



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 030 803 A1** 2006.01.19

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 030 803.9**

(22) Anmeldetag: **25.06.2004**

(43) Offenlegungstag: **19.01.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G02B 5/08** (2006.01)

G02B 1/10 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01)

G21K 1/06 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(74) Vertreter:

**PFENNING MEINIG & PARTNER GbR, 80336
München**

(72) Erfinder:

**Schmidt, Jan Uwe, Dipl.-Phys., 01099 Dresden,
DE; Sandner, Thilo, Dr.-Ing., 01462 Cossebaude,
DE; Schenk, Harald, Dr.-Ing., 01109 Dresden, DE;
Gatto, Alexandre, Dr.-Phys., 07745 Jena, DE; Yang,
Minghong, Dr.-Phys., 07745 Jena, DE; Heber, Jörg,
99092 Erfurt, DE; Kaiser, Norbert, Dr. habil., 07745
Jena, DE**

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

US 52 14 344

US 44 08 825

WO 2004/0 84 710 A2

A.Gatto, M.Yang, J.Heber, N.Kaiser:

Beschichtungen

**für Mikrospiegelarrays. Jahresbericht 2003 des
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und
Feinmechanik, S. 34-37;**

O.R.Wood II, H.G.Craighead, J.E.Sweeney, P.J.

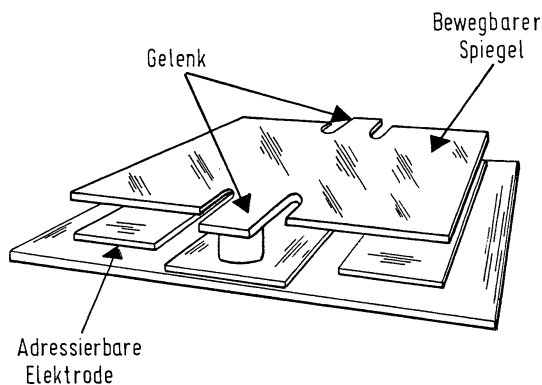
**Maloney: Vacuum ultraviolet loss in magnesium
fluoride films. Appl. Optics, Vol. 23, Nr. 20,
S. 3644-3649;**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel, Verfahren zu dessen Herstellung sowie dessen Verwendung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft hochreflektiv beschichtete mikromechanische Spiegel für den tief-ultravioletten (DUV)- und vakuum-ultravioletten (VUV)-Spektralbereich, basierend auf einem Substrat, das mit einer Aluminium-Schicht und einer transparenten Vergütungsschicht überzogen ist. Ebenso betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung derartiger hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel sowie deren Verwendung zur Herstellung von Mikrosensoren, optischen Datenspeichern oder Video- und Datenprojektionsdisplays.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft hochreflektiv beschichtete mikromechanische Spiegel für den tief-ultravioletten (DUV)- und vakuum-ultravioletten (VUV)-Spektralbereich, basierend auf einem Substrat, das mit einer Aluminium-Schicht und einer transparenten Vergütungsschicht überzogen ist. Ebenso betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung derartiger hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel sowie deren Verwendung zur Herstellung von Mikrosensoren, optischen Datenspeichern oder Video- und Datenprojektionsdisplays.

Stand der Technik

[0002] Die Erzeugung, Modulierung, Leitung und Detektion von Licht bilden gegenwärtig Schwerpunkte auf dem Gebiet der Optik-Forschung. Die stetige Steigerung der Modulationsgeschwindigkeiten und der Trend zu höheren Integrationsdichten forcieren die Miniaturisierung mikrooptischer Bauelemente und führten zur Entwicklung von auf Nanostrukturen basierenden funktionellen Schichten für aktive optische Komponenten. Die Synergie aus Opto-Elektronik und Mikromechanik führte zu einer neuen Klasse integrierter mikrooptoelektronischer Systeme (MOEMS) mit komplett neuen Anwendungsfeldern und großem Potential für die nahe Zukunft. Beispiele für MOEMS-Anwendungen sind Phasenfrontkorrekturen durch adaptive Optik, Lab-on-chip- sowie Telekommunikations-Anwendungen.

[0003] Eine völlig neue Anwendung, die den Hintergrund dieser Erfindung bildet, ist die UV-Lithographie mittels Flächenlichtmodulatoren (engl. spatial light modulators, SLM), bei der die Produktivität der herkömmlichen optischen Lithographie und die hochauflösenden Eigenschaften der Elektronenstrahlolithographie vereinigt werden (U. Ljungblad, U. Dauderstädt, P. Dürr, T. Sandström, H. Buhre, H. Lakner, „New laser pattern generator for DUV using spatial light modulator“, *Microelectronic Engineering* 57–58 (2001) 23–29; T. Sandström, U. B. Ljungblad, P. Dürr, H. Lakner „High-performance laser pattern generation using spatial light modulators (SLM) and deep-UV radiation, *Proceedings of SPIE Vol. 4343* (2001) 35; R. Thielsch, „Optical coatings for the DUV/VUV“, in *Interference Coatings*, by N. Kaiser and H. K. Pulker (Hrsg.), Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003)). Anwendungen dieser Technologie sind Maskenbelichter zur Herstellung von Photomasken für die Halbleitertechnologie bzw. Direktbelichtungssysteme für die maskenlose Lithographie, welche gegenüber den existierenden Laser- bzw. Elektronenstrahl-basierten Belichtungssystemen deutlich kostengünstiger und schneller sind. Diese Systeme arbeiten im DUV- bzw. VUV-Spektralbereich, wo aufgrund der starken Absorption der meisten Materialien Strahlenschäden eine wichtige Rolle spielen. Die Verminderung der Absorption reflektierender Mikroaktuatoren, sog. Mikrospiegel, bzw. das Erreichen hoher Reflektivitäten im DUV/VUV (> 90%) ist daher nicht nur zur Verringerung von Lichtverlusten, sondern vor allem auch zur Verhinderung von Degradationseffekten an Mikrospiegeln dringend geboten. Obwohl die Technologie massiver Spiegel für den DUV/VUV-Bereich weitgehend bekannt ist, gibt es bisher keine optischen Verspiegelungen für Mikrospiegel im DUV/VUV, welche diese Anforderungen erfüllen. Grund dafür sind die im Vergleich zu massiven Spiegeln um ein Vielfaches komplexeren Bandbedingungen, denen eine zur Technologie der MOEMS kompatible Verspiegelung genügen muss.

[0004] Zur Herstellung von Verspiegelungen gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Konzepte:

1. dielektrische Bragg-Spiegel, d.h. Stapel aus Schichten mit hohem bzw. niedrigem Brechungsindex und
2. metallische Spiegel

[0005] Speziell für den DUV/VUV-Bereich wurden in der Literatur sowohl Bragg-Spiegel (Zs. Czigany, M. Adamik, N. Kaiser, 248 nm laser interaction studies on LaF₃/MgF₂ optical coatings by cross-sectional transmission electron microscopy, *Thin Solid Films* 312 (1998) 176–181; A. Gatto, J. Heber, N. Kaiser, D. Ristau, S. Günster, J. Kohlhaas, M. Marsi, M. Trovo, R. P. Walker, High-performance DUV/VUV optics for the Storage Ring FEL at ELETTRA, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 483 (2002) 357–362; N. Kaiser, H. K. Pulker (Editors), *Optical Interference Coatings* (Springer Series in Optical Sciences, 88), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003) als auch vergütete Aluminiumspiegel vorgestellt. Es existieren integrierte Mikrospiegel-Arrays mit unvergüteten Aluminium-Spiegeln für Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich (VIS), die in Projektionsdisplays eingesetzt werden. Mikrospiegel-Arrays für Anwendungen im UV (u.a. maskenlose Lithographie bei 248 nm) werden vom Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme Dresden gefertigt. Als Material kommt hier eine unvergütete Aluminium-Legierung zum Einsatz. Nur wenige Arbeiten beschäftigen sich mit vergüteten Verspiegelungen für mikromechanische Aktuatoren. Die existierenden Arbeiten beschränken sich dabei auf den sichtbaren Spektralbereich (400–800 nm). Bisher sind keine Arbeiten zu vergüteten Mikrospiegeln für das DUV/VUV bekannt.

[0006] Die Anwendung reflektierender Mikroaktuatoren im DUV und VUV (140–400 nm) erfordert deren Beschichtung mit hochreflektierenden Schichtsystemen, um einerseits den Intensitätsverlust durch Absorption und Streuung zu minimieren, und andererseits den Leistungseintrag in das Aktuatomaterial sowie dadurch verursachte strukturelle Instabilitäten, wie z.B. das Verbiegen freitragender Strukturen, aber auch Oxidation bzw. Korrosion der Aktuatomaterialien zu vermeiden. Im Gegensatz zu den massiven großflächigen hochreflektierenden (HR) Spiegeln müssen Spiegelschichten auf freitragenden Mikroaktuatoren zusätzlichen Anforderungen genügen: Die HR-Verspiegelung muss mit Verfahren der Halbleitertechnologie strukturierbar sein, wobei sich ihre Reflektivität nicht durch Anwendung dieser Verfahren verringern darf. Um die Ebenheit der Mikroaktuatoren in einem Temperaturintervall um den Arbeitspunkt zu gewährleisten, müssen die im allgemeinen aus zwei und mehr Schichten aufgebauten verspiegelten Aktuatoren in Bezug auf Schichtspannungen und thermische Ausdehnung kompensiert sein.

Aufgabenstellung

[0007] Ausgehend hiervon war es Aufgabe der vorliegenden Erfindung mikromechanische Spiegel bereitzustellen, die strukturierbare hochreflektive Beschichtungen im Spektralbereich des DUV und VUV aufweisen.

[0008] Diese Aufgabe wird durch den hochreflektiv beschichteten mikromechanischen Spiegel mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch das Verfahren zur Herstellung derartiger Spiegel mit den Merkmalen des Anspruchs 9 gelöst. Die weiteren abhängigen Ansprüche zeigen vorteilhafte Weiterbildungen auf. In den Ansprüchen 10 und 11 werden die Verwendungen der erfindungsgemäßen mikromechanischen Spiegel beschrieben.

[0009] Erfindungsgemäß wird ein hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel für den tief-ultravioletten (DUV)- und vakuum-ultravioletten (VUV)-Spektralbereich mit einem Substrat und darauf abgeschiedener Aluminium-Schicht, die mit einer transparenten Vergütungsschicht überzogen ist, bereitgestellt. Die Vergütungsschicht hat dabei mehrere Funktionen. Einerseits schützt sie die Aluminium-Schicht vor Oxidation und Korrosion, andererseits erhöht sie die Reflektivität im angestrebten Wellenlängenbereich.

[0010] Verglichen mit den alternativ anwendbaren dielektrischen Schichtsystemen haben vergütete Aluminium-Verspiegelungen im Hinblick auf die Technologie von Mikrospiegeln mehrere Vorteile. Die für die jeweilige Wellenlänge optimale Reflektivität wird bereits bei einer relativ geringen Gesamtdicke der Verspiegelung, d.h. etwa 100 bis 150 nm im Spektralbereich von 140 bis 400 nm, erreicht, was bei schwer ätzbaren Vergütungen die Strukturierung überhaupt erst ermöglicht und insbesondere für die Herstellung schmaler Strukturen im Bereich von $< 1 \mu\text{m}$ essentiell ist. Vergütete Aluminium-Spiegel lassen sich bei geeigneter Wahl der Abscheidungsparameter mit sehr geringen Schichtspannungen auf verschiedenen Unterlagen abscheiden. Gemeinsam mit den benötigten geringen Schichtdicken der Verspiegelungen bewirkt dies, dass eine Stresskompensation der Vergütung bereits durch das Aktuatomaterial oder durch zusätzliche Kompensationsschichten erreicht werden kann. So wird eine hohe Planarität auch für sehr dünne Mikrospiegel mit einer Dicke $< 1 \mu\text{m}$ ermöglicht. Die Trennung zwischen Aktuator-Material und Verspiegelung ermöglicht zudem die getrennte Optimierung der funktionellen Eigenschaften beider Bestandteile.

[0011] Vorzugsweise ist der erfindungsgemäße mikromechanische Spiegel im Spektralbereich von 140 bis 400 nm hochreflektiv.

[0012] Hinsichtlich des zu verwendenden Substrates gibt es grundsätzlich keinerlei Beschränkungen. Ein bevorzugtes Material hierfür ist Silicium.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform besitzt die Aluminium-Schicht eine Schichtdicke von 10 bis 1000 nm, insbesondere von 50 bis 200 nm und besonders bevorzugt von 50 bis 100 nm.

[0014] Die Vergütungsschicht ist bevorzugt eine Fluoridschicht, eine Oxid-Schicht und/oder deren Mischschichten. Besonders bevorzugte Beispiele hierunter sind Schichten aus Lantanfluorid (LaF_3), Aluminiumfluorid (AlF_3), Magnesiumfluorid (MgF_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Siliciumoxid (SiO_2). Derartige Vergütungsschichten bilden einen Schutz gegen die Oxidation der Aluminium-Schicht an Luft und verringern so die von ungeschützten Aluminium-Spiegeln bekannte rasche Degradation der Reflektivität im DUV/VUV.

[0015] Vorzugsweise weisen die Vergütungsschichten eine Schichtdicke im Bereich von 10 bis 200 nm, besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 100 nm auf und besonders bevorzugt von 30 bis 60 nm.

[0016] Erfindungsgemäß wird ebenso ein Verfahren zur Herstellung hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel bereitgestellt, bei dem ein Substrat in einer Hochvakuum-Bedampfungskammer mit Aluminium und anschließend einer Vergütungsschicht aus einem Fluorid, Oxid oder deren Gemischen beschichtet wird. Die Abscheidung der Vergütungsschicht erfolgt dabei bei niedriger Substrattemperatur, d.h. $< 100^{\circ}\text{C}$, unmittelbar nach Abscheidung der Aluminium-Schicht im selben Vakuum-Zyklus.

[0017] Verwendung finden die erfindungsgemäßen hochreflektiv beschichteten mikromechanischen Spiegel bei der Herstellung von Mikrosensoren, optischen Datenspeichern und Video- und Datenprojektionsdisplays. Weitere Anwendungsmöglichkeiten liegen im Bereich von lap-onchip-Anwendungen bzw. Telekommunikations-Anwendungen.

Ausführungsbeispiel

[0018] Anhand der nachfolgenden Figuren und dem folgenden Beispiel soll der erfindungsgemäße Gegenstand näher erläutert werden, ohne diesen auf die hier gezeigten speziellen Ausführungsformen zu beschränken.

[0019] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen mikromechanischen Spiegels.

[0020] [Fig. 2](#) zeigt eine Aufnahme eines integrierten Flächenlichtmodulators.

[0021] [Fig. 3](#) zeigt ein Reflektionsspektrum einer erfindungsgemäßen Aluminium-Verspiegelung mit Fluorid-Vergütungsschicht.

[0022] [Fig. 4](#) zeigt ein Reflektionsspektrum einer erfindungsgemäßen Aluminium-Verspiegelung mit Oxid-Vergütungsschicht.

[0023] [Fig. 5](#) zeigt eine erfindungsgemäße Verspiegelung, die aus einer Aluminium-Schicht mit einer Schichtdicke von 90 nm und einer Oxid-Vergütungsschicht aus Al_2O_3 mit einer Schichtdicke von 38 nm, besteht.

Beispiel

[0024] Für die Anwendung in einer weltweit neuen Generation von UV-Maskenbelichtern wurden am Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) in Dresden quadratische, $16\ \mu\text{m}$ breite, um die Mittelachse kippbare Mikrospiegel in SLM-Mikrospiegel-Arrays (z.B. 1024×512 Spiegel) integriert. Jeder einzelne Spiegel ist hierbei über eine Streuelektrode individuell auslenkbar. In den maskenlosen Lithographieanlagen der schwedischen Firma Micronic sind SLM-Arrays Bestandteil der Projektionsoptik und arbeiten als programmierbares optisches 2D-Gitter bei Wellenlängen von 248 nm bzw. 193 nm. Am Fraunhofer Institut für Präzisionsoptik und Feinmechanik Jena (IOF) wurden speziell für Wellenlängen von 193 nm und 157 nm vergütete Aluminium-Verspiegelungen entwickelt. Die HR-Verspiegelungen wurden in einer Hochvakuum-Bedampfungskammer der Firma Balzers (Typ BAK640, ausgerüstet mit Kryopumpe, Elektronenstrahl- und thermischem Verdampfer, Basisdruck $6 \cdot 10^{-7}$ mbar) hergestellt. Die Verspiegelungsschichten bestanden aus einer 75 nm dicken Aluminiumschicht (abgeschieden auf Silizium mit einer Rate von 30 nm/s) und verschiedenen dielektrischen Vergütungen, die bei einer Rate von 1 nm/s in der jeweils optimalen Dicke abgeschieden wurden. Die maximal erreichten Reflektivitäten betragen hierbei 91.2% für 193 nm bzw. 88.9% für 157 nm. [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) zeigen die experimentellen Reflexionsspektren der in Tabelle 1 spezifizierten Verspiegelungen mit den verschiedenen Fluorid- bzw. Oxidvergütungsschichten.

Tabelle 1

λ_0 (nm)	Material Design	Substrat	Alumini- umdicke (nm)	Vergütungs- dicke (nm)	R (%) bei 0° 193 nm	λ_0 von 157 nm
193	Al	Si	75	-	87	73
193	Al/SiO ₂	Si	90	50	89	83
193	Al/Al ₂ O ₃	Si	90	38	88	-
157	Al/MgF ₂	Si	90	44	91	88
157	Al/LaF ₃	Si	90	33	85	88
157	Al/AlF ₃	Si	90	55	91	89

Patentansprüche

1. Hochreflektiv beschichteter mikromechanischer Spiegel für den tief-ultravioletten (DUV) und vakuum-ultravioletten (VUV) Spektralbereich mit einem Substrat und darauf abgeschiedener Aluminium-Schicht, die mit einer transparenten Vergütungsschicht überzogen ist.

2. Mikromechanischer Spiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der mikromechanische Spiegel im Spektralbereich von 140 bis 400 nm hochreflektiv ist.

3. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat aus Silicium besteht.

4. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Aluminium-Schicht eine Schichtdicke von 10 bis 1000 nm, insbesondere von 50 bis 200 nm besitzt.

5. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergütungsschicht aus einer Fluorid-Schicht, einer Oxid-Schicht und/oder deren Mischschichten besteht.

6. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergütungsschicht ausgewählt ist aus der Gruppe Lanthanfluorid (LaF₃), Aluminiumfluorid (AlF₃), Magnesiumfluorid (MgF₂), Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Siliciumoxid (SiO₂).

7. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vergütungsschicht eine Schichtdicke von 10 bis 200 nm, insbesondere von 20 bis 100 nm aufweist.

8. Mikromechanischer Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beschichtung aus der Aluminium-Schicht und der Vergütungsschicht lithographisch strukturierbar ist.

9. Verfahren zur Herstellung hochreflektiver beschichteter mikromechanischen Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem ein Substrat in einer Hochvakuum-Bedampfungskammer mit Aluminium und anschließend einer Vergütungsschicht aus einem Fluorid, Oxid oder deren Gemischen beschichtet wird.

10. Verwendung der hochreflektiv beschichteten mikromechanischen Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 8 zur Herstellung von Mikrosensoren, optischen Datenspeichern und/oder Video- und Datenprojektionsdisplays.

11. Verwendung der hochreflektiv beschichteten mikromechanischen Spiegel nach einem der Ansprüche 1 bis 8 für Lab-on-chip- und/oder Telekommunikationsanwendungen.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

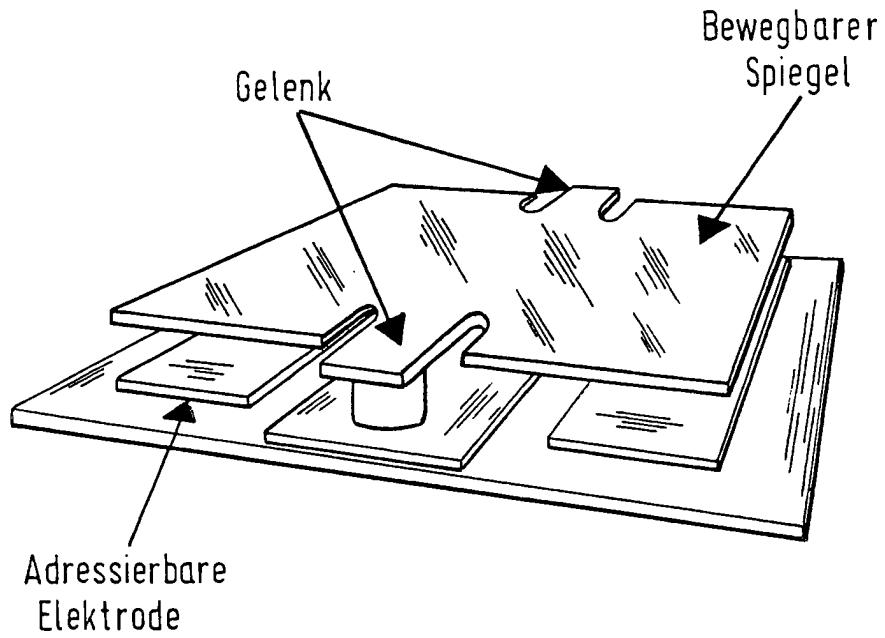


FIG. 2

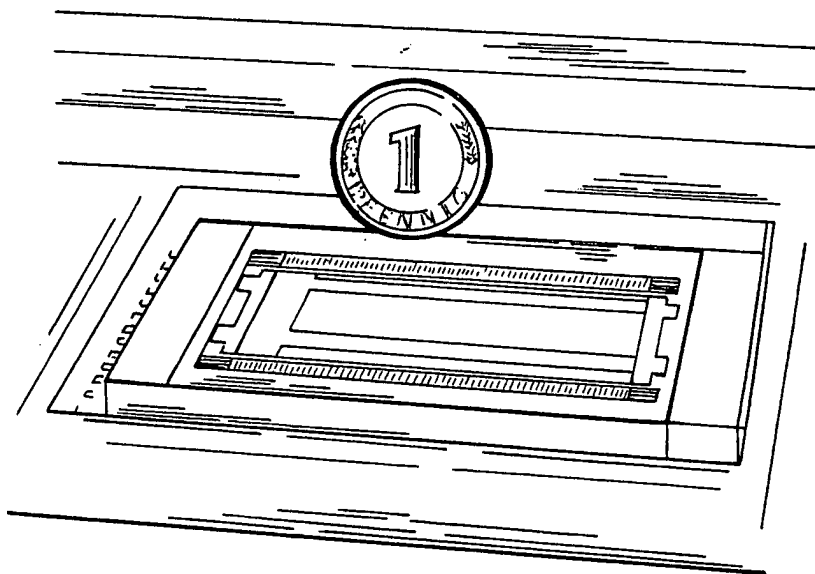


Fig. 3

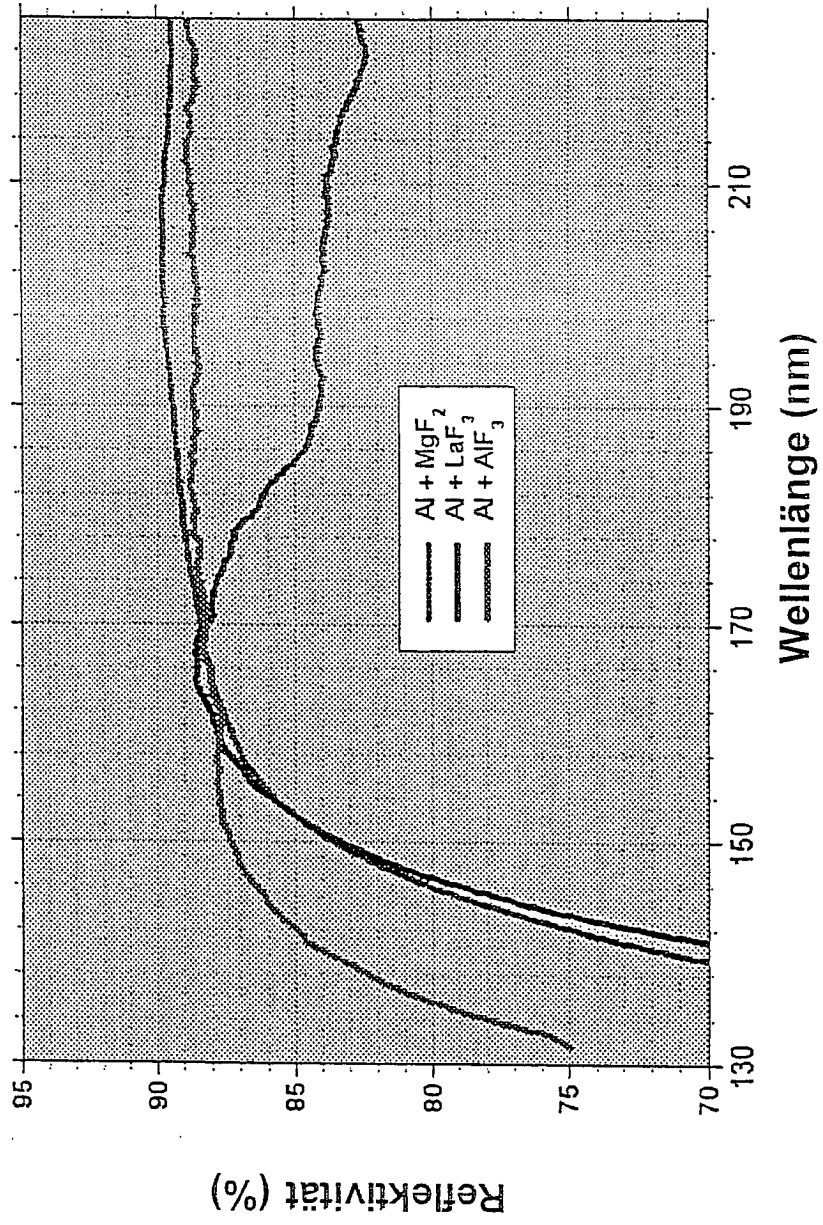


Fig. 4

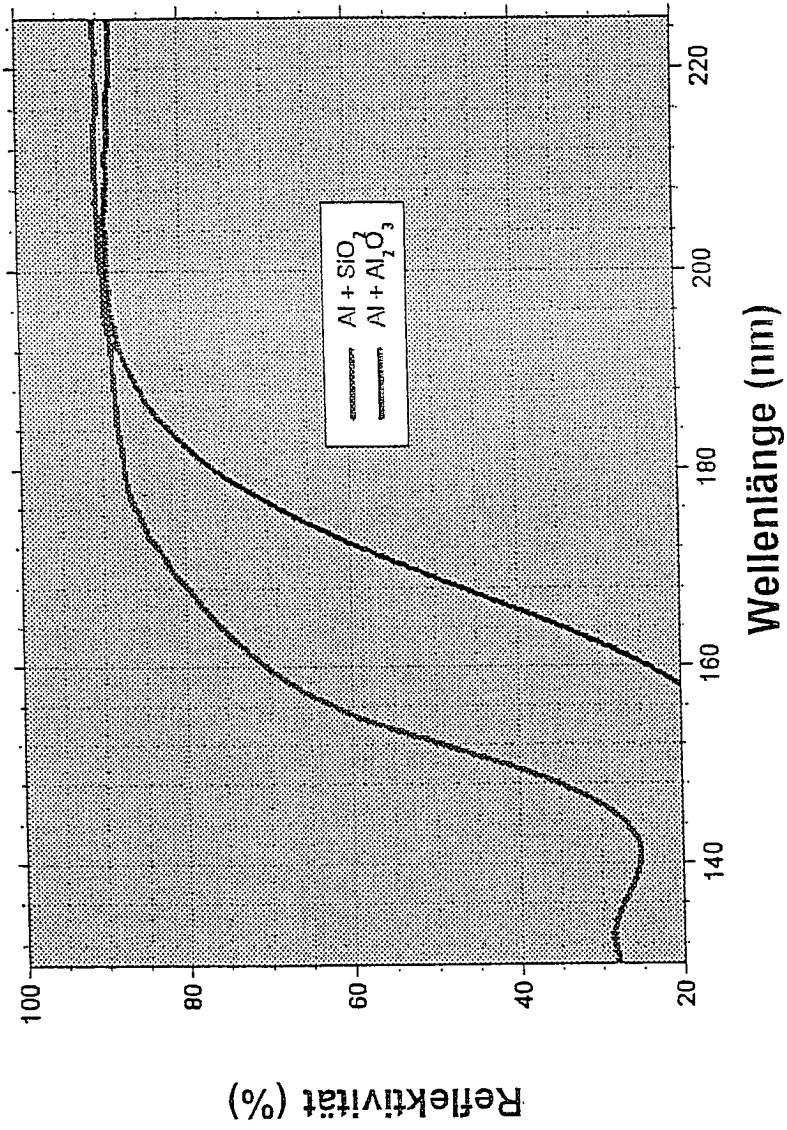


Fig. 5

