

(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 18 Absatz 2 Patentgesetz

(19) DD (11) 276 996 A3

5(51) G 02 F 1/11  
H 03 C 7/00

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

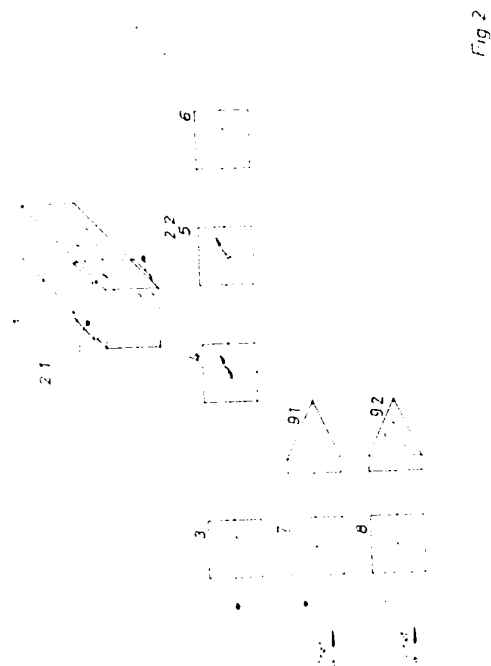
(21) WP G 02 F / 303 191 1 (22) 27.05.87 (45) 21.03.90

(71) Akademie der Wissenschaften der DDR, Otto-Nuschke-Straße 22/23, Berlin, 1080, DD  
(72) Naumburger, Volkmar, Dr.-Ing.; Schmeisser, Michael, Dr.-Ing.; Zimmer, Hellmar, Dr.-Ing., DD

(54) Verfahren und Schaltungsanordnung zur Anregung photoelastischer Modulatoren

(55) Modulator, photoelastisch, Modulationstiefe, phasenstarr, Synchronisation, Modulatorfrequenz, Piezowandler, Modulatorstab, Referenzfrequenz, Referenzamplitude

(57) Die Erfindung betrifft die Anregung photoelastischer Modulatoren. Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, bei Einhaltung einer konstanten vorgegebenen Modulationstiefe eine phasenstarre Synchronisation der Modulatorfrequenz mit der vorgegebenen Frequenz eines externen Steuergenerators zu ermöglichen. Erfindungsgemäß wird das dadurch erreicht, daß die Ausgangsspannung eines mit Piezowandlern versehenen Modulatorstabes sowohl mit einer Referenzfrequenz als auch mit einer Referenzamplitude, die der gewünschten Modulationstiefe proportional ist, verglichen wird, daß die Ausgangsspannung so weiterverarbeitet wird, daß sie als Eingangsspannung zur Anregung des Modulatorstabes verwendet wird. Fig. 2



**Patentansprüche:**

1. Verfahren zur Anregung photo-elastischer Modulatoren unter Anwendung des Prinzips rückgekoppelter Verstärker, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ausgangsspannung eines mit Piezowandlern versehenen Modulatorstabes sowohl mit einer Referenzfrequenz als auch mit einer Referenzamplitude, die der gewünschten Modulationstiefe proportional ist, verglichen wird, daß die Ausgangsspannung weiterhin verstärkt wird, wobei sie einer Phasendrehung in Abhängigkeit von der festgestellten Frequenzabweichung von der Referenzfrequenz und einer Amplitudenbewertung in Abhängigkeit von der festgestellten Amplitudenabweichung von der Referenzamplitude unterworfen wird, und daß die so beeinflusste Ausgangsspannung des Modulatorstabes als Eingangsspannung zur Anregung des Modulatorstabes verwendet wird.
2. Schaltungsanordnung zur Anregung photo-elastischer Modulatoren, bestehend aus einem aus amorphem Quarzglas gebildeten und mit Piezogeber und Piezoempfänger versehenen, Modulatorstab, der in den als Mitkopplung ausgeführten Rückkopplungszweig der aus einem Vorverstärker, einem steuerbaren Verstärkungsregelglied und einem Leistungsverstärker gebildeten Verstärkereinrichtung eingefügt ist, sowie einem Amplitudenkomparator und einem Integrator, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Ausgangssignal des Piezoempfängers (2.1) sowohl auf den einen Eingang einer Koinzidenzschaltung (7), deren anderer Eingang mit einem Frequenzreferenzsignal ( $f_{ref}$ ) beaufschlagt ist, als auch auf den einen Eingang des Amplitudenkomparators (8), dessen anderer Eingang mit einer die Modulationstiefe bestimmenden Referenzspannung ( $U_{ref}$ ) beaufschlagt ist, geschaltet wird, wobei der Ausgang der Koinzidenzschaltung (7) über einen Integrator (9.1) mit dem Steuereingang des steuerbaren Phasenschiebers (4) und der Ausgang des Amplitudenkomparators (8) über den Integrator (9.2) mit dem Steuereingang des Verstärkungsregelgliedes (5) verbunden ist.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

**Anwendungsgebiet der Erfindung**

Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung für eine amplituden- und phasenstarre Anregungsspannungserzeugung zur Realisierung von Ellipsometern hoher Genauigkeit und Zeitauflösung.

**Charakteristik der bekannten technischen Lösungen**

Photoelastische Modulatoren dienen der Phasenmodulation linear polarisierter Lichtstrahlen. In bekannter Weise wird diese Aufgabe durch amorphe Quarzglasstäbe, die mittels piezoelektrischer Schwingungsgeber zu Ultraschallschwingungen angeregt werden, realisiert (siehe hierzu Fig. 1 a)). Dabei werden die Stäbe vorzugsweise in ihrer ersten Längenresonanz betrieben, um mit relativ kleinen elektrischen Anregungsenergien zum gewünschten Modulationseffekt des Lichtstrahles zu gelangen. Auf diese Weise werden im Quarzstab stehende Wellen erzeugt, die eine zeitlich und örtlich sinusförmige Dichteschwankung und damit eine gleichartige Änderung des Brechungsindex im Stab zur Folge haben. Für moderne Ellipsometeranordnungen werden zwei solche Modulatoren benötigt, die jedoch mit unterschiedlichen Frequenzen arbeiten. Hier ist es von größter Wichtigkeit, daß sowohl die beiden Modulatorfrequenzen phasenscharf miteinander gekoppelt sind als auch die Modulationstiefe, die der Amplitude des Anregungssignals proportional ist, einen festgelegten konstanten Wert besitzt, um eine exakte Meßsignalauswertung vornehmen zu können. Beim Stand der Technik (DE-OS 3326555, DE-OS 2453233, SU-Urheberschein 397881 und US-PS 130661) werden Anregungsgeneratoren benutzt, deren Frequenz mittels thermostatisierter Quarznormale auf die festgelegten Frequenzen abgestimmt sind. Die Anregungssignalamplitude wird in bekannter Weise durch Amplitudenregelschaltungen konstant gehalten. Als Referenzsignal kann sowohl das vom Piezoempfänger als auch von einer speziellen optischen Kontrolleinrichtung gelieferte Signal verwendet werden (Canit, J. C.; Badoz, J.: „Photoelastic modulator for polarimetry and ellipsometry“ in Applied Optics, Band 23, Nr. 17, S. 2861–2862, New York, September 1984; US-PS 3540827). Da aber die Quarzstäbe der Modulatoren sehr hohe Resonanzgüten (1000–5000) und damit nur geringste Bandbreiten besitzen, führen kleinste Änderungen, bedingt durch thermische Drift und Bauelementalterung, zu großen Änderungen im Modulationsverhalten. Davon besonders betroffen sind die Modulationstiefe und die Phase zwischen Anregungssignal und Phasenhubverlauf des Lichtstrahls. Infolge solcher Einflüsse kann die Stabilität der ellipsometrischen Messungen beim Stand der Technik nur für wenige Stunden aufrecht erhalten werden. Notwendigerweise ist also in kurzen Intervallen eine aufwendige Justageprozedur zu absolvieren, um weitere Messungen durchführen zu können.

Eine andere Lösung des Standes der Technik vermeidet diese Nachteile dadurch, daß der Quarzstab als frequenzbestimmendes Element in den Rückkopplungszweig einer Verstärkeranordnung geschaltet wird. Ist die Rückkopplungsschleife als Mitkopplung ausgeführt, entsteht eine sinusförmige Schwingung, deren Frequenz durch die Eigenschaften des Quarzstabes bestimmt wird (Jasperson, S. N.; Schnatterly, S. E.: „An Improved Method for High Reflectivity Ellipsometry Based on a New Polarization

Modulation Technique" in: The Review of Scientific Instruments, Band 40, Nr. 6, S. 761-767, New York, June 1969 sowie Canit, J. C.; Badoz, J.: „New design of a photoelastic modulator" in Applied Optics, Band 22, Nr. 4, S. 592-594, New York, February 1983). Dadurch wird im wesentlichen immer garantiert, daß der Stab in seiner Resonanz arbeitet. Dieses Prinzip wird auch in der US-PS 491 398 ausgeführt. Da aber die Sollfrequenz nicht mehr von außen vorgegeben werden kann, besteht nun keine Korrelation mehr zu der Frequenz des anderen Modulatorstabes. Die Folge davon ist, daß das Meßsignal jetzt wie ein stochastisches Signal behandelt werden muß. Das führt zu einer erheblichen Vergrößerung der Meßzeit, damit die statistische Sicherheit für die geforderte Genauigkeit gegeben ist.

### Ziel der Erfindung

Die Erfindung verfolgt das Ziel, eine Lösung zu schaffen, die unter Beibehaltung einer phasenstarken Synchronisation der Systemeigenfrequenz mit einer Referenzfrequenz eine Anregung der Quarzstäbe in ihrer Eigenresonanz garantiert, um die Meßzeit bei einer vorgegebenen Genauigkeit auf das notwendige Maß zu reduzieren.

### Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Anregungserzeugung für photoelastische Modulatoren anzugeben, die bei Einhaltung einer konstanten vorgegebenen Modulationstiefe eine phasenstarke Synchronisation der Eigenfrequenz einer über den Quarzstab des Modulators mitgekoppelten Verstärkereinrichtung mit der vorgegebenen Frequenz eines externen Steuergenerators erlaubt, wobei die Eigenfrequenz der so mitgekoppelten Verstärkereinrichtung in etwa der Frequenz des Steuergenerators entspricht.

Das erfindungsgemäße Verfahren beruht darauf, daß die Ausgangsspannung eines mit Piezowandlern versehenen Modulatorstabes sowohl mit einer Referenzfrequenz als auch mit einer Referenzamplitude, die der gewünschten Modulationstiefe proportional ist, verglichen wird, daß die Ausgangsspannung weiterhin verstärkt wird, wobei sie einer Phasendrehung in Abhängigkeit von der festgestellten Frequenzabweichung von der Referenzfrequenz und einer Amplitudenbewertung in Abhängigkeit von der festgestellten Amplitudenabweichung von der Referenzamplitude unterworfen wird, und daß die so beeinflusste Ausgangsspannung des Modulatorstabes als Eingangsspannung zur Anregung des Modulatorstabes verwendet wird.

Eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung ist dadurch gekennzeichnet, daß das Ausgangssignal eines Piezoempfängers sowohl auf den einen Eingang einer Koinzidenzschaltung, deren anderer Eingang mit einem Frequenzreferenzsignal  $f_{ref}$  beaufschlagt wird, als auch auf den einen Eingang eines Amplitudenkomparators, dessen anderer Eingang mit einer die Modulationstiefe bestimmenden Referenzspannung  $U_{ref}$  beaufschlagt ist, geschaltet wird, wobei der Ausgang der Koinzidenzschaltung über einen Integrator mit dem Steuereingang eines steuerbaren Phasenschiebers und der Ausgang des Amplitudenkomparators über den Integrator mit dem Steuereingang eines Verstärkungsregelungsgliedes verbunden ist. Die Schaltungsanordnung besteht im wesentlichen aus einer mitgekoppelten Verstärkereinrichtung, wobei sich im Mitkopplungsweig auf der Verstärkerausgangsseite ein Piezogeber, der auf den Quarzstab des Modulators im Abstand des vierten Teiles seiner Länge vom einen Rand des Stabes auf einer der vier Längsseiten des Stabes aufgeklebt und elektrisch mit dem Ausgang des Verstärkers verbunden ist. Eingangsseitig ist der Verstärker über einen nichtinvertierenden Eingang mit einem Piezoempfänger, der auf einer der anderen freien Seiten aber im gleichen Abstand vom einen Rand des Stabes aufgeklebt ist, elektrisch verbunden (siehe auch Fig. 1 a)).

Es ist bekannt, daß zur Entstehung ungedämpfter Schwingungen rückgekoppelter Verstärker die sog. Schwingungsbedingung (Gl. 1) erfüllt werden muß:

$$k \cdot v = 1 \quad (1)$$

Wobei  $k$  der komplexe Übertragungsfaktor des Rückkopplungsweiges und  $v$  die komplexe Verstärkung des Verstärkers bedeuten. Gl. (1) besagt, daß erstens die Dämpfung des Rückkopplungsweiges durch die Verstärkung des Verstärkers vollständig ausgeglichen werden und daß zweitens die Summe der Phasendrehungen in beiden Systemen ganzzahlige Vielfache von  $360^\circ$  betragen muß. Fig. 1 c) zeigt den Phasengang des Quarzstabes in der Nähe seiner ersten Längenresonanz. Es ist zu sehen, daß die Phasendrehung in der Resonanz (vergl. dazu Fig. 1 b))  $0^\circ$  beträgt, also würde die Eigenfrequenz eines mitgekoppelten Verstärkers, dessen Phasendrehung ebenfalls  $0^\circ$  beträgt, identisch der Resonanzfrequenz des Quarzstabes sein. Oder, wenn der Verstärker eine von  $0^\circ$  verschiedene Phasendrehung aufweist und seine Verstärkung hinreichend groß ist, wird sich eine andere, von der Resonanzfrequenz des Stabes abweichende, Eigenfrequenz des Systems einstellen. Es ist also möglich, mit Hilfe einer gezielten Änderung der Phasendrehung des Verstärkers in gewissen Grenzen eine Änderung der Eigenfrequenz des Systems hervorzurufen. Die Grenzen der Änderung sind einerseits durch die Grenzen des Frequenzbereiches des Quarzstabes, in denen sich die Phase monoton steigend verändert und andererseits durch den Frequenzbereich, in dem die Übertragungsfunktion des Quarzstabes ihr erstes Maximum hat (siehe Fig. 1 b) und c)), gegeben. Beide Bereiche fallen in etwa überein und beinhalten die erste Längenresonanz des Quarzstabes.

Erfindungsgemäß wird mittels eines Frequenz- bzw. Phasenvergleichers die Frequenz- bzw. Phasenabweichung zwischen der Eigenfrequenz des mitgekoppelten Systems und der von außen zugeführten stabilisierten Referenzfrequenz gemessen. Die so festgestellte Regelabweichung wird dazu benutzt, um eine Phasenschieberstufe, die vor dem Verstärker angeordnet ist, so zu verändern, daß die Regelabweichung verschwindet. Die damit notwendig verbundene Änderung der Verstärkung des Verstärkers (Fig. 1 b)) muß durch eine Verstärkungsregelung durchgeführt werden. Auf diese Weise ist es möglich, Fertigungstoleranzen des Modulatorstabes, Alterungs- und andere Drifterscheinungen auszuregulieren, wobei die geforderte starre Phasenkopplung innerhalb des Regelbereiches immer erhalten bleibt.

Weiterhin ist für die erfindungsgemäße Lösung von besonderer Bedeutung, daß das Signal, welches der Piezoempfänger abgibt, nicht nur den Schwingungszustand des Quarzstabes darstellt, was für die Schwingungserzeugung allein ausreichend

wäre, sondern vielmehr auch durch seine Amplitudeninformation direkt die Stärke der Dichteschwankungen im Stab und damit die zu erwartende Modulationstiefe des Lichtstrahls repräsentiert. Diese Information, die dem Spitzenwert des empfangenen Signals proportional ist, wird bei der erfindungsgemäßen Lösung zur Verstärkungsregelung des mitgekoppelten Verstärkers benutzt. Auf diese Weise können sowohl die Verstärkungsschwankungen, die durch die Phasenregelung hervorgerufen werden, ausgeregelt als auch die Intensität der Modulation gesteuert werden.

#### Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird nachfolgend an einem Ausführungsbeispiel erläutert. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 a): Die Anordnung von Piezogeber und Piezoempfänger auf dem Quarzglasstab

Fig. 1 b): Die Übertragungsfunktion des Quarzglasstabes in der Umgebung der ersten Längenresonanz, dargestellt durch das Betragsverhältnis der Ausgangsspannung des Piezoempfängers zur Eingangsspannung des Piezogebers über der Frequenz

Fig. 1 c): Den Phasengang des Quarzstabes in der Umgebung der ersten Längenresonanz

Fig. 2: Die erfindungsgemäße Schaltungsanordnung.

Kernstück der in Fig. 2 gezeigten erfindungsgemäßen Anordnung ist der aus amorphem Quarzglas bestehende Modulatorstab 1, auf dem der Piezoempfänger 2.1 und der Piezogeber 2.2 angeordnet sind. Der Modulatorstab befindet sich aus elektrischer Sicht in einer Rückkopplungsschleife der aus dem Vorverstärker 3, dem elektrisch steuerbaren Phasenschieber 4, dem Verstärkungsregelglied 5 und dem Leistungsverstärker 6 bestehenden Verstärkeranordnung. Das vom Piezoempfänger 2.1 gelieferte Signal, welches den Schwingungszustand im Modulatorstab 1 in Betrag und Phase repräsentiert, wird weiterhin auf den einen Eingang einer Koinzidenzschaltung 7 geführt, deren anderer Eingang mit der externen Frequenzreferenzquelle  $f_{ref}$  verbunden ist. Die die Phasenabweichung beider Schwingungen repräsentierende Ausgangsspannung der Koinzidenzschaltung 7 wird in der Integratoranordnung 9.1 integriert und zur Steuerung des Phasenschiebers 4 verwendet. Die Frequenzregelung ist in dem in Fig. 1 c) markierten Bereich möglich. Ebenso wird das vom Piezoempfänger 2.1 gelieferte Signal in einem Amplitudenkomparator 8 mit der die Modulationstiefe bestimmenden Referenzspannung  $U_{ref}$  verglichen. Das die Abweichung darstellende Ausgangssignal des Komparators 8 wird im Integrator 9.2 ebenfalls integriert und zur Steuerung des Verstärkungsregelungsgliedes 5 verwendet. Beide Regelschleifen besitzen integrales Verhalten, was zu geringstmöglichen Regelabweichungen führt.

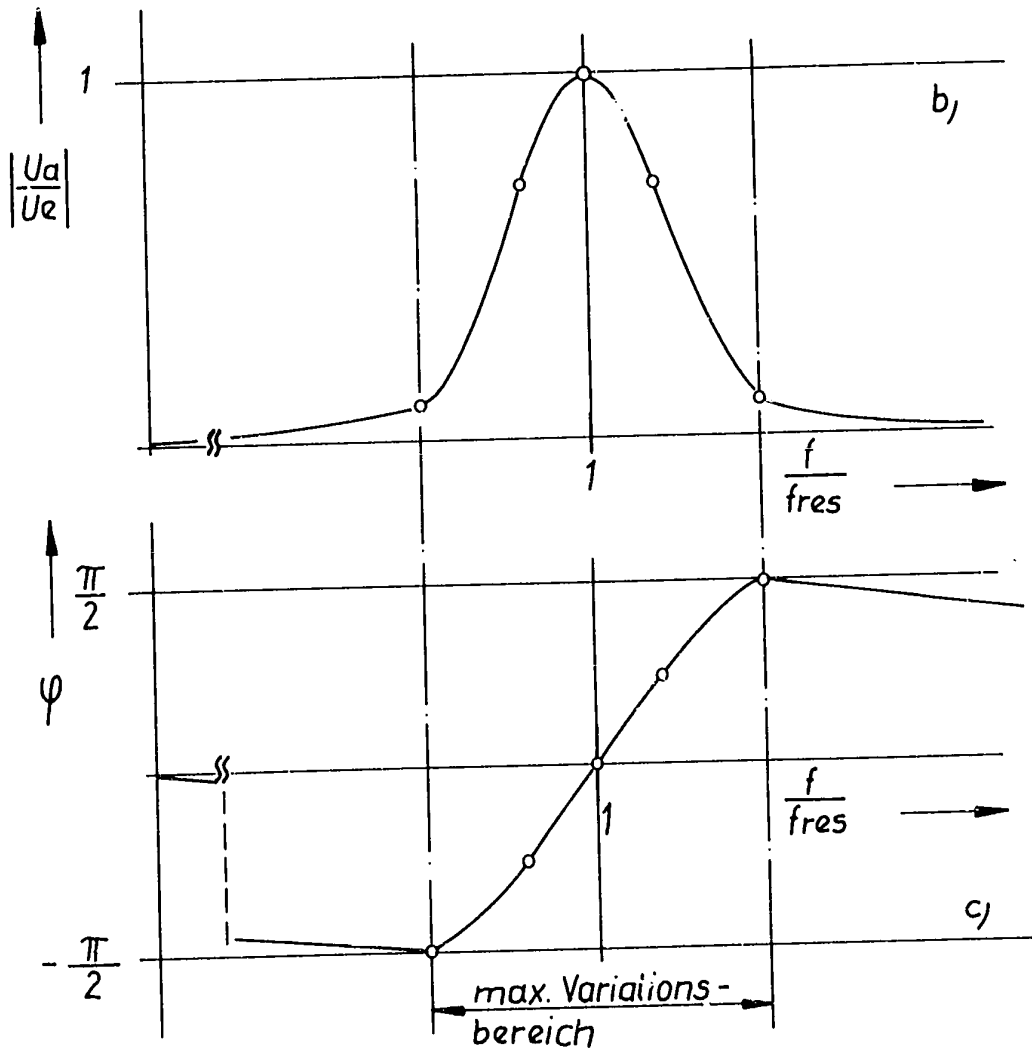
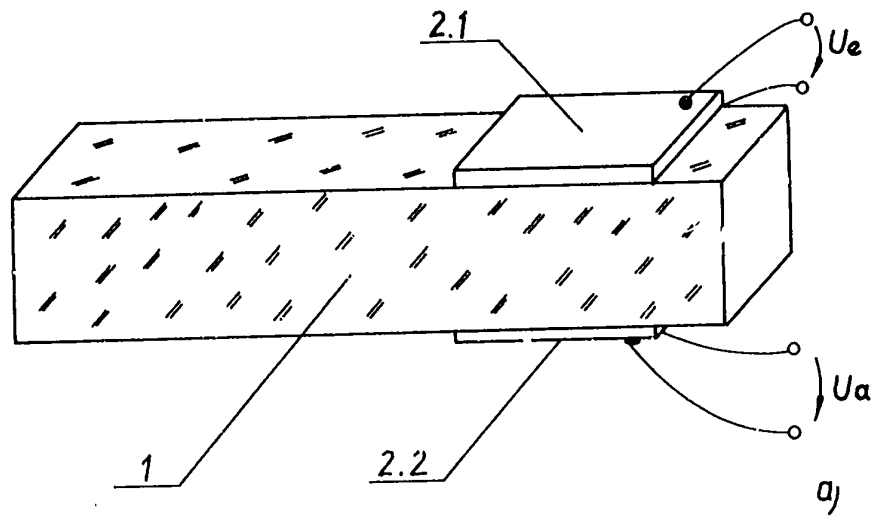


Fig.1

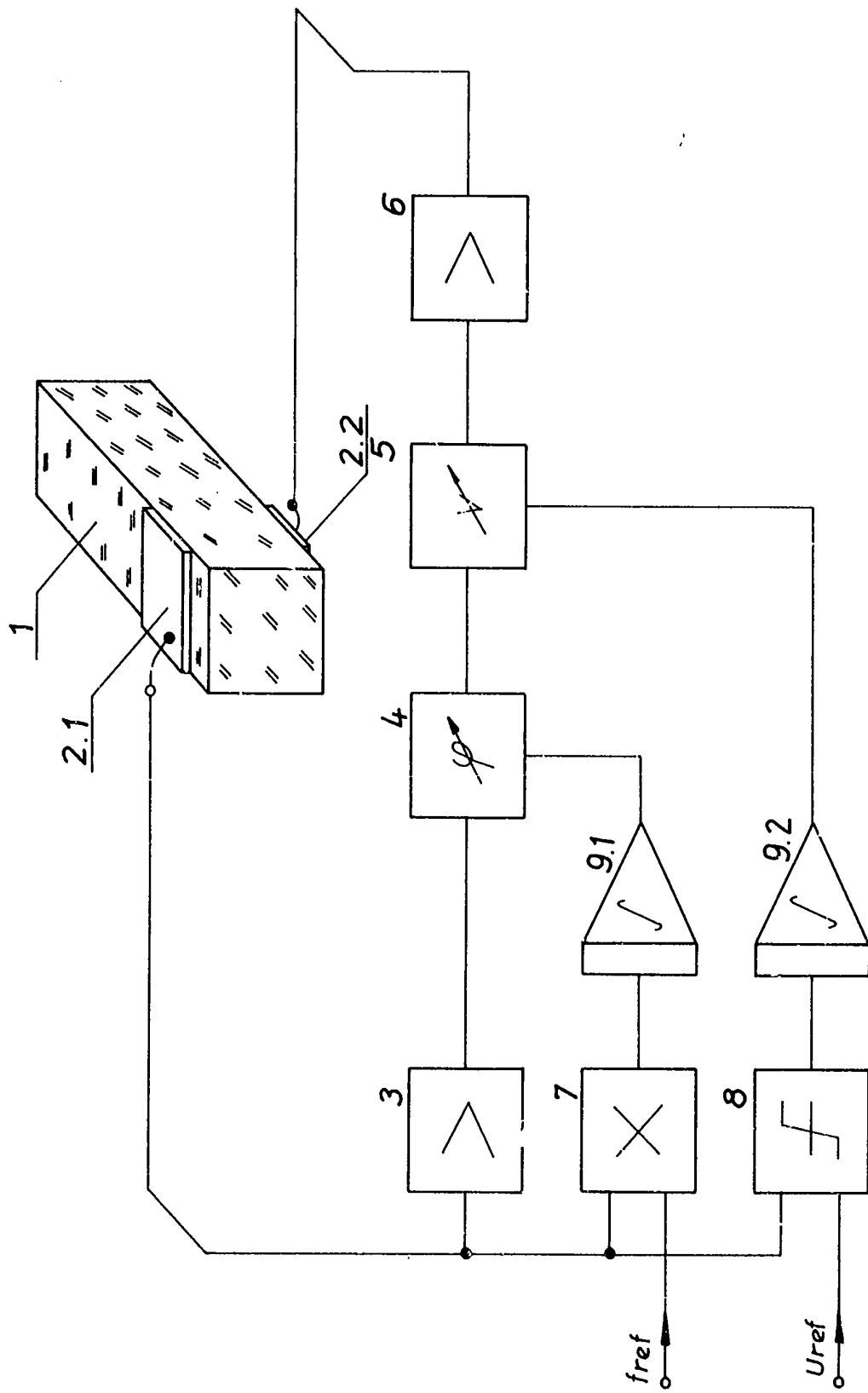


Fig.2