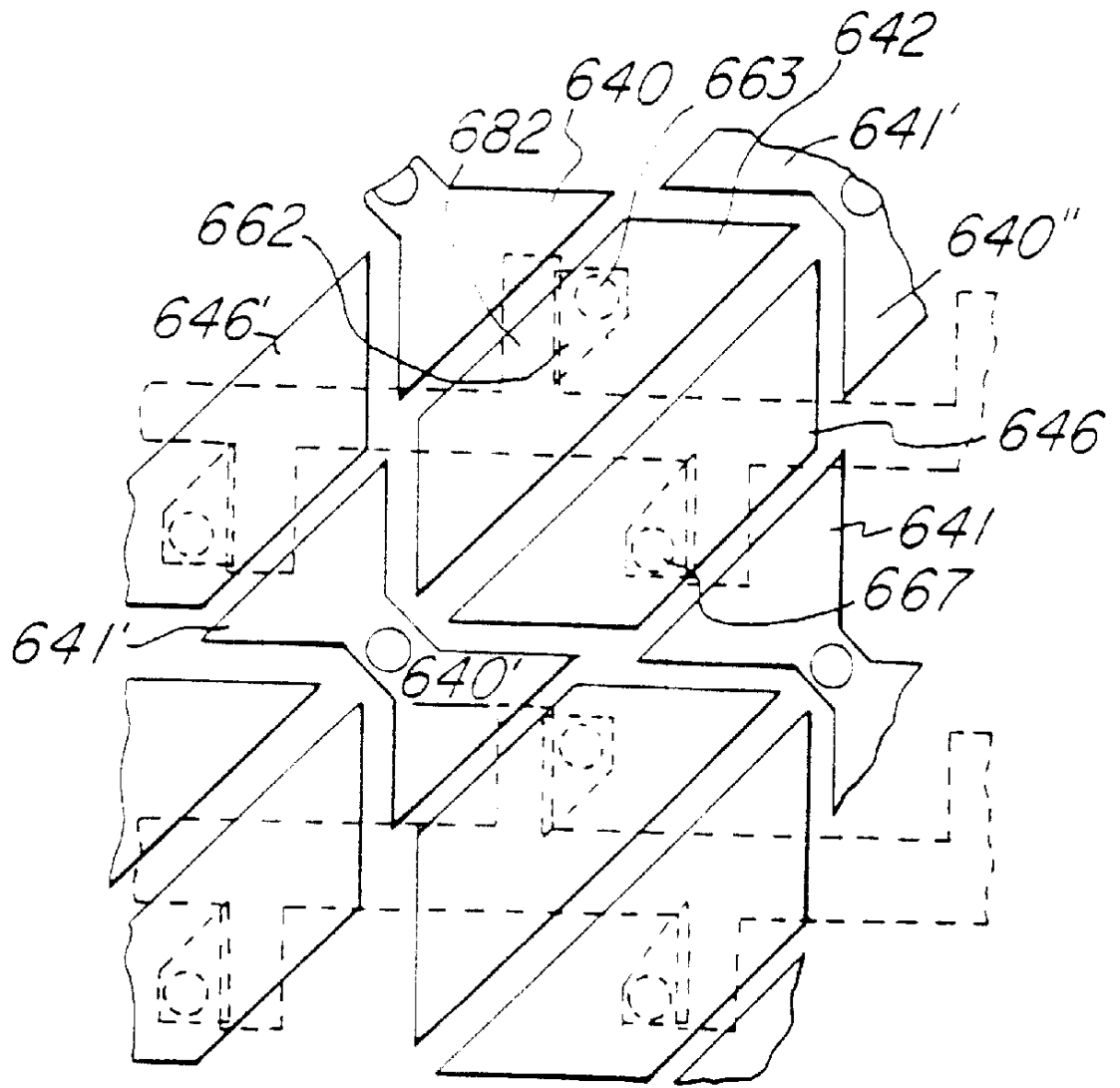


图43C

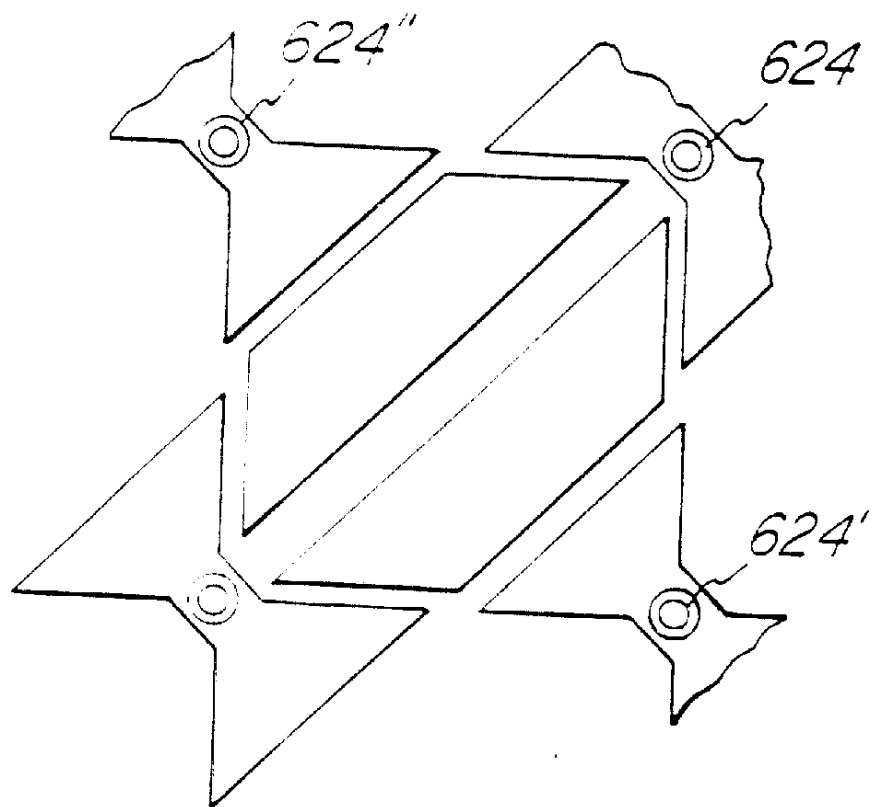


图43d

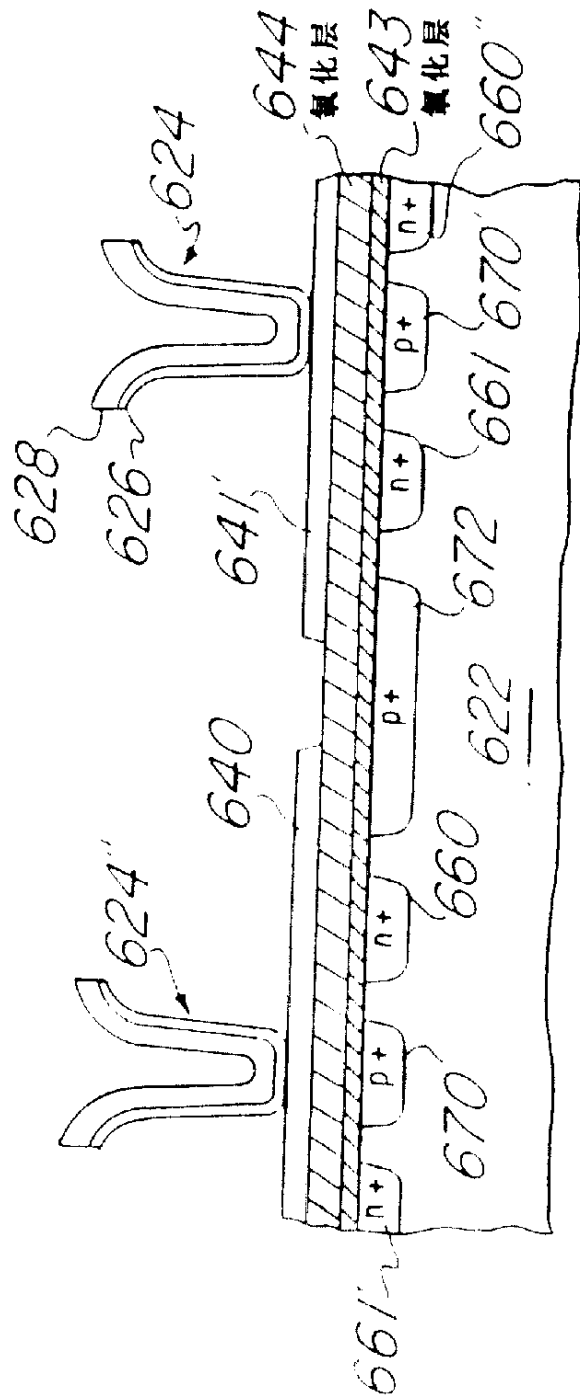


图440

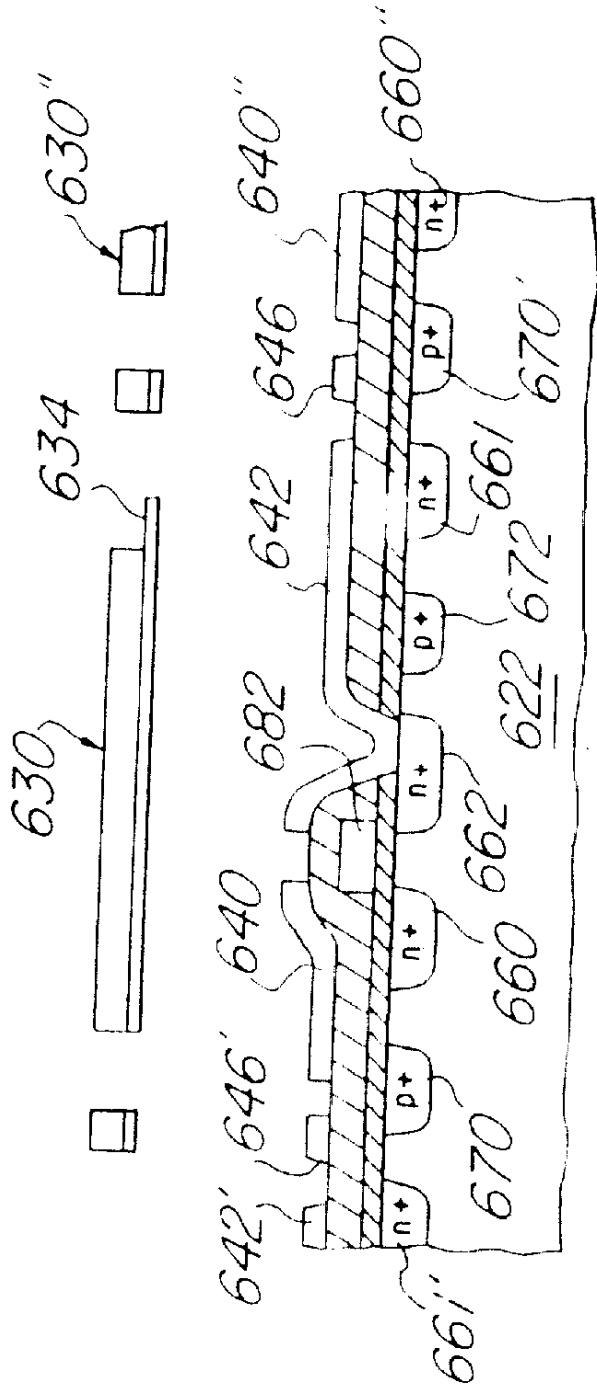


图44b

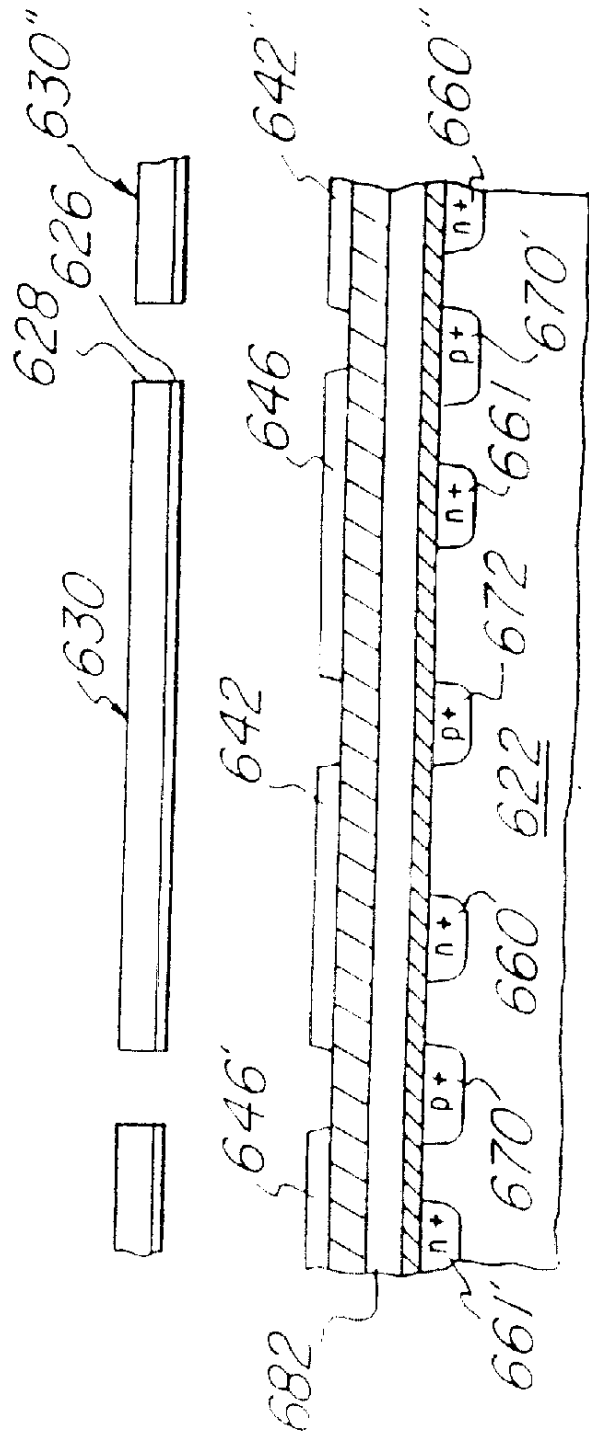


图44C