



[12] 发明专利说明书

CN 1020976C

[21] 专利号 ZL 89 1 07454

[51]Int.Cl³

G11B 3/00

[45]授权公告日 1993年5月26日

[24]颁证日 93.3.5

[21]申请号 89 1 07454.6

[22]申请日 89.9.18

[30]优先权

[32]88.9.21 [33]NL [31]8802335

[73]专利权人 飞利浦光灯制造公司

地 址 荷兰艾恩德霍芬

[72]发明人 埃弗特·简·范洛恩伦

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

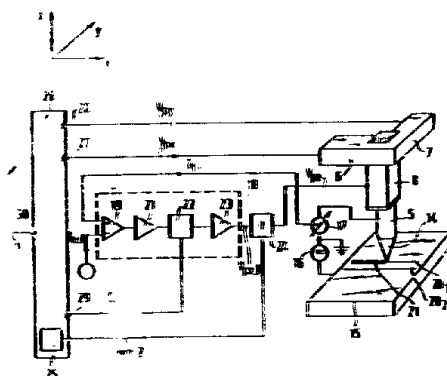
代理人 何耀煌 吴增勇

说明书页数: 附图页数:

[54]发明名称 表面亚微米处理方法及设备

[57]摘要

叙述了亚微米级表面变形的方法和设备。例如用于记录信息的目的。在扫描该表面期间,扫描隧道显微镜的尖端(14)由受控于尖端与表面间隧道电流的负反馈控制回路(18)保持于距离表面一恒定距离上,以及,为了在表面(15)上形成凹坑(21),将控制回路去激励,并由一控制电压(V_{pz})激励尖端高度驱动件(8),该控制电压作为时间函数而增长并有预定终值,以使尖端下降而进入该材料。



>40
<40

权利要求书

1.一种利用扫描隧道显微镜的尖端生产亚微米级的表面变形方法,其中,利用使尖端沿平行于表面的扫描方向移动的驱动装置使尖端按照所述表面需要加工的图样在与该表面平行的平面上描绘路径,在描绘所述路径时,通过将第一控制电压加到尖端高度驱动件上,把所述尖端保持在距离所述表面恒定距离的基准高度上,所述电压由负反馈控制回路供给,该负反馈控制回路由尖端与表面间的隧道电流控制,所述电流出自加在所述表面与所述尖端之间的恒定隧道电压,这种变形方法的特征在于表面变形包括以下分步骤:

(a) 中断所述反馈控制回路,

(b) 用第二控制电压激励尖端高度驱动件,

(c) 第二控制电压的幅度作为时间函数而增加,使尖端从基准高度向下以限定的高度落入该表面中,

(d) 用尖端在所述限定高度上在表面中产生一个凹坑,所述凹坑具有精确限定的几何形状,以及在凹坑形成后接通负反馈控制回路,使得在表面上形成下一凹坑之前将该尖端缩回到所述表面之上的基准高度上。

2.权利要求1的方法,其特征在于:通过把负反馈控制回路中断瞬间的第一控制电压的瞬时值和一个其幅度作为时间函数而增长并有预定终值的第三电压相加来得到第二控制电压。

3.权利要求1或2的方法,其特征在于:在硅层中形成凹坑。

4.权利要求1、2或3的方法,其特征在于:以这样的方式产生大量凹坑,即,使得它们的中心之间相互距离小于尖端扫描方向上凹坑的尺寸。

5.权利要求1、2或3的方法,其特征在于:相继书写的凹坑表示一个信息信号而带变形的表面表示记录载体表面,表示待记录信息的电信号用于对尖端在扫描方向上的移动进行时间控制,并且,用于分别确定尖端高度控制回路中断或闭合的时刻,而在中断和闭合时刻之间,将所述第二控制电压加到尖端高度驱动件。

6.一种按权利要求5的方法处理并形成记录载体的表面,其中,相继的凹坑代表在轨迹中排列的信息区,按照在轨迹方向上信息区的顺序对信息编

码,其特征在于:所述信息区为表面凹坑,这些凹坑具有小于0.01平方微米的表面面积的一致几何形状。

7.用于执行如权利要求1、2、3、4或5中所述方法的设备,该设备包括:用于夹持待加工的材料托架,细导电触针,用于使触针和托架在平行于托架平面的相互正交的两个方面上相对移动的第一和第二驱动件,用于调整触针尖端与待加工材料的表面间的距离的尖端高度驱动件以及用于将第一控制电压加至尖端驱动件的负反馈控制回路,其特征在于(1)包括一个处理信号接收和控制电路,它具有用于接收包含有关在表面上欲产生图样信息的电子信号的输入端,所述电路具有第一、第二和第三输出端,其中,第一和第二输出端用于提供第一和第二控制信号,这些输出端连接到第一和第二驱动件,而第三输出端用于在给定时间间隔内提供瞬时地中断尖端高度控制回路的信号,(2)还包括在所述时间间隔内将尖端高度驱动件的第二控制电压提供给该尖端高度控制回路的电压源,所述第二控制电压作为时间函数而增长并具有大于第一控制电压终值的终值。

8.权利要求7所述的设备,其特征在于:尖端高度控制回路具有采样保持电路,该电路的控制输入端连接到所述处理信号和接收控制电路的第三输出端,

尖端高度控制回路的输出端连接到累加装置的第一输入端,累加装置的第二输入端连接到与采样保持电路的控制信号同步通断的电压源,该电压源提供具有递增幅度的电压,所述累加装置的输出端连接到尖端高度驱动件。

9.一种如权利要求7或8所述的设备,其特征在于,它使所述表面带有表示信息信号的图形,该图形包括相互分隔开的连续信息凹坑,该设备可在书写模式和读出模式之间切换,而且在读出模式当中,尖端高度驱动件仅由所述第一控制电压或与信息无关的控制电压所控制。

本发明涉及通过使用扫描隧道显微镜的尖端在亚微米级上使表面变形的办法,在所述的扫描隧道显微镜中,使用一种使所述尖端以平行于所述表面的扫描方向移动的驱动装置,根据在所述表面上欲

加工的图样,在与所述表面平行的平面上所述尖端描绘路径,在描绘所述路径时,借助于把第一控制电压加到尖端高度驱动件,将所述尖端保持在距离所述表面恒定距离的参照高度,所述电压由负反馈控制回路供给,而该负反馈控制回路由所述尖端和所述表面间的隧道电流控制,所述隧道电流起因于加在所述表面与所述尖端间的恒定的隧道电压。本发明还涉及执行所述方法的设备,涉及记录信息的方法,涉及记录和读出信息的装置以及由所述方法和设备记录的记录介质。

扫描隧道显微镜也可称作 STM,有段时期,它已成功用于原子级的表面结构的研究。该显微镜有一非常细的带有极细尖端例如钨制的触针,该触针装在定位装置上,该定位装置由例如压电驱动件控制,用此压电驱动件可将尖端以三个相互垂直的方向非常精确地定位,其中两个方向(X和Y方向)置于欲观察表面平行的平面上,而第三方向(Z方向)与此平面垂直,这使得以例如 0.01nm 的精度给尖端定位成为可能。

Z 或尖端高度驱动件为调整元件,利用此驱动件来调整尖端与表面之间的距离,可将此驱动件和触针连接,以相对于表面移动尖端,或者和材料托架相连接,使该材料相对于尖端移动。

在扫描欲观察导电表面期间,借助于 Z 方向的尖端驱动件维持尖端和该表面间的距离不变。该驱动件由负反馈回路控制,尖端和表面间距是如此之小,例如为 0.5nm 的数量级,使得当将一给定电压、即、所谓隧道电压加在尖端和表面之间时,所谓隧道电流开始在这些元件之间流动。在伺服回路中,该隧道电流和基准电流进行比较,后者是由尖端与表面所要求距离所确定的。这样得到的信号用于校正尖端的 Z 位置,以这种方式,使得隧道电流等于基准电流,以及尖端与表面的距离等于所要求距离。尖端在与表面平行的方向上相对于表面的移动,旨在扫描该表面,是借助于另两个驱动件 X 和 Y 驱动件来实现的。

研究表面情况时,利用与尖端高度驱动件 Z 方向控制信号成正比的信号,将尖端与表面间距离的变动表示为该尖端的 X 和 Y 位置的函数,从而得到该表面布局的图象。

在较近的一些实验中,还利用扫描隧道显微镜的尖端在表面产生变形。这些实验中的一个,已经

描述于“IBM Jour.Res.Dev.”Vol.30, no.5, 1986 年 9 月, PP492-9 中的文章“用扫描隧道显微镜的表面变形”。在该实验中,将尖端降落到金箔、一种软质材料上,发现产生了 15nm 数量级直径的表面变形。该文进一步提出,这项技术有可能用于高密度存贮系统和微加工。然而,用这种方法不但产生所希望的变形,而且会在和所希望变形中心相距达 70nm 范围内出现额外变形。确实,额外变形不稳定,只要在 17 分钟左右的相当长时间后便会消失。如果在表面产生相互接近的大量变形,那么,这就意味着连续变形间的等待时间,在实际中长得不可接受,由于在不稳定的额外变形区中加工是不可能的,故而必须对这个等待时间加以考虑。再,只要在距离第一变形较短距离处出现第二变形,即使额外变形消失后,对第一变形的作用并不清楚。如果要将信息以分立的、隔开的信息区的形式记录于表面,那么,可通过将尖端在产生第一信息区之后迅速放到额外变形外的位置上,以便在该位置处产生下一信息区。但是,就使用扫描隧道显微镜的可能的非常高信息密度的存贮装置而言,却没有做到最佳的利用。

本发明的一个目的是提供没有上述缺点的方法,该方法在与至今为止没有采用隧道显微镜进行加工处理的材料相结合方面提供了产生能及时稳定的表面变形的可能性。这种方法的特征在于:(1)由中断所述负反馈控制回路来产生表面变形,(2)由第二控制电压来激励尖端高度驱动件,第二电子控制电压的幅度作为时间的函数而增加,而且该电压有一预定的终值,该终值的结果是使尖端从基准高度降低到进入该表面的限定的深度,这样产生的凹坑具有精确限定的几何形状,(3)紧接着将尖端抽回到表面之上,并且再次接通负反馈控制回路,使得在下一凹坑产生之前将尖端提升到其基准高度。

这样,可以在那些不易流动、不太扩散并比金要硬的材料上形成能及时稳定的凹坑。

本发明基于这样的认识:采用非常优越的方法可产生令人惊奇的、完全不能预料的效果,即,在将几毫微米直径的尖端插入硬材料时,不会断裂或磨损,甚至变得更锋利。

应当注意,“Journ.Vac.Sci.Technology”, A6(2)PP537-539(1988)中的文章“用扫描隧道显

显微镜的毫微米范围内的表面变形”描述了借助于扫描隧道显微镜的尖端在比金更硬、换言之，在金属玻璃材料中产生变形的实验。在该实验中，在形成变形时，尖端高度的负反馈回路维持运转。当尖端到达必须产生变形的位罝时，尖端与表面间电压增加到 2 伏特，而隧道电流增到大约 300nA，这时，该电流开始振荡。大约 3 秒后，该电流又下降，可以确定，已经形成了一个 30nm 直径，15nm 高度的小丘。作为这种现象的一种解释，该文认为大量材料在尖端下溶解，而且，由于表面与尖端间的强电场，此材料被引向尖端，该电场在溶解的金属冷却时也存在。根据本发明的方法及得到的变形均不同于上面提及的文章所述的方法及得到的变形。

根据本发明的方法的另一特征在于：第二控制电压是通过将负反馈控制回路被中断瞬间的第一控制电压瞬时值和第三电压相加得到的，其中，后者的幅度作为时间函数而增加，并且，有一预定的终值。

由于凹坑开始变形瞬间的第一控制电压的瞬时值保持到形成凹坑为止，所以，可以实现在凹坑变形后，尖端立即到达其基准高度。

原则上根据本发明的方法可用于各种材料。本方法最佳实施例的另一特征在于该材料为硅。该材料有相当大的硬度以及足够高的导电率，以实现尖端高度控制所需的隧道电流。

在“*Journ. Vac. Sci. Technology*”A6(2)(1988) PP.537-539 中的所述文章中，已经注意到用该文所描述的方法也可形成若干线条。然而，这些线条有不规则的几何形状，并由于热漂移而受到干扰。相反，如果根据本发明的方法还具有这样的特征，即，以这样方式产生大量凹坑，使得它们中心的相互距离小于尖端扫描方向的凹坑的尺度，那么，该方法也适合于在表面形成线条或轨迹。这样形成的凹坑相互合并，然后，构成具有规则几何形状的轨迹。这种方法非常适合于制造有极为微细细节的表面结构，这种微细细节是用常规方法所不能制出的。这种方法的重要应用为集成电路制造领域，在集成电路中，直接在硅衬底上形成各种结构，或在掩模上先产生各种结构，然后将掩模复制到衬底上。

由于能够形成非常小和精确限定的凹坑，所

以，根据本发明的方法的实施例非常适合于在记录介质上记录信息。该实施例的另一特征在于表示欲记录信息的电信号可用于对扫描方向的尖端运动进行时间控制，并且，用于确定尖端高度控制回路中断和闭合的时刻；在这两个时刻之间，将所述第二控制电压加到尖端高度驱动件上。

用该方法记录的记录介质可用相同的用于记录信息的扫描隧道显微镜来读出。读出期间，显微镜以已知方式工作，即，以不变的隧道电流工作。Z 驱动件控制电压的变动足以代表已读出的信号。在这种环境下，最好以将尖端保持在记录介质表平面上恒定高度处的 Z 驱动件的控制电压，来扫描记录介质上的记录区。这样的电压称为信息无关的控制电压。如这种电压控制 Z 驱动件，那么，变化的隧道电流表示已读出的信息。扫描期间，除了在记录载体表面的最后大斜坡后面的部分之外，尖端在 Z 方向上不移动，因此，能够以很多的速率进行扫描。

应当注意，从美国专利说明书 4, 575, 822 本身就知道了使用扫描隧道显微镜来读出记录介质上的信息区。所述专利说明书比较透彻地描述了信息区如何以多层记录介质中的两层之间的电荷包的形式进行记录的。所述说明书还阐述了信息区可能有表面物理扰动的形态，所述扰动可由所述物理探针与表面间的物理接触产生，但对此没有进一步详细说明。例如，它没有说明探针是隧道显微镜的尖端。美国专利说明书 4, 575, 822 并没有展示这样观点，即，借助于特定控制以限定的方式把尖端落到记录介质表面，以及有效利用肯定令人惊异的事实，即，尖端无磨损。

本发明还涉及用本发明的方法进行记录的新记录载体。该记录载体（类似已知的其信息区按轨道排列，而轨道内信息以轨道方向按信息区顺序进行编码的记录介质）的特征在于：信息区是表面上的凹坑，这些凹坑具有其表面面积小于 $0.01\mu\text{m}^2$ 一致的几何形状。

一致的凹坑，例如为 10nm 直径的圆。这就意味着新记录介质的信息单元或比特占用例如 $10 \times 10\text{nm}^2$ 的表面积。对于任意的一种可读的记录介质，如已知的“小型磁盘”，它拥有的信息比特占用大约 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 的表面区域。通过使用本发明，就可以对其信息密度比已知记录介质的信息密度大

10, 000 倍左右的记录介质进行信息记录和读出。

本发明还涉及一种实现表面变形和新颖方法的设备。该设备包括用于夹持待加工材料的托架, 细的导电触针, 用于使触针和托架在平行于托架平面的相互垂直的两个方向上彼此相对移动的第一和第二驱动件, 用于调整尖端和表面间距的尖端驱动件和用于将第一控制电压加到尖端驱动件上的电子负反馈控制回路, 该设备的特征在于: (1) 包括一种处理信号接收和控制电路, 它具有用于接收包含有关在表面上欲产生图样信息的电子信号的输入端, 所述电路具有第一、第二和第三输出端, 其中, 第一和第二输出端用来供给第一和第二控制信号, 这些输出端连接到第一和第二驱动件, 而第三输出端用于在给定时间间隔内提供瞬时地中断尖端高度控制回路的信号 (2), 还包括在所述时间间隔内提供尖端高度驱动件的第二控制电压源, 所述第二控制电压幅度作为时间的函数增至预定的终值, 该终值大于第一控制电压的预定终值。

本装置的最佳实施例的特征在于: (1), 尖端高度控制回路具有采样保持电路, 该电路的控制输入连接到所述电子电路第三输出端, (2) 尖端高度控制回路的输出连接到累加装置的第一输入端, 累加装置的第二输入端连接到与采样保持电路的控制信号同步通断的电压源上, 该电压源提供具有递增幅度的电压, (3), 累加装置的输出还接到尖端高度驱动件。

本发明还涉及在记录载体表面以相互分开的信息凹坑的顺序的形式记录和读出信息的装置, 该装置备有上述记录信息的设备。该装置的特征在于: 其读出部分是由所述设备构成的, 在所述设备中, 尖端高度驱动件仅由所述第一控制电压或与信息无关的控制电压控制。

如果尖端高度驱动件由第一控制电压控制, 那么, 该电压的变化代表已读出的信息, 当用一恒定控制电压控制该驱动件时, 隧道电流的变化就代表已读出信息。

现在参考附图, 更详细地描述本发明, 其中,

图 1 说明了已知的扫描隧道显微镜的原理,

图 2 以图解法示出了本发明的设备的实施例,

图 3a, 3b 和 3c 示出了加到用于记录信息的设备上的信息信号、尖端高度驱动件的相关控制电压 (上述两者均为时间函数) 的变化情况以及记录载

体上相关的凹坑。

图 4a, 4b 和 4c 示出了按本发明可在表面形成的不同的图样, 以及图 5 示出了按本发明在表面上形成的轨迹的结构。

为更好地理解本发明, 首先给出用于研究表面的已知的扫描隧道显微镜原理的简短描述。图 1 的方框图示出了这种显微镜的基本元件, 例如, 在美国专利 4, 343, 993 中透彻地说明该显微镜。

图 1 中, 标号 15 为置于工作台或托架 4 上的待观察物体, 具有极细尖端的导电的触针置于该物体之上, 起第一电极的作用, 也导电的物体 15 构成了第二电极, 为清楚起见, 以放大的尺寸示出这两个电极, 尖端和该物体可以三个相互正交的方向彼此相对移动, 三个相互正交方向用 XYZ 坐标系图解地说明, 为此, 显微镜有一个含有三个独立驱动的激励器或驱动件 7、8、9 的组合定位系统。这些驱动件最好包含压电元件, 用这些压电元件, 能实现百分之一毫微米数量级的最小的移动。驱动件 6 和 7 使尖端 14 和工作台 4 在 X 和 Y 方向上彼此相对移动, 这些元件可相对于尖端移动工作台, 但最好是尖端相对于工作台移动, Z 方向上尖端和表面的距离, 可用压电驱动件 8 校正。驱动件 8 可连接到触针 5, 以便相对于工作台 4 移动该触针。驱动件 8 也可以连接到工作台 4, 以便相对触针 5 移动工作台 4。触针 5 与驱动件 6、7 和 8 电绝缘。

带驱动件的触针 5 和带材料 15 的工作台置于容器 1 中, 在该容器中, 用真空泵 2 实现高真空。还借助于冷却器 3 (例如低温冷却器) 将该容器维持在低温。然而, 扫描隧道显微镜也可以工作于没有真空和冷却的空气中。

隧道显微镜进一步包含电子控制和测量电路 9。该电路给 X 和 Y 驱动件 6 和 7 提供控制电压, 并测量由这些驱动件 (它们将称为第一和第二驱动件) 产生的位移。电路 9 还以这样的方式为 Z 或尖端高度驱动件提供控制电压, 以致使尖端如此接近表面, 例如, 相距 0.1-1nm 数量级的距离, 如果将一电压 (在本说明书中称为隧道电压) 加到尖端和表面之间, 那么, 电子可穿行于尖端和表面之间。该电压由图 1 所示的控制和测量电路 9 供给。

既然隧道电流很大程度上取决于尖端和表面间

的距离, 故而要以很高的精度来进行尖端的 Z 的调整, 例如, 以 0.01nm 数量级的精度, 以便得到足够的分辨率。

在观察表面时, 可在各种方式下进行隧道显微镜操作, 例如, 用恒定的隧道电流或用与信息无关的 Z 控制电压。前一种所述方式的描述暂定已够了。如果尖端 4 与表面的距离足够小, 那么, 当加上恒定的隧道电压时, 隧道电流便开始流动。只要尖端扫描表面的平坦部分, 隧道电流就保持不变。但是, 如果尖端移过一变形部分, 例如一凹坑或一小丘, 则由于尖端与表面间距离变化的结果, 隧道电流会显著变化。无论如何, 用电子电路 9 来测量该隧道电流, 并与该电路中产生的基准电流比较, 该基准电流表示了尖端高出表面所希望的高度。该比较的结果以电子信号形式加到 Z 驱动件的控制电路 10。该控制电路以这样的方式校正尖端高度, 即, 使隧道电流维持与基准电流相等。通过将信号加到 Z 驱动件的方法来确定尖端的 Z 运动。由该信息以及关于尖端的那些 X 和 Y 位置的信息 (这些位置与发生这种 Z 位置变化相对应), 可以在信号处理部件 11 中构成被扫描表面的“隧道图象”, 该图象可借助于划线器 12 或显示屏幕 13 观察到。

根据本发明, 可通过将所述隧道显微镜的尖端落到表面上, 在该表面上形成带有不变的和非常精确限定的几何图形的表面变形。

图 2 图示了可用来实现本方法的修改的隧道显微镜。在该图中, 标号 15 还表示必须产生变形 (例如信息区 21) 的表面, 标号 14 指固定在定位系统中的导电触针 5 的尖端。该定位系统包含例如三个分开的可有不同形状的压电元件 6、7 和 8, 也可包含单个压电元件, 例如, 可在上面布置用于不同移动方向的不同电极对的圆柱体。通过改变加在第一和第二驱动件 6、7 和 8 的控制电压 V_{px} 、 V_{py} 和 V_{pz} , 使这些元件的长度变化, 从而, 能够使尖端 14 相对于表面 15, 沿 X、Y 和 Z 方向移动。

当待加工材料放置于工作台 4 上之后, 一个预置设备 (未示出) 保证尖端对准表面上给定的 XY 起始位置。而且, 将尖端置于距该表面很短距离的位置上。如果电压源 16 提供直流电压形式的 (例如, 1 伏特) 隧道电压, 将此电压源连接到触针和

表面, 那么, 隧道电流开始流动。该电流可由电流传感器 17 测量, 然后, 在维持尖端和表面距离恒定的同时, 扫描该表面。为此, 加工设备有一控制电路 18, 它构成图 1 中电路 9 的一部分。

控制电路 18 包含差动放大器 19, 该放大器的第一输入端接收隧道电流 I_t 。与尖端和表面所希望距离成比例的基准电流 I_{ref} , 由基准电源 20 供给, 并加至该放大器的第二输入端。可以将放大器 19 的输出信号在作为控制电压 $V_{pz, 1}$ 加到 Z 驱动件 8 之前, 先通过积分器 21, 高电压放大器 21 也置于该控制电路中。

当记录具有一致的凹坑 21 形式的信息时, 首先扫描 X 方向的行 20, 接着扫描第二行 20, 直至记完所有信息。X 方向的扫描运动并不连续, 每次中断于那些对应于必须形成 X 信息区的给定的 X 位置的瞬间。该不连续的 X 扫描运动由处理信号接收和控制电路 26 控制, 该电路从其输出端 27 供给控制电压 V_{px} 。将包含必须在表面 15 形成的图样的有关数据的信号 S_i 加到电子电路 26 的输入端 30。借助于这些数据在电路 26 中, 确定驱动件 6、7 和 8 必须完成的移动 (该移动是时间的函数), 以及产生出现在输出端 27、28 和 29 的驱动件 6 和 7 的第一和第二控制电压 V_{px} 、 V_{py} 和开关信号 S_c 。

图 3a 示出了必须记录的小部分数字信号的实例。该信号包含许多标准脉冲, 这些脉冲具有彼此不同的时间间隔和相同的脉宽 T。信号 S_i 的时间轴通过电路 26 与尖端沿 X 方向的移动相关联。在时刻 t_1 , 触针运动停止而同时必须将尖端落到正加工的材料上。开关信号 S_c 用于此目的。该信号使负反馈控制电路 17、18 去激励。再用控制电压 V_{pz} 激励驱动件 8, 控制电压 V_{pz} 以这样的方式区别于 $V_{pz, 1}$, 即, 使尖端 14 向下移过大于隧道距离的距离, 其中, 隧道距离即为有隧道电流时尖端到表面的距离。

实现所述移动的方法是: 中断控制电路的输出端与驱动件 8 之间的连接, 使得电压 $V_{pz, 1}$ 不再加到 Z 驱动件 8, 并且, 用其幅度为带有预定终值的时间递增函数的确定电压来激励该驱动件。

然而, 尖端的下移最好由图 2 所示的电路 18 和累加装置 24 实现。和图 1 电路 9 相比较, 图 2 的控制电路 18 包含取样和保持电路 22 这一额外

元件。该电路由开关信号 S_c 接通，并从接通的时刻（图 3a 中 t_1 , t_3 , t_5 ）起，有一个其电压值等于接通瞬间控制电压 $V_{pz,1}$ 瞬时值的恒定输出电压。电路 22 的输出电压加到累加装置，来自附加电压源 25 的信号也加到该累加装置。电压源 25 提供其幅度作为时间函数而增加的电压。该电压源与开关信号 S_c 同步地接通和断开。新的控制电压 $V_{pz} = V_{pz,1} + V_{pz,2}$ 确保尖端朝下移动并落到所加工的材料上。在时刻 t_2 ，电压脉冲 $V_{pz,2}$ 终止。于是，尖端缩回。采样保持电路 22 也关闭，使驱动件 8 的控制回路 18 又被激励。结果，尖端和局部的表面部分间的距离和在给控制回路 17、18 去激励前保持完全相同。其优点在于：对每一凹坑变形而言，尖端的下移运动从关于所述表面的同一相对的 Z 位置开始，因此，对于电压 $V_{pz,2}$ 的相同的终值，尖端总能以相同的深度压入该材料中。

尖端缩回后，凹坑及时稳定地保留在表面。这种凹坑的几何形状由电压 $V_{pz,2}$ 的终值以及压入材料的尖端部分的几何形状所确定。既然如已经令人惊奇地证实了的，当尖端压入材料时并无磨损，所以，原则上说来，形成大量相同几何形状的凹坑是可能的。

图 3c 用图解法示出了在位置 X_1 、 X_2 、 X_3 ，用上述方式形成的几个凹坑 Pi_1 、 Pi_2 和 Pi_3 。这些位置和扫描方向上尖端速度为零的时刻相关，而这些时刻分别与所提供的信息信号 S_i 的时刻 t_1 、 t_3 和 t_5 相关。图 3b 示出在记录一串凹坑的时间间隔内的控制电压 V_{pz} ，该电压由电压分量 $V_{pz,1}$ 与电压分量 $V_{pz,2}$ 交错排列组成。

所形成的信息区的表面积可能比迄今已知的最小信息区，即，光学记录载体的信息区的表面积要小 10,000 倍左右，因此，使用本发明能使记录载体的信息密度提高 10,000 倍左右，实验装置中，形成了具有大约 5nm 直径的圆形凹坑，这些凹坑由被压出凹坑的材料边缘所包围，这些边缘也只有大约 5nm 的宽度，因此，非覆盖凹坑的有效直径大约为 15nm。凹坑深度大约为 1nm。

在记录了凹坑之后，可用如图 2 所示相同的隧道显微镜读出这些凹坑（在为了控制目的的记录过程中以及在后一阶段需对已记录的信息处理时，都可利用图 2 所示的隧道显微镜）。在读出期间，取

样保持电路关闭，并且，不用额外电压 $V_{pz,m2}$ 。可在隧道电流不变的情况下进行读出，此时控制电压 $V_{pz,1}$ 的变化表示已读出的信息。但是，在读出记录介质已记录部分时，用与信息无关的控制电压 V_{pz} 来扫描也是可能的（其中，已记录部分在写入期间已被扫描过，所以，其光洁度是已知的）。于是，隧道电流的变化表示已读出的信息。

可在记录载体上记录并从该记录载体中读出的信号为数字信号这一事实并不意味着信息本身仅仅是来自或用于例如计算机的数字数据。原则上说，该记录载体适合于存贮所有各种信息，例如视频和/或音频节目、图形表示、X 射线图象等等，只要该信息可数字化。

除了凹坑图样之外，用本发明的方法，在表面上形成连续的、直线或曲线的轨迹也是可能的，其中一些例子示于图 4a、4b 和 4c 中。这提供了以迄今为止前所未有的等级，即在亚微米范围内进行直接的材料加工的可能性。一种重要的应用是直接构成半导体材料例如硅的各种结构，以致在制造集成电路中不再需要使用繁琐的光刻制版工艺。本发明也可用于 X 射线平版印刷术的掩模的制造。本发明的方法不仅可作为精细机械加工的一种选择，而且也可作为它的一种补充，因为，用本方法可实现精细得多的结构。

当在表面上形成连续轨迹时，在两凹坑变形之间，沿扫描方向将尖端移过一距离，该距离小于扫描方向上尖端的尺寸。此时，所形成的凹坑以或大或小的量度彼此合并，如图 5 所示。轨迹 43 的边界 44 和 45 的光滑度由相继的凹坑 $Pi_1 \dots Pi_n$ 的重叠确定。因为，在每次产生下一个凹坑之前将尖端的 Z 位置调整到基准高度，所以，所形成的轨迹在其整个长度上有恒定的深度。

通过改变尖端的 X 和 Y 的控制信号，可实现具有任意形状的轨迹。为形成图 4a 的图样，首先将尖端在 X 方向移过给定距离，而 Y 位置不变，以形成图形部分 40，然后，将尖端在 Y 方向移过给定距离，而 X 位置不变，以形成图形部分 41。为形成图 4b 的图形，以相反方向重复尖端运动。而实现图 4c 的椭圆形图形 42 时，同时要对尖端的 X 和 Y 位置进行控制。

具体来说，在记录载体上记录非常小的信息区

时，必须保证表面足够光滑，使得所记录信息还能取回，而不被隐藏在可能已经存在于未记录表面的缺陷之间。例如，需要在硅（100）表面的所谓平台上实现原子光洁度。这些平台必须有至少为尖端长度 2 倍、最好更多倍的最小的纵向长度。

已经发现，在钨尖端和有轻微的镍掺杂的硅（110）材料相配合的情况下，可以取得显著效果。除了晶体硅衬底表面之外，用本发明方法也可对在晶体硅衬底上形成的含非晶层的硅进行变形加工。硅的优点在于它大量存在于自然界中，因此，原则上说，它是一种廉价材料。此外，它还是最经常用于集成电路的并已取得很多技术经验的原材料，因此，硅凹坑存储器与其它硅结构例如集成电路的集成化，也可加以考虑。

在写入和读出硅凹坑存储器时，必须在如图 1 所示的真空室中进行操作。但是，也可以用隧道显微镜在空气中实现变形，以及进行随后的检验或读出这些变形的操作。然而，必须使用不太流动并比金要硬的不活泼的材料。

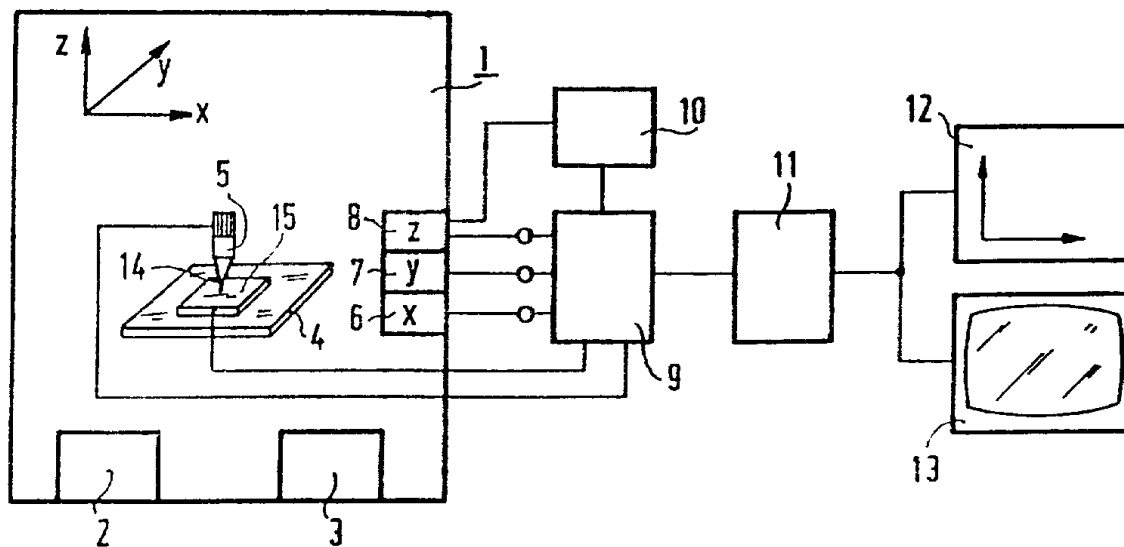


图 1

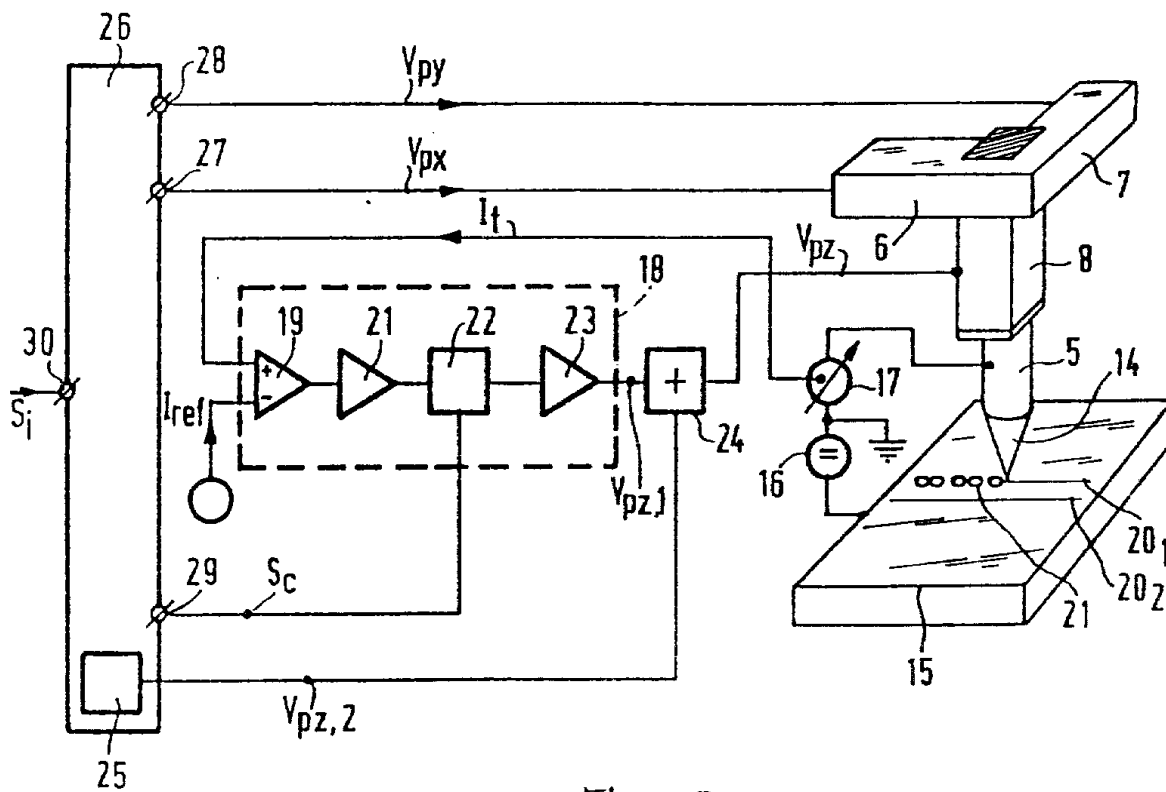


图 2

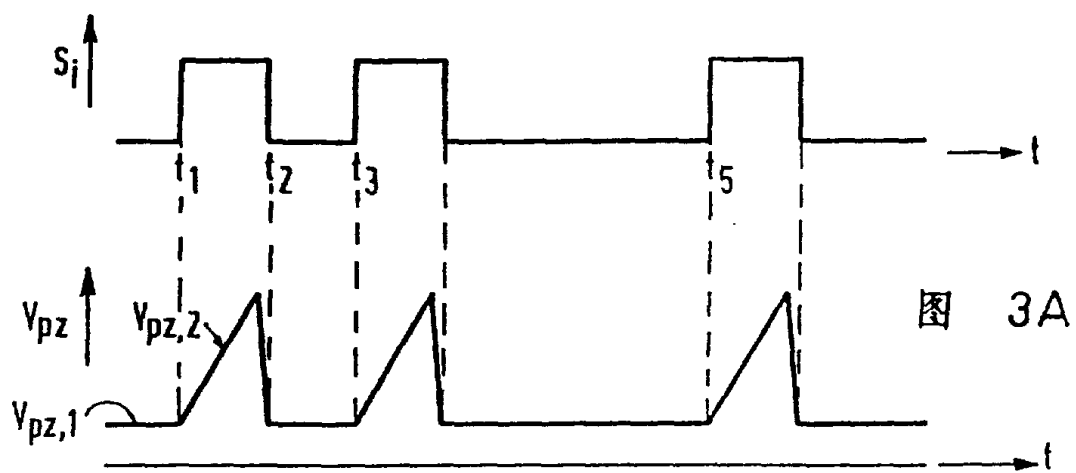


图 3A

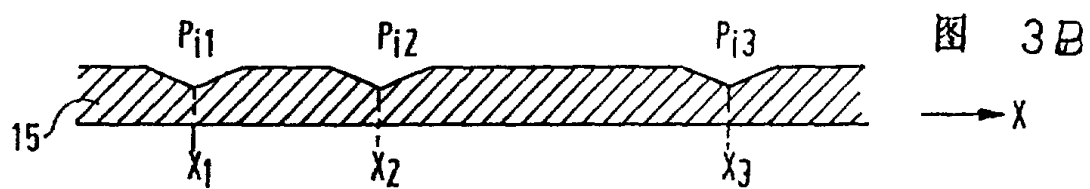


图 3B

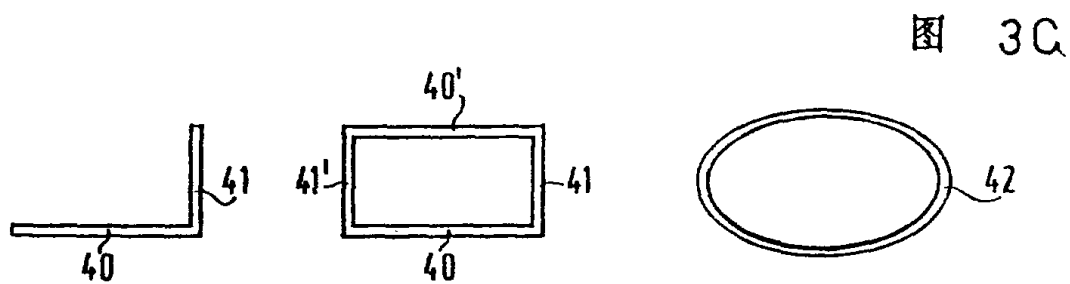


图 3C

图 4A

图 4B

图 4C

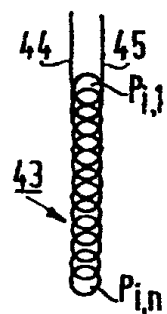


图 5