



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2005 045 622 B4 2009.04.30

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 045 622.7**

(22) Anmeldetag: **23.09.2005**

(43) Offenlegungstag: **05.04.2007**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **30.04.2009**

(51) Int Cl.⁸: **H01J 37/28 (2006.01)**

H01J 37/244 (2006.01)

G21K 1/16 (2006.01)

G01N 23/20 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**GST Gesellschaft für systembezogene
Technologieentwicklung mbH, 55130 Mainz, DE**

(74) Vertreter:

Walther, Walther & Hinz GbR, 34130 Kassel

(72) Erfinder:

Antrag auf Nichtnennung

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 198 42 476 C1

DE 103 39 404 A1

US 2002/0 03 213 A1

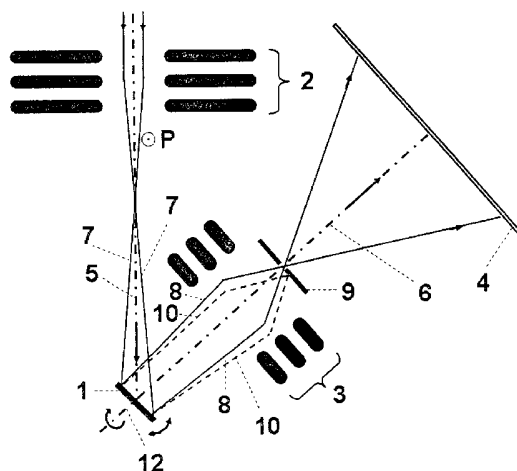
US 41 53 844

JP 59-0 79 948 A

J.Kessler, "Polarized Electrons", 1st Edition, Springer-Verl. Berlin, 1976; J.Kirschner, "Polarized Electrons at Surfaces", Springer-Tracts in Mod. Phys. Vol. 106, Berlin 1985; H.Hopster, H.P.Oepen (Hrsg.) "Magnetic Microscopy of Nanostructures", Springer-Verl. Berlin 1985; R.Bertacco et al: Rev. Sci. Instr. 70 (1990) 3572ff; E.Bauer, "LEEM-Basics", Surf. Rev. Lett. 5 (1998) 1275ff;

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Anordnungen zum Nachweis der Elektronen-Spinpolarisation**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur orts aufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation im Strahlengang eines parallel abbildenden Elektronenmikroskops, umfassend ein polarisationssensitives Streutarget (1) und eine Anordnung (2, 3) zur elektronenoptischen Strahlführung, wobei die laterale Verteilung des Spinpolarisationsgrades der Elektronen im aufgeweiteten Strahl durch das polarisationssensitive Streutarget (1) simultan analysiert und durch eine elektronenoptische Rundlinse (3) auf dem Bilddetektor (4) des Mikroskops sichtbar gemacht wird.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft jeweils ein Verfahren und eine entsprechende Anordnungen zur Analyse der Elektronen-Spinpolarisation in einem parallel abbildenden Elektronenmikroskop sowie jeweils ein Verfahren und eine Anordnung zur Analyse der Elektronen-Spinpolarisation in einem Elektronenspektrometer. Die jeweilige Anordnung umfasst ein polarisationssensitives Streutarget in einem elektronenoptischen Strahlengang und einen ortsauflösenden Detektor oder eine Anordnung aus mehreren Detektoren zum Nachweis der gestreuten Elektronen.

[0002] Bekannt sind verschiedene Methoden zur Analyse der Spinpolarisation von Elektronenstrahlen, darunter die spinabhängige Mottstreuung, die Niederenergie-Elektronenbeugung oder -Streuung sowie die Austauschstreuung an ferromagnetischen Targets. Einen Überblick gibt J. Kessler [„Polarized Electrons“, 1st Edition, Springer Verlag, Berlin (1976)]. Wichtige Anwendungen für die Analyse der Elektronen-Spinpolarisation bestehen im Bereich der Elektronenspektroskopie, siehe z. B. J. Kirschner [„Polarized Electrons at Surfaces“, Springer Tracts in Mod. Phys., Vol. 106, Berlin (1985)] und der Elektronenmikroskopie an magnetischen Proben [H. Hopster und H. P. Oepen (Hrsg.) „Magnetic Microscopy of Nanostructures“, Springer, Berlin (2005)]. Bekannte Beispiele sind die Rasterelektronenmikroskopie mit Polarisationsanalyse (SEMPA) oder die spinaufgelöste Photoelektronenspektroskopie. Bei magnetischen Proben trägt die Spinpolarisation der zum Nachweis gelangenden Elektronen wichtige Informationen über die Magnetisierungsstruktur der untersuchten Probe. Die Höhe der Spinpolarisation ist ein Maß für die zugehörige Probenmagnetisierung. Darüber hinaus besteht eine direkte Korrelation zwischen der Richtung des Spinpolarisationsvektors der Elektronen mit der Richtung der lokalen Magnetisierung der Probe. Eine spinaufgelöste Abbildung ist daher geeignet, die magnetische Domänenstruktur von ferromagnetischen Proben direkt abzubilden oder dynamische Effekte, wie z. B. das Verhalten der Magnetisierung bei ultraschnellen Anregungsprozessen, zeitlich aufgelöst zu verfolgen.

[0003] Die Literaturstellen US 4,153,844, DE 198 42 476 C1 und die US 2002/0003213 A1 befassen sich allesamt mit dem Einsatzfall eines Polarimeters im Rasterelektronenmikroskop – genannt SEMPA (Secondary Electron Microscopy with Polarization Analysis). Hierbei wird durch Rasterung ein Bild erzeugt; dabei wird die Spinanalyse für die einzelnen Bildpunkte sequenziell vorgenommen.

[0004] Auch bei der DE 103 39 404 A1 wird ein spinbefiltertes Bild erzeugt. Hier findet sich eine Spinfilterfolie im Strahlengang (Fig. 3 der DE 103 39 404 A1). Mit dieser Folie wird ein Teil des Bildes spinbefiltert

zur Abbildung gelangen. Das in der Literaturstelle US 2002/0003213 A1 beschriebene Polarimeter ist ebenfalls eine besondere Bauform für den Einsatz im SEMPA, wobei hierbei die beschleunigenden Elektroden ein Kugelfeld erzeugen.

[0005] Aus der JP 59 79948 A ist der Einsatz eines Spinpolarimeters (Mottdetektor) hinter einem Photoemissions-Elektronenmikroskop bekannt. Der Detektor analysiert den durch ein Loch im Leuchtschirm hindurchtretenden Elektronenstrahl. Hierbei folgt eine sequentielle Analyse der Polarisationsverteilung durch Abrastern. Eine sequentielle Analyse zur Bilderfassung ist allerdings sehr zeitintensiv, mithin ist die Effizienz der Polarisationsanalyse sehr gering.

[0006] Ein fundamentales Problem aller bisherigen Anordnungen zur Analyse der Spinpolarisation besteht darin, dass der ausgenutzte spinabhängige Streuprozess durch einen erheblichen Verlust an Elektronenintensität gekennzeichnet ist. Bei den am weitesten verbreiteten Verfahren, der Mottstreuung und Niederenergie-Elektronenbeugung, beträgt der Intensitätsverlust etwa drei Größenordnungen. Hinzu kommt eine Analysierstärke (Asymmetriefunktion A), die deutlich geringer ist als 100%. Typische Werte liegen um 25%, so dass die so genannte Gütefunktion A^2I nur typisch 10^{-4} beträgt. Daraus resultieren sehr große Messzeiten; in vielen Fällen verbietet die geringe Signalstärke eine spinaufgelöste Messung.

[0007] Die vorliegende Erfindung löst durch die Merkmale der Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 und 8 die Aufgabe, die Effizienz einer Polarisationsanalyse in Mikroskopie- und Spektroskopieexperimenten durch Simultandetektion der Polarisationsverteilung zu erhöhen. Dadurch wird eine spinaufgelöste Parallelabbildung ermöglicht. D. h. die laterale Ortsverteilung der Spinpolarisation ist im analysierten Elektronenstrahl nachweisbar. In typischen Mikroskopieexperimenten beträgt die Erhöhung der Messeffizienz mehr als zwei Größenordnungen, in Spektroskopieexperimenten mehr als eine Größenordnung. Das Verfahren ist sowohl für Hochenergie-Elektronenstrahlen (kinetische Energie > 10 keV) als auch für Niederenergie-Elektronenstrahlen (kinetische Energie wenige eV bis einige 100 eV) geeignet. Im ersteren Fall arbeitet die Spinpolarisations-Analyse nach den bekannten Prinzipien der Mottstreuung oder Moeller-Streuung, während im zweiten Fall die Niederenergie-Elektronenbeugung oder die Austauschstreuung an ferromagnetischen Targets ausgenutzt wird. Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens gegenüber bisherigen Ansätzen sind die Möglichkeiten zur direkten Parallelabbildung eines spinaufgelösten (d. h. spinbefilterten) Bildes in der Elektronenmikroskopie sowie zur simultanen Erfassung von spinaufgelösten Winkel- oder Energieverteilungen von gestreuten Elektronen oder Photoelektronen in der Spektroskopie.

[0008] Verschiedene Ausführungsarten und Anwendungsfälle der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen beispielhaft näher erläutert.

[0009] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Anordnung zur orts aufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation auf der Basis von Mottstreuung oder Niederenergie-Elektronenbeugung an einem Streutarget in der Säule eines Elektronenmikroskops in einer nicht-symmetrischen Geometrie;

[0010] Fig. 2a-b zeigt eine schematische Darstellung einer Anordnung zur orts aufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation auf der Basis von Mottstreuung oder Niederenergie-Elektronenbeugung (a) bzw. Austauschstreuung (b) an einem Streutarget in der Säule eines Elektronenmikroskops in einer symmetrischen 45°-Geometrie;

[0011] Fig. 3a-d zeigt schematische Skizzen zur Definition der Winkel- und Energieauflösung;

[0012] Fig. 4a-b zeigt eine schematische Darstellung der Anordnung gemäß Fig. 1 in der Säule eines Elektronenmikroskops unter Verwendung eines magnetischen Sektorfeldes in einer orthogonalen Geometrie (a) und einer nicht-orthogonalen Geometrie (b);

[0013] Fig. 5a-c zeigt eine schematische Darstellung der Anordnung zur orts aufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation hinter dem Strahlaustritt eines Elektronenspektrometers zur Simultanerfassung eines 1D-Energiebereiches (a), eines 1D-Winkelbereiches bzw. Ortsbereiches (b) oder eines 2D-Energie- und Winkelbereiches (c);

[0014] Fig. 6a-c zeigt bevorzugte Arten der Anordnung zur orts aufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation hinter dem Strahlaustritt eines Elektronenspektrometers, bei denen auf die erste Transferlinse (a) oder beide Transferlinsen (b) verzichtet werden kann oder bei denen das Streutarget segmentiert ist, um so einen größeren Energie- oder Winkelbereich der Elektronen simultan erfassen zu können (c).

[0015] Eine bevorzugte Ausführungsart des erfindungsgemäßen ortsauflösenden Spinpolarimeters nutzt aus, dass sich durch die spinabhängige Streuung an einem Target mit homogener Oberfläche eine Spinfilterung des gesamten Strahls, d. h. insbesondere der lateralen Verteilung der Elektronen im Strahl, erreichen lässt. Homogene Targetoberflächen können durch geeignete Präparation auf Einkristallen mit wohldefinierter kristallographischer Orientierung erzielt werden. Ein geeignetes Beispiel ist die Oberfläche eines Wolfram-Einkristalls mit (100)-Orientierung. Alternativ können geordnete (epitaktische) Schichten von Materialien mit hoher Ordnungszahl

auf geeigneten Substraten aufgedampft werden. Für die Mottstreuung oder die diffuse Niederenergiebeugung können polykristalline Schichten mit hinreichend homogener feinkristalliner Struktur genutzt werden. Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Ausführungsart in der elektronenoptischen Säule eines parallel abbildenden Elektronenmikroskops in einer nicht-symmetrischen Geometrie. Der einfallende Strahl wird über die erste Transferlinse (2) auf das Streutarget (1) abgebildet und nach der Streuung bzw. Beugung durch die zweite Transferlinse (3) auf den Bildschirm bzw. eine Zwischenbildebene (4) abgebildet. Die Fig. 1 und die nachfolgenden Abbildungen sind schematisch vereinfacht. In der Praxis können die Transferlinsen aus mehreren Linsenelementen bestehen und hinter der Zwischenbildebene (4) können Linsen (Projektive) zur weiteren Vergrößerung angebracht sein. Die Strahlquerschnitte sind der Deutlichkeit halber stark vergrößert dargestellt.

[0016] In der dargestellten Geometrie wird die mit P gekennzeichnete Komponente des Spinpolarisationsvektors senkrecht zur Zeichenebene analysiert. Im Fall eines einkristallinen Streutargets ist der Beugungswinkel energieabhängig. Bei korrekter Streuenergie wird für den gewählten Beugungsreflex das durch die Randstrahlen (7) begrenzte einfallende Strahlenbündel so gebeugt, dass es die Blende (9) passieren kann. Dieser Fall ist durch den Zentralstrahl (6) und die Randstrahlen (8) illustriert. Elektronen mit zu hoher oder zu niedriger Streuenergie sowie inelastisch oder diffus gestreute Elektronen werden durch die Blende (9) blockiert und tragen nicht zur Bildentstehung in der Bildebene (4) bei. Dies ist durch die Randstrahlen (10) verdeutlicht, welche zu einer zu niedrigeren Energie korrespondieren. Diese Anordnung ist besonders vorteilhaft, wenn die Energiebreite des einfallenden Elektronenstrahls zu groß für eine Spinanalyse mittels Niederenergiebeugung ist. Ein praktisches Beispiel für diese Geometrie ist die Beugung an der (100)-Oberfläche von Wolfram bei einer Streuenergie von 104,5 eV und Nutzung der Polarisationsempfindlichkeit des (2,0)-Strahls. Die Analysierstärke ist etwa 27% [J. Kirschner, „Polarized Electrons at Surfaces“, Kap. 3.1.1].

[0017] Bei diffuser Streuung an einer polykristallinen Schicht oder Mottstreuung bei höheren Energien treten keine Beugungsreflexe auf und der Effekt der Energiedispersion existiert nicht. In diesem Fall dient die Blende (9) zur Selektion des zur Abbildung genutzten Streuwinkelbereichs und zur Diskriminierung inelastisch gestreuter Elektronen. Das Verhältnis des Strahldurchmessers auf dem Streutarget zur Bildweite der Transferlinse (2) wird so gewählt, dass die Tiefenschärfe des Zwischenbildes auf dem schräg angeordneten Streutarget genügend groß ist. Die Transferlinse (3) ist in diesem Fall senkrecht zur Oberfläche des Streutargets angeordnet. Zur Fein-

justierung kann das Streutarget (1) gekippt und um seine Oberflächennormale (12) gedreht werden.

[0018] Fig. 2a zeigt eine schematische Darstellung in einer symmetrischen Geometrie, die der Bedingung Eintrittswinkel = Austrittswinkel genügt. Zur Abbildung gelangt in diesem Fall der Spiegelstrahl, auch (0,0)-Strahl genannt. Es tritt keine Energiedispersion auf. Die Oberflächennormale (12) fällt mit einer niedrig indizierten Richtung des Targetkristalls zusammen. Ein praktisches Beispiel für diese Geometrie ist die Beugung an der (100)-Oberfläche von Wolfram bei einer Streuenergie von etwa 30 eV oder 7 eV und Nutzung der Polarisationsempfindlichkeit des (0,0)-Spiegelstrahls. Die Blende (11) dient zur Begrenzung des zur Abbildung genutzten Streuwinkelbereichs. Im Fall der Beugung am Einkristall oder einer epitaktischen Schicht wirkt der Targetkristall auf den (0,0)-Strahl wie ein Spiegel. Im Fall diffuser Streuung (polykristalline Schicht oder Mottstreuung) muss die Tiefenschärfe beider Transferlinsen (2) und (3) genügend groß in Bezug auf das schräg angeordnete Streutarget sein.

[0019] Alternativ kann eine ferromagnetische Schicht als spinsensitives Streutarget genutzt werden. Dabei beruht die spinfilternde Wirkung auf der Austauschstreuung [R. Bertacco, D. Onofrio, F. Cicaci, Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 3572]. Fig. 2(b) zeigt eine schematische Darstellung eines ferromagnetischen Streutargets (1), welches auf ein magnetisches Joch (13) montiert ist und mittels eines Stroms durch eine Magnetisierungsspule (14) aufmagnetisiert werden kann. Zusätzlich kann eine zweite Spule senkrecht zur Zeichenebene angebracht werden. Dies erlaubt die Ausrichtung der Magnetisierung entlang der Richtungen parallel bzw. senkrecht zur Zeichenebene (M_p bzw. M_s). Diese Vektoren definieren die Quantisierungsrichtungen für die Spinpolarisationsanalyse.

[0020] Fig. 3a–c definieren die zu einer quantitativen Abschätzung der erreichbaren Energie- und Winkelauflösung relevanten Parameter. Der durch die Kontrastblende des Elektronenmikroskops (15) und deren Abstand vom Streutarget (1) definierte Winkelbereich $\Delta\alpha$ in Fig. 3a hat für Emissions-Elektronenmikroskope Werte < 1 mrad (für Hochauflösung typisch $< 0,2$ mrad). Eine Energieabweichung ΔE von der Sollenergie E_0 führt zu einer Winkeländerung $\Delta\epsilon$. Für $\Delta\epsilon = \Delta\alpha$ beginnen die beiden Emissionskegel zu überlappen. Dies begrenzt die erreichbare Energieauflösung, im Fall von 104,5 eV Streuenergie auf $\Delta E < 500$ meV (in Fall der Hochauflösung < 100 meV).

[0021] Fig. 3b zeigt den Fall der diffusen Niederenergiestreuung oder der Mottstreuung bei höheren Energien. Die Blende (11) definiert den zur Abbildung gelangenden Streuwinkelbereich. Ihr Durchmesser bestimmt den Akzeptanzwinkel des von jedem Punkt

auf dem Streutarget (1) ausgehenden Strahlenkegels. Aufgrund der chromatischen Aberration der Transferlinse (3) wirkt die Blende (11) zusätzlich auch als Energiefilter.

[0022] Fig. 3c zeigt die durch die Divergenz der Randstrahlen (7) hervorgerufene Winkelvariation auf dem Streutarget. Die Winkeldivergenz $\Delta\theta$ darf bei der Beugung am Einkristall maximal etwa 35 mrad betragen, da die Asymmetriefunktion eine starke Winkelabhängigkeit aufweist [siehe J. Kirschner, „Polarized Electrons at Surfaces“, Kap. 3.1.1]. Die Bildweite der Transferlinse (2) muss daher genügend groß in Relation zum Strahldurchmesser D auf dem Streutarget sein. Bei der diffusen Niederenergiestreuung und der Mottstreuung bei höheren Energien darf das Winkelintervall erheblich größer sein, da die Winkelabhängigkeit schwächer ist [für Mottstreuung siehe J. Kessler, „Polarized Electrons“, Kap. 3.5.1]. Hier sind Werte bis zu $\Delta\theta > 200$ mrad möglich.

[0023] Fig. 3d zeigt das Beispiel eines teleskopischen Strahlengangs. Die Blende (nicht dargestellt) begrenzt hier sowohl den Öffnungswinkel als auch den Streuwinkel.

[0024] Eine spezielle Ausführungsart verwendet zur Strahlführung ein magnetisches Sektorfeld (16). Zwei mögliche geometrische Anordnungen sind in Fig. 4a und b dargestellt. Ähnliche Sektorfelder werden in der Niederenergie-Elektronenmikroskopie eingesetzt [E. Bauer „LEEM-Basics“, Surf. Rev. Lett. 5 (1998) 1275]. Ein Vorteil dieser Ausführungsart besteht darin, dass der einfallende Strahl (7) und der gestreute Strahl (8) beide parallel oder nahezu parallel zur Oberflächennormalen (12) verlaufen. Die Transferlinse (17) kann als Immersionslinse betrieben werden, um sehr kleine Streuenergien zu ermöglichen. Ein praktisches Beispiel für diese Geometrie ist die Beugung an der (0001)-Oberfläche von Kobalt bei einer Streuenergie um 2 eV und Nutzung der Polarisationsempfindlichkeit des Spiegelstrahls. Die Anordnung in Fig. 4a bietet aufgrund der zweimaligen 90° Ablenkung den Vorteil, dass die lineare Säule des Elektronenmikroskops insgesamt erhalten bleibt.

[0025] Das ortsauflösende Spinpolarimeter kann auch in energiegefilterten Elektronenmikroskopen eingesetzt werden. Dabei kann die Energieselection sowohl durch dispersive Energiefilter als auch durch Flugzeitfilterung erfolgen.

[0026] Die erfindungsgemäße Anordnung zur Spinpolarisationsanalyse in einem Elektronenspektrometer nutzt die räumliche Separation von Elektronen mit verschiedenen Eintrittsenergien oder Eintrittswinkeln in der Ebene des Austrittsspalts des Spektrometers aus.

[0027] Fig. 5 zeigt die erfindungsgemäße Anord-

nung in Verbindung mit einem elektrostatischen Halbkugelanalysator, bestehend aus Außenkugel (19), Innenkugel (20), Eintrittsspalt (21) und Austrittsspalt (22). Das Streutarget (1) befindet sich im Strahlengang hinter dem Analysator. In der dargestellten Ausführungsart wird der Strahl durch die Transferlinse (2) auf das Streutarget (1) und durch die Transferlinse (3) auf den ortsauflösenden Elektronendetektor (18) abgebildet. Die Blende (11) dient zur Begrenzung des Streuwinkelintervalls und zur Diskriminierung von inelastisch gestreuten Elektronen.

[0028] Die mehrkanalige Polarisationsanalyse eines Energiespektrums ist in **Fig. 5a** dargestellt (Blickrichtung senkrecht zur dispersiven Ebene). Der energetisch aufgefächerte Elektronenstrahl (23) wird durch die erste Transferlinse (2) auf das Streutarget (1) abgebildet. Nach der Streuung wird der spingefilterte Strahl durch die zweite Transferlinse (3) auf den ortsauflösenden Elektronendetektor (18) abgebildet. Verschiedene Auftrefforte auf dem Detektor korrespondieren zu verschiedenen Energien. So wird ein spingefiltertes Energiespektrum simultan aufgenommen. Typische Energieintervalle liegen im Bereich von der Größenordnung eines eV (für hochauflösende Spektroskopie) bis zur Größenordnung von mehreren 10 eV. Für ein Energieintervall von 2 eV und eine gewünschte Energieauflösung von 25 meV beträgt der Gewinn an Messeffizienz durch den Vielkanalnachweis im Idealfall einen Faktor 80. In der Praxis kann die nicht perfekte Abbildung (chromatische Aberration) der Transferlinsen (2) und (3) die Zahl der aufgelösten Punkte auf dem Detektor begrenzen. Für große Energieintervalle bietet das Prinzip der Mottstreuung bei höheren Energien Vorteile, da die Niederenergiebeugung eine starke Energieabhängigkeit zeigt. Energieintervalle von bis zu etwa 3 eV lassen sich durch Niederenergie-Elektronenbeugung simultan analysieren.

[0029] Die mehrkanalige Polarisationsanalyse einer Winkelverteilung ist in **Fig. 5b** dargestellt (Blickrichtung in der dispersiven Ebene). Der bezüglich des Eintrittswinkels aufgefächerte Elektronenstrahl (24) wird durch die Transferlinse (2) auf das Streutarget (1) und danach durch die Transferlinse (3) außerhalb der Zeichenebene auf den ortsauflösenden Detektor (18) abgebildet. In diesem Fall korrespondieren verschiedene Auftrefforte der Elektronen auf dem Detektor zu verschiedenen Winkeln. So wird eine spingefilterte Winkelverteilung simultan aufgenommen. Typische Winkelintervalle für Halbkugelanalysatoren liegen im Bereich von ± 180 mrad um den Zentralstrahl. Bei einer gewünschten Winkelauflösung von 9 mrad ist der Gewinn an Messeffizienz durch den Vielkanalnachweis in diesem Fall durch den Faktor 40 bestimmt. Die Eintrittslinse von Energieanalysatoren lässt sich alternativ auch so betreiben, dass anstelle eines Emissionswinkelbereichs ein streifenförmiger Ortsbereich auf der Probe simultan analysiert wird.

[0030] **Fig. 5c** zeigt, dass die Ebene der Energieauffächerung und die Ebene der Winkelauffächerung senkrecht aufeinander stehen. Daher lassen sich die beiden vorgenannten Betriebsarten zu einer zweidimensionalen mehrkanaligen Detektion kombinieren. Der Gewinn an Meßeffizienz kann dabei prinzipiell drei Größenordnungen überschreiten; durch die nutzbare Winkel- und Energieakzeptanz des Streutargets und durch die Abbildungsfehler der Transferlinsen sind jedoch praktische Grenzen gesetzt. Der Übersichtlichkeit halber sind das Strahlenbündel des Energieintervalls (23) in **Fig. 5(a)** und das Strahlenbündel des Winkelintervalls (24) in **Fig. 5b** nur durch jeweils 5 Strahlen gekennzeichnet. Ferner sind die Elektronenbahnen nur als Striche gezeichnet, in der Praxis haben die Strahlenbündel im Analysator jedoch eine endliche Ausdehnung.

[0031] Nach einer besonders einfachen Ausführungsart kann das Streutarget unter Verzicht auf die Transferlinse (2) direkt kurz hinter dem Spektrometer-Austrittsspalt (22) angebracht werden. Diese erfindungsgemäße Ausführungsart ist in **Fig. 6a** dargestellt. Die Streuenergie ist in diesem Fall gleich oder nahezu gleich der kinetischen Energie (Passenergie) der Elektronen im Spektrometer. Ein praktisches Beispiel für diese Ausführungsart ist die Beugung an der (100)-Oberfläche von Wolfram bei einer Streuenergie um 30 eV oder um 7 eV und Nutzung der Polarisationsempfindlichkeit des Spiegelstrahls. Wenn der ortsauflösende Detektor (18) sehr nahe am Streutarget (1) platziert wird, kann auch auf die Transferlinse (3) verzichtet werden. Diese erfindungsgemäße Ausführungsart ist in **Fig. 6b** dargestellt. In diesem Fall entfällt die Energieselektion durch die Blende (11). Daher muss vor dem ortsauflösenden Detektor (18) eine Einrichtung zur Unterdrückung der inelastisch gestreuten Elektronen, wie z. B. eine Anordnung von Retardierungsnetzen (25), eingefügt werden.

[0032] In der Praxis kann mittels Niederenergiebeugung ein Energieintervall von bis zu etwa 3 eV simultan erfasst werden. Zur Erweiterung des nutzbaren Energieintervalls kann ein segmentiertes Streutarget (26) eingesetzt werden; diese Ausführungsart ist in **Fig. 6c** skizziert. Die einzelnen Segmente von (26) können auf verschiedenen Spannungen betrieben werden, um die Energievariation des einfallenden Strahls auszugleichen. Das oberste Segment liegt auf einer Spannung U_1 , das unterste auf U_2 , die Segmente dazwischen liegen auf Spannungen zwischen diesen Randwerten gemäß einem linearen Spannungsteiler. Durch geeignete Wahl von U_1 und U_2 lässt sich erreichen, dass alle Elektronen in dem energetisch aufgefächerten Strahlenbündel (23) mit derselben Energie auf dem segmentierten Streutarget auftreffen. Eine Segmentierung mit elektrischer Isolierung der einzelnen Segmente lässt sich durch Nutzung einer epitaktischen Schicht als Streutarget erreichen. Ein Beispiel für eine geeignete epitakti-

sche Schicht ist Wolfram in (110)-Orientierung auf einer Saphir-Substratoberfläche in (1120)-Orientierung. Alle elektronenoptischen Strahlengänge in den **Fig. 1–Fig. 6** sind schematisch vereinfacht.

Bezugszeichenliste

1	Streutarget zur Analyse der Spinpolarisation
2	Erste elektronenoptische Transferlinse
3	Zweite elektronenoptische Transferlinse
4	Bildschirm bzw. Zwischenbildebene
5	elektronenoptische Achse des einfallenden Strahls
6	elektronenoptische Achse des gestreuten Strahls
7	Randstrahlen des Bildes
8	Strahlverlauf für die gewünschte Energie (Sollenergie)
9	Blende zur Energieselektion
10	Strahlverlauf für eine niedrigere Energie
11	Blende zur Begrenzung des Streuwinkelbereichs
12	Oberflächennormale
13	Magnetisches Joch
14	Magnetisierungsspule
15	Kontrastblende des Mikroskops
16	Magnetisches Sektorfeld zur Strahlablenkung
17	Elektronenoptische Transferlinse
18	ortsauflösender Detektor für die gestreuten Elektronen
19	Außenkugel des Energieanalysators
20	Innenkugel des Energieanalysators
21	Eintrittsspalt des Energieanalysators
22	Austrittsspalt des Energieanalysators
23	Strahlenbündel des parallel analysierten Energieintervalls
24	Strahlenbündel des parallel analysierten Winkelintervalls
25	Retardierungsnetze zur Unterdrückung der inelastisch gestreuten Elektronen
26	segmentiertes Streutarget
$\Delta\alpha$	Winkeldivergenz des einfallenden Zentralstrahls
$\Delta\theta$	Winkeldivergenz der Randstrahlen des einfallenden Elektronenstrahls
D	Strahldurchmesser am Streutarget
E	Elektronenenergie
Φ	Winkel im Elektronenspektrometer
P	Analysierte Komponente des Polarisationsvektors
M_p	Parallele Komponente der Magnetisierung eines ferromagnetischen Streutargets
M_s	Senkrechte Komponente der Magnetisierung eines ferromagnetischen Streutargets
B	Magnetfeld senkrecht zur Zeichenebene

Patentansprüche

1. Verfahren zur ortsaufgelösten Analyse der

Elektronen-Spinpolarisation im Strahlengang eines parallel abbildenden Elektronenmikroskops, umfassend ein polarisationssensitives Streutarget (1) und eine Anordnung (2, 3) zur elektronenoptischen Strahlführung, wobei die laterale Verteilung des Spinpolarisationsgrades der Elektronen im aufgeweiteten Strahl durch das polarisationssensitive Streutarget (1) simultan analysiert und durch eine elektronenoptische Rundlinse (3) auf dem Bilddetektor (4) des Mikroskops sichtbar gemacht wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Streutarget (1) und die Strahlführung so positioniert und justiert sind, dass auf dem Bilddetektor (4) des Mikroskops ein spingefiltertes elektronenoptisches Bild der Probe zur Abbildung kommt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Streutarget (1) und die Strahlführung so positioniert und justiert sind, dass auf dem Bilddetektor (4) des Mikroskops ein spingefiltertes elektronenoptisches Beugungsbild, d. h. die spingefilterte Impulsverteilung der von der Probe emittierten Elektronen, zur Abbildung kommt.

4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine energie- oder flugzeitgefilterte Elektronenverteilung lateral aufgelöst analysiert wird.

5. Verfahren zur ortsaufgelösten Analyse der Elektronen-Spinpolarisation im Strahlengang hinter dem Strahlaustritt eines Elektronenspektrometers, umfassend ein polarisationssensitives Streutarget (1) und einen ortsauflösenden Detektor (18), wobei durch das polarisationssensitive Streutarget die laterale Verteilung des Spinpolarisationsgrades der Elektronen hinter dem Strahlaustritt des Spektrometers simultan analysiert wird und auf dem ortsauflösenden Detektor (18) sichtbar gemacht wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronen durch eine Transferlinse (2) hinter dem Strahlaustritt des Elektronenspektrometers auf das Streutarget abgebildet werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronen durch eine Transferlinse (3) hinter dem Streutarget auf den ortsauflösenden Detektor (18) abgebildet werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5–7, dadurch gekennzeichnet, dass die Spinpolarisationsverteilung innerhalb eines Energieintervalls in der Art einer eindimensionalen Mehrkanal-Detektion simultan analysiert wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5–7, dadurch gekennzeichnet, dass die Spinpolarisations-

verteilung innerhalb eines Winkelintervalls in der Art einer eindimensionalen Mehrkanal-Detektion simultan analysiert wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 5–7, dadurch gekennzeichnet, dass die Spinpolarisationsverteilung innerhalb eines streifenförmigen Ortsintervalls der Probe in der Art einer eindimensionalen Mehrkanal-Detektion simultan analysiert wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 5–7, dadurch gekennzeichnet, dass die Spinpolarisationsverteilung innerhalb eines Energie- und Winkel-(oder Orts-)Intervalls in der Art einer zweidimensionalen Mehrkanal-Detektion simultan analysiert wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–11, dadurch gekennzeichnet, dass der ortsauflösende Detektor (18) die gestreuten Elektronen als einzelne Zählereignisse, als Strom oder als Helligkeitsverteilung auf einem Leuchtschirm nachweist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–12, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Polarisationsanalyse ausgenutzte Streuasymmetrie auf dem bekannten Prinzip der Mottstreuung an einem Streutarget (1) mit hoher Ordnungszahl basiert.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–12, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Polarisationsanalyse ausgenutzte Streuasymmetrie auf dem bekannten Prinzip der spinabhängigen Niederenergie-Elektronenbeugung bzw. -Streuung an einem einkristallinen oder polykristallinen Streutarget (1) oder einer dünnen Schicht basiert.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–12, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Polarisationsanalyse ausgenutzte Streuasymmetrie auf dem bekannten Prinzip der Austauschstreuung an einem ferromagnetischen Streutarget (1) oder einer dünnen ferromagnetischen Schicht basiert.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Richtung der Magnetisierung des ferromagnetischen Streutargets (1) bzw. der Schicht durch eine Magnetisierungseinrichtung (13) umgepolt oder um 90° gedreht wird, so dass zwei zueinander orthogonale Komponenten des Spinpolarisationsvektors analysiert werden können.

17. Anordnung zur elektronenoptischen Strahlführung in einem parallel abbildenden Elektronenmikroskop zur ortsauflösenden Analyse der Elektronenspinpolarisation, umfassend ein polarisations-sensitives Streutarget (1), sowie eine elektronenoptische Transferlinse (3) strahlabwärts des Streutargets zur Strahlaufweitung und Abbildung.

18. Anordnung nach Anspruch 17, dadurch ge-

kennzeichnet, dass die Anordnung zur Strahlführung ein magnetisches oder elektrisches Sektorfeld zur Strahlablenkung (16) beinhaltet.

19. Anordnung nach Anspruch 17 oder 18, dadurch gekennzeichnet, dass das Streutarget (1) in oder in der Nähe einer Zwischenbildebene, einer Beugungsebene oder in einem Bereich paralleler Strahlführung positioniert ist.

20. Anordnung zur ortsauflösenden Analyse der Elektronenspinpolarisation im Strahlengang hinter dem Strahlaustritt eines Elektronenspektrometers, umfassend ein polarisationssensitives Streutarget (1) und einen ortsauflösenden Detektor (18), wobei durch das polarisationssensitive Streutarget (1) die laterale Verteilung des Spinpolarisationsgrades der Elektronen hinter dem Strahlaustritt des Spektrometers simultan analysiert wird, und auf dem ortsauflösenden Detektor (18) sichtbar gemacht wird.

21. Anordnung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass eine Blende (11) im Strahlengang der Transferlinse (3) hinter dem Streutarget (1) zur Begrenzung des Winkel- und Energieintervalls der gestreuten Elektronen eingefügt ist.

22. Anordnung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Streutarget (1) mehrere Segmente auf verschiedenen elektrischen Potentialen aufweist, so dass ein größeres Energie- und Winkelintervall mittels Niederenergiebeugung an einem einkristallinen Streutarget simultan analysiert werden kann.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

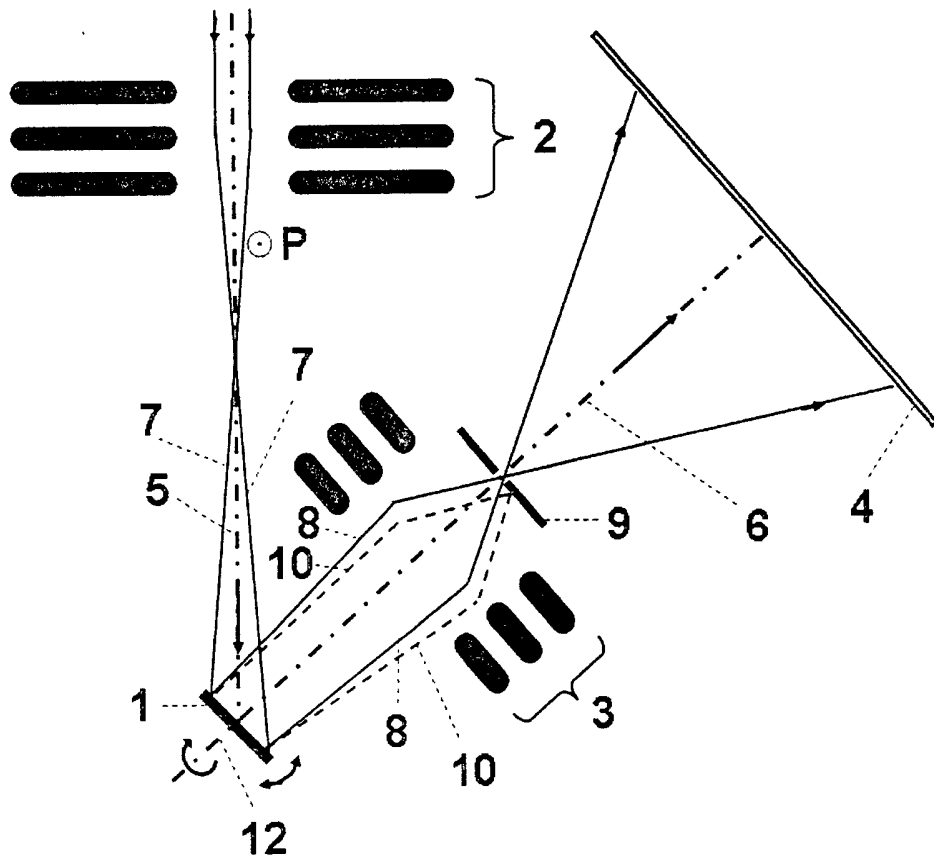


Fig. 1

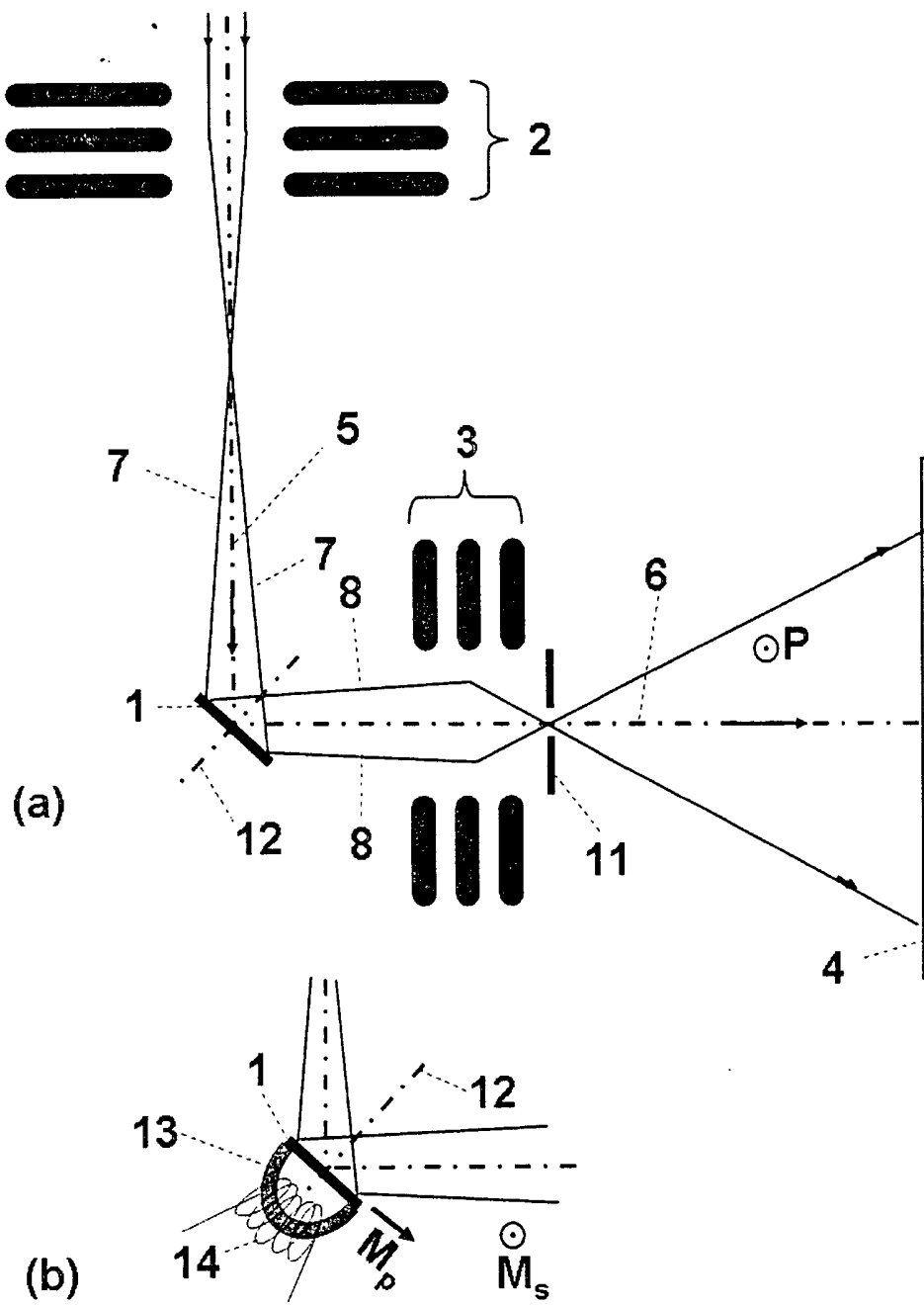


Fig. 2

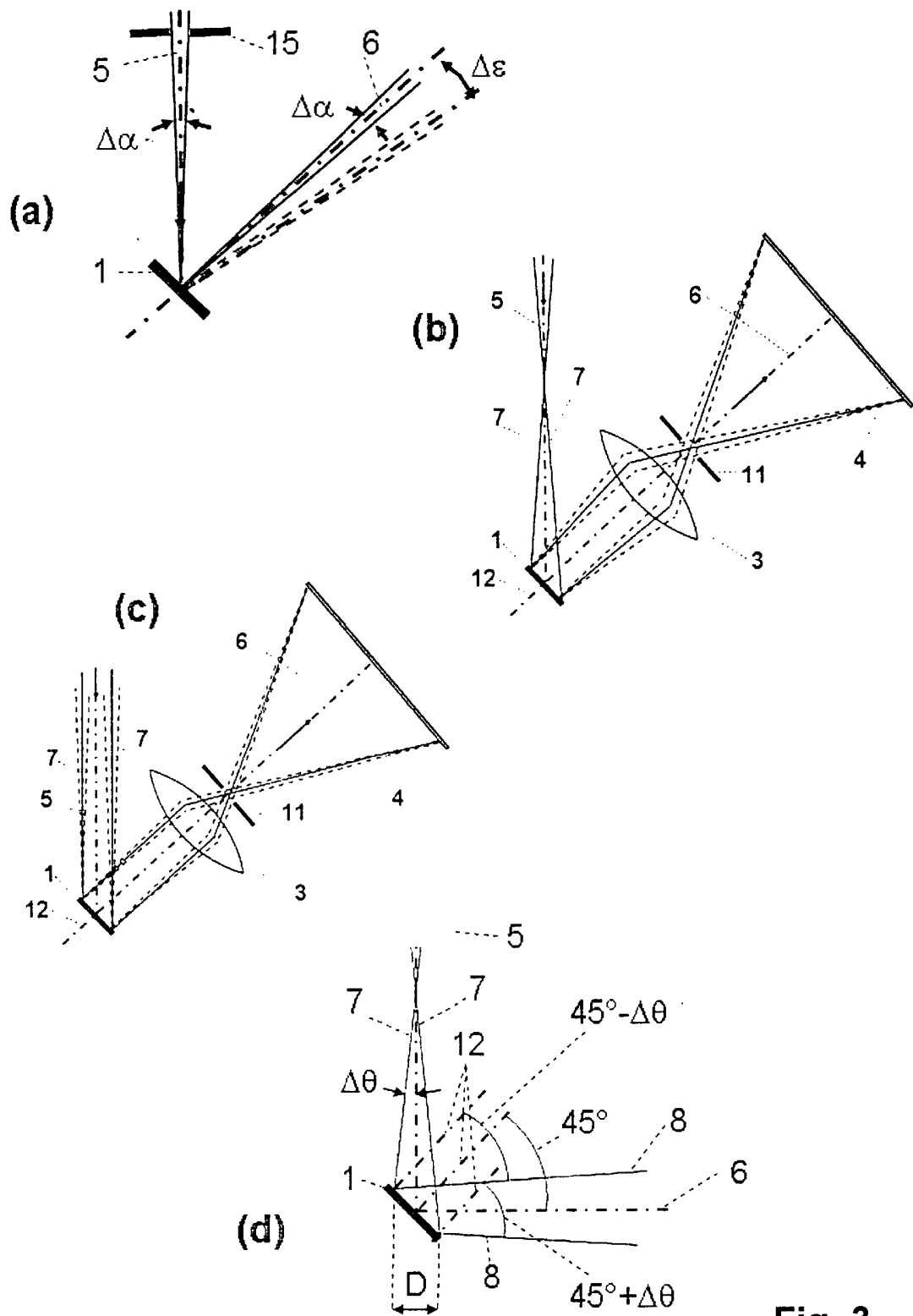


Fig. 3

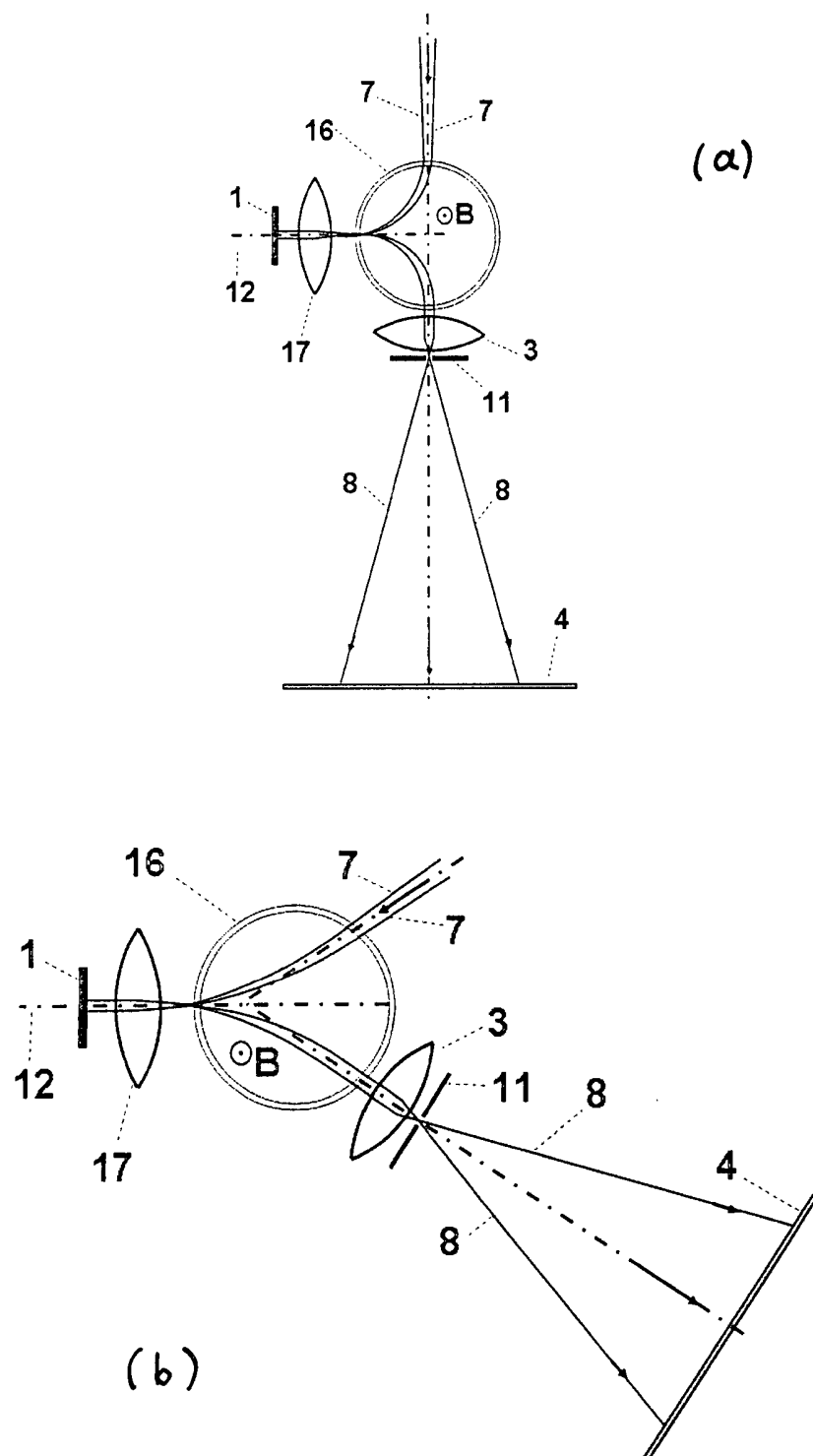


Fig. 4

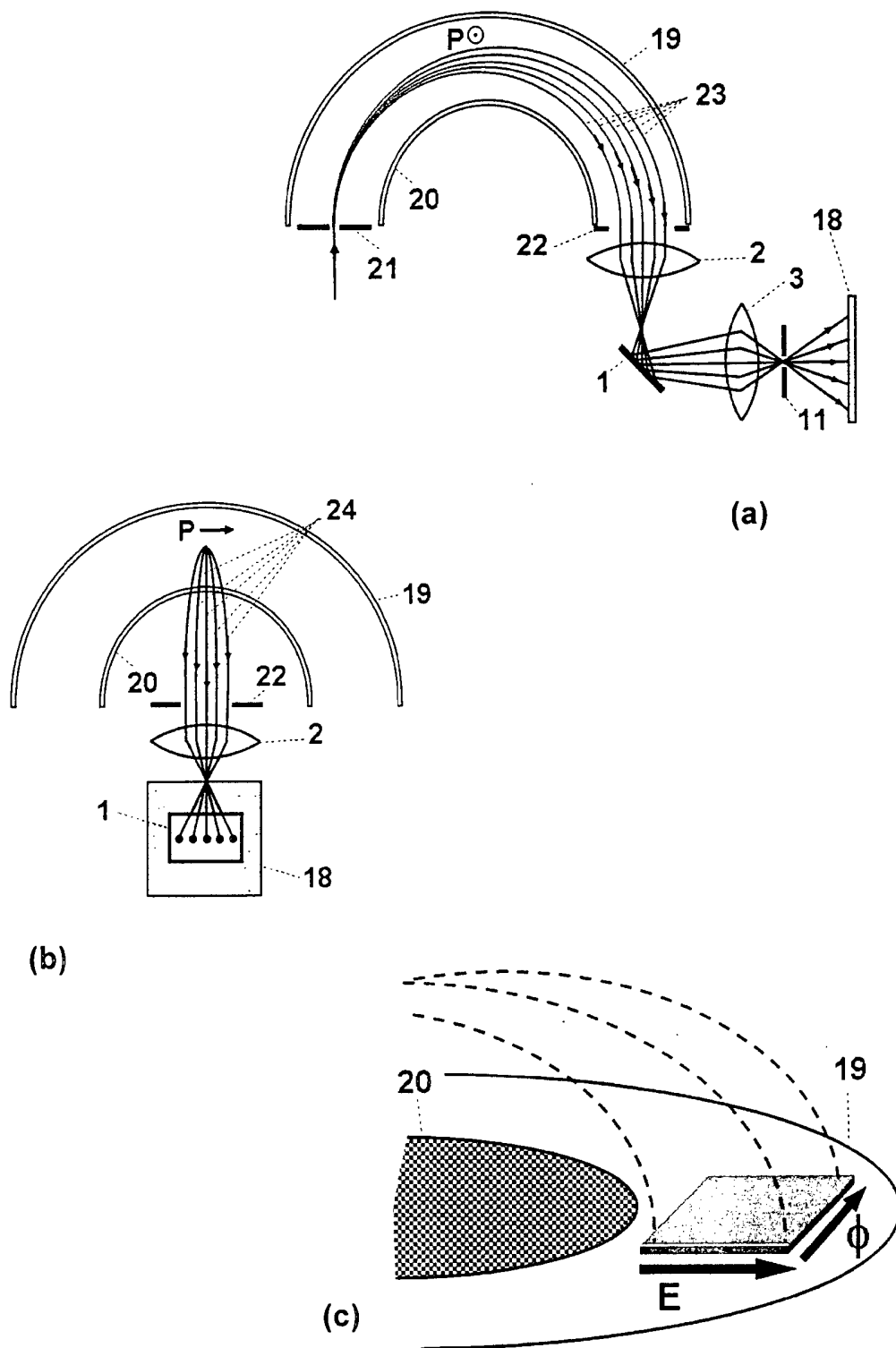


Fig. 5

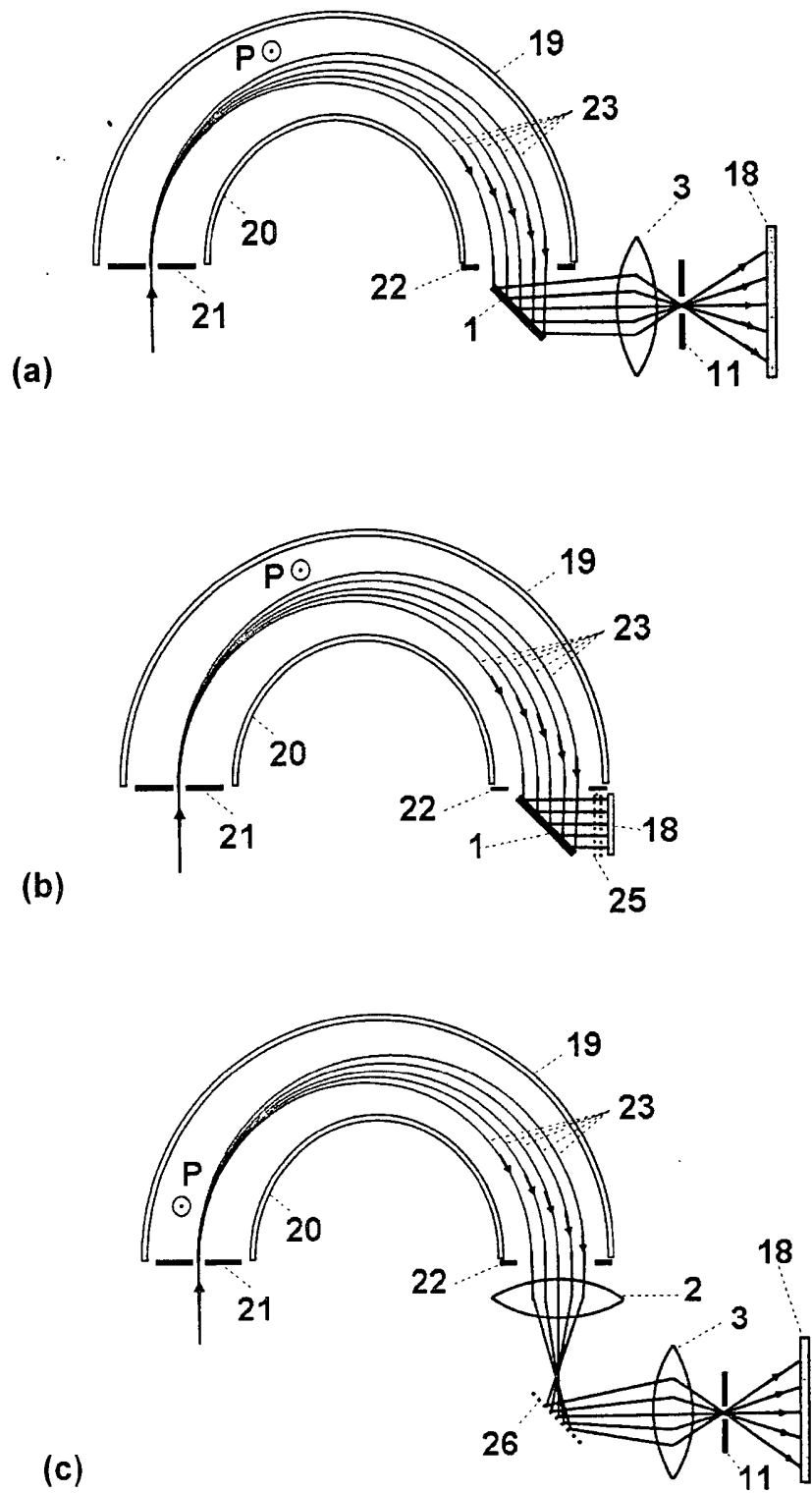


Fig. 6