



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 694 34 641 T2** 2006.12.14

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 443 337 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **694 34 641.1**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **04 008 313.1**

(96) Europäischer Anmeldetag: **12.04.1994**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **04.08.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **01.03.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **14.12.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01R 31/311** (2006.01)

**G01R 1/07** (2006.01)

**G01N 27/00** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**8643993**      **13.04.1993**      **JP**

**17930793**      **20.07.1993**      **JP**

**17932093**      **20.07.1993**      **JP**

**17932693**      **20.07.1993**      **JP**

**18168793**      **22.07.1993**      **JP**

(73) Patentinhaber:

**Agilent Technologies, Inc., Palo Alto, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Anwaltskanzlei Gulde Hengelhaupt Ziebig &  
Schneider, 10179 Berlin**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, GB**

(72) Erfinder:

**Takeuchi, Koichiro, Tokyo 196, JP; Kasahara,  
Yukio, Tokyo 195, JP; Miura, Akira, Tokyo 196, JP;  
Iwaoka, Hideto, Tokyo 193, JP; Sugiyama, Tadashi,  
Tokyo 181, JP**

(54) Bezeichnung: **Elektrooptisches Messinstrument**

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 Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung wird auf dem Gebiet der Halbleiterforschung und Halbleiterherstellung eingesetzt und betrifft insbesondere Verfahren zur Messung des Betriebszustandes von schnellen integrierten Schaltkreisen (IC). Sie wird für die Beobachtung und die Messung an extrem kleinen, hochgenauen Strukturen und als Präzisionsmeseinrichtung eingesetzt, die in der Lage ist, die elektrischen Kennwerte elektrischer Schaltungen zu messen, auf denen äußerst winzige mechanische Strukturen ausgebildet sind und bei denen die Abstände zwischen benachbarten Stromkreisen äußerst gering sind. Die vorliegende Erfindung ist für die Anwendung bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und in der Halbleiterforschung geeignet und sie wurde entwickelt, um elektrische Messungen des Betriebszustandes von schnellen integrierten Schaltkreisen (IC) durchzuführen.

## Stand der Technik

**[0002]** Die Frequenz der Signale, mit denen man es auf dem Gebiet der Elektronik zu tun hat, erreichte in der jüngsten Vergangenheit 250 GHz, und Stand der schnellen elektrischen Messtechnik ist, so dass die zur Beobachtung dieser schnellen elektrischen Schwingungsformen angewendeten Verfahren mit dem technischen Fortschritt nicht schrittgehalten haben. Darüber hinaus haben die Fortschritte bei der Miniaturisierung von Schaltungselementen zu einer Situation geführt, in der weder die zeitliche Auflösung noch die räumliche Auflösung der elektrischen Messinstrumente mit dem aktuellen technischen Fortschritt mithalten konnte.

**[0003]** Ein etabliertes und repräsentatives Mittel zur Beobachtung von Hochgeschwindigkeitsphänomenen, zum Beispiel des Zustandes von Mikroschaltungselementen im Hochgeschwindigkeitsbetrieb, ist das Abtastoszilloskop. Darüber hinaus wurden kürzlich Studien zur elektrooptischen Abtastung durchgeführt, einer Methode, welche den elektrooptischen Effekt in elektrooptischen Kristallen ausnutzt (siehe Kamiya, T. und Takahashi, M., „Electro-optic sampling using semiconductor lasers“, Oyo Butsuri, Vol. 61, p. 30, 1992; und Nagatsuma, T. „Measurement of high-speed devices and integrated circuits using electro-optic sampling technique“, IEICE Trans. Electron., Vol. E-76C, No. 1, January 1993). Unter der Voraussetzung, dass es mittlerweile relativ einfach ist, auf dem Gebiet der Lasertechnik optische Impulse im Sub-Pikosekundenbereich zu erzeugen, versucht man, bei diesen optischen Abtastverfahren derartige Laserimpulse zur Abtastung elektrischer Signale einzusetzen. Diese Verfahren sind schneller als herkömmliche elektronische Messverfahren und können

direkte, kontaktlose Messungen des elektrischen Potentials an einem gewünschten Punkt auf einer zu messenden Schaltung bewerkstelligen, ohne das Signal herauszuführen. Anders gesagt heißt dies, dass mit dieser Methode die bei der Abtastung in einem Abtastoszilloskop verwendeten elektrischen Impulse durch optische Impulse ersetzt werden.

**[0004]** Ein weiteres Verfahren zur räumlich hochauflösenden direkten Messung des elektrischen Potentials an einem gewünschten Punkt bietet der Elektronenstrahltester (siehe Plows, G., „Electron-beam probing“, Semiconductors and semimetals, Vol. 28 (Measurement of high-speed signals in solid-state devices), Chap. 6, p. 336, Ed. Willardson, R.K. und Beer, Albert C., Academic Press, 1990). Elektronenstrahltester stellen ein leistungsfähiges Mittel für die Beobachtung elektrischer Signale im Inneren von integrierten Schaltkreisen (IC) für die Diagnose und Analyse des Betriebsverhaltens von IC dar.

**[0005]** Raster-Tunnelmikroskope (STM) und Rasterkraftmikroskope (AFM) gehören zu den Vorrichtungen, die in jüngster Zeit eine rasche Entwicklung durchlaufen haben und die als Instrumente für die Durchführung von Beobachtungen mit hoher räumlicher Auflösung der Oberflächenform von Prüfobjekten starke Verbreitung gefunden haben. Weil diese Vorrichtungen in der Lage sind, dreidimensionale Bilder mit einer ultra-hohen räumlichen Auflösung zu liefern, die im Bereich atomarer Abmessungen liegt, eignen sie sich ausgezeichnet für die Beobachtung der Oberflächenform integrierter Halbleiterschaltkreise und ähnlichem. Bloom et al. haben kürzlich ein Verfahren zur Messung des elektrischen Potentials eines Prüfobjektes mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops (AFM) vorgeschlagen, (siehe Hou, A. S., Ho, F. und Bloom, D. M., „Picosecond electrical sampling using a scanning force microscope“, Electronics Letters, Vol. 28, No. 25, p. 2302, 1992). Bei diesem Verfahren wird als Messobjekt eine schnelle elektronische Schaltung benutzt, die mit einem normalen Rasterkraftmikroskop (AFM) gemessen wird, und eine abstoßende oder anziehende Kraft wird zwischen dem Messkopf des Rasterkraftmikroskops (AFM) und diesem Prüfobjekt erzeugt, in Übereinstimmung mit dem elektrischen Potential am Messort. Diese Kraft führt zu einer winzigen Verschiebung der Position des Messkopfes. Das von Bloom et al. vorgeschlagene Verfahren schließt ein Erkennen dieser winzigen Verschiebungen ein, um zeitabhängige Änderungen des Potentials an der Messstelle zu messen.

**[0006]** Die zeitliche Auflösung eines Abtastoszilloskops ist jedoch durch die Geschwindigkeit eingeschränkt, mit der Messungen durchgeführt werden können. Dies hängt von einer Zeitkonstante ab, die von der Breite der elektrischen Impulse bestimmt wird, die zur Abtastung verwendet werden und vom

Widerstand und der Kapazität des Messsystems. Darüber hinaus wird das zu messende Signal letztendlich gestört, bzw. verfälscht, weil es von der Messstelle über ein Kabel oder einen Wellenleiter herausgeführt wird, mit dem Ergebnis, dass es zusätzlich Probleme hinsichtlich seiner Zuverlässigkeit gibt.

**[0007]** Beim elektrooptischen Abtastverfahren (EO) ist es schwierig, den Absolutwert des Signals zu messen, und es gibt praktische Probleme, die unter anderem von den verwendeten Methoden zur Bereitstellung einer räumlich hochauflösenden Überwachung und Steuerung der Position des Messkopfes abhängen.

**[0008]** Elektronenstrahltester haben eine geringe zeitliche Auflösung und können zur Bewertung von IC nicht herangezogen werden, die schnelle Transistoren enthalten. Sie weisen auch den Nachteil auf, dass sie in der Umgebung der Messstelle ein Hochvakuum erfordern.

**[0009]** Die zeitliche Auflösung von Raster-Tunnelmikroskopen und Rasterkraftmikroskopen hat eine Grenze, die von der Ansprechgeschwindigkeit des Messfühlers gesetzt wird, der ein mechanisches System ist, und es ist deshalb schwierig, diese Vorrichtungen bei der Messung von schnellen elektrischen Schwingungsformen einzusetzen.

**[0010]** In Übereinstimmung damit ist zur genauen Bewertung elektrischer Wellenformen in Schaltkreisen hoher Integrationsdichte (LSI-Schaltkreisen) ein neues Messmittel erforderlich.

**[0011]** Diese Situation kann auch unter einem anderen Gesichtspunkt betrachtet werden. Insbesondere in Vorrichtungen nach dem Stand der Technik wurde lediglich das Streben nach Abtastgeschwindigkeit als wichtig angesehen und der Positionsregelung wurde kaum irgendwelche Aufmerksamkeit zuteil. Der Stand der Technik wird mit Bezug auf [Fig. 28](#) erläutert, die ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach dem Stand der Technik darstellt. Das Messobjekt **1** liegt auf dem Prüfstand **133**, und der Teil des Messobjektes, an dem gemessen werden soll, wird durch den Betrieb des Prüfstand-Positionsreglers **132** so eingestellt, dass er in der Nähe der Messfühlerspitze **51** liegt, die vom Messfühlerarm **21** getragen wird. Danach wird, nachdem die Messfühlerspitze **51** mit dem Messobjekt **1** in Kontakt gebracht wurde, die Höhenlage durch den Vertikalpositionsregler **130** justiert, der aus einem piezoelektrischen Element oder etwas ähnlichem geformt ist, und die optimale Messposition wird bestimmt. Die Messfühlerspitze **51** wird mit Licht aus der Lichtquelle **92** bestrahlt. Falls die Messstelle auf dem Messobjekt **1** ein elektrisches Potential aufweist, wird sich der Brechungsindex des elektrooptischen Kristalls auf Grund des elektrooptischen Effektes ändern, wodurch die Polarisations-

richtung des von der Messfühlerspitze **51** reflektierten Lichtes verändert wird, aus der Richtung, die es gehabt hätte, wenn kein elektrisches Potential vorhanden gewesen wäre. Der Grad der Veränderung wird mit Hilfe eines optischen Systems erfasst, das eine Verzögerungsplatte **99**, einen Polarisator **97** und einen Photoempfänger **11** umfasst und dem elektrischen Messinstrument **60** zugeführt, was eine Messung des elektrischen Potentials an der Messstelle zur Folge hat.

**[0012]** Vorrichtungen dieser Art nach dem Stand der Technik weisen die folgenden Nachteile auf. Insbesondere dann, wenn das Messobjekt ein IC oder etwas ähnliches ist, wo die Dicke zwischen den Messstellen variiert, ist es jedes Mal bei einem Wechsel der Messstelle erforderlich, die Schritte zu wiederholen, mit denen die Messfühlerspitze **51** kontaktiert und positioniert wird, mit dem Ergebnis (1), dass die Messungen zeitaufwendig sind und (2), dass die große Masse des Teils, das die Messfühlerspitze **51** trägt, bedeutet, dass eine große Wahrscheinlichkeit für eine physische Beschädigung der Stromkreise des Messobjektes besteht.

**[0013]** US 5,185,572 offenbart ein potentialspektroskopisches Rastertunnelmikroskop für die Ermittlung von Daten der Oberflächenkonfiguration, von differentiellen Konduktanzdaten und lokalen Potentialdaten einer leitfähigen Probe; das Mikroskop enthält einen Messfühler, der in z-Richtung servogeregelt ist, um den mittleren Absolutwert des Tunnelstromes konstant zu halten, der zwischen dem Messfühler und der Probe fließt, wobei aus der Servospannung ein Bild der Probenoberfläche abgeleitet wird.

**[0014]** Somit wurde in Vorrichtungen nach dem Stand der Technik das Streben nach Abtastgeschwindigkeit als wichtig angesehen, obwohl die Positionsregelung berücksichtigt wurde.

**[0015]** Die vorliegende Erfindung wurde im Lichte dieser Situation entworfen und sie erfüllt das Bedürfnis nach zeitlich und räumlich hochauflösenden Messungen an schnellen elektrischen Schwingungsformen an einem beliebigen Messort auf oder in einer integrierten Schaltung. Sie ist bei schnelleren und noch winzigeren Messobjekten einsetzbar, und ihre Aufgabe besteht darin, ein zuverlässigeres, schnelles elektrisches Messinstrument und einen Messfühler für dieses Instrument bereitzustellen und ein Rasterkraftmikroskop, das sowohl als elektrisches Hochgeschwindigkeits-Messverfahren als auch als Hochgeschwindigkeits-Messinstrument dient.

**[0016]** Ein weiteres Anliegen der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein elektrooptisches Messinstrument bereitzustellen, das eine hochpräzise Positionsregelung ausführen kann.

**[0017]** Die Erfindung stellt ein elektrisches Messinstrument mit einem Messfühler bereit, der im Betrieb ganz dicht an eine zu messende elektronische Vorrichtung (Messobjekt) herangeführt wird, und Mittel, die mit Hilfe des Messfühlers elektrischen Strom messen, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 der Messfühler optisch aktives Material enthält, und das Messinstrument umfasst:  
 eine optische Impulsquelle, die den Messfühler durch Erzeugen von Lichtimpulsen einer voreingestellten Impulsfrequenz aktiviert, wodurch die Leitfähigkeit des optisch aktiven Materials des Messfühlers bei der voreingestellten Folgefrequenz verändert wird,  
 eine Positionsregeleinrichtung, mit der die Position des Messfühlers relativ zum elektronischen Messobjekt in Übereinstimmung mit einer relativ niederfrequenten Komponente eines Tunnelstromes geregelt wird, der zwischen dem Messfühler und dem elektronischen Messobjekt fließt, und  
 Messmittel zum Ausführen von Messungen an dem elektronischen Messobjekt, durch Nutzung einer relativ hochfrequenten Komponente des Tunnelstromes.

**[0018]** Diese Erfindung stellt ein elektrisches Messinstrument mit einem Messfühler bereit, der im Betrieb ganz dicht an eine zu messende elektronische Vorrichtung (Messobjekt) herangeführt wird, und Mittel, die mit Hilfe des Messfühlers elektrischen Strom messen; das elektrische Messinstrument ist dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teil des Messfühlers ein optisch aktives Material enthält und dass eine Vorrichtung bereitgestellt wird, die Lichtimpulse durch das optisch aktive Material strahlt, wobei die Lichtimpulse die Leitfähigkeit des Materials verändern. Das optisch aktive Material sollte in der Messumgebung in einem nichtleitenden Zustand sein und kann ein Halbleiter der Gruppe IV, der Gruppe III-V oder der Gruppe II-VI sein.

**[0019]** In dieser Beschreibung kann die zuvor beschriebene Vorrichtung zur Messung des elektrischen Stromes so konstruiert sein, dass sie ein Mittel zur Messung des elektrischen Potentials ist. Weil die vorliegende Erfindung für die Anwendung bei elektronischen Vorrichtungen ausgelegt ist, wird die Messung des Potentials mit einer Strommessung bewerkstelligt. Darüber hinaus wird in dieser Beschreibung der Ausdruck „Messfühler“ benutzt, um ein detektierendes Teil zu bezeichnen, das eine Messfühlerspitze aufweist, die sich ganz dicht am Messobjekt befindet und einen Messfühlerarm, der diese Messfühlerspitze trägt.

**[0020]** Um ultraschnelle Messungen der zeitlichen Veränderungen am elektrischen Feld eines Messobjektes mit ultrahoher räumlicher Auflösung durchzuführen, wird Licht in Form kurzer Impulse auf das Messobjekt und auf die in dessen Nähe positionierte

Messfühlerspitze gestrahlt, wobei die Messfühlerspitze einen nadelförmigen Anschlusspunkt darstellt, woraufhin ein elektrischer Strom erzeugt wird. Dieser Stromfluss tritt nur dann auf, wenn die Messfühlerspitze mit Licht bestrahlt wird und hängt von der Spannung zwischen dem Messobjekt und der Messfühlerspitze ab. Durch Messen dieses Stromes kann das elektrische Potential des Messobjektes abgetastet werden. Anders gesagt heißt dies, obwohl die Messfühlerspitze extrem dicht an das Messobjekt herangebracht wird, dass sie selbst elektrisch nichtleitend ist, wodurch der Widerstand und die Kapazität, etc., des Messsystems überhaupt keinen Einfluss auf das Messobjekt haben. Wenn die Messfühlerspitze jedoch mit einem optischen Impuls bestrahlt wird, wird die Messfühlerspitze zu einem Leiter und ein Strom fließt zwischen ihr und dem Messobjekt, mit dem Ergebnis, dass das elektrische Potential des Messobjektes gemessen werden kann.

**[0021]** Es spielt keine Rolle, ob die Messfühlerspitze und das Messobjekt, voneinander getrennt, in einem Abstand gehalten werden, der in der Größenordnung von Atomen liegt, oder ob sie bis zur Kontaktgabe zusammengebracht werden. Falls sie voneinander getrennt sind, fließt der Strom auf Grund des Tunneleffekts oder infolge von Feldemission. Falls sie sich berühren und sich an ihrer Trennstelle ein Potentialwall ausgebildet hat, fließt der Strom auf Grund eines Tunnelphänomens, wogegen sich bei fehlender Ausbildung eines Potentialwalls ein normaler Stromfluss einstellt. Selbst wenn ein Kontakt besteht, kann der Einfluss auf das Messobjekt ausreichend klein gemacht werden, wenn der durch den Strompfad der Messfühlerspitze repräsentierte Widerstand ausreichend groß ist und die Kapazität der optisch aktiven Region im nichtleitenden Fall ausreichend klein ist. In diesem Fall wird die Größe des gemessenen Stromes mit Hilfe dieses Widerstandswertes bestimmt und ist dem elektrischen Potential des Messobjektes proportional.

**[0022]** Ein auf diese Art und Weise aufgebautes schnelles elektrisches Messinstrument erleichtert Messungen an schnellen Schwingungsformen, wie sie zuvor unmöglich waren. Es erleichtert auch die Überwachung und Steuerung der Messfühlerspitzenposition mit hoher räumlicher Auflösung und die Charakterisierung der Messanordnungen und macht es möglich, Messungen hoher Zuverlässigkeit bei geringen Kosten durchzuführen.

**[0023]** Der zuvor erwähnte Messfühler soll nach Möglichkeit eine Messfühlerspitze aufweisen und ein Teil der Messfühlerspitze oder die gesamte Messfühlerspitze sollte aus einem optisch aktiven Material bestehen.

**[0024]** Es ist auch möglich, den zuvor erwähnten Messfühler mit einer Messfühlerspitze auszustatten,

die aus einem elektrisch leitenden Material besteht und das optisch aktive Material in den elektrischen Leitungsweg einzufügen, der die aus diesem elektrisch leitenden Material hergestellte Messfühlerspitze mit dem zuvor erwähnten Messfühler verbindet.

**[0025]** Es ist auch möglich, eine Synchronisationschaltung vorzusehen, welche die Mittel zur Erzeugung optischer Impulse und den Betrieb des zuvor genannten Messobjektes synchronisiert.

**[0026]** Die zuvor genannten optischen Impulse können periodische optische Impulse sein.

**[0027]** Die vorliegende Erfindung stellt auch einen Messfühler mit einer Messfühlerspitze bereit, der im Betrieb ganz dicht an ein elektronisches Messobjekt herangeführt wird, wobei der Messfühler zu einem elektrischen Messinstrument das elektrische Potential überträgt, das an dem Punkt herrscht, in dessen unmittelbarer Nähe sich die Messfühlerspitze befindet; der Messfühler ist dadurch gekennzeichnet, dass ein optisch aktives Material in den elektrischen Leitungsweg zwischen der zuvor erwähnten Messfühlerspitze und dem zuvor erwähnten elektrischen Messinstrument eingefügt wird und dass er über Mittel verfügt, die Licht in dieses optisch aktive Material einkoppeln, wobei das Licht dieses Material aktiviert und in einen elektrisch leitenden Zustand versetzt. Zumindest ein Teil der Messfühlerspitze sollte aus einem optisch aktiven Material bestehen.

**[0028]** Es ist auch möglich, einen Arm vorzusehen, der die zuvor erwähnte Messfühlerspitze trägt und das zuvor erwähnte Mittel zur Einkopplung von Licht mit einem optischen Wellenleiter auszustatten, der an diesem Arm entlang läuft.

**[0029]** Es ist auch möglich, dass der zuvor erwähnte optische Wellenleiter aus einem mit einem metallenen Mantel versehenen Lichtwellenleiter besteht und dass der metallene Mantel Teil des zuvor erwähnten elektrischen Leitungsweges ist.

**[0030]** Die zuvor erwähnte Messfühlerspitze kann aus einem leitfähigen Material hergestellt sein und die Befestigungskonstruktion, mit der die Messfühlerspitze an dem mechanischen Trägerarm befestigt ist, kann ein optisch aktives Material enthalten. Es kann ein optischer Wellenleiter vorgesehen sein, der an diesem Arm entlang läuft.

**[0031]** Die vorliegende Erfindung kann auch ein Rasterkraftmikroskop bereitstellen, das mit dem zuvor genannten Messfühler ausgestattet ist. Es ist wünschenswert, wenn dieses Rasterkraftmikroskop als Mittel für die Positionierung des Messfühlers relativ zum elektronischen Messobjekt ein Mittel aufweist, um den Messfühler mit Licht zu bestrahlen und ein Mittel, um Licht zu detektieren, das vom Messfüh-

ler reflektiert wurde. Das Licht, mit dem das optisch aktive Material in den elektrisch leitfähigen Zustand versetzt wird, kann Licht sein, das von derselben Lichtquelle emittiert wird, die das Licht erzeugt, das von dieser Positioniervorrichtung verwendet wird.

**[0032]** Die vorliegende Erfindung stellt auch eine integrierte Halbleiterschaltung bereit, die über eine mit einem elektrischen Messinstrument verbundene Messelektrode verfügt, wobei die integrierte Halbleiterschaltung dadurch gekennzeichnet ist, dass das zu messende Element und die zuvor erwähnte Messelektrode über ein optisch aktives Material miteinander verbunden sind und dieses optisch aktive Material sich in der Messumgebung in einem nichtleitenden Zustand befindet und dass es leitfähig wird, wenn es mit Licht bestrahlt wird.

**[0033]** Weil es auf dem Gebiet der Lasertechnik relativ einfach geworden ist, optische Impulse im Sub-Pikosekundenbereich zu erzeugen, werden derartige Laserimpulse benutzt, um elektrische Signale abzutasten. Dies ermöglicht die direkte Messung von elektrischen Potentialen an interessierenden Punkten, und derartige Messungen sind schneller als herkömmliche elektronische Messungen und erfordern keine Herausführung des Messsignals. Anders gesagt heißt dies, dass diese Methode die zur Abtastung in einem Abtastoszilloskop benutzten elektrischen Impulse durch optische Impulse ersetzt.

**[0034]** Was die Positionsregelung des Messfühlers betrifft, so können winzige Ortsveränderungen der Messfühlerposition als Ortsveränderungen der Position des Lichtstrahles ausgedrückt werden, der nach dem Auftreffen vom Messfühler reflektiert wird. Ein Photoempfänger erkennt die Position des Messfühlers, indem es die Ortsveränderungen der Position erkennt, an der dieses reflektierte Licht auftrifft. Die Position des Messfühlers wird in Übereinstimmung mit Unregelmäßigkeiten der Oberfläche des Messobjektes verlagert.

**[0035]** Die Position des Messfühlers relativ zu einem integrierten Schaltkreis oder einem anderen Messobjekt, das Unregelmäßigkeiten aufweist, kann mit großer Genauigkeit geregelt werden, indem die Unregelmäßigkeiten, die vom Messfühler abgetastet werden, mit Unregelmäßigkeiten verglichen werden, die bereits bekannt sind. Auf diese Art und Weise lässt sich mit Hilfe einer einfachen Konstruktion ein elektrooptisches Messinstrument herstellen, das eine hochgenaue Positionsregelung ausführen kann.

**[0036]** Es werden nun Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf die Zeichnungen erläutert.

## Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0037] **Fig. 1** ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0038] **Fig. 2** zeigt eine experimentelle Anordnung dieses ersten Ausführungsbeispiels.

[0039] **Fig. 3** zeigt eine experimentelle Anordnung dieses ersten Ausführungsbeispiels.

[0040] **Fig. 4** stellt die Messprinzipien anschaulich dar.

[0041] **Fig. 5** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0042] **Fig. 6** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0043] **Fig. 7** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0044] **Fig. 8** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0045] **Fig. 9** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0046] **Fig. 10** gibt experimentelle Ergebnisse an, die mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0047] **Fig. 11** gibt Messergebnisse an, die mit einer Vorrichtung gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel erzielt wurden.

[0048] **Fig. 12** zeigt die Kennwerte eines elektronischen Messobjektes.

[0049] **Fig. 13** ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0050] **Fig. 14** zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0051] **Fig. 15** ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach einem vierten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0052] **Fig. 16** ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach einem fünften Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0053] **Fig. 17** ist eine perspektivische Darstellung eines sechsten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0054] **Fig. 18** ist eine perspektivische Darstellung eines siebenten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0055] **Fig. 19** zeigt den Aufbau eines achten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0056] **Fig. 20** zeigt den Aufbau eines neunten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0057] **Fig. 21** ist eine perspektivische Darstellung eines zehnten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0058] **Fig. 22** zeigt den Aufbau eines elften Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0059] **Fig. 23** zeigt das Einführen eines optischen Impulses in einen Messfühler.

[0060] **Fig. 24** ist ein Blockschaltbild eines zwölften Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

[0061] **Fig. 25** zeigt den Aufbau des Messfühlers im zwölften Ausführungsbeispiel.

[0062] **Fig. 26** zeigt den Aufbau des Messfühlers in einem dreizehnten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0063] **Fig. 27** zeigt den Aufbau des Messfühlers in einem vierzehnten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0064] **Fig. 28** ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung nach dem Stand der Technik.

## Beste Methoden zum Ausführen der Erfindung

[0065] Der Aufbau einer Vorrichtung nach einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird mit Bezug auf **Fig. 1** erläutert, die ein Blockschaltbild einer derartigen Vorrichtung darstellt. Diese Vorrichtung stellt ein elektrisches Messinstrument dar und ist mit einem Messfühler **2** versehen, der ganz dicht an das elektronische Messobjekt **11** herangeführt wird. Sie weist auch einen Strom-Spannungs-Wandler **17**, einen Verstärker **18**, ein Bandpassfilter **19** und ein Oszilloskop **10** auf, die in ihrer Gesamtheit als Messeinrichtung dienen, mit welcher der im Messfühler **2** fließende Strom gemessen wird.

[0066] Die herausragenden Merkmale dieser Vorrichtung liegen darin, dass der Messfühler **2** ein optisch aktives Material enthält, und dass eine optische Impulsquelle **13** vorgesehen ist, um den Messfühler **2** mit intensiven Lichtimpulsen zu bestrahlen, die das zuvor erwähnte optisch aktive Material in den leitfähigen Zustand versetzen. Dieses optisch aktive Material kann ein Halbleiter der Gruppe IV, Gruppe III-V



oder Gruppe II-VI sein. In einer Vorrichtung nach dem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung besteht der Messfühler **2** in seiner Gesamtheit aus einem optisch aktiven Material. Wie dies zuvor bereits beschrieben wurde, wird in dieser Beschreibung der Ausdruck „Messfühler“ benutzt, um ein detektierendes Teil zu bezeichnen, das eine Messfühlerspitze aufweist, die sich ganz dicht am Messobjekt befindet und einen Messfühlerarm, der die Messfühlerspitze trägt. In diesem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung sollte der Messfühler **2** jedoch als Messfühler betrachtet werden, der in seiner Gesamtheit aus einer Messfühlerspitze besteht.

**[0067]** Die zuvor erwähnten Lichtimpulse sind periodische optische Impulse. In **Fig. 1(a)** werden die optische Impulsquelle **13** und die Stromversorgung **5** mit Hilfe der Synchronisationsschaltung **20** synchronisiert, wohingegen auf **Fig. 1(b)** ein Mittel vorhanden ist, welches die Messzeitablenkung des Oszilloskops **10** mit der optischen Impulsquelle **13** synchronisiert.

**[0068]** Messfühler **2** sitzt auf dem Aktuator **16** und das elektronische Messobjekt **11** sitzt auf dem Aktuator **16'**. Der Abstand zwischen den beiden Aktuatoren **16** und **16'** wird durch den Positionsregler **15** auf einen voreingestellten Wert geregelt.

**[0069]** Nun wird die Arbeitsweise dieses ersten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf **Fig. 2** bis **Fig. 10** erläutert. **Fig. 2** und **Fig. 3** zeigen experimentelle Anordnungen dieses ersten Ausführungsbeispiels. **Fig. 4** stellt die dabei einbezogenen Messprinzipien dar.

**[0070]** **Fig. 5** bis **Fig. 10** zeigen experimentelle Ergebnisse, wobei die Zeit auf der horizontalen Achse und die Spannung auf der vertikalen Achse abgetragen sind. Die auf diesem ersten Ausführungsbeispiel beruhenden Experimente wurden in Luft unter Verwendung der beiden experimentellen Anordnungen durchgeführt, wie sie auf **Fig. 2** und **Fig. 3** dargestellt sind. Bei diesen Experimenten wurde aus Gründen der Bequemlichkeit das Messobjekt **1** aus einem optisch aktiven Material hergestellt und eine Platin-Iridium-Legierung (nachfolgend in der Form „Pt-Ir“ geschrieben) als Messfühler **2** verwendet. Das elektrische Potential wurde gemessen, indem das optisch aktive Material in der Nähe der am Ende des Messfühlers **2** angeordneten Messfühlerspitze durch Bestrahlen mit Licht aktiviert wurde. Auf diese Art und Weise ist es möglich, äquivalente Messungen der Betriebseigenschaften einer Vorrichtung gemäß dieses ersten Ausführungsbeispiels durchzuführen.

**[0071]** Das Messobjekt **1** in diesem ersten Ausführungsbeispiel war eine Scheibe (Wafer) eines quasiisolierenden Galliumarsenids (nachfolgend in der Form „GaAs“ geschrieben), oder Indiumphosphid

(nachfolgend in der Form „InP“ geschrieben). Eine Elektrode wurde durch Sputtern von Gold (Au) auf die Oberfläche des Wafers hergestellt und ein Leitungsdraht wurde mit Hilfe eines leitfähigen Klebstoffs (Silberpaste) befestigt. Um Oxidation und/oder Kontamination an der Oberfläche des Prüfobjektes **1** zu vermeiden, wurde der Wafer unmittelbar vor der Messung durchtrennt und die entstandene, durchtrennte Oberfläche als Messobjekt verwendet. Lichtimpulse aus einer Aluminium-Galliumarsenid-LED (nachfolgend in der Form „AlGaAs“ geschrieben), die bei einer Wellenlänge von 650 nm emittierte, wurden als Lichtquelle verwendet. LED **3** wurde an 50  $\Omega$  Impedanzangepasst, und ihre Ansprechzeit auf die Eingangsspannung betrug 45 ns.

**[0072]** Das in **Fig. 2** dargestellte Experiment wird zuallererst erläutert. Das Prüfobjekt **1**, umfassend einen Halbleiterwafer (GaAs oder InP) und Messfühler **2** werden unter Luft eingerichtet und durch einen winzigen Abstand voneinander getrennt. LED **3** wird vom Impulsgenerator **4** angesteuert und der Bereich der Messfühlerspitze **2** über dem Prüfobjekt **1** wird mit Licht bestrahlt. Eine Gleichspannung wird als Vorspannung mit Hilfe der Stromversorgung **5** an das Messobjekt **1** angelegt.

**[0073]** Der Messfühler **2** wird mit Hilfe des Piezoantriebs **6** angetrieben und die Regelung der Mikropositionierung des Messfühlers wird mit Hilfe eines rückgekoppelten Kreises bewerkstelligt, der den Vorverstärker **7** und die Operationsverstärker **8** und **9** enthält, um den Tunnelstrom nachzuweisen, der zwischen Messfühler **2** und dem Messobjekt **1** fließt. Dies bildet das gleiche Regelungssystem wie in einem Raster-Tunnelmikroskop.

**[0074]** Die Zeitkonstante der Rückkopplungsschaltung insgesamt wird so bemessen, dass sie größer ist als die Zeitkonstante des Impulssignals vom Impulsgenerator **4**. Operationsverstärker **7** arbeitet jedoch ausreichend schnell, damit das zuvor erwähnte Impulssignal mit einem am Ausgang des Verstärkers angeschlossenen Oszilloskop **10** im Ganzen betrachtet werden kann.

**[0075]** Nachfolgend wird das in **Fig. 3** anschaulich dargestellte Experiment erläutert. **Fig. 3** zeigt eine experimentelle Anordnung, bei der anstelle der Zuführung einer Gleichspannung zum Messobjekt **1**, wie auf **Fig. 2**, ein elektrisches Wechselfeld angelegt wurde.

**[0076]** Auf **Fig. 3** werden das Prüfobjekt **1** und der Messfühler **2** eingerichtet, wie auf **Fig. 2**, das heißt, unter Luft und durch einen winzigen Abstand voneinander getrennt. LED **3** wird vom Impulsgenerator **4** angesteuert und die Umgebung der Messfühlerspitze **2** über dem Prüfobjekt **1** wird mit Licht bestrahlt.

**[0077]** Das Messobjekt **1** wird von einem Oszillator **25** angesteuert, und es kann ein Frequenzzähler **31** verwendet werden, um die Impulsfrequenzen des Impulsgenerators **4** und des Oszillators **25** sowie deren Differenzfrequenz  $\Delta f$  zu beobachten.

**[0078]** Der Messfühler **2** wird mit Hilfe des Piezoantriebs **6** angetrieben und die Regelung der Mikropositionierung des Messfühlers wird mit Hilfe eines rückgekoppelten Kreises bewerkstelligt, der den Vorverstärker **7** und die Operationsverstärker **8** und **9** enthält, um den Tunnelstrom nachzuweisen, der zwischen Messfühler **2** und dem Messobjekt **1** fließt. Die Zeitkonstante dieses Regelungssystems wird genauso groß gemacht, wie die in dem auf [Fig. 2](#) erläuterten Experiment.

**[0079]** Das Ausgangssignal des Vorverstärkers **7** kann mit Hilfe eines Digitaloszilloskops **30** unter Zwischenschaltung eines Tiefpassfilters **32** beobachtet werden. Oszillator **25** wird so ausgeführt, dass eine Gleichspannung als Offset zugeführt werden kann.

**[0080]** Mit dieser experimentellen Anordnung wird ein Messinstrument aufgebaut, dessen Messfühler **2** das Messobjekt **1** berührt oder in einem winzigen Abstand in der Größenordnung von Atomen (5 bis 10 Å) zu diesem angeordnet ist. Dieses Messinstrument wird in der Umgebung des Bereichs, wo das Prüfobjekt **1** und der Messfühler **2** sich gegenüberliegen, mit Licht in Form kurzer Impulse bestrahlt, und dies hat zur Folge, dass ein elektrischer Strom generiert wird und zwischen Prüfobjekt **1** und Messfühler **2** fließt. Das elektrische Potential des Messobjektes **1** kann durch Messen dieses Stromes abgetastet werden, und so ist es möglich, Messungen der Betriebsbedingungen und der elektrischen Feldverteilung, usw., am Messobjekt **1** durchzuführen.

**[0081]** Die Messprinzipien werden mit Bezug auf [Fig. 4](#) erläutert. Es wird angenommen, dass, wenn  $V_D$ , das Potential des Prüfobjekts (DUT), gleich  $V_t$ , dem Potential des nadelförmigen Anschlusses, ist, der als Messfühlerspitze dient, (siehe [Fig. 4a](#)), das Fermi-Niveau der Probe DUT mit dem Zentrum des verbotenen Bandes der Messfühlerspitze zusammenfällt. Unter diesen Umständen wird, weil dort gewöhnlich nur wenige Ladungsträger vorhanden sind, weder ein Tunnelstrom fließen noch wird Feldemission auftreten. In diesem Zustand werden, wenn die Messfühlerspitze mit Licht bestrahlt wird, Träger generiert und ein Tunnelstrom wird fließen, jedoch nur so lange, wie Licht auftrifft. In Abhängigkeit von der Form des Potentialwalls und von anderen Faktoren, kann auch ein Strom auf Grund von Feldemission fließen. Die Größe dieses Stromes wird von der Potentialdifferenz zwischen dem Messobjekt und der Messfühlerspitze, dass heißt, von  $V_D - V_t$  abhängen (siehe [Fig. 4b](#) und [Fig. 4c](#)). Daraus folgt, dass das Potential des Prüfobjektes DUT gefunden werden

kann, indem  $V_t$  entsprechend eingestellt und der resultierende Strom beobachtet wird.

**[0082]** Unter Anwendung dieses grundlegenden Messprinzips kann ein Abtastbetrieb ausgeführt werden, indem die Folgefrequenz der kurzen Laserimpulse, welche das Bestrahlungslicht enthalten, auf eine Frequenz eingestellt wird, die nur ganz leicht von der Frequenz des elektrischen Signals im Prüfobjekt **1** abweicht und durch Messen des Stromes, der unter diesen Bedingungen fließt. In diesem Falle kann das elektrische Signal im Prüfobjekt **1** einfach mit einem gewöhnlichen Messinstrument, zum Beispiel einem Digitaloszilloskop **30**, gemessen werden, als ein Signal, dessen Frequenz gleich der Differenzfrequenz zwischen der Frequenz der oben erwähnten optischen Impulse und der Frequenz des elektrischen Signals ist, mit anderen Worten, als eine Mischfrequenzkomponente.

**[0083]** Ein wirksames Mittel zum Einhalten der Position der Messfühlerspitze ist der Einsatz der von der Art her gleichen Mittel, wie sie in einem Raster-Tunnelmikroskop (STM) verwendet werden, durch Bereitstellen einer Rückkopplung, um den mittleren Strom konstant zu halten. Indem der Frequenzbereich dieses Regelungssystems ausreichend schmal gemacht wird und indem sichergestellt wird, dass (a) die Frequenz des elektrischen Signals des Prüfobjektes **1**, (b) die Impulsfrequenz der optischen Impulse, und (c), die resultierende Mischfrequenz alle so eingestellt werden, dass sie ausreichend weit oberhalb des Frequenzbereichs des Regelungssystems liegen, kann das elektrische Signal des Prüfobjektes **1** gemessen werden, während die Position der Messfühlerspitze konstant gehalten wird.

**[0084]** Ein weiteres wirksames Mittel zum Einhalten der Position der Messfühlerspitze besteht in der Anwendung einer Methode, wie sie allgemein in einem Rasterkraftmikroskop (AFM) verwendet wird, nämlich dem Detektieren der interatomaren Kraft, die zwischen dem Messobjekt **1** und der Messfühlerspitze als Ablenkung der Position der Messfühlerspitze wirkt und in der Bereitstellung einer Rückkopplung, um die Position konstant zu halten.

**[0085]** Es ist auch möglich, am Messobjekt **1** hochgenaue Messungen der Potentiale durchzuführen, indem man dem Messobjekt **1** und/oder der Messfühlerspitze entsprechende Vorspannungen zuführt und die entsprechenden Vorströme justiert. Unter diesen Bedingungen können Halbleiter aus Silizium oder anderen Halbleitern der Gruppe IV, Galliumarsenid oder anderen Halbleitern der Gruppe III-V, Zinkselenid oder anderen Halbleitern der Gruppe II-VI, usw., für die aus einem Halbleiter hergestellte Messfühlerspitze verwendet werden.

**[0086]** Die Antwort des Systems auf optische Impul-



se wurde mit Hilfe der Versuchsanordnung bestätigt, wie sie auf [Fig. 2](#) dargestellt ist. Nachfolgend werden nun die angewendete experimentelle Methode und die erhaltenen Ergebnisse erläutert. Es wird nun auf [Fig. 2](#) Bezug genommen, wo ein Impulsgenerator **4** verwendet wurde, um rechteckige Lichtimpulse von LED **3** auszusenden, während mit Hilfe der Stromversorgung **5** eine Vorspannung (Gleichspannung) dem Messobjekt **1** zugeführt wurde. Diese optischen Impulse bestrahlten die durchtrennte Oberfläche des Messobjekts **1** und das Oszilloskop **10** wurde verwendet, um das resultierende Ausgangssignal des Vorverstärkers **7** zu messen, wodurch die Beobachtung der Antwort des zwischen Messobjekt **1** und dem Messfühler erzeugten Tunnelstromes auf die Lichtimpulse ermöglicht wurde. Das Potential des Messfühlers **2** betrug 0 V und der unter diesen Bedingungen fließende mittlere Tunnelstrom wurde mit Hilfe der zuvor erwähnten Rückkopplungsschaltung auf einen Wert von 1 nA geregelt.

**[0087]** Der Vorverstärker **7** setzt einen Tunnelstrom von 1 nA in eine Spannung von 10 mV um, und sein Frequenzbereich liegt in der Größenordnung von 400 kHz. Andererseits wird der Frequenzbereich des Regelungssystems eines Raster-Tunnelmikroskops von der Zeitkonstante des integrierenden Netzwerks bestimmt und er wird bei diesem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung auf 300 Hz eingestellt. Ein Signal im Frequenzbereich zwischen diesen beiden Werten, das heißt, etwa im Bereich von 1 bis 400 kHz, kann deshalb zugeführt und erkannt werden, ohne den Betrieb des Regelungssystems zu stören.

**[0088]** In der Folge werden die verschiedensten experimentellen Ergebnisse angegeben. Dabei ist anzumerken, dass aus Gründen der Bequemlichkeit die folgenden Messungen mit Messfühler **2** und Messobjekt **1** umgesetzt wurden, mit einer Platin-Iridium-Legierung, (nachfolgend in der Form „Pt-Ir“ geschrieben), verwendet als Messfühler **2**; und GaAs oder InP, verwendet als Messobjekt **1**. Die (bei einer Frequenz von 10 kHz) unter Verwendung eines quasiisolierenden Typs aus InP als Prüfobjekt **1** erzielten Ergebnisse sind auf [Fig. 5](#) dargestellt, während die (bei einer Frequenz von 1 kHz) unter Verwendung eines quasiisolierenden Typs GaAs erzielten Ergebnisse auf [Fig. 6](#) dargestellt sind. Die Rechteckwellen **41** und **43** in [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) werden als Ansteuerungsspannung für LED **3** verwendet, während die verschliffenen (abgerundeten) Schwingungsformen **42** und **44** die Tunnelströme darstellen. Die Tatsache, dass die Schwingungsformen des Tunnelstromes keine perfekten Rechteckwellen, sondern abgerundet sind, ist darauf zurückzuführen, dass Vorverstärker **7** ein schmales Durchlassband aufweist und dass seine Zeitkonstante etwa 10  $\mu$ s beträgt. Dieser Wert korrespondiert sehr stark mit der Zeitkonstante, die man aus diesen Schwingungsformen erhält.

**[0089]** Weil das Vorzeichen des Tunnelstromes umgekehrt ist, entsprechen den nach unten gewendeten Teilen Zeiten, in denen ein Strom fließt. Wegen der Existenz eines zusätzlichen Offsets im Vorverstärker **7** scheint der Ursprung des Stromes nach unten verschoben zu sein, der Tunnelstrom schwankt jedoch zwischen 0 nA und 2 nA, und konzentriert sich auf einen mittleren Tunnelstrom von 1 nA, was ein plausibles Verhalten ist.

**[0090]** Die hier dargestellten Ergebnisse treffen auf den Fall zu, wenn die aus der Stromversorgung **5** zugeführte Vorspannung eine Gleichspannung von +2 V ist. Es wurden unterschiedliche Vorspannungen zwischen -5 V und +5 V überprüft, und in jedem Fall trat ein ähnliches Ergebnis auf, nämlich, dass Strom nur dann floss, während Licht auf die Messstelle traf. Diese Art der Tunnelstromantwort auf Licht war auch zu beobachten, wenn die Vorspannung viel kleiner als der Bandabstand des Messobjekts **1** war, und praktisch bei 0 V lag.

**[0091]** Nachfolgend wird nun eine Beschreibung des experimentellen Verfahrens angegeben, wie es in der auf [Fig. 3](#) dargestellten Versuchsanordnung angewendet wird, um die Schwebungsfrequenz (Mischfrequenz) zwischen den optischen Impulsen und einer Wechsellspannungsvorspannung zu detektieren. Es wird nun auf [Fig. 3](#) Bezug genommen, wo die Impulsfrequenz der von LED **3** abgegebenen optischen Impulse bei Ansteuerung aus dem Impulsgenerator **4**, auf 400 kHz und die Frequenz der Wechsellspannungskomponente der vom Oszillator **25** zugeführten Vorspannung auf 400 kHz +  $\Delta f$  eingestellt war. Anschließend wurde ein Testlauf durchgeführt, um sicherzustellen, ob im Tunnelstrom eine Komponente zu erkennen war oder nicht, die mit der Mischfrequenz  $\Delta f$  übereinstimmte. Auf [Fig. 7](#) ist die Schwingungsform **45** der Impulse (400 kHz) dargestellt, mit denen LED **3** angesteuert wird. [Fig. 8](#) zeigt die Schwingungsform **46** der Wechselstromkomponente der Vorspannung (400 kHz). Diese wurde mit einer Gleichspannungskomponente von +2 V als Offset überlagert, so dass die dem Messobjekt **1** zugeführte Spannung schließlich eine Sinusspannung darstellte, die zwischen +1 V und +3 V schwankte. Mit Hilfe eines geschlossenen Regelkreises wurde der resultierende mittlere Tunnelstrom auf 1 nA geregelt.

**[0092]** Mit diesem Aufbau wurde das Ausgangssignal des Vorverstärkers **7**, das mit dem Tunnelstrom korrespondierte, als Einzelimpuls mit Hilfe eines Digitaloszilloskops **30** gemessen. Um ausschließlich die Mischfrequenzkomponente  $\Delta f$  nachzuweisen, wurden alle anderen Frequenzkomponenten in der Nähe von 400 kHz, dies ist die Grundfrequenz, mit Hilfe eines Tiefpassfilters **32** entfernt. Die Impulsfrequenz der optischen Impulse und die Frequenz der Wechsellspannungsvorspannung wurden mit Hilfe des Fre-

quenzzählers **31** gemessen.

**[0093]** Nachfolgend werden, wie dies auf [Fig. 9](#) gezeigt wird, die erzielten Ergebnisse dargestellt, die bei der Verwendung von InP vom Halbisolatortyp als Messobjekt **1** erzielt wurden, während [Fig. 10](#) die Ergebnisse zeigt, die bei Verwendung von quasiisolierendem GaAs erzielt wurden. [Fig. 9\(a\)](#) bis [9\(d\)](#) zeigen, in der entsprechenden Reihenfolge die erhaltenen Ausgangsschwingungsformen **47** bis **50**, wenn die oben erwähnte  $\Delta f$  auf 9,54 kHz, 13,96 kHz, 17,27 kHz und 20,05 kHz eingestellt war. Auf [Fig. 10](#) ist die Ausgangsschwingungsform **51** dargestellt, die man bei einem Wert von 20 kHz für  $\Delta f$  erhielt. In jedem Fall können Unregelmäßigkeiten, die mit der Mischfrequenz korrespondieren, eindeutig identifiziert werden. Die Anzahl der Unregelmäßigkeiten korrespondiert mit jedem Wert von  $\Delta f$ , und es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Unregelmäßigkeiten mit steigender  $\Delta f$  zunimmt. Die Amplitude liegt in der Größenordnung von 1 nA, und dieser Wert korrespondiert ebenfalls stark mit dem voreingestellten mittleren Tunnelstrom von 1 nA.

**[0094]** In diesem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung kann eine Mischfrequenzkomponente auch in der weiter oben beschriebenen Art und Weise extrahiert werden, indem die optischen Impulse, mit denen das Messobjekt **1** bestrahlt wird und die dem Messobjekt zugeführte Wechselspannung variiert werden. Dies stellt nichts anderes als das Durchführen einer Abtastung dar. Wenn es erforderlich ist, ein schnelles Wechselspannungssignal zu messen, ist es möglich, die gewünschte Messung mit Hilfe der oben erwähnten Abtastung durchzuführen, vorausgesetzt, dass ultraschnelle optische Impulse verwendet werden. Mit der vorliegenden Erfindung kann schnelle Abtastung, die bisher mit elektronischen Messverfahren unmöglich war, leicht ausgeführt werden. Der Wert für die industrielle Anwendung der Erfindung ist extrem hoch.

**[0095]** Dieses erste Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wurde im Zusammenhang mit Fällen beschrieben, bei denen Metall für den Messfühler **2** und ein Halbleiterwafer als Messobjekt **1** verwendet wurden. Ähnliche Ergebnisse wurden jedoch im entgegengesetzten Fall erzielt, nämlich da, wo ein Halbleiter als Messfühler **2** und Metall und/oder Halbleiter als Messobjekt **1** verwendet wurden. Darüber hinaus umfasst die Region, in welcher der Tunnelstrom erzeugt wird, nur eine winzige Fläche und deshalb erzielte man gute Ergebnisse selbst dann, wenn das Messobjekt ein extrem kleines Muster aufwies. Dabei ist auch zu vermerken, dass das Führungssystem hinreichend schnell war, sogar dann, wenn die Impulsbreiten der verwendeten optischen Impulse im Pikosekunden- oder Sub-Pikosekundenbereich lagen. Annähernd dieselben Ergebnisse erhielt man, wenn ein Halbleiter der Gruppe II-VI verwendet wur-

de. Obwohl das erste Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung im Zusammenhang mit Halbleitern vom quasiisolierenden Typ dargestellt wurde, ließ sich ein ähnlicher Effekt erzielen (wenn auch die Empfindlichkeit etwas geringer war), wenn Halbleiter vom p-Typ oder vom n-Typ verwendet wurden.

**[0096]** Die Ergebnisse der Messungen, die unter Verwendung der auf [Fig. 1b](#) dargestellten Schaltung erzielt wurden, sind in [Fig. 11](#) angegeben. Periodische Lichtimpulse wurden durch periodische Anregung in der optischen Impulsquelle **13** erzeugt, und dies wurde so bewerkstelligt, dass die Phasen dieser Lichtimpulse und der Betrieb des elektronischen Messobjektes **11** langsam divergierten. Genauer ausgedrückt, wurde das Triggersignal, das dem elektronischen Messobjekt **11** von der Stromversorgung **5** zugeführt wurde, auf 100,000 MHz eingestellt, während die Impulsfrequenz der optischen Impulsquelle **13** auf 100,001 MHz eingestellt wurde. Anders gesagt heißt dies, dass das Messobjekt **11** so eingestellt wurde, dass es in neuen Anläufen mit einer Wiederholfrequenz  $f_d$  von 100,000 MHz arbeitete, während die Impulsfrequenz der optischen Impulse  $f_p$  auf 100,001 MHz eingestellt war. Die Wellenlänge der optischen Impulse betrug 670 nm und ihre Impulsbreite 80 ps. Die horizontale Achse in [Fig. 11](#) ist die Zeitachse und die vertikale Achse ist der Spannungspegel (gezeichnet in einem beliebigen Maßstab). Eine Teilung auf der Zeitachse beträgt 200  $\mu$ s, dies bedeutet, dass die auf [Fig. 11](#) erscheinende Periodendauer 1000  $\mu$ s beträgt. Anders gesagt heißt dies, die Folgefrequenz beträgt 1 kHz. Dies ist äquivalent zur Differenzfrequenz zwischen der Frequenz der optischen Impulse und der Frequenz des Triggersignals, nämlich

$$\Delta f = |f_p - f_d| = 1 \text{ kHz}$$

**[0097]** Auf [Fig. 12](#) sind die Kennlinien eines Vergleichs dargestellt, welcher das erzielte Ergebnis zeigt, wenn der tatsächliche Betrieb des elektronischen Messobjektes **11** direkt gemessen wurde, nicht durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens, sondern mit Hilfe eines extrem teuren Messinstrumentes, (in diesem Falle mit einem Yokogawa DL8100). Die horizontale Achse in [Fig. 12](#) ist die Zeitachse und die vertikale Achse ist der Spannungspegel (gezeichnet in einem beliebigen Maßstab). Eine Teilung auf der Zeitachse von [Fig. 12](#) beträgt 2 ns. Daraus ist zu erkennen, dass die auf [Fig. 12](#) beobachtete Kurvenform eine Periodendauer von 10 ns aufweist, oder anders gesagt, die Antwortcharakteristik eines elektronischen Messobjektes **11**, wenn dieses mit Hilfe eines Triggersignals angesteuert wird, dessen Folgefrequenz 100 MHz beträgt.

**[0098]** Ein Vergleich der [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) zeigt, dass, weil auf [Fig. 11](#) die Folgefrequenz 1 kHz beträgt, was in Wirklichkeit erreicht wurde, ist, dass die

Antwort-Schwingungsform der elektronischen Einrichtung **11**, die mit einer Folgefrequenz von 100 MHz arbeitet, wie dies auf [Fig. 12](#) dargestellt ist, mit Hilfe eines billigen, gewöhnlichen Oszilloskops gemessen werden kann, das in der Lage ist, bei 1 kHz zu messen. Der unmittelbare Vergleich von [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) zeigt, dass sogar die Schwingungseinzelheit in [Fig. 11](#), (das heißt, die Antwort auf einer Zeitachse in der Größenordnung von 300 ps), sehr gut mit der auf [Fig. 12](#) dargestellten übereinstimmt, woraus ersichtlich wird, dass mit einer Vorrichtung, in welche die vorliegende Erfindung implementiert ist, wahrheitsgetreue Messungen durchgeführt werden können.

**[0099]** Das weiter oben erwähnte extrem teure Messinstrument, das verwendet wurde, um die Vergleichsmessungen durchzuführen, ist das am höchsten entwickelte Messinstrument, auf welches das Laboratorium des Erfinders direkten Zugriff hat, und es ist ein Instrument, das in der Lage ist, Schwingungsformen in der Größenordnung von 300 ps zu messen, (dem entspricht eine Frequenz von 3 GHz). Ein Instrument, das in der Lage ist, wahrheitsgetreue Messungen an Impulsen mit kürzerer Periodendauer durchzuführen, ist einfach nicht verfügbar, und selbst wenn es verfügbar wäre, so würde es unvermeidbar ein extrem kompliziertes und teures Messgerät sein. Es ist nicht schwierig, die Folgefrequenz der optischen Impulse in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung auf das 10- bis 100fache der in den vorgenannten Messbeispielen verwendeten 100 MHz zu erhöhen, und mit Hilfe nur einiger weniger, geschickter Modifikationen der Messeinrichtung wird es möglich sein, sie auf das mehr als 1000fache dieses Wertes zu erhöhen. Das heißt, die vorliegende Erfindung macht es möglich, Phänomene zu beobachten, die an einer elektronischen Einrichtung bei Frequenzen oberhalb von 10 GHz oder 100 GHz auftreten, indem ein Messinstrument, zum Beispiel ein ganz normales Synchroskop verwendet wird, das in der Lage ist, Messungen in der Größenordnung von 1 MHz durchzuführen. Anders gesagt heißt dies, dass es offensichtlich ist, dass die vorliegende Erfindung Messungen an Signalformen ermöglicht, in Bereichen, die bisher einer Messung nicht zugänglich waren. Ein Instrument, das in der Lage ist, genaue Beobachtungen des Zustands von Signalen zu ermöglichen, die an Halbleiterbauelementen in solchen Bereichen auftreten, werden in der Zukunft zwangsläufig essentielle Vorrichtungen darstellen, und daraus folgt, dass ein erfindungsgemäßes Messinstrument zu einer extrem nützlichen Vorrichtung auf diesem Gebiet werden wird.

**[0100]** Bei der vorhergehenden Erläuterung wurde, um leicht zu verstehende Messergebnisse zu erhalten, die Frequenz der dem elektronischen Messobjekt **11** zugeführten Triggersignale, bei Verwendung der Schaltung, wie sie auf [Fig. 1b](#) dargestellt ist, auf

100,000 MHz eingestellt, während die Folgefrequenz der optischen Impulsquelle **13** auf genau 100,001 MHz eingestellt wurde. Bei praktischen Messungen können jedoch Messungen, die den oben beschriebenen ähnlich sind, in der Praxis in ausreichendem Maße durchgeführt werden, indem optische Impulse mit einer Folgefrequenz erzeugt werden, die annähernd gleich der charakteristischen Betriebsfrequenz des elektronischen Messobjektes ist. Anders gesagt heißt dies, selbst wenn die Differenz zwischen den beiden Frequenzen ( $\Delta f$ ) nicht genau feststeht, kann eine praktische Messschaltung leicht aufgebaut werden, wenn die Synchronisationsschaltung **20** gemäß [Fig. 1a](#) verwendet wird, um die optische Impulsfrequenz ( $f_p$ ) der optischen Impulsquelle **13** und die Betriebsfrequenz ( $f_d$ ) des elektronischen Messobjektes **11** zu synchronisieren, so dass sie bei der selben Frequenz arbeiten. Alternativ kann eine praktische Messschaltung leicht aufgebaut werden, indem ein getrennter Frequenzgenerator verwendet wird, wie er auf [Fig. 1b](#) dargestellt ist, um die optische Impulsfrequenz ( $f_p$ ) und die Betriebsfrequenz ( $f_d$ ) des elektronischen Messobjektes **11** auf dieselbe Frequenz zu synchronisieren. Falls ein praktisches Messsystem aufgebaut wird, das in dem extrem hohen Frequenzregime arbeiten soll, werden die gemeinsamen Phasen der beiden Frequenzen unvermeidlich nach und nach divergieren, auf Grund von Nebengeräusch, geringen Fluktuationen des Messsystems und anderer Einflüsse. Mit anderen Worten, wenn eine in der Praxis übliche Synchronisationsschaltung **20** oder ein der Praxis üblicher Frequenzgenerator verwendet wird, wird tatsächlich Folgendes passieren, die Folgefrequenz der optischen Impulse und die Betriebsfrequenz des elektronischen Messobjektes werden nach und nach in der Phase auseinanderlaufen (oder die beteiligten Frequenzen werden divergieren), mit dem Resultat, dass Beobachtungen der oben beschriebenen Art in ausreichendem Maße in der Praxis durchgeführt werden können, selbst dann, wenn Schaltungen, welche die Phasen genau synchronisieren und dann nach und nach die Phasen gegeneinander verschieben, nicht speziell bereitgestellt wurden.

**[0101]** Es wird nun ein zweites Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf [Fig. 13](#) erklärt, die ein Blockschaltbild dieses zweiten Ausführungsbeispiels darstellt. In diesem zweiten Ausführungsbeispiel wird auf ähnliche Art und Weise wie in einem gewöhnlichen Rasterkraftmikroskop die Position der Messfühlerspitze **51** detektiert, in Bezug auf die Position des Lichts von der Dauerstrichlaserlichtquelle **27**, nachdem es an der Rückseite des Messfühlerarms **21** reflektiert wurde und mit Hilfe einer Positionsregelvorrichtung geregelt, die den optischen Positionsdetektor **28** einschließt. In diesem Fall können das Positionsregelungssystem und das elektrische Messsystem vollkommen unabhängig voneinander sein. Auf ähnliche Art und Weise wie im ersten

Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, das auf **Fig. 1** dargestellt wurde, kann dieses zweite Ausführungsbeispiel die auf **Fig. 13a** dargestellte Ausführung aufweisen oder die auf **Fig. 13b** dargestellte Ausführung, in Abhängigkeit von den für die Synchronisation der Messzeitablenkung eingesetzten Mitteln.

**[0102]** Es wird nun auf **Fig. 14** Bezug genommen, wo ein drittes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erklärt wird. Wie dies auf **Fig. 14a** dargestellt ist, kann diese Erfindung auf eine elektronische Einheit angewendet werden, wobei diese zum Beispiel ein integrierter Schaltkreis **42** ist, der eine mit einem Messinstrument verbundene Messelektrode **40** aufweist, und wobei das Messobjekt **44** und die Messelektrode **40** über eine optisch aktive Region **46** miteinander verbunden sind, die aus einem optisch aktiven Material hergestellt wurde, das mit dem Messobjekt **44** verbunden ist. Darüber hinaus können, wie dies auf **Fig. 14b** dargestellt ist, selbst wenn keine Messelektrode vorhanden ist, schnelle elektrische Signale im Messobjekt **44** gemessen werden, indem der Messfühler **48** mit der optisch aktiven Region **46** in Kontakt gebracht wird, die aus einem optisch aktiven Material hergestellt wurde, das mit dem Messobjekt **44** verbunden ist.

**[0103]** Der Aufbau eines vierten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung wird nun mit Bezug auf **Fig. 15** erklärt, die ein Blockschaltbild einer Vorrichtung gemäß dieses vierten Ausführungsbeispiels darstellt. Diese konkret vorliegende Vorrichtung ist ein elektronisches Messinstrument, das mit einem Messfühler **2** versehen ist, der ganz dicht an das elektronische Messobjekt herangebracht wird, und das weiterhin einen Strom-Spannungs-Wandler **17**, einen Verstärker **18**, ein Bandpassfilter **19** und ein Oszilloskop **10** aufweist, die zusammen als Mittel zum Messen des Stromes dienen, der in diesem Messfühler **2** fließt.

**[0104]** Die herausragenden Merkmale dieser konkret vorliegenden Vorrichtung sind, dass das optisch aktive Material **12**, das sich in der Messumgebung im nichtleitenden Zustand befindet, zwischen Messfühler **2** und Strom-Spannungs-Wandler **17** eingeschlossen ist, und dass es mit der optischen Impulsquelle **13** ausgestattet ist, als Mittel zum Erzeugen intensiver Lichtimpulse, die dazu dienen, das optisch aktive Material **12** in den leitfähigen Zustand zu versetzen. Das optisch aktive Material **12** kann ein Halbleiter der Gruppe IV, der Gruppe III-V oder der Gruppe II-VI sein. In diesem vierten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist der Messfühler **2** in seiner Gesamtheit als eine Messfühlerspitze aufgebaut.

**[0105]** Die oben erwähnten Lichtimpulse sind periodische Lichtimpulse, und in **Fig. 15a** werden die optische Impulsquelle **13** und die Stromversorgung **5** mit Hilfe der Synchronisationsschaltung **20** synchroni-

siert, wogegen auf **Fig. 15b** Mittel vorhanden sind, um die Messzeitablenkung des Oszilloskops **10** mit der optischen Impulsquelle **13** zu synchronisieren. Die von der optischen Impulsquelle **13** erzeugten optischen Impulse werden mit Hilfe einer Lichtleitfaser **22** von Linse **14** auf das optisch aktive Material **12** gestrahlt.

**[0106]** Messfühler **2** ist auf dem Aktuator **16** installiert und das elektronische Messobjekt liegt auf Aktuator **16'** auf. Der Abstand zwischen diesen beiden Aktuatoren **16** und **16'** wird mit Hilfe des Positionsreglers **15** auf einen voreingestellten Wert geregelt.

**[0107]** In diesem vierten Ausführungsbeispiel der Erfindung kann die Mischfrequenzkomponente zwischen den optischen Impulsen, welche das elektronische Messobjekt **11** bestrahlen und der dem elektronischen Messobjekt zugeführten Wechselspannung extrahiert werden, indem die Frequenz der optischen Impulse und der Wechselspannung variiert wird. Dies stellt nichts anderes dar als eine Abtastung. Demgemäß ist es möglich, falls ein schnelles Wechselspannungssignal gemessen werden soll, die Messung mit Hilfe der oben erwähnten Abtastung durchzuführen, vorausgesetzt, dass ultraschnelle optische Impulse verwendet werden. Mit dieser konkret vorliegenden Vorrichtung kann eine schnelle Abtastung, wie sie bisher mit Hilfe elektronischer Messverfahren nicht möglich war, einfach bewerkstelligt werden. Der industrielle Nutzen ist extrem hoch.

**[0108]** Dieses vierte Ausführungsbeispiel der Erfindung wurde im Zusammenhang mit Fällen beschrieben, bei denen als Messfühler **2** Metall und eine Halbleiterscheibe (Wafer) als elektronisches Messobjekt **11** verwendet wurde. Ähnliche Ergebnisse erhielt man jedoch auch im entgegengesetzten Fall, nämlich, wenn als Messfühler **2** ein Halbleiter und als elektronisches Messobjekt **11** Metall und/oder ein Halbleiter verwendet wurde. Darüber hinaus umfasst die Region, in welcher ein Tunnelstrom erzeugt wird, nur eine winzige Fläche und deshalb erzielte man gute Ergebnisse selbst dann, wenn das Messobjekt ein extrem kleines Muster aufwies. Dabei ist auch zu vermerken, dass das Führungssystem hinreichend schnell war, sogar dann, wenn die Impulsbreiten der verwendeten optischen Impulse im Pikosekundenbereich oder Sub-Pikosekundenbereich lagen. Annähernd dieselben Ergebnisse erhielt man, wenn ein Halbleiter der Gruppe II-VI verwendet wurde. Obwohl dieses vierte Ausführungsbeispiel der Erfindung im Zusammenhang mit Halbleitern vom quasiisolierenden Typ dargestellt wurde, ließ sich ein ähnlicher Effekt erzielen (wenn auch die Empfindlichkeit etwas geringer war), wenn Halbleiter vom p-Typ oder vom n-Typ verwendet wurden.

**[0109]** Es wird nun ein fünftes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf **Fig. 16** er-



klärt, die ein Blockschaltbild dieses fünften Ausführungsbeispiels darstellt. In diesem fünften Ausführungsbeispiel wird auf ähnliche Art und Weise wie in einem gewöhnlichen Rasterkraftmikroskop die Position der Messfühlerspitze **51** detektiert, in Bezug auf die Position des Lichts von der Dauerstrichlaserlichtquelle **27**, nachdem es an der Rückseite des Messfühlerarms **21** reflektiert wurde und mit Hilfe einer Positionsregeleinrichtung geregelt, die den optischen Positionsdetektor **28** einschließt. In diesem Fall können das Positionsregelungssystem und das elektrische Messsystem vollkommen unabhängig voneinander sein. Auf ähnliche Art und Weise wie im vierten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, das auf [Fig. 15](#) dargestellt wurde, kann dieses fünfte Ausführungsbeispiel die auf [Fig. 16a](#) dargestellte Ausführung aufweisen oder die auf [Fig. 16b](#) dargestellte Ausführung, in Abhängigkeit von den für die Synchronisation der Messzeitablenkung eingesetzten Mitteln.

**[0110]** Der Aufbau eines sechsten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung wird nun mit Bezug auf [Fig. 17](#) erklärt, die eine perspektivische Ansicht dieses sechsten Ausführungsbeispiels darstellt. Dieses Ausführungsbeispiel verfügt über eine Messfühlerspitze **51** aus Metall, die ganz dicht an das Messobjekt herangebracht wird, wobei der Messfühler **2** an das elektrische Messinstrument **60** das elektrische Potential des Punktes überträgt, in dessen unmittelbarer Nachbarschaft sich die Messfühlerspitze **51** befindet.

**[0111]** Die herausragenden Merkmale dieses Ausführungsbeispiels liegen darin, dass das optisch aktive Material **53** zwischen Messfühlerspitze **51** und einem elektrischen Leitungspfad **59**, der am Messfühlerarm **21** vorgesehen ist, der in dem elektrischen Messinstrument **60** endet, eingefügt ist, und darin, dass ein optischer Wellenleiter **54** vorgesehen ist, der Licht zu dem optisch aktiven Material **53** leitet.

**[0112]** Nachfolgend wird nun die Arbeitsweise dieses sechsten Ausführungsbeispiels der Erfindung erläutert. Das optisch aktive Material **53** besteht aus einem Halbleiter der Gruppe IV, Gruppe III-V oder Gruppe II-VI, und ein elektrischer Strom kann durch dieses Material fließen, solange es mit Licht bestrahlt wird. In den anderen Zeitabschnitten wird das Material nichtleitend. Wenn kein Licht auf das Material trifft, ist das auf [Fig. 17](#) schraffiert dargestellte optisch aktive Material **53** nichtleitend, dies hat zur Folge, dass die Messfühlerspitze **51** von dem elektrischen Pfad **59** isoliert ist. Wenn Licht auf das Material trifft, wird das optisch aktive Material **53** leitend und mit Hilfe des elektrischen Messgerätes **60** kann die Abtastung durchgeführt werden. Obwohl in diesem sechsten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung für den elektrischen Pfad **59** Metall verwendet wurde, ist es auch möglich, einen Metallfilm auf die Oberfläche eines Halbleiters oder eines Isolier-

stoffs aufzubringen.

**[0113]** Nachfolgend wird nun ein siebentes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf [Fig. 18](#) erläutert, die eine perspektivische Ansicht dieses siebenten Ausführungsbeispiels darstellt. In diesem siebenten Ausführungsbeispiel wird eine Messfühlerspitze **51'** verwendet, die aus einem optisch aktiven Material ausgebildet ist, und nicht aus Metall. Die Messfühlerspitze **51'** wird mit Hilfe der reflektierenden Oberfläche **55**, die am Ende des optischen Wellenleiters **54**, der wiederum am Messfühlerarm **21** vorgesehen ist, mit optischen Impulsen bestrahlt. Dieses siebente Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erfordert weniger Bauelemente als das sechste Ausführungsbeispiel.

**[0114]** Nachfolgend werden nun ein achttes und ein neuntes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf [Fig. 19](#) und [Fig. 20](#) erläutert, welche die entsprechenden Aufbauten zeigen. Im achten Ausführungsbeispiel wird, wie dies auf [Fig. 19](#) dargestellt ist, der Kern des Lichtwellenleiters **56** als optischer Wellenleiter **54** verwendet und am Ende dieses Wellenleiters ist die Messfühlerspitze **51'** vorgesehen, die aus einem optisch aktiven Material besteht. Die Peripherie des Lichtwellenleiters **56** ist mit Metall überzogen, und dieser Metallüberzug bildet den elektrischen Pfad **52**. Dieses Ausführungsbeispiel weist noch weniger Bauteile auf, als das sechste oder das siebente Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

**[0115]** Im neunten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist, wie dies auf [Fig. 20](#) dargestellt ist, das optisch aktive Material **53** zwischen der metallenen Messfühlerspitze **51** und dem optischen Wellenleiter **54** eingebracht. Obwohl der Gesamtaufbau dieses Ausführungsbeispiels derselbe wie der des achten Ausführungsbeispiels ist, wird die Messfühlerspitze **51** bei Messobjekten verwendet, für die eine metallene Spitze geeignet ist.

**[0116]** Nachfolgend wird nun ein zehntes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf [Fig. 21](#) erläutert, die eine perspektivische Ansicht dieses zehnten Ausführungsbeispiels darstellt. Der elektrische Pfad **52** ist mit der metallenen Messfühlerspitze **51** verbunden, dieser elektrische Pfad ist am Messfühlerarm **21** vorgesehen und er weist ein optisch aktives Material **53** auf, das in einer Zwischenposition eingebracht ist. Darüber hinaus wird parallel zum elektrischen Pfad **52** der optische Wellenleiter **54** bereitgestellt. Dieses zehnte Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung weist die Vorteile auf, dass die Gestalt des optisch aktiven Materials **53** eine leicht herstellbare Form, wie zum Beispiel die Form eines Würfels haben kann, und dass, weil es an den unterschiedlichsten Stellen angebracht werden kann, was den Entwurf des Messfühlers betrifft, ein

hoher Grad an Freiheit existiert.

**[0117]** Nachfolgend wird nun ein elftes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf [Fig. 22](#) erläutert, die den Aufbau dieses elften Ausführungsbeispiels zeigt. Die Messfühlerspitze **51'** besteht aus einem optisch aktiven Material und ist mit dem Lichtwellenleiter **56** verbunden, der an seiner Peripherie einen metallenen Überzug aufweist. Dies ist genau so wie in dem im zuvor erläuterten achten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Der Lichtwellenleiter **56** dient als optischer Wellenleiter **54**, und er kann mit der Kopplungsoberfläche **64** frei verbunden und von dieser gelöst werden. Der elektrische Pfad **52**, der einen metallenen Überzug um die Peripherie des Lichtwellenleiters **56** umfasst, kontaktiert die leitfähige Lichtwellenleiterhalterung **70**, und diese leitfähige Lichtwellenleiterhalterung **70** ist mit dem elektrischen Messinstrument **60** verbunden. Die leitfähige Lichtwellenleiterhalterung **70** wird von einem Isolator **62** gehalten, der aus Ethylentetrafluoridharz besteht. Dieser Isolator **62** ist mit dem röhrenförmigen piezoelektrischen Element **61** verbunden. Auf diese Art und Weise bilden die Messfühlerspitze **51'** und der metallüberzogene Lichtwellenleiter **56** ein im Ganzen austauschbares Bauelement, und bei auftretendem Verschleiß muss lediglich dieses Bauelement ausgetauscht werden. Darüber hinaus kann, wenn man Messfühlerspitzen **51'** unterschiedlicher Gestalt gebrauchsfertig bereithält, die Messfühlerspitze in Übereinstimmung mit dem Messobjekt ausgetauscht werden.

**[0118]** Als nächstes wird mit Bezug auf [Fig. 23](#) beispielhaft erklärt, wie ein optischer Impuls in einen Messfühler eingekoppelt wird. Der Messfühler **2** wird von einer Führung **58** zum Befestigen des Messfühlers gehalten, wie dies auf [Fig. 23](#) dargestellt ist. Obwohl der Wirkungsgrad der Einkopplung vom Lichtwellenleiter **56** in den optischen Wellenleiter **54**, der am Messfühlerarm **21** angebracht ist, relativ gering ist, stellt dies kein Hindernis dar, und durch Polieren der Spitze des Lichtwellenleiters **56** bis auf einen Punkt, wodurch dieser Wirkungsgrad erhöht wird, ist eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit erreichbar. Derselbe Effekt kann durch Verwendung einer Linse erzielt werden.

**[0119]** Der Aufbau eines zwölften Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung wird nun mit Bezug auf [Fig. 24](#) erläutert, die ein Blockschaltbild einer Vorrichtung gemäß dieses zwölften Ausführungsbeispiels darstellt. Diese Vorrichtung ist ein Rasterkraftmikroskop, das versehen ist mit: einem Messfühlerarm **21**; einer Messfühlerspitze **51**, die an diesem Messfühlerarm **21** befestigt ist und die ganz dicht an das Messobjekt **1** herangebracht wird; einer optischen Impulsquelle **13**, welche diesen Messfühlerarm **21** mit Licht bestrahlt; einer Messfühlerpositionserkennung **74**, welche die Position der Messfühler-

spitze **51** mit Hilfe des vom Messfühlerarm **21** reflektierten Lichtes detektiert; und einer Messfühlerpositionsregelschaltung **75**, welche die relativen Positionen der Messfühlerspitze **51** und des Messobjekts **1** regelt.

**[0120]** Die herausragenden Merkmale dieser Vorrichtung sind, dass zumindest ein Teil des Messfühlerarms **21** und der Messfühlerspitze **51** aus einem optisch aktiven Material geformt sind, das in der Messumgebung nichtleitend ist, das jedoch im Ergebnis einer Bestrahlung mit Licht Leitfähigkeit zeigt; und dass es über Mittel verfügt, welche Licht von einer optischen Impulslichtquelle **13** in dieses optisch aktive Material einkoppeln; und dass es ein elektrisches Messinstrument **60** aufweist, das den Strom oder das Potential zwischen Messfühlerspitze **51** und Messobjekt **1** detektiert. In diesem zwölften Ausführungsbeispiel ist die Messfühlerspitze **51** aus einem optisch aktiven Material geformt, der Messfühlerarm **21** ist aus einem leitfähigen Material geformt und dieser Messfühlerarm **21** ist elektrisch mit dem elektrischen Messinstrument **60** verbunden. Zusätzlich enthält das zuvor erwähnte Mittel, welches Licht einkoppelt, einen halbdurchlässigen Spiegel, der am Ende des Messfühlerarms **21** vorgesehen ist, und die Messfühlerspitze **51** ist an der Stelle angeordnet, wo das Licht, das durch diesen halbdurchlässigen Spiegel hindurchtritt, auftrifft.

**[0121]** Nachfolgend wird die Arbeitsweise einer Vorrichtung gemäß dieses zwölften Ausführungsbeispiels erklärt. Die Messfühler-Positionsvorgabeschaltung **84** bewirkt, dass die Messfühlerspitze **51** an einer vorgegebenen Stelle ganz dicht an das Messobjekt **1** herangebracht wird, in Übereinstimmung mit einer Eingabe durch die Bedienperson. Nun liegt der Zweck dieses zwölften Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung in der elektrischen Messung einer elektronischen Einrichtung (das heißt, das Messobjekt **1** ist eine elektronische Einrichtung). Demgemäß kann die Messfühlerspitze **51** auch ganz dicht an eine gewünschte Position am Messobjekt **1** herangebracht werden, indem die Messfühlerpositionserkennung **74** erkennt, ob die Messfühlerspitze **51** dem konvexen Bereich folgt, der mit einer gewünschten Verdrahtungsposition auf der elektronischen Einrichtung korrespondiert, das Ausgangssignal dieser Messfühlerpositionserkennung **74** der Messfühlerpositionsvorgabe **84** als Eingangssignal zugeführt wird und bewirkt wird, dass die Messfühlerpositionsregelung **75** das piezoelektrische Element **83** ansteuert.

**[0122]** Die Messfühlerspitze **51**, die auf diese Art und Weise ganz dicht an eine gewünschte Position herangeführt wurde, ist selbst elektrisch nichtleitend, und folglich hat sie elektrisch keinerlei Einfluss auf die Betriebskennwerte der elektronischen Einrichtung, die als Messobjekt **1** fungiert. An diesem Punkt



wird der Strom an der Messstelle, die sich ganz dicht an der Messfühlerspitze **51** befindet, dann, wenn das optisch aktive Material, welches die Messfühlerspitze **51** bildet, durch Bestrahlen mit Licht aus der optischen Impulslichtquelle **13** elektrisch leitend wird, zur Messfühlerspitze **51** fließen. Das elektrische Messinstrument **60** wird dies messen, mit dem Resultat, dass an der elektronischen Einrichtung elektrische Messungen durchgeführt werden können. Eine optische Abtastung in Übereinstimmung mit der Periode der Impulse aus der optischen Impulsquelle **13** kann ebenfalls durchgeführt werden.

**[0123]** Nachfolgend wird der in diesem zwölften Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung verwendete Messfühler mit Bezug auf **Fig. 25** beschrieben, auf welcher der Aufbau des Messfühlers dargestellt ist. Der Messfühlerarm **21** besteht aus Metall. Wie auf **Fig. 25a** dargestellt, ist die Spitze des Messfühlerarms **21** als halbdurchlässiger Spiegel **86** ausgeführt. Die eine Hälfte des Lichts von der optischen Impulsquelle **13** wird reflektiert, und die andere Hälfte bestrahlt die Messfühlerspitze **51**. Weil die Messfühlerspitze **51** aus einem optisch aktiven Material besteht, wird sie infolge der Bestrahlung mit Licht elektrisch leitend. Das in diesem zwölften Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung verwendete optisch aktive Material ist ein Halbleiter der Gruppe IV. Halbleiter der Gruppe III-V und der Gruppe II-VI können ebenfalls verwendet werden. Das Messobjekt war ein Halbleiterbauelement. Für den halbdurchlässigen Spiegel **86** wurde die Oberfläche einer dünnen Metallfolie als Spiegelfläche verwendet. Es ist auch möglich, eine dielektrische Mehrlagenfolie anstelle einer Metallfolie zu verwenden.

**[0124]** Das Messobjekt **1** wird mit Hilfe einer Mikro-Positionsregeleinrichtung bewegt, und die Messfühlerspitze **51** wird an der gewünschten Stelle auf dem Messobjekt platziert. Zu diesem Zeitpunkt ist die Messfühlerspitze **51** nichtleitend, weil keine optischen Impulse auf die Messfühlerspitze **51** strahlen. Anschließend werden von der optischen Impulsquelle **13** optische Impulse geliefert. Ein Teil des Lichts, das auf den halbdurchlässigen Spiegel **86** trifft, tritt durch diesen hindurch und bestrahlt die Messfühlerspitze **51**. Der restliche Teil wird reflektiert und fällt auf den Photoempfänger **81**, woraufhin die Position der Messfühlerspitze **51** erkannt wird. Das optisch aktive Material, das die Messfühlerspitze **51** bildet, wird auf Grund der Bestrahlung der Messfühlerspitze mit Licht, leitend. Unter diesen Umständen wird der Strom an der gewünschten Position auf dem Halbleiterbauelement, welches das Messobjekt darstellt, über die Messfühlerspitze **51** in den Messfühlerarm **21** fließen, der aus einem leitfähigen Metall besteht und mit Hilfe des elektrischen Messinstruments **60** gemessen. Deshalb können elektrische Signale in Intervallen abgetastet werden, die mit der Emission aufeinander folgender optischer Impulse korrespon-

dieren. Während der Zeitdauer, in der kein optischer Impuls auf die Messfühlerspitze **51** trifft, ist die Messfühlerspitze elektrisch nichtleitend und übt auf das Messobjekt **1** keinen elektrischen Einfluss aus. Deshalb kann man hoch zuverlässige Messergebnisse erhalten.

**[0125]** Wie dies auf **Fig. 25b** dargestellt ist, ist es auch möglich, die Messfühlerspitze **51** aus Metall herzustellen und ein optisch aktives Material als Zwischenstück **87** zwischen dieser Messfühlerspitze **51** und dem halbdurchlässigen Spiegel **86** einzufügen.

**[0126]** Nachfolgend wird ein dreizehntes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf **Fig. 26** erklärt, welche den Aufbau des Messfühlers **2** in diesem dreizehnten Ausführungsbeispiel zeigt. Ein optisch aktives Material wird als reflektierende Oberfläche **88** an der Stelle eingesetzt, an der im zwölften Ausführungsbeispiel der halbdurchlässige Spiegel **86** vorgesehen war. In diesem dreizehnten Ausführungsbeispiel wird die Messfühlerspitze **51** aus Metall geformt. Wenn das optisch aktive Material, das die reflektierende Oberfläche **88** bildet, mit Licht aus der optischen Impulsquelle **13** bestrahlt wird, geht es in den leitfähigen Zustand über, worauf die Messfühlerspitze **51** elektrisch mit dem elektrischen Pfad **52** verbunden wird.

**[0127]** Nachfolgend wird ein vierzehntes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung mit Bezug auf **Fig. 27** erklärt, welche den Aufbau des Messfühlers **2** in diesem vierzehnten Ausführungsbeispiel zeigt. In diesem vierzehnten Ausführungsbeispiel ist der Messfühlerarm **21** aus einem Ethylentetrafluoridharz oder einem anderen Isolator geformt, und auf diesem ist der elektrische Pfad **59** aufgebracht. Die aus einem optisch aktiven Material gebildete reflektierende Oberfläche **88** ist in diesen elektrischen Pfad eingefügt. Die Arbeitsweise dieses Ausführungsbeispiels ist dieselbe, wie im dreizehnten Ausführungsbeispiel, weil die reflektierende Oberfläche **88** jedoch an jeder beliebigen, gewünschten Position auf dem Messfühlerarm **21** angebracht werden kann, hat dieses Ausführungsbeispiel den Vorteil eines größeren Freiheitsgrades beim Entwurf des Messfühlerarms **21**.

**[0128]** Wie nunmehr ausgeführt wurde, ist der wirtschaftliche Nutzen dieser Erfindung extrem hoch und schließt die Fähigkeit ein, schnelle elektrische Schwingungsformen in Echtzeit abzutasten, was mit den auf der herkömmlichen elektronischen Messtechnik beruhenden Verfahren bisher unmöglich war, dazu kommt noch die Fähigkeit, ein Messinstrument mit extrem hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zur Verfügung zu stellen. Die Vorteile dieses Verfahrens können wie folgt aufgelistet werden:

1. zeitliche Auflösung im Sub-Pikosekundenbereich,

2. räumliche Auflösung im Nanometerbereich,
3. keine Kreuzkopplung
4. kontaktlose Messungen sind möglich,
5. Messungen können ohne Herausführen des Messsignals durchgeführt werden,
6. weil die zahlreichen mikroskopischen Funktionen von Raster-Tunnelmikroskopen, Rasterkraftmikroskopen und ähnlichen Einrichtungen (zum Beispiel der Regelungsfunktionen) in dieser Erfindung ohne Modifikationen eingesetzt werden können, ist es möglich, die Probenoberfläche und die Position der Messfühlerspitze mit höchster Auflösung zu beobachten,
7. der Absolutwert des Signalpotentials kann gemessen werden,
8. Messungen können entweder an der Luft oder unter Vakuum durchgeführt werden.

## Patentansprüche

1. Elektrisches Messinstrument mit einem Messfühler (2), der im Betrieb ganz dicht an ein elektronisches Messobjekt (1) herangeführt wird, und mit Mitteln (7, 10), die mit Hilfe des Messfühlers (2) elektrischen Strom messen, **dadurch gekennzeichnet**, dass:  
 der Messfühler (2) optisch aktives Material enthält, und das Messinstrument umfasst:  
 eine optische Impulsquelle (3, 4), die den Messfühler (2) durch Erzeugen von Lichtimpulsen einer voreingestellten Impulsfrequenz aktiviert, wodurch die Leitfähigkeit des optisch aktiven Materials des Messfühlers (2) bei der voreingestellten Folgefrequenz verändert wird,  
 eine Positionsregeleinrichtung (6, 7, 8, 9), mit der die Position des Messfühlers (2) relativ zum elektronischen Messobjekt (1) in Übereinstimmung mit einer relativ niederfrequenten Komponente eines Tunnelstromes geregelt wird, der zwischen dem Messfühler (2) und dem elektronischen Messobjekt (1) fließt, und Messmittel (7, 10) zum Ausführen von Messungen an dem elektronischen Messobjekt (1), durch Nutzung einer relativ hochfrequenten Komponente des Tunnelstromes.

**[0129]** Die vorliegende Erfindung kann auch als integrierte Halbleiterschaltung ausgeführt werden, die über eine, mit einem Messinstrument verbundene Messelektrode verfügt, wobei ein Messobjekt und die zuvor erwähnte Messelektrode über ein optisch aktives Material miteinander verbunden werden. Falls ein Ausführungsbeispiel dieser Art bei einer elektronischen Einrichtung angewandt wird, lassen sich mit einem herkömmlichen Messinstrument dieselben elektrischen Messungen durchführen, wie mit einer erfindungsgemäßen Einrichtung.

2. Elektrisches Messinstrument nach Anspruch 1, mit Anregungsmitteln (25), die während des Betriebs das elektronische Messobjekt (1) anregen, der Tunnelstromfluss zwischen dem elektronischen Messobjekt (1) und den Messmitteln (7, 30, 32) tritt bei einer Mischfrequenz auf, die von den Anregungsmitteln (25) und der optischen Impulsquelle (3, 4) bestimmt wird, die den Messfühler (2) anregt, die Positionsregeleinrichtung (6, 7, 8, 9) regelt während des Betriebs die Position des Messfühlers (2) relativ zum elektronischen Messobjekt (1), in Übereinstimmung mit einer niederfrequenten Komponente, die vom mischfrequenten Tunnelstrom abgeleitet wird, und die Messmittel (7, 30, 32) führen während des Betriebs Messungen am elektronischen Messobjekt (1) durch, unter Verwendung einer relativ hochfrequenten Komponente, die vom mischfrequenten Tunnelstrom abgeleitet wird.

**[0130]** Die vorliegende Erfindung erfüllt das Bedürfnis, an jeder beliebigen Messstelle oder in einem integrierten Schaltkreis, an schnellen elektrischen Schwingungsformen zeitlich und räumlich hochauflösende Messungen durchführen zu können. Sie kann bei noch schnelleren und noch kleineren Messobjekten eingesetzt werden und stellt einen kostengünstigen Messfühler für ein schnelleres und zuverlässigeres elektrisches Messinstrument bereit. Sie kann auch ein Rasterkraftmikroskop als ein zuverlässigeres schnelles elektrisches Messverfahren und Messinstrument zur Verfügung stellen. Weil ein Rasterkraftmikroskop gemäß der vorliegenden Erfindung so aufgebaut ist, dass ein Teil Lichts, das zur Erkennung der Position der Messfühlerspitze benutzt wird, ein optisch aktives Material bestrahlt, ist der Einsatz eines zusätzlichen optischen Systems nicht erforderlich, um das optisch aktive Material in den leitfähigen Zustand zu versetzen. Auf diese Art und Weise erhält man ein billiges und hochzuverlässiges Rasterkraftmikroskop, ohne den essentiellen Betrieb eines Rasterkraftmikroskops zu stören.

3. Elektrisches Messinstrument nach Anspruch 1 oder 2, wobei die die Messmittel (7, 30, 32) ein Filter (32) einschließen, zum Wählen der Tunnelstromfrequenz, die beim Durchführen der Messungen am elektronischen Messobjekt (1) benutzt wird.

**[0131]** Die vorliegende Erfindung macht ein elektrooptisches Messinstrument möglich, das in der Lage ist, mit Hilfe eines einfachen Aufbaus eine hochpräzise Positionsregelung zu erzielen.

4. Elektrisches Messinstrument nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Positionsregeleinrichtung (6, 7, 8, 9) während des Betriebs die Position des Messfühlers (2) relativ zum elektronischen Messobjekt (1) in Übereinstimmung mit dem Mittelwert des Tunnelstromes regelt.

5. Elektrisches Messinstrument nach Anspruch 4, wobei die Positionsregeleinrichtung (**6, 7, 8, 9**) die Position des Messfühlers (**2**) relativ zum elektronischen Messobjekt (**1**) regelt, indem sie den Mittelwert des Tunnelstromes konstant hält.

6. Elektrisches Messinstrument nach einem der Ansprüche 1 bis 5, das Schaltmittel (**2, 3, 4**) aufweist, die während des Betriebs einen leitfähigen Pfad zwischen dem elektrischen Messinstrument und dem elektronischen Messobjekt (**1**) zur Verfügung stellen, wenn die Schaltmittel aktiviert sind.

7. Elektrisches Messinstrument nach Anspruch 6, wobei die Schaltmittel (**2, 3, 4**) den Messfühler (**2**) und die optische Impulsquelle (**3, 4**) einschließen, die während des Betriebs so positioniert sind, dass sie den Messfühler (**2**) aktivieren.

8. Elektrisches Messinstrument nach Anspruch 1, wobei ein Positionsregler (**15**) sowohl die Position des Messfühlers (**2**) als auch die Position des elektronischen Messobjektes (**1**) regelt.

Es folgen 19 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

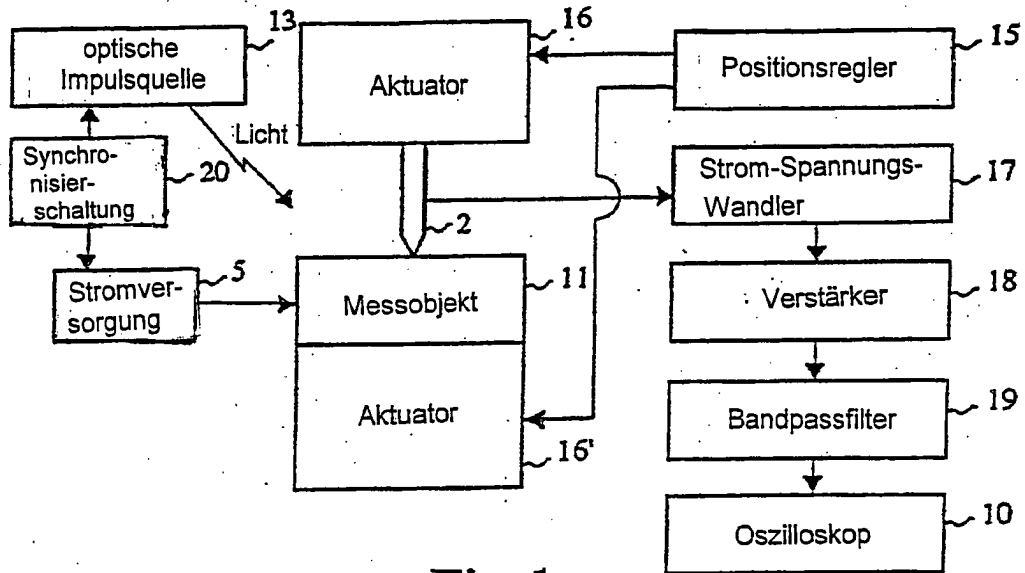


Fig. 1a

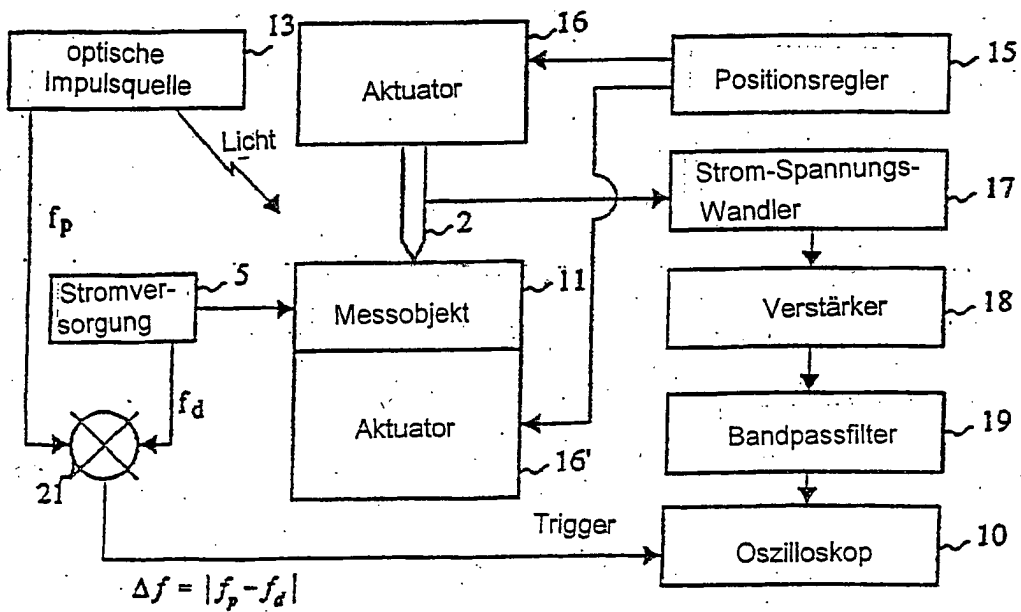


Fig. 1b

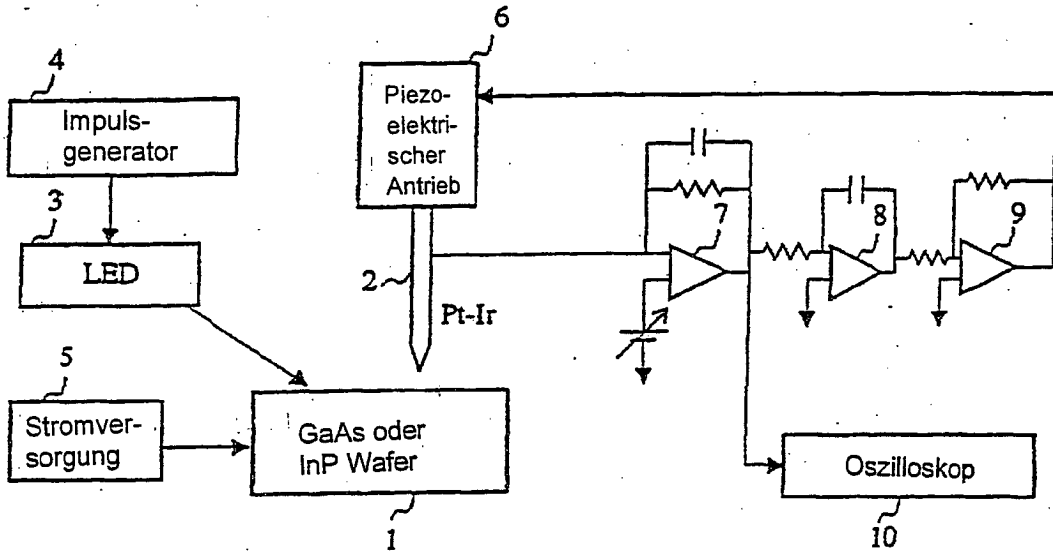


Fig.2

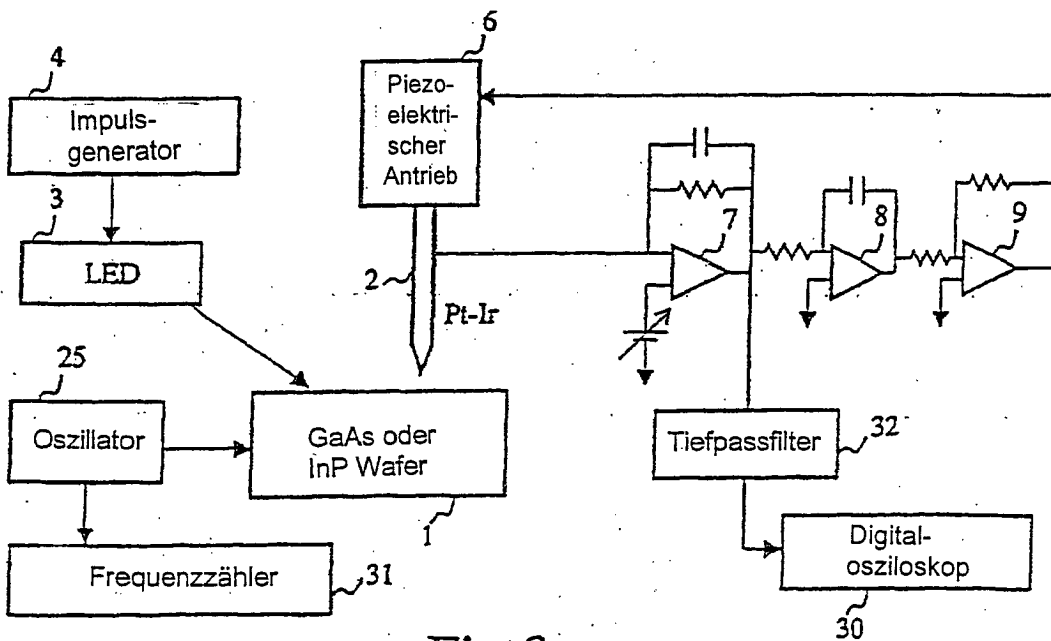


Fig.3

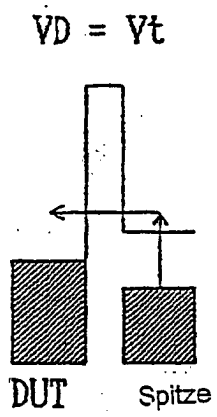


Fig.4a

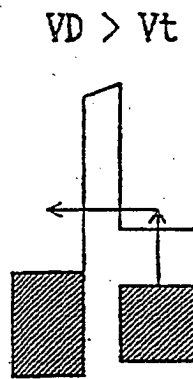


Fig.4b

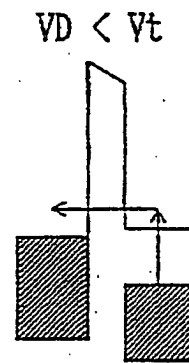


Fig.4c



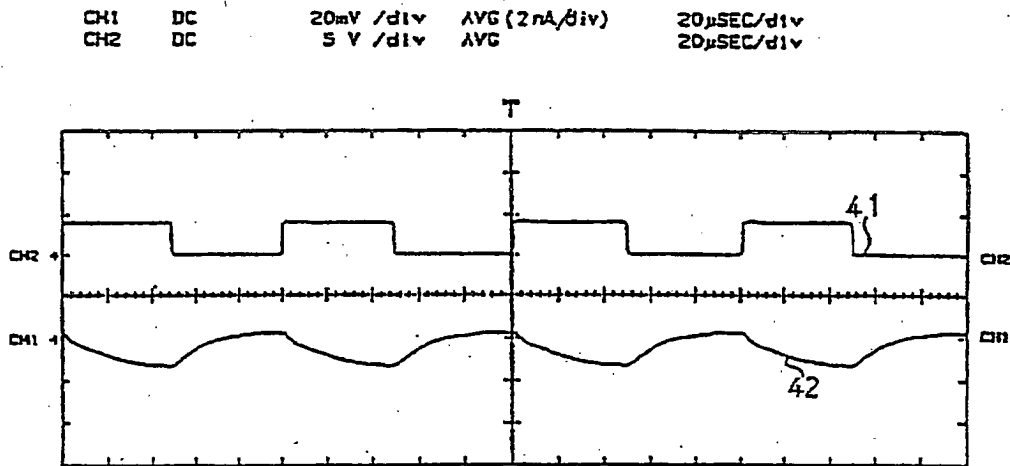


Fig.5

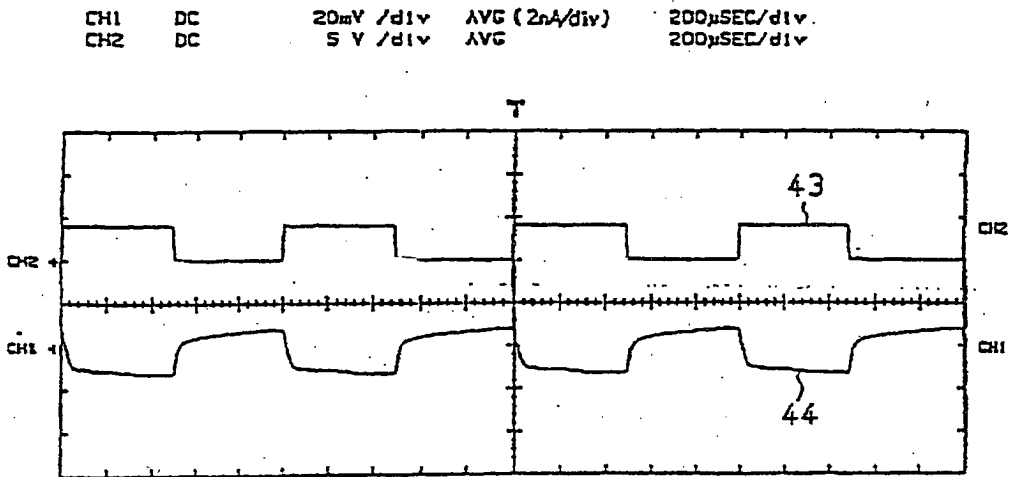


Fig.6

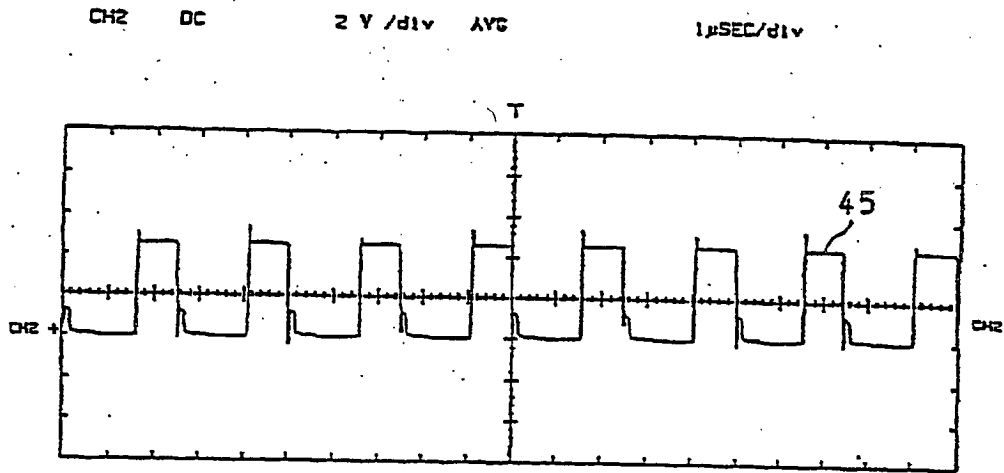


Fig.7

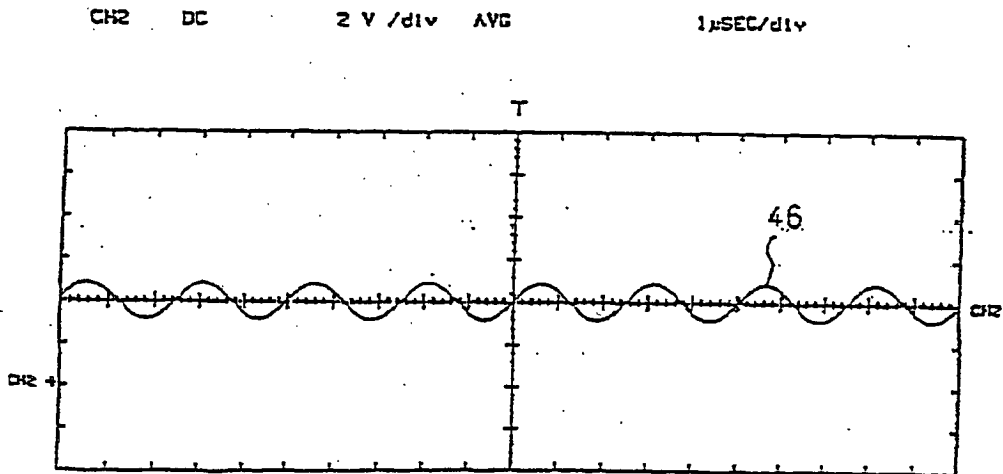


Fig.8

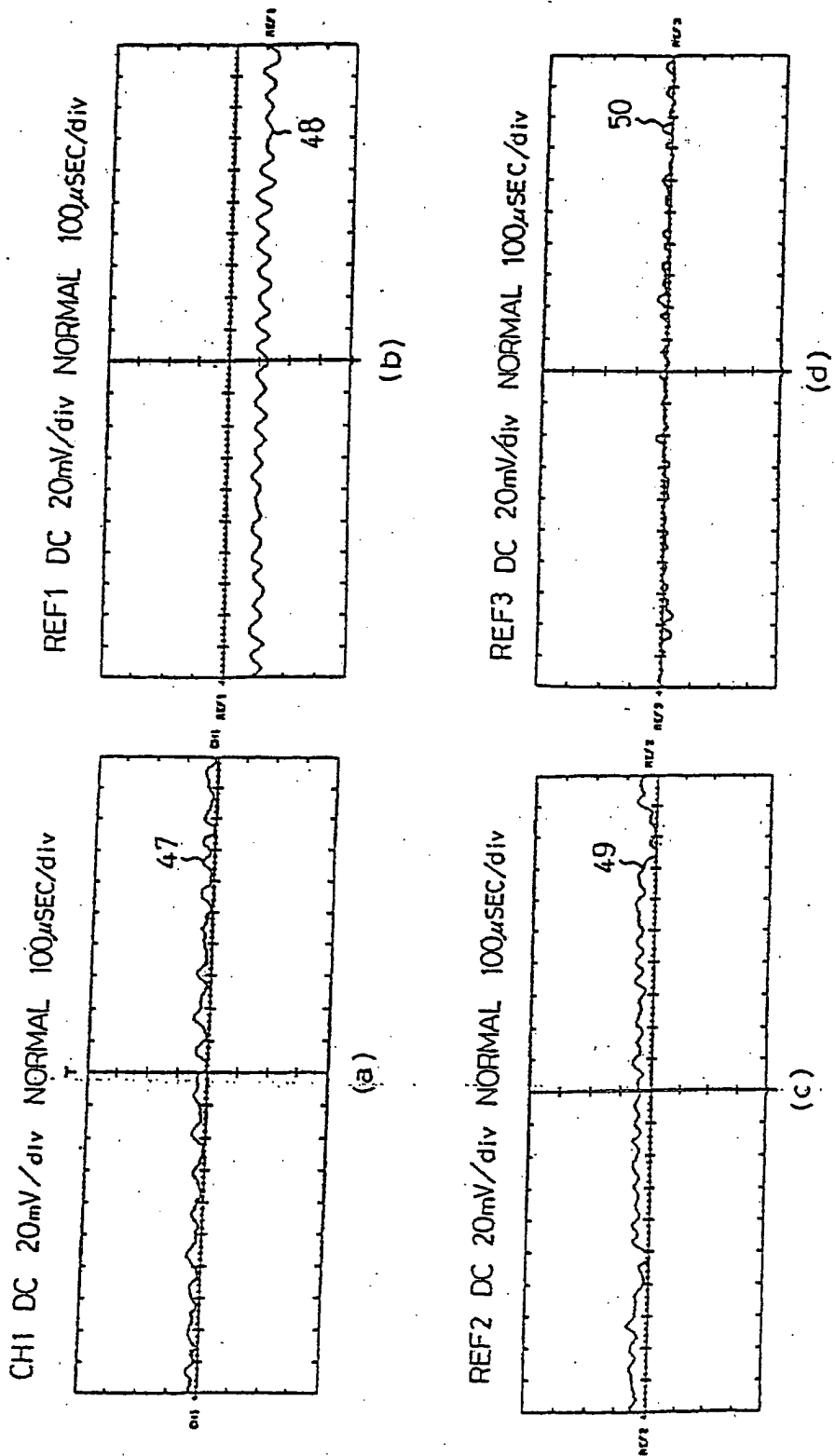


Fig.9

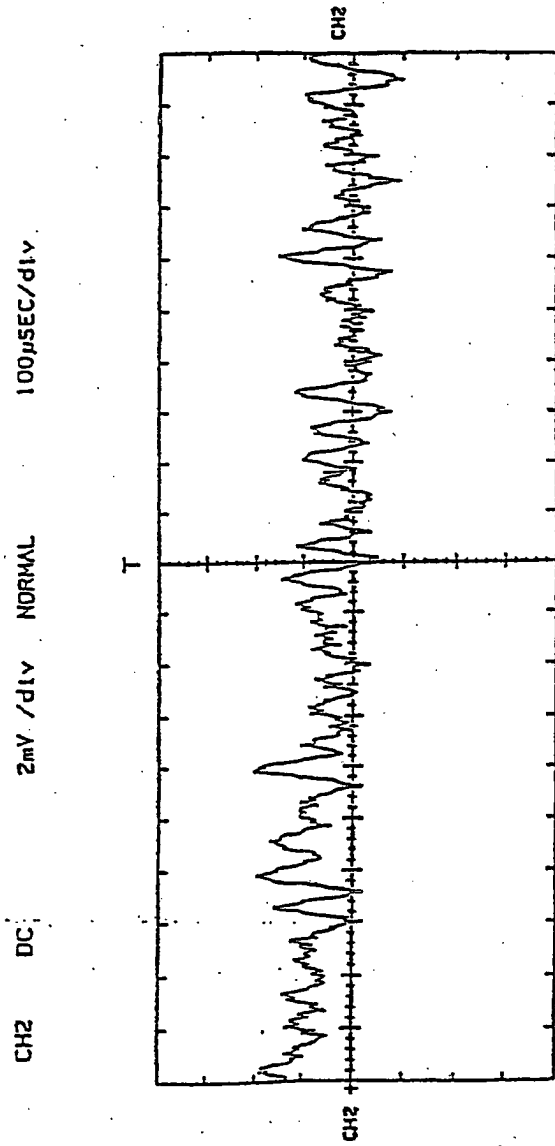


Fig.10

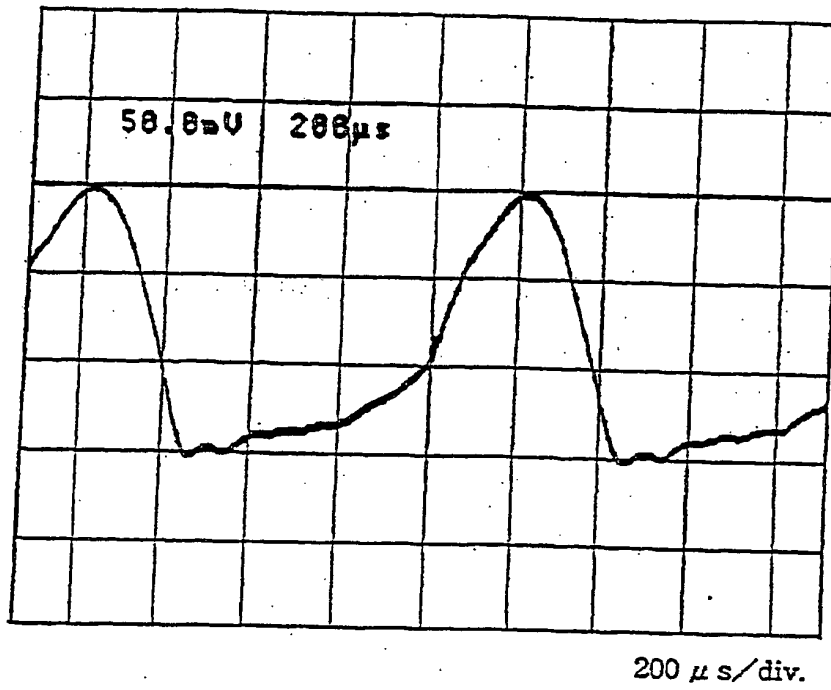


Fig.11

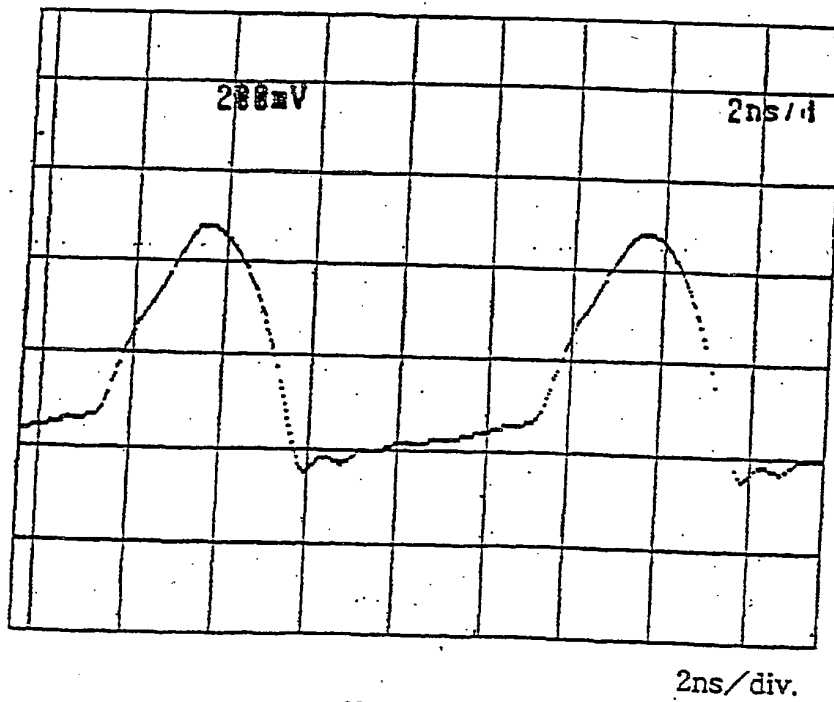


Fig.12

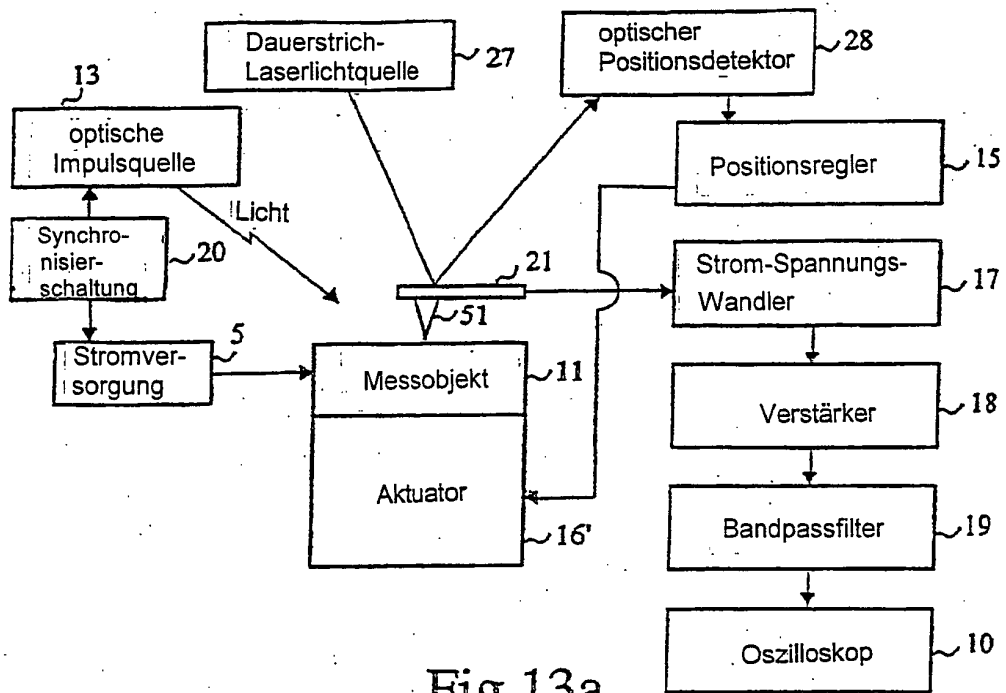


Fig.13a

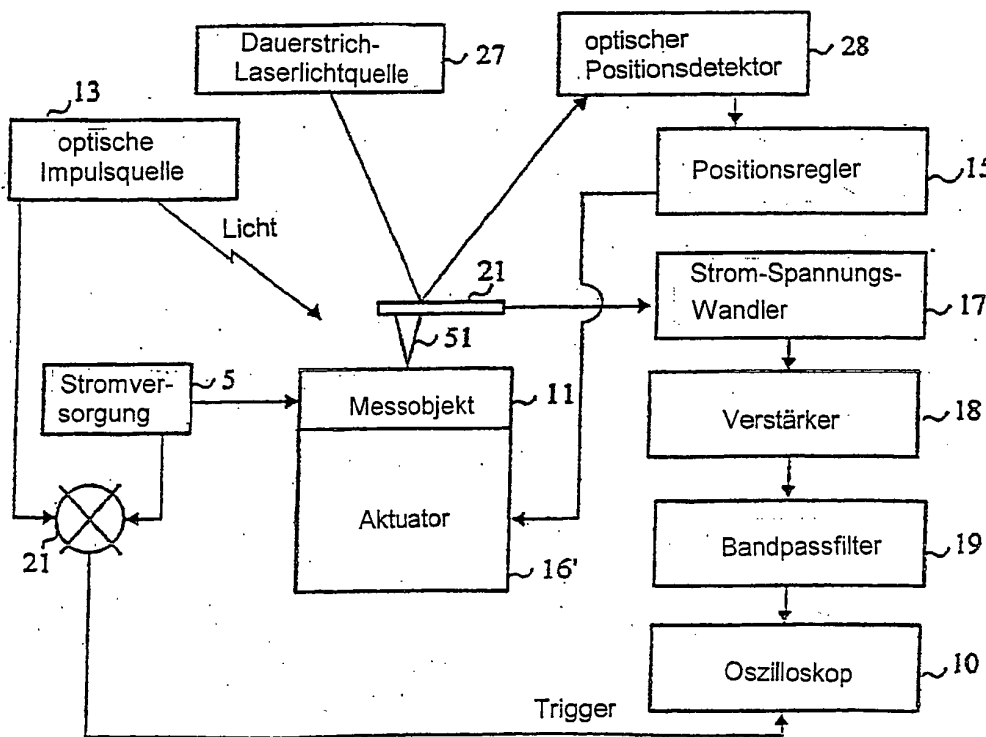


Fig.13b



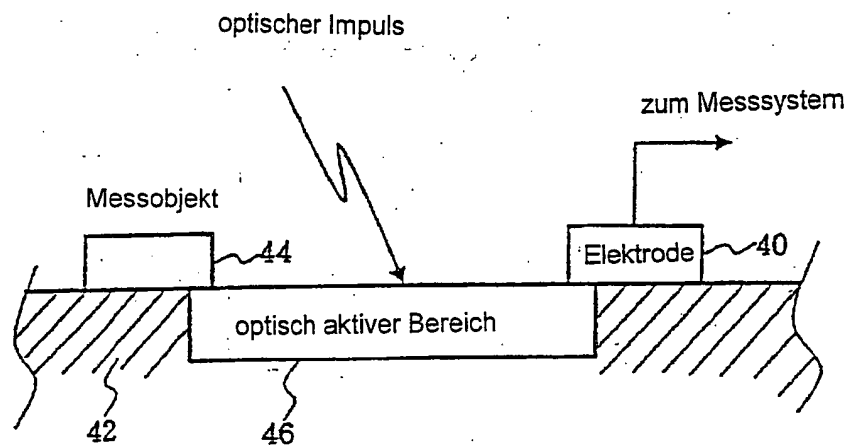


Fig.14a

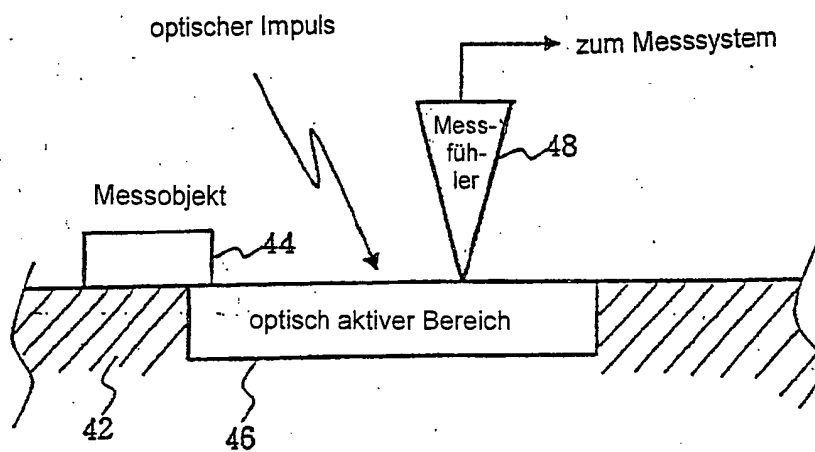
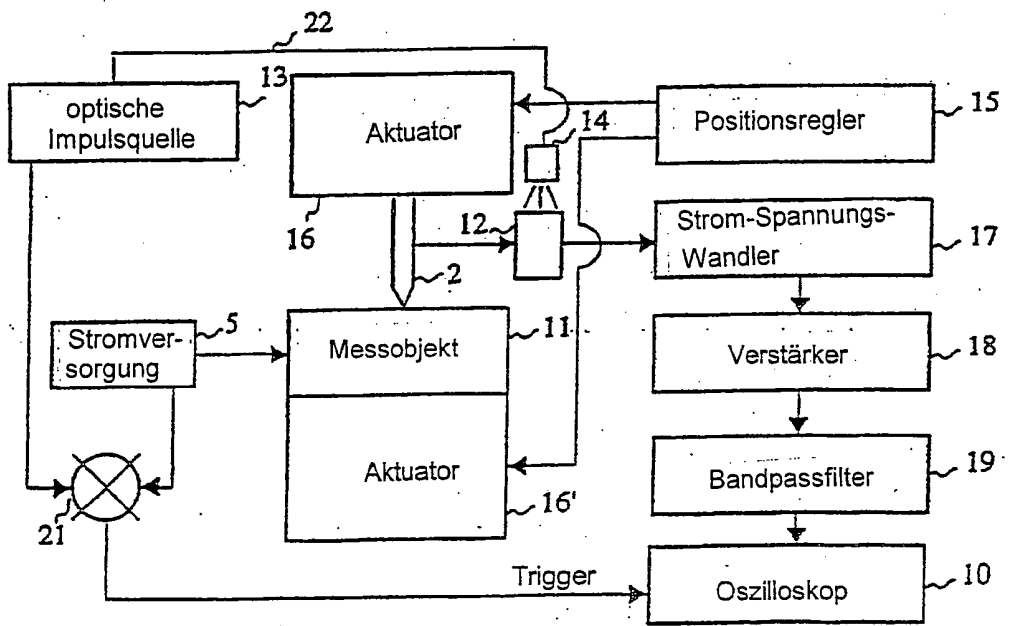
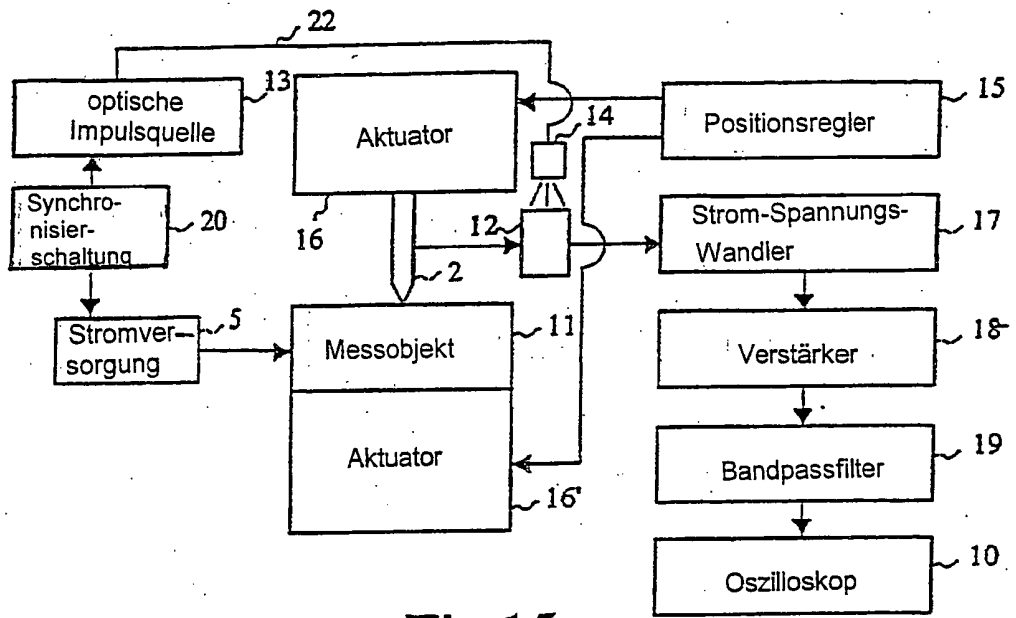


Fig.14b



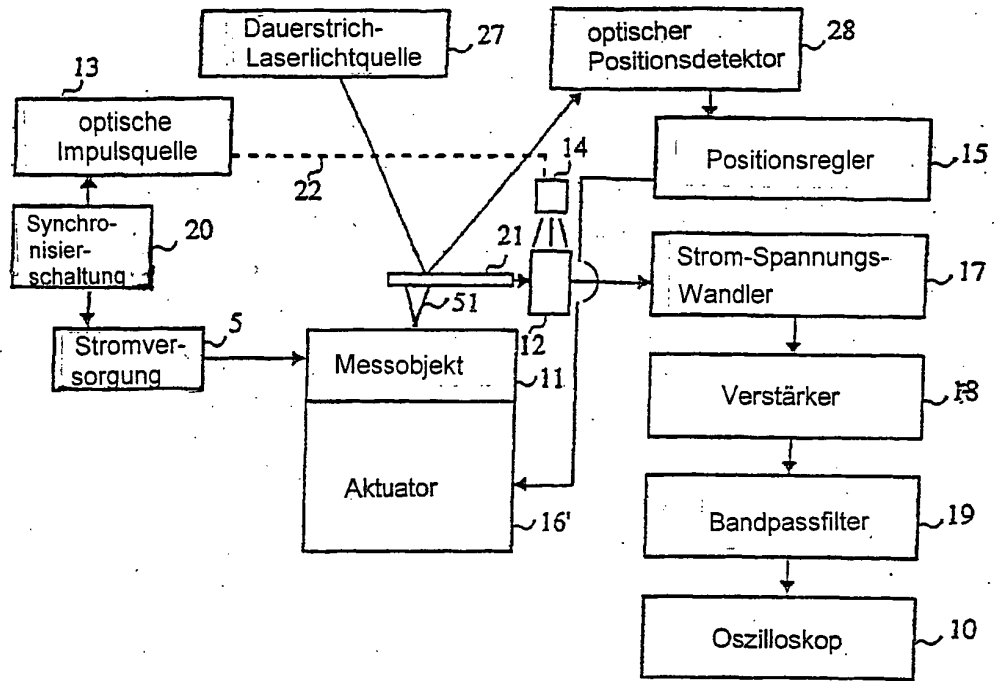


Fig.16a

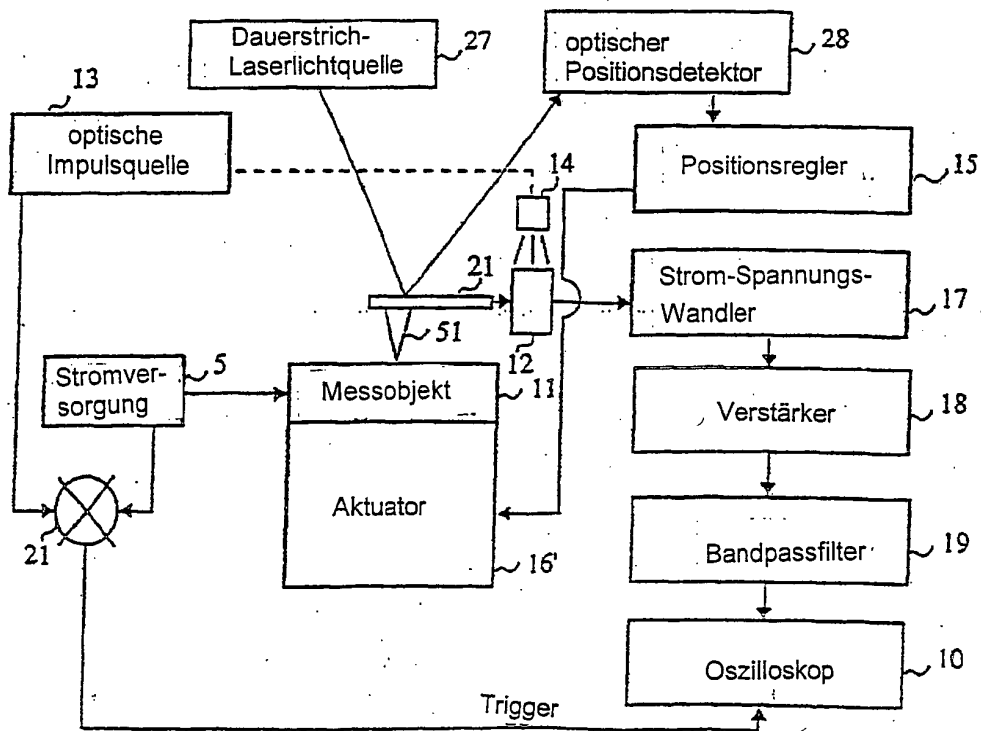


Fig.16b

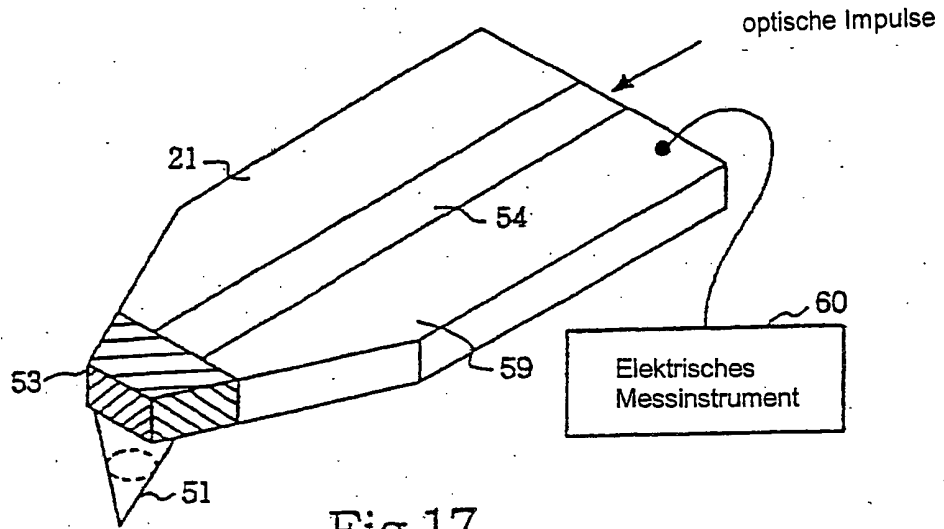


Fig.17

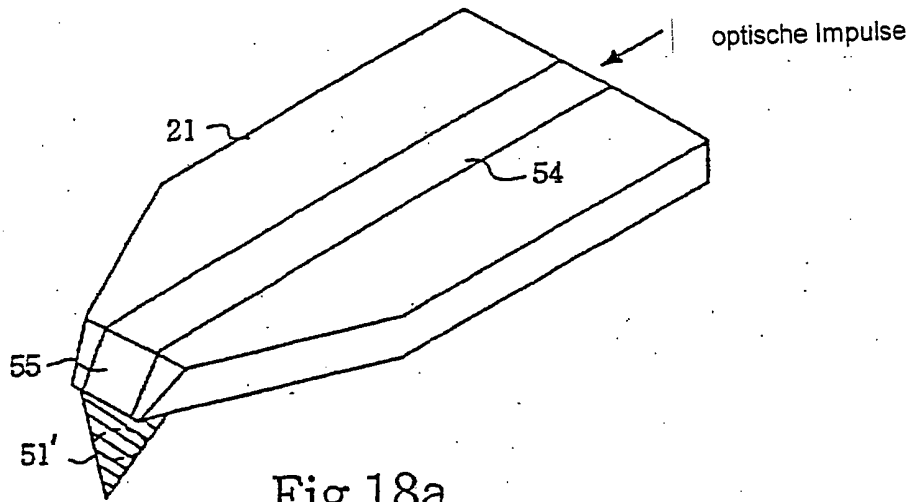


Fig.18a

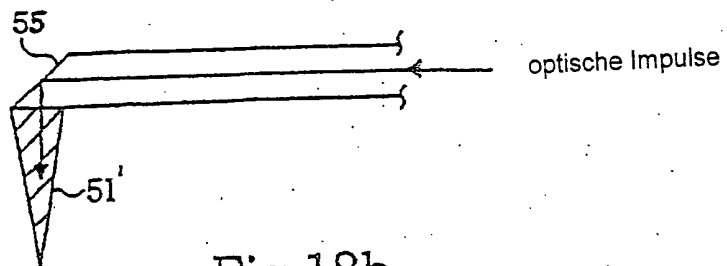


Fig.18b

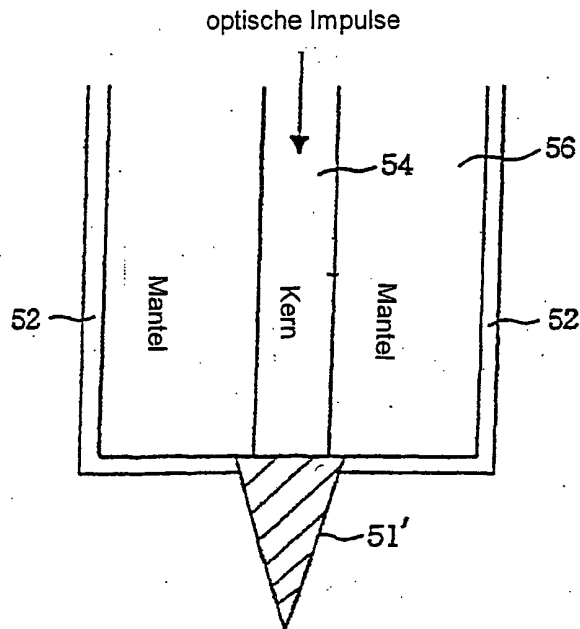


Fig.19

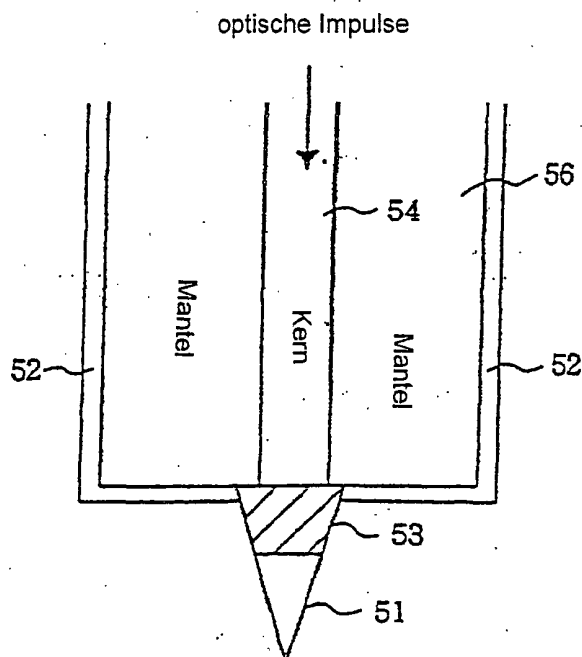


Fig.20

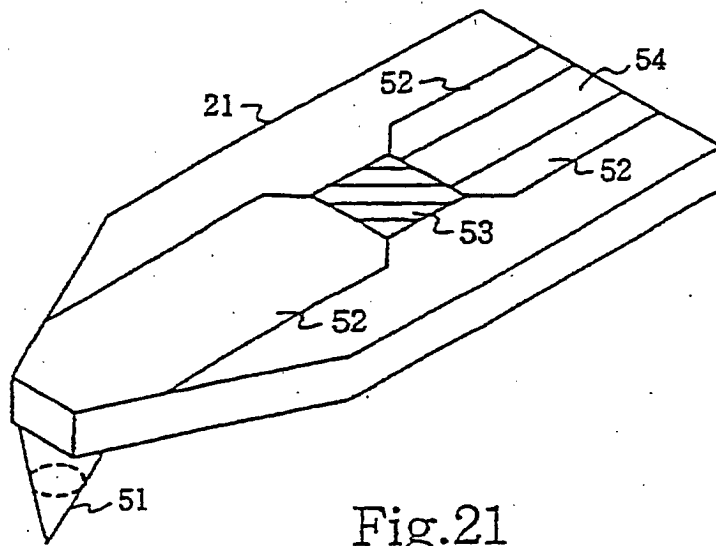


Fig.21

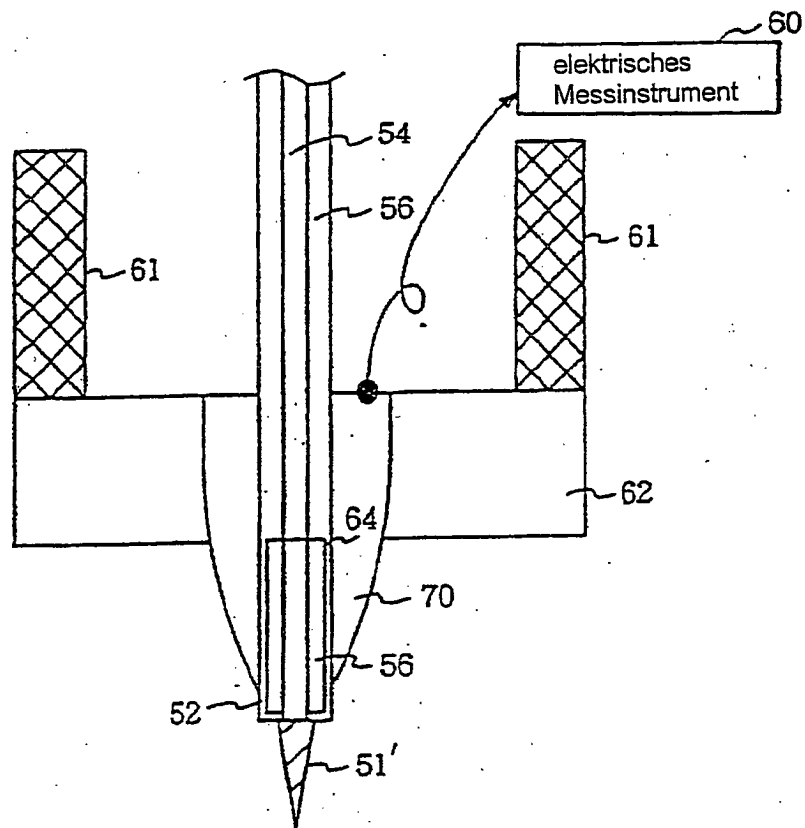


Fig.22

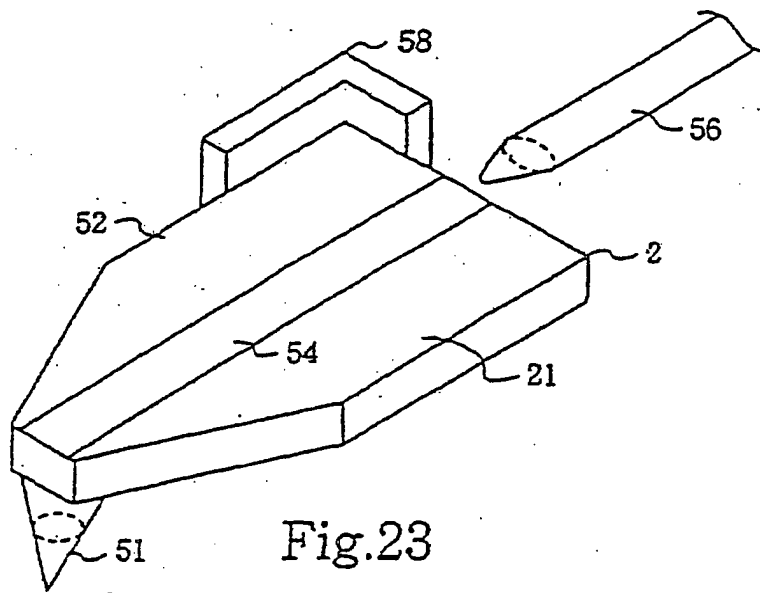


Fig.23

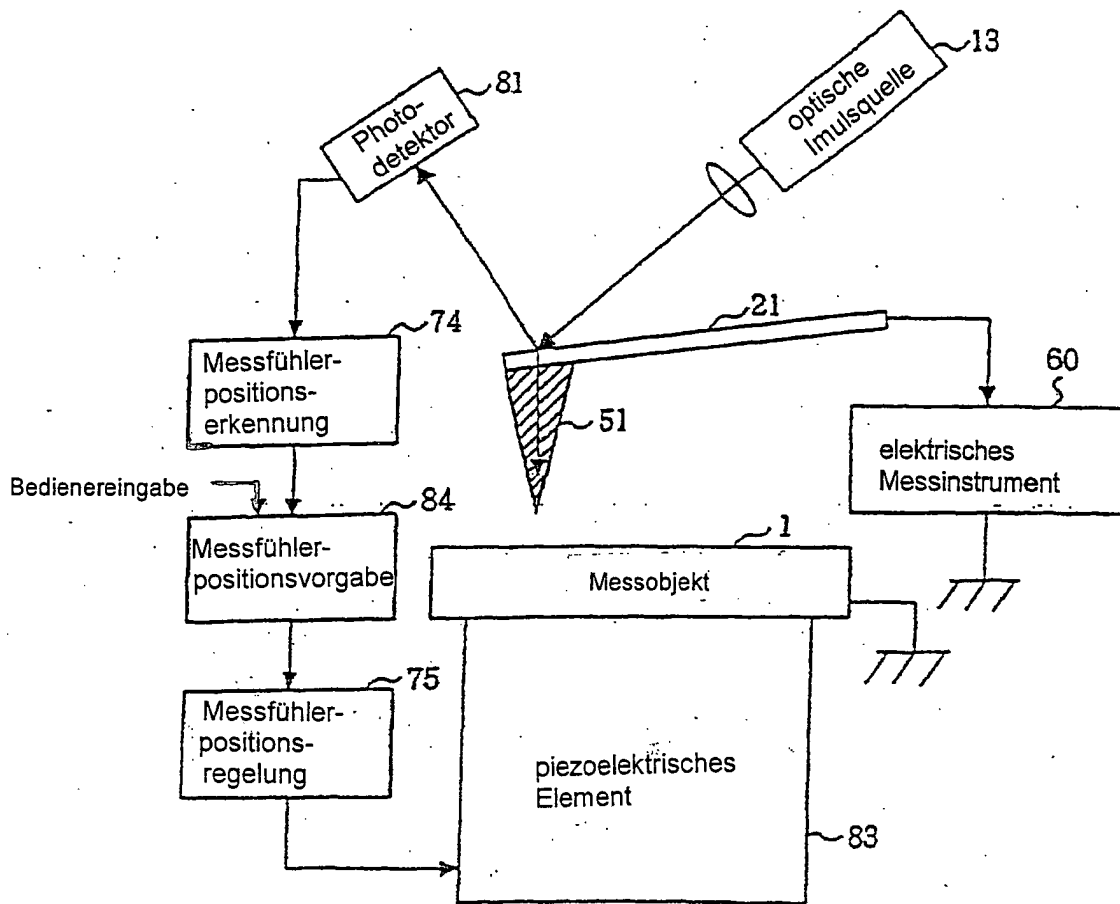


Fig.24

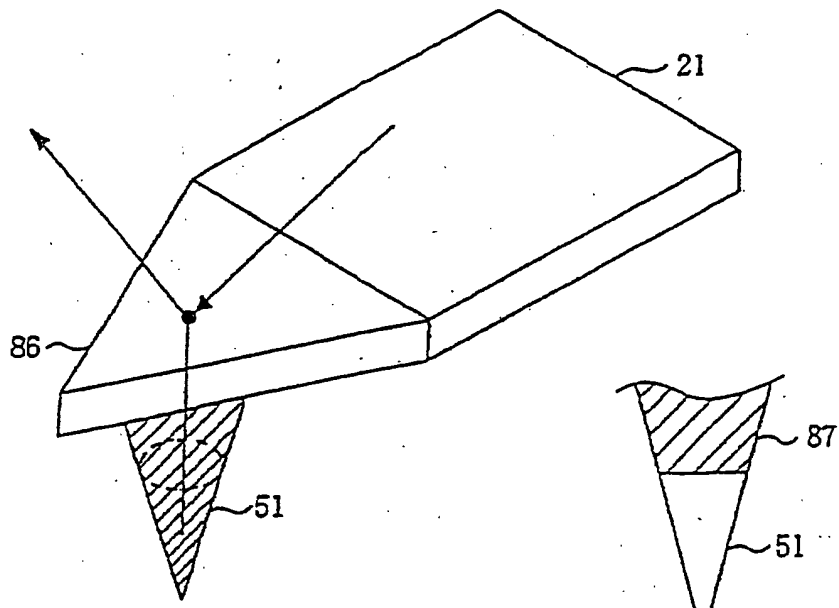


Fig.25a

Fig.25b

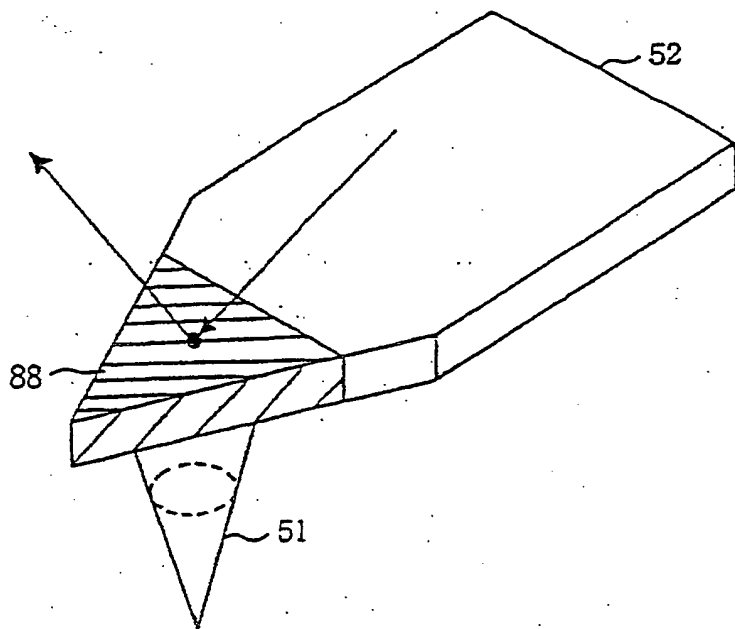


Fig.26



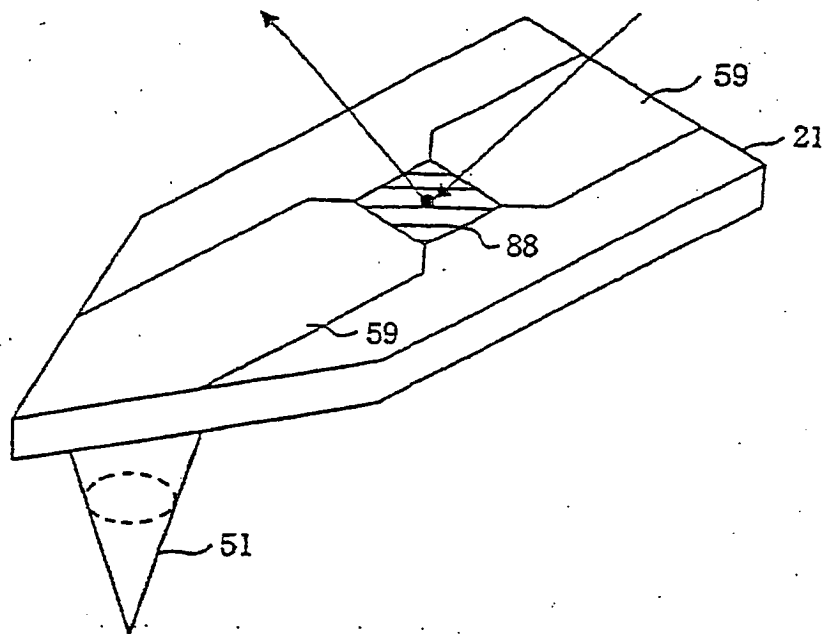


Fig.27

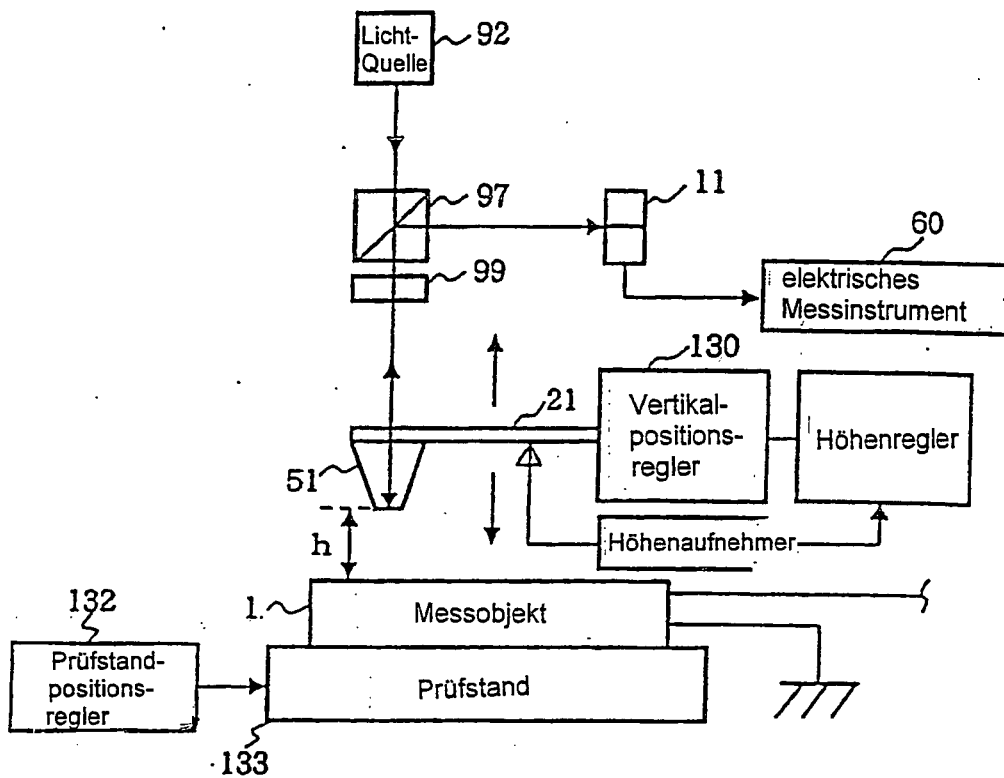


Fig.28

Stand der Technik