



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Übersetzung der
europäischen Patentschrift

87 EP 0 442 536 B1

10 DE 37 50 408 T 2

61 Int. Cl.⁶:
G 01 B 11/30
G 01 B 7/34
G 11 B 11/08

DE 37 50 408 T 2

- 21 Deutsches Aktenzeichen: 37 50 408.8
- 86 Europäisches Aktenzeichen: 91 105 520.0
- 86 Europäischer Anmeldetag: 12. 5. 87
- 87 Erstveröffentlichung durch das EPA: 21. 8. 91
- 87 Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: 17. 8. 94
- 47 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 30. 3. 95

- 73 Patentinhaber:
International Business Machines Corp., Armonk,
N.Y., US
- 74 Vertreter:
Teufel, F., Dipl.-Phys., Pat.-Ass., 71155 Altdorf
- 84 Benannte Vertragsstaaten:
CH, DE, FR, GB, LI

- 72 Erfinder:
Dürig, Urs Theodor, Dr., CH-8803 Rüschlikon, CH;
Rohrer, Heinrich, Dr., CH-8805 Richterswil, CH;
Binnig, Gerd Karl, Prof. Dr., W-8084 Inning, DE

64 Atomarer Kräftesensor zur Messung der Eigenschaften eines Datenträgers.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 37 50 408 T 2

B E S C H R E I B U N G

Atomarer Kräftesensor zur Messung der Eigenschaften eines Datenträgers

Diese Erfindung bezieht sich allgemein auf atomare Kräftemikroskope (AKM) und im einzelnen auf Mittel zum Messen der Eigenschaften eines Datenträgers mit Hilfe eines atomaren Kräftesensorkopfes.

Bei dem von G. Binnig in EP-A-0 223 918 vorgeschlagenen atomaren Kräftemikroskop, das von G. Binnig, C.F. Quate und Ch. Gerber in Phys. Rev. Letters, Band 56, Nr. 9, März 1986, auf den Seiten 930-933 beschrieben wurde, wird eine sehr feine, an einen federähnlichen Freitträger angebrachte Spitze verwendet, um das Profil einer zu untersuchenden Oberfläche abzutasten. Bei den hierbei verwendeten Abständen treten zwischen den Atomen am Scheitelpunkt der Spitze und den Atomen auf der Oberfläche sehr kleine Kräfte auf, was zu einem sehr geringen Ausschlag des Freitträgers führt. In dem Vorschlag von Binnig wird dieser Ausschlag mit Hilfe eines Tunnelmikroskops gemessen, das heißt, eine elektrisch leitfähige Tunnelspitze wird in Tunnelabstand an der Rückseite des Freitträgers plaziert, und die Veränderungen des Tunnelstroms dienen zur Bestimmung des Ausschlags. Da die Eigenschaften des Freitträgers bekannt sind, können die zwischen der AKM-Spitze und der zu prüfenden Oberfläche auftretenden Kräfte bestimmt werden.

Die zwischen einer sehr feinen Spitze und einer Oberfläche auftretenden Kräfte werden üblicherweise als van-der-Waal'sche Kräfte, kovalente Kräfte, Ionenkräfte oder Kernabstoßungs-Interaktionskräfte beschrieben. Die bei der Methode mit atomarem Abstand zwischen einzelnen Atomen auftretenden Energien, respektive am Scheitelpunkt der Spitze und auf einer Oberfläche, bewegen sich im Bereich von ,

$E_0 = 0,01 \dots 10 \text{ eV} = 10^{22} \dots 10^{18}$ Joule. Die entsprechenden Abstände liegen im Sub-Nanometerbereich, und zwar bei $x_0 = 10 \dots 1000 \text{ pm} = 0,01 \dots 1 \text{ nm}$. Die betreffenden Kräfte (das heißt, die ersten Ableitungen der Potentialfunktion) liegen daher im Bereich von $K_0 = 10 \text{ pN} \dots 10 \text{ nN}$. Die daraus resultierenden atomaren "Federkonstanten", das heißt, die zweiten Ableitungen der Potentialfunktion, liegen im Bereich von $C_0 = 100 \dots 0,01 \text{ N/m}$. Diese Daten lassen sich aus Oberflächenuntersuchungen und aus vielen anderen Quellen, wie zum Beispiel den Werten elastischer Konstanten, ableiten.

Über Experimente mit den van-der-Waal'schen Kräften wird in "Measurements of Attractive Forces Between Flat Plates" von M.J. Sparnaay, Physica XXIV (1958), Seiten 751-764, berichtet. Fig. 2 dieser Quellenangabe zeigt einen Aufbau mit einem Freitträger, der an einem Ende befestigt ist und der auf halber Länge eine Platte eines aus zwei Parallelplatten bestehenden Plattenpaares trägt. Die andere Platte des Plattenpaares ist unabhängig vom Freitträger angebracht. Das Gewicht des Trägers wird von einer Feder ausgeglichen und die Auslenkung des Trägers bei Interaktion des Plattenpaares wird bestimmt von der Veränderung eines Kondensators, dessen eine Platte an dem Freitträger angebracht ist, während die andere Platte fest ist.

Es ist eine der Aufgaben der vorliegenden Erfindung, mehrere Ausführungsbeispiele von Datenträgern zu beschreiben, bei denen eine atomare Kräfte-meßvorrichtung verwendet wird, bei der nicht die Tunneltechnik, sondern andere Techniken verwendet werden, während der Freitträger als Kraft-/Auslenkungsumsetzer dient. Die Vorrichtungen gemäß der Erfindung können als atomare Kräfte-mikroskope verwendet werden, sie können jedoch auch einem breiteren Anwendungsbereich zugeführt werden.

Die vorliegende Erfindung ist demnach bestrebt, einen atomaren Kräftesensorkopf zur Messung der Eigenschaften eines Datenspeichermediums zu offenbaren, der mindestens einen an einem Ende befestigten Freiträger aufweist, und der ein Interaktionselement trägt, das zu dem genannten festen Ende einen bestimmten Abstand aufweist, und das mit der Oberfläche des genannten zu untersuchenden Speichermediums in Wechselwirkung tritt, und Mittel zum Erfassen der Auslenkung des genannten Freiträgers, wenn das genannte Interaktionselement mit der Oberfläche des genannten Speichermediums in Wechselwirkung tritt. Die genannten Erfassungsmittel sind so gestaltet, daß sie die genannte Auslenkung von der Ausgangsposition des genannten Freiträgers in eine Veränderung eines elektrischen Werts umwandeln, der kein Tunnelstrom ist, und zwar ausgehend von einem Ausgangspegel dieses Werts. Dieser atomare Kräftesensorkopf ist dadurch gekennzeichnet, daß das genannte Erfassungsmittel als Kondensator mit einem Kondensator-Plattenpaar ausgeführt ist, wobei eine Platte einen integrierten Teil des genannten Freiträgers bildet, während die zweite Platte gegenüber der ersten Platte fest montiert ist, daß beide Platten des genannten Kondensators an eine herkömmliche Kapazitätsmeßausrüstung angeschlossen sind, und daß das Ausgangssignal der genannten Kapazitätsmeßausrüstung, das eine Veränderung der Kapazität des genannten Kondensators, ausgehend von einem Ausgangskapazitätswert darstellt, über eine Rückkoppelungs-Steuerschaltung zu einem z-Antrieb gesendet wird, der so angeordnet ist, daß er den z-Abstand des genannten Interaktionselements zur Oberfläche des Speichermediums anpaßt.

Einzelheiten verschiedener Ausführungsbeispiele der Erfindung sollen im folgenden anhand von Beispielen und unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben werden; es zeigt:

Fig. 1 ein schematisches Diagramm eines atomaren Kräftemikroskops, in dem ein Kondensator als Auslenkungsdetektor verwendet wird;

Fig. 2 ein mikromechanisches Ausführungsbeispiel des kapazitiven Kräftesensorkopfes;

Fig. 3 eine Erweiterung des Ausführungsbeispiels der Fig. 2, in dem ein piezoelektrischer Wandler verwendet wird;

Fig. 4 eine andere Erweiterung des Ausführungsbeispiels der Fig. 2 mit einem Material mit hoher dielektrischer Konstante;

Fig. 5 einen kapazitiven Sensorkopf in einem Datenspeicher;

Fig. 6 ein anderes Ausführungsbeispiel eines kapazitiven Sensorkopfes in einem Datenspeicher;

Fig. 7 ein drittes Ausführungsbeispiel eines kapazitiven Sensorkopfes in einer Datenspeicheranwendung;

Fig. 8 eine schematische Erläuterung der Maßnahmen zum Weichmachen der Oberfläche in Verbindung mit dem Sensorkopf der Fig. 6.

In Fig. 1 ist ein atomares Kräftemikroskop 1 mit einer sehr feinen Spitze 2 dargestellt, die zum Beispiel aus einem Diamanten bestehen kann, und die an einem Freitträger 3 befestigt ist, der auf einer Grundplatte 4 aufliegt. Wird die zu untersuchende Probe 5 in die Nähe der Spitze 2 gebracht, bewirken die zwischen den dichtesten Atomen an der Spitze 2 und an der Probe 5 auftretenden Kräfte eine Auslenkung des Freitragers 3. Unter der Annahme, daß die genannten Kräfte einander abstoßende Kräfte sind, was normalerweise der Fall ist, wird

der Freitträger 3 in Fig. 1 nach rechts ausgelenkt. Die Größe der Auslenkung liegt bei etwa 10^{-11} m.

An seiner Oberseite, wo die Auslenkung am größten ist, bildet der Freitträger 3 eine Platte eines Kondensators 6. Zu diesem Zweck kann der Freitträger 3 entweder aus einem elektrisch leitenden Material gefertigt sein, oder an seinem oberen Ende eine leitfähige Beschichtung aufweisen. Die zweite Platte 8 des Kondensators 6 ist in einem sehr geringen Abstand gegenüber der Beschichtung 7/dem Freitträger 3 angeordnet. In Fig. 1 ist der Freitträger 3 an Erde angeschlossen und die Kondensatorplatte 8 ist an eine herkömmliche Kapazitätsmeßvorrichtung 9 angeschlossen, die zum Beispiel eine AC-Wheatstone-Brücke sein kann.

Im Ruhezustand ist die Kapazitätsmeßvorrichtung 9 so justiert, daß ihr Ausgang Null ist. Wenn der Freitträger 3 unter dem Einfluß einer auf seine Spitze 2 ausgeübten Kraft ausgelenkt wird, verändert sich die Kapazität und das Kapazitätsmeter 9 erzeugt ein Ausgangssignal. Dieses Ausgangssignal wird von einer Rückkoppelungsschaltung 10 zur Erzeugung eines Steuersignals auf Leitung 11 verwendet, welches an den z-Teil eines xyz-Antriebs 12 gesendet wird. Dieser z-Teil ist verantwortlich für die Steuerung des Abstands zwischen der Oberfläche der Probe 5 und dem Scheitelpunkt der Spitze 2. (Die x- und y-Teile des xyz-Antriebs 12 steuern die Matrix-Abtastung der Spitze 2 über der Oberfläche der Probe 5 unter Führung einer xy-Steuereinheit 13).

Kapazitätsmeter nach dem heutigen Stand der Technik können Kapazitätsveränderungen einer Größenordnung von $\Delta C = 10^{-18}$ F (Attofarad) unter Anwendung der zum Beispiel von J.R. Matey und J. Blanc, in J. Appl. Phys., 57, Seite 1437 (1985) beschriebenen Techniken messen. Diese Empfindlichkeit kann zur Messung von Veränderungen des Abstands oder der dielektri-

schen Konstante entsprechend der Parallelplattenkondensator-Formel $C = \epsilon A/d$ verwendet werden, wobei ϵ die dielektrische Konstante, A die Plattenfläche und d der Plattenabstand ist. Bei einer Plattenfläche von 100×100 Mikrometer und einem Plattenabstand von 1 Mikrometer ergibt sich in Luft eine Kapazität von etwa $2 \cdot 10^{-13}$ F. Die oben genannte Empfindlichkeit setzt somit in eine erfaßbare Mindestspaltbreitenveränderung von $\Delta d = (d/C) \cdot \Delta C = 10^{-11}$ m um.

Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Kräftesensor-kopfes, in welchem der die Spitze tragende Freiträger 30 gegenüber einem starren Körper 31 angeordnet ist, der als eine feste Basis dient. Vorzugsweise sind der Freiträger 30 und der Körper 31 aus einem Stück Si/SiO₂ unter Anwendung bekannter mikromechanischer Techniken gefertigt. Die sich gegenüberliegenden Oberflächen des Freiträgers 30 und des Körpers 31 sind jeweils mit einer dünnen Goldbeschichtung 32 und 33 überzogen, und bilden so einen Kondensator 29, an den eine Spannungsquelle 34 angeschlossen wird. Die Goldbeschichtung 32 des Freiträgers 30 ist außerdem an einen Verstärker 35 angeschlossen. Der Ausgangsanschluß des letzteren ist an einen Diskriminator 36 angeschlossen.

Bringt man die Spitze 37 in die Nähe der Oberfläche der Probe 38, treten die dichtesten Atome an der Spitze und an der Oberfläche in Wechselwirkung, wodurch zwischen ihnen eine Kraft entwickelt wird, die von ihrem Interaktionspotential U_{int} , ihrem Abstand r und der Federkonstanten C des Freiträgers 30 bestimmt wird. Im Gleichgewichtszustand, das heißt, wenn die atomare Kraft dU_{int}/dr die Federkraft $C \cdot x$ ausgleicht, wird die Auslenkung des Freiträgers 30 durch die folgende Gleichung wiedergegeben:

$$U_{int} + \frac{1}{2} C x^2 = \text{Min.}$$

Das Ausführungsbeispiel von Fig. 2 kann so justiert werden, daß sich eine statische Auslenkung $x \approx 10 \dots 100 \text{ pm}$ ergibt, die mit statischen Mitteln erfaßt werden kann. Der Freitträger 30 ist außerdem ein harmonischer Oszillator mit einer Eigenfrequenz ω_0 . Findet die genannte atomare Interaktion statt, verschiebt sich die Resonanzfrequenz des Freitträgers 30 entsprechend der folgenden Gleichung:

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left(1 + \frac{1}{C} \frac{d^2 U_{\text{int}}}{dr^2} \right).$$

Bei diesem Term wird angenommen, daß Terme höherer Ordnung des Interaktionspotentials keinen Beitrag zur Bewegungsgleichung leisten. Die Messung der Frequenzverschiebung hat den großen Vorteil, daß die Längenmessung entfallen kann, was zu einer einfacheren Kalibrierung des Sensorkopfes führt.

Die Konstruktion dieses Sensorkopfes muß unter Berücksichtigung von einander entgegenstehenden Forderungen optimiert werden: Für eine hohe Sensibilität ist eine schwache Federkonstante C wünschenswert. Die maximal tolerable Amplitude der thermischen Schwingungen der Anordnung erfordert jedoch eine niedrigere Grenze. Weiter sollte C größer als das Maximum von $d^2 U_{\text{int}} / dr^2$ sein, damit keine metastabilen Gleichgewichtspositionen existieren, die einen zuverlässigen Betrieb des Sensorkopfes unmöglich machen. Dies kann bei der kurzreichweitigen kovalenten Bindungs-Interaktion, bei der zweite Ableitungen des Potentials der Größenordnung $10 \dots 100 \text{ N/m}$ zu erwarten sind, zu einem schwerwiegenden Problem werden. Daher ist ein eher starrer Freitträger anzustreben.

Der mikromechanische Freitträger 30 gemäß der vorliegenden Erfindung erzielt eine optimale Leistung. Seine Resonanzfre-

quenz wird durch Messen des kapazitiven Stroms überwacht, der durch thermische Schwingungen am Träger entsteht. In einer Rückkoppelungsschleife kann die natürliche Schwingungsamplitude des Trägers erhöht werden, um dadurch die Empfindlichkeit des Sensorkopfes zu verbessern. Hiermit hat man eine gute Möglichkeit, die Eigenschaften des Sensorkopfes an die jeweilige Form des Interaktionspotentials anzupassen. Bei einem großen Abstand zwischen Spitze und Probe, das heißt, wenn die Interaktion nur schwach ist, wird zum Beispiel die erforderliche hohe Empfindlichkeit durch Erhöhen der Schwingungsamplitude auf etwa ein Nanometer erreicht. Wird bei Annähern der Spitze an die Oberfläche die Interaktion stärker, kann die Schwingung des Trägers verringert werden, um ein Berühren der Oberfläche zu verhindern.

Wenden wir uns erneut der Fig. 2 zu; Schwingungen des Freitragers 30 bewirken Kapazitätsschwankungen, die einen entsprechenden Wechselstrom entstehen lassen. Dieser Strom wird von einem Verstärker 35 verstärkt und die Frequenz der Schwingungen wird mit Hilfe von Standardtechniken gemessen. Der Körper 31 kann auf einem herkömmlichen xyz-Antrieb (nicht dargestellt) montiert werden, der die Spitze 37 an die Oberfläche der Probe 38 heranführt und die Abtastbewegung der Spitze über diese Oberfläche ausführt.

Um eine genaue Untersuchung der schwachen Anziehungskräfte zwischen zwei Atomen, das heißt, der zweiten Ableitung des Interaktionspotentials $C_{int} = d^2U_{int}/dr^2$, zu ermöglichen, sollte das gezeigte Ausführungsbeispiel unter Berücksichtigung der folgenden Überlegungen dimensioniert werden:

Die zweite Ableitung C_{int} des Interaktionspotentials U_{int} und die gemessene Frequenzverschiebung $\Delta\omega$ haben zueinander die folgende Beziehung:

$$C_{\text{int}} = 2 C_{\text{eff}} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

hierbei entspricht C_{eff} ungefähr der statischen Federkonstanten des Freitragers 2. Die Nachweisschwelle C_{min} kann als Eigenfrequenz ω_0 , als der Q-Faktor des Resonators, und als die Integrationszeit τ der Frequenzmessung ausgedrückt werden:

$$C_{\text{min}} = 2 \frac{C_{\text{eff}}}{\sqrt{Q\omega_0\tau}}.$$

für C_{min} wird 0,01 N/m eingesetzt; vor kurzem wurde für einen mikromechanischen Freitragler ein Q-Faktor von 1000 festgelegt; die Integrationszeit τ darf 10 ms nicht überschreiten, um eine Rastermikroskopie mit konstanter Kraft zusätzlich zu der Messung des Interaktionspotentials U_{int} zu ermöglichen; und die Eigenfrequenz ω_0 sollte etwa $2\pi \times 10$ kHz betragen, um eine adäquate Isolierung gegenüber Umgebungsschwingungen zu ermöglichen. Mit diesen Parametern erhält man für $C_{\text{eff}} = 4$ N/m und eine Detektor-Empfindlichkeit von 1,25 kHz/(N/m). Mit anderen Worten, bei einem C_{min} von 0,01 N/m erhält man eine Frequenzverschiebung von 12,5 Hz. Die effektive Amplitude der thermischen Schwingungen beträgt 0,016 nm bei Flüssigstickstofftemperatur und 0,03 nm bei Raumtemperatur.

Terme des Interaktionspotentials U_{int} in einer Größenordnung von über 3 lassen eine zusätzliche Frequenzverschiebung proportional zum Quadrat der Schwingungsamplitude entstehen. Diese Frequenzverschiebung verursacht eine Mehrdeutigkeit C_{ah} des gemessenen Werts für C_{int} in der Größenordnung von

$$C_{\text{ah}} < \frac{1}{8} \left| \frac{d^4 U_{\text{int}}}{dr^4} \right| x_{\text{th}}^2.$$

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß $C_{eff} = K \cdot f_R$, wobei K eine Konstante nahe Eins ist, können die Maße für den Freitträger 2 für die Kraftkonstante f_R und für die Resonanzfrequenz ω_0 aus den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$f_R = \frac{1}{4} E \frac{wt^3}{l^3}$$

$$\omega_0 = 1,02 \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{t}{l^2} .$$

hierbei ist $E = 7,2 \times 10^{10}$ N/m² das Elastizitätsmodul nach Young für SiO₂, w , t und l stehen für Breite, Dicke beziehungsweise Länge des Freitragers 2, und $\rho = 2,2 \times 10^3$ kg/m³ ist die spezifische Dichte des Freiträgermaterials. Aus den oben genannten Parametern und unter Zugrundelegung der realistischen Annahme, daß $w = 8t$, ergeben sich für die Abmessungen des Freitragers für $w = 115 \mu\text{m}$, für $t = 14 \mu\text{m}$ und für $l = 1150 \mu\text{m}$.

Bei Verwendung eines Abstands d von $10 \mu\text{m}$ zwischen den Goldschichten 32 und 33 erhalten wir für die Kapazität $C_b = 0,12$ pf. Der induzierte Wechselstrom I ist wie folgt:

$$I = V \frac{dC_b}{dt} = 0,392 C_b \omega_0 x_{th} \frac{V}{d} .$$

Bei einem Potential $V = 50$ V erhält man einen Effektivstrom von $0,25$ pA. Ströme dieser Größenordnung können mit herkömmlichen FET-Verstärkern erfaßt werden.

Das zwischen den Goldelektroden 32 und 33 existierende elektrische Feld übt eine zusätzliche Kraft auf den Freiträger aus und erhöht seinen Wert für C_{eff} um einen Faktor k .

$$k = \sqrt{1 + C_b \frac{V^2}{m \omega_0^2 d^2}},$$

hierbei ist m die Masse des Freitragers 30. In diesem besonderen Beispiel entspricht der Faktor $k \approx 1,1$.

Eine wichtige Erweiterung des Ausführungsbeispiels der Fig. 2 ist die Hinzunahme einer Rückkoppelung zur Erhöhung der natürlichen Schwingungsamplitude des Freitragers. Hierdurch wird die Empfindlichkeit des Sensorkopfes verbessert und es werden weitere Anwendungsbereiche erschlossen.

Fig. 3 zeigt eine Möglichkeit zur Implementierung einer Rückkoppelungsschleife in einem mikromechanischen Sensorkopf. Genauso wie bei dem Ausführungsbeispiel von Fig. 2 trägt der Freitrag器 30 eine Elektrode 32 und ist gegenüber dem Körper 31 angeordnet, der seine Elektrode 33 trägt. Der Freitrag器 30 ist oben auf einem piezoelektrischen Wandler 40 montiert, der auf einem Körper 31 aufliegt. Der Wandler 40 kann von dem Ausgangssignal einer Erregungseinheit 41 erregt werden. Eine Spannungsquelle 42 ist zwischen der Elektrode 33 und Erde angeschlossen und eine Elektrode 32 ist an den Eingangsanschluß eines I/V-Wandlers 43 angeschlossen. Das Ausgangssignal des letzteren steuert einen schnell steuerbaren Verstärker 44 und, über den Gleichrichter 45 und bei Hinzunahme eines Schwankungsamplituden-Bezugssignals, einen langsam steuerbaren Rückkoppelungsverstärker 46, der ein Verstärkungs-Steuersignal an den Verstärker 44 sendet.

Fig. 4 zeigt eine Modifizierung der in Verbindung mit den Figuren 2 und 3 beschriebenen Ausführungsbeispiele. Eine Isolierschicht 56 mit hoher dielektrischer Konstante füllt einen Teil des Abstands zwischen den Elektroden 51 und 52 aus. Dies hat drei Vorzüge:

- Die Elektroden können einander nicht berühren und somit keinen Kurzschluß verursachen.
- Die Auslenkung des Freitragers ist innerhalb des verbleibenden freien Spalts 54 zwischen den Elektroden stabil.
- Die Empfindlichkeit wird verbessert, wenn die Abmessungen entsprechend ausgewählt werden.

Die Anordnung der Figur 4 ist im wesentlichen dieselbe wie die bereits beschriebene, mit der Ausnahme, daß der Abstand zwischen der Elektrode 51, die von dem Freitragger 50 getragen wird, und der Gegenelektrode 52, die auf dem Körper 53 aufliegt, mit zwei (oder mehr) dielektrischen Materialien angefüllt ist, die unterschiedliche dielektrische Konstanten ϵ , aufweisen. Vorzugsweise soll das an dem Freitragger 50 angeordnete dielektrische Material 54 außerordentlich flexibel sein, so daß die Bewegungen des Freitraggers 50, die dadurch verursacht werden, daß die Spitze 55 sehr nahe an die zu untersuchende Oberfläche herangeführt wird, nicht behindert werden. Das Material der Wahl ist hier Luft mit einer dielektrischen Konstanten von $\epsilon_1 = 1$.

Das andere dielektrische Material 56, welches vom Freitragger 50 entfernt angeordnet ist, sollte über eine dielektrische Konstante ϵ_2 verfügen, die viel höher als die des dielektrischen Materials 54 ist, zum Beispiel um einen Faktor 10.

Die Anordnung der Fig. 4 bildet in Wirklichkeit eine Reihenschaltung von zwei Kondensatoren mit einer Gesamtkapazität C von:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{s} \frac{\epsilon_2}{1 + \frac{s_1}{s} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)} = \frac{\epsilon_0 A}{s} \frac{\epsilon_2}{B}$$

wobei A die Kondensatorfläche ist und B die Wechselbeziehung zwischen den relativen Dicken und den dielektrischen Konstanten der dielektrischen Materialien 54 und 56 angibt:

$$B = 1 + \frac{s_1}{s} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right).$$

Um die Verbesserung der Empfindlichkeit zu bestimmen, wird der vorangehende Term für C differenziert:

$$\frac{dC}{ds_1} = - \frac{\epsilon_0 A}{s^2} \left(\frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1} - \epsilon_2 \right) \frac{1}{B^2}.$$

Mit einer Beziehung $\frac{s_1}{s} = 0,05$ und einem Verhältnis von 1:10 wird die Empfindlichkeit durch Auffüllen eines Teils des Spalts s wie folgt verbessert:

$$F = \frac{\epsilon_2^2 - \epsilon_2}{B^2} = \frac{90}{2.1} \approx 40.$$

Eine Anwendungsmöglichkeit für die Erfindung in einer magnetischen Speichereinheit ist schematisch in Fig. 5 dargestellt. Die Stelle der Probe 5 aus Fig. 1 nimmt hier das magnetische Speichermedium 80 ein, von dem angenommen wird, daß es mit einer hohen Geschwindigkeit an einer Spitze 81 vorbeiläuft, die an einem Freitragler 82 angebracht ist. Der letztere ist an einem Rahmenelement 83 montiert, welches starr in

der Speichereinheit gelagert ist. Eine Kondensatorplatte 85 stützt sich auf einen Arm 84 des Rahmenelements 83 ab und bildet zusammen mit dem rückwärtigen Teil des Freiträgers 82 einen Kondensator 87.

Eine Veränderung der auf die Spitze 81 ausgeübten Kraft, verursacht entweder durch eine Veränderung des Abstands zwischen der Spitze 81 und der Oberfläche des Speichermediums 80, oder durch eine Veränderung einer Oberflächeneigenschaft des Speichermediums 80, auf die die Spitze 81 empfindlich reagiert (wie zum Beispiel die Magnetfeldeigenschaften), bewirkt eine Auslenkung des Freiträgers 82 aus seiner ursprünglichen Position. Die Kapazität des Kondensators 87 verändert sich folglich und es wird daher ein Korrektursignal von einer Entfernungsteuereinheit 88 entwickelt, zur Steuerung eines Hebebocks 89, der den Plattenantrieb 90 entsprechend der Kraftveränderung anhebt oder absenkt.

Ein anderes Ausführungsbeispiel eines kapazitiven Kräftesensors in Verbindung mit einem magnetischen Datenträger zeigt die Figur 6. Ein Freiträger 92 trägt ein kleines Eindomänen-Magnetpartikel 93 auf seiner dem Speichermedium 95 gegenüberliegenden Seite 94. Das Speichermedium hat eine Vielzahl von Spuren, entlang derer magnetische Domänen 96 mit ein oder zwei Richtungen angeordnet sind. Eine Veränderung der Orientierung zwischen zwei benachbarten Domänen entlang einer Spur kann einer gespeicherten "1" zugeordnet werden, während keine Veränderung zwischen benachbarten Domänen einer gespeicherten "0" zugeordnet werden kann. Diese Veränderungen der Domänenorientierung können von einem am Freiträger angebrachten magnetischen Eindomänen-Partikel erfaßt werden, vorausgesetzt, die Flughöhe wird auf etwa 100 Nanometer justiert.

Jede der genannten Spuren magnetischer Domänen ist Ende an Ende gestapelt, ein Partikelchen breit und ein Partikelchen

dick. Ein angenommener Abstand von fünf Domänen Durchmessern zwischen benachbarten Spuren würde einer Aufzeichnungsdichte von etwa $6 \cdot 10^{11}$ Bit/cm² entsprechen. Das Frequenzverhalten und somit die Datenrate, wird von dem mechanischen Verhalten des Freitragers 92 begrenzt, und kann bei einem relativ kleinen Freitragerelement mehrere MHz betragen.

Unter der Annahme, daß der Freitragerelement 92 eine Eigenfrequenz von mehreren MHz aufweist, gilt: $f/m = \omega^2 = 10^{14} \text{ s}^{-2}$. Die Frequenz wird durch thermische Schwankungen begrenzt. Bei einem Spalt 87 mit einer Breite $x_c \sim 0,5 \text{ nm}$ und unter der Bedingung, daß $f x_c^2 > kT$, und $kT \approx 2,5 \cdot 10^{-21} \text{ J}$ bei 300 K, $f > \frac{kT}{x_c^2} \sim 10^{-2} \text{ N/m}$.

Die kleinste Kraft, die mit einer Eigenfrequenz von mehreren MHz bei einem Freitragerelement der Masse $m = f/\omega^2 = 10^{-16} \text{ kg}$ und bei Vorhandensein thermischer Schwankungen, unter der Annahme eines Qualitätsfaktors des Kräftesensors $Q = 100$, in einer Zeit $2\pi/\omega$ meßbar ist, beträgt

$$k \approx f \frac{x_c}{Q} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ N.}$$

Vorausgesetzt, daß zwischen dem Partikelchen 93 und den Domänen 96 auf dem magnetischen Medium 95 vorhandene Magnetfeld ist ausreichend stark, um eine Kraft von mindestens 10^{-14} N verfügbar zu machen, die eine Auslenkung des Freitragerelement 92 bewirkt, kann die Anordnung der Fig. 6 auch zur Abbildung der Magnetfelder einer unter dem Freitragerelement 92 durchlaufenden Struktur mit hoher räumlicher Auflösung verwendet werden.

Die Größen der magnetischen Kräfte, die für die Messung zur Verfügung stehen, werden wie folgt geschätzt: magnetische

Eindomänen-Partikel aus Gamma-Eisenoxyd haben ein Volumen V von etwa 10^{-21} m³ und eine Magnetisierung von etwa 400 G (= 0,4 T). Ihr magnetisches Moment beträgt $M = 4 \cdot 10^{-19}$ G m³. Die magnetische Kraft ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$F = MV \frac{\partial H}{\partial r}$$

Bei einem Feldgradienten $\frac{\partial H}{\partial r} = 10^{11}$ A/m², beträgt die Kraft $F = 0,4 \cdot 10^{-10}$ N. Dieser Wert liegt gut innerhalb der Empfindlichkeit der Anordnung.

Die in den Figuren 5 und 6 gezeigte Anordnung kann an eine Speichereinheit mit beweglicher Oberfläche angepaßt werden, indem man die Spitze 81 (oder das magnetische Partikel 93) gegen eine Kondensatorplatte 100 austauscht, wie in Fig. 7 gezeigt, und diese an einem Element 101 anbringt, das seinerseits am Freitträger 102 befestigt ist. (Man beachte, daß die Anordnung der Fig. 7, bezogen auf die Figuren 5 und 6, umgekehrt dargestellt ist). Wird die Information eines Informationsmusters 103 auf einem Aufzeichnungsträger 99 unter der Kondensatorplatte 100 durchgeführt, verändert sich die Kapazität C_s mit jeder Veränderung des Abstands x_s zwischen der Kondensatorplatte 100 und der Struktur 103. Angesichts der über dem Abstand x_s zwischen der Platte 100 und dem Informationsmuster 103 vorhandenen kapazitiven Kräfte, wird der Freitträger 102 ausgelenkt und die Kapazität C_c des Kondensators, die von den leitfähigen Schichten der sich gegenüberliegenden Flächen des Freitragers 102 und dem Körper 106 gebildet wird, wird aufgrund der Veränderung des Abstands x_c variieren. Die Gütezahl M ist der durch Messen der Position des Freitragers 102 erhaltene Hebelarm:

$$M = \frac{\left(\frac{dC_c}{dx_s} \right)}{\left(\frac{dC_s}{dx_s} \right)}$$

Bei einem weichen Freitragler hat der Haupthebelarm das folgende Kapazitätsverhältnis:

$$M_{\text{weich}} = \frac{C_c}{C_s} \frac{\frac{x_s}{\epsilon_s}}{\frac{x_c}{\epsilon_c}} \frac{B_s^2}{B_c^2}$$

hierbei sind ϵ_s und ϵ_c die dielektrischen Konstanten der Medien der Kapazitäten C_s beziehungsweise C_c und B_s und B_c sind konstante Werte nahe Eins, charakteristisch für die Kapazitäten, deren Indices sie tragen.

Bei einem starren Freitragler ist der Hebelarm die Dämpfung $\frac{1}{\alpha}$ der effektiven Federkonstanten f_{eff} und des Spannungsverhältnisses:

$$M_{\text{starr}} = \frac{1}{\alpha} \frac{\frac{x_c}{\epsilon_c}}{\frac{x_s}{\epsilon_s}} \frac{B_c}{B_s} \frac{V_s^2}{V_c^2}$$

Bei einem einfachen Beispiel mit den folgenden Parametern:

$C_s/C_c = \text{Verhältnis der Flächen} = 10^2 \mu\text{m}^2 / 10^5 \mu\text{m}^2;$
 $x_s = 0,1 \mu\text{m}; x_c = 1 \mu\text{m}; \epsilon_s = 1; \epsilon_c = 10; V_s = 5 \text{ V}; V_c = 1 \text{ V};$
 $B_s \approx 1; B_c \approx 1; \alpha = 1/5,$ erhalten wir:

$$M_{\text{weich}} \approx 10^3$$

$$M_{\text{starr}} \approx 125.$$

Ein allgemeines Problem bei Speichereinheiten mit beweglicher Oberfläche ist das Auftreten unerwünschter Rillen auf der Oberfläche, die einen unerwünschten Effekt auf das Schreiben oder Lesen von Informationen haben können. Das kapazitive Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung bietet für dieses Problem eine einfache Lösung. Fig. 8 zeigt das Prinzip. Die Oberflächenrillen 107 auf dem Speichermedium 108 sind mit einem dielektrischen Medium 109 mit einer dielektrischen Konstante ϵ_1 beschichtet. Das dielektrische Medium 109 kann zum Beispiel eine Flüssigkeit sein. Vom Speichermedium 108 durch einen Luftspalt 110 ($\epsilon_2 = 1$) getrennt ist eine Kondensatorplatte 111, die an einem Freitträger 112 angebracht ist. Die Kondensatorplatte 111 trägt ein dielektrisches Element 113 mit einer dielektrischen Konstante ϵ_3 zum Schutz der Kondensatorplatte 111. Die Anordnung der Fig. 8 dient zur "Reduzierung" der Oberflächenrauhigkeit des Speichermediums 108. Zur Regelung der konstanten Kapazität haben wir

$$ds_1 = - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} ds_2.$$

das heißt, die Kondensatorplatte 111 folgt der Kontur des Speichermediums 108 mit einer Dämpfung von ϵ_1/ϵ_2 .

Die elektrostatische Anziehung durch die Aufladung der Oberfläche kann in derselben Weise wie die magnetischen Kräfte überwacht werden, wenn das Magnetpartikelchen durch eine lei-

tende (ladbare) Spitze ersetzt wird. Eine Ladung von zum Beispiel 40 Elektronen erzeugt eine Kraft von etwa 1 nN bei einem Spalt von 30 nm zwischen Spitze und Probe. Bei Annahme einer typischen Oberflächenladungsdichte von $0,01 \text{ Cb/m}^2$, kann die Ladung 40 e in einem Bereich von $30 \times 30 \text{ nm}^2$ angepaßt werden. Betrachtet man eine solche geladene Fläche als ein Speicherbit und fordert man einen Sicherheitsabstand von 70 nm in jeder Richtung, so erreicht man ein Speicherschema mit einer Dichte von 10^{14} Bit/m^2 , welches die heutige Technologie bei weitem überragt.

A N S P R Ü C H E

1. Atomarer Kräftesensorkopf zum Messen der Eigenschaften eines Datenspeichermediums (5, 38, 80, 95, 99, 108), mindestens einen Freiträger (3, 30, 50, 70, 82, 92, 102, 112) umfassend, der an einem Ende befestigt ist und der in einem bestimmten Abstand von dem genannten festen Ende ein Interaktionselement (2, 37, 55, 81, 93, 101, 113) trägt, zur Interaktion mit der Oberfläche des genannten zu untersuchenden Speichermediums (5, 38, 80, 95, 99, 108), und Mittel (6, 29, 98) zum Erfassen der Auslenkung des genannten Freiträgers (3, 30, 50, 82, 92, 102, 112), wenn das genannte Interaktionselement (2, 37, 55, 81, 93, 101, 113) mit der genannten Oberfläche des Speichermediums (5, 38, 80, 95, 99, 108) in Wechselwirkung tritt, wobei die genannten Erfassungsmittel (6, 29, 98) so konstruiert sind, daß sie die Auslenkung des genannten Freiträgers (3, 30, 50, 82, 92, 102, 112) in eine Veränderung eines elektrischen Werts umwandeln, der kein Tunnelstrom ist, und zwar ausgehend von einem Ausgangswert desselben, dadurch gekennzeichnet, daß das genannte Erfassungsmittel als Kondensator (6, 29, 57, 87) ausgeführt ist, der ein Paar von Kondensatorblechen (7, 8; 32, 33; 51, 52; 82, 85; 92, 85; 104, 105; 108, 111) umfaßt, von denen eine erste (7, 32, 51, 82, 92, 105, 111) einen integrierten Teil des genannten Freiträgers (3, 30, 50, 82, 92, 102, 112) bildet, während die zweite Platte (8, 33, 52, 85, 104, 108) fest gegenüber der genannten ersten Platte (7, 32, 51, 82, 92, 105, 111) montiert ist, daß beide Platten des genannten Kondensators (6, 29, 57, 87) an herkömmliche Kapazitätsmeßausrüstungen angeschlossen sind, und daß das Ausgangssignal der genannten Kapazitätsmeßausrüstung, das eine Veränderung der Kapazität des genannten Kondensators (6, 29, 57, 87), ausgehend von einem Ausgangskapazitätswert,

darstellt, über eine Rückkoppelungs-Steuerschaltung (10; 35, 36; 43-46; 88) an einen z-Antrieb (12, 39, 89) gesendet wird, der so angeordnet ist, daß er den z-Abstand des genannten Interaktionselements (2, 37, 55, 81, 93, 101, 113) zur Oberfläche des Speichermediums (5, 38, 80, 95, 99, 108) justiert.

2. Sensorkopf nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der genannte Freitträger (92) an einem starr gelagerten Rahmenelement (83) angebracht ist, dessen Arm (84) eine Kondensatorplatte (85) an seinem freien Ende und gegenüber der Rückseite des genannten Freitragers (92) trägt, wobei die genannte Platte (85) und der genannte Freitträger (92) einen Kondensator (87) bilden, und daß der genannte Freitträger (92) ein Interaktionselement trägt, das als ein magnetisches Element (93) ausgeführt ist, angebaut an der Unterseite (94) des genannten Freitragers (92) und, in einem vorbestimmten geringen Abstand (d) einem magnetischen Speichermedium (95) gegenüberliegend, welches mindestens eine Spur von magnetischen Domänen (96) trägt.
3. Sensorkopf nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das genannte Interaktionselement als dielektrisches Element (101, Fig. 8) ausgeführt ist, angebracht am freien Ende des genannten Freitragers (102), daß das genannte dielektrische Element (101) eine Elektrode (100) trägt, die als erste Platte eines Kondensators (C_s) dient, dessen andere Platte von dem Informationsmuster (103) gebildet wird, welches von dem genannten Speichermedium (99) getragen wird, und welches im Betrieb unter dem genannten dielektrischen Element (101) hindurchläuft.
4. Sensorkopf nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das genannte Interaktionselement als die erste Platte

(111) eines Kondensators ausgeführt ist und an dem genannten Freiträger (112) an dessen freiem Ende angebracht ist, daß die genannte erste Kondensatorplatte (111) ein dielektrisches Element (113) trägt, mit einer ersten dielektrischen Konstante (ϵ_3), daß die genannte erste Kondensatorplatte (111) durch einen Luftspalt (110, $\epsilon_2 = 1$) von dem genannten Speichermedium (108) getrennt ist, wobei letzteres eine elektrisch leitfähige Oberfläche hat und die zweite Platte des genannten Kondensators bildet, und daß das genannte Speichermedium (108) mit einem weichen dielektrischen Medium (109, ϵ_1) beschichtet ist, welches mögliche Rillen (107) auf dem genannten Speichermedium (108) glättet.

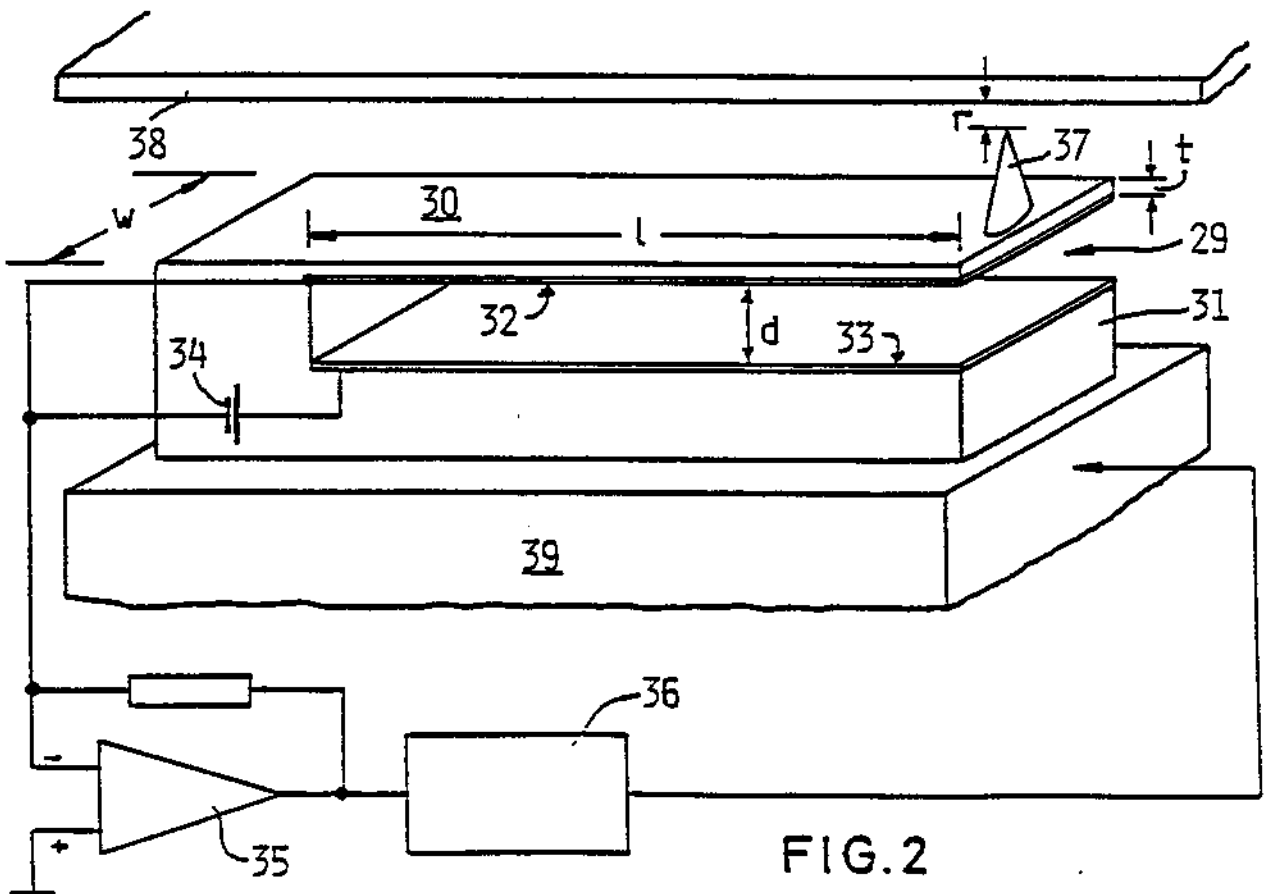
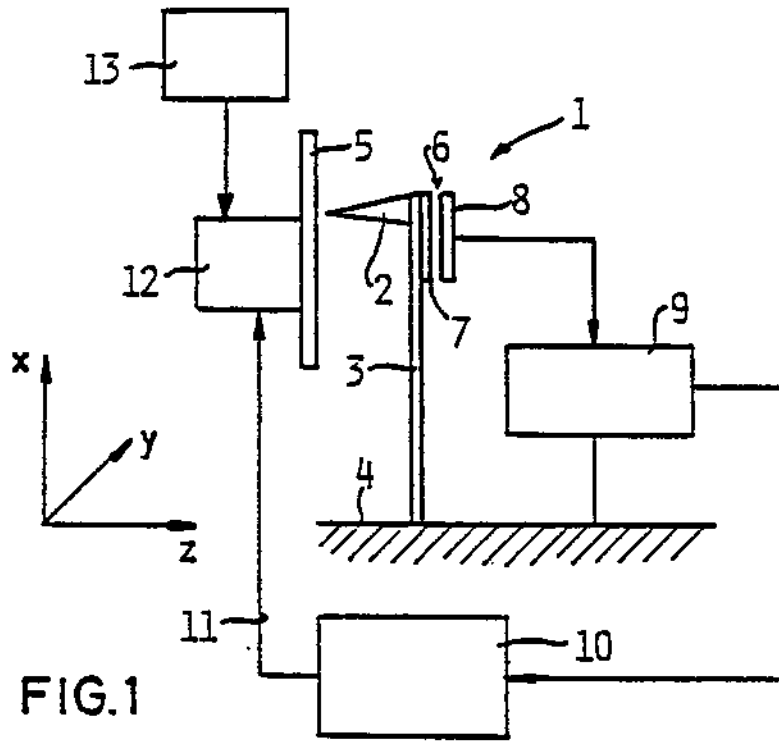
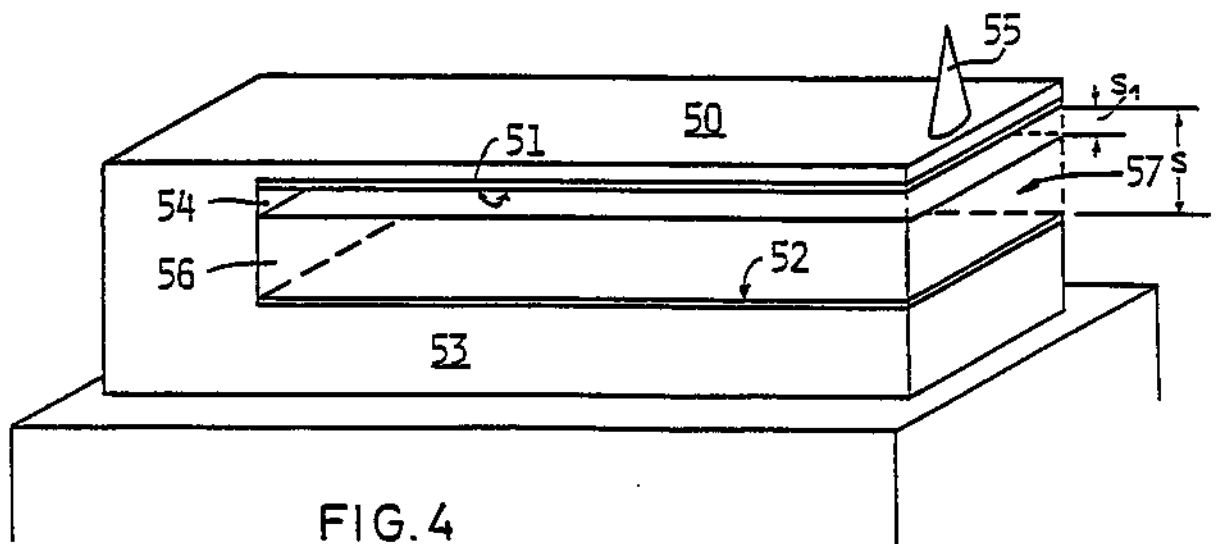
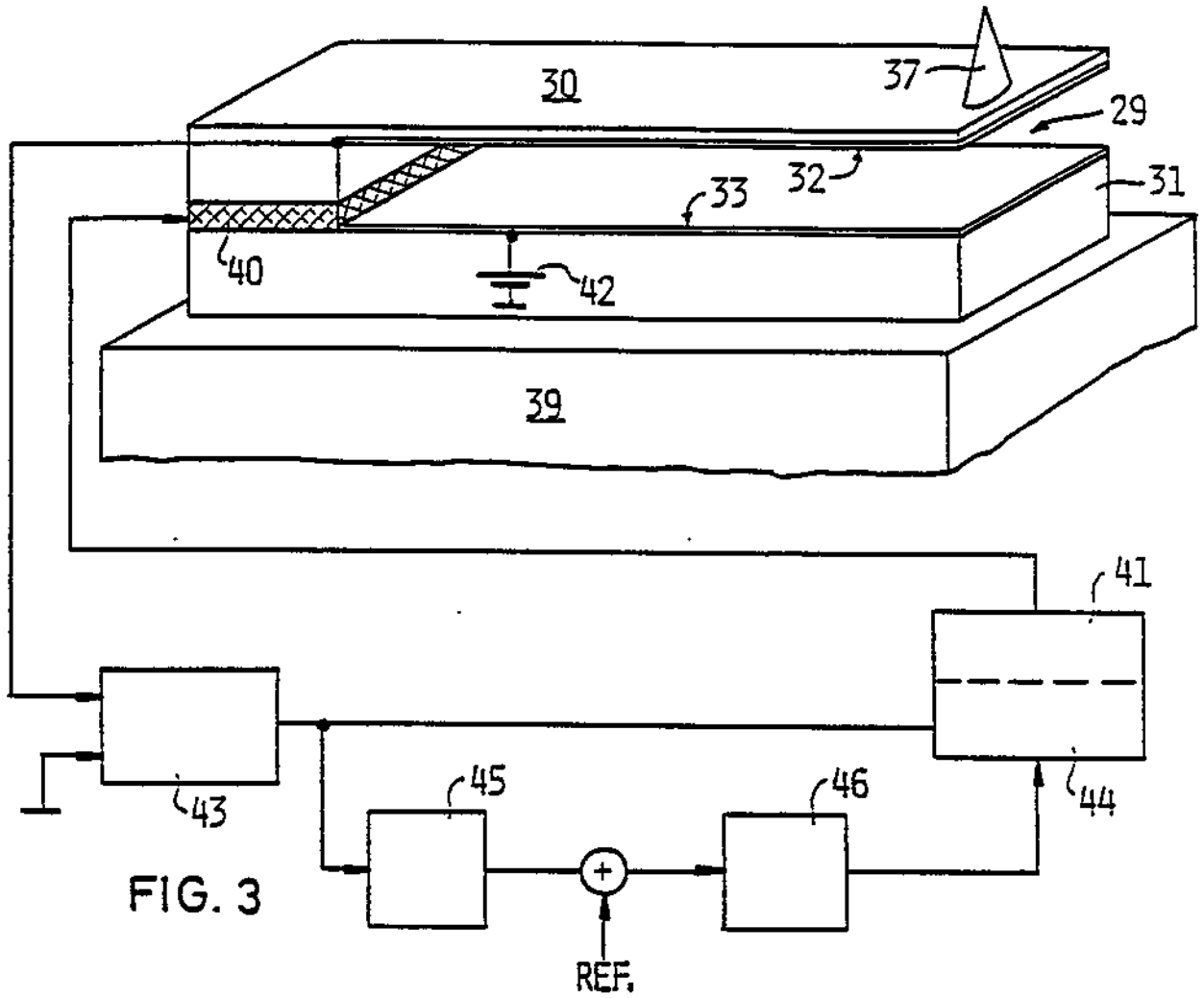


FIG. 2



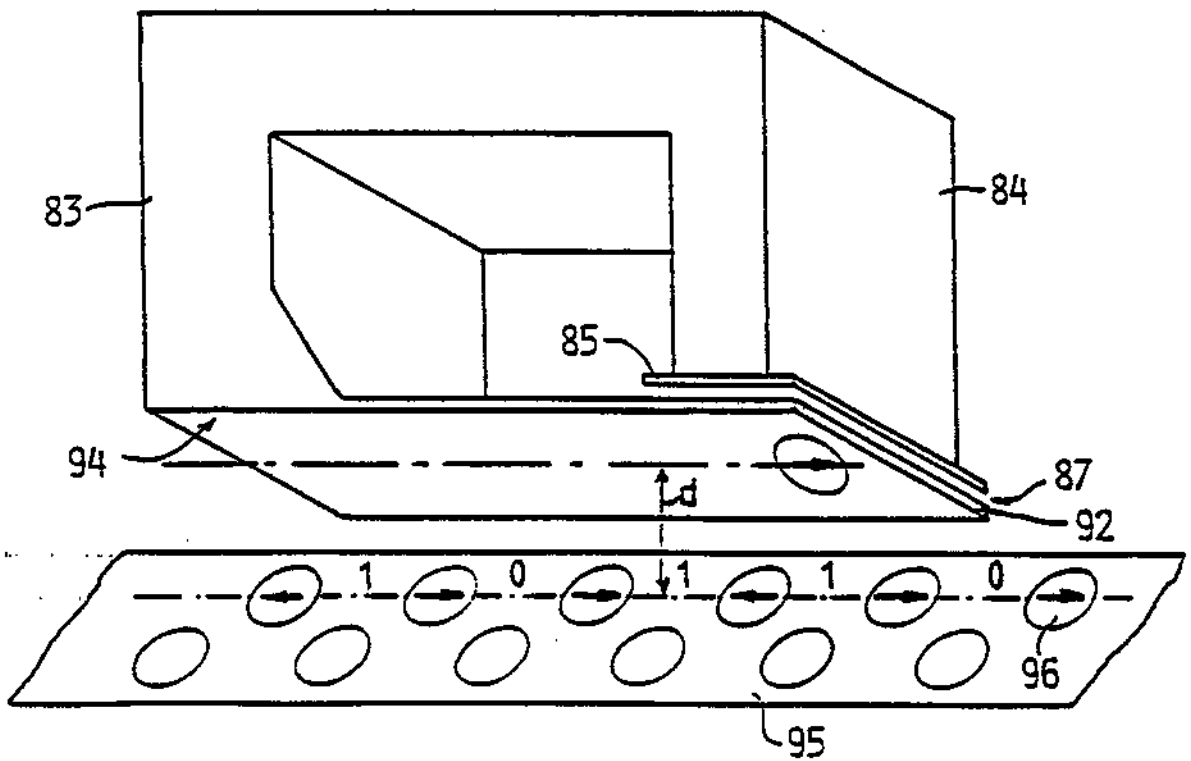
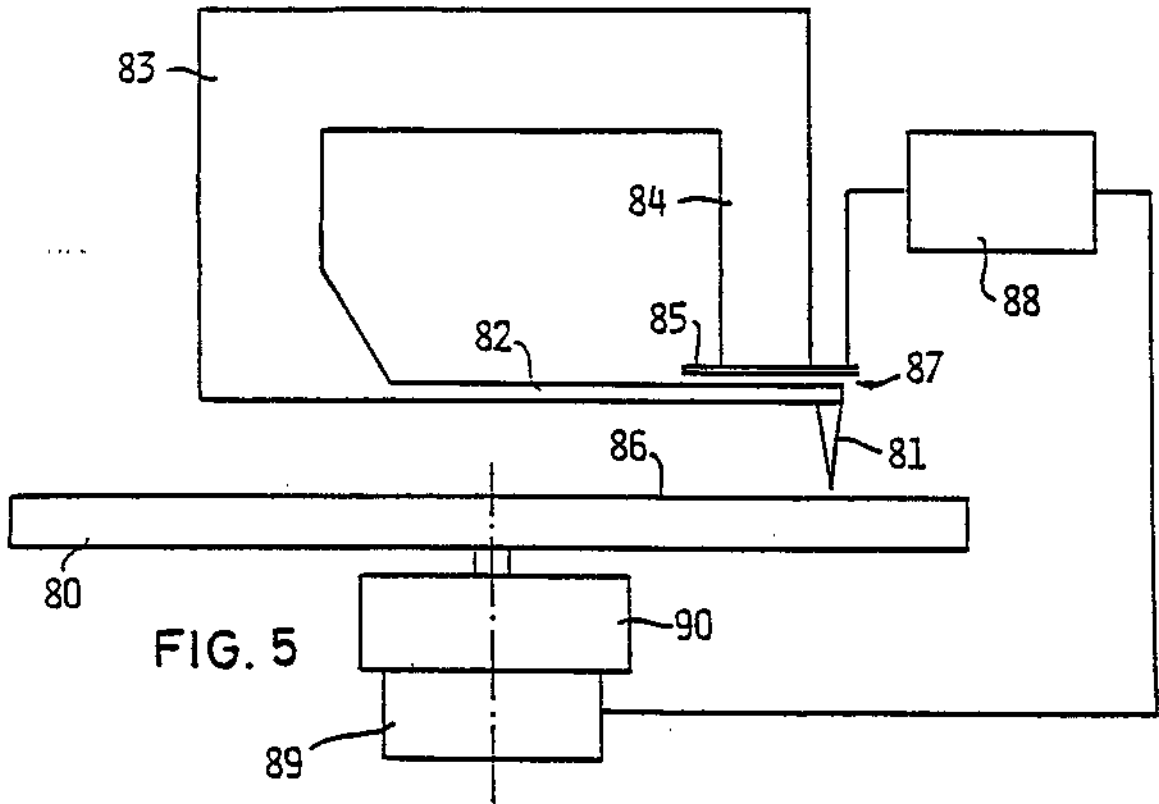


FIG. 7

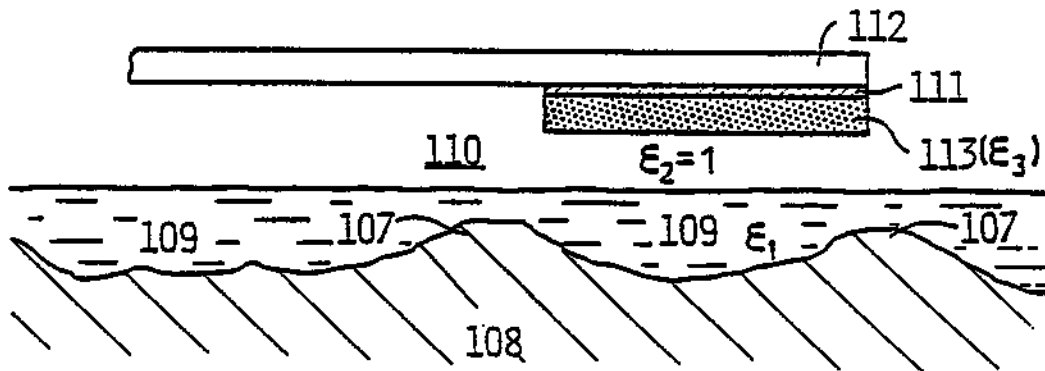
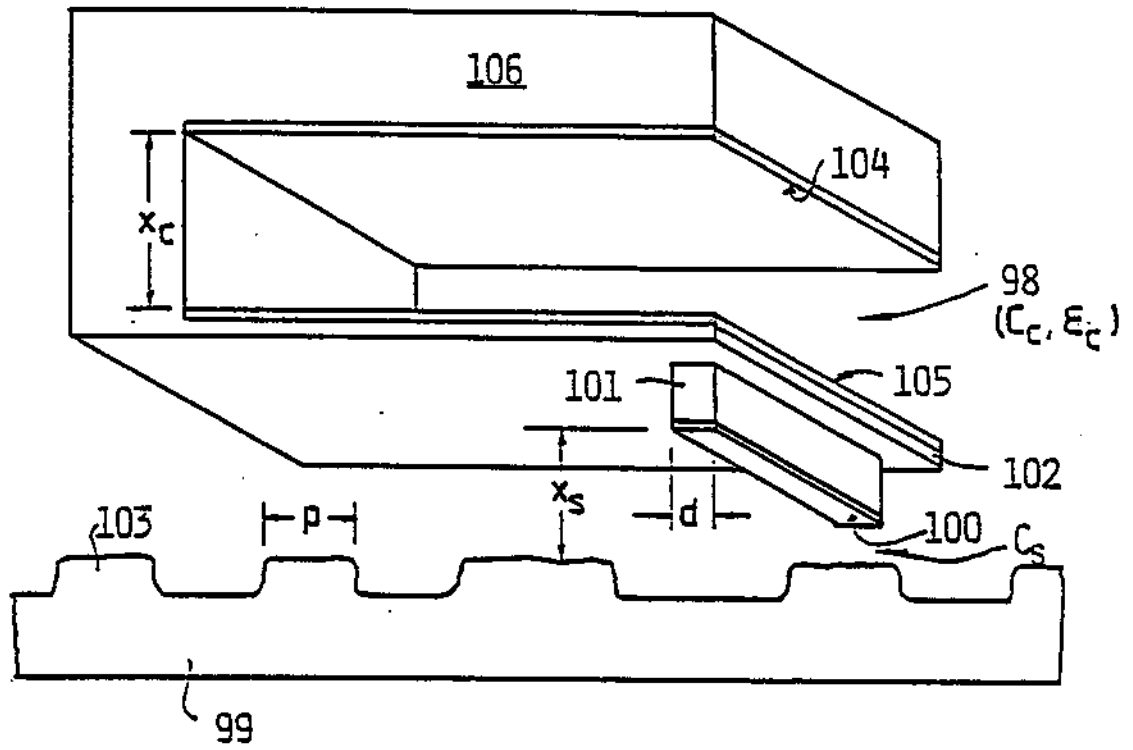


FIG. 8