



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 10 462 T2 2005.04.21**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 192 414 B1**

(51) Int Cl.⁷: **G01B 11/24**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 10 462.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CA00/00834**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 947 712.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 01/006210**

(86) PCT-Anmeldetag: **14.07.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **25.01.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **03.04.2002**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **06.05.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **21.04.2005**

(30) Unionspriorität:
2277855 14.07.1999 CA

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, SE**

(73) Patentinhaber:
Solvision, Inc., Longueuil, Quebec, CA

(72) Erfinder:
**COULOMBE, Alain, Brossard, CA; CANTIN,
Michel, Brossard, CA; NIKITINE, Alexandre,
Montreal, CA**

(74) Vertreter:
**Patentanwälte Dr. Sturies Eichler Füssel, 42289
Wuppertal**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Messen von Unebenheiten auf einem Gegenstand**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich generell auf ein Verfahren zum Messen von Unebenheiten auf einem Gegenstand. Die vorliegende Erfindung beschäftigt sich im Speziellen mit einer Verwendung von derartigen Systemen und Verfahren zum Prüfen der Lotkoplanarität auf einer Leiterplatte.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Die Verwendung von interferometrischen Verfahren zum Prüfen der Oberfläche von einem Gegenstand auf Defekte oder zum Messen von Unebenheiten auf einem Gegenstand ist gut bekannt. Generell gesagt bestehen diese Verfahren im Generieren eines interferometrischen Musters auf der Oberfläche von dem Gegenstand und dann Analysieren des resultierenden interferometrischen Bildes (oder Interferogramms), um die Unebenheiten auf dem Gegenstand zu erhalten. Das interferometrische Bild beinhaltet generell eine Serie von schwarzen und weißen Strichmustern.

[0003] Interferometrische Verfahren, die eine Verwendung eines Lasers zum Generieren des interferometrischen Musters benötigen, werden "klassische interferometrische Verfahren" genannt. Bei derartigen klassischen Verfahren bestimmt generell die Wellenlänge des Lasers und die Konfiguration von der Meßeinrichtung die Periode von dem resultierenden Interferogramm. Klassische Interferometrieverfahren werden generell im sichtbaren Spektrum verwandt, um Höhenunterschiede in der Größenordnung von Mikrometern zu messen.

[0004] Es ist, wie auch immer, als schwierig empfunden worden, derartige Verfahren zu verwenden, um Höhenunterschiede (Unebenheiten) auf einer Oberfläche zu messen, die Unterschiede unterhalb 0,5 – 1 μm zeigt, falls diese im sichtbaren Spektrum implementiert werden. Tatsächlich steigt die Dichte von den weißen und schwarzen Strichmustern von dem resultierenden Interferogramm und verursacht, daß deren Analyse umständlich wird.

[0005] Ein anderer Nachteil von klassischen interferometrischen Verfahren besteht darin, daß sie Meßeinrichtungen benötigen, die insbesondere empfindlich bezüglich Rauschen und Vibrationen sind.

[0006] Oberflächenprüfungsverfahren basierend auf Moiré Interferometrie erlauben ein Messen der Unebenheiten von einem Gegenstand im sichtbaren Spektrum mit einer sehr viel höheren Genauigkeit als der Genauigkeit von klassischen interferometrischen Verfahren. Diese Verfahren basieren auf der Analyse von den erhaltenen Schwebungen zwischen, 1.) einem über dem zu messenden Gegenstand positionierten Gitter und dessen Schatten auf dem Gegenstand ("Schatten-Moiré-Techniken") oder 2.) der Projektion von einem Gitter auf dem Gegenstand und einem anderen zwischen dem Gegenstand und der Kamera positionierten Gitter, das verwandt wird, um ein Bild von dem resultierenden Interferogramm aufzunehmen ("Projizierende Moiré-Techniken"). In beiden Fällen produzieren die Schwebungen zwischen den beiden Gittern die Strichmuster von dem resultierenden Interferogramm.

[0007] Die Schatten-Moire-Technik beinhaltet im Speziellen die Schritte zum Positionieren eines Gitters nahe dem zu messenden Gegenstand, Bereitstellen einer Ausleuchtung unter einem ersten Winkel zu der Ebene von dem Gegenstand (zum Beispiel 45°) und Verwenden einer Kamera, positioniert unter einem zweiten Winkel (zum Beispiel 90° zu der Ebene von dem Gegenstand), um Bilder von dem Interferogramm aufzunehmen. Da der Abstand zwischen dem Gitter und dem Gegenstand variiert, erzeugt diese Änderung der Höhe eine Änderung in dem Muster von dem Interferogramm. Diese Änderung in dem Muster kann dann analysiert werden, um die Unebenheiten auf dem Gegenstand zu erhalten. Beispielsweise behandelt die Patentanmeldung WO-A-98 55 826 die Messung von einer Oberflächenflachheit unter Einsatz der Schatten-Moiré-Technologie.

[0008] Ein Nachteil der Verwendung der Schatten-Moire-Technik zum Messen der Unebenheiten von einem Gegenstand ist, daß das Gitter sehr nahe zu dem Gegenstand positioniert werden muß, um genaue Resultate zu erhalten, was Einschränkungen im Aufbau von der Meßeinrichtung verursacht.

[0009] Die projizierende Moiré-Technik ist sehr ähnlich zu der Schatten-Moire-Technik, da das Gitter, positioniert zwischen der Kamera und dem Gegenstand, eine ähnliche Funktion wie der Schatten von dem Gitter in der Schatten-Moire-Technik hat. Ein Nachteil von der projizierenden Moiré-Technik ist allerdings, daß es viele Einstellungen mit sich bringt und hierdurch ein höheres Risiko von Ungenauigkeiten in den Resultaten erzeugt, da es die Positionierung und Verfolgung von zwei Gittern verlangt. Weiterhin führt das zweite Gitter zum Ver-

dunkeln der Kamera, was eine gleichzeitige Verwendung zur Vornahme anderer Messungen verhindert.

[0010] Auf verschiedenen Prinzipien basierend schließen die beiden Techniken allerdings typischerweise den Einsatz von einem Phasenverschiebungsverfahren ein, um die Genauigkeit der Analyse von den erhaltenen Interferogrammen zu verbessern. Insbesondere die hierin vorstehend genannte Patentanmeldung WO-A-98 55 826, das europäische Patent EP-A-0 182 469, das ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erhalt von Oberflächenprofilometrie und dreidimensionalen Oberflächenkonturen in einem phasenabgestuften Abbildungsprozeß lehrt, und Patentanmeldung WO-A-88 02 847, die sich auf einen erweiterten Bereich zum Moiré-Konturieren bezieht, verwenden das Phasenverschiebungsverfahren. Alle drei Dokumente lehren, daß zusätzliche Bilder von einem Bezugsgegenstand und entsprechend von dem Gegenstand mit dem Ziel einer Erhöhung der Präzision von der Phasenberechnung unter Einsatz aller Werte in Berechnungen höherer Ordnung aufgenommen werden.

[0011] Ein Verfahren und ein System zum Messen von Unebenheiten auf einem Gegenstand frei von den oben genannten Nachteilen nach dem Stand der Technik sind folglich wünschenswert.

AUFGABEN DER ERFINDUNG

[0012] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist daher, ein verbessertes Verfahren und System zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands bereitzustellen.

[0013] Eine andere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein derartiges System bereitzustellen, das für eine Prüfung auf Lotkoplanarität geeignet ist.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0014] In Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands unter Einsatz einer Kamera bereitgestellt, das die folgenden Schritte umfaßt:

- a) Projizieren eines Gitters auf einem Bezugsgegenstand; das Gitter wird auf einer ersten Position bezüglich zu der Kamera und dem Bezugsgegenstand angeordnet;
 - b) Aufnehmen eines Bildes mittels der Kamera, welches mindestens einen Bildpunkt des durch das projizierte Gitter ausgeleuchteten Bezugsgegenstandes umfaßt, und Speichern jeweils eines Intensitätswerts für den mindestens einen Bildpunkt des Bildes des Bezugsgegenstandes;
 - c) Wiederholen der Schritte a) und b), wobei das Gitter jedesmal bezüglich zu der Kamera und dem Bezugsgegenstand in einer anderen bekannten Position und des Bezugsgegenstands angeordnet wird;
 - d) Berechnen einer Phase des Bezugsgegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes von dem Bezugsgegenstand unter Verwendung der Intensitätswerte des Bezugsgegenstands von einem Bildpunkt des Bildes von dem Bezugsgegenstand;
 - e) Projizieren des Gitters auf den Gegenstand; wobei das Gitter in der ersten Position angeordnet wird;
 - f) Aufnehmen eines Bildes von dem Gegenstand mittels der Kamera, welches durch das projizierte Gitter ausgeleuchtet ist; wobei das Bild des Gegenstands mindestens einen Bildpunkt des durch das projizierte Gitter ausgeleuchteten Gegenstands umfaßt und Speichern jeweils eines Intensitätswerts für den mindestens einen Bildpunkt des Bildes von dem Gegenstand;
 - g) Wiederholen der Schritte e) und f), wobei das Gitter jedesmal in der anderen aus c) bekannten Position angeordnet wird;
 - h) Berechnen einer Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes für die Position des Gegenstands unter Verwendung von Intensitätswerten des Gegenstands für den Bildpunkt des Bildes vom Gegenstand;
 - i) Berechnen einer Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand für jeden des mindestens einen Bildpunkts unter Verwendung der Phase des Bezugsgegenstands und der Phase des Gegenstands für den entsprechenden des mindestens einen Bildpunkts;
 - j) Verwenden dieser Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand für jeden dieser Bildpunkte zum Bestimmen der Unebenheiten auf den Gegenstand;
- dadurch gekennzeichnet, daß
- Schritt c) ein Wiederholen der Schritte a) und b) umfaßt, wobei das Gitter jedesmal in einer anderen bekannten Position bezüglich zu der Kamera und zum Bezugsgegenstand angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand zu erhalten;
- Schritt d) ein Berechnen der Phase des Bezugsgegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand umfaßt, und zwar unter Verwendung von drei ausgewählten Intensitätswerten

ten des Bezugsgegenstands eines Bildpunktes aus dem Bild vom Bezugsgegenstand, die aus den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt werden, die für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand erhalten wurden;

Schritt g) das Wiederholen der Schritte e) und f) umfaßt, wobei das Gitter jedesmal in einer anderen aus c) bekannten Position angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Gegenstand zu erhalten; und

Schritt h) ein Berechnen der Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes in einer Position des Gegenstands umfaßt, wobei bei dem Berechnen drei ausgewählte Intensitätswerte des Gegenstands eines Bildpunktes des Bildes vom Gegenstand von den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt werden, die für den des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Gegenstand erhalten wurden;

wodurch nur drei Bilder vom Bezugsgegenstand und drei Bilder vom Gegenstand benötigt werden, die von verschiedenen bekannten Positionen des Gitters aufgenommen wurden, um die Unebenheiten des Gegenstands zu messen.

[0015] In Übereinstimmung mit einem anderen Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren bereitgestellt zum Messen einer Höhe eines Moduls, das mindestens einen auf einem generell ebenen Substrat angeordneten Gegenstand beinhaltet, und zwar unter Verwendung einer Kamera, die mit einer Anordnung von Bildpunkten versehen ist, wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt:

a) Projizieren eines Gitters auf das Modul; wobei das Gitter in einer ersten Position bezüglich zu der Kamera und zum Modul angeordnet wird;

b) Aufnehmen eines Bildes von dem Modul mit der Kamera, welches von dem projizierten Gitter beleuchtet wird, wobei das Bild des Moduls Intensitätswerte für jeden Bildpunkt aufweist;

c) Wiederholen der Schritte a) und b), um Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;

d) Berechnen einer Phase des Moduls für jeden Bildpunkt unter Verwendung der Intensitätswerte des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt;

e) Berechnen der Höhe von mindestens einem Gegenstand für jeden Bildpunkt;

f) Projizieren des Gitters auf eine Bezugsebene, wobei das Gitter in der ersten Position angeordnet wird;

g) Aufnehmen eines Bildes von der Bezugsebene mit der Kamera, welche von dem projizierten Gitter beleuchtet wird, wobei das Bild der Bezugsebene Intensitätswerte für jede Bildpunktposition aufweist;

h) Wiederholen der Schritte f) und g), um Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;

i) Berechnen der Phase der Bezugsebene für jede Bildpunktposition unter Verwendung der Intensitätswerte für den entsprechenden Bildpunkt der Bezugsebene;

j) Berechnen der Höhe des Substrats für jeden Bildpunkt; und

k) Berechnen der Höhe des Moduls;

dadurch gekennzeichnet, daß:

der Schritt c) mindestens zwei Mal ausgeführt wird, wobei das Gitter in zwei verschiedenen bekannten Positionen bezüglich der Kamera und des Moduls angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;

Schritt d) das Berechnen einer Phase des Moduls für jeden Bildpunkt unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt umfaßt;

der Schritt h) mindestens zwei Mal ausgeführt wird, wobei das Gitter auf zwei verschiedenen Positionen angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten; und

Schritt i) das Berechnen der Phase der Bezugsebene für jede Bildpunktposition unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte für den entsprechenden Bildpunkt der Bezugsebene umfaßt.

[0016] Vorzugsweise ist dieses Verfahren weiterhin dadurch gekennzeichnet, daß

der Schritt e) das Berechnen einer komplementären Phase des Substrats umfaßt und zwar unter Verwendung von mindestens drei Intensitätswerten der Bildpunkte des Bildes von dem Modul, die nicht mit dem mindestens einen Gegenstand korrespondieren, und Verwenden der komplementären Phase des Substrats und der Phase des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt;

der Schritt j) die Verwendung der komplementären Phase des Substrats und der Phase der Bezugsebene für den entsprechenden Bildpunkt umfaßt; und

der Schritt k) das Addieren der Höhe des Substrats und der Höhe des mindestens einen Gegenstands umfaßt.

[0017] Gemäß eines anderen Aspekts der vorliegenden Erfindung wird ein System zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands bereitgestellt, welches folgendes umfaßt:

eine Gitterprojektionsvorrichtung, wobei die Gitterprojektionsvorrichtung ein Gitter aufweist, eine Ausleuchtungsvorrichtung, die eine Lichtquelle enthält, die durch das Gitter auf den Gegenstand zu projizieren ist, und

einen Projektor zum Projizieren des Gitters auf den Gegenstand, wobei das Gitter an einen Träger befestigt ist; eine Bildaufnahmeeinrichtung, die eine mit einer Anordnung von Bildpunkten versehene Kamera enthält ein Computersystem, das konfiguriert ist für

- a) eine Positionierung des Gitters bezüglich des Gegenstands und der Bildaufnahmeeinrichtung;
 - b) das Empfangen von der Bildaufnahmeeinrichtung von mindestens drei Bildern des auf dem Gegenstand projizierten Gitters und mindestens drei Bildern des auf einen Bezugsgegenstand projizierten Gitters; wobei jedes der Bilder von dem auf dem Gegenstand projizierten Gitter einer anderen bekannten Position des Gitters entspricht, wobei jedes der Bilder des auf den Bezugsgegenstand projizierten Gitters einer der bekannten Positionen des Gitters entspricht;
 - c) das Berechnen einer Phase des Bezugsgegenstands für jeden Bildpunkt unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte des Bezugsgegenstandes für den entsprechenden Bildpunkt;
 - d) das Berechnen einer Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes von der Gegenstandsposition unter Verwendung von drei ausgewählten Intensitätswerten des Gegenstands eines Bildpunkts des Bildes von dem Gegenstand, die aus den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt wird, die für jeden Bildpunkt der Abbildung des Gegenstands erhalten wurden; und
 - e) das Berechnen der Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand für jeden Bildpunkt unter Verwendung der Phase des Bezugsgegenstands und der Phase des Gegenstands für jeden entsprechenden Bildpunkt;
- dadurch gekennzeichnet, daß der Projektor zwischen dem Gitter und dem Gegenstand angeordnet ist und dadurch, daß das System so ausgelegt ist, daß es zum Messen der Unebenheiten des Gegenstands lediglich drei Bilder des Bezugsgegenstands und drei Bilder des Gegenstands benötigt, die in drei unterschiedlichen bekannten Positionen des Gitters aufgenommen wurden, wobei zusätzliche Bilder des Bezugsgegenstands und zusätzliche Bilder des Gegenstands, die in unterschiedlichen bekannten Positionen des Gitters aufgenommen wurden, lediglich ein Erhöhen der Präzision und der Verlässlichkeit des Systems ermöglichen.

[0018] Andere Aufgaben, Vorteile und Merkmale der vorliegenden Erfindung werden deutlicher durch Lesen der folgenden nicht beschränkenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen hiervon, die lediglich im Wege von Beispielen unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen gegeben werden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0019] In den hinzugefügten Zeichnungen:

[0020] **Fig. 1** ist eine schematische Darstellung von einem System zum Prüfen der Oberfläche von einem Gegenstand gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung;

[0021] **Fig. 2** ist eine schematische Darstellung von beiden, der Bildaufnahmeeinrichtung und der Gitterprojektionsvorrichtung nach **Fig. 1**;

[0022] **Fig. 3** ist eine schematische Darstellung, die die Projektion von einem Gitter auf einem Gegenstand zeigt;

[0023] **Fig. 4** ist ein Blockdiagramm von einem Verfahren zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0024] **Fig. 5** ist eine Abbildung von einer auf einer Platte angeordneten Kugel, die durch das System von **Fig. 1** aufgenommen wurde;

[0025] **Fig. 6** ist eine Abbildung von der Platte von **Fig. 5**, die durch das Gitter ausgeleuchtet ist;

[0026] **Fig. 7** ist ein durch das System von **Fig. 1** berechnetes Bild, das die Phase von der Platte von **Fig. 6** repräsentiert;

[0027] **Fig. 8** ist ein Bild von der durch das Gitter ausgeleuchteten Kugel von **Fig. 5** angeordnet auf der Platte;

[0028] **Fig. 9** ist ein durch das System von **Fig. 1** berechnetes Bild, das die Phase von der Kugel mit der Platte von **Fig. 8** repräsentiert;

[0029] **Fig. 10** ist ein Bild, das die Phasenänderung zwischen den Bildern von **Fig. 7** und **9** zeigt;

[0030] **Fig. 11** ist ein Bild, das die Phasenänderung zwischen einem Bleikugeln auf einem Substrat umfassenden Modul und einer Bezugsoberfläche repräsentiert;

[0031] **Fig. 12** ist ein Bild, das die Phase von dem Modul in **Fig. 11** repräsentiert;

[0032] **Fig. 13** ist ein Bild, das die Phasenänderung zwischen der Phase von den Bildern von der **Fig. 12** und der Phase des Bildes von einer komplementären Oberfläche repräsentiert;

[0033] **Fig. 14** ist ein Bild, das die Phasenänderung zwischen den Phasen von den Bildern von der komplementären Oberfläche und der Bezugsebene repräsentiert;

[0034] **Fig. 15** ist ein Bild von **Fig. 14** nach dem Auspacken.

BESCHREIBUNG DES BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSBEISPIELS

[0035] Sich den **Fig. 1** und **2** von den hinzugefügten Zeichnungen zuwendend, wird ein System **10** zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands, in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung beschrieben werden.

[0036] Das Oberflächenprüfsystem **10** umfaßt eine Gitterprojektionsvorrichtung **11**, eine Bilderfassungs- oder Bildaufnahmeeinrichtung **12** und einen Computer **14**, der vorteilhafterweise mit einem Speichergerät **16**, einem Ausgabegerät **18** und einem Eingabegerät **20** versehen ist.

[0037] Sich nun im Speziellen der **Fig. 2** der beigefügten Zeichnungen zuwendend wird die Gitterprojektionsvorrichtung **11** und die Bildaufnahmeeinrichtung **12** detaillierter beschrieben werden.

[0038] Die Gitterprojektionsvorrichtung **11** enthält eine Illuminations- oder Ausleuchtungsvorrichtung **22**, ein Gitter **24**, welches auf einem bewegbaren Träger **26** angeordnet ist, und einen Projektor **28**.

[0039] Die Ausleuchtungsvorrichtung **22** beinhaltet vorteilhafterweise eine Quelle für weißes Licht **34**, das durch das Gitter **24** projiziert ist. Die Quelle **34** ist zum Beispiel das Ende von einer optischen Faser (nicht gezeigt), die Licht von einer Weißlichtquelle (nicht gezeigt) bereitstellt. Eine aspherische Linse **36** oder jeder andere Kondensor kann vorteilhafterweise ebenso zwischen der Quelle **34** und dem Gitter **24** verwandt werden. Andere Lichtquellen können ebenso benutzt werden. Es wird ebenso angenommen, innerhalb der Reichweite von Fähigkeiten eines Fachmanns zu sein, um eine andere Ausleuchtungsvorrichtung innerhalb der Lehre der vorliegenden Erfindung, wie in den hinzugefügten Ansprüchen definiert, auszudenken.

[0040] Die Konfiguration von dem Gitter **24** kann, abhängig von der Auflösung, die benötigt wird, variieren, um die Unebenheiten von dem Gegenstand **30** hinreichend zu messen. Es wurde beispielsweise gefunden, daß eine Ronchi-Linierung mit 250 Linien pro Inch (2,53 cm) es ermöglicht, die Lotkoplanarität von einer Leiterplatte zu messen, wo eine Auflösung von etwa 1 mm benötigt wird.

[0041] Das Gitter **24** ist vorteilhafterweise auf einem bewegbaren Träger **26** angeordnet, der eine Verschiebung von dem Gitter **24** in einer Richtung senkrecht (siehe Doppelpfeil **40** in **Fig. 2**) zu beiden der Linien auf dem Gitter **24** und zu der Einfallsrichtung von dem Licht (unterbrochene Linie **42** in **Fig. 2**) erlaubt.

[0042] Der bewegbare Träger **26** wird von einem Schrittmotor (nicht gezeigt) betätigt. Der Schrittmotor wird vorteilhafterweise mit einem Mikrocontroller (nicht gezeigt) gesteuert, der von dem Computer **14** getriggert wird. Selbstverständlich kann der Schrittmotor direkt von dem Computer **14** gesteuert werden.

[0043] Ein Projektor **28** in Form von einer 50 mm großen TV-Linse wird vorteilhafterweise zum Projizieren des Gitters **24** auf den Gegenstand **30** benutzt.

[0044] Der Winkel θ zwischen der Einfallsrichtung von dem Licht (unterbrochene Linie **42** in **Fig. 2**) und der Sichtlinie von der Bildaufnahmeeinrichtung **12** (unterbrochene Linie **44** in **Fig. 2**) kann abhängig von der Beschaffenheit des zu messenden Gegenstands **30** variieren.

[0045] Es wird angenommen, innerhalb der Fähigkeiten eines Fachmanns zu sein, die Ausleuchtungsvorrichtung **22**, das Gitter **24** und den Gitterprojektor **28** relativ zu dem Gegenstand **30** zu positionieren, um ein projiziertes Gitter zu erhalten, das die gewünschte Teilung p auf dem Gegenstand **30** aufweist.

[0046] Beispielsweise stellt ein Ronchi-Gitter mit einer Dichte von 250 Linien pro Inch (2,53 cm) bei einem Abstand **43** von 22 cm zwischen dem Gegenstand **30** und dem Projektor **28** und für einen Winkel θ von 30° ein projiziertes Gitter bereit, das eine Teilung p von 0,5 mm aufweist. Solch eine Teilung ist äquivalent zu einer Änderung der Höhe von etwa 1 mm auf der Oberfläche von dem Gegenstand **30**.

[0047] Offensichtlich wird die Teilung von dem projizierten Gitter variieren mit der Teilung von dem Gitter **24**.

[0048] Wie hierin nachstehend erklärt werden wird, kann die Verschiebung von dem projizierten Gitter **24** auf dem Gegenstand **30** alternativ durch Festlegung der Position von dem Gitter **24** und durch gemeinschaftliches Bewegen des Gegenstands **30** und der Kamera **46** erreicht werden.

[0049] Es ist anzumerken, daß das System **10** kein Gitter zwischen der Kamera **46** und dem Gegenstand **30** benötigt.

[0050] Die Bildaufnahmeeinrichtung **12** enthält eine Kamera **46**, die mit einer Anordnung von Bildpunkten versehen ist und vorteilhafterweise in Form von einer CCD-Kamera **46** ist. Solch eine Kamera stellt beispielsweise eine Auflösung von 1300×1024 Bildpunkten zur Verfügung.

[0051] Die Bildaufnahmeeinrichtung **12** beinhaltet ebenso vorteilhafterweise eine telezentrische Linse **48**, die vorteilhafterweise über einen optionalen Verlängerungstubus **50** an der Kamera **46** angeordnet ist.

[0052] Die Konfiguration von der Bildaufnahmeeinrichtung **12** und der Entfernung zwischen der Einrichtung **12** und dem Gegenstand **30** bestimmt das Sichtfeld von der Bildaufnahmeeinrichtung **12**. Ein gewünschtes Sichtfeld kann alternativ ohne den Verlängerungstubus **50** durch Beabstanden der Kamera **46** von dem Gegenstand **30** erreicht werden.

[0053] Die CCD-Kamera kann ersetzt werden durch eine konventionelle Kamera, falls der Computer **14** so konfiguriert ist, um die aquirierten Bilder zu digitalisieren.

[0054] Der Computer **14** ist vorteilhafterweise so konfiguriert, die Verschiebung von dem Gitter **24** zu steuern, die von der Kamera **46** aufgenommenen Bilder von dem Gegenstand **30** zu verarbeiten und diese Bilder zu analysieren, um die Unebenheiten eines Gegenstands **30** zu messen.

[0055] Der Computer **14** ist vorteilhafterweise mit Speichermitteln versehen, die ein Abspeichern von den Bildern erlauben, wenn sie durch den Computer **14** verarbeitet worden sind, wodurch die Verarbeitungsgeschwindigkeit erhöht wird.

[0056] Das Speichergerät **16** kann zum Beispiel eine Festplatte, ein beschreibbares CD-Rom Laufwerk oder eine andere bekannte Datenspeichereinrichtung sein. Es kann direkt oder entfernt bzw. indirekt über ein Computernetzwerk wie dem Internet mit dem Computer **14** verbunden sein. In Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird das Speichergerät **14** benutzt, um beides, die durch die Bildaufnahmeeinrichtung **12** aufgenommenen Bilder, die Unebenheiten von dem Gegenstand **30** und andere Zwischenergebnisse zu speichern. Diese Dateien können in jedem Format und jeder Auflösung gespeichert werden, die durch den Computer **14** gelesen werden können.

[0057] Das Ausgabegerät **18** erlaubt die Visualisierung von den Bildern und der durch den Computer **14** produzierten Daten und kann vielfältige Formen von einem Anzeigemonitor bis zu einem Druckgerät annehmen.

[0058] Das Eingabegerät **20** kann eine konventionelle Maus, eine Tastatur oder jedes andere wohlbekannte Eingabegerät oder eine Kombination hiervon sein, welches das Eingeben von Daten und Befehlen in den Computer **14** erlaubt.

[0059] Das Speichergerät **16**, der Anzeigemonitor **18** und das Eingabegerät **20** sind alle über Standardverbindungseinrichtungen, wie Datenkabel, an den Computer **14** angeschlossen.

[0060] Der Computer **14** kann ein konventioneller Personalcomputer oder jede andere Daten verarbeitende Maschine sein, die einen Prozessor, einen Speicher und Eingabe-/Ausgabeports (nicht gezeigt) beinhaltet. Die Eingabe-/Ausgabeports können eine Netzwerkverbindung beinhalten, um die Bilder zu und von dem Speichergerät **16** zu übertragen.

[0061] Selbstverständlich läuft eine Software auf dem Computer **14**, die das Verfahren der vorliegenden Erfindung verwirklicht, wie hierin nachstehend beschrieben wird.

[0062] Es soll angemerkt werden, daß das System **10** einstellbare Trägereinrichtungen (nicht gezeigt) beinhaltet, um die Bildaufnahmeeinrichtung **12** und die Gitterprojektionseinrichtung **11** relativ zueinander und zu dem Gegenstand **30** zu positionieren. Alternativ können andere Einstelleinrichtungen verwandt werden, die die Lehre der vorliegenden Erfindung, wie sie in den beigefügten Ansprüchen definiert ist, nicht verlassen.

[0063] Vor einer detaillierten Beschreibung von einem Verfahren zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung soll die dem Verfahren zugrundeliegende generelle Theorie beschrieben werden. Da diese Theorie als wohlbekannt in der Technik angesehen wird und aus Gründen der Exaktheit wird diese hier lediglich kurz beschrieben werden.

[0064] Die Intensität $I(x,y)$ für jeden Bildpunkt (x,y) in einem interferometrischen Bild kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(\Delta\Phi(x,y)) \quad (1)$$

wobei $\Delta\Phi$ die Phasenvariation (oder Phasenmodulation) ist und A und B Koeffizienten sind, die für jeden Bildpunkt berechnet werden können.

[0065] Bei Kenntnis der Phasenvariation $\Delta\Phi$ kann die Höhenverteilung (die Unebenheiten) auf dem Gegenstand an jedem Punkt $h(x,y)$ relativ zu einer Bezugsoberfläche unter Einsatz der folgenden Gleichung (siehe **Fig. 3**) berechnet werden:

$$h(x,y) = \frac{\Delta\Phi(x,y) \cdot p}{2\pi \cdot \tan(\theta)} \quad (2)$$

wobei p die Gitterteilung ist und θ der Projektionswinkel ist, wie vorstehend hierin beschrieben worden ist.

[0066] Obwohl die vorstehende Gleichung für eine parallele Projektion von dem Gitter auf den Gegenstand, wie in **Fig. 3** gezeigt (beachte, daß die Einfallsstrahlen **60** von der Gitterprojektion parallel zueinander sind), gültig ist, wird angenommen, daß es innerhalb der Möglichkeit der Fähigkeiten eines Fachmanns liegt, auch eine andere Gleichung zu benutzen, wenn die Gitterprojektion nicht parallel ist.

[0067] Es wurde beispielsweise für eine kleine nadellochförmige Projektion festgestellt, daß die Teilung p und der Winkel θ mit der Entfernung von dem Gitter auf der Ebene von der Bezugsoberfläche (siehe X in **Fig. 3**) ansteigen. Es wurde festgestellt, daß mit einer Approximation erster Ordnung Variationen von p und θ einander aufheben und die Gleichung 2 innerhalb einer gewissen Grenze der Parameter gültig bleibt.

[0068] Innerhalb der Fähigkeiten von einem Fachmann wird es angenommen, die Beziehung zwischen der Variation von der Höhe $h(x,y)$ und der Phase $\Delta\Phi$ nachzubestimmen und Korrekturen der Beziehung entsprechend der Konfiguration des zum Messen der Unebenheiten verwandten Systems durchzuführen.

[0069] Sich nun auf die **Fig. 4** der beigefügten Zeichnungen beziehend, wird ein Verfahren zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung detaillierter beschrieben.

[0070] Generell gesagt besteht das Verfahren zum Messen der Unebenheiten eines Gegenstands **30** aus der Benutzung des Systems **10** durch Ausführen der folgenden Schritte:

100 – Positionieren des Gitters **24** in einer ersten Position bezüglich zu einem Bezugsgegenstand;

102 – Projizieren des Gitters **24** auf den Bezugsgegenstand;

104 – Aufnehmen eines Bildes von dem Bezugsgegenstand mittels der Kamera **46**, um einen Intensitätswert für jeden Bildpunkt von dem Bild zu sammeln;

106 – mindestens zweimaliges Wiederholen der Schritte **100** bis **104** mit dem auf zwei neuen verschiedenen und bekannten Positionen positionierten Gitter, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;

108 – Berechnen der Phase für jeden Bildpunkt unter Verwendung der drei Intensitätswerte;

110 – Wiederholen der Schritte **100** bis **108** unter Ersetzen des Bezugsgegenstands durch den zu messenden Gegenstand **30**;

112 – Berechnen der Höhendifferenz für jeden Bildpunkt zwischen dem Gegenstand **30** und dem Bezugsgegenstand unter Verwendung der entsprechenden Phasen hiervon für jeden Bildpunkt; und

114 – Bestimmen der Unebenheiten von dem Gegenstand für jeden Bildpunkt unter Verwendung der Höhendifferenz bei jedem Bildpunkt.

[0071] Diese generellen Schritte werden nun mit Bezugnahme auf ein erstes Beispiel weiter beschrieben werden, wo der zu messende Gegenstand **62** eine auf einer Platte **66** angeordnete Sphäre **64** ist. Ein Bild von dem genannten Gegenstand **62** ist in **Fig. 5** gezeigt.

[0072] Durch Auswählen einer ähnlichen Platte als Bezugsgegenstand wird die Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand **62** und dem Bezugsgegenstand die Höhe von der Sphäre **64** liefern. Das gemeinsame Element des Gegenstands **62** und des Bezugsgegenstands ist in diesem Beispiel die Platte **66**.

[0073] In Schritt **100** wird das Gitter **24** unter Verwendung des Trägers **26**, der mittels eines Schrittmotors betätigt wird, zu einer ersten vorbestimmten Position bewegt. Wie hierin vorstehend beschrieben wurde, beinhaltet das System **10** Mittel zum Registrieren und Fixieren der Position von dem Gitter **24** und der Kamera **46** bezüglich des Bezugsgegenstands (und später des Gegenstands).

[0074] In Schritt **102** wird das Gitter **24** dann auf den Bezugsgegenstand projiziert.

[0075] In Schritt **104** nimmt die Kamera **46** ein Bild von dem Bezugsgegenstand auf.

[0076] Das Bild beinhaltet einen Intensitätswert für jeden Bildpunkt von dem Bild. Der Computer **14** speichert die Intensitätswerte für eine zukünftige Verarbeitung.

[0077] Die Schritte **100** bis **104** werden dann mindestens zwei mal wiederholt mit dem auf zwei neuen, bekannten und verschiedenen Positionen positionierten Gitter (Schritt **106**). Dies wird drei leicht verschiedene Bilder und somit die drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt liefern. Eines von den drei Bildern von der durch das Gitter **24** ausgeleuchteten Platte ist in **Fig. 6** gezeigt.

[0078] Da die Gleichung 1 drei Unbekannte, diese sind A, B und $\Delta\Phi$, beinhaltet, werden die Intensitätswerte I_1 , I_2 und I_3 für jeden Bildpunkt und somit drei Bilder benötigt, um die Phasenänderung $\Delta\Phi$ zu berechnen.

[0079] Die zwei neuen Bilder werden nach kleinen Translationen von dem Gitter **24** relativ zu der Oberfläche von dem Bezugsgegenstand aufgenommen. Die Verschiebungen werden so ausgewählt, um Phasenvariationen in den Bildern $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ und $\Delta\phi_3$ zu erhalten. Dies resultiert in drei Gleichungen ähnlich zu Gleichung 1 für jeden Bildpunkt von der Anordnung von Bildpunkten von der Kamera **46**:

$$I_n = A + B \cdot \cos(\Delta\Phi + \Delta\phi_n) \quad (3)$$

mit $n = 1, 3$.

[0080] Durch Lösen des Systems von Gleichung 3 erhält man den Wert von $\Delta\Phi$. Die Verschiebungen von dem Gitter **24** werden so ausgewählt, daß vorteilhafterweise verschiedene Werte für $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ und $\Delta\phi_3$ bereitgestellt werden.

[0081] Gemäß eines bevorzugten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung werden mehr als drei Bilder aufgenommen. Dies ergibt zusätzliche Intensitätswerte, die benutzt werden können, um die Genauigkeit von der berechneten Phase zu erhöhen.

[0082] Verfahren gemäß dem Stand der Technik benötigen häufig den Einsatz von vier Bildern, und alle vier Werte von diesen Bildern werden zur Phasenabschätzung genommen. Da ein Verfahren der vorliegenden Erfindung lediglich drei Bilder benötigt, können zusätzliche Bilder verwandt werden, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von dem Verfahren zu erhöhen.

[0083] Durch Erhalt von zum Beispiel vier (oder mehreren) Bildern ist es möglich, verrauschte Bildpunkte oder Bilder auszusondern und lediglich die Bildpunkte zu nehmen, die die vorteilhaftesten Intensitätswerte aufweisen. Wenn in der Tat einer von den vier Intensitätswerten verrauscht ist (dies kann zum Beispiel durch eine Bildsättigung verursacht werden), kann die entsprechende Intensität ohne Beeinträchtigen der Genauigkeit von der resultierenden Phase für diesen speziellen Bildpunkt eliminiert werden.

[0084] Alternativ können mehr als drei Intensitätswerte benutzt werden, um die Phase unter Verwendung eines numerischen Verfahrens, wie einer Anpassung kleinster Quadrate, traditionell berechnet werden. Allerdings kann solch ein Verfahren keine fehlerhafte Berechnung der Phasenwerte für bestimmte Bildpunkte verhindern, die möglicherweise eine Ungenauigkeit in der Berechnung von den Unebenheiten eines Gegenstands verursachen.

[0085] Gemäß eines anderen bevorzugten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung werden die Verschiebungen von dem Gitter von den zweiten und dritten Bildern (und dem vierten Bild) so ausgewählt, um zwei Bilder bereitzustellen, die eine 180° Phasenvariation $\Delta\phi_n$ (siehe Gleichung 3) aufweisen. Dies ermöglicht den Erhalt eines Bildes von dem Bezugsgegenstand (oder dem Gegenstand) ohne das projizierte Gitter. Dies kann erreicht werden durch Addieren der Intensitätswerte von den zwei Bildphasen, die um 180° verschoben sind.

[0086] Allgemein ausgedrückt, wenn die Summe von den Phasenänderungen von einigen von den drei oder mehreren von der Kamera **46** aufgenommenen Bildern 360° ist, kann ein entsprechendes zweidimensionales Bild durch Addieren der Intensitätswerte von diesen Bildern für jeden Bildpunkt erhalten werden. Dieses nachgebildete zweidimensionale Bild beinhaltet nicht das projizierte Gitter. Dieses Bild kann benutzt werden, um eine vorläufige Analyse des Bezugsgegenstands (oder des Gegenstands) durchzuführen, wodurch jede nachfolgende Analyse beschleunigt werden kann, was mit dem Bild oder den Werten, die mit Schritt **112** erhalten werden, durchzuführen sein wird.

[0087] In Schritt **108** wird die Phase unter Verwendung der drei Intensitätswerte (oder der drei besten Intensitätswerte) für jeden Bildpunkt berechnet durch Lösen der Gleichung 3. Dies kann beispielsweise durch Benutzen eines konventionellen numerischen Verfahrens erreicht werden. Numerische Verfahren zum Lösen eines derartigen Gleichungssystems werden als bekannt im Stand der Technik angenommen und werden nicht hierin beschrieben werden.

[0088] Die resultierende Phase von dem Bezugsgegenstand für jeden Bildpunkt ist in **Fig. 7** gezeigt.

[0089] Wenn das Verfahren von **Fig. 4** benutzt wird, um eine Reihe von Gegenständen zu prüfen, können die Schritte **100** bis **108** vorteilhafterweise lediglich einmal für den Bezugsgegenstand vor der Prüfung durchgeführt werden. Dies erlaubt die Erhöhung der Geschwindigkeit von der Prüfung.

[0090] Die Schritte **100** bis **108** werden durch Ersetzen des Bezugsgegenstands durch den Gegenstand wiederholt, um den Gegenstand **62** zu messen.

[0091] Eines von den Bildern von der Sphäre **64** mit der durch das Gitter **24** ausgeleuchteten Platte **66** ist in **Fig. 8** gezeigt.

[0092] Da kein Unterschied bei dem Durchführen der Schritte **100** bis **108** mit dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand sich ergeben und zu Klarstellungszwecken, werden diese Schritte nicht erneut und mit Bezugnahme auf den Gegenstand beschrieben werden.

[0093] Die resultierende Phase von der Sphäre **64** mit der Platte **66** ist in **Fig. 9** gezeigt. Es soll angemerkt werden, daß der Bereich **68** im Bild von **Fig. 9** von dem Schatten der Sphäre **64** verursacht wird.

[0094] In Schritt **112** wird die Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand **30** und dem Bezugsgegenstand für jeden Bildpunkt, wie in Schritt **108** erhalten, berechnet durch Subtrahieren der Phase des Bezugsgegenstands von der Phase des geprüften Gegenstands. Das resultierende Bild ist in **Fig. 10** gezeigt.

[0095] Es soll angemerkt werden, daß die in Schritt **108** berechneten Phasen für den Gegenstand und für den Bezugsgegenstand, die in den **Fig. 7** und **9** dargestellt sind, mit den Oberflächenphasen relativ zu einer imaginären Projektionsebene korrespondieren.

[0096] Wenn eine nicht parallele Projektion von dem Gitter **24** ausgeführt wird, erscheint diese imaginäre Projektion leicht gebogen. Dies ist nicht nachteilig für das Verfahren zum Messen von Unebenheiten von einem Gegenstand gemäß der vorliegenden Erfindung, so lange die Bilder sowohl von dem Gegenstand als auch von dem Bezugsgegenstand mit demselben System **10** aufgenommen werden.

[0097] Da die Phasen von dem Gegenstand und von dem Bezugsgegenstand bei jedem Bildpunkt mit der Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand (oder dem Bezugsgegenstand) und mit derselben imaginären Projek-

tionsebene (solange dasselbe System mit demselben optischen Aufbau verwandt wird) korrespondieren, ergibt deren Subtraktion die Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand. Dies erlaubt die Bildaufnahme von dem Gegenstand und von dem Bezugsgegenstand unter verschiedener Ausleuchtung durchzuführen.

[0098] Im optionalen Schritt **114** werden die Unebenheiten von dem Gegenstand, das heißt dessen Höhe, für jeden Bildpunkt bestimmt, und zwar unter Verwendung der Höhendifferenz in jedem Bildpunkt zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand und mit Kenntnis der Abmessungen des Bezugsgegenstands.

[0099] Wie einem Durchschnittsfachmann nunmehr klar wird, kann ein Verfahren gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung benutzt werden, um die Höhendifferenz zwischen zwei Gegenständen (einer wird der Bezugsgegenstand sein) zu messen. In diesem Fall wird naheliegenderweise der Schritt **114** nicht durchgeführt.

[0100] In einigen Anwendungen kann es vorteilhaft sein, eine ebene Oberfläche als Bezugsgegenstand zu verwenden, auf welcher der zu messende Gegenstand aufgelegt sein wird.

[0101] Bei einigen Anwendungen kann es vorteilhaft sein, das System **10** mit einem Registrierungssystem zu versehen, um das Positionieren von dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand auf einer bekannten Position bezüglich zu der Kamera zu unterstützen. Sofern ein Vergleich zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand für jeden Bildpunkt durchgeführt wird, kann tatsächlich ein Registrierungssystem sicherstellen, daß korrespondierende Punkte verglichen werden.

[0102] Ein derartiges Registrierungssystem kann viele Formen annehmen und beinhaltet Zeichen auf einer planen Oberfläche, einen Bezugspunkt oder ein in den Computer implementiertes Softwareprogramm.

[0103] Es soll angemerkt werden, daß die Bilder zuerst gewonnen werden können und dann zu einem zukünftigen Zeitpunkt ohne die Lehre von der vorliegenden Erfindung, wie in den hinzugefügten Ansprüchen definiert, zu verlassen, verarbeitet werden.

[0104] Wie beim Lesen der vorliegenden Beschreibung klar werden wird, erlaubt das Verfahren gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung das Messen von Unebenheiten eines Gegenstands unter Verwendung von weißem Licht.

[0105] Obwohl die vorliegende Erfindung anhand eines Beispiels beschrieben wurde, bei dem sphärische Gegenstände gemessen wurden, erlaubt es die Prüfung und Messung von Gegenständen, die andere Konfigurationen aufweisen.

[0106] Derselbe Gegenstand kann auch als der Bezugsgegenstand dienen, wenn das System **10** benutzt wird, um die Variation über die Zeit von den Unebenheiten des Gegenstands zu beobachten.

[0107] Der Bezugsgegenstand kann alternativ durch ein Computermodell von dem Gegenstand ersetzt werden, das beispielsweise durch eine Rechner gestützte Konstruktion (CAD) generiert ist, das gemäß dem Aufbau von dem Systems **10** virtuell positioniert werden wird.

[0108] Der Bezugsgegenstand kann ebenso ein ähnlicher Gegenstand sein, der Defekte innerhalb akzeptabler Parameter aufweist. Die Subtraktion von den Phasen von dem Gegenstand und von dem Bezugsgegenstand wird folglich den Defekt von dem Gegenstand unter Prüfung fortsetzen. Dieser Aspekt der Erfindung ist insbesondere interessant, um die Unebenheiten eines Gegenstands zu überprüfen, der wichtige Unterschiede in den Unebenheiten aufweist.

[0109] Da tatsächlich die Phasenwerte im Bereich von 0 bis 2π beschränkt sind, ist die maximale Höhe h_0 , die durch die meisten Systeme nach dem Stand der Technik ermittelt werden können

$$h_0 = \frac{p}{\tan(\theta)} \quad (\text{siehe Gleichung 2}).$$

[0110] Normalerweise geschieht das Auswickeln der Phase durch Benutzen eines Gitters, welches eine hinreichend große Teilung p aufweist, um sicherzustellen, daß alle Höhenänderungen in einer Einzelphasenordnung (0 bis 2π) sein werden.

[0111] Ein Nachteil hierbei ist der Verlust von Genauigkeit, der ihm innewohnt. Wenn der zu messende Gegenstand zum Beispiel geneigt im Bezug auf die Bildaufnahmeeinrichtung ist, kann der Verlust von Genauigkeit wichtig werden.

[0112] Das folgende Beispiel wird aufzeigen, wie ein Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung den vorstehend genannten Nachteil zu verhindern erlaubt und bezieht sich auf die Prüfung auf Lotkoplanarität auf einer Leiterplatte.

[0113] Fig. 11 zeigt ein Bild mit Unebenheiten eines Moduls **69**, das eine Vielzahl von Bleikugeln **70** auf einem Substrat **72** umfaßt. Das Bild von Fig. 11 wird durch Durchführen der Schritte **107** bis **114** von Fig. 4 erhalten. In diesem Beispiel ist der Gegenstand das Modul **69** (beinhaltend das Substrat **72** und die Bleikugeln **70**) und der Bezugsgegenstand ist eine ebene Bezugsoberfläche (nicht gezeigt).

[0114] Es kann durch die Änderung in den grauen Schatten in dem Bild in Fig. 11 gesehen werden, daß das Substrat **72** nicht parallel zu einer ebenen Oberfläche ist. Ein derartiges Bild stellt hierdurch eine geringere Genauigkeit beim Messen der Höhe von dem Gegenstand bereit, als wenn das Substrat eben gewesen wäre. Es ist anzumerken, daß die Neigung in dem Substrat **72** auf dem Bild tatsächlich nicht verursacht wird durch das System **12**, aber die aktuelle Konfiguration von dem Substrat **72** wiedergibt. Die geringe Änderung in der Höhe von jedem Bleiball **70** kann verlorengehen in der Gesamtvariation des Profils von dem Substrat **72**.

[0115] Ebenso kann jemand einen Computeralgorithmus zum virtuellen Gleichrichten des Substrats von dem Bild ersinnen, ein derartiger Algorithmus kann zu der Prüfverarbeitungszeit hinzukommen. Dies kann als ein Nachteil angesehen werden, wenn die Prüfung in Echtzeit an einer Produktionslinie durchgeführt wird.

[0116] Die vorgeschlagene Lösung ist zum Verwenden einer Abschätzung von der Oberfläche von dem Substrat als ein zweiter Bezugsgegenstand.

[0117] Tatsächlich kann es vorteilhaft sein, an jedem Bildpunkt zuerst die Höhe von dem Substrat **72** relativ zu einer ebenen Oberfläche zu ermitteln, nachfolgend die Höhe von den Bleikugeln **70** relativ zu dem Substrat **72** und letztlich diese beiden Höhen zu addieren, um die Gesamthöhe von dem Gegenstand, das heißt das Substrat mit den Bällen, bereitzustellen.

[0118] Die Phase von dem Modul ist in Fig. 12 aufgezeigt und durch die Schritte **100** bis **108** von dem Verfahren von Fig. 4 zu erhalten.

[0119] Information über die Oberfläche von dem Substrat **72** wird dann durch Analysieren der Bildpunkte korrespondierend zu dem Substrat **72** (zwischen den Bällen **70**) in dem Bild von Fig. 12 erhalten, wo ein Pseudophasenbild von einer komplementären Oberfläche berechnet wird.

[0120] Die Höhe von den Bällen **70** wird für jeden Bildpunkt (Schritt **112**) berechnet durch Subtrahieren der Phase von dem Modul (Fig. 12) und der Phase von der komplementären Oberfläche. Das resultierende Bild kann in Fig. 13 gesehen werden.

[0121] Die Höhe von dem Substrat **72** ist für jeden Bildpunkt (Schritt **112**) ähnlich berechnet durch Subtrahieren der Phase von der komplementären Oberfläche und der Phase von der Bezugsebene. Das resultierende Bild kann in Fig. 14 gesehen werden. Dieses Phasenbild ist dann ausgewickelt (siehe Fig. 15).

[0122] Die Höhe von dem Modul **69** wird dann erhalten durch Addieren der Höhe von Phasen von den Fig. 13 und 15.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands (**30**) unter Verwendung einer Kamera (**46**), das die folgenden Schritte umfaßt:

- a) Projizieren eines Gitters auf einen Bezugsgegenstand; wobei das Gitter (**24**) in einer ersten Position bezüglich zu der Kamera (**46**) und dem Bezugsgegenstand angeordnet wird;
- b) Aufnehmen eines Bildes mittels der Kamera (**46**), welches mindestens einen Bildpunkt des durch das projizierte Gitter ausgeleuchteten Bezugsgegenstandes umfaßt, und Speichern jeweils eines Intensitätswerts für den mindestens einen Bildpunkt des Bildes des Bezugsgegenstandes;
- c) Wiederholen der Schritte a) und b), wobei das Gitter (**24**) jedesmal bezüglich zu der Kamera (**46**) und dem

Bezugsgegenstand in einer anderen bekannten Position und des Bezugsgegenstands angeordnet wird;

d) Berechnen einer Phase des Bezugsgegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes von dem Bezugsgegenstand unter Verwendung der Intensitätswerte des Bezugsgegenstands von einem Bildpunkt des Bildes von dem Bezugsgegenstand;

e) Projizieren des Gitters (24) auf den Gegenstand (30); wobei das Gitter (24) in der ersten Position angeordnet wird;

f) Aufnehmen eines Bildes von dem Gegenstand (30) mittels der Kamera, welches durch das projizierte Gitter ausgeleuchtet ist; wobei das Bild des Gegenstands mindestens einen Bildpunkt des durch das projizierte Gitter ausgeleuchteten Gegenstands umfaßt und Speichern jeweils eines Intensitätswerts für den mindestens einen Bildpunkt des Bildes von dem Gegenstand;

g) Wiederholen der Schritte e) und f), wobei das Gitter (24) jedesmal in der anderen aus c) bekannten Position angeordnet wird;

h) Berechnen einer Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes für die Position des Gegenstands unter Verwendung von Intensitätswerten des Gegenstands für den Bildpunkt des Bildes vom Gegenstand (30);

i) Berechnen einer Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand (30) und dem Bezugsgegenstand für jeden des mindestens einen Bildpunkts unter Verwendung der Phase des Bezugsgegenstands und der Phase des Gegenstands für den entsprechenden des mindestens einen Bildpunkts;

j) Verwenden dieser Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand (30) und dem Bezugsgegenstand für jeden dieser Bildpunkte zum Bestimmen der Unebenheiten auf den Gegenstand (30).

Dadurch gekennzeichnet, daß:

Schritt c) ein Wiederholen der Schritte a) und b) umfaßt, wobei das Gitter (24) jedesmal in einer anderen bekannten Position bezüglich zu der Kamera (46) und zum Bezugsgegenstand angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand zu erhalten;

Schritt d) ein Berechnen der Phase des Bezugsgegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand umfaßt, und zwar unter Verwendung von drei ausgewählten Intensitätswerten des Bezugsgegenstands eines Bildpunktes aus dem Bild vom Bezugsgegenstand, die aus den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt werden, die für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Bezugsgegenstand erhalten wurden;

Schritt g) das Wiederholen der Schritte e) und f) umfaßt, wobei das Gitter (24) jedesmal in einer anderen aus c) bekannten Position angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Gegenstand zu erhalten; und

Schritt h) ein Berechnen der Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes in einer Position des Gegenstands umfaßt, wobei bei dem Berechnen drei ausgewählte Intensitätswerte des Gegenstands eines Bildpunktes des Bildes vom Gegenstand (30) von den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt werden, die für den des mindestens einen Bildpunkts des Bildes vom Gegenstand erhalten wurden; wodurch nur drei Bilder vom Bezugsgegenstand und drei Bilder vom Gegenstand (30) benötigt werden, die von verschiedenen bekannten Positionen des Gitters (24) aufgenommen wurden, um die Unebenheiten des Gegenstands zu messen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei mindestens einem der Schritte d) und h), eine Phase $\Delta\Phi$ für jeden Bildpunkt berechnet wird durch Lösen des folgenden Gleichungssystems:

$$I_n = A + B \cdot \cos(\Delta\Phi + \Delta\varphi_n)$$

worin I_n mindestens drei Intensitätswerte darstellt, A und B bekannte Koeffizienten sind und $\Delta\varphi_n$ diejenigen Phasenvariationen sind, die durch das verschiedene Anordnen des Gitters (24) verursacht werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Schritt c) die Schritte a) und b) mehr als zwei Mal wiederholt werden, wobei das Gitter (24) jedesmal in einer anderen bekannten Position bezüglich zu der Kamera (46) und dem Bezugsgegenstand angeordnet wird, um mehr als drei Intensitätswerte zu erhalten, und wobei im Schritt d) nur die drei vorteilhaftesten Werte aus den mehr als drei Intensitätswerten ausgewählt und zum Berechnen der Phase des Gegenstands für jeden Bildpunkt eingesetzt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Schritt g) die Schritte a) und b) mehr als zwei Mal wiederholt werden, wobei das Gitter jedesmal in einer anderen bekannten Position bezüglich zu der Kamera (46) und dem Gegenstand (30) angeordnet wird, um mehr als drei Intensitätswerte zu erhalten, und wobei im Schritt d) nur die drei vorteilhaftesten Werte aus den mehr als drei Intensitätswerten ausgewählt und zum Berechnen der Phase des Gegenstands für jeden Bildpunkt eingesetzt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in Schritt g) die verschiedenen bekannten Positionen des Gitters (24) so ausgewählt werden, um mindestens zwei Bilder vom Gegenstand (30) bereitzustellen, welche zueinander eine Phasendifferenz von 180 Grad aufweisen.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweidimensionales Bild vom Gegenstand (30) berechnet wird durch Addieren mindestens zweier Bilder des Gegenstands (30), welche zueinander eine Phasendifferenz von 180 Grad aufweisen; wobei das zweidimensionale Bild benutzt wird, um eine vorläufige Analyse vom Gegenstand (30) durchzuführen.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in Schritt c) die verschiedenen bekannten Positionen des Gitters (24) so ausgewählt werden, daß mindestens zwei Bilder des Bezugsgegenstands bereitgestellt werden, die zueinander eine Phasendifferenz von 180 Grad aufweisen.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweidimensionales Bild des Bezugsgegenstands berechnet wird durch Addieren mindestens zweier Bilder des Bezugsgegenstands, welche zueinander eine Phasendifferenz von 180 Grad aufweisen; wobei das zweidimensionale Bild benutzt wird, um eine vorläufige Analyse des Bezugsgegenstands durchzuführen.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Bezugsgegenstand eine ebene Oberfläche ist.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Bezugsgegenstand der Gegenstand (30) zu einem vergangenen vorbestimmten Zeitpunkt ist und die Phase des Bezugsgegenstands um diesen vergangenen Zeitpunkt berechnet wird, wodurch Schritt i) eine Variation der Höhe bei jedem Bildpunkt zwischen dem vergangenen Zeitpunkt und einem daran angenäherten Zeitpunkt bereitstellt, wenn die Phase des Gegenstands berechnet wird; und wobei Schritt j) die Variation über die Zeit der Unebenheiten des Gegenstands (30) ergibt.

11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Bezugsgegenstand eine rechnergestützte Konstruktion (CAD) des Gegenstands (30) ist; das Gitter (24) im Schritt a) virtuell positioniert und in die rechnergestützte Konstruktion (CAD) projiziert und das Bild des Bezugsgegenstands im Schritt b) simuliert wird.

12. Verfahren zum Messen einer Höhe eines Moduls (69), das mindestens einen auf einem generell ebenen Substrat angeordneten Gegenstand beinhaltet, und zwar unter Verwendung einer Kamera (46), die mit einer Anordnung von Bildpunkten versehen ist, wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt:

- a) Projizieren eines Gitters (24) auf das Modul (69); wobei das Gitter (24) in einer ersten Position bezüglich zu der Kamera (46) und zum Modul (69) angeordnet wird;
 - b) Aufnehmen eines Bildes von dem Modul (69) mit der Kamera (46), welches von dem projizierte Gitter beleuchtet wird, wobei das Bild des Moduls (69) Intensitätswerte für jeden Bildpunkt aufweist;
 - c) Wiederholen der Schritte a) und b), um Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;
 - d) Berechnen einer Phase des Moduls für jeden Bildpunkt unter Verwendung der Intensitätswerte des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt;
 - e) Berechnen der Höhe von mindestens einem Gegenstand für jeden Bildpunkt;
 - f) Projizieren des Gitters (24) auf eine Bezugsebene, wobei das Gitter (24) in der ersten Position angeordnet wird;
 - g) Aufnehmen eines Bildes von der Bezugsebene mit der Kamera (46), welche von dem projizierten Gitter beleuchtet wird, wobei das Bild der Bezugsebene Intensitätswerte für jede Bildpunktposition aufweist;
 - h) Wiederholen der Schritte f) und g), um Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;
 - i) Berechnen der Phase der Bezugsebene für jede Bildpunktposition unter Verwendung der Intensitätswerte für den entsprechenden Bildpunkt der Bezugsebene;
 - j) Berechnen der Höhe des Substrates für jeden Bildpunkt; und
 - k) Berechnen der Höhe des Moduls (69);
- dadurch gekennzeichnet, daß:

der Schritt c) mindestens zwei Mal ausgeführt wird, wobei das Gitter (24) in zwei verschiedenen bekannten Positionen bezüglich der Kamera (46) und des Moduls (69) angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten;

Schritt d) das Berechnen einer Phase des Moduls für jeden Bildpunkt unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt umfaßt;

der Schritt h) mindestens zwei Mal ausgeführt wird, wobei das Gitter (24) auf zwei verschiedenen Positionen

angeordnet wird, um mindestens drei Intensitätswerte für jeden Bildpunkt zu erhalten; und Schritt i) das Berechnen der Phase der Bezugsebene für jede Bildpunktposition unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte für den entsprechenden Bildpunkt der Bezugsebene umfaßt.

13. Verfahren zum Messen der Höhe eines Moduls nach Anspruch 12, des weiteren dadurch gekennzeichnet, daß:

der Schritt e) das Berechnen einer komplementären Phase des Substrats umfaßt und zwar unter Verwendung von mindestens drei Intensitätswerten der Bildpunkte des Bildes von dem Modul (69), die nicht mit dem mindestens einen Gegenstand korrespondieren, und Verwenden der komplementären Phase des Substrats und der Phase des Moduls für den entsprechenden Bildpunkt;

der Schritt j) die Verwendung der komplementären Phase des Substrats und der Phase der Bezugsebene für den entsprechenden Bildpunkt umfaßt; und

der Schritt k) das Addieren der Höhe des Substrats und der Höhe des mindestens einen Gegenstands umfaßt.

14. Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 11 für eine Qualitätsprüfung Lot-Koplanarität.

15. System (10) zum Messen von Unebenheiten eines Gegenstands (30), welches folgendes umfaßt:

eine Gitterprojektionsvorrichtung (11), wobei die Gitterprojektionsvorrichtung (11) ein Gitter (24) aufweist, eine Ausleuchtungsvorrichtung, die eine Lichtquelle (34) enthält, die durch das Gitter (24) auf den Gegenstand (30) zu projizieren ist, und einen Projektor (28) zum Projizieren des Gitters (24) auf den Gegenstand (30), wobei das Gitter (24) an einen Träger (26) befestigt ist;

eine Bildaufnahmeeinrichtung (12), die eine mit einer Anordnung von Bildpunkten versehene Kamera (46) enthält

ein Computersystem (14), das konfiguriert ist für

a) eine Positionierung des Gitters (24) bezüglich des Gegenstands (30) und der Bildaufnahmeeinrichtung (12);

b) das Empfangen von der Bildaufnahmeeinrichtung (12) von mindestens drei Bildern des auf dem Gegenstand (30) projizierten Gitters und mindestens drei Bildern des auf einen Bezugsgegenstand projizierten Gitters; wobei jedes der Bilder von dem auf dem Gegenstand (30) projizierten Gitter einer anderen bekannten Position des Gitters (24) entspricht, wobei jedes der Bilder des auf den Bezugsgegenstand projizierten Gitters einer der bekannten Positionen des Gitters (24) entspricht;

c) das Berechnen einer Phase des Bezugsgegenstands für jeden Bildpunkt unter Verwendung der mindestens drei Intensitätswerte des Bezugsgegenstandes für den entsprechenden Bildpunkt;

d) das Berechnen einer Phase des Gegenstands für jeden des mindestens einen Bildpunkts des Bildes von der Gegenstandsposition unter Verwendung von drei ausgewählten Intensitätswerten des Gegenstands eines Bildpunkts des Bildes von dem Gegenstand (30), die aus den mindestens drei Intensitätswerten ausgewählt wird, die für jeden Bildpunkt der Abbildung des Gegenstands erhalten wurden; und

e) das Berechnen der Höhendifferenz zwischen dem Gegenstand und dem Bezugsgegenstand für jeden Bildpunkt unter Verwendung der Phase des Bezugsgegenstands und der Phase des Gegenstands für jeden entsprechenden Bildpunkt;

dadurch gekennzeichnet, daß der Projektor (28) zwischen dem Gitter (24) und dem Gegenstand (30) angeordnet ist und dadurch, daß das System (10) so ausgelegt ist, daß es zum Messen der Unebenheiten des Gegenstands (30) lediglich drei Bilder des Bezugsgegenstands und drei Bilder des Gegenstands (30) benötigt, die in drei unterschiedlichen bekannten Positionen des Gitters (24) aufgenommen wurden, wobei zusätzliche Bilder des Bezugsgegenstands und zusätzliche Bilder des Gegenstands (30), die in unterschiedlichen bekannten Positionen des Gitters (24) aufgenommen wurden, lediglich ein Erhöhen der Präzision und der Verlässlichkeit des Systems (10) ermöglichen.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

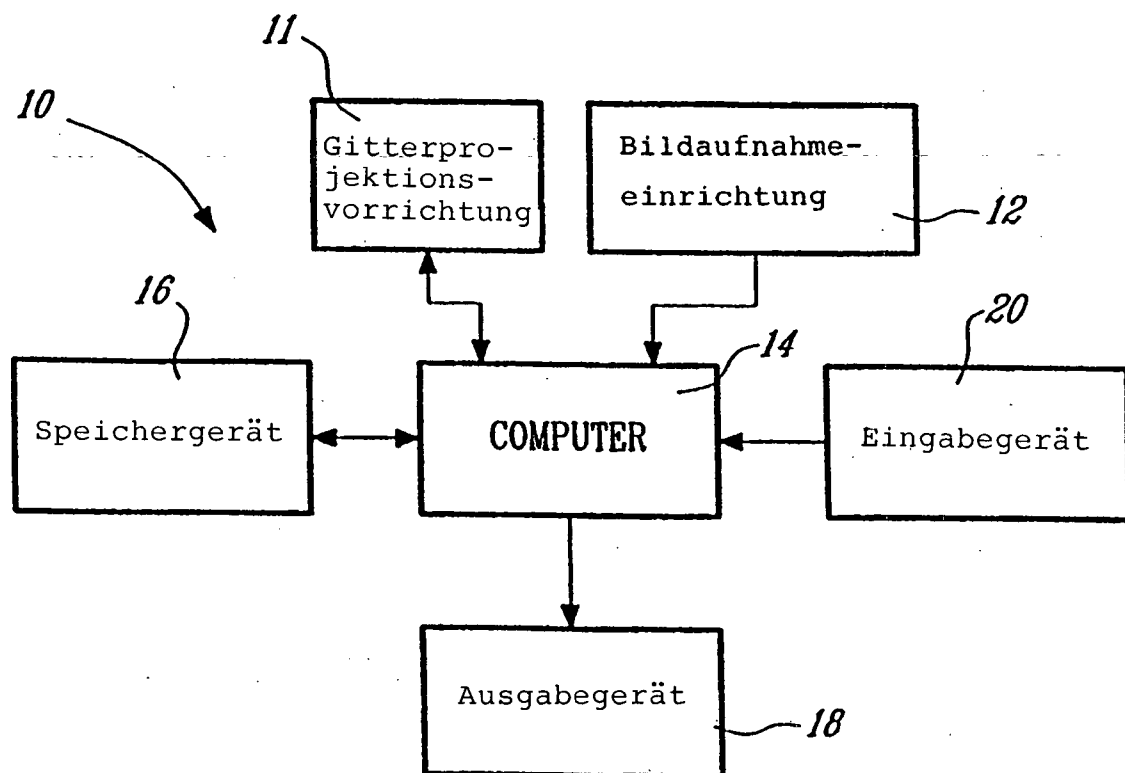


Fig. 1

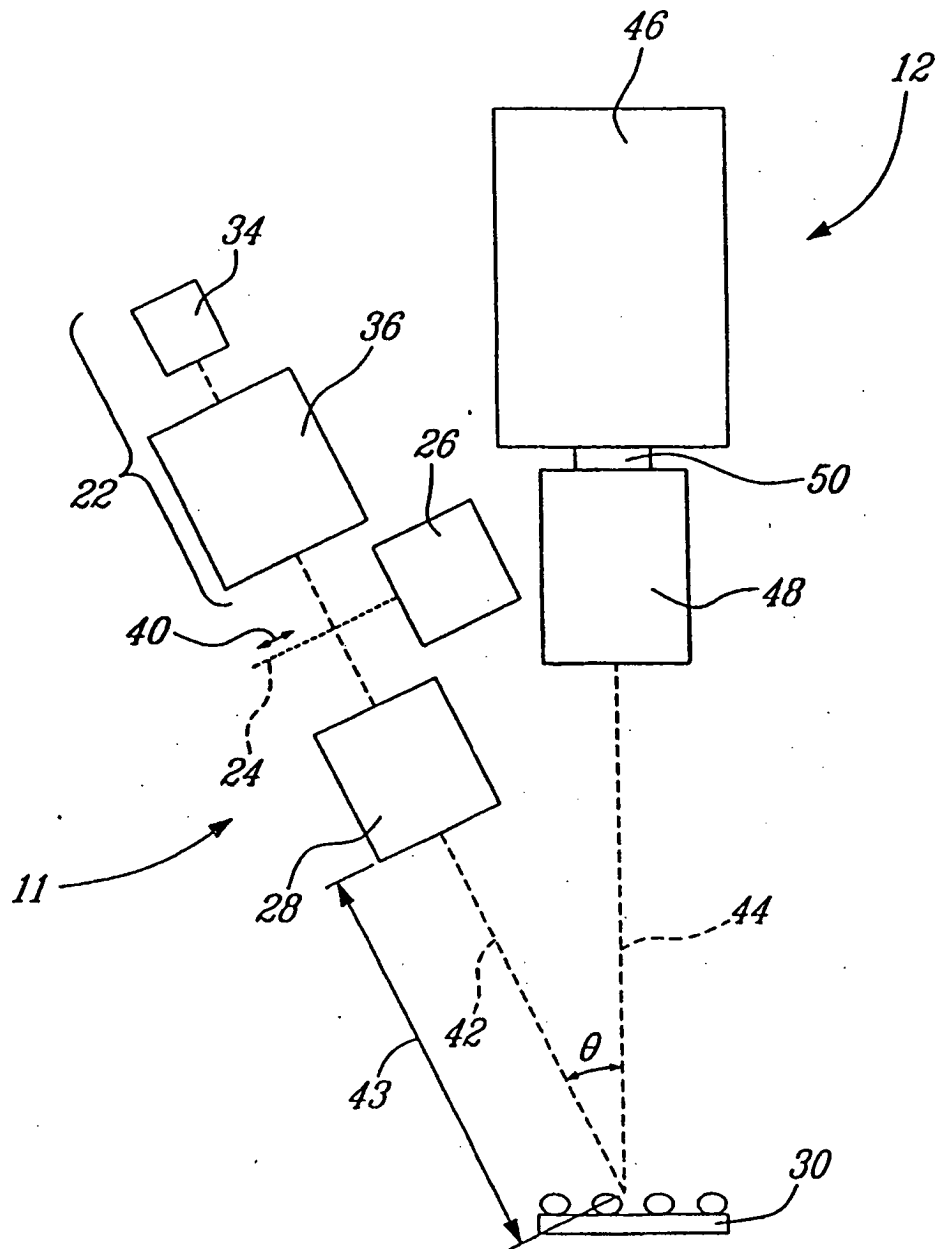


FIG. 2

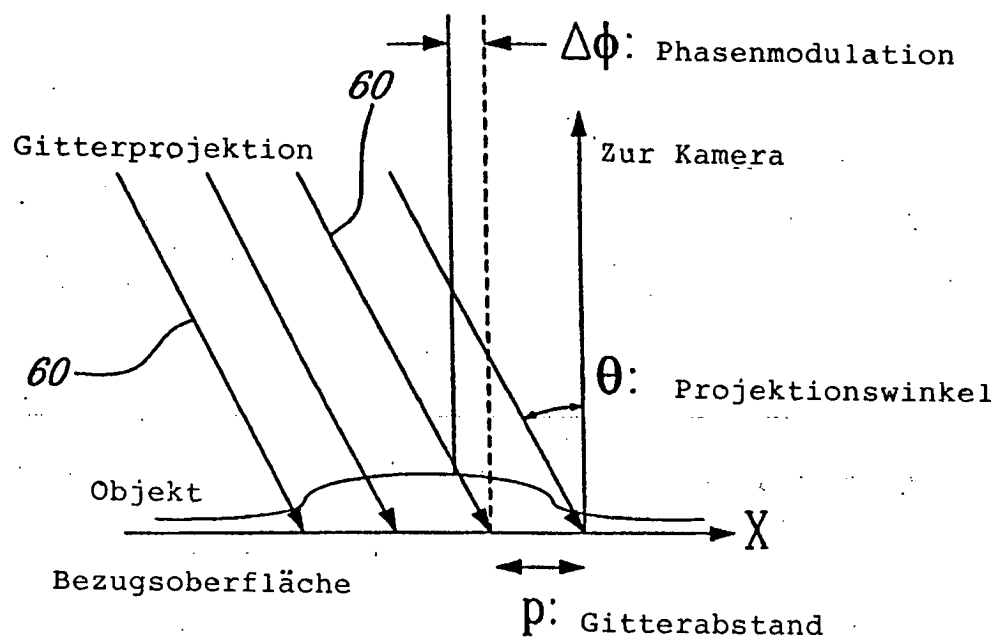


Fig. 3

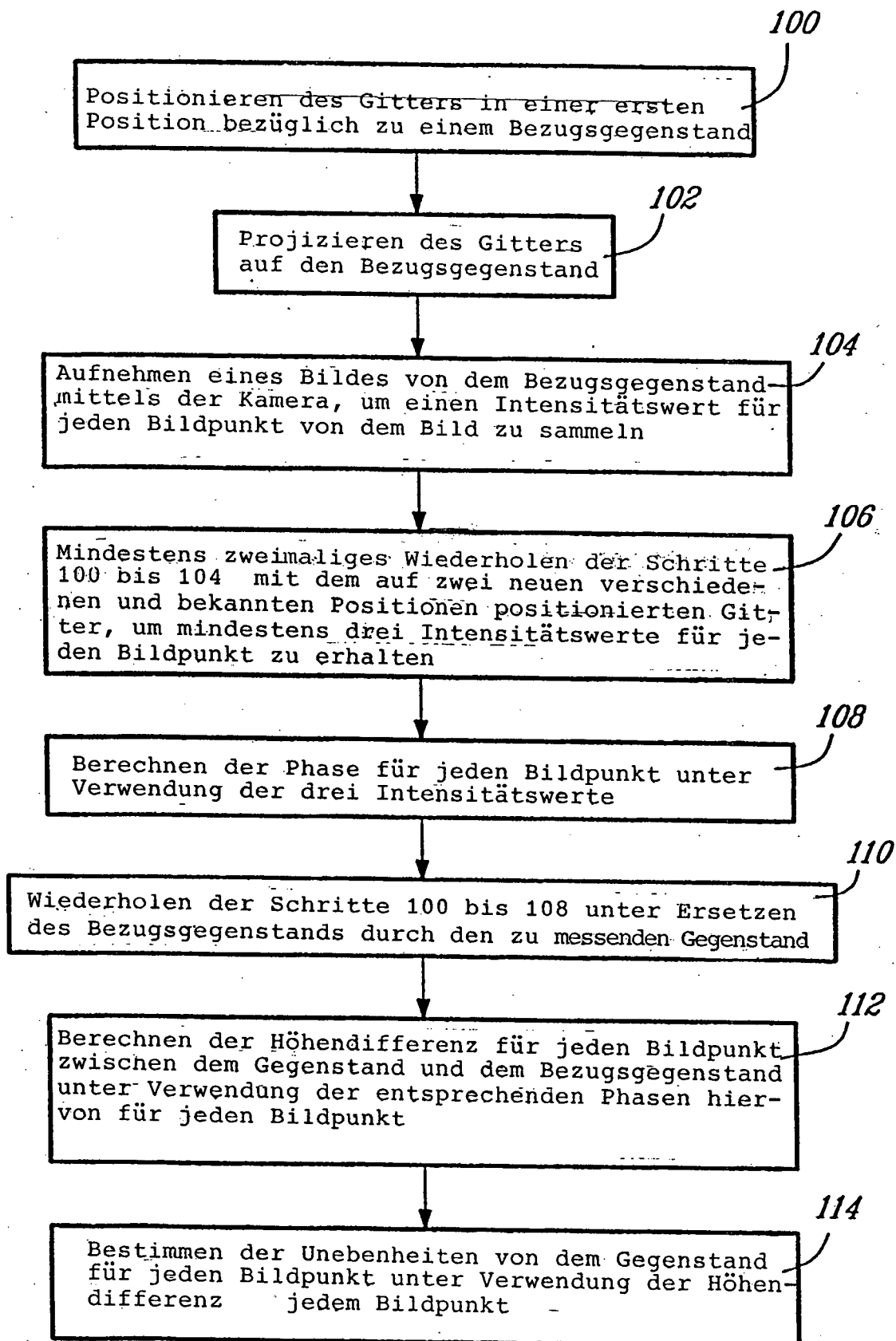
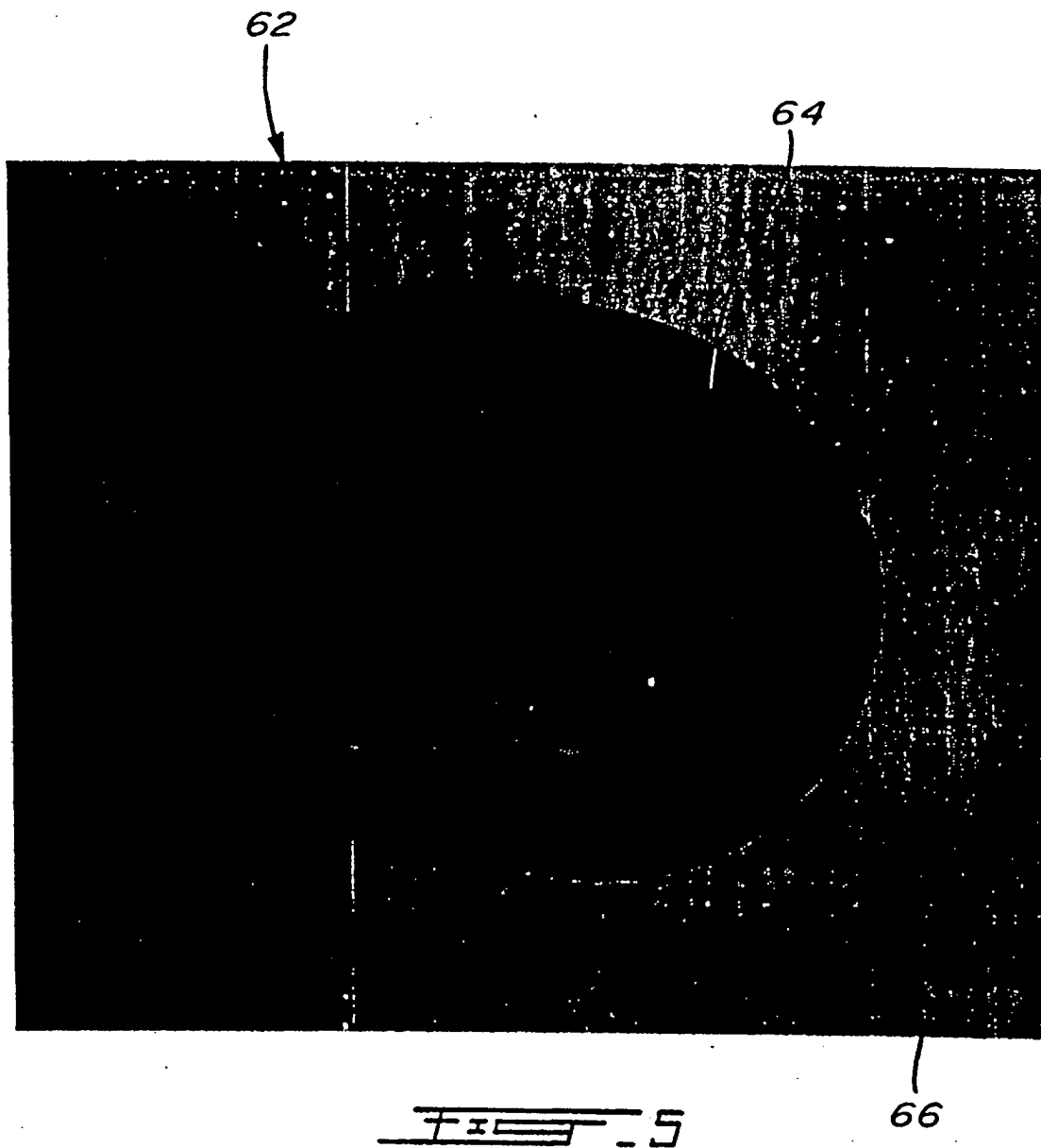
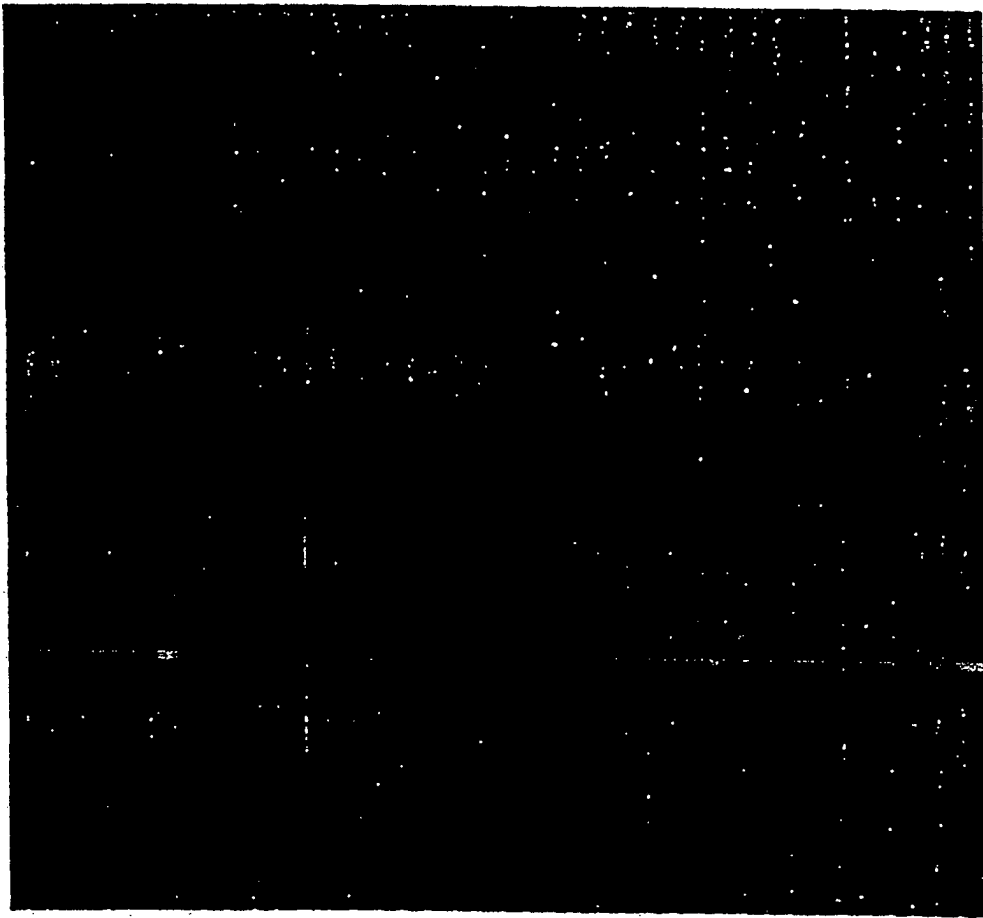
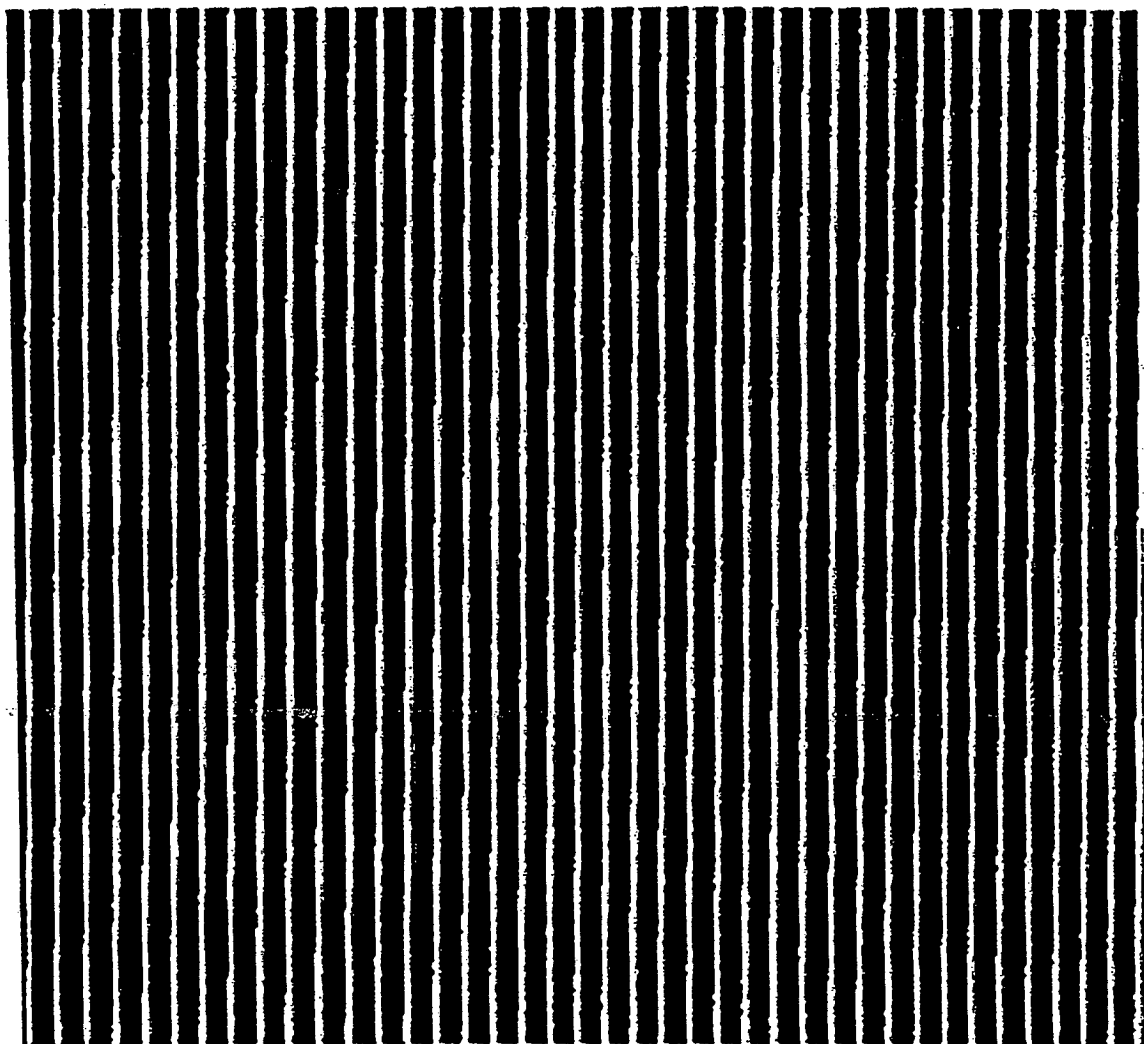


Fig. 4

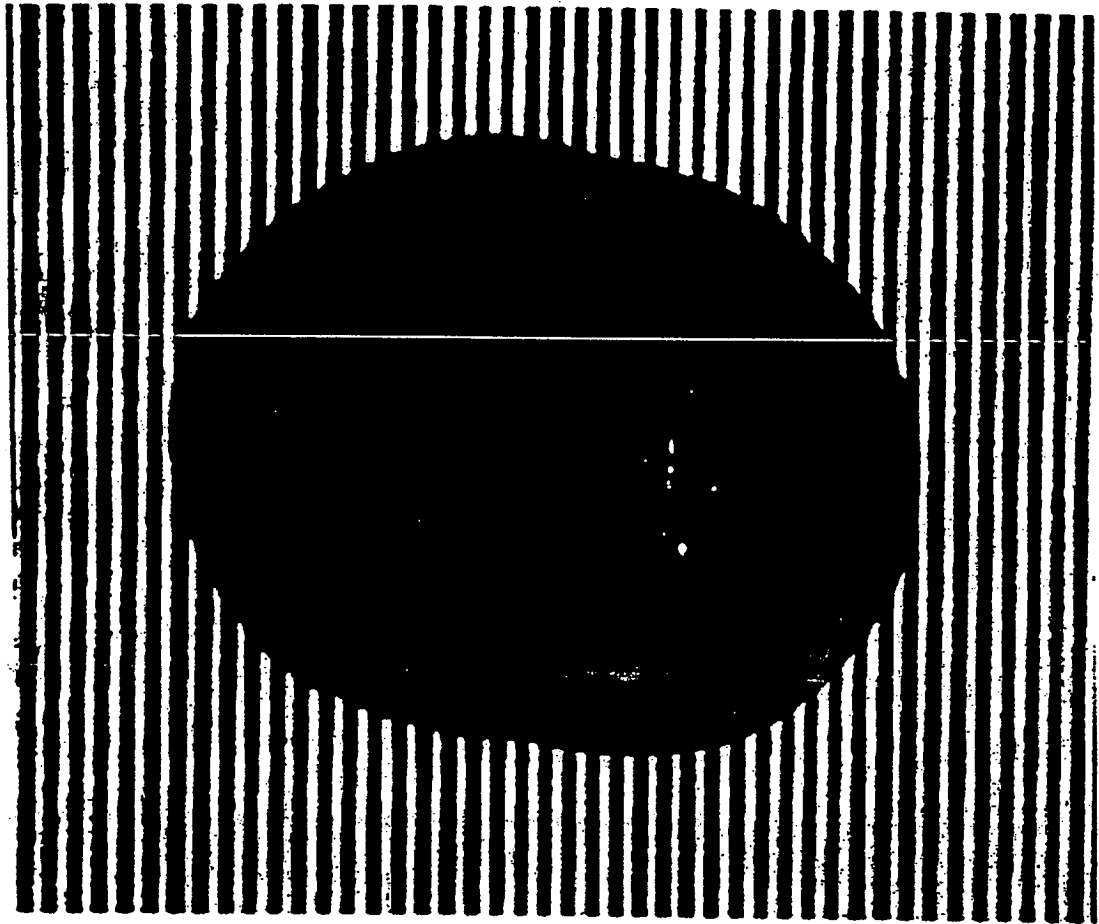




FE-6



7



FI - 8

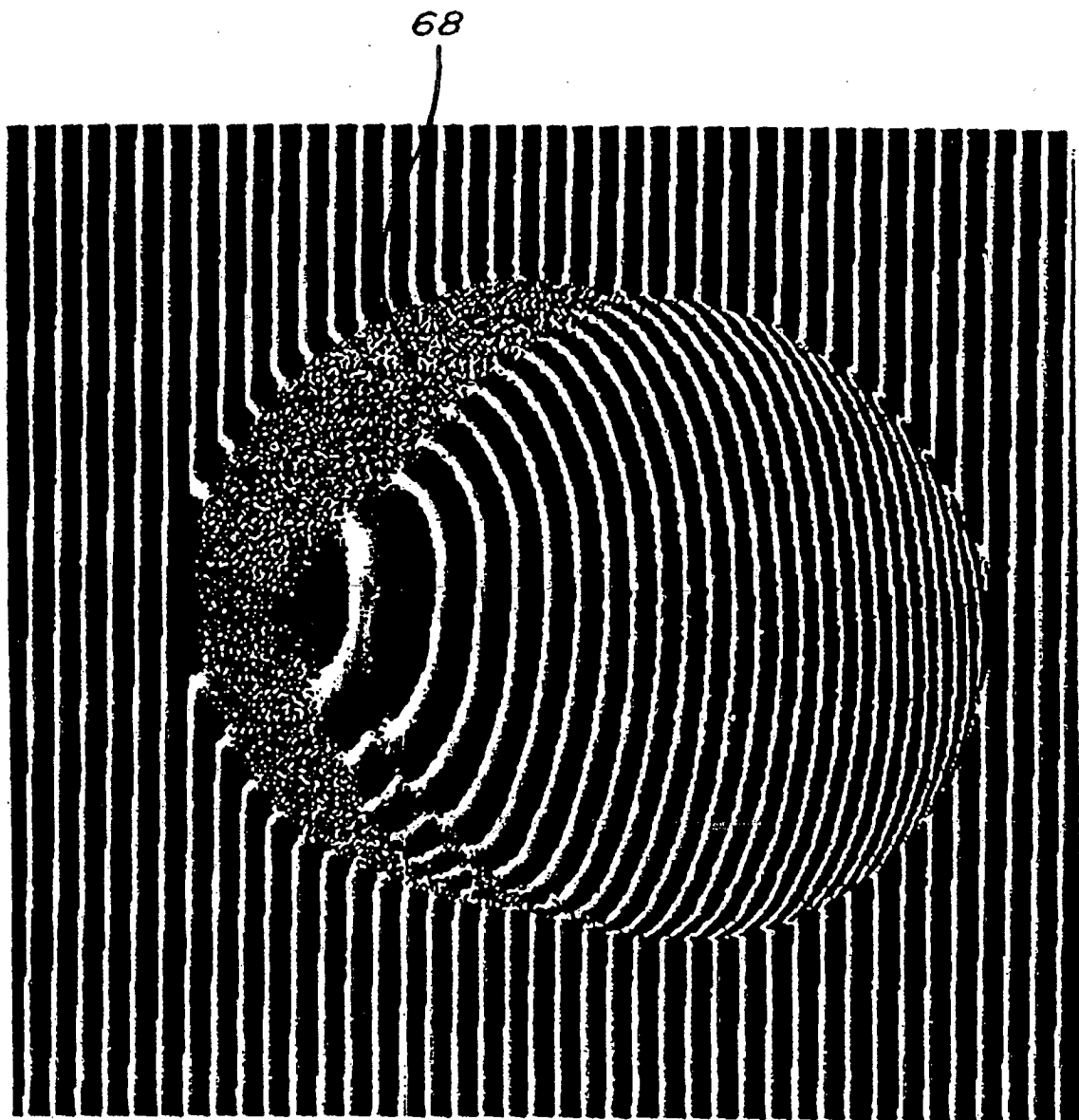


FIG. 9

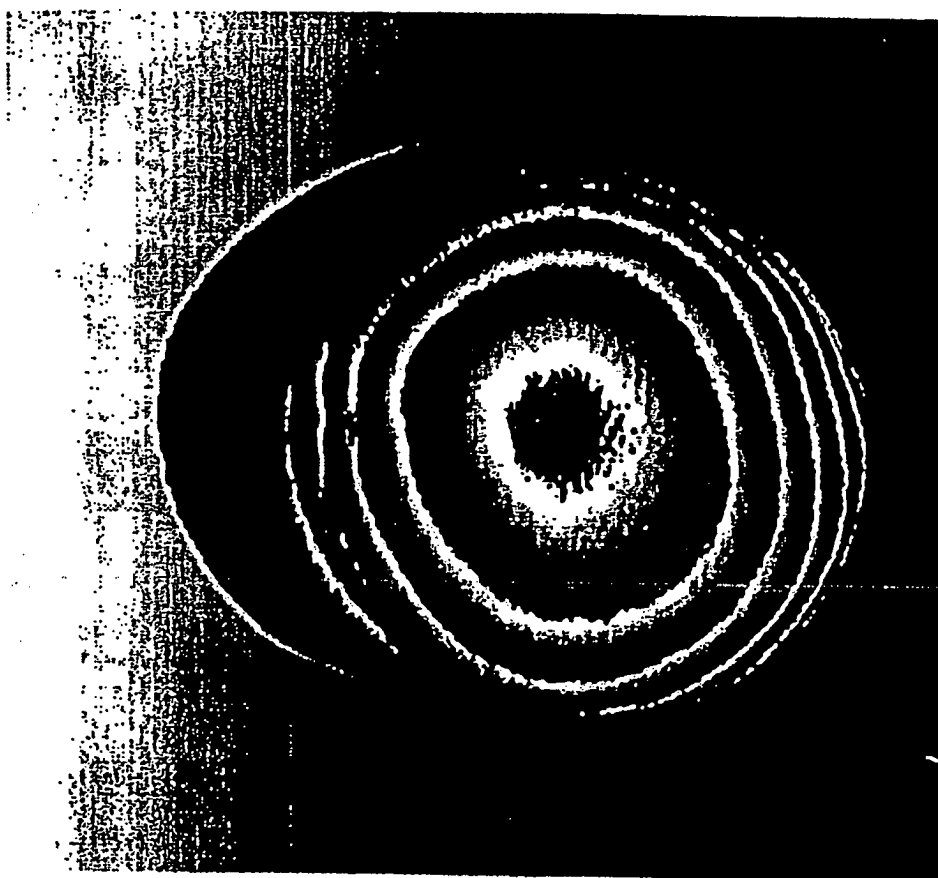


FIG. 10

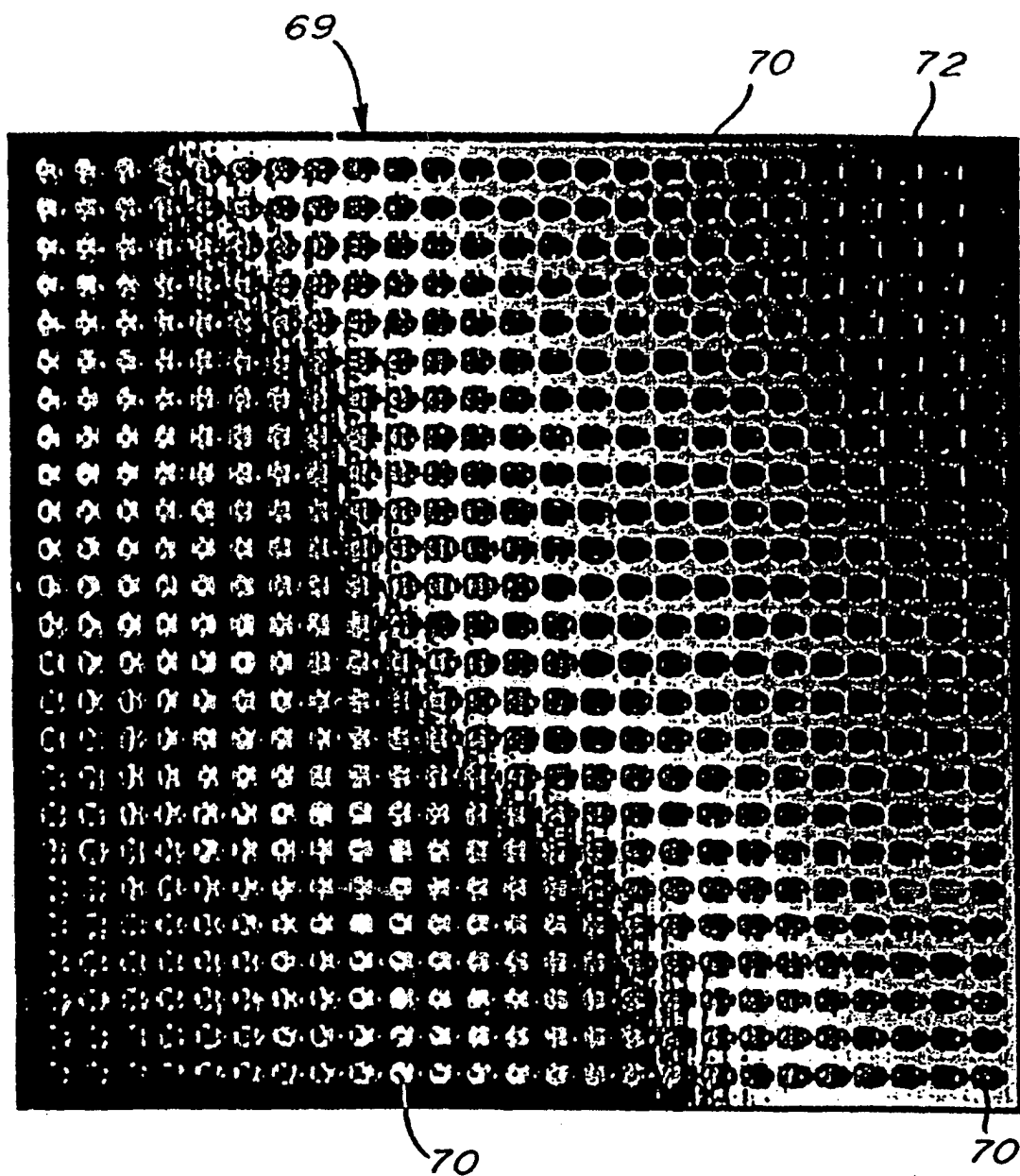
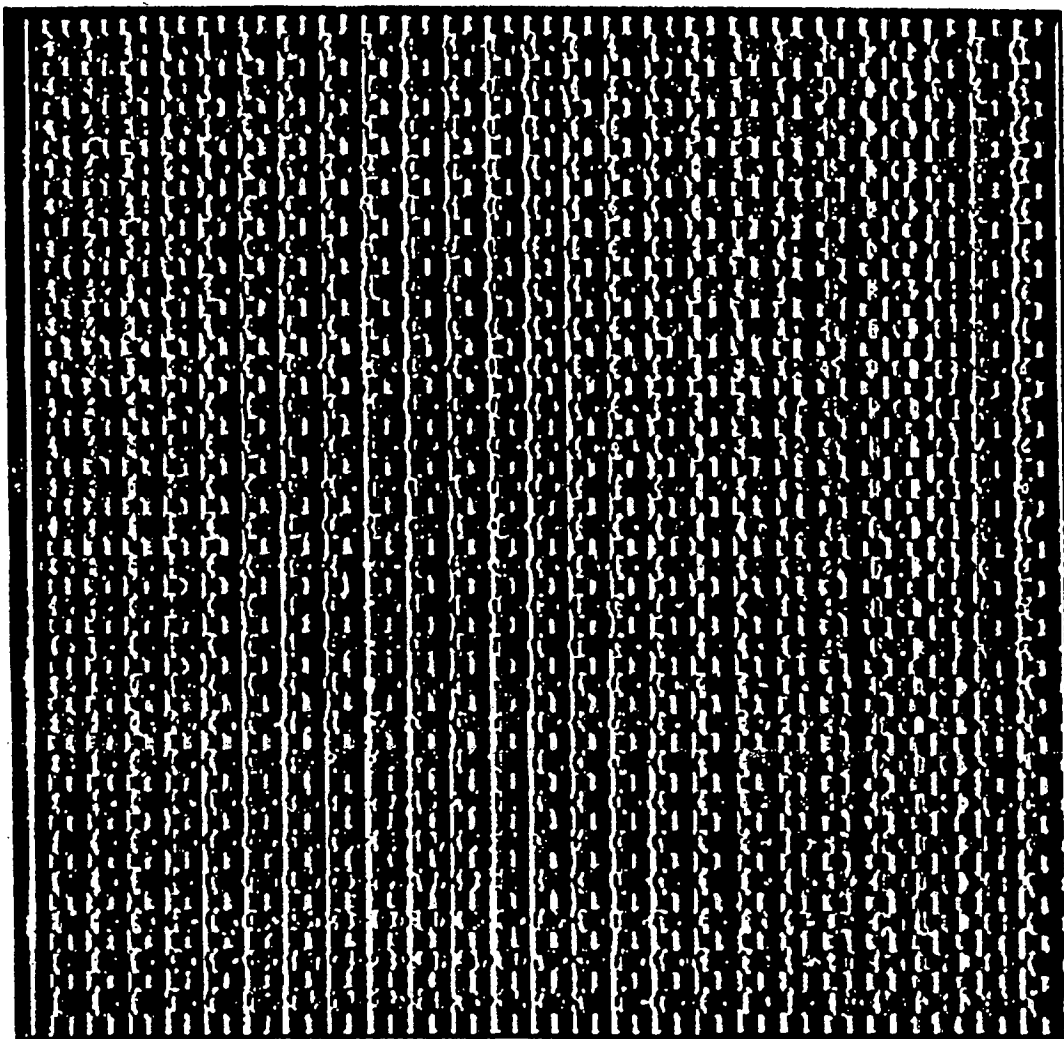
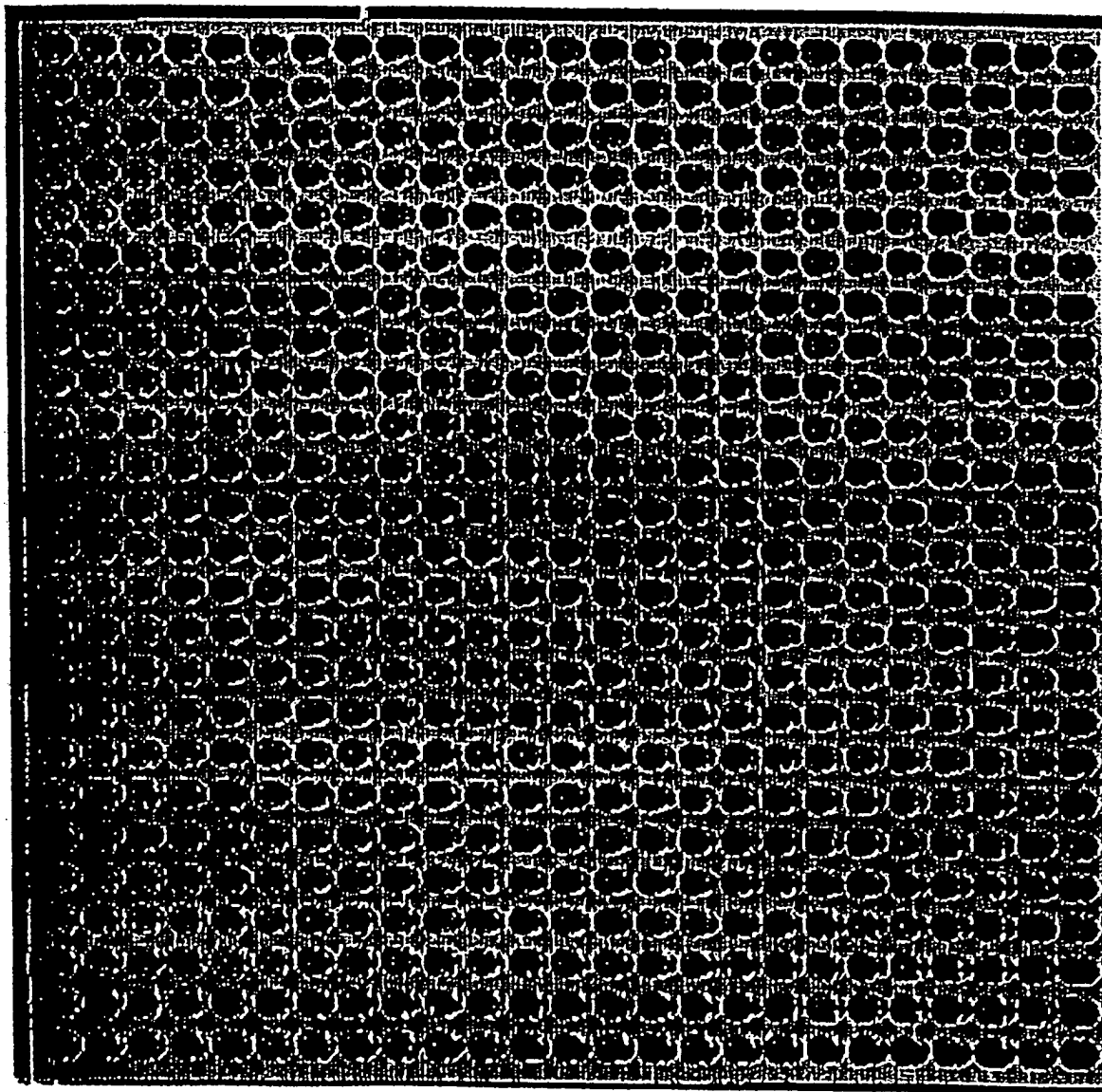


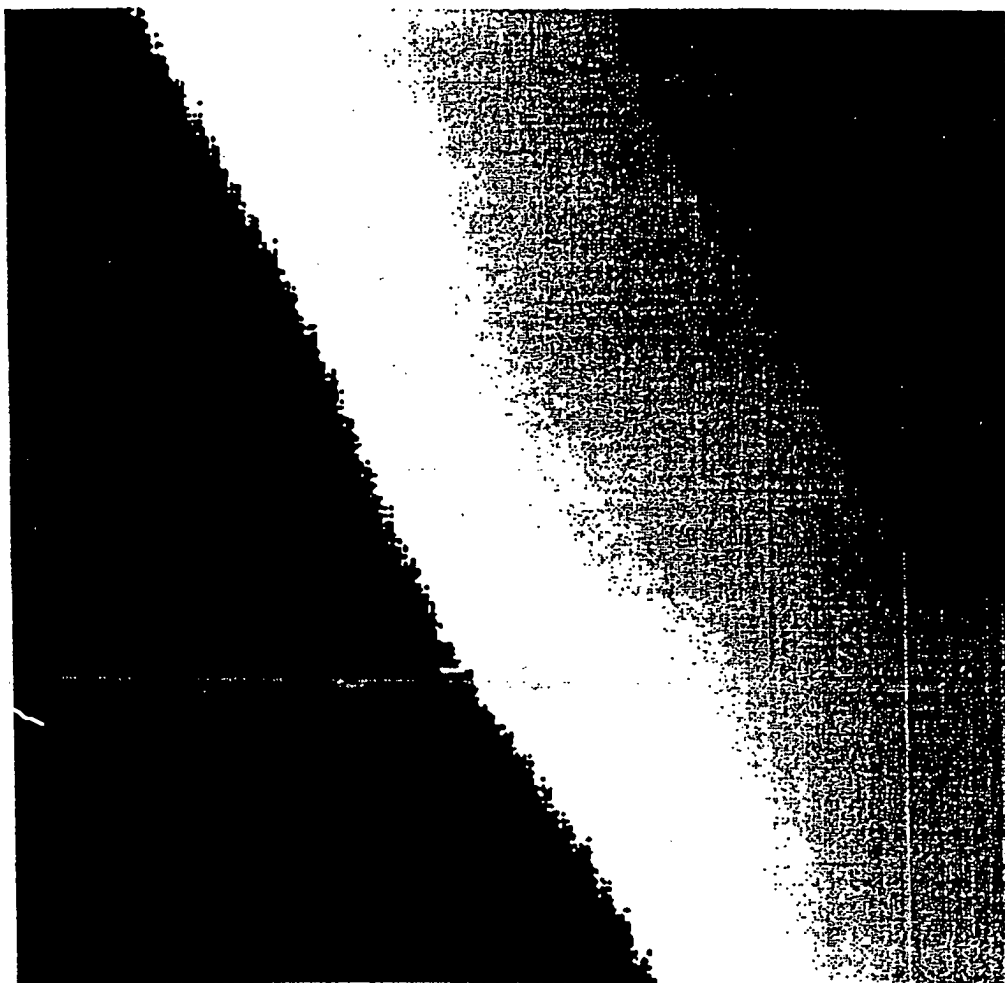
FIG. 11



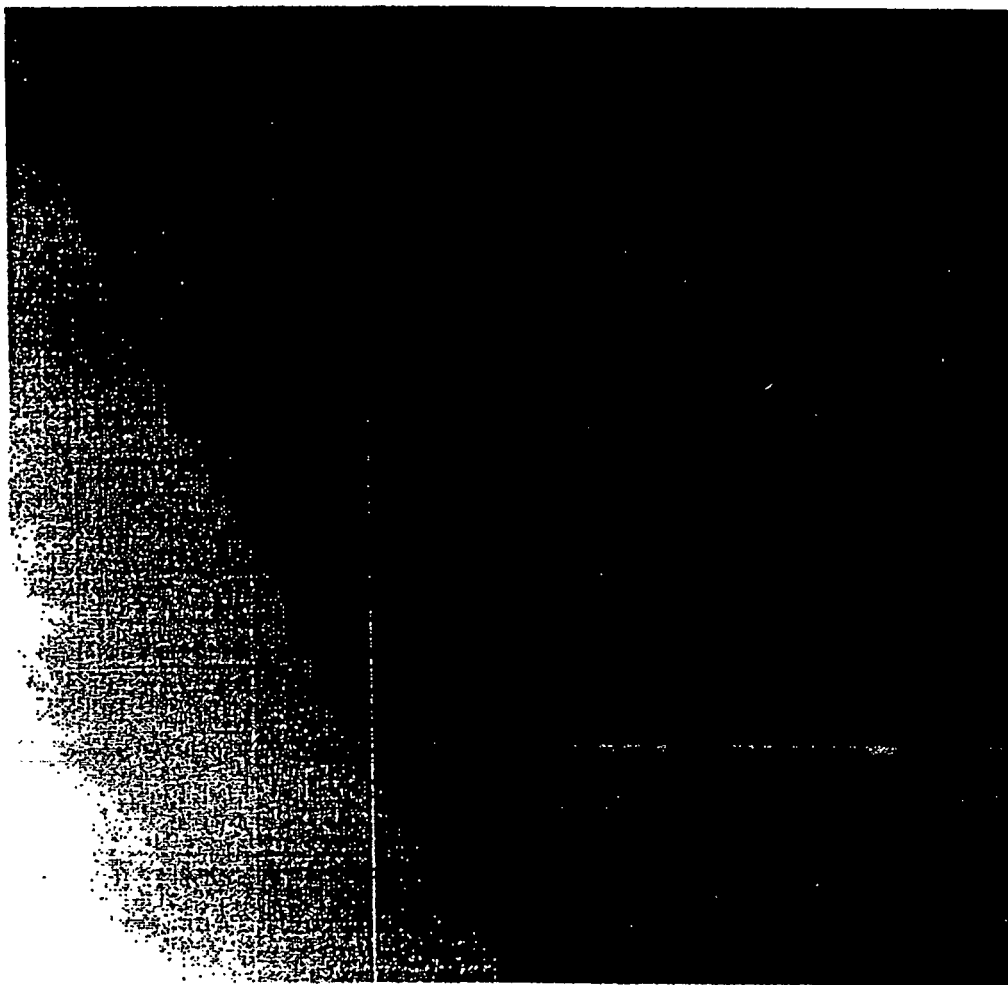
FiS-12



Fi 13



Fi 14



FIS-15