

DIN EN 62047-30

ICS 31.080.01; 31.220.01

Einsprüche bis 2016-09-22

Entwurf

**Halbleiterbauelemente –
Bauelemente der Mikrosystemtechnik –
Teil 30: Messverfahren für Kenngrößen der elektromechanischen
Energiewandlung bei piezoelektrischen MEMS-Dünnschichten
(IEC 47F/241/CD:2016)**

Semiconductor devices –
Micro-electromechanical devices –
Part 30: Measurement methods of electro-mechanical conversion characteristics of MEMS
piezoelectric thin film
(IEC 47F/241/CD:2016)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-07-22 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 34 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
1 Anwendungsbereich.....	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Messaufbau der piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht.....	5
4.1 Allgemeines	5
4.1.1 Einspannvorrichtung.....	7
4.1.2 Linearantrieb.....	7
4.1.3 Biege-Messeinrichtung.....	8
4.1.4 Elektrische Messgeräte	8
4.1.5 Stromversorgung	8
5 Zu messende Dünnschicht.....	8
5.1 Allgemeines	8
5.2 Messprinzip	8
5.3 Messdurchführung für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten.....	9
5.4 Messdurchführung für den inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten	9
6 Messprotokoll	9
Anhang A (informativ/normativ) Beispiel zum Messverfahren der piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht.....	11
A.1 Allgemeines	11
A.2 Verfahren zur Probenpräparation.....	11
A.3 Messdurchführung.....	11
A.3.1 Durchführung der Messung für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten	11
A.3.2 Durchführung der Messung für den inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten	13
A.4 Messprotokoll	15
A.5 Gleichung zur Ebene der neutralen Faser	16
Literaturhinweise.....	17
 Bilder	
Bild 1 – Messaufbau für den direkten bzw. inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten einer piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht.....	6
Bild A.1 – Auslenkung der Spitze und berechneter direkter transversaler piezoelektrischer Koeffizient.....	13
Bild A.2 – Eingangs-Spannung und berechneter inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient	14
 Tabellen	
Tabelle 1 – Symbole und Bezeichnungen zum Messaufbau	7
Tabelle A.1 – Vorbehandlungsbedingungen zur Polarisierung	12
Tabelle A.2 – Werkstoffeigenschaften für die Berechnung des direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten.....	12

	Seite
Tabelle A.3 – Ausgangsspannung und berechneter transversaler piezoelektrischer Koeffizient	12
Tabelle A.4 – Werkstoffeigenschaften für die Berechnung des inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten.....	14
Tabelle A.5 – Auslenkung der Biegebalken-Spitze und berechneter transversaler piezoelektrischer Koeffizient.....	14

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 47F/241/CD:2016 „Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 30: Measurement methods of electro-mechanical conversion characteristics of MEMS piezoelectric thin film“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom SC 47F „Micro-electromechanical systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 631 „Halbleiterbauelemente“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

**Halbleiterbauelemente –
Bauelemente der Mikrosystemtechnik –
Teil 30: Messverfahren für Kenngrößen der elektromechanischen
Energiewandlung bei piezoelektrischen MEMS-Dünnschichten**

1 Anwendungsbereich

In dieser Internationalen Norm sind sowohl Messverfahren für Kenngrößen der elektromechanischen Energiewandlung bei piezoelektrischen Dünnschichten (siehe Tabelle 1), welche in Mikrosensoren und -aktoren verwendet werden, als auch Schemata für die Messprotokolle, um die wesentlichen Kenngrößen für den Konsumgüterbereich, Industrie- oder andere Anwendungen zu bestimmen. Die Norm ist auf piezoelektrische Dünnschichten, welche mithilfe von Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik (MEMS-Prozessen) hergestellt werden, anwendbar.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60483-1:1976, *Guide to dynamic measurements of piezoelectric ceramics with high electromechanical coupling*

EN 50324-2, *Piezoelectric properties of ceramic materials and components – method of measurement – Low power*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Unimorph-Balken

balkenförmiger Probekörper, welcher vor dem Einspannen aus einer piezoelektrischen Dünnschicht auf einem Substrat besteht

3.2

direkter transversaler piezoelektrischer Koeffizient

direkter piezoelektrischer Querkoeffizient

transversaler piezoelektrischer Koeffizient der piezoelektrischen Dünnschicht, welcher aus der erzeugten Ladung unter einer periodischen Dehnung berechnet wird

3.3

inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient

inverser piezoelektrischer Querkoeffizient

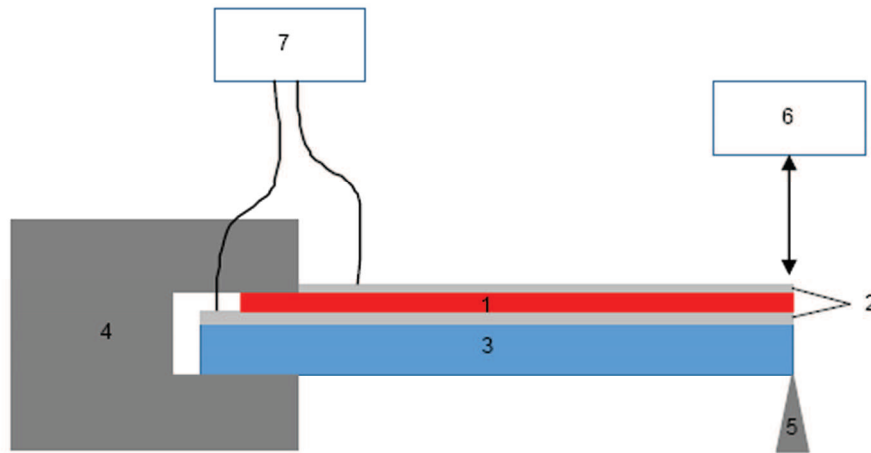
transversaler piezoelektrischer Koeffizient der piezoelektrischen Dünnschicht, welcher aus der Auslenkung des mit einer periodischen elektrischen Spannung beanspruchten Unimorph-Biegebalkens berechnet wird

4 Messaufbau der piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht

4.1 Allgemeines

Diese Messverfahren bezüglich der transversalen piezoelektrischen Eigenschaften sind auf den Biegebalken (Cantilever) anwendbar. Im Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt, der aus Funktionsblöcken oder Komponenten des Messaufbaus hinsichtlich des direkten bzw. inversen transversalen piezoelektrischen

Koeffizienten von piezoelektrischen MEMS-Dünnschichten besteht. Einzelheiten zu den Funktionsblöcken und Komponenten, die in der Legende angegeben sind, werden nachfolgend Abschnitten in 4.1.1 bis 4.1.5 beschrieben.



Legende

- 1 zu messende Dünnschicht
- 2 Elektroden
Die Elektroden sind mit der Ober- bzw. Unterseite der Oberfläche der zu messenden Dünnschicht verbunden.
- 3 Substrat
- 4 Einspannvorrichtung
- 5 Linearantrieb (nicht erforderlich für Messung des inversen Piezokoeffizienten)
- 6 Auslenkungs-Messeinrichtung
- 7 Elektrische Messgeräte (z. B. Spannungsmessgerät, Ladungsmessgerät, Strommessgerät, Oszilloskop, FFT oder Lock-in-Verstärker) für die Messung des direkten Piezokoeffizienten. Stromversorgungsquelle (Funktionsgenerator und Verstärker) für die Messung des inversen Piezokoeffizienten

Bild 1 – Messaufbau für den direkten bzw. inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten einer piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht

Tabelle 1 – Symbole und Bezeichnungen zum Messaufbau

	Symbol	Einheit	Bezeichnung
Maße des Biegebalken-Prüflings	l	m	Länge des Biegebalkens
	w	m	Breite des Biegebalkens
	h_s	m	Substratdicke des Biegebalkens
	h_p	m	Dicke der piezoelektrischen Dünnschicht
Elektromechanische Konversions-Kennwerte	$e_{31,f}$	C/m^2	effektiver transversaler piezoelektrischer Koeffizient
	$e_{31,f}^d$	C/m^2	effektiver direkter transversaler piezoelektrischer Koeffizient
	$e_{31,f}^c$	N/Vm	effektiver inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient
	$e_{31,f(0)}^c$	N/Vm	extrapolierter effektiver inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient (bei $U_{in} = 0 V$)
	$e_{31,f(min)}^c$	N/Vm	kleinster effektiver inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient (bei der kleinsten U_{in})
	$e_{31,f(max)}^c$	N/Vm	größter effektiver inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient
	d_{31}	m/V	transversaler piezoelektrischer Koeffizient (d-Form)
Elektrische Kennwerte	C	F	Kapazität der piezoelektrischen Dünnschicht
	U_{out}	V	Ausgangsspannung
	U_{in}	V	Eingangs-Steuerspannung, Spitze-Spitze
	$\tan \delta$		dielektrischer Verlustwinkel
Mechanische Kennwerte	s_{11}^E, s_{12}^E	m^2/N	elastische Nachgiebigkeit der piezoelektrischen Dünnschicht
	D_{in}	m	aufgeprägte Auslenkung der Spitze des Biegebalkens
	D_{out}	m	erzeugte Auslenkung der Spitze des Biegebalkens
	E_s	N/m^2	Elastizitätsmodul des Biegebalkens-Substrats
	ν_s		Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl) des Biegebalkens-Substrats
	E_p	N/m^2	Elastizitätsmodul der piezoelektrischen Dünnschicht
	y_c	m	Position der neutralen Faser des Unimorph-Biegebalkens bezogen auf dessen Unterseite

4.1.1 Einspannvorrichtung

Die Einspannvorrichtung hält ein Ende des Unimorph-Balkens fest, um somit einen Biegebalken zu bilden.

ANMERKUNG Der Einspannzustand wird mithilfe des Q-Faktors bestätigt.

4.1.2 Linearantrieb

Der Linearantrieb erzeugt mit einer Dreieck-Schwingungsform die Auslenkung der Biegebalken-Spitze. Er wird bei der direkten piezoelektrischen Messungen verwendet.

4.1.3 Biege-Messeinrichtung

Mit der Biege-Messeinrichtung wird die Auslenkung des Biegebalkens gemessen.

4.1.4 Elektrische Messgeräte

Bei Messungen zum direkten piezoelektrischen Effekt erzeugt die unter Messbedingungen beanspruchte Dünnschicht elektrische Energie zwischen den Elektroden. Mit den elektrischen Messgeräten (d. h., Spannungsmessgerät, Ladungsmessgerät, Strommessgerät, Oszilloskop, FFT oder Lock-in-Verstärker) wird die erzeugte elektrische Spannung, Strom oder Ladung synchron mit dem Linearantrieb gemessen.

4.1.5 Stromversorgung

Bei den Messungen zum inversen piezoelektrischen Effekt wird mithilfe der Stromversorgung ein elektrisches Eingangs-Steuersignal zwischen der Ober- und Unterelektrode angelegt. Das sinusförmige Eingangs-Steuersignal des Funktionsgenerators wird über einen Leistungsverstärker verstärkt.

5 Zu messende Dünnschicht

5.1 Allgemeines

Die oberliegende Oberfläche der piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht ist mit der Oberelektrode kaschiert, um die Ausgangsspannung bei der direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizientenmessung zu erfassen, oder die Eingangs-Steuerspannung bei der inversen piezoelektrischen Koeffizientenmessung bereitzustellen.

Die Dicke des Grundwerkstoffs für den Unimorph-Balken muss viel größer als die Dicke der zu messenden Dünnschicht sein und zwar üblicherweise mindestens 100mal größer, um die Ebene der neutralen Faser des Unimorph-Balkens der halben Substratdicke anzunähern. Die theoretische mathematische Gleichung der neutralen Faser ist in A.5 beschrieben. (Diese Näherung wird in der Stoney-Gleichung verwendet.)

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen sollte die Dicke der Elektroden viel kleiner als die Dicke der zu messenden Dünnschicht sein.

ANMERKUNG 2 Bei ferroelektrischen Dünnschichten ist zur Maximierung von deren piezoelektrischen Kennwerten eine Vorbehandlung zur Polarisierung notwendig, um die Polarisierung auszurichten.

5.2 Messprinzip

Im Allgemeinen ist der effektive transversale piezoelektrische Koeffizient einer piezoelektrischen Dünnschicht wie folgt definiert [1] bis [4].

$$e_{31,f} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E + s_{12}^E} \quad (1)$$

Der effektive transversale piezoelektrische Koeffizient des direkten piezoelektrischen Effekts ($e_{31,f}^d$) wird wie folgt berechnet.

$$e_{31,f}^d = \frac{4lC}{3wh_s(1-\nu_s)} \frac{U_{out}}{D_{in}} \quad (2)$$

Der effektive transversale piezoelektrische Koeffizient des inversen piezoelektrischen Effekts ($e_{31,f}^c$) wird wie folgt berechnet.

$$e_{31,f}^c = \frac{E_s h_s^2}{3l^2(1-\nu_s)} \frac{D_{out}}{U_{in}} \quad (3)$$

ANMERKUNG 1 Der inverse piezoelektrische Effekt hängt wegen des von außen wirkenden piezoelektrischen Beitrags sehr stark von der Eingangs-Spannung ab. Deswegen müssen die drei transversalen piezoelektrischen Koeffizienten $e_{31,f}^c(\min)$, $e_{31,f}^c(\max)$ und $e_{31,f}^c(0)$ auf der Grundlage der inversen piezoelektrischen Messungen bestimmt werden.

ANMERKUNG 2 In den Messungen sind $e_{31,f}^c(\min)$ der Kleinstwert von $e_{31,f}^c$ und $e_{31,f}^c(\max)$ der Höchstwert von $e_{31,f}^c$. Die Eingangs-Spannung U_{in} in $e_{31,f}^c(\min)$ sollte fünfmal kleiner als die Eingangs-Spannung U_{in} in $e_{31,f}^c(\max)$ sein.

ANMERKUNG 3 $e_{31,f}^c(0)$ ist der Wert von $e_{31,f}^c$ bei einer Eingangs-Spannung $U_{in} = 0$ V. Dieser Wert kann anhand der Extrapolationskurve des Verhältnisses zwischen $e_{31,f}^c$ und U_{in} erhalten werden. Die Gleichung für die Extrapolationskurve kann vom Prüfenden ermittelt werden, allerdings sollte sie im Messprotokoll vermerkt werden.

ANMERKUNG 4 Die Resonanzfrequenz und der Q-Faktor wird mithilfe der Frequenzantwort auf die Auslenkung des Unimorph-Biegebalkens gemessen, wobei eine sinusförmige Spannung zwischen Unter- und Oberelektrode angelegt wird.

ANMERKUNG 5 Die relative Permittivität und der dielektrische Verlust wird mithilfe eines LCR-Messgerätes oder eines Impedanz-Analysegerätes gemessen, wobei üblicherweise eine Frequenz von 1 kHz verwendet wird.

5.3 Messdurchführung für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten

Die Messung wird entsprechend der folgenden Schritte durchgeführt.

- Es sind die Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchte zu messen;
- Ein Ende des zu messenden Unimorph-Balkens mit der Dünnschicht ist einzuspannen, um einen Biegebalken zu erstellen.
- Der Linearantrieb ist an die Spitze des Biegebalkens zu positionieren und die Spitze des Biegebalkens ist mit dreieckförmiger Welle zum Schwingen zu bringen.
- Die Auslenkung der Biegebalken-Spitze ist zu messen.
- Die Ausgangsspannung der unter Messbedingungen beanspruchten Dünnschicht ist zu messen.

5.4 Messdurchführung für den inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten

Die Messung wird entsprechend der folgenden Schritte durchgeführt.

- Es sind die Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchte zu messen.
- Ein Ende des zu messenden Unimorph-Balkens mit der Dünnschicht ist einzuspannen, um einen Biegebalken zu erstellen.
- An der zu messenden Dünnschicht ist eine unipolare sinusförmige Spannung anzulegen, um den Biegebalken zum Schwingen zu bringen. Die verwendete elektrische Spannung hat die gleiche Richtung wie die Vorbehandlung zur Polarisierung, falls der Probekörper eine vorbehandelt wurde.
- Die Eingangs-Spannung der unter Messbedingungen beanspruchten Dünnschicht ist zu messen.
- Die Auslenkung der Biegebalken-Spitze ist zu messen.
- Die Eingangs-Spannung schwingt mehr als drei Perioden lang, und die Daten der letzten Schwingungsperiode sind für die Berechnung von $e_{31,f}^c$ zu verwenden.

6 Messprotokoll

Das Messprotokoll muss mindestens die folgenden Angaben enthalten.

- Pflichtangaben
 - Länge, Breite und Dicke des Unimorph-Balkens

- b) Länge des Biegebalkens
- c) Zusammensetzung und Dicke der zu messenden Dünnschicht
- d) Beschichtungsverfahren der Dünnschicht
- e) Substratwerkstoff und dessen Eigenschaften
 - Elastizitätsmodul, Poissonzahl und Kristallorientierung im einkristallinen Fall
- f) Elektrische Eigenschaften der zu messenden Dünnschicht
 - Kapazität und dielektrischer Verlust
- g) Umgebungsbedingungen während der Messung (Temperatur und relative Luftfeuchte)
- h) Messbedingungen für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten
 - Aufgeprägte Auslenkung der Biegebalken-Spitze, Schwingungsform und Frequenz, die für den Linearantrieb verwendet werden
- i) Messbedingungen für den inversen transversalen piezoelektrischen Koeffizienten
 - Eingangs-Spannung, Schwingungsform und Frequenz, die für die zu messende Dünnschicht verwendet werden
- j) Bedingungen für die Polarisations-Vorbehandlung
 - Spannung
 - Polarität
 - Temperatur
 - Schwingungsform
 - Dauer der Polarisations-Vorbehandlung
 - Dauer von der Polarisation bis zur Messung
- k) Messgrößen
 - $e^d_{31,f}$
 - $e^c_{31,f}(\min)$
 - $e^c_{31,f}(\max)$
- Optionale Angaben
 - a) Bedingungen für die Polarisationsvorbehandlung (entgegengesetzte Polarisationsrichtung bezogen auf die Pflichtangaben)
 - Spannung
 - Temperatur
 - Schwingungsform
 - Dauer der Polarisations-Vorbehandlung
 - Dauer von der Polarisation bis zur Messung
 - b) Messgrößen (entgegengesetzte Polarisationsrichtung bezogen auf die Pflichtangaben)
 - $e^d_{31,f}$
 - $e^c_{31,f}(\min)$
 - $e^c_{31,f}(\max)$
 - c) Extrapolierter inverser transversaler piezoelektrischer Koeffizient bei 0 V
 - $e^c_{31,f}(0)$
 - Gleichung der Extrapolierungskurve und Polarisationsrichtung
 - d) Resonanz des Unimorph-Balkens
 - Resonanzfrequenz
 - Q-Faktor

Anhang A

(informativ/normativ)

Beispiel zum Messverfahren der piezoelektrischen MEMS-Dünnschicht

A.1 Allgemeines

Im Anhang A wird ein Beispiel zum Messverfahren für die piezoelektrische MEMS-Dünnschicht beschrieben. In A.2 bis A.5 sind die Verfahren zur Probenpräparation, Bedingungen für die Vorbehandlung zur Polarisierung, Werkstoffeigenschaften für die Berechnung des transversalen piezoelektrischen Koeffizienten, die Messdurchführung und die Messergebnisse zusammengefasst.

A.2 Verfahren zur Probenpräparation

Die folgenden Schritte beschreiben die Präparationsverfahren für die Probe (siehe Bild 1).

- Die Probe ist eine piezoelektrische PZT-Dünnschicht, welche mittels HF-Magnetron-Sputterns auf dem Unimorph-Balken, der ein einkristallines $\langle 100 \rangle$ -Siliziumsubstrat mit einer Dicke von 625 μm ist, abgeschieden wurde.
- Eine Unterelektrode aus Platin mit einer Titan-Haftschrift wurde vorher auf dem Substrat vorbereitet.
- Eine Oberelektrode aus Platin wird auf der Oberfläche der PZT-Dünnschicht erstellt.
- Die Dicken der PZT-Dünnschicht, der Platin-Unterelektrode einschließlich der Titan-Haftschrift und der Platin-Oberelektrode betragen 3 μm , 0,2 μm bzw. 0,05 μm .
- Die Probe wird mit einer Trennsäge entlang der $\langle 110 \rangle$ -Kristallorientierung zu einer Balkenform mit 20 mm Länge und 2 mm Breite zugeschnitten.
- Ein Ende des Unimorph-Balkens wird in der Einspannvorrichtung befestigt.
- Auf die Elektroden werden Golddrähte mittels Silberleitpaste befestigt.

A.3 Messdurchführung

A.3.1 Durchführung der Messung für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten

Folgende Schritte zeigen beispielhaft die Messdurchführung für den direkten transversalen piezoelektrischen Koeffizienten.

- Der Probekörper ist im Messaufbau, so wie in Bild 1 dargestellt, positioniert, und die Spitze des Linearantriebs ist auf das Ende des Biegebalkens von der Unterseite her aufgesetzt.
- Die auf den Elektroden gebondeten Golddrähte sind mit dem Spannungsmessgerät (Oszilloskop, FFT oder Lock-in-Verstärker) verbunden.
- Falls erforderlich ist vor der Messung eine Vorbehandlung zur Polarisierung durchzuführen. Die Bedingungen für die Vorbehandlung zur Polarisierung sind in Tabelle A.1 angegeben.
- In der Tabelle A.2 sind die Abmessungen des Biegebalkens sowie notwendige Kennwerte für die Berechnung des transversalen piezoelektrischen Koeffizienten angegeben.
- Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl des Biegebalkens werden auf Basis der Referenzwerte für Silizium mit $\langle 110 \rangle$ -Kristallorientierung verwendet.
- Die aufgeprägte Auslenkung der Biegebalken-Spitze wird mithilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers gemessen.
- Die aufgeprägte Auslenkung variiert im Bereich von 1 μm bis 23,5 μm bei einer Schwingungsfrequenz von 5 Hz.