



(10) **DE 11 2014 003 881 T5** 2016.05.12

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/024679**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2014 003 881.4**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP2014/061232**
(86) PCT-Anmeldetag: **30.05.2014**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **26.02.2015**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **12.05.2016**

(51) Int Cl.: **G01N 25/72 (2006.01)**
G01R 31/309 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
13181506.0 **23.08.2013** **EP**

(71) Anmelder:
DCG Systems, Inc., Fremont, Calif., US;
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE

(74) Vertreter:
Puschmann Borchert Bardehle Patentanwälte
Partnerschaft mbB, 82041 Oberhaching, DE

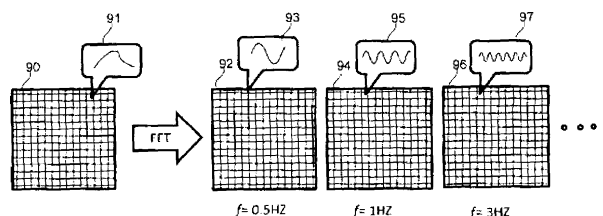
(72) Erfinder:
Schmidt, Christian, 91058 Erlangen, DE;
Meinhardt-Wildegger, Raiko, 91058 Erlangen,
DE; Altmann, Frank, 06118 Halle, DE; Naumann,
Falk, 06110 Halle, DE; Schlangen, Rudolf, San
Francisco, Calif., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Lockin-Thermographie-Verfahren und System zur Hotspot-Lokalisierung**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zum Lokalisieren eines Hotspots (27) in einer Probe (12), insbesondere einem eingekapselten Bauteil unter Test (DUT) unter Verwendung von Lockin-Thermographie (LIT), wobei wenigstens eine Wärmequelle (23) einer elektrischen Schaltung in der Probe (12) vergraben ist und den Hotspot (27) auf einem Stromfluss darin erzeugt hat, umfasst das Anlegen eines nicht-harmonischen Anregungswellen-Testsignals bei einer Lockin-Frequenz an die elektrische Schaltung der Probe (12), um die Wärmequelle (23) zur Erzeugung des Hotspots (27) zu aktivieren, das Abbilden der Probe (12) unter Verwendung eines Infrarotsensors (16), um ein IR-Bild der Probe (12) zu erhalten, während das nicht-harmonische Testsignal an die elektrische Schaltung angelegt ist; und das Detektieren eines thermischen Antwortsignals, welches aus der Bilderzeugung erhalten wurde, wobei das thermische Antwortsignal in Korrelation mit der thermischen Wärmeausbreitung in der Probe (12) steht. Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass das Anlegen des nicht-harmonischen Testsignals das Anlegen eines nicht-harmonischen Signals bei einer einzigen ausgewählten Frequenz umfasst; dass das thermische Antwortsignal einer Fourier-Transformation (FT) unterworfen wird, um das thermische Antwortsignal in ein Frequenzspektrum zu zerlegen, welches harmonische Signale eines Basis- oder höher-harmonischen Signals enthält, um dadurch eine Vielzahl von frequenzspezifischen Antwortsignalen bei mehrfachen spezifischen Frequenzen zu erhalten; dass die Phasenverschiebungen von jedem der frequenzspezifischen Antwortsignale erhalten wird; dass eine Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve aus den

Phasenverschiebungen der frequenzspezifischen Antwortsignale erhalten wird; und dass eine Vielzahl von Bildern, die jeweils einer der spezifischen Frequenzen entsprechen, angezeigt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung ist in dem Gebiet der Lokalisierung von Anomalitäten unter Verwendung der Lockin-Thermographie (LIT) und insbesondere zum Detektieren der räumlichen und tiefen Lokalisation von verschiedenen detektierten Anomalitäten. Spezielle Beispiele beziehen sich auf Verfahren und Systeme zur Lokalisierung von Anomalitäten in integrierten Halbleiterschaltungen, die im Stand der Technik als Bauteile unter Test (DUT) bezeichnet werden, durch Detektieren von Hotspots, die durch Anomalitäten in einer elektrischen Schaltung verursacht werden, die in dem DUT vergraben sind.

[0002] WO 2011/156527 A1 bezieht sich auf die dreidimensionale Hotspot-Lokalisierung unter Verwendung der Lockin-Thermographie, die sehr kleine Temperaturveränderungen über einem Muster durch direkte thermische Bilderzeugung detektieren kann, wobei eine IR-sensitive Kamera in Kombination mit einer Zweikanal-Lockin-Korrelation von Pixel zu Pixel verwendet wird. Zur quantitativen LIT-Analyse und dreidimensionalen Lokalisierung von vergrabenen heißen Quellen müssen die grundlegenden Prinzipien der Wärmewellenausbreitung und der Abhängigkeit der thermischen und geometrischen Eigenschaften der Materialschicht(en) oberhalb des Hotspot-Bereichs verstanden werden. In dem System und dem Verfahren der WO 2011/156527 A1 werden Testsignale an das Muster bei mehreren unterschiedlichen Lockin-Frequenzen angelegt, um die Phasenverschiebungswerte an den verschiedenen Lockin-Frequenzen zu bestimmen. Die Phasenverschiebung ist ein Ergebnis der thermischen Ausbreitung in dem Material und zeigt daher die Tiefe an, an der der Hotspot entstanden ist. Es wird auch eine Kurve der Frequenz gegen die Phase erhalten, aus der die Tiefe eines Defekts in dem Muster bestimmt werden kann. Diese Kurve von Frequenz gegen Phase dient dazu, unter Verwendung eines mathematischen Modells der Struktur des DUTs die genaue dreidimensionale Stelle des Defekts zu berechnen, der den Hotspot verursacht. Diese genaue Lokalisierung des Defekts kann auch dazu dienen, das Schaltungselement zu identifizieren, das den Defekt verursacht hat.

[0003] Fernando Lopez Rodriguez et al „NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF COMPOSITES MATERIALS BY PULSED-PHASE THERMOGRAPHY: DEPTH INVERSION“, Veröffentlichung von COBEM 2011, 28. Oktober 2011 (2011-10-28), Seiten 1–11, XP055082429, abgerufen aus dem Internet: URL: http://emc.ufsc.br/labtermo/publicalac_19_C0B25761_211_TIR.pdf (abgerufen am 03. Oktober 2013* Einführung, 2.2 Prinzipien der Thermographie mit gepulster Phase, 2.3 Datenerfassung und -verarbeitung bei PPT; Fig. 1, Fig. 2, Fig. 7, Fig. 8* befassen sich mit der Anwendung der Thermographie mit gepulster Phase (PPT) für die nichtzerstörende

Beurteilung von Verbundstoffmaterialien. Bei diesem Ansatz wird die Verbundwerkstoffprobe durch einen thermischen Puls kurzzeitig aufgeheizt und der Oberflächentemperaturabfall wird mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Die Datenverarbeitung und Tiefeninversion wird durchgeführt, indem die thermischen Anregungspulse extrahiert werden. Die Extraktion der verschiedenen Frequenzen wird mit einer diskreten, eindimensionalen Diffusionslängengleichung in einer ähnlichen Weise wie bei der Lockin-Thermographie durchgeführt. Somit reduziert sich das Inversionsproblem auf den Phasenkontrast, der auf den Frequenzspektren detektiert werden soll.

[0004] In der Veröffentlichung von CHRISTIAN SCHMIDT et al: „Non destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using Lock-in Thermography“, PHYSICAL AND FAILURE ANALYSIS OF INTEGRATED CIRCUITS (IPFA, 2010), Veröffentlichung bei den 17. IEEE Internationales Symposium bei der IEEE, NJ, USA, 5. Juli 2010 (2010-07-05), Seiten 1 bis 5, XP 031720074, ISBN 978-1-4244-5596-6, wird ein nichtzerstörender Ansatz für die 3D-Lokalisierung von thermisch aktiven, vergrabenen Defekten in einem einzigen Chip und in gestapelten Chip-Architekturen unter Verwendung der Lockin-Thermographie (LIT) vorgestellt. Die Veröffentlichung beschreibt auch die Verwendung der Phasenverschiebung, um die Tiefe des thermisch aktiven, vergrabenen Defekts abzuleiten. Das grundlegende Prinzip betrifft die Ausbreitung der thermischen Welle durch verschiedene Materialschichten und die resultierende Phasenverschiebung. Darauf basierend wird die LIT-Anwendung für die 3D-Defekt-Lokalisierung erläutert und sowohl vollständig verpackte, einzelne Chips als auch gestapelte Chip-Bauteile werden betrachtet, während theoretische und experimentelle Daten (Resultate) verglichen werden.

[0005] Gemäß der US 6,812,468 B1 ermöglicht die gleichzeitige Mehrfachfrequenzanregung mit zwei oder mehreren diskreten Frequenzen einer elektrisch modulierbaren, heißen Lichtquelle die parallele Ermittlung entsprechend der unterschiedlichen Antriebsfrequenzen. Als Resultat davon wird angenommen, dass die Messzeit bei der Messung von Vielschichtsystemen erheblich verkürzt wird. Als Resultat einer geeigneten Auswahl der diskreten Teilfrequenzen der Antriebsfrequenzen können diese an das Messproblem angepasst werden.

[0006] Maldague X et al: „PULSE PHASE INFRARED THERMOGRAPHY“, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. New York, US, Band 79, Nr. 5, 1. März 1996 (1996-03-01), Seiten 2694–2698, XP 000593846, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.362662, kombinieren sowohl die gepulste (PT) als auch die modulierte Infrarot-Thermographie (MT). In einer zerstörungsfreien Messperspektive wird die Probe durch Pulse auf-

geheizt wie bei PT, und eine Mischung aus Frequenzen der thermischen Wellen, die in die Probe eingeführt wurde, wird dadurch aufgelöst, dass die Fourier-Transformation der Temperaturmessung über dem Gesichtsfeld ausgeführt wird. Von Interesse ist das Maximum-Phasenbild mit vielen attraktiven Merkmalen: die tiefere Messung, weniger Einfluss von Oberflächeninfrarot und optischen Charakteristiken, schnelle Bilderfassung (pulsförmige Aufheizung, Oberflächenweiteninspektion) und die Möglichkeit, Proben mit hoher Wärmeleitfähigkeit zu inspizieren. Einige Resultate werden angeboten, und die Theorie wird ebenfalls diskutiert.

[0007] Wenn DUTs getestet und überprüft werden, kann es ausreichend sein, die allgemeine Tiefenlage eines Defekts zu bestimmen, der den Hotspot verursacht, und diese Information kann verwendet werden, um weitere Tests und Analysen des DUTs zu entwerfen. Beispielsweise können gelegentlich Ionenabtragungs- oder andere Verfahren verwendet werden, um Teile der Schichtstruktur des DUTs zu entfernen, um den Defekt für eine weitere Bilderzeugung und/oder Messungen freizulegen. Die geeignete Stelle und Tiefe der Abtragung kann unter Verwendung der Hotspot-Lokalisierung bestimmt werden. Aus der Kenntnis der näherungsweisen Tiefenlage eines Defekts kann man auch die Charakteristiken und/oder die Ursache des Defekts und den allgemeinen Teil der Schaltung postulieren, wo er aufgetreten ist.

[0008] Im Hinblick auf den oben diskutierten Stand der Technik gibt es definitiv einen Bedarf für ein Verfahren und ein System zur Lokalisierung von Hotspots in einer Probe unter Verwendung der Lockin-Thermographie (LIT) in einer kürzeren Zeitdauer, wobei die Probe beispielsweise ein Bauteil unter Test (DUT) ist.

[0009] Die folgende Zusammenfassung der Offenbarung ist eingeführt, um ein grundlegendes Verständnis von einigen Aspekten und Merkmalen der Erfindung zu liefern. Die Zusammenfassung ist nicht eine extensive Übersicht der Erfindung und sie ist auch nicht dafür gedacht, Schlüssel- oder kritische Elemente der Erfindung zu identifizieren oder den Schutzzumfang der Erfindung einzugrenzen. Der einzige Zweck besteht darin, einige Konzepte der Erfindung in einer vereinfachten Form anzubieten als Vorbemerkung zu der detaillierteren Beschreibung, die unten angeboten wird.

[0010] Nach Ausführungsbeispielen der Erfindung wird ein Verfahren zur Lokalisierung von Hotspots in einer Probe durch Lockin-Thermographie (LIT) gemäß Anspruch 1 bereitgestellt.

[0011] In Ausführungsbeispielen der Erfindung ist das nicht-harmonische Testsignal ein Rechteckimpuls-Testsignal, welches das Einschalten und Aus-

schalten der an die Probe gelieferten Energie am besten darstellt. Das nicht-harmonische Testsignal wird bei einer einzigen ausgewählten Frequenz geliefert, die die niedrigste Frequenz sein kann, die erwartungsgemäß eine Antwort von dem DUT erzeugt. Die niedrigste ausgewählte Frequenz kann beispielsweise auf 0,5 Hz oder 1,0 Hz gestellt sein.

[0012] In Ausführungsbeispielen der Erfindung ist die Fourier-Transformation eine schnelle Fourier-Transformation (FFT = Fast Fourier Transformation), wobei das Messverfahren pro Probe weiter verkürzt wird, weil der Ausgang der FFT bereits individuelle, frequenzspezifische Antwortsignale an vorab auswählbaren Frequenzen sind.

[0013] Das Verfahren kann die Glättung der Steigung der Kurve der Frequenz gegen die Phase durch eine Quadratwurzelfunktion umfassen, um die Messung der Tiefenlage zu verbessern, indem die Abweichung des individuellen, gemessenen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungspunktes aus der geglätteten Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve ermittelt wird.

[0014] In Ausführungsbeispielen der Erfindung kann das Verfahren ferner das Berechnen einer theoretischen, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve durch eine analytische Lösung der thermischen Wellenausbreitung umfassen und das Korrelieren der berechneten, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve mit der detektierten Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve, um die Tiefenlage der heißen Quelle in der Probe zu identifizieren. Als Alternative können Ausführungsbeispiele der Erfindung die Berechnung der theoretischen, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve durch eine endliche Elementmodellierung der Ausbreitung der thermischen Welle umfassen und die Korrelation des berechneten, materialspezifischen, parameterbezogenen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungsverhaltens mit der detektierten, materialspezifischen, parameterbezogenen Phasenverschiebung, um die Tiefenlage der heißen Quelle in der Probe zu identifizieren. Es wird angenommen, dass, je näher die theoretische, probenspezifische Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve bei der gemessenen, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve ist, die Genauigkeit der Messungen umso besser ist.

[0015] In verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung kann das Verfahren ferner das Anlegen eines Testsignals umfassen, indem das Testsignal von einer externen Quelle erhalten wird, beispielsweise ein herkömmliches, automatisiertes Testgerät (ATE = Automated Testing Equipment), und durch Synchronisieren einer IR-Kamera als Infrarotsensor mit dem Signal von der externen Quelle, Die IR-Kamera kann

einen zweidimensionalen IR-Sensor haben und die FFT kann individuell auf ein Ausgangssignal von jedem Pixel des zweidimensionalen IR-Sensors angewendet werden. Nach der Anwendung der FFT auf jedes Signal der Pixel des IR-Sensors können eine Vielzahl von Bildern von den resultierenden Signalen erzeugt werden, wobei jedes Bild einer Antwort auf eine ausgewählte Frequenz entspricht.

[0016] Ausführungsbeispiele der Erfindung können ein System zur Lokalisierung von Hotspots in einer Probe unter Verwendung der Lockin-Thermographie (LIT) nach Anspruch 7 umfassen.

[0017] Ein Vorteil des Systems und des Verfahrens nach der Erfindung ist die Tatsache, dass die Phasenverschiebungs-Messpunkte einer speziellen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve für eine Anzahl von Lockin-Frequenzen während eines einzigen Messlaufs erhalten werden kann, indem ein nicht-harmonisches Testsignal bei einer Frequenz als Anregungsenergie verwendet wird, um die Probe in Antwort auf das nicht-harmonische Testsignal reagieren zu lassen, wobei das jeweilige einzelne Antwortsignal weiterverarbeitet wird, um die Phasenverschiebungsmesspunkte auf der Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve zu erhalten. Mit anderen Worten, es gibt nur eine Messung bei einer Frequenz, die für jeden Typ der Probe erforderlich ist, und die resultierenden Daten entsprechen mehreren Frequenzen.

[0018] Vorteilhafte Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

[0019] Während Ausführungsbeispiele der Erfindung hier in Bezug auf eingekapselte integrierte Schaltungen beschrieben werden, kann die Erfindung auch eingesetzt werden, um andere Bauteile zu testen, die Hotspots durch elektrische Stimulation erzeugen, beispielsweise Batterien, Solarzellen, Leistungsbauteile, LEDs usw. Daher kann die Diskussion, die hier in Bezug auf einen DUT gegeben wird, auch auf diese anderen Bauteile angewendet werden.

[0020] Weitere Vorteile, Merkmale und mögliche Anwendung der vorliegenden Erfindung können aus der Beschreibung, die folgt, entnommen werden in Zusammenhang mit den Ausführungsbeispielen, die in den Zeichnungen gezeigt sind. In der gesamten Beschreibung, den Ansprüchen und den Zeichnungen werden die Begriffe und zugeordneten Bezugszeichen verwendet, die aus der beigefügten Liste der Bezugszeichen zu ersehen sind. Die entsprechenden Zeichnungen, die hiermit einbezogen werden und einen Teil dieser Beschreibung bilden, zeigen Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung und dienen zusammen mit der Beschreibung dazu, die Prinzipien der Erfindung zu erläutern und zu zeigen. Die Zeichnungen sind dafür gedacht, hauptsächliche

Merkmale der Ausführungsbeispiele in einer schematischen Weise zu zeigen. Die Zeichnungen sind nicht dafür gedacht, jedes Merkmal von tatsächlichen Ausführungsformen oder relativen Dimensionen der gezeigten Elemente darzustellen, und sie sind nicht maßstabsgerecht. In den Zeichnungen zeigen:

[0021] Fig. 1 eine Schnittdarstellung einer experimentellen Anordnung wie sie in WO 2011/156527 A1 gezeigt ist, wobei das Muster einen vergrabenen Defekt hat;

[0022] Fig. 2 eine Kurve der resultierenden Phasenverschiebung als eine Funktion der aufgebrachten Lockin-Frequenz, die aus einem angenommenen Defekt unter einer 1 Millimeter Materialschicht aus Silizium und einer Gusskomponenten resultiert, wie es in WO 2011/156527 A1 gezeigt ist;

[0023] Fig. 3 eine allgemeine Kurzdarstellung des Systems zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

[0024] Fig. 4 eine grafische Darstellung, die das eingegebene Rechteckwellen-Testsignal und das in Bezug auf Zeit aufgelöste Antwortsignaldiagramm zeigt, das die Verzögerung des Antwortsignals zeigt, welches die Tiefe der Anomalie zeigt;

[0025] Fig. 5 die Verwendung einer FFT zur Umsetzung eines Rechteckwellen-Signals in eine Vielzahl von Sinussignalen und zur Umsetzung der Kurve in der Zeitdomäne auf eine Kurve in der Frequenzdomäne, wobei die Amplitude der Frequenzdomäne auf 1 standardisiert ist;

[0026] Fig. 6 eine schematische Darstellung, die das Ergebnis ihrer Aufteilung des erfassten Signals durch eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) zeigt;

[0027] Fig. 7 eine grafische Darstellung der Frequenzdomäne des erfassten Antwortsignals nach der Anwendung der FFT für eine Probe, die mit einem Rechteck-Wellensignal mit einer Frequenz von 0,5 Hz angeregt wurde;

[0028] Fig. 8 die Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve, die sich aus der Phasenanalyse des in Fig. 7 gezeigten Results ergibt; und

[0029] Fig. 9 die Anwendung der FFT auf jedes Pixel eines Antwortbildes, das unter Verwendung eines Anregungssignals mit einer einzigen Frequenz aufgenommen wurde, um mehrfache Antwortsignale zu konstruieren, die jeweils einer ausgewählten Anregungsfrequenz entsprechen.

[0030] In der folgenden Beschreibung wird die Erfindung unter Bezugnahme auf ein DUT erläutert, welches ein spezielles Beispiel für die Probe ist, unter

der die vorliegende Erfindung angewendet wird. Dreidimensionale Architekturen von elektronischen Bauteilen, beispielsweise einem System in einer Verpackung (SiP = System in Package) sind aus mehreren integrierten Schaltungschips, Chip-Verbauelementen, miteinander verbundenen Umverteilungsschichten usw. zusammengesetzt, die alle vertikal gestapelt und miteinander verpackt sind. Solche gekapselten elektronischen Bauteile sind heterogene Materialstapel, die Silizium, Polymere und Siliziumoxidisolatoren, Metallleitungen und Drähte, Klebstoff und/oder Klebmaterialien, Verkapselungsverguss usw. enthalten. Daher kann die interne Ausbreitung der Wärme, die an der Hotspot-Position beginnt, sehr komplex sein. Daher ist die Bestimmung des Ortes eines Hotspot-Defekts in der z-Richtung, das heißt seine Tiefe in der Probe, sehr schwierig. Ferner können komplexe Defekte oder Probentypen von nicht-idealen Hotspot-Aktivierungen in Sachen Leistungsumsetzung an der Hotspot-Stelle führen. Verschiedene Ausführungsbeispiele, die hier offenbart sind, ermöglichen die genaue Lokalisierung der Wärmequellen (beispielsweise thermisch aktive Strukturen oder Defekte) in solchen Bauteilen.

[0031] Ausführungsbeispiele der Erfindung verwenden quantitative Messungen der Phasenverschiebung/Zeitverzögerung der elektrischen Anregung und der thermischen Antwort und der Form der gemessenen Wellenformen für die automatisierte und halbautomatisierte Datenanalyse. Die Wellenformanalyse kann auf einer Querkorrelation zwischen den gemessenen Resultaten und vordefinierten Funktionen basieren, wobei eine Korrelationsmatrix statt lediglich einzelner Phasenwerte pro angewendeter Lockin-Frequenz geliefert wird.

[0032] Im Allgemeinen ist das DUT in einem Material eingekapselt, welches für eine optische Überprüfung nicht transparent ist. Thermische Wellen bei IR-Wellenlänge (typischerweise 3–5 µm) können sich jedoch durch das Material fortpflanzen, woraus eine erhöhte Temperatur an der Oberfläche des Bauteils oberhalb des eingebetteten Hotspots resultiert. Dieser Anstieg in der Temperatur kann durch eine IR-Kamera abgebildet und durch LIT gemessen werden. Die Zeitkonstante des zugrundeliegenden, thermischen Diffusionsprozesses bestimmt die Phasenverschiebung zwischen dem Anregungssignal und der thermischen Antwort. Die hauptsächlich Beitragenden zu der thermischen Verzögerung sind die Materialschichten mit geringerer Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise die Vergusskomponente, Chip-Befestigungskleber, Polymere und Si-Oxid-Isolatoren, jedoch nicht die Silizium-Chips oder Materialschichten, die eine viel höhere Wärmeleitfähigkeit haben. In einfachen Worten, je länger der Abstand zwischen dem Hotspot und der Oberfläche des Bauteils ist, desto höher ist die resultierende Phasenverschiebung. Daher ermöglicht die Kenntnis der thermischen Eigen-

schaften des Materials oberhalb des Hotspots die Bestimmung einer unbekannten Tiefe des Hotspots durch Messung der Phasenverschiebung.

[0033] Der Parameter, der den Einfluss der thermischen Eigenschaften einer Materialschicht beschreibt, wird hier als thermische Diffusionslänge (μ) bezeichnet, die die Dämpfung der thermischen Welle innerhalb des Materialkörpers beschreibt. Die thermische Diffusionslänge μ (in mm) ist charakteristisch für jedes Material, das von der thermischen Welle durchdrungen wird. Sie ist definiert als die charakteristische Länge, wo die Amplitude der thermischen Welle auf e^{-1} abgefallen ist. Sie kann berechnet werden, wie in der unten angegebenen Gleichung gezeigt ist, durch die thermischen Parameter: Wärmeleitfähigkeit (λ in W/m·K), spezifische Wärmekapazität (c_p in J/g·K), Dichte (ρ in g/cm³) und die angewendete Lockin-Frequenz (f_{lockin} in Hz). Die thermischen Parameter können als thermische Diffusivität ($a = \lambda / C_p \rho$ in mm²/s) zusammengefasst werden.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda}{c_p \rho 2\pi f_{\text{lockin}}}} = \sqrt{\frac{2a}{2\pi f_{\text{lockin}}}}$$

[0034] Da die thermische Diffusionslänge μ charakteristisch für jedes Material ist, das von der thermischen Welle durchdrungen wird, braucht es, je tiefer die Anomalie in dem DUT ist, eine längere Zeit für die thermische Welle, um sich zu der Oberfläche auszubreiten. Folglich ermöglicht das Reduzieren der Frequenz des Anregungssignals genügend Zeit für die thermische Welle, um zu der Oberfläche vorzudringen und um von der IR-Kamera erfasst zu werden, wodurch die Wärmequellen selbst durch hunderte von Mikronen von IR-undurchlässigen Materialschichten lokalisiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die thermische Diffusionslänge als Dämpfungsfaktor für die thermische Welle gesehen werden kann, beeinflusst sie nicht nur die Amplitude sondern auch die resultierende Phase. Eine höhere Lockin-Frequenz resultiert in einer größeren Zeitverzögerung zwischen dem Anregungssignal an der Hotspot-Position und der thermischen Antwort an der Oberfläche des Bauteils. Daher ist eine Erhöhung der Phasenverschiebung als eine Funktion der erhöhten Lockin-Frequenz zu erwarten.

[0035] Die Beziehung zwischen der Phasenverschiebung der Phase Φ und der Hotspot-Tiefe z wird wie folgt beschrieben:

$$\Phi = \frac{z}{\mu} 180/\pi$$

wobei μ die thermische Diffusionslänge darstellt.

[0036] Das Verfahren der LIT kann verwendet werden, um die Hotspot-Position innerhalb eines vollständig verpackten Einzelchipbauteils, das in **Fig. 1**

gezeigt ist, zu bestimmen, wobei eine bessere Anpassung für die folgenden, physischen Fehleranalyse-schritte beliefert wird. **Fig. 1** zeigt einen IC-Chip **22** innerhalb einer Verpackung **20** und überdeckt mit einem Isolator **24**. Wenn ein Strom durch den Chip **22** fließt, verursacht eine Anomalität **23**, beispielsweise ein Defekt, Wärmewellen **26**, die sich zur Oberfläche des Isolators **24** fortpflanzen und sich als Hotspot **27** zeigen. Der Hotspot kann durch eine IR-Kamera abgebildet werden, um eine räumliche Lokalisierung der Anomalität zu liefern. Die Zeitverzögerung zwischen dem Stromfluss und dem Auftreten des Hotspots auf der Oberfläche, das heißt die Phasenverschiebung, kann verwendet werden, um die Tiefe der Anomalität festzustellen.

[0037] Die Beziehung zwischen der Hotspot-Tiefe, der angewendeten Lockin-Frequenz und der resultierenden Phasenverschiebung wurde untersucht unter Verwendung von Teststrukturen mit definierten punktförmigen Wärmequellen. Die Teststrukturen wurden hergestellt unter Verwendung eines Einzel-Chip-Bauteils, der einen Mäander aus Kupferleitungen enthält. Der Mäander wurde durch eine Technik mit fokussiertem Ionenstrahl (FIB = Focused Ion Beam) modifiziert, um eine klar definierte, lokale Wärmequelle **23** zu erzeugen. Nach der Erzeugung des lokalen Bereichs mit hohem Widerstand wurde das Einzel-Chip-Bauteil durch LIT mit einer Versorgungsspannung von 1,2 V und einer Lockin-Frequenz von 5 Hz gemessen, wodurch eine lokale Wärmequelle mit einer Verbrauchsleistung von 14 mW erzeugt wird. Als nächster Schritt wurde das Bauteil mit der Gusskomponente **24** eingekapselt, um eine Materialschicht zwischen den Hotspots und der Oberfläche des Bauteils zu erzeugen. In diesem Fall war die Tiefe des Hotspots bekannt durch die Dimension des Bauteils und den Einzel-Chip, und sie wurde als 950 µm bestimmt. Wie in **Fig. 1** gezeigt ist, umschließt eine zweifache, keramische Inline-Verpackung (DCIOP = Dual Ceramic In-line Package) **20** den Einzel-Chip **22** mit dem erzeugten Defekt **23**. Eine Gusskomponente **24** wurde über den Chip bis zu einer Dicke von 950 µm über der Oberfläche des Chips **22** aufgefüllt.

[0038] Auf der Basis der oben erläuterten Theorie wurde das DUT über einem Frequenzbereich von 0,1 bis 7 Hz untersucht, und die resultierende Phasenverschiebung wurde gemessen. **Fig. 2** zeigt die untersuchte Beziehung zwischen der angelegten Lockin-Frequenz und der resultierenden Phasenverschiebung. Die gemessenen Datenpunkte sind über der theoretischen Kurve aufgezeichnet. Es ist klar ersichtlich, dass die Kurven zu den theoretischen Daten für einen Lockin-Frequenzbereich von 0,1 bis 3 Hz passen. Im Falle von 5 und 7 Hz wurde eine geringfügige Fehlanpassung erhalten, was durch das geringere Signal/Rausch-Verhältnis (S/N) aufgrund der höheren Dämpfung der thermischen Welle erklärt werden kann. Dieser Einfluss kann durch eine län-

gere Messzeit entfernt werden aufgrund der Tatsache, dass das stochastische Rauschen des Detektors nach der Quadratwurzel der Messzeit reduziert wird.

[0039] Das Verhältnis zwischen der Phasenverschiebung und der Lockin-Frequenz wurde experimentell für Vergussmaterial mit einer guten Korrelation zu den theoretischen Daten bestimmt, wie aus **Fig. 2** zu ersehen ist. Die erhaltenen Ergebnisse bestätigen das Potential von Lockin-Thermographie-Untersuchungen für eine 3D-Lokalisierung von thermisch aktiven Strukturen oder Defekten in vollständig verpackten Bauteilen.

[0040] Für die 3D-Hotspot-Lokalisierung innerhalb von integrierten Bauteilen mit gestapelten Chips, beispielsweise für eine System-in-Verpackung, ist ein zweiter Einflussfaktor zu berücksichtigen. Thermische Wellen, die an der Hotspot-Position erzeugt werden, müssen sich durch unterschiedliche Materialschichten, beispielsweise Silizium, Vergussmaterial, Chip-Befestigungsband, usw. fortpflanzen, die jeweils unterschiedliche Dicken und Materialeigenschaften haben. In Abhängigkeit von der axialen Hotspot-Position an unterschiedlichen Chips des defekten Bauteils ändert sich als Konsequenz nicht nur der Abstand zu der Oberfläche des Bauteils sondern auch die thermische Diffusionslänge. Daher müssen thermische Wellen, die an Hotspots an weiter unten liegenden Chips in dem Stapel zusätzliche Materialschichten durchlaufen im Vergleich zu thermischen Wellen, die an Hotspots erzeugt werden, die nahe bei der Oberfläche des Bauteils sind. Wie in dem vorstehenden Abschnitt, der Einzel-Chip-Bauteile betrifft, kann dieses Verhalten verwendet werden, um die Hotspot-Tiefe durch Berechnung der theoretischen Phasenverschiebung über einen gewissen Frequenzbereich für unterschiedliche Hotspot-Positionen zu bestimmen. Abweichend von den Untersuchungen bei Einzel-Chip-Bauteilen wird angenommen, dass der Hotspot mit einem speziellen Chip in Bezug steht, was zu der Möglichkeit führt, dass ein diskretes Modell des Materialsystems verwendet werden kann. Daher ist wenigstens bis zur ersten Ordnung die gesamte thermische Diffusionslänge die Summe der einzelnen thermischen Diffusionslängen von jeder Materialschicht. Auch die gesamte Tiefe des Hotspots ist die Summe der Dicken der einzelnen Materialschichten.

[0041] **Fig. 3** ist eine schematische Darstellung, die ein System zur Durchführung der LIT zeigt und das verwendet werden kann, um die Verfahren der Erfindung umzusetzen, wie unten beschrieben wird. Ein Bauteil unter Test (DUT) **12** wird durch ein Anregungssignal **22** bei einer Lockin-Frequenz angeregt, die durch die Anregungsquelle **14** erzeugt wird. Die Lockin-Frequenz des Anregungssignals wird durch eine zentrale Verarbeitungseinheit **18** eingestellt. Während Thermographie im Allgemeinen unter Ver-

wendung von sinusförmigen Signalen durchgeführt werden kann, ist, da das DUT ein digitales Bauteil ist, das Anregungssignal **22** ein elektrisches, rechteckiges oder quadratisches Signal, das bemessen ist, um verschiedene aktive Elemente ein- und auszuschalten, beispielsweise Transistoren in dem DUT. Sowohl bei rechteckigen als auch quadratischen Signalen wechselt die Amplitude sofort zwischen festgelegtem Maximum- und Minimum-Werten, so dass die Frequenz die Anzahl der Übergänge pro Periode ist, das heißt die Anzahl der Übergänge pro Sekunde. Somit kann das Testsignal **22** im Wesentlichen als Impulszug mit einer vorgegebenen Frequenz betrachtet werden.

[0042] Ein Synchronsignal **24** wird von der zentralen Verarbeitungseinheit **18** ausgegeben und an die Anregungsquelle **14** gesendet. Dies ist der einfachste Weg, das Synchronsignal **24** auf die gewünschte Lockin-Frequenz einzustellen, obwohl es auf eine unterschiedliche Frequenz eingestellt werden kann, solange Vorkehrungen getroffen werden, um es der Anregungsquelle **14** zu ermöglichen, das Anregungssignal **22** mit der gewünschten Lockin-Frequenz unter Verwendung des Synchronsignals **24** zu erzeugen. Die Anregungssignale bewirken, dass Ströme in dem DUT **12** fließen, und Anomalitäten in dem DUT **12** verursachen lokale Hotspots. Die Wärme von den Hotspots pflanzt sich sodann innerhalb des DUTs **12** fort, bis sie die Oberfläche des DUT **12** erreichen, die der IR-Kamera **16** zugewandt ist. Die IR-Kamera kann ein Sensor mit zweidimensionalem Feld sein. Die Wärmestrahlen **28**, die von der Oberfläche des DUT **12** an die IR-Kamera **16** ausgegeben werden, werden verwendet, um IR-Bilder der Oberfläche des DUT zu nehmen und Bildsignale **26** an die zentrale Verarbeitungseinheit **18** auszugeben, die einen Prozessor **30** umfasst. Die Rahmenrate der Kamera **16** wird gewöhnlich ausgewählt, indem die Lockin-Frequenz berücksichtigt wird. Im Falle einer Zwei-Kanal-IR-Kamera ist die Rahmenrate der Kamera das Vierfache der Lockin-Frequenz. Mit der Anordnung von **Fig. 3** ist eine Identifizierung der räumlichen und Tiefen-Lokalisierung eines Hotspots in dem DUT **12** möglich. Der Prozessor **30** der Anordnung von **Fig. 3** ist konfiguriert, um die Verarbeitung auszuführen, die in der Erfindung erforderlich ist, wie unten beschrieben ist.

[0043] **Fig. 4** zeigt eine Darstellung des Rechteck-Anregungssignals und des IR-Antwortsignals. Die Zeitverzögerung zwischen dem Ende des Anregungssignals und dem Antwortsignal ist die Phasenverschiebung, die mit Φ bezeichnet ist. Wie oben erläutert wurde, würde die resultierende Phasenverschiebung entsprechend der Frequenz des angelegten Anregungssignals unterschiedlich sein. Daher muss, um eine genaue Messung der Tiefe zu erhalten, die Messung viele Male bei unterschiedlichen Frequenzen wiederholt werden, um die Darstellung

zu erhalten, die in **Fig. 2** gezeigt ist. Andererseits kann gemäß der unten beschriebenen Ausführungsform die Untersuchung genau abgeschlossen werden unter Verwendung einer einzigen Messung bei einer einzigen Frequenz, wobei aber die Phasenverschiebungen erhalten werden, die mehrfachen Anregungssignalen bei mehrfachen Frequenzen entsprechen.

[0044] Das Diagramm von **Fig. 5** zeigt die Grundlage hinter der Fourier-Transformation, siehe auch https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform. Gemäß der Fourier-Transformation kann jede Rechteckwelle durch Überlagerung mehrerer Sinuswellen angenähert werden, wobei die Näherung der Wellenform an einen Rechteckwellenpuls verbessert wird, wenn mehr Harmonische der Sinuswelle bei unterschiedlichen Frequenzen überlagert werden. In anderen Worten kann die Rechteckwelle in Sinuswellen aufgeteilt werden, die unterschiedliche Frequenzen haben, wie in **Fig. 5** gezeigt ist.

[0045] In der Spalte (a) der **Fig. 5** sind verschiedene Sinuswellen in einem Diagramm von Amplitude-gegen-Zeit gezeigt. Die Sinuskurven haben unterschiedliche Frequenzen, wie aus den Diagrammen in Spalte (a) zu sehen ist. Die Spalte (b) zeigt in Zeile (A) die Sinuswelle, die als fundamental betrachtet werden kann, die auch Spalte (a), Zeile (A) gezeigt ist. Zusätzliche höherharmonische Sinuswellen sind als überlagert über die fundamentale Sinuswelle von Spalte (b) gezeigt. Das Diagramm von Spalte (b), Zeile (13) zeigt die Sinuswelle der ersten Zeile und auch die Sinuswelle des Diagramms auf Spalte (a), Zeile (B) in einem kombinierten Diagramm. Das Diagramm in Spalte (c), Zeile (B), zeigt die Wellenform, die durch Überlagerung, das heißt Hinzufügung, der Linienkurven der Spalte (a), Zeile (A) und Zeile (B), erzeugt wird. Es ist ersichtlich, dass eine Rechteckwelle bereits in dem Diagramm der Spalte (c), Zeile (B), angenähert ist. Das Diagramm in Spalte (c), Zeile (C), zeigt die resultierende Kurve von einer Überlagerung der Sinuswellen in der Spalte (a), Zeile (A), (B) und (C), wobei die Rechteckwelle besser angenähert ist im Vergleich zu der Wellenform in Spalte (c), Zeile (B). Das Diagramm in der Spalte (c), Zeile (D) ist eine Überlagerung von allen vier Sinuswellen der Spalte (a) und kann eine bessere Annäherung an einen Rechteckwellenimpuls sein. Wie zu ersehen ist, je mehr höherharmonische-Sinuswellen zu der fundamentalen Sinuswelle addiert werden, desto besser wird die Annäherung der nicht-harmonischen Rechteckwelle.

[0046] Wie aus der obigen Erläuterung zu sehen ist, kann jede Rechteckwelle in Sinuswellen aufgebrochen werden, die unterschiedliche Frequenzen haben, wie in **Fig. 5** gezeigt ist. Die Fourier-Transformation kann jedes Originalsignal nur dann zerteilen, wenn das ursprüngliche Signal keine Sinusform hat,

das heißt, wenn das Signal ein nicht-harmonisches Signal ist. Daher kann per Definition ein nicht-harmonisches Signal jede beliebige Form außer einer Sinusform haben. Beispiele für ein nicht-harmonisches Signal sind Rechteckwellen, Dreieckwellen, Sägezahnwellen und dergleichen. Die folgenden Ausführungsbeispiele verwenden diesen Ansatz, um die vergrabenen Hotspots unter Verwendung der Anregung bei nur einer Frequenz zu lokalisieren.

[0047] Es wird bemerkt, dass die Verwendung eines nicht-harmonischen Anregungssignals, insbesondere eines Rechteck- oder Viereck-Anregungssignals zur Untersuchung von ICs keine Einschränkung sondern stattdessen natürlich ist. ICs haben aktive Bauteile, beispielsweise Transistoren, die ausgelegt sind, um unterschiedliche binäre Zustände entsprechend dem angelegten binären Signal anzunehmen. Somit ist das Testen eines ICs unter Verwendung eines binären Rechteck- oder Viereck-Signals tatsächlich vorteilhaft.

[0048] Nach den folgenden Ausführungsbeispielen wird der DUT durch ein nicht-harmonisches, das heißt Rechteckwellensignal, bei nur einer einzigen Frequenz angeregt. Die Signalfrequenz wird als die niedrigste Frequenz gewählt, die untersucht werden soll. Eine Fourier-Transformation wird dann auf das resultierende Antwortsignal angewendet, um ein Antwortsignal abzuleiten, das zu allem erwünschten Anregungsfrequenzen korrespondiert. Dies kann aus dem Folgenden verstanden werden. **Fig. 6** zeigt ein Beispiel eines Rechteckwellen-Anregungsimpulses TS und das resultierende Antwortsignal RS in einem Diagramm von Zeit-gegen-Anregungsintensität. In **Fig. 6** ist nur ein einziger Anregungsimpuls und ein einziger Antwortimpuls gezeigt, das Anregungssignal und das IR-Antwortsignal können jedoch über mehrere Zyklen hinweg aufgesammelt werden. In einem Beispiel ist die Frequenz des Anregungssignals als 0,5 Hz gewählt. Als Startpunkt wird solch ein Rechteckwellen-Anregungssignal an die elektrische Schaltung des DUT als nicht-harmonisches Testsignal angelegt. Während das Testsignal an den DUT angelegt ist, wird der DUT durch die Infrarotkamera abgebildet, um ein IR-Bild der Probe zu erhalten, was in dem Antwortsignal RS resultiert, das in **Fig. 6** gezeigt ist. Das thermische Antwortsignal RS wird von der Bilderzeugung der IR-Kamera erhalten und hat eine Korrelation zu der thermischen Wärmeausbreitung in dem DUT.

[0049] Das thermische Antwortsignal RS wird dann einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) unterworfen, siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform, um das thermische Antwortsignal in ein frequenzspezifisches Spektrum aufzuteilen, welches wenigstens die individuellen Frequenzen 1 bis x enthält, wie in **Fig. 6** gezeigt ist, wobei die Frequenzen 1 bis x jeweils eine spezifische Phasenver-

schiebung Φ_1 bis Φ_x zeigen. Diese Phasenverschiebungen Φ_1 bis Φ_x werden dann gegen die Frequenzen aufgetragen, um die Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve zu erhalten. Mit Hilfe der FFT wird das Messverfahren pro Probe weiter verkürzt, weil die Resultate des FFT bereits individuelle frequenzspezifische Antwortsignale bei vorher auswählbaren Frequenzen sind.

[0050] Der Effekt der schnellen Fourier-Transformation (FFT) ist auch in **Fig. 7** gezeigt, die ein Frequenzgegen-Amplituden-Diagramm des Resultats der schnellen Fourier-Transformation (FFT) zeigt. Das heißt, dass die FFT die Information von der Zeitdomäne (das heißt eine Kurve von Amplitude-gegen-Zeit) in eine Frequenzdomäne (das heißt Amplitude-gegen-Frequenz) ändert. **Fig. 7** zeigt, dass die Unterteilung des thermischen Antwortsignals RS durch FFT in einer großen Anzahl von individuellen, spezifischen Spitzen in der Amplitude resultiert, die zu den individuellen Frequenzen in Beziehung stehen. Da die Amplitude des Signals auch mit der Phasenverschiebung in Beziehung steht, die durch die Probe und die jeweiligen Frequenzen erzeugt wird, können die Ergebnisse, die aus dem Diagramm von **Fig. 7** erhalten werden, als Frequenz-gegen-Phasenverschiebungsdiagramm dargestellt werden, wie in **Fig. 8** gezeigt ist.

[0051] Es ist zu beachten, dass die Frequenzen, die mit den Spitzen in dem Diagramm von **Fig. 7** in Beziehung stehen, die Frequenzen 1 bis Frequenz x sind, die in **Fig. 6** gezeigt sind. Diese Frequenzen entsprechen den harmonischen Signalen, die dem grundlegenden harmonischen Signal (Sinus- oder Kosinuswelle) entsprechen. Mit anderen Worten werden die Phasenverschiebungen der frequenzspezifischen Antwortsignale bei mehrfachen spezifischen Frequenzen bestimmt, und eine Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve kann aus den Phasenverschiebungen der frequenzspezifischen Antwortsignale (Antwortsignale bei den Frequenzen 1 bis 4 und Frequenz x) erhalten werden, die mit der Tiefenlage des Hotspots in Beziehung stehen, der durch die Wärmequelle erzeugt wurde.

[0052] Das Diagramm von **Fig. 8** ist eine Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve für ein DUT. Die in **Fig. 8** gezeigte Kurve wird aus einer Anzahl von Messpunkten erhalten, die in dem Frequenzbereich von 0,5 bis 50 Hz und auf der Basis der Spitzen in dem Diagramm von **Fig. 7** erhalten wurden. Es ist zu beachten, dass der Frequenzbereich im Vergleich zu dem Messbereich, der in **Fig. 7** gezeigt ist, vergrößert ist. In der Praxis sind jedoch höchstens vier oder fünf Messpunkte, die den Spitzen in dem Diagramm **7** entsprechen, ausreichend, um zu einer Basis für ein befriedigendes Resultat des Messverfahrens zu gelangen.

[0053] Das Diagramm von **Fig. 8** zeigt wiederum den Vorteil des Systems und des Verfahrens nach der Erfindung, das heißt, dass eine spezielle Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve aus einer Anzahl von Lockin-Frequenzen während eines einzigen Messdurchlaufs unter Verwendung eines nicht-harmonischen Testsignals bei einer Frequenz als Anregungsenergie erhalten werden kann, um die Probe zu veranlassen, auf das nicht-harmonische Testsignal als Antwort zu reagieren, wobei das jeweilige einzige Antwortsignal weiter verarbeitet wird, um die Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve zu erhalten. Mit anderen Worten gibt es nur eine Messung bei einer Frequenz, die für jeden Typ der Probe erforderlich ist.

[0054] CHRISTIAN SCHMIDT et al und WO 2011/156527 A1 lehren, wie die Tiefenlage eines Defekts aus den Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurven geleitet wird. Daher kann die Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve von **Fig. 8** als Basisinformation verwendet werden, um die Tiefenlage eines Defekts zu bestimmen.

[0055] **Fig. 9** zeigt ein anderes Merkmal der Erfindung. In **Fig. 9** ist ein Bild, das am Ende einer Serie von Anregungen bei einer einzigen Frequenz erhalten wird, als Pixel **90** des IR-Sensors gezeigt. Dieses Bild kann dadurch erhalten werden, dass die Life-Bilder kontinuierlich gemittelt werden, um ein Bild mit reduziertem Signal/Rausch-Verhältnis (S/N) zu erhalten. Nach diesem Merkmal wird ein Bild der Oberfläche des DUT, welches an dem Ende des vorher zeitlich festgelegten Intervalls erzeugt wurde, mit einem Bild der Oberfläche des DUT gemittelt, welches an einem Ende eines nachfolgenden Zeitintervalls erhalten wird. Da mehr Bilder bei jedem nachfolgenden Intervall aufgenommen werden, werden die Bilder kontinuierlich Schritt für Schritt aufsummiert und gemittelt. Da das Antwortsignal das gleiche bleibt, wird das Rauschen durch das Mittelungsverfahren über die Zeit gelöscht. Folglich hat das resultierende Bild **90** ein verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis.

[0056] Wie durch die Ansage **91** gezeigt ist, enthält jedes Pixel ein individuelles Antwortsignal einer entsprechenden Stelle auf dem DUT. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel wird eine schnelle Fourier-Transformation auf jedes Pixel angewendet, so dass ein Antwortsignal bei einer Vielzahl von Frequenzen für jedes Pixel erhalten wird. Diese Bilder können gespeichert oder für einen Benutzer angezeigt werden. Das heißt, dass der Benutzer jegliche spezifische Frequenzen beliebig auswählen kann, und die Bilder können entsprechend diesen Frequenzen erzeugt und angezeigt werden unter Verwendung des einzigen Bildes **90**, welches unter Verwendung einer Anregung bei einer einzigen nicht-harmonischen Frequenz erzeugt wurde. In **Fig. 9** ist dies beispielhaft als drei Bilder **92**, **94** und **96** dargestellt, die jeweils einer

anderen Frequenz entsprechen, das heißt, 0,5 Hz, 1 Hz und 3 Hz, so dass jedes Pixel die Hotspot-Antwort an dieser Frequenz zeigt, wie beispielhaft durch die Ansagen **93**, **95** und **97** gezeigt ist.

[0057] Die vorliegende Erfindung wurde in Zusammenhang mit speziellen Ausführungsbeispielen beschrieben, die in jeglicher Hinsicht illustrativ statt einschränkend sein sollen. Fachleute werden erkennen, dass viele unterschiedliche Kombinationen von Hardware, Software und Firmware geeignet sein werden, um die vorliegende Erfindung zu praktizieren. Darüber hinaus sind auch andere Implementierungen der Erfindung für die Fachleute aus dem Studium der Beschreibung und der Handhabung der Erfindung ersichtlich, die hier offenbart sind. Es ist beabsichtigt, dass die Beschreibung und die Beispiele nur als Beispiele zu betrachten sind, wobei der echte Schutzbereich der Erfindung durch die folgenden Patentansprüche angegeben ist.

Bezugszeichenliste

12	DUT
14	Anregungsquelle
16	Kamera
18	zentrale Verarbeitungseinheit
20	Einkapselung
22	Anregungssignal
23	lokale Wärmequelle
24	Synchronsignal
26	Bildsignale
27	Hotspot
30	Prozessor

Patentansprüche

1. Verfahren zum Lokalisieren eines Hotspots (**27**) in einer Probe (**12**), insbesondere einem eingekapselten Bauteil unter Test (DUT) unter Verwendung von Lockin-Thermographie (LIT), wobei wenigstens eine Wärmequelle (**23**) einer elektrischen Schaltung in der Probe (**12**) vergraben ist und den Hotspot (**27**) auf einem Stromfluss darin erzeugt hat, umfassend: Anlegen eines nicht-harmonischen Anregungswellen-Testsignals bei einer Lockin-Frequenz an die elektrische Schaltung der Probe (**12**), um die Wärmequelle (**23**) zur Erzeugung des Hotspots (**27**) zu aktivieren, Abbilden der Probe (**12**) unter Verwendung eines Infrarotsensors (**16**), um ein IR-Bild der Probe (**12**) zu erhalten, während das nicht-harmonische Testsignal an die elektrische Schaltung angelegt ist; und Detektieren eines thermischen Antwortsignals, welches aus der Bilderzeugung erhalten wurde, wobei das thermische Antwortsignal in Korrelation mit der thermischen Wärmeausbreitung in der Probe (**12**) steht, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Anlegen des nicht-harmonischen Testsignals das Anlegen eines nicht-harmonischen Signals bei einer einzigen ausgewählten Frequenz umfasst;

dass das thermische Antwortsignal einer Fourier-Transformation (FT) unterworfen wird, um das thermische Antwortsignal in ein Frequenzspektrum zu zerlegen, welches harmonische Signale eines Basis- oder höher-harmonischen Signals enthält, um dadurch eine Vielzahl von frequenzspezifischen Antwortsignalen bei mehrfachen spezifischen Frequenzen zu erhalten; dass die Phasenverschiebungen von jedem der frequenzspezifischen Antwortsignale erhalten wird; dass eine Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve aus den Phasenverschiebungen der frequenzspezifischen Antwortsignale erhalten wird; und dass eine Vielzahl von Bildern, die jeweils einer der spezifischen Frequenzen entsprechen, angezeigt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin die Fourier-Transformation eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Anlegen eines nicht-harmonischen Testsignals das Anlegen eines Rechteckimpuls-Testsignals umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend das Glätten der Steigung der Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve durch eine Quadratwurzelfunktion, um die Bestimmung der Tiefenlage zu verbessern.

5. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend: Berechnen einer theoretischen, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve durch eine analytische Lösung der thermischen Wellenausbreitung oder durch eine endliche Elementmodellierung der thermischen Wellenausbreitung, und Korrelieren der theoretischen, probenspezifischen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve mit der gemessenen Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve, um die Tiefenlage der Wärmequelle (23) in der Probe (12) zu identifizieren.

6. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Anlegen des Testsignals das Erhalten des Testsignals von einer externen Quelle und das Synchronisieren einer IR-Kamera als Infrarot-Sensor (16) mit dem Signal von der externen Quelle umfasst,

7. System zum Lokalisieren eines Defekts in einer Probe (12), insbesondere einem eingekapselten Bauteil unter Test (DUT), umfassend:
eine Bank, um die Probe (12) zu montieren;
eine Anregungsquelle, um eine nicht-harmonische Welle als Anregungs-Testsignal bei einer Lockin-Frequenz auf die Probe (12) anzuwenden;
ein Infrarot-Sensor (16), vorzugsweise eine Infrarotkamera, zum Abbilden der Probe (12), um TR-Bilder der Probe (12) zu erhalten, während das nicht-harmonische Testsignal an die elektrische Schaltung angelegt ist; wobei der Prozessor (30) konfiguriert ist:

um Daten aus dem Infrarot-Sensor (16) auszulesen und die thermischen Bilder des Infrarot-Sensors (16) zu verwenden, um thermische Wellenformen zu erzeugen durch:

Anlegen des nicht-harmonischen Testsignals bei einer einzigen ausgewählten Frequenz; Unterwerfen des thermischen Antwortsignals einer Fourier-Transformation (FT), um das thermische Antwortsignal in ein Frequenzspektrum zu zerlegen, welches harmonische Signale von Basis- oder höher-harmonischen Signalen enthält, um dadurch eine Vielzahl von frequenzspezifischen Antwortsignalen bei mehrfachen spezifischen Frequenzen zu erhalten;

Bestimmen der Phasenverschiebungen von jedem der frequenzspezifischen Antwortsignale;

Erhalten einer Frequenz-gegen-Phasenverschiebungskurve von den bestimmten Phasenverschiebungen der frequenzspezifischen Antwortsignale bzw. eines frequenzspezifischen Bildes, welches mit der Tiefenlage der Probe (12) in Beziehung steht; und Anzeigen einer Vielzahl von Bildern, die jeweils einer der spezifischen Frequenzen entsprechen.

8. System nach Anspruch 7, worin der Prozessor (30) konfiguriert ist, um das Antwortsignal einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) zu unterwerfen.

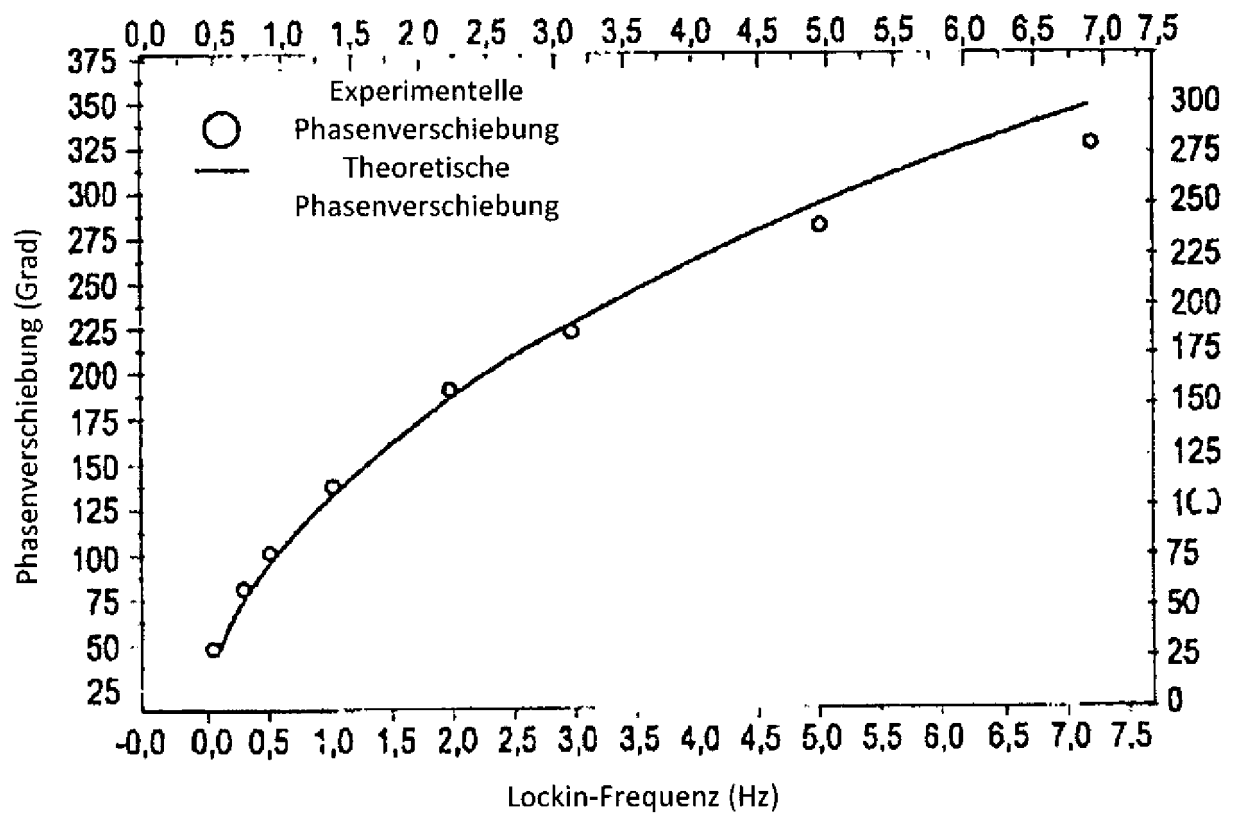
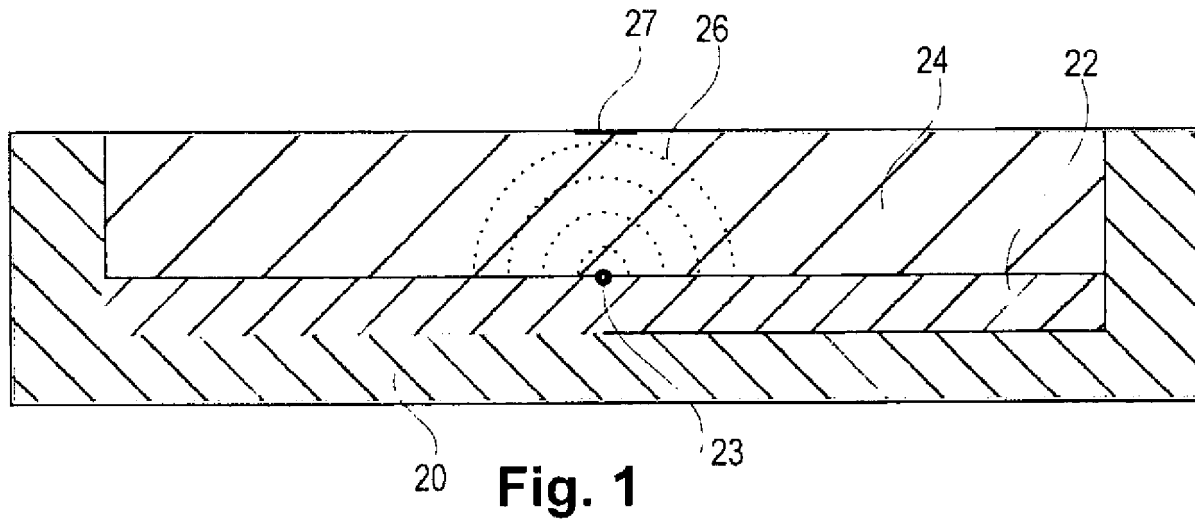
9. System nach Anspruch 7, worin die Anregungsquelle konfiguriert ist, um ein Rechteckimpuls-Testsignal an die Probe (12) anzulegen.

10. System nach Anspruch 7, umfassend:
einen Synchronsignal-Eingang, der konfiguriert ist, um ein Synchronsignal zu empfangen, welches einem nicht-harmonischen Testsignal entspricht, das an die elektrische Schaltung der Probe angelegt wird, um die Wärmequelle (23) zur Erzeugung des Hotspots (27) zu aktivieren; worin der Prozessor (30) ferner konfiguriert ist, um das Synchronsignal zu empfangen und den Infrarot-Sensor (16) zu betreiben, um eine Sequenz von thermischen Bildern der Probe (12) an Zeiträumen aufzunehmen, die mit dem Synchronsignal in Korrelation sind.

11. System nach Anspruch 7, worin der Infrarot-Sensor (16) einen Sensor mit zweidimensionalem Feld aufweist, und worin der Prozessor (30) konfiguriert ist, um die FT an jedes Pixel des Sensors mit zweidimensionalem Feld anzuwenden, um die frequenzspezifischen Antwortsignale von jedem der Pixel zu erhalten.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

**Fig. 2**

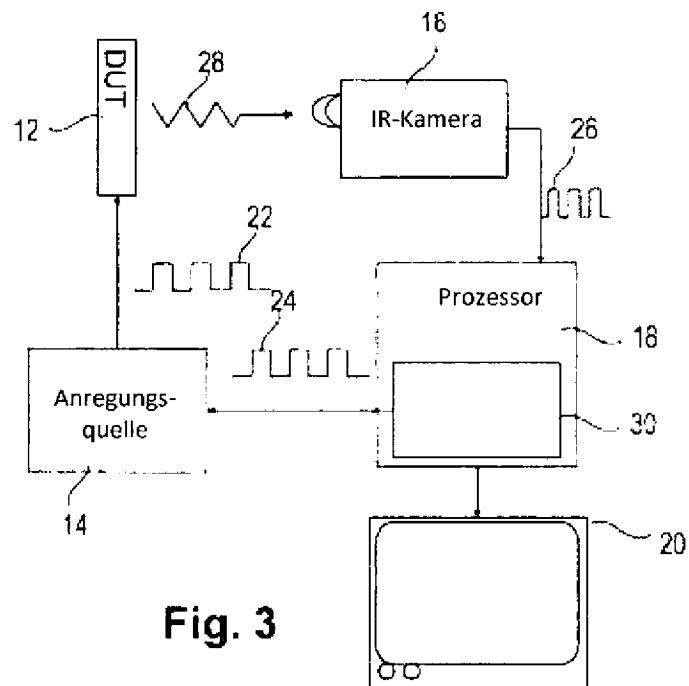


Fig. 3

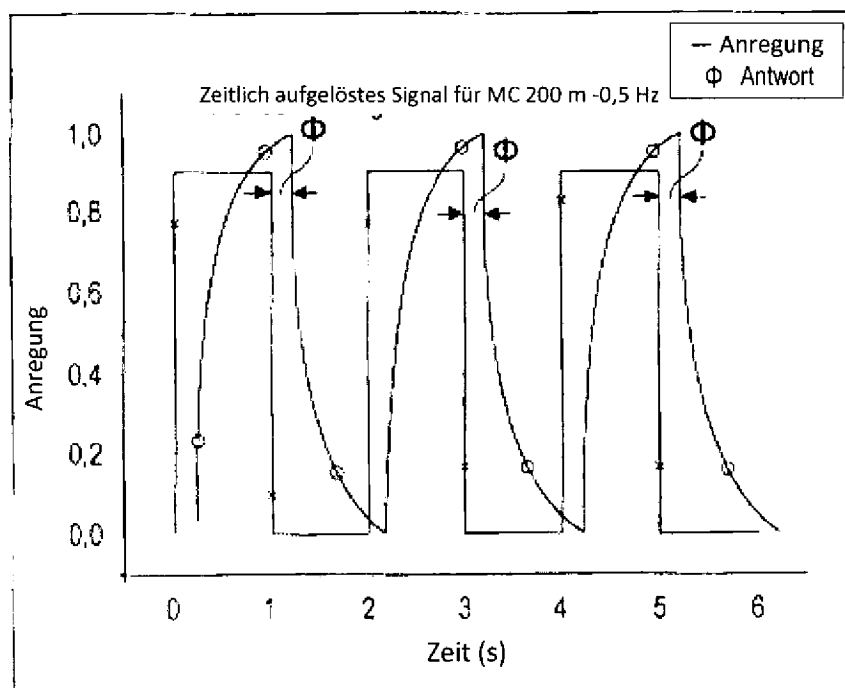


Fig. 4

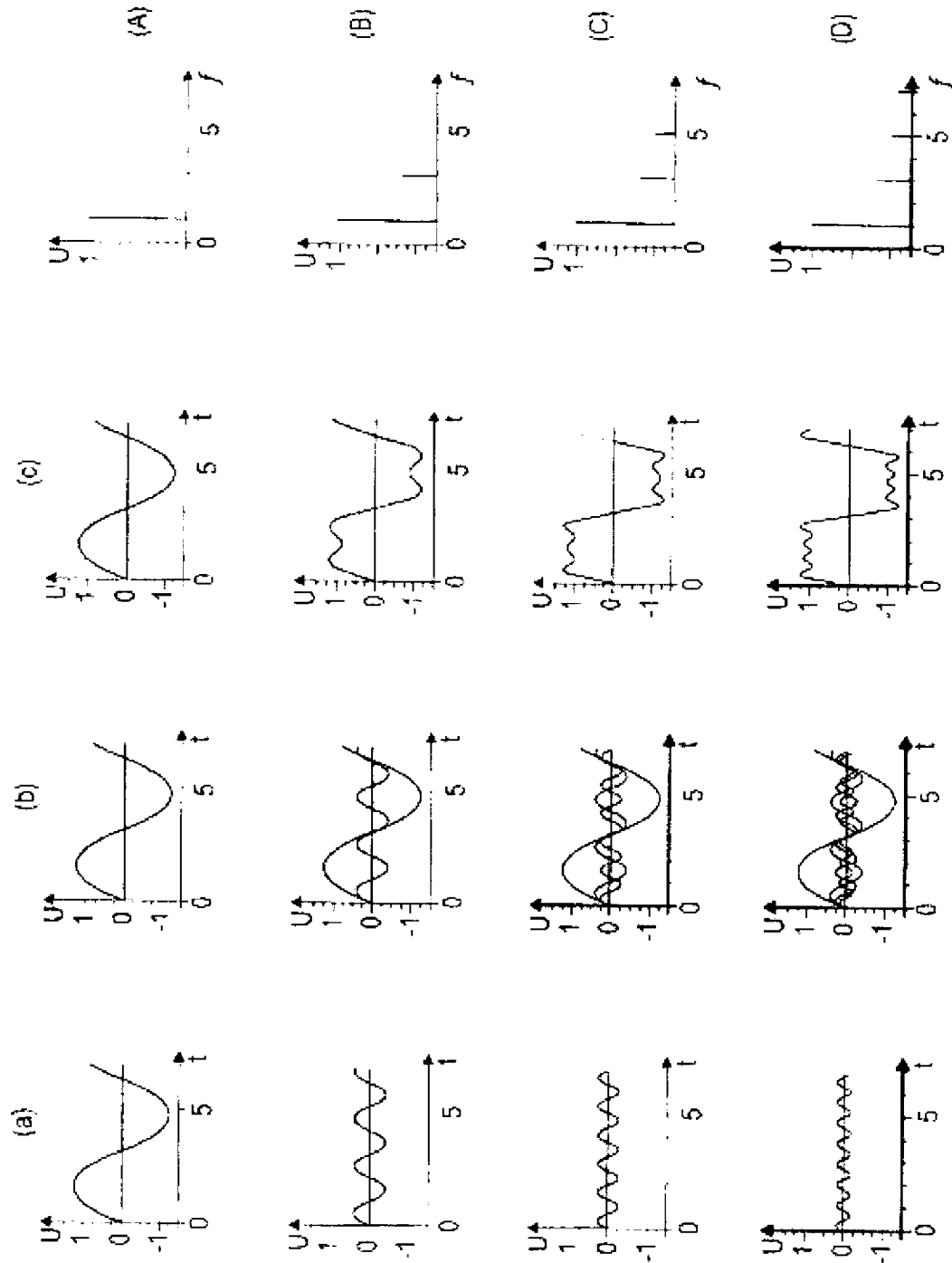


Fig. 5

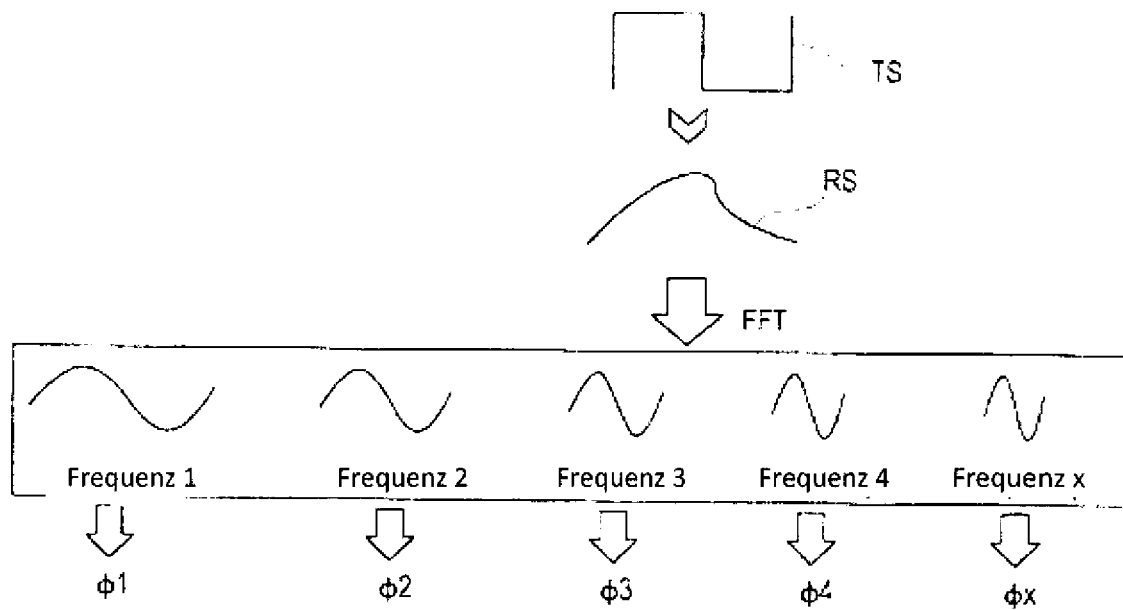


Fig. 6

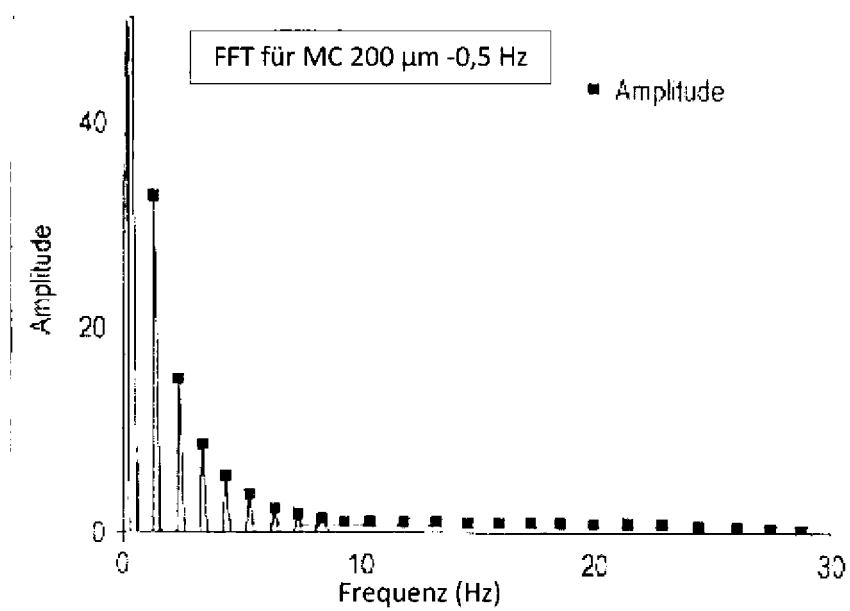
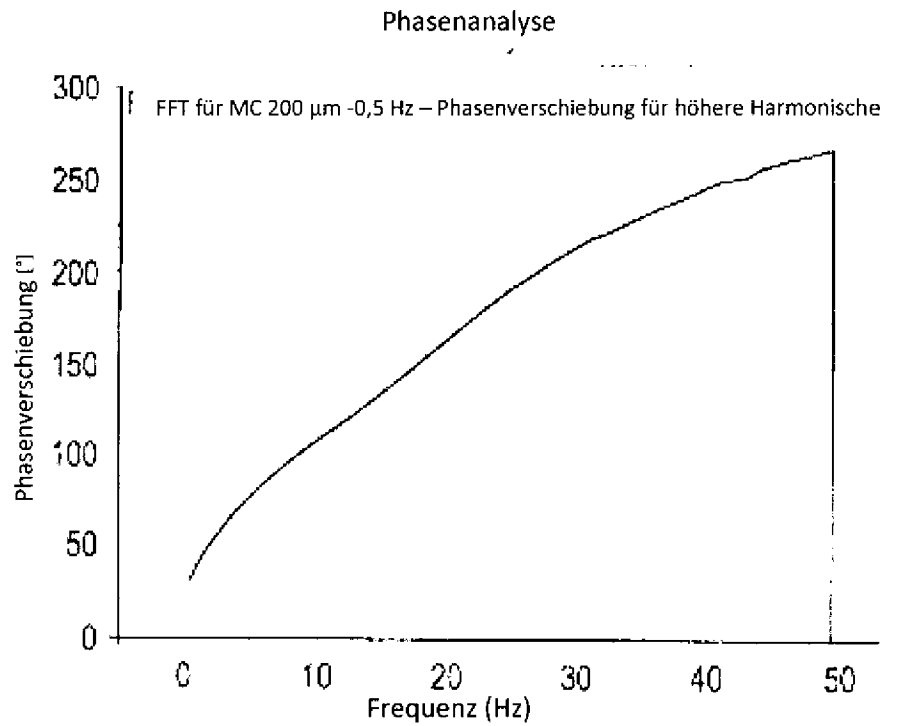
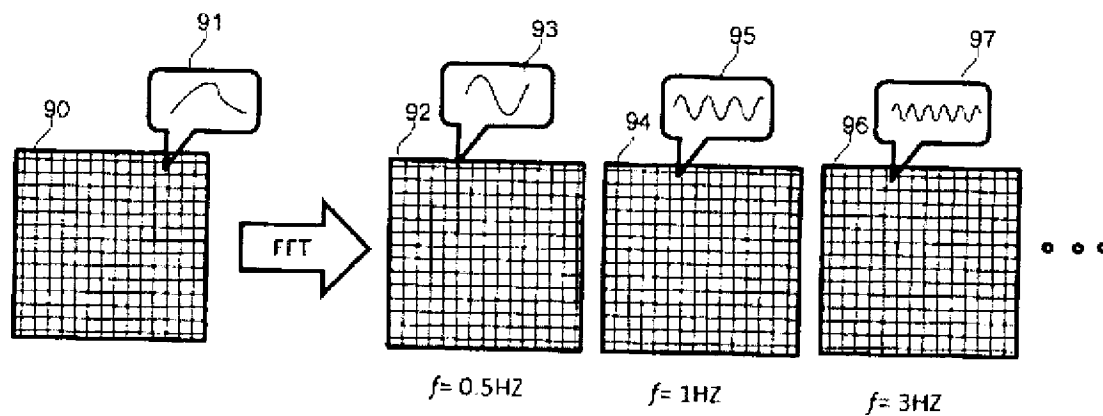


Fig. 7

**Fig. 8****Fig. 9**