



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑤ Int. Cl.³: H 01 L 41/04
H 01 L 41/18
G 01 L 1/16

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑪

644 227

⑳ Gesuchsnummer: 8315/79

㉓ Inhaber:
Kistler Instrumente AG, Winterthur

㉔ Anmeldungsdatum: 14.09.1979

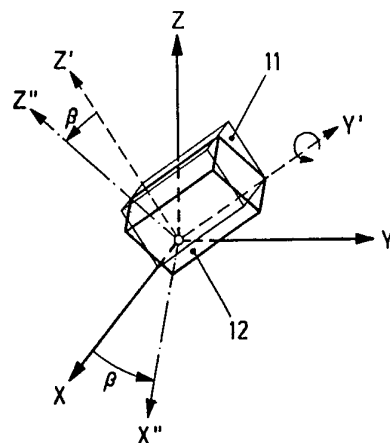
㉖ Patent erteilt: 13.07.1984

㉙ Patentschrift
veröffentlicht: 13.07.1984

㉚ Erfinder:
Reto Calderara, Bern

㉜ Piezoelektrisches Kristallelement für Messwandler.

㉞ Aus kubisch-polaren Kristallen können piezoelektrische Messwandlerelemente mit maximaler Empfindlichkeit und minimalen Störkoeffizienten hergestellt werden für die Anwendung in Longitudinal-, Transversal- und Scheraufnehmern für Kräfte, Drücke und Beschleunigungen, indem die Orientierung der Kristallelemente (II) bezüglich der kristallographischen Symmetriachsen (X, Y, Z) so gewählt wird, dass die Elektrodenflächen eine kristallographische Hauptachse unter einem Winkel von $\alpha' = \arcsin \sqrt{p}$ und die beiden anderen Hauptachsen unter einem Winkel von $\beta' = \pm 1/2 \arccos p$ schneiden, wobei $p = 0$ für den piezoelektrischen orthoaxialen Schereffekt, $p = 1/3$ für den longitudinalen und $p = 1$ für den transversalen Piezoeffekt. Planparallele Krafteinleitungsflächen fallen für den Scher- und Longitudinaleffekt mit den Elektrodenflächen zusammen und verlaufen für den Transversaleffekt in senkrecht auf den Elektrodenflächen stehenden Diagonalebene.



PATENTANSPRÜCHE

1. Piezoelektrisches Kristallelement für einen Messwandler für mechanische Grössen, bestehend aus einem kubisch-polaren Einkristall, gekennzeichnet durch Elektrodenflächen, deren Schnittwinkel α' mit einer kristallographischen Hauptachse definiert ist durch

$$\alpha' = \arcsin \sqrt{p}$$

und welche die beiden anderen Hauptachsen schneiden unter Winkeln von

$$\beta' = \pm \frac{1}{2} \arccos p$$

worin $p = 0$ für den piezoelektrischen orthoaxialen Schereffekt, $p = \frac{1}{3}$ für den longitudinalen und $p = 1$ für den transversalen Piezoeffekt, und durch planparallele Krafteinleitungsflächen, welche für Scher- und Longitudinaleffekt mit den Elektrodenflächen zusammenfallen und für den Transversaleffekt in senkrecht auf den Elektroden stehenden Diagonalebenen verlaufen.

2. Piezoelektrisches Kristallelement nach Anspruch 1 zur Umformung von Kräften, Drücken und Beschleunigungen in elektrische Signale mittels des longitudinalen direkten Piezoeffektes, dadurch gekennzeichnet, dass es von zwei planparallelen, zur Ladungsabnahme dienenden Krafteinleitungsflächen begrenzt ist, welche die kristallographischen Hauptachsen unter Winkeln von etwa $35, 26^\circ$ schneiden.

3. Piezoelektrisches Kristallelement nach Anspruch 1 zur Umformung von Scherkräften in elektrische Signale mittels des orthoaxialen direkten Scherpiezoeffektes, dadurch gekennzeichnet, dass es von zwei planparallelen, zur Ladungsabnahme dienenden Krafteinleitungsflächen begrenzt ist, welche im wesentlichen parallel zur einen und diagonal zu beiden anderen Hauptachsen verlaufen.

4. Piezoelektrisches Kristallelement nach Anspruch 1 zur Umformung von Kräften, Drücken und Beschleunigungen in elektrische Signale mittels des transversalen direkten Piezoeffektes, dadurch gekennzeichnet, dass es von senkrecht zur einen Hauptachse verlaufenden Elektrodenflächen und von zwei planparallelen Krafteinleitungsflächen begrenzt wird, welche letztere diagonal zu den beiden anderen Hauptachsen verlaufen.

5. Piezoelektrisches Kristallelement nach Anspruch 1 zur Umformung mechanischer Grössen in elektrische bei hohen Temperaturen, dadurch gekennzeichnet, dass es aus einkristallinem Wismutgermaniumoxid besteht.

Bei der Analyse von dynamischen Kraft- und Druckverläufen, Beschleunigungen und Vibrationszuständen wird sehr oft von der piezoelektrischen Messtechnik Gebrauch gemacht, da sich diese Methode durch grosse Präzision und Universalität in den Anwendungsmöglichkeiten auszeichnet. Piezoelektrische Messwandler zeichnen sich gegenüber anderen Systemen durch extreme Starrheit, kleine Dimensionen und sehr hohe Eigenfrequenzen aus. Dies ermöglicht praktisch translationsfreie Messungen mit minimaler Rückwirkung auf das Messobjekt sowie die simultane Auflösung mehrerer Vektorkomponenten. Einmalig ist die Möglichkeit, bei Druck-, Kraft-, Schub- und Drehmomentmessungen statische Vorlasten, die um mehrere Zehnerpotenzen grösser als der Messwert sein können, ohne Präzisionsverlust elektrisch zu kompensieren.

Die Entwicklung der Messtechnik verlangt in zunehmendem Masse nach hochempfindlichen miniaturisierten Mess-

wandlern. Nun führt aber die Verkleinerung eines Messwandlers grundsätzlich zu einer Verringerung dessen Empfindlichkeit. Dieses Dilemma hat den Trend verstärkt, piezoelektrische Messwertnehmer mit integrierten Impedanzwandler-Vorverstärkern zu versehen. Solche Verstärker sind auch anwendungstechnisch vorteilhaft, da sie die Verwendung extrem hochisolierender Signalübertragungsleitungen, wie sie bei der herkömmlichen Ladungsverstärkung notwendig sind, erübrigen.

Der Eingang dieser integrierten Vorverstärker ist allgemein mit einem Feldeffekt-Transistor bestückt. Dies bedeutet, dass zum Erreichen eines guten Signal- zu Rauschverhältnisses am Vorverstärkereingang eine möglichst hohe elektrische Spannung pro mechanische Messeinheit anzustreben ist.

Hierzu genügt es nicht, für die aktiven Aufnahmerelemente ein piezoelektrisches Material mit maximalem Feldstärkekoeffizienten $g_{m\mu}$ zu wählen, denn in einem Messwandler wird die Spannungsempfindlichkeit reduziert durch die Gatekapazität C_g des Feldeffekttransistors und durch die Shuntkapazität C_s zwischen den spannungsführenden Leitern vom Piezoelektrikum zum Gate – und sämtlichen übrigen Konstruktionselementen des Messwandlers auf Gegenpotential. Die Spannungsempfindlichkeit S_v eines Aufnehmers kann dargestellt werden durch

$$S_v = \frac{f_1 \cdot d_{m\mu}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{mm} \cdot f_2 + C_g + C_s (f_3)}$$

worin $d_{m\mu}$: Piezoelektrischer Ladungskoeffizient des aktiven Materials

ϵ_0 : Influenzkonstante; ϵ_{mm} : Dielektrizitätskonstante des aktiven Materials; $f_{1,2,3}$: Faktoren, die von der Geometrie der krafteinleitenden bzw. der aktiven bzw. der kapazitätsbestimmenden Elemente abhängen.

Diese Formel erklärt das grundsätzliche Problem des Empfindlichkeitsverlustes bei miniaturisierten piezoelektrischen Messaufnehmern mit spannungsverstärkenden Impedanzwandlern.

Bei Verkleinerung der geometrischen Abmessungen eines Aufnehmers bleibt die Gatekapazität C_g konstant und die Shuntkapazitäten C_s bis zum Verstärkereingang nehmen nur unterproportional ab. Das heisst, der kapazitive Nebenschluss bekommt Übergewicht, relativ zur Kapazität des Piezoelektrikums und wird dadurch zum limitierenden Faktor. Aus der Formel wird deutlich, dass von piezoelektrischen Messwandlmaterialien sowohl hohe Dielektrizitätskonstanten als auch Piezokoeffizienten gefordert werden müssen, und dass diese Daten die technisch sinnvollen Abmessungen und Einsatzmöglichkeiten für jedes Piezoelektrikum verschieden eingrenzen.

Die aktiven Elemente piezoelektrischer Präzisionsmesszellen bestehen besonders häufig aus Quarzkristall, denn dieses Material ist durch die ausgezeichnete Linearität und Konstanz seiner elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu solchen Anwendungen geradezu prädestiniert. Quarz besitzt zwar einen hohen piezoelektrischen Feldstärkekoeffizienten g_{11} , doch schränken die relativ ungünstigen Daten für d_{11} und ϵ_{11} die Anwendungen in Miniaturaufnehmern sehr stark ein.

Als Alternativen stehen mehrere ditrigonal-pyramidale Kristalle wie z.B. Lithiumniobat, Lithiumtantalat und Turmalin zur Verfügung. Kristalle dieser Symmetrie sind pyroelektrisch. Da sie noch weitere schwerwiegende Nachteile wie stark anisotrope thermische Ausdehnung, ungenügende elektrische Isolation bei höheren Temperaturen, bzw. kleine piezoelektrische Empfindlichkeit aufweisen, können sie Quarz nur in Spezialfällen ersetzen.

Eine andere Gruppe piezoelektrischen Wandlermaterialien umfasst die zahlreichen ferroelektrischen Keramiken, die definitionsgemäss alle auch pyroelektrisch sind. In dieser Materialgruppe wird der Vorteil der teils recht grossen piezoelektrischen Longitudinalempfindlichkeit oft schon zunichte gemacht durch die damit parallel gehende Pyroelektrizität. Beim piezoelektrischen Transversaleffekt sind die Verhältnisse noch ungünstiger. Ein besonders schwerwiegender Nachteil ferroelektrischer Keramiken liegt in Zeitabhängigkeit und Nichtlinearität ihrer Eigenschaften, was ihre Anwendung ausschliesst, wo hohe Anforderungen an die Messpräzision gestellt werden.

Die Entwicklung der Piezomesstechnik verlangt somit nach neuen Kristallen, die gute piezoelektrische und dielektrische Materialdaten aufweisen, ohne aber an den genannten Nachteilen zu leiden.

Das erste Auswahlkriterium für die gesuchte neue Gruppe von piezoelektrischen Materialien sei das Fehlen von Pyroelektrizität. Dies schliesst bereits die zehn kristallographischen Symmetrieklassen mit singulären polaren Achsen aus.

Es können noch weitere Kriterien durch die Kristallsymmetrie definiert werden. Eine möglichst hohe Symmetrie ist wünschenswert im Hinblick auf Isotropie der Festigkeits- und Ausdehnungseigenschaften. Die Symmetrie darf aber nicht so hoch sein, dass die Piezoelektrizität verschwindet, was namentlich schon bei Vorliegen eines Inversionszentrums der Fall ist. Andererseits darf die Kristallsymmetrie auch nicht zu niedrig sein, denn sonst werden zuviele Matrixelemente des Piezoelektrizitätstensors von Null verschieden, was Störeffekte wie Einspann- und Seitenempfindlichkeiten verursacht.

Von Präzisionsmesswandlern wird verlangt, dass ihre Empfindlichkeit in einer exakt spezifizierten Krafteinleitungsrichtung liegt. Beispielsweise darf ein Scherkraftaufnehmer nicht auf Longitudinalkräfte (Einspanndruck) ansprechen und umgekehrt.

In piezoelektrischen Messwandlern für mechanische Grössen werden Kristalle und Keramiken verwendet, deren Piezoelektrizitätstensenoren endliche Matrixelemente für Longitudinal-, Transversal- und orthoaxiale Schereffekte besitzen. Diese drei Belastungsfälle werden technisch durch unzählige Aufnehmerkonstruktionen verwirklicht. Es gibt nun auch Kristalle, deren Symmetrie in der Matrixdarstellung der Piezoelektrizitätstensenoren ausschliesslich synaxiale Scherkoeffizienten auftreten lässt. Da sich der synaxiale Schermodus mit den konventionellen Messwandlerkonstruktionen nicht dazu eignet, mittels des direkten Piezoeffektes mechanische Signale in elektrische umzuformen, sind derartige Kristalle bisher als ungeeignet für die Piezomesstechnik angesehen worden.

Das Ziel der vorliegenden Erfindung ist mithin, Wege aufzuzeigen, wie neuartige piezoelektrische Messwandlerelemente hergestellt werden können, aus Kristallen mit ausschliesslich synaxialen Scherpiezokoeffizienten, derart, dass ihre Anwendung auch im Longitudinal-, Transversal- und im orthoaxialen Schermodus ermöglicht wird.

Der Gedankengang, der dieser Erfindung zugrundeliegt, ist kurz zusammengefasst, der folgende: Die allgemeine Zustandsgleichung für den direkten piezoelektrischen Effekt lautet bekanntlich:

$$D_m = \sum_{\mu=1}^6 (d_{m\mu} \cdot T_\mu) + \sum_{n=1}^3 (\epsilon_{mn}^T \cdot E_n)$$

Hierin bedeuten:

D: die dielektrischen Verschiebungen (Ladung pro Fläche)

d: die piezoelektrischen Koeffizienten

T: die mechanischen Spannungen (Kraft pro Fläche)

ϵ : die Dielektrizitätskonstanten

E: die elektrischen Feldstärken

Die Indizes m (bzw. n) bezeichnen die Richtungskomponenten der dielektrischen Verschiebung (bzw. Feldstärke), bezogen auf orthogonale Kristallkoordinaten und laufen von 1 bis 3, entsprechend den Achsen X, Y, Z. Analog werden mit den reduzierten Indizes μ die Komponenten des elastischen Spannungstensors bezeichnet. Wie üblich bedeuten T_1, T_2, T_3 Spannungen parallel zu und T_4, T_5, T_6 Scherspannungen um die Achsen X, Y, Z.

Die piezoelektrischen Koeffizienten $d_{m\mu}$ bilden also einen Tensor dritter Ordnung, der im allgemeinen Falle durch 18 Matrixelemente darzustellen ist.

Die Elemente mit $m = \mu$ stellen die drei Longitudinaleffekte dar, die drei mit $m = (\mu - 3)$ werden als synaxiale Schereffekte bezeichnet. Unter den übrigen Matrixelementen mit $m \neq \mu$ sind die sechs mit $\mu \leq 3$ den transversalen Piezoeffekten und die sechs Element mit $\mu > 3$ den orthoaxialen Schereffekten zugeordnet.

Bei den hier bevorzugten Anwendungen ist der Beitrag des Feldstärkevektors zur dielektrischen Verschiebung praktisch vernachlässigbar klein gegenüber dem Einfluss des elastischen Spannungstensors. Deshalb wird im folgenden nur noch der letztere berücksichtigt. Damit lautet die obige Beziehung für den direkten Piezoeffekt eines Materials mit ausschliesslich synaxialen Schereffekten in Matrixdarstellung allgemein:

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}$$

Diese Voraussetzungen sind bei sechs kristallographischen Symmetrieklassen verwirklicht. Kommen weiter Symmetrieelemente zu jenen der orthorhombisch-disphenoidischen Kristallklasse hinzu, so gelten folgende Beziehungen zwischen den Koeffizienten: In der tetragonal-skalenoeidischen Kristallklasse: ($d_{25} = d_{24}$); bei tetragonal- und hexagonal-trapezoedischen Kristallen ($d_{25} = -d_{14}$; $d_{36} = 0$). Bei der kubisch-hexakistetraedischen und der tetraedisch-pentagon-dodekaedischen Kristallklasse schliesslich gilt: ($d_{14} = d_{25} = d_{36}$).

Diese beiden Klassen werden zusammenfassend als Kubisch-Polare bezeichnet und sollen im Folgenden speziell behandelt werden. Alle Berechnungen können aber sinngemäss analog auch für die genannten Kristallklassen niedriger Symmetrie durchgeführt werden.

Es gibt in der Natur viele Mineralien, welche den kubisch-polaren Kristallklassen angehören. Als Beispiele seien Zinkblende ZnS bzw. Gersdorffit NiAsS angeführt.

Es sind auch sehr viele synthetische Kristalle dieser Symmetrieklassen hergestellt worden, darunter auch einige mit beachtlich starker Piezoelektrizität. Als Beispiele seien genannt: Cadmiumsulfid CdS und Zinkselenid ZnSe; sowie Natrium-chlorat NaClO₃ und Wismutgermaniumoxid Bi₁₂GeO₂₀.

Die letztgenannte Substanz weist recht hohe Materialwerte sowohl bezüglich der piezoelektrischen und dielektrischen Daten, als auch hinsichtlich thermischen und elastischen Eigenschaften auf, wodurch sie für die Piezomesstechnik potentiell interessant wird.

Dank seiner piezoelektrischen Eigenschaften hat Wismutgermaniumoxid ebenso wie andere kubisch-polare Kristalle bereits technische Anwendungen gefunden, namentlich als Resonator in der Ultraschalltechnik, als elektrooptischer Modulator und in Verzögerungselementen, wo die relativ niedrige Schallgeschwindigkeit und der günstige elektromechanische Kopplungsfaktor von Nutzen sind. Auf dieser Basis wurden sogar schon Konstruktionen vorgeschlagen, welche die indirekte Messung von Drücken, Kräften oder Beschleunigungen ermöglichen (z.B. US Patent 3 863 497 (Van de Vaart et al.)). Dabei wird durch das zu messende mechanische Signal ein Kristallstab verbogen, auf dessen Oberfläche durch Anschluss an einen Wechselspannungsgenerator eine Rayleighschwingung angeregt wird. Nach Massgabe der Verbiegung wird die Wellenausbreitung verändert, wodurch die Messgrösse indirekt in Form einer Phasenverschiebung detektiert werden kann.

Allen diesen Anwendungen ist gemeinsam, dass ein achsenparallel aus dem Kristall geschnittenes Resonatorelement durch Zufuhr von elektrischer Energie zu Schwingungen auf einer seiner Eigenfrequenzen angeregt wird. Die Wirksamkeit hängt dabei vom elektromechanischen Kopplungsfaktor ab, wogegen die piezoelektrischen Koeffizienten nur untergeordnete Bedeutung haben als Antriebskonstanten. Solche Kristallelemente sind piezoelektrisch inaktiv gegenüber longitudinaler, transversaler und orthoaxialer Belastung.

Hievon unterscheiden sich die Messwandlerelemente, welche den im Patentanspruch definierten Gegenstand der vorliegenden Erfindung bilden, ganz fundamental, indem ihnen keine elektrische Energie zugeführt wird, sondern die zu messende mechanische Kraftgrösse mittels des direkten Piezoeffektes in ein proportionales elektrisches Signal umge-

formt wird. Ausserdem arbeiten diese Messwandlerelemente auch nicht auf ihren Resonanzfrequenzen, im Gegenteil, es werden sogar konstruktive Massnahmen getroffen, um Eigenschwingungen möglichst weitgehend zu eliminieren.

Um nun kubisch-polare Kristalle in Messwandlern anwenden zu können, die auf dem direkten Piezoeffekt basieren, ist es notwendig, daraus Kristallelemente herzustellen, welche auch bei longitudinaler, transversaler bzw. antiaxialer Scher-Belastung piezoelektrisch aktiv sind. Wie dies möglich ist, kann gezeigt werden, indem man die tensorielle Richtungsabhängigkeit in den Zustandsgleichungen für den direkten Piezoeffekt in Rechnung zieht.

Zur Herleitung der piezoelektrischen Koeffizienten für eine beliebige Raumrichtung ist es zweckmässig, die Lage des Kristallelementes zu den Koordinatenachsen nach Gauss durch sukzessive Rotationen um aufeinander senkrecht stehende Achsen zu beschreiben.

Die Longitudinal-, Transversal- und Scherkoeffizienten können dann als Funktionen der Orientierungswinkel α , β , γ berechnet werden, aus der nichtreduzierten d-Matrix (allgemein 27 Elemente mit dreistelligen Indizes), indem man für jede der Rotationen die Symmetrieelemente des Kristallelementes anwendet und mit den bekannten Transformationsmatrizen multipliziert und schliesslich wieder auf zweistellige Indizes übergeht. Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im folgenden anhand schematischer Zeichnungen näher erläutert.

Figur 1 erläutert die Bezeichnungen bei der ersten Rotation. Kristallelement (10) ist parallel zu den kristallographischen Achsen X, Y, Z geschnitten und ist somit piezoelektrisch inaktiv gegenüber longitudinalen, transversalen und orthoaxialen Normalkräften. Kristallelement (11) ist bezüglich der X-Achse um den Orientierungswinkel $\alpha > 0$ gedreht. Seine Kantenrichtungen bzw. transformierten Achsen Y' und Z' fallen allgemein nicht mehr mit kristallographischen Symmetrieelementen zusammen. Diese Zuordnungen gelten sinngemäss auch für anders geformte, beispielsweise kreisscheibenförmige Messwandlerelemente, die schief zu den Hauptachsen X, Y, Z aus einem Kristall geschnitten sind.

Man erhält so die folgenden Ausdrücke für die Orientierungsabhängigkeit der piezoelektrischen Koeffizienten:

$$\begin{aligned} d'_{11} &= 0 \\ d'_{12} &= d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ d'_{13} &= -d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ d'_{14} &= d_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ d'_{15} &= d'_{16} = d'_{21} = d'_{22} = d'_{23} = d'_{24} = 0 \\ d'_{25} &= d_{25} \cdot \cos^2 \alpha - d_{36} \cdot \sin^2 \alpha \\ d'_{26} &= (d_{25} + d_{36}) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ d'_{31} &= d'_{32} = d'_{33} = d'_{34} = 0 \\ d'_{35} &= -(d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ d'_{36} &= d_{36} \cdot \cos^2 \alpha - d_{25} \cdot \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

Durch eine einachsige Rotation erhält man somit Kristallelemente, die sowohl transversalen Piezoeffekt wie auch antiaxialen Scherpiezoeffekt aufweisen. Man erkennt leicht, dass bei kubisch-polaren Kristallen maximale Empfindlichkeiten bei einem Orientierungswinkel $\alpha = 45^\circ$ erzielt werden, und dass dann die synaxialen Schereffekte verschwinden. Die d'-Matrix erhält somit für einen kubisch-polaren X + 45°-Kristall folgende Form:

$$d'_{m\mu} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{d_{14}}{2} & -\frac{d_{14}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \end{pmatrix}$$

Hieraus ist ohne weiters ersichtlich, dass im orthoaxialen Schermodus keine Störung durch Transversalempfindlichkeit auftritt und umgekehrt, da bei $\alpha' = 45^\circ$ die Krafteinleitung in Diagonalebenen erfolgt, die beim orthoaxialen Schereffekt definitionsgemäss mit den Elektrodenflächen identisch sind und beim Transversaleffekt senkrecht zu letzteren stehen.

Um ein Kristallelement zu erhalten, das auch piezoelektrische Longitudinalempfindlichkeit besitzt, ist eine weitere Rotation um eine transformierte Achse notwendig.

Figur 2 zeigt, wie das bereits um die X-Achse gedrehte Kristallelement (11) durch eine zweite Rotation bezüglich der transformierten Y'-Achse um den Winkel β in das nunmehr zu allen kristallographischen Hauptachsen schief stehende Kristallelement (12) übergeht. Man erhält die folgenden, für alle sechs erwähnten Kristallklassen mit rein synaxialem Scherpiezoeffekt gültigen Formeln für das zuerst um die Achse X, dann um Y' rotierte Kristallelement (12):

$$\begin{aligned} d''_{11} &= -(d_{14} + d_{25} + d_{36}) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin^2 \beta \\ d''_{12} &= d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ d''_{13} &= -d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^3 \beta + (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin^2 \beta \\ d''_{14} &= d_{14} \cdot (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \cdot \cos^2 \beta - (d_{36} \cdot \cos^2 \alpha - d_{25} \cdot \sin^2 \alpha) \sin^2 \beta \\ d''_{15} &= 2 \cdot d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta - (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot (\sin \beta - 2 \cos^2 \beta \cdot \sin \beta) \\ d''_{16} &= (d_{25} \cdot \sin^2 \alpha - d_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) - d_{36} \cdot \cos^2 \alpha) \cos \beta \cdot \sin \beta \\ d''_{21} &= (d_{36} \cdot \sin^2 \alpha - d_{25} \cos^2 \alpha) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \\ d''_{22} &= 0 \\ d''_{23} &= (d_{25} \cdot \cos^2 \alpha - d_{36} \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \\ d''_{24} &= (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ d''_{25} &= (d_{25} \cdot \cos^2 \alpha - d_{36} \cdot \sin^2 \alpha) (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \\ d''_{26} &= (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ d''_{31} &= (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta - d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin^3 \beta \\ d''_{32} &= d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ d''_{33} &= -(d_{14} + d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \\ d''_{34} &= (d_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) - d_{25} \cdot \sin^2 \alpha + d_{36} \cdot \cos^2 \alpha) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d''_{35} &= (d_{25} + d_{36}) \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot (2 \cos \beta \cdot \sin^2 \beta - \cos \beta) + 2 \cdot d_{14} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin^2 \beta \\ d''_{36} &= d_{14} \cdot (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha) \cdot \sin^2 \beta - (d_{36} \cdot \cos^2 \alpha - d_{25} \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \cos^2 \beta \end{aligned}$$

Eine Analyse dieser Gleichungen lässt leicht erkennen, dass die piezoelektrische Longitudinalempfindlichkeit bei einem kubisch-polaren Kristall dann Maximalwerte erreicht, wenn einerseits $\cos \alpha = \sin \alpha = \sqrt{2}/2$ und andererseits entweder $\sin \beta = \sqrt{3}/3$ oder $\sin \beta = \sqrt{2}/3$ ist. Dies entspricht $\alpha = 45^\circ$ und $\beta = 35,26439^\circ$ bzw. dem Komplementwinkel $\beta = 54,73561^\circ$. Diese beiden Orientierungen sind geometrisch äquivalent und entsprechen Kristallelementen, deren Longitudinalrichtung, die bekanntlich mit der Krafteinleitungsrichtung identisch ist, parallel zu einer Raumdiagonalen eines hauptachsenparallelen Kristallwürfels verläuft. Die Elektrodenflächen eines Longitudinalelementes stehen definitionsgemäss senkrecht auf der Krafteinleitungsrichtung, man kann damit die Schnittwinkel $\alpha', \beta', \gamma = \beta'$ der Elektrodenflächen bezüglich der kristallographischen Hauptachsen X, Y, Z mittels einer elementaren trigonometrischen Umformung auch darstellen durch

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arcsin \sqrt{p} \text{ und} \\ \beta' &= \pm \frac{1}{2} \arcsin p \end{aligned}$$

worin der Parameter p die Werte $\frac{1}{3}$ für den longitudinalen, 1 für den transversalen und 0 für den orthoaxialen Piezoeffekt hat. Damit sind für kubisch polare Kristalle sämtliche Orientierungen maximaler piezoelektrischer Empfindlichkeit festgelegt, denn aus der kubischen Symmetrie folgt zwangsläufig die Äquivalenz bei zyklischer Vertauschung der Orientierungswinkel.

Die technische Verwendbarkeit eines neuen Kristallschnittes ist nicht a priori gesichert durch die Ermittlung einer Orientierung maximaler Empfindlichkeit. Die Praxis verlangt zusätzlich wie erwähnt, dass Störeffekte wie Seitenempfindlichkeit eines Messwandlerelementes minimal sind. Zur Abklärung dieser Frage genügt es, die Winkel $\alpha = 45^\circ$ und $\beta = 35,26439^\circ$ in die Formeln für die piezoelektrischen Koeffizienten des doppelt rotierten Kristallelementes einzusetzen, und man erhält für alle kubisch-polaren Materialien:

$$d''_{m\mu} = d_{14} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{6} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Offensichtlich weist ein um die Achsen X und Y' rotierter Kristallschnitt in der Z''-Richtung maximale Longitudinalempfindlichkeit auf und ein solcherart geschnittenes Kristallelement hat zudem den Vorteil, dass Scherkräfte um jede beliebige Achse (infolge $d''_{34} = d''_{35} = d''_{36} = 0$) nicht als Störsignale in Erscheinung treten können.

Als Ausführungsbeispiel sei ein piezoelektrisches Longitudinalwandlerelement für Anwendung in Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmern beschrieben, das aus Wismutgermaniumoxid besteht. Dieses Material lässt sich in Form grosser Einkristalle nach dem Czochralski-Verfahren aus der Schmelze züchten. Dabei kann die Lage einer kristallographischen Achse bereits durch den Keimling festgelegt werden. Da für piezoelektrische Messwandler die Anforderungen an die Orientierungspräzision relativ hoch sind, ist es zweckmässig, die genaue Achsenlage röntgenographisch zu bestimmen. Zur Erreichung maximaler Longitudinalempfindlichkeit wird das Kristallelement derart aus dem Zuchtkristall geschnitten, dass die Orientierungswinkel α und β gemäss Figur 2 45° und $35,26439^\circ$ betragen. Die piezoelektrischen Koeffizienten lassen sich dann leicht berechnen aus der Materialkonstante von Wismutgermaniumoxid, also den Piezokoeffizienten $d_{14} = 3,88 \cdot 10^{-11} \text{ AsN}^{-1}$.

Man erhält für die piezoelektrische Longitudinalempfindlichkeit in der Z''-Achse:

$$d''_{33} = -22,4 \text{ pC/N}$$

Die übrigen piezoelektrischen Koeffizienten haben die Werte

$$d''_{11} = -d''_{12} = -15,8 \text{ pC/N}$$

$$d''_{15} = d''_{24} = +22,4 \text{ pC/N}$$

$$d''_{26} = +31,7 \text{ pC/N}$$

$$d''_{31} = d''_{32} = +11,2 \text{ pC/N}$$

Das erfindungsgemässe Messwandlerelement aus Wismutgermaniumoxid bietet gegenüber einem konventionellen Longitudinalquarz somit den Vorteil einer um den Faktor

9,7mal höheren Empfindlichkeit bei Ladungsverstärkung.

Wismutgermaniumoxid hat zudem eine um den Faktor 8,7mal höhere Dielektrizitätskonstante als Quarz. Dadurch bietet ein Longitudinalelement in Miniaturaufnehmern mit integrierten Impedanzwandler-Vorverstärkern zusätzliche Vorteile, wenn die Nebenschlusskapazitäten in der Grössenordnung der Kristallkapazität liegen. Ausserdem kann Wismutgermaniumoxid bei höheren Temperaturen eingesetzt werden, denn im Gegensatz zu Quarzkristallen neigt es nicht zur Verzwillingung und zu Kristallgitterumwandlungen. Es hat auch keinen Curiepunkt wie ferroelektrische Keramiken.

Die Formgebung eines erfindungsgemässen Kristallelementes braucht selbstverständlich nicht der in Figur 2 zur besseren Veranschaulichung der Achsenlagen gezeichneten Quaderform zu entsprechen. Da ja alle Orientierungsformeln von den geometrischen Abmessungen unabhängig sind, hat zum Beispiel eine Abrundung der Ecken keinen Einfluss auf die Piezoelektrizität. In Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmern sind beispielsweise je nach Konstruktion dünne Kreisscheiben mit Isolierfasen oder auch Lochscheiben besonders zweckmässig.

In der Praxis werden die Krafteinleitungsflächen vorzugsweise plan parallel bearbeitet. Im besprochenen Anwendungsbeispiel eines Longitudinalwandlerelementes sind dieselben identisch mit den Elektrodenflächen. Sie stehen senkrecht zur transformierten Achse Z'', welche mit der Krafteinleitungsrichtung übereinstimmt. Die Elektrodenflächen werden meist metallisiert, beispielsweise durch Hochvakuumbedampfung mit Gold oder durch Kathodenzerstäubung von Tantal-Platin.

Das erläuterte Beispiel ist nicht als eine Einschränkung der Anwendungsmöglichkeiten der Erfindung zu verstehen, die abgeleiteten Formeln zeigen vielmehr, dass gemäss der gegebenen technischen Lehre piezoelektrische Kristallelemente für Longitudinal-, Transversal- und orthoaxiale Schermesswandler in Schnittorientierungen maximaler Empfindlichkeit hergestellt werden können, aus jedem Material, das die genannten kristallographischen Symmetriebedingungen erfüllt.

Fig. 1

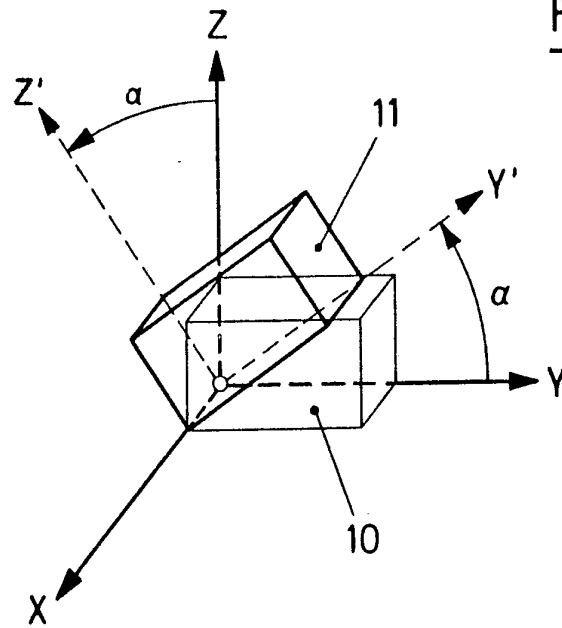


Fig. 2

