

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie der Wärmeleitung	5
2.1	Grundgleichungen	5
2.2	Elektrisch-thermische Analogie	7
2.3	Analytische Lösungsmöglichkeiten	9
2.4	Numerische Verfahren	9
2.4.1	Finite-Differenzen-Verfahren	10
2.4.2	Finite-Elemente-Methode	12
2.4.3	Ersatzquellenverfahren	13
2.4.4	Monte-Carlo-Methode	14
2.5	Vergleich der thermischen Berechnungs-Möglichkeiten	15
3	Das Diskretisierungsproblem	17
3.1	Typisches Eckenproblem	17
3.2	Analytische Lösung	17
3.2.1	Funktionentheoretische Methoden	18
3.2.2	Schwarz-Christoffelsche Transformation	19
3.3	FEM Lösung	23
3.3.1	Das Diskretisierungskriterium	24
3.3.2	Automatische Netzoptimierung	26
3.3.3	Berechnung der Testecke II	28
4	Thermische Analyse in der Leistungselektronik	31
4.1	Das Leistungsmodul	31
4.1.1	Der vertikale Aufbau	32
4.1.2	Die stationäre Temperaturverteilung	33
4.1.3	Die Wärmespreizung	36
4.1.3.1	Streifenförmige Geometrie	37
4.1.3.2	Radialsymmetrische Geometrie	38
4.1.3.3	Modellbildung	42
4.1.4	Die transiente Temperaturanalyse	46
4.1.4.1	Analytisches Randwertproblem	46
4.1.4.2	Modellbildung	48
4.1.5	Fehler durch die Anstiegsverzögerung	56
4.1.6	Temperaturabhängigkeit der Materialdaten	58

4.1.7	Prüfstrategie für Lunker in Lötungen	60
4.1.7.1	Kritische Lunkergröße	62
4.2	Vergleich von Simulation und Messung	65
4.2.1	Prüfobjekt und Randbedingungen	65
4.2.2	Ergebnis	66
4.3	Silicon-On-Insulator Devices (SOI)	67
4.3.1	Typische Bauelementstruktur	67
4.3.2	Transientes Verhalten	68
4.3.2.1	Vereinfachte eindimensionale Wärmeleitung	68
4.3.2.2	Mehrdimensionaler Wärmefluß	71
4.3.2.3	Thermische Messungen an SOI-Bauelementen	72
5	Mechanische Zustandsbeschreibung	73
5.1	Spannungen und Verzerrungen	73
5.2	Eigenspannungen	75
5.3	Elastizität	75
5.4	Plastizität	77
5.5	Kriechen	78
5.6	Werkstoffverfestigungen	78
5.7	Festigkeitshypothesen	79
5.7.1	Normalspannungshypothese	79
5.7.2	Schubspannungshypothese	80
5.7.3	Hypothese der Gestaltänderungsenergie	80
6	Mechanische Analyse in der Leistungselektronik	81
6.1	Anwendung der Finite-Elemente-Methode	81
6.1.1	Das Diskretisierungsproblem	82
6.2	Das Leistungsmodul	83
6.2.1	Analytische Lösung einer Mehrplattenstruktur	83
6.2.2	Die Grundplattenverbiegung	86
6.2.2.1	Materialien und Kennwerte	86
6.2.2.2	Ergebnisse aus FEM-Simulationen und analytischen Berechnungen	86
6.2.2.3	Praktische Ergebnisse und Gegenmaßnahmen	87
6.2.3	Aktive versus passive Temperaturlastwechsel	90
6.2.4	Eigenschaften von Keramiken	91
6.2.4.1	Alternativen	93
6.2.5	Mechanische Eigenschaften von Weichloten	93
6.2.5.1	Einfluß auf die Grundplattenverbiegung	94
6.2.5.2	Prinzip der Lebensdauerabschätzung	96
6.2.5.3	Alternativen	97

6.3	Niedertemperaturverbindungstechnik	97
6.3.1	Stand der Technik	97
6.3.2	Anwendungsbeispiel: Siliziumrunde	98
6.3.2.1	Vergleich von Messungen und Simulationen	99
7	Zusammenfassung	103
ANHANG		105
A	Liste verwendeter Formelzeichen	105
B	Temperaturabhängige Materialdaten	107
C	Beispiele für die automatische Gitteroptimierung	108
D	Elektrisch-thermische Kopplungen	113
E	Wärmespreizung bei zylinderförmiger Geometrie	114
	Quellenverzeichnis	117