



Ausschliessungspatent

Erteilt gemäß § 5 Absatz 1 des Änderungsgesetzes
zum Patentgesetz

ISSN 0433-6461

(11) 208 872

Int.Cl.³ 3(51) G 02 B 27/48

AMT FUER ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) AP G 02 B/ 2451 605
(31) 8135/59; 8206923

(22) 23.11.82
(32) 28.11.81; 09.03.82

(44) 11.04.84
(33) GB;GB

(71) siehe (73)

(72) BERTERO, MARIO, PROF., IT; PIKE, EDWARD R.; GB;

(73) THE SECRETARY OF STATE FOR DEFENCE IN HER BRITANNIC MAJESTY'S GOVERNMENT WHITEHALL, LONDON, GB

(74) PAB (PATENTANWALTSBUERO BERLIN) 1533157 1130 BERLIN FRANKFURTER ALLEE 286

(54) ABBILDUNGSSYSTEM

(57) Ein Abbildungssystem zum Erhalt von Information innerhalb der Beugungsgrenze umfaßt eine zur Beleuchtung dienende Strahlungsquelle (1). Ein Linsensystem (8) fokussiert Strahlung von einem kleinen Bereich eines Objekts (4) auf eine Detektoranordnung (11) in der Bildebene. Die Detektoren erfassen die Amplitude der empfangenen Strahlung unter Erzeugung einer Informationsmatrix. Diese Matrix wird dann in einem Rechner (12) umgekehrt unter Rekonstruktion der Abbildung, so daß diese auf einer Kathodenstrahlröhre betrachtet werden kann. Das Objekt (4) wird entweder durch Abtasten der Strahlung oder schrittweises Bewegen des Objekts (4) abgetastet. Fig. 1

245 160 5

Abbildungssystem

Anwendungsgebiet der Erfindung:

Die Erfindung bezieht sich auf durch Beugung bzw. Diffraktion begrenzte Abbildungssysteme.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen:

Abbildungssysteme dienen zur Erzeugung der Abbildung eines Objekts. Z. B. erzeugen Mikroskope eine vergrößerte Abbildung eines kleinen Objekts auf einem beleuchteten Objektträger. Zur Steigerung der Vergrößerung der Abbildung gegenüber dem Objekt muß eine Fokussierung auf kleinere Ausschnitte des Objekts erfolgen. Der Durchmesser der aufgelösten Objektfläche wird schließlich durch Beugung in dem verwendeten Abbildungssystem begrenzt. Die theoretische beugungsbedingte Auflösungsgrenze eines guten optischen Mikroskops ist $\lambda / 2$, wobei λ die Wellenlänge der Strahlung ist, und wird als Rayleighsches Kriterium bezeichnet. Die gleiche Grenze ergibt sich bei der Infrarotabbildung.

Das Beugungsproblem findet sich auch bei der Radarbeobachtung von Luftfahrzeugen, z.B. in der Flugsicherung. Die Fähigkeit eines Antennensystems zur Auflösung von nahe beieinander befindlichen Luftfahrzeugen ist durch die Beugung begrenzt.

Auch bei der akustischen Erfassung z.B. von Objekten auf dem Meeresboden oder beim akustischen Mikroskop ist die Auflösung durch Beugung begrenzt.

Wenn eine Abbildung eines Objekts von einem Linsensystem bzw. einer Optik auf eine Bildebene fokussiert wird, wird nur ein Teil der die Optik durchsetzenden Strahlungsinformation in die geometrische Abbildung fokussiert. In der Bildebene außerhalb der geometrischen Abbildung ist ebenfalls Information über das Objekt vorhanden, wird aber normalerweise nicht genutzt. Bei Objekten, die erheblich oberhalb der Beugungsgrenze liegen, bildet diese Extrainformation einen wesentlichen Teil der die Optik durchsetzenden Gesamtinformation.

Ziel der Erfindung:

Die vorliegende Erfindung nutzt diese bisher ungenutzte Information zusammen mit der geometrischen Bildinformation zum Erhalt von Information über Objekte, deren Größe im Bereich der Beugungsgrenze liegt.

Darlegung des Wesens der Erfindung:

Das Abbildungssystem, nach der Erfindung ist gekennzeichnet durch ein Linsensystem zur Fokussierung von kohärenter oder nichtkohärenter Strahlung auf eine Bildebene, durch Detektoren zum Erfassen der Amplitude der Strahlung in der Bildebene unter Erzeugung einer Informationsmatrix, durch eine Einheit zur Umkehrung dieser Matrix unter Erzeugung

eines rekonstruierten Bilds, und durch eine Einheit zur Beobachtung des rekonstruierten Bilds.

Das Abbildungssystem kann mit elektromagnetischer Strahlung, z.B. bei Radar- oder sichtbaren Frequenzen, Elektronenstrahlen oder akustischer Strahlung arbeiten, wobei geeignete Linsensysteme vorzusehen sind. Bei sichtbaren Frequenzen erfassen jedoch die Detektoren normalerweise nur die Intensität der Abbildung, und in diesem Fall müssen weitere Mittel zur Bestimmung der Amplituden und Phasen vorgesehen werden.

Die Detektoren für sichtbares Licht können eine Anordnung von Fotodetektoren oder das Target einer Halbleiterfotосchicht-Elektronenröhre wie in Fernsehkameras sein, wobei eine elektronische Abtastung mit einem Hauptreferenzstrahl erfolgt, so daß die erforderliche Phaseninformation erhalten wird, wie etwa in der Holografie, oder es wird alternativ das exponentielle Filterverfahren nach Walker (vgl. die GB-Patentanmeldung Nr. 81 08244) eingesetzt; wenn das Objekt als reell angenommen werden kann, kann in einfacherer Weise die spezielle Beziehung zwischen Abbildung und Objekt genutzt werden, auch wenn nur die Intensität allein bekannt ist.

Die rekonstruierte Abbildung kann auf einer Kathodenstrahlröhre, auf einem fotografischen Film oder grafisch oder numerisch auf Papier sichtbar gemacht und betrachtet werden.

Zum Erhalt einer Gesamtabbildung eines großen Objekts kann das Linsensystem das Objekt abtasten. In diesem Fall ist die rekonstruierte Abbildung die Summe der rekonstruierten abgetasteten Bereiche.

Bei einem Abbildungssystem mit sichtbarem Licht, d.h. einem Mikroskop, kann das Objekt durch einen Strahl von kohärentem Laserlicht beleuchtet werden. Der Strahl wird so fokussiert, daß er eine Fläche mit einem Durchmesser etwa $1/2$ Wellenlänge beleuchtet, oder das Objekt kann kohärent oder nichtkohärent durch eine Blende beleuchtet werden, die einen Durchmesser oder Quadratform von ca. $1/2$ Wellenlänge aufweist.

Im Fall von Radarsystemen werden Luftfahrzeuge mit kohärenter Strahlung bestrahlt. Im Fall von Luftfahrzeugen, die einen größeren Abstand voneinander aufweisen als die Beugungsgrenze der Empfangsantenne, wird keine Verbesserung der Auflösung benötigt, und der Empfänger arbeitet dann im Normalbetrieb. Im Beugungsgrenzbereich wird jedoch Empfangsinformation von eng beabstandeten Luftfahrzeugen gemäß der vorliegenden Erfindung verarbeitet.

Ausführungsbeispiel:

Anhand der Zeichnung wird die Erfindung beispielsweise näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Darstellung eines Mikroskops, wobei ein Objekt schrittweise über einen Laserstrahl bewegt wird, so daß ein abgetastetes Objekt erhalten wird; und

Fig. 2: ein Mosaik rekonstruierter Abbildungen.

Ein Hochauflösungs-Mikroskop gemäß Fig. 1 umfaßt eine Laserquelle 1 oder eine andere Lichtquelle, deren Austrittsstrahl 2 durch Linsen 3 auf eine zu messende Probe 4 fokussiert wird. Die Laserquelle 1 kann ein HeNe-Laser, der bei 633 nm arbeitet, oder eine geeignete UV-Laserleitung sein.

Der Lichtstrahl 2 wird auf eine Fläche 5 von weniger als 1 Wellenlänge, z.B. ca. $1/2$ Wellenlänge im Quadrat, fokussiert; alternativ kann eine Blende mit einer Öffnung von $1/2$ Wellenlänge im Quadrat verwendet werden.

Die Probe 4 ist so angeordnet, daß sie mittels Schrittmotoren 6; 7 oder geeigneten Sägezahn- oder Sinuswellen-Abtastvorrichtungen in x- und y-Richtung senkrecht zur Lichtquelle bewegbar ist.

Durch die Probe durchgelassenes Licht wird von einer Mikroskop-Optik 8 gesammelt und auf eine 10×10 -Detektoranordnung 11 fokussiert. Jeder Detektor empfängt somit Licht von einem jeweils verschiedenen Teil der beleuchteten Probe, also ein Probenelement 5.

Der Ausgangswert jedes Detektors in der Detektoranordnung 11, eine Informationsmatrix, wird einem Rechner 12 zugeführt, der diese Matrix verarbeitet und auf einer Sichtanzeigeeinheit 13, z.B. einer Kathodenstrahlröhre, einem fotografischen Film oder einem Aufzeichnungspapier, zur Anzeige bringt.

In Fig. 2 bezeichnet jedes der 12 größeren Quadrate ein bestrahltes Probenelement 5. Die vollständige gezeigte Abbildung ist das Resultat von vier Schrittpositionen der Probe 4 in x-Richtung und drei Schrittpositionen in y-Richtung. Ein Normalmikroskop kann nicht jedes Detail in jedem Probenelement 5, d.h. einem $\lambda/2$ -Quadrat, auflösen. Somit würde jedes Quadrat 14 als mittlerer Bestrahlungsstärkepegel angezeigt werden. Unter Anwendung der Verarbeitungsmethode nach der Erfindung ist es möglich, innerhalb jedes dieser größeren Quadrate 14 z.B. neun Unter-elemente 15 zu schaffen, wobei jedes Unter-element 15 einen gleichen Intensitätspegel aufweist. Dadurch ist aus der Gesamtprobe ein wesentlich höheres Maß an Einzelin-

formation als mit einem konventionellen Mikroskop zu erzielen. Die Information aus jedem Probenelement wird in dem Rechner gespeichert, bis die gesamte Probe verarbeitet ist. Dann kann die Gesamtprobe betrachtet werden.

Im Betrieb wird eine dünne Scheibe 4 zu untersuchendes Probenmaterial auf einen Objektträger gelegt und in einem Probenhalter angeordnet. Dieser Probenhalter wird in Schritten von jeweils $\lambda / 2$ in der erforderlichen Weise in x- und y-Richtung bewegt.

Laserlicht 2 wird auf eine $\lambda / 2$ -Quadratfläche der Probe fokussiert; der beleuchtete Probenteil bildet ein Probenelement 5.

Das Probenelement 5 wird auf die gesamte Detektoranordnung 11 abgebildet. Der Ausgang jedes Detektorelements wird dem Rechner 12 zugeführt, in dem eine Umkehrung der Matrixinformation berechnet und der Sichtanzeigeeinheit 13 zugeführt wird. Die Probe 5 wird dann schrittweise um einen $\lambda / 2$ -Schritt bewegt und der Vorgang wiederholt. Dieses Schritt-/Verarbeitungs-Verfahren wird so lange wiederholt, bis die gesamte Probe 4 untersucht ist. Das Resultat ist eine sehr scharf begrenzte Abbildung der Probe.

Das vorstehend angegebene Verfahren ist auch in der Spiegelmikroskopie und in der Durchstrahlungsmikroskopie anwendbar.

Zur besseren Bildbegrenzung im Fall von Störsignalen kann die Probe um Bruchteile einer Wellenlänge schrittweise bewegt werden, wobei dann die erzeugten Vielfachabbildungen integriert werden.

Es sei nun der einfachste Fall betrachtet, in dem das Objekt als reell angenommen wird. In diesem Fall ist die Am-

plitude der Abbildung die Quadratwurzel der Intensität, und die Phase ist entweder 0 oder π . Unter Anwendung der Stetigkeit der Ableitung kann die Phase dadurch bestimmt werden, daß ihr 0 im Zentrum der Abbildung und abwechselnd π und 0 zugeordnet werden, wonach man während des aufeinanderfolgenden Schneidens von Intensitäts-Nullstellen nach außen fortschreitet. Dies kann erforderlichenfalls auch durch das mathematische Verfahren der analytischen Fortsetzung erfolgen.

Die theoretische Grundlage für die Matrixtransformationen der abgeleiteten komplexen Amplituden ist dann wie folgt:

Wenn mit $\underline{x} = \{x_1, x_2\}$ ein Punkt im Objekt bezeichnet wird, und wenn die komplexe Amplitude des Objekts $f(\underline{x})$ nur über den beleuchteten oder begrenzten Bereich D von Null verschieden ist, ist die Abbildung gegeben durch:

$$(Kf)(\underline{x}) = \iint_D S(\underline{x} - \underline{y}) f(\underline{y}) d\underline{y}$$

wobei

$$S(\underline{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_P e^{i(\underline{x}, \underline{\omega})} d\underline{\omega} \quad \begin{array}{l} \text{bei kohärenter} \\ \text{Bestrahlung} \end{array}$$

oder

$$S(\underline{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \left| \iint_P e^{i(\underline{x}, \underline{\omega})} d\underline{\omega} \right|^2 \quad \begin{array}{l} \text{bei nichtko-} \\ \text{härenter Be-} \\ \text{strahlung} \end{array}$$

wobei P der beschränkte Bereich im Fourier-Raum entsprechend den durch die Linse durchgelassenen Ortsfrequenzen ist.

Eine lineare Methode der kleinsten Quadrate des Objekts relativ zur Abbildung wird durch Computer-Umkehrung der digitalisierten normalen Gleichungen erhalten.

$$\sum_{n_1 n_2 p_1 p_2} S_{n_1 n_2 m_1 m_2} S_{n_1 n_2 p_1 p_2} f_{p_1 p_2} = \sum_{q_1 q_2} S_{m_1 m_2 q_1 q_2} g_{q_1 q_2}$$

wobei

$$S_{abcd} = S(\{a, b\} - \{c, d\})$$

und

$$f_{ab} = f(\{a, b\}) \quad g_{ab} = g(\{a, b\})$$

In der Praxis reichen p_1 und p_2 über eine wesentlich geringere Anzahl Punkte als q_1 und q_2 .

Der Vektor $\underline{x}$ bezeichnet einen Punkt $\{x_1, x_2\}$ in der Objektebene (Ebene der Probe 4), der Vektor $\underline{y}$ bezeichnet einen Punkt $\{y_1, y_2\}$ in der Bildebene (auf Detektor 11),

p_1, p_2 sind Probenwerte von x_1, x_2

q_1, q_2 sind Probenwerte von y_1, y_2 .

Bei kohärenter Bestrahlung ist die Funktion $S(x)$

$$S(\underline{x}) = \frac{\sin(\Omega x_1)}{\pi x_1} \frac{\sin(\Omega x_2)}{\pi x_2},$$

bei einem quadratischen Objekt mit quadratischer Pupille,
definiert durch

$$= \text{rect}(\Omega, \Omega) \times \text{rect}(\Omega, \Omega)$$

bei einem kreisrunden Objekt und einer kreisrunden Pupille
mit einem Frequenzradius

$$S(\underline{x}) = \frac{\Omega}{2\pi} \frac{J_1(\Omega |\underline{x}|)}{|\underline{x}|}$$

Bei nichtkohärenter Bestrahlung sind die analogen Ausdrücke
für das quadratische Objekt

$$S(\underline{x}) = \frac{\sin^2(\Omega x_1)}{\pi \Omega x_1^2} \frac{\sin^2(\Omega x_2)}{\pi \Omega x_2^2}$$

und für das kreisrunde Objekt

$$S(\underline{x}) = \text{FT} \left\{ \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{|\underline{\omega}|}{2\Omega} \right) - \left(\frac{|\underline{\omega}|}{2\Omega} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{|\underline{\omega}|}{2\Omega} \right)^2} \right] E_p \left(\frac{\underline{\omega}}{2} \right) \right\}$$

wobei FT die Fourier-Transformierte bezeichnet und $E_p = 1$
auf der Pupille und anderswo Null ist.

Ein alternativer Algorithmus zur Rekonstruktion des Ob-
jekts aus der die Abbildung abtastenden Anordnung von
Detektorausgängen verwendet das singuläre System

$$\{u_k, v_k; \alpha_k\}_{k=0}^{\infty}$$

der Transformation aus dem kontinuierlichen Objekt f über dessen bekannte Halterung zu der "Vektor-"Abbildung g_n , definiert durch die (N) komplexen Datenproben an dem endlichen Satz von Detektoren. Die Rekonstruktion wird dann durch folgende Operation durchgeführt:

$$f = \sum_{k=0}^K \frac{(g, v_k)}{\alpha_k} u_k, \quad (g, v_k) = \sum_{n=1}^N w_n g_n (v_k)_n$$

wobei $(g \cdot v_k)$ das skalare Produkt oder die Projektion der Daten auf den singulären Vektor v_k ist. Das singuläre System ist eine Funktion der experimentellen Verteilung, kann jedoch in jedem speziellen Fall durch numerische Verfahren entsprechend der bekannten Praxis auf dem Gebiet der numerischen Analyse errechnet werden. K ist ein oberer Grenzwert für die Anzahl der wiedergewinnbaren Komponenten, der bestimmt ist durch die Abnahmerate der singulären Werte α_k und den tatsächlich vorhandenen Störpegel. w_k sind geeignete Gewichtungsfaktoren, die eine mögliche ungleichmäßige Detektor-Beabstandung berücksichtigen.

Die Auflösung bei der durch Beugung begrenzten Abbildung ist in OPTICA ACTA 1982, Bd. 29, Nr. 6, 727-746, beschrieben.

Erfindungsansprüche:

1. Abbildungssystem, gekennzeichnet dadurch, daß ein Linsensystem (8) zur Fokussierung von kohärenter oder nichtkohärenter Strahlung auf eine Bildebene, Detektoren (11) zum Erfassen der Amplitude der Strahlung in der Bildebene unter Erzeugung einer Informationsmatrix, eine Einheit (12) zur Umkehrung dieser Matrix unter Erzeugung eines rekonstruierten Bilds, und eine Einheit (13) zur Beobachtung des rekonstruierten Bilds vorgesehen sind.
2. Abbildungssystem nach Punkt 1, gekennzeichnet dadurch, daß es Mittel (1;3) zum Beleuchten eines Objekts (4) enthält, wobei die beleuchtete und auf die Detektoranordnung (11) fokussierte Fläche (5) kleiner als eine Wellenlänge im Quadrat der beleuchtenden Strahlung ist.
3. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß es Mittel zum Abtasten der beleuchtenden Strahlung relativ zum Objekt (4) enthält.
4. Abbildungssystem nach Punkt 3, gekennzeichnet dadurch, daß die Abtastmittel Motoren (6; 7) zum Bewegen des Objekts (4) in Einzelschritten aufweisen.
5. Abbildungssystem nach Punkt 3, gekennzeichnet dadurch, daß die Abtastmittel Ablenkorgane zum Ablenken der Strahlung über das Objekt (4) aufweisen.
6. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß eine Laserquelle (1) zum Beleuchten des Objekts (4) vorgesehen ist.
7. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß das Linsensystem durch das Objekt gelassene Strahlung empfängt.

8. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß das Linsensystem von der Objektoberfläche reflektierte Strahlung empfängt.
9. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß die Detektoren Einzeldetektoren in Matrixanordnung (11) sind.
10. Abbildungssystem nach Punkt 2, gekennzeichnet dadurch, daß die Detektoren durch ein Target in einer Halbleiterfotoschicht-Elektronenröhre gebildet sind.

Hierzu 1 Seite Zeichnungen

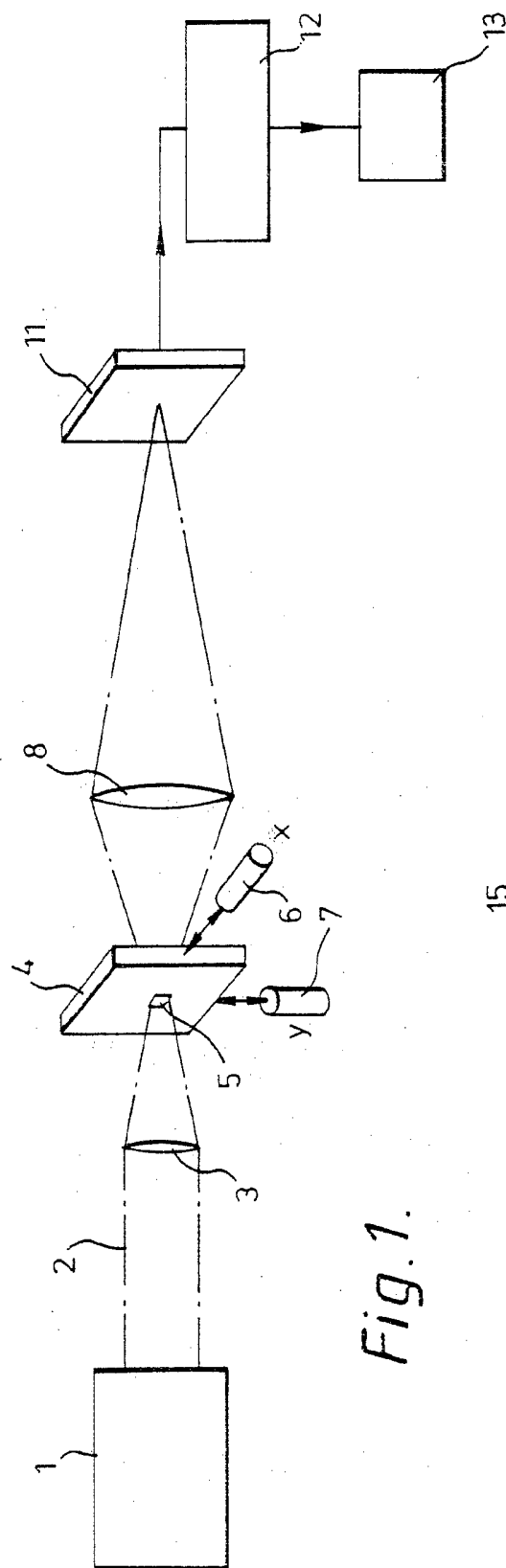


Fig. 1.

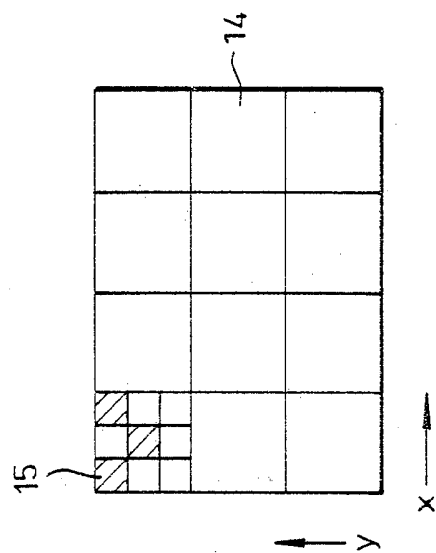


Fig. 2.