

J. Tichý · G. Gautschi

Piezoelektrische Meßtechnik

Physikalische Grundlagen,
Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmer,
Verstärker

Mit 145 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York 1980

Inhaltsverzeichnis

	Symbolverzeichnis	XIV
1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Piezoelektrizität	4
2.1	Der direkte und der reziproke piezoelektrische Effekt	4
2.2	Die Entdeckung der Piezoelektrizität	5
2.3	Entwicklung der technischen Anwendung der Piezoelektrizität ...	5
2.4	Entwicklung der Theorie des piezoelektrischen Effektes	7
3	Grundlagen der phänomenologischen Kristallphysik	8
3.1	Die Struktur der Kristalle	8
3.1.1	Die Symmetrieeigenschaften des Translationsgitters	9
3.1.2	Bravais-Gitter	11
3.1.3	Raumgruppen	13
3.1.4	Symmetrieklassen	13
3.2	Einführung in die Tensorrechnung	13
3.2.1	Skalare und Vektoren	15
3.2.2	Die Beziehungen zwischen den Vektorkoordinaten in zwei verschiedenen Grundsystemen mit gemeinsamem Koordinatenursprung ..	15
3.2.3	Die kovarianten und kontravarianten Basisvektoren (Koordinaten)	18
3.2.4	Die Metrik-Koeffizienten	20
3.2.5	Anschauliche Bedeutung der kontravarianten und kovarianten Koordinaten	21
3.3	Einige Anwendungen der Tensorrechnung in der Kristallphysik ..	22
3.3.1	Das reziproke Gitter und die Millerschen Indizes	22
3.3.2	Das kartesische Koordinatensystem	26
3.3.3	Dielektrische Permittivität als Beispiel eines Tensors zweiter Stufe .	27

3.3.4	Tensoren p -ter Stufe	30
3.3.5	Symmetrischer und antisymmetrischer Tensor zweiter Stufe	30
3.3.6	Die Hauptachsentransformation von symmetrischen Tensoren zweiter Stufe	31
4	Elastische Eigenschaften der Kristalle	33
4.1	Der Verzerrungszustand	33
4.2	Der Spannungszustand	40
4.3	Das Hookesche Gesetz	44
4.4	Transformationsgleichungen für elastische Konstanten	48
4.5	Der Youngsche Modul und die Poissonsche Zahl	49
4.6	Thermodynamik der Deformation	50
5	Grundlagen der Thermodynamik der piezoelektrischen Kristalle	54
5.1	Dielektrische Eigenschaften	54
5.2	Innere Energie des elastischen Dielektrikums	55
5.3	Lineare Zustandsgleichungen	56
5.4	Materialkonstanten	59
5.5	Beziehungen zwischen den Materialkonstanten	63
5.6	Die piezoelektrischen Konstanten	67
5.7	Die vier Arten des piezoelektrischen Effektes	70
5.8	Der piezoelektrische Effekt und die Kristallsymmetrie	71
5.9	Transformationsgleichungen für piezoelektrische Konstanten	73
5.10	Der pyroelektrische Effekt	74
5.11	Der hydrostatische piezoelektrische Effekt	77
5.12	Ferroelektrizität	77
5.12.1	Besondere Eigenschaften der Ferroelektrika	78
5.12.2	Thermodynamische Theorie	80
5.12.3	Mikrophysikalisches Modell zur Erklärung der Ferroelektrizität ..	86
5.12.4	Antiferroelektrizität	91
5.13	Ferroika	92
5.14	Nichtlineare Effekte	94
5.14.1	Der elektrooptische Effekt	96
5.14.2	Die Elektrostriktion	97
5.14.3	Der elektroelastische Effekt	98
5.14.4	Elastische Konstanten dritter Ordnung	99
6	Piezoelektrische Materialien	100
6.1	Allgemeine Anforderungen an piezoelektrische Materialien für Aufnehmer	100
6.2	Quarz	101

6.2.1	Wahl des Koordinatensystems	102
6.2.2	Physikalische Eigenschaften	104
6.2.3	Synthetische Quarzkristalle	106
6.2.4	Zwillingsbildung	107
6.2.5	Unterdrückung der sekundären Zwillingsbildung	112
6.2.6	Temperaturabhängigkeit der piezoelektrischen Konstanten	114
6.2.7	Nichtlineare elektromechanische Eigenschaften des α -Quarzes	115
6.2.8	Piezoelektrische Eigenschaften des β -Quarzes	116
6.3	Turmalin	117
6.4	Einige andere piezoelektrische Einkristalle	120
6.5	Piezoelektrische Texturen	122
6.5.1	Piezoelektrische Keramiken	122
6.5.2	Piezoelektrizität in dünnen Schichten von Polymeren	127
7	Grundbegriffe der piezoelektrischen Meßtechnik	128
7.1	Wahl der Begriffe und Definitionen	128
7.2	Definition eines Aufnehmers	129
7.3	Meßtechnische Eigenschaften der Aufnehmer	130
7.3.1	Statische Eigenschaften	130
7.3.1.1	Eigenschaften, die sich auf die Meßgröße beziehen	130
7.3.1.2	Eigenschaften der Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	131
7.3.1.3	Einflüsse der Temperatur auf die Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	135
7.3.1.4	Einflüsse von Beschleunigung, Vibration und Schock auf die Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	139
7.3.2	Dynamische Eigenschaften	140
7.3.3	Elektrische Eigenschaften	143
7.3.4	Einflüsse der Aufnehmermontage	144
7.3.5	Lebensdauer des Aufnehmers	144
7.3.6	Übersprechen	145
8	Piezoelektrische Aufnehmer	146
8.1	Einführung	146
8.2	Grundsätzliches zur Kraftmessung	147
8.3	Prinzipieller Aufbau der Aufnehmer	148
8.4	Allgemeine Übersicht über den praktischen Aufbau der Aufnehmer	154
8.5	Bauteile der Aufnehmer	156
8.5.1	Aufnehmerelemente	156

8.5.1.1	Quarz	157
8.5.1.2	Turmalin	158
8.5.1.3	Piezoelektrische Keramiken	158
8.5.2	Elektroden	158
8.5.3	Isolationsmaterialien	159
8.5.4	Vorspannelemente	159
8.5.5	Aufnehmergehäuse	160
8.5.6	Stecker	160
9	Aufnehmer für Kräfte und Momente	162
9.1	Allgemeines	162
9.2	Aufnehmer für Kräfte	162
9.3	Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer	169
9.4	Aufnehmer für Momente	170
9.5	Meßtechnische Besonderheiten von Ein- und Mehrkomponenten-Kraftmeßsystemen	171
9.6	Einbau von Kraftaufnehmern	174
9.7	Sechskomponenten-Kraftmessung	175
9.8	Grundlagen der Kalibrierung von Kraftaufnehmern	181
10	Druckaufnehmer	184
10.1	Allgemeines	184
10.2	Aufbau piezoelektrischer Druckaufnehmer	185
10.3	Niederdruck-Aufnehmer	187
10.4	Druckaufnehmer für allgemeine Anwendungen	188
10.5	Hochdruck-Aufnehmer	189
10.6	Druckaufnehmer mit Beschleunigungskompensation	190
10.7	Druckaufnehmer für hohe Temperaturen	193
10.8	Druckaufnehmer für plastische Massen	194
10.9	Grundlagen der Kalibrierung von Druckaufnehmern	195
11	Beschleunigungsaufnehmer	197
11.1	Allgemeines	197
11.2	Grundlegende Eigenschaften von Beschleunigungsaufnehmern ...	197
11.3	Bauformen piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer	205
11.4	Besondere Eigenschaften von Beschleunigungsaufnehmern mit Auf- nehmer-elementen aus Turmalin oder piezoelektrischen Keramiken	207
11.5	Hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer	209
11.6	Beschleunigungsaufnehmer für allgemeine Anwendungen	210
11.7	Beschleunigungsaufnehmer für Schockmessungen	212

11.8	Beschleunigungsaufnehmer für hohe Temperaturen	214
11.9	Grundlagen der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern . . .	215
12	Verstärker für piezoelektrische Aufnehmer	218
12.1	Elektrische Grundlagen	218
12.1.1	Elektrische Ladung	218
12.1.2	Entladung eines Kondensators, Zeitkonstante, Isolationswiderstand	218
12.1.3	Untere Grenzfrequenz eines RC -Gliedes	220
12.1.4	Meßnullpunkt	222
12.2	Der ideale Elektrometerverstärker	222
12.3	Der reale Elektrometerverstärker	224
12.4	Der ideale Ladungsverstärker	225
12.5	Der reale Ladungsverstärker	228
12.5.1	Empfindlichkeitseinstellung, Maßstab und Meßbereich	228
12.5.2	Untere Grenzfrequenz des Ladungsverstärkers	230
12.5.3	Rückstellung und Nullpunktswahl beim Ladungsverstärker	231
12.5.4	Obere Grenzfrequenz	232
12.5.5	Quasistatisches Messen, Stabilität und Drift	233
12.5.5.1	Zeitkonstante des Gegenkopplungskreises	233
12.5.5.2	Dielektrische Nachwirkung im Gegenkopplungskondensator	233
12.5.5.3	Eingangsleckstrom	234
12.5.5.4	Nullpunktstabilität	235
12.5.5.5	Leckströme über die Isolationswiderstände im Eingangskreis infolge Offsetspannungen	235
12.5.5.6	Ausgangsspannung bei schlechter Eingangsisolation und kurzer Zeitkonstante	236
12.5.5.7	„Operate“-Sprung	237
12.5.5.8	Ladungsausgleich nach Manipulationen am Meßkreis	238
12.5.5.9	„Teildefekte“ des MOS-FET am Verstärkereingang	238
12.5.6	Kabeleinfluß	238
12.5.7	Eigenschaften der heute gebräuchlichen Eingangsstufen	239
12.5.8	Kapazitive Kopplung für Messungen bei hohen Temperaturen	239
12.5.9	Schutz des MOS-FET-Eingangs vor Überspannung	240
12.5.10	Kalibrierung von Ladungsverstärkern	241
12.6	Kabel und Stecker	243
	Literaturverzeichnis	245
	Sachverzeichnis	251