

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
24. August 2006 (24.08.2006)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2006/086806 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 1/11 (2006.01) H01L 23/64 (2006.01)
C03C 17/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2005/000050

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. Februar 2005 (16.02.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN [AT/AT];
Karlsplatz 13, A-1040 Wien (AT).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DARMO, Juraj
[SK/SK]; Tomankova 1, 841 05 Bratislava (SK). KRÖLL,
Josef [AT/AT]; Seitenberggasse 67/7/7, A-1160 Wien
(AT). UNTERRAINER, Karl [AT/AT]; Rudolf Kas-
par-Gasse 32/12, A-2511 Pfaffstätten (AT).

(74) Anwälte: KOPECKY, Helmut usw.; Wipplingerstrasse
32/22, A-1010 Wien (AT).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU,
ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,
PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

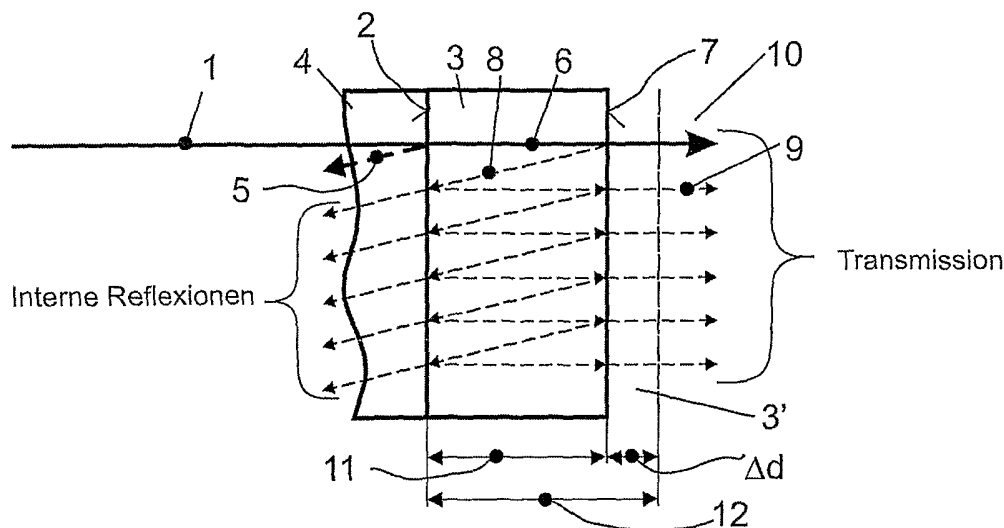
Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: TRANSPARENT BODY PROVIDED WITH AN ULTRAFINE METAL LAYER FOR ADAPTING IMPEDANCE
AND SUPPRESSING REFLECTIONS AND A METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

(54) Bezeichnung: TRANSPARENTER KÖRPER MIT EINER ULTRADÜNNEN METALLSCHICHT ZUR IMPEDANZAD-
APTION UND UNTERDRÜCKUNG VON REFLEXEN SOWIE VERFAHREN ZU DESSEN HERSTELLUNG



8 INTERNAL REFLECTIONS
9 TRANSMISSION

(57) Abstract: The inventive electromagnetic wave penetrable body (4) comprises an anti-reflection coating (3, 3') for electromag-
netic waves (1), in particular an optically useable body (4), wherein, in order to obtain an effectiveness for electromagnetic wave
having different wavelengths, said body is characterised in that the anti-reflection coating (3, 3') is formed by an ultrafine and elec-
tromagnetic wave-transparent metal coating.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2006/086806 A1



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Ein mit elektromagnetischen Wellen durchdringbarer Körper (4) mit einer Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') für die elektromagnetischen Wellen (1), insbesondere ein zur Verwendung in der Optik bestimmter Körper (4) ist zur Wirksamkeit für elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlängen dadurch gekennzeichnet, dass die Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') von einer ultradünnen und für die elektromagnetischen Wellen transparenten Metallbeschichtung gebildet ist.

TRANSPARENTER KÖRPER MIT EINER ULTRADÜNNEN METALLSCHICHT ZUR IMPEDANZADAPTION
UND UNTERDRÜCKUNG VON REFLEXEN SOWIE VERFAHREN ZU DESSEN HERSTELLUNG

Die Erfindung betrifft einen mit elektromagnetischen Wellen durchdringbaren Körper mit einer Anti-Reflexionsbeschichtung für die elektromagnetischen Wellen, insbesondere einen zur Verwendung in der Optik bestimmten Körper sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Körpers.

Die Entwicklungen im Bereich der Optik haben in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Speziell die Verfahren zur Messung optischer Eigenschaften und Identifizierung von Materialien ermöglichen immer genauere Analysen vom Bereich der Mikrowellen bis hin zu Röntgenstrahlen. Besonders die Entwicklungen von zeitaufgelösten Messmethoden ermöglichen zusätzlich, den Ablauf und die Dynamik von z.B. chemischen und physikalischen Reaktionen zu beobachten. Auf diesem Gebiet bietet derzeit die THz-TDS (X.C. Zhang, et al., „Terahertz transceivers and methods for emission and detection of terahertz pulses using such transceivers,“ U.S: Patent 6844552, 2005.; P.Y. Han, et al., „A Direct Comparison between Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Far-Infrared Fourier Transform Spectroscopy,“ J. Appl. Physics 89, 2357 (2201)) herausragende Eigenschaften. Aufgrund der großen Bandbreite und der im Gegensatz zu Röntgenstrahlung verschwindend kleinen Photonenenergie findet die Messmethode immer öfter Anwendung.

Ein großes Problem stellt aber noch immer das Auftreten von Reflexionen dar. Diese treten bei jedem Übergang auf, bei dem sich die Materialeigenschaften ändern. Normalerweise bewirkt eine solche Reflexion nur eine Abschwächung des Signals, da ein Teil davon in die entgegengesetzte Richtung zur elektromagnetischen Welle reflektiert wird. Trifft aber die reflektierte elektromagnetische Welle wiederum auf einen optischen Übergang, treten Probleme bei der Messung des Hauptsignals auf, da dieses jetzt mit allen Reflexionen gemeinsam detektiert wird.

Die meistbenutzte Methode einer Anti-Reflexionsbeschichtung an einem mit elektromagnetischen Wellen durchdringbaren Körper ist der Einsatz von dielektrischen, auf den Körper aufgetragenen Schichten, deren Dicke ein Viertel der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle beträgt. Dies bewirkt, dass die einfallende Welle zuerst am Eingangs-Interface des Körpers teilweise reflektiert wird. Der Anteil, der sich durch die Anti-Reflexionsschicht weiter fortpflanzt, wird ebenfalls am Ausgangs-Interface des Körpers teilweise reflektiert. Dieser reflektierte Anteil legt auf seinem Weg durch diese Schicht zurück zum Eingangs-Interface genau die halbe Wellenlänge zurück. Dies bewirkt eine

Phasendrehung um 180° relativ zur Erstreflexion, weshalb sich diese Anteile gegenseitig auslöschen.

Der Vorteil dieser Methode besteht in der einfachen Herstellung solcher dielektrischen Schichten, z.B. durch Aufdampfen. Der große Nachteil liegt aber in einem sehr engen Wirkungsbereich. Da die erforderliche Schichtdicke der Anti-Reflexionsbeschichtung direkt mit der Frequenz der elektromagnetischen Welle gekoppelt ist, kommt es nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich zu der gewünschten Wirkung. Zusätzlich ergeben sich auch Nachteile für Frequenzen, die unterhalb des sichtbaren Bereichs liegen. Aufgrund der größeren Wellenlängen erhöht sich auch die erforderliche Schichtdicke der Anti-Reflexionsbeschichtung. Dies führt unter Umständen dazu, dass die elektromagnetische Welle diese nicht mehr durchdringen kann.

Z.B. werden solche $\lambda/4$ -Schichten zum Entspiegeln von Brillen benützt. Aufgrund der oben beschriebenen Nachteile gelingt dies durch Aufbringen mehrerer Anti-Reflexionsschichten, um den ganzen sichtbaren Bereich abzudecken und keine Farbveränderungen zu erhalten

Obige Lösung für das Problem ist beschränkt auf Wellen nur einer bestimmten Frequenz. Für den Fall von zeitlich kurzen Pulsen ist keine geeignete Problemlösung bekannt. Besonders zeitaufgelöste Messmethoden, wie THz-TDS, machen von einem großen Teil des elektromagnetischen Spektrums Gebrauch. Dabei ist wesentlich, dass großes Augenmerk auf die Qualität der Pulsform gelegt wird, denn je kürzer ein Puls ist, desto breiter ist der Bereich, den der Puls im Spektrum abdeckt, und desto weniger Messungen müssen durchgeführt werden.

Treten nun, hervorgerufen durch Reflexionen, nach dem Hauptpuls weitere Pulse auf, so wird das gemessene Spektrum entsprechend nach dem Fourier-Theorem moduliert. Die Frequenz und Stärke dieser Modulation ergibt sich durch

$$p(t) + \sum_i k_i \cdot p(t - T_i) \xrightarrow{\text{Fourier-Transformation}} P(\omega) + \sum_i k_i \cdot P(\omega) \cdot e^{j\omega T_i}, \quad (1)$$

wobei $p(t)$ den Hauptpuls repräsentiert, k_i ist die relative Amplitude der Reflexion und T_i ist der Abstand der Reflexion zum Hauptpuls. Dies behindert die Interpretierung der Messdaten, da die für ein Material charakteristischen Absorptionslinien verzerrt werden. Für einwellige bzw. schmalbandige Signale gibt es Wege und Möglichkeiten, diese Reflexionen

zu unterdrücken, für Breitbandanwendungen steht jedoch eine erfolgreiche Lösung des Problems noch aus.

Die Erfindung bezweckt die Vermeidung der oben geschilderten Nachteile und Schwierigkeiten und stellt sich die Aufgabe, einen Körper der eingangs beschriebenen Art zu schaffen, dessen Anti-Reflexionsbeschichtung es ermöglicht, für elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlängen wirksam zu sein, wobei mit einer einzigen Schicht für die Anti-Reflexionsbeschichtung das Auslangen gefunden wird. Insbesondere sollen Reflexionen bei Breitbandanwendungen vermieden werden.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Anti-Reflexionsbeschichtung von einer ultradünnen und für die elektromagnetischen Wellen transparenten Metallbeschichtung gebildet ist.

Vorzugsweise ist die Schichtdicke der Antireflexionsbeschichtung wesentlich geringer als $\lambda/4$, wobei λ die Wellenlänge der kürzestwelligen, den Körper durchdringenden elektromagnetischen Welle ist.

Die Berechnung der Schichtdicke der Anti-Reflexionsbeschichtung erfolgt vorzugsweise nach folgender Formel:

$$d = \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0}, \quad (2)$$

wobei d die Dicke der Metallschicht, $\rho(d)$ den dickenabhängigen spezifischen Widerstand der Metallschicht, Δn den Brechungsindexsprung am optischen Übergang und Z_0 die Wellenimpedanz des freien Raumes darstellen. Letztere beträgt $377 \, \Omega$ und lässt aus

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

berechnen, wobei ε_0 die Permittivität und μ_0 die Permeabilität des freien Raumes sind. Es handelt sich dabei um Naturkonstanten.

Für die Anti-Reflexionsbeschichtung haben sich insbesondere Metalle wie Chrom, Aluminium, Titan oder auch Gold bewährt.

Für bestimmte Anwendungsbereiche hat es sich gezeigt, dass es vorteilhaft ist, wenn eine Zusatzschicht aus dem selben Metall wie die Anti-Reflexionsbeschichtung in der Dicke von bis zu 0,5 nm, vorzugsweise in der Dicke zwischen 0,1 bis 0,2 nm, vorgesehen ist, wobei diese Zusatzschicht nicht als eigene Schicht aufgebracht wird, sondern im Zuge der

Aufbringung der Anti-Reflexionsbeschichtung aufgebracht wird, und zwar auch aus dem selben Metall wie diese, sodass letztendlich kein Unterschied zwischen der Anti-Reflexionsbeschichtung und der Zusatzschicht zu erkennen ist und diese Schichten eine einzige Schicht bilden.

Zweckmäßig weist die Zusatzschicht eine Dicke =

$$\Delta d \approx (0,1 \text{ bis } 0,5 \text{ nm}) \cdot \frac{\text{Oberfläche der rauhen Schicht}}{\text{Oberfläche der idealen Schicht}} \text{ auf.}$$

Vorzugsweise erfolgt das Aufbringen der Anti-Reflexionsbeschichtung, gegebenenfalls mit Zusatzschicht, auf den Körper durch Aufdampfen. Das Aufdampfen erfolgt zweckmäßig unter Hochvakuum, vorzugsweise einem Mindestvakuum von 10^{-8} bar, insbesondere bei einem Hochvakuum von 10^{-9} bar.

Zur Erzielung einer sehr glatten und gleichmäßig dicken Aufdampfung erfolgt das Aufdampfen langsam, d.h. unter 0,1 nm/s, vorzugsweise bei 0,05 nm/s oder darunter.

Vorzugsweise wird für die Bemessung der Dicke der Zusatzschicht wie folgt vorgegangen:

$$\Delta d \approx (0,1 \text{ bis } 0,5 \text{ nm}) \cdot \frac{\text{Oberfläche der rauhen Schicht}}{\text{Oberfläche der idealen Schicht}} .$$

Die Erfindung ist nachstehend theoretisch und auch an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert. Fig. 1 zeigt eine Reflexion an einer Metallschicht, Fig. 2 den spezifischen Widerstand von Chrom in Abhängigkeit der Schichtdicke, Fig. 3 eine Ansicht einer Metallschicht stark vergrößert (Ausschnitt $1 \mu\text{m}^2$) und Fig. 4 theoretische und gemessene Werte einer Reflexion in Abhängigkeit der Schichtdicke einer Chrom-Schicht. Fig. 5 und Fig. 6 sind Diagramme zur Bestimmung der Schichtdicke.

Wie eingangs erwähnt, ist der Schlüssel gemäß dem Stand der Technik zu einer wirkungsvollen Anti-Reflexionsbeschichtung immer eine Phasendrehung um 180° , wodurch eine gegenseitige Auslöschung der reflektierten Wellen erzielt wird. Um dies zu bewirken, wird erfindungsgemäß ein ganz anderer Effekt genützt.

Dielektrische Materialien weisen einen fast rein realwertigen Brechungsindex $\underline{n} = n - j0$ auf. Dadurch ändert der elektrische Feldvektor bei Transmission und Reflexion nicht seine Phase. Die Formeln des Transmissions- und Reflexionskoeffizienten für einen optischen Übergang

von einem ersten Material zu einem zweiten Material zeigen dies klar durch ihre realwertigen Koeffizienten.

$$t = \frac{2 \cdot n_1}{n_1 + n_2}, \quad r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (3)$$

Im Gegensatz dazu haben elektrisch leitfähige Materialien einen Brechungsindex mit einem sehr hohen Imaginärteil $\underline{n} = n - jk$. Dieser verursacht, dass die Koeffizienten für Transmission und Reflexion

$$\underline{t} = \frac{2 \cdot \underline{n}_1}{\underline{n}_1 + \underline{n}_2} = t \cdot e^{i\varphi_t}, \quad \underline{r} = \frac{\underline{n}_1 - \underline{n}_2}{\underline{n}_1 + \underline{n}_2} = r \cdot e^{i\varphi_r} \quad (4)$$

neben ihrem Absolutwert noch eine Phase beinhalten. Um Einfluss auf die Eigenschaften des Beschichtungsmaterials nehmen zu können, wird der Parameter der Schichtdicke herangezogen. Durch geeignete Wahl der Dicke kann der Brechungsindex eingestellt werden und auch die Transparenz für elektromagnetische Wellen verbessert werden.

Trifft eine elektromagnetische Welle vom einem ersten Material auf eine solche leitfähige Schicht, geschieht folgendes (vgl. Fig. 1):

1. Die einfallende Welle 1 wird am Eingangs-Interface 2 mit einer ultradünnen Metallschicht 3, die auf einen optischen Körper 4 aufgedampft ist, reflektiert, was im folgenden als Hauptreflexion 5 bezeichnet wird. Höhe und Phase dieser kann mittels (4) bestimmt werden.
2. Der Anteil 6 der Welle 1, der in die Metallschicht 3, die eine metallische Anti-Reflexionsbeschichtung 3 bildet, eindringt, trifft auf den hinteren Übergang 7. Dort wird wieder ein Teil 8 der Welle 1 reflektiert und ein Teil 9 dringt in den dielektrischen Bereich 10 ein. Dies geschieht mehrere Male auf beiden Seiten 2 und 7 der metallischen Anti-Reflexionsbeschichtung 3.
3. Eine Phasenänderung des Signals geschieht an den Übergängen 2 und 7 der metallischen Anti-Reflexionsbeschichtung 3 zu den benachbarten Schichten 4 und 10. Das bedeutet, dass sich nach jeder Reflexion die Phase ändert.

4. Die Summe der transmittierten und reflektierten Teile des Signals ergeben durch Überlagerung die Gesamttransmission und Gesamtreflexion.
5. Durch den Brechungsindex der Anti-Reflexionsbeschichtung 3 löscht die Summe der innerhalb der Anti-Reflexionsbeschichtung 3 reflektierten Signale 8 die Hauptreflexion 5 aus.

Da die Amplitude und Phase der Teilreflexion von der Schichtdicke 11 des leitfähigen Materials, d.h. der Metallschicht 3, und dessen optischen Eigenschaften abhängt, kann für ein gegebenes Materialsystem (Dielektrikum 4 / Metallische Schicht 3 / Dielektrikum 10) die richtige Schichtdicke

$$d = \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0}, \quad (2)$$

wobei d die Dicke der Metallschicht, $\rho(d)$ den dickenabhängigen spezifischen Widerstand der Metallschicht, Δn den Brechungsindexsprung am optischen Übergang und Z_0 die Wellenimpedanz des freien Raumes darstellen. Letztere beträgt $377 \, \Omega$ und lässt sich aus

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

berechnen, wobei ε_0 die Permittivität und μ_0 die Permeabilität des freien Raumes sind. Es handelt sich dabei um Naturkonstante.

Der große Vorteil dieser Art der Anti-Reflexionsbeschichtung 3 liegt in der Frequenzunabhängigkeit des Effekts. Die Phasenänderungen um die resultierende Drehung um 180° der resultierenden Reflexion werden nicht durch Fortpflanzung innerhalb der Metallschicht 3, sondern an den Begrenzungsflächen 2 und 7 erreicht. Solange für den gewünschten Frequenzbereich im elektromagnetischen Spektrum die Eigenschaften des zu beschichtenden Materials, d.h. des optischen Körpers 4 und des eingesetzten metallischen Beschichtungsstoffes, konstant bleiben bzw. sich nur geringfügig ändern, solange bleibt auch der Anti-Reflexionseffekt erhalten.

Einen Nachteil, wie bei jeder anderen Art der Anti-Reflexionsbeschichtung, stellt die verminderte Transmission dar. Durch die elektrisch leitfähige Anti-Reflexionsbeschichtung 3 wird ein Teil der Leistung der elektromagnetischen Welle 1 absorbiert. Z.B. für ein Materialsystem Silizium/Chrom/Luft beträgt die Verminderung ca. 55%.

Ein wesentlicher Vorteil der Erfindung ist darin zu sehen, dass der für die Anti-Reflexionswirkung ausgenützte Effekt auf der elektrischen Leitfähigkeit der metallischen Anti-Reflexionsbeschichtung 3 beruht und nicht auf Eigenschaften des zu beschichtenden Körpers 4. Deshalb kann jeder elektrisch nichtleitfähige bzw. schwachleitfähige Körper 4 mit einer ultradünnen metallischen Anti-Reflexionsbeschichtung 3 überzogen werden. Im allgemeinen muss das Material der Anti-Reflexionsbeschichtung 3 folgende Bedingungen erfüllen:

1. Gute Benetzungsfähigkeit, damit die Anti-Reflexionsbeschichtung 3 auf dem zu beschichtenden Körper 4 verbleibt bzw. aufgebracht werden kann.
2. Langzeitstabilität der Materialeigenschaften.
3. Schneller Aufbau von durchgehenden und homogenen Schichten.

Als gutes Material für die Anti-Reflexionsbeschichtung 3 hat sich z.B. Chrom bewährt. Es erfüllt alle obigen Materialeigenschaften in hohem Maße. Zusätzlich bildet es schnell durchgehende Atomschichten (vgl. Fig. 3), und der hohe spezifische Widerstand (vgl. Fig. 2) führt dazu, dass die erforderlichen Schichten dicker sind und damit leichter mit einer hohen relativen Genauigkeit aufgedampft werden können.

Der hohe Schmelzpunkt von Chrom erlaubt eine Hochtemperaturanwendung und dadurch den Beschuss des optischen Körpers 4 auch mit Hochleistungslasern.

Bei der Anwendung in der Praxis hat es sich gezeigt, dass es nach einiger Zeit zu einer Verminderung der Leitfähigkeit der metallischen Anti-Reflexionsbeschichtung 3 gekommen ist. Um dies auszugleichen, wurde die Schichtdicke 12 der Anti-Reflexionsbeschichtung 3 geringfügig dicker gewählt, als sich durch die Formel (2) ergibt. Es wurde also eine Zusatzschicht 3' mit einer Dicke Δd von bis zu 0,5 nm, vorzugsweise einer Dicke Δd von 0,1 bis 0,2 nm, aufgebracht, jedoch im gleichen Aufbringungsverfahren und aus dem selben Material. Erstaunlicherweise hat sich gezeigt, dass bei einer solchen Anti-Reflexionsbeschichtung 3, die um die Zusatzschicht 3' dicker bemessen ist, nach einer anfänglichen Verminderung der Leitfähigkeit keine weitere Verminderung mehr eingetreten ist, sodass nach der Verminderung der Leitfähigkeit der mit einer Zusatzschicht 3' versehenen Anti-Reflexionsbeschichtung 3 diese die optimale elektrische Leitfähigkeit aufweist.

Es hat sich gezeigt, dass bei fast allen Metallen, die besonders gute Hafteigenschaften aufweisen, nach dem Beschichtungsprozess eine Verminderung der Leitfähigkeit nach einer bestimmten Betriebsdauer auftritt. Dieser Effekt wird erfindungsgemäß durch Aufdampfen einer dickeren als der berechneten Schicht kompensiert. Zu diesen Metallen zählen speziell Chrom, Titan und Aluminium. Diese Überkompensation soll im Mittel 0,1 bis 0,5 nm betragen. Dies setzt aber eine hohe Qualität (bzw. glatte Oberfläche) der Metallschicht voraus. Ist die Qualität aufgrund des Aufdampfprozesses schlechter, erhöht sich auch die zusätzliche Schichtdicke, da sich auch deren spezifischer Widerstand erhöht.

$$\rho(d_{\text{soll}}) = \rho(d_{\text{ist}} - \Delta d)$$

Dieser Faktor kann durch das Verhältnis von Oberfläche der glatten Schicht zur rauhen Schicht berücksichtigt werden und führt zur Näherungsformel zu Überkompensation von

$$\Delta d \approx (0,1 \text{ bis } 0,5 \text{ nm}) \cdot \frac{\text{Oberfläche der rauhen Schicht}}{\text{Oberfläche der idealen Schicht}} \quad .$$

Eine solche in der Frequenzdomäne breitbandige Anti-Reflexionsbeschichtung 3 kann sehr vielfältig eingesetzt werden. So reicht die Anwendung von der Mikrowellentechnik bis zum Infrarot für die Beschichtung von nichtleitfähigen bis schwach leitfähigen Materialien. Dazu zählen z.B. alle halbleitenden Stoffe, Keramiken, glasartige Materialien, usw. Speziell Probensubstrate, Linsen, Fenstermaterialien und andere optische Komponenten können durch diese Metallschicht 3 wesentlich zur Verbesserung der Messqualität beitragen.

Erfolgreich angewendet wurden die ultradünnen Metallschichten 3, 3' zur Reflexionsunterdrückung bisher für Probensubstrate aus Silizium (Si) und elektro-optische Sensoren aus Gallium-Phosphid (GaP) für die Messung von gepulster THz-Strahlung (0,1 bis 7 THz).

In Fig. 4 sind die simulierten und gemessenen Amplituden der relativen elektrischen Feldstärke von Transmission und Reflexion für das Material Silizium dargestellt. Die Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Werten lassen sich durch die Rauigkeit (vgl. Fig. 3) der Chromschicht und die Messungsgenauigkeit während des Beschichtungsprozesses erklären. Grundlage der Simulation war die gemessene Leitfähigkeit für die verschiedenen Schichtdicken. Zu der Leitfähigkeit tragen hauptsächlich die durchgehenden Atomlagen bei. Die effektive Leitfähigkeit, die auf eine elektromagnetische Welle wirkt, beinhaltet aber auch die lokalen Anhäufungen von Atomen. Dies bewirkt, dass bei geringen Schichtdicken eine elektromagnetische Welle eine höhere Leitfähigkeit fühlt und damit der Anti-Reflexionseffekt größer ist, als die Simulation vorhersagt.

Der Effekt funktioniert aufgrund durchgeführter Simulationen und Berechnungen auch im Mikrowellenbereich und auch für mittleres Infrarot, nur dass in diesem Frequenzbereich die Eigenschaften von Metallen nicht mehr als konstant angesehen werden können und der Effekt nur innerhalb einer gewissen Bandbreite auftritt.

Nachfolgend ist ein Beispiel für die Berechnung der Schichtdicke einer metallischen Schicht aus Chrom für das System Silizium/Chrom/Luft wiedergegeben:

Um die Berechnung der optimalen Schichtdicke für eine metallische Anti-Reflexionsbeschichtung 3 durchführen zu können, werden folgende Informationen benötigt:

1. Der Brechungsindex der beteiligten Materialien für den gewünschten Frequenzbereich.
2. Der spezifische Widerstand des einzusetzenden Metalls als Funktion der Schichtdicke. Da noch keine exakten mathematischen Berechnungsmethoden für dessen Bestimmung existieren, muss dieser experimentell bestimmt werden. Für Chrom ist dieser in Abbildung 1 dargestellt.
3. Die Formel zur Berechnung:

$$d = \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0}, \quad (2)$$

wobei d die Dicke der Metallschicht, $\rho(d)$ den dickenabhängigen spezifischen Widerstand der Metallschicht, Δn den Brechungsindexsprung am optischen Übergang und Z_0 die Wellenimpedanz des freien Raumes darstellen. Letztere beträgt $377 \, \Omega$ und lässt sich aus

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

berechnen, wobei ε_0 die Permittivität und μ_0 die Permeabilität des freien Raumes sind. Es handelt sich dabei um Naturkonstante.

Silizium hat im Bereich von 0,2 bis 10 THz einen konstanten Brechungsindex von ungefähr 3,4. Der Brechungsindex von Luft beträgt in guter Näherung 1. Daraus folgt ein Brechungsindexsprung Δn am optischen Übergang von 2,4.

Da die obige Formel nur in expliziter Form vorliegt und auf der linken und rechten Seite die Schichtdicke d vorkommt, besteht keine direkte Berechnungsmöglichkeit; es können jedoch folgende Methoden benutzt werden:

1. Die optimale Schichtdicke soll iterativ bestimmt werden. Dies bedeutet, es wird eine Schichtdicke einfach angenommen und mit einem Näherungsverfahren, wie z.B. nach Newton, der Endwert der Formel (also die optimale Schichtdicke) berechnet.
2. Schneller und einfacher geht man vor, indem die Formel für die Schichtdickenbestimmung umgeformt wird, um eine Fehler- bzw. Abweichungsfunktion zu erhalten, deren Nullpunkt graphisch bestimmt werden kann:

$$d = \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0} \Rightarrow f(d) = d - \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0} = d - \rho(d) \cdot \frac{2,4}{377\Omega}$$

Der Verlauf dieser Funktion für das Materialsystem Silizium/Chrom/Luft ist in Fig. 5 dargestellt; sie zeigt den Schichtdickenfehler für Chrom auf Silizium als Funktion der Chromschichtdicke d .

Es kann direkt die optimale Schichtdicke ermittelt werden. In dem Beispiel Chrom auf Silizium beträgt diese 8,1 nm. Auf diese einfache Weise lässt sich für jedes Materialsystem die richtige Schichtdicke bestimmen. Aufgrund einer anfänglich stattfindenden Verminderung der Leitfähigkeit werden erfindungsgemäß 0,2 nm addiert, was zum Endwert von 8,3 nm führt.

Eine weitere allgemein Methode zur Schichtdickenbestimmung der Anti-Reflexionsbeschichtung ist folgende:

Obige Formel lässt sich in den meisten Fällen benützen, wenn rein dielektrische bzw. ideale Materialien beschichtet werden sollen. Handelt es sich aber um verunreinigte bzw. schwach leitfähige Materialien, so kann die Genauigkeit der Berechnung durch Anwendung einer allgemeinen Berechnungsmethode verbessert werden.

Ausgehend von den allgemein gültigen Formeln für Transmission und Reflexion an einem optischen Übergang (sind bereits im Patenttext beinhaltet)

$$\underline{t} = \frac{2 \cdot n_1}{n_1 + n_2} = t \cdot e^{i\varphi_t} \quad \text{und} \quad \underline{r} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = r \cdot e^{i\varphi_r}, \quad (4)$$

kann die Amplitude der elektromagnetischen Welle der Transmission und Reflexion berechnet werden. Die Berechnung nützt den Umstand aus, dass die Metallschicht viel dünner ist als die Wellenlänge des Signals. Dadurch kann die Standardformel zur

Berechnung geometrischer Reihen angewendet werden, was die Berechnungszeit drastisch reduziert. Dies führt letztendlich zu den Formeln für die Transmission

$$\underline{E}_T = \underline{E}_1 \cdot \underline{t}_{M2} \cdot \underline{t}_{1M} \cdot \underline{t}_M \cdot \frac{1}{1 - \underline{r}_{M1} \cdot \underline{t}_M^2 \cdot \underline{r}_{M2}}$$

und Reflexion

$$\underline{E}_R = \underline{E}_1 \cdot \left(\underline{r}_{1M} + \underline{t}_{M1} \cdot \underline{t}_{1M} \cdot \underline{t}_M^2 \cdot \underline{r}_{M2} \cdot \frac{1}{1 - \underline{r}_{M1} \cdot \underline{t}_M^2 \cdot \underline{r}_{M2}} \right),$$

wobei $t_{x,y}$ und $r_{x,y}$ die komplexen Transmissions- und Reflexionskoeffizienten für einen Übergang vom Material x zu y sind, t_M ist der komplexe Transmissionskoeffizient der Metallschicht und E_I ist die elektrische Feldstärke der einfallenden em-Welle für eine gegebene Frequenz.

Möchte man nun die optimale Schichtdicke für ein gegebenes Materialsystem berechnen, so setzt man die schichtdickenabhängigen Koeffizienten $t_{x,y}$, t_M und $r_{x,y}$ ein und berechnet den Graphen für die Amplitude der Reflexion als Funktion der Schichtdicke. Wo diese den Wert 0 erreicht ist auch die optimale Schichtdicke erreicht (siehe Fig. 6).

Der Vorteil dieser Methode ist folgender: Da alle Materialparameter in der Formel beinhaltet sind, kann speziell auf das frequenzabhängige Verhalten aller beteiligten Materialien eingegangen werden. Zusätzlich erlaubt diese Berechnungsmethode eine sehr genaue Bestimmung für schwach leitfähige Materialien, da deren komplexer Brechungsindex komplett in die Berechnung eingeht.

Patentansprüche:

1. Mit elektromagnetischen Wellen durchdringbarer Körper (4) mit einer Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') für die elektromagnetischen Wellen (1), insbesondere ein zur Verwendung in der Optik bestimmter Körper (4), dadurch gekennzeichnet, dass die Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') von einer ultradünnen und für die elektromagnetischen Wellen transparenten Metallbeschichtung gebildet ist.

2. Körper nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtdicke (11, 12) der Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') wesentlich geringer ist als $\lambda/4$, wobei λ die Wellenlänge der kürzestwelligen den Körper (4) durchdringenden elektromagnetischen Welle (1) ist.

3. Körper nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtdicke (11) der Anti-Reflexionsbeschichtung (3) nach folgender Formel bemessen ist:

$$d = \rho(d) \cdot \frac{\Delta n}{Z_0}, \quad (2)$$

wobei d die Dicke der Metallschicht, $\rho(d)$ den dickenabhängigen spezifischen Widerstand der Metallschicht, Δn den Brechungsindexsprung am optischen Übergang und Z_0 die Wellenimpedanz des freien Raumes darstellen; letztere beträgt $377 \, \Omega$ und lässt sich aus

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

berechnen, wobei ε_0 die Permittivität und μ_0 die Permeabilität des freien Raumes sind.

4. Körper nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') von Cr, Al, Ti oder Au gebildet ist.

5. Körper nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass eine Zusatzschicht (3') aus dem selben Metall wie die Anti-Reflexionsbeschichtung (3) in der Dicke Δd von bis zu 0,5 nm, vorzugsweise in der Dicke Δd zwischen 0,1 bis 0,2 nm, vorgesehen ist.

6. Körper nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusatzschicht (3') eine Dicke $= \Delta d \approx (0,1 \text{ bis } 0,5 \text{ nm}) \cdot \frac{\text{Oberfläche der rauen Schicht}}{\text{Oberfläche der idealen Schicht}}$ aufweist.

7. Verfahren zum Herstellen eines Körpers nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Anti-Reflexionsbeschichtung (3), gegebenenfalls mit einer Zusatzschicht (3'), auf den Körper (4) aufgedampft wird.

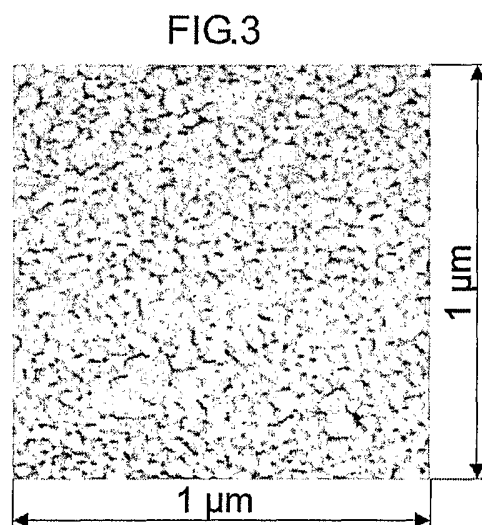
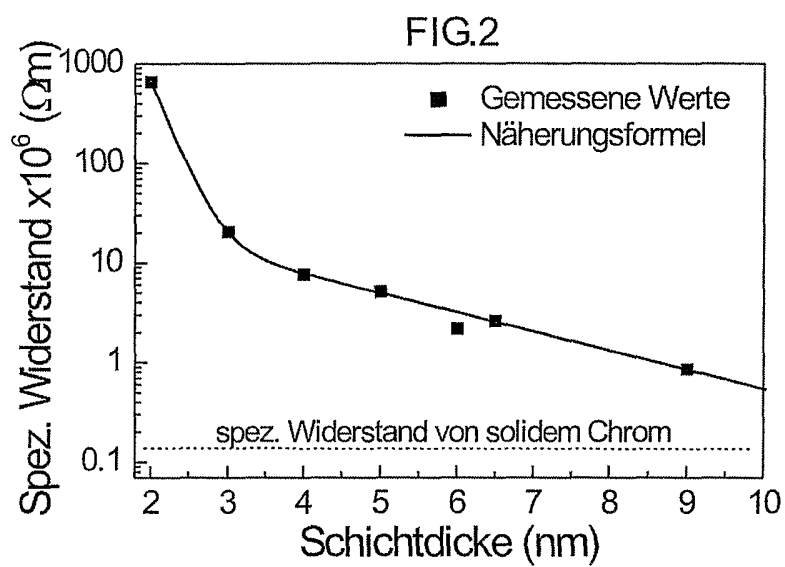
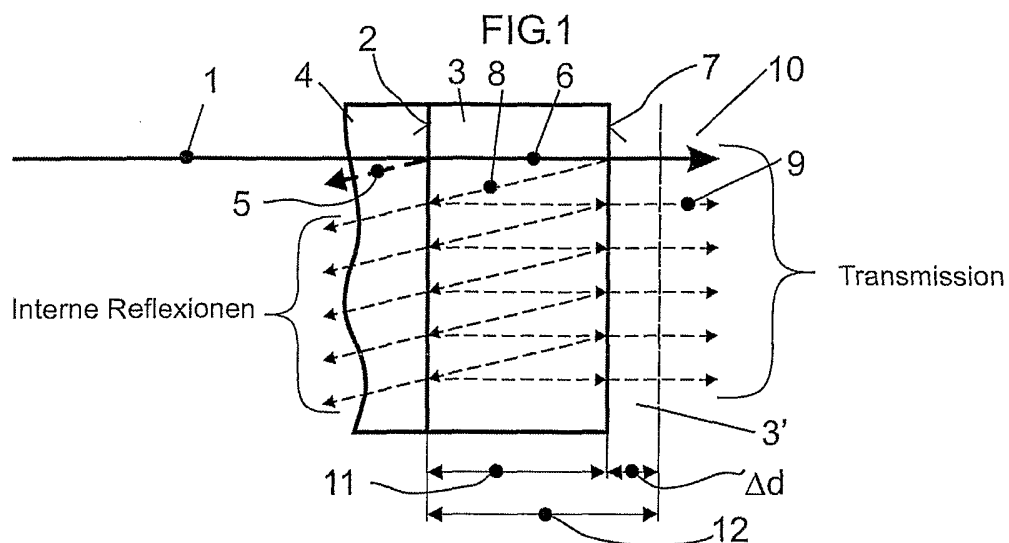
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die anti-Reflexionsbeschichtung (3, 3') unter Hochvakuum, vorzugsweise einem Mindestvakuum von 10^{-8} bar, insbesondere bei einem Hochvakuum von 10^{-9} bar, aufgedampft wird.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Aufdampfung langsam erfolgt, d.h. unter 0,1 nm/s, vorzugsweise bei 0,05 nm/s oder darunter.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass für die Bemessung der Dicke (Δd) der Zusatzschicht (3') wie folgt vorgegangen wird:

$$\Delta d \approx (0,1 \text{ bis } 0,5 \text{ nm}) \cdot \frac{\text{Oberfläche der rauen Schicht}}{\text{Oberfläche der idealen Schicht}}$$

1/2



2/2

FIG.4

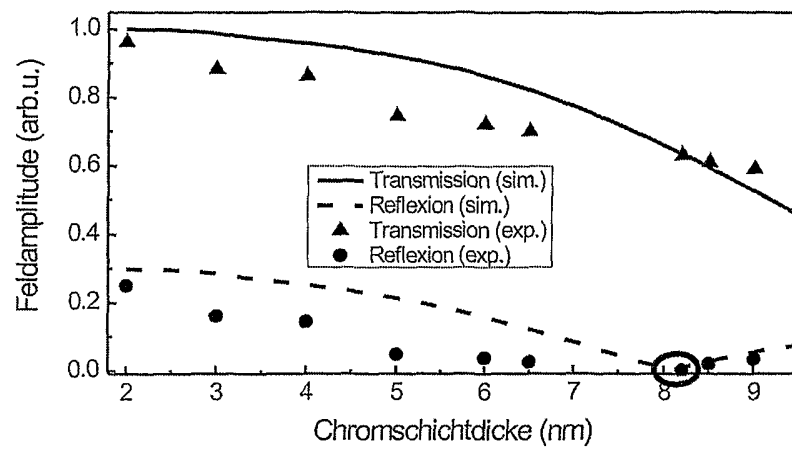


FIG.5

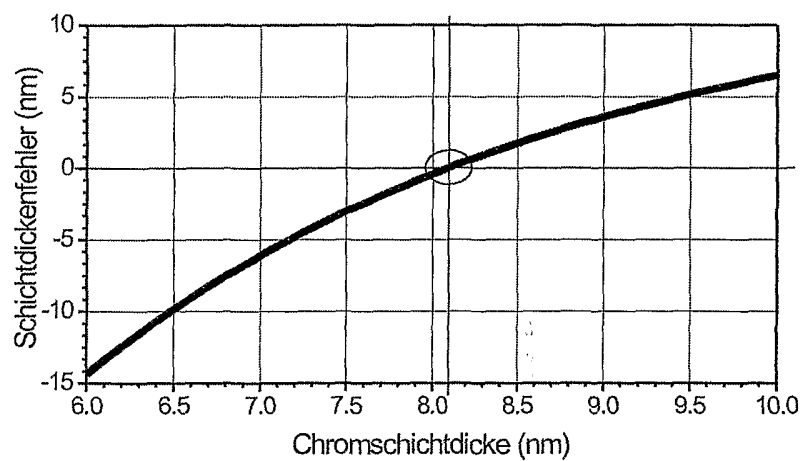
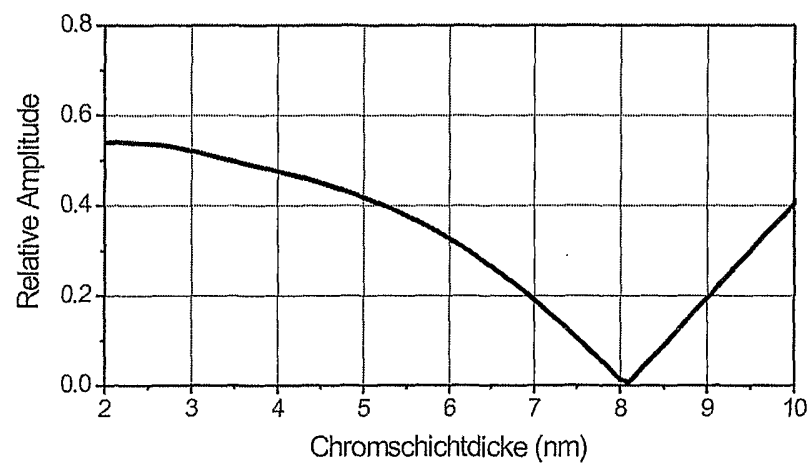


FIG.6



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/AT2005/000050

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G02B1/11 C03C17/00 H01L23/64

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G02B H01L C03C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	KROLL J ET AL: "Ultra-thin metallic layers studied by broadband terahertz time-domain spectroscopy" CONFERENCE DIGEST OF THE 2004 JOINT 29TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED AND MILLIMETER WAVES AND 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TERAHERTZ ELECTRONICS (IEEE CAT. NO.04EX857) IEEE PISCATAWAY, NJ, USA, 2004, pages 465-466, XP002329448 ISBN: 0-7803-8490-3 the whole document ----- -/--	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☐ Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *&* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 May 2005

Date of mailing of the international search report

09/06/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

von Hentig, R

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/AT2005/000050

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	KRÖLL J ET AL: "High-performance terahertz electro-optic detector" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 40, no. 12, 10 June 2004 (2004-06-10), pages 763-764, XP006022142 ISSN: 0013-5194 the whole document -----	1-6
X	KROLL J ET AL: "High resolution terahertz time-domain spectroscopy" INTERNATIONAL QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE (IQEC) 16-21 MAY 2004 SAN FRANCISCO, CA, USA, 21 May 2004 (2004-05-21), page 2 pp., XP002329449 International Quantum Electronics Conference (IQEC) (IEEE Cat. No.04CH37598) IEEE Piscataway, NJ, USA the whole document -----	1-3
X	KAZMERSKI L L ET AL: "Growth, environmental, and electrical properties of ultrathin metal films" Journal of Applied Physics USA, vol. 46, no. 2, February 1975 (1975-02), pages 791-795, XP002329450 ISSN: 0021-8979 page 791, left-hand column - page 793, left-hand column figures 1,2 -----	1-10

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/AT2005/000050

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 G02B1/11 C03C17/00 H01L23/64

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G02B H01L C03C

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie ^a	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	KROLL J ET AL: "Ultra-thin metallic layers studied by broadband terahertz time-domain spectroscopy" CONFERENCE DIGEST OF THE 2004 JOINT 29TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED AND MILLIMETER WAVES AND 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TERAHERTZ ELECTRONICS (IEEE CAT. NO.04EX857) IEEE PISCATAWAY, NJ, USA, 2004, Seiten 465-466, XP002329448 ISBN: 0-7803-8490-3 das ganze Dokument ----- -/--	1-10

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☐ Siehe Anhang Patentfamilie

^a Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

25. Mai 2005

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

09/06/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

von Hentig, R

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie ^a	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	KRÖLL J ET AL: "High-performance terahertz electro-optic detector" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, Bd. 40, Nr. 12, 10. Juni 2004 (2004-06-10), Seiten 763-764, XP006022142 ISSN: 0013-5194 das ganze Dokument -----	1-6
X	KROLL J ET AL: "High resolution terahertz time-domain spectroscopy" INTERNATIONAL QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE (IQEC) 16-21 MAY 2004 SAN FRANCISCO, CA, USA, 21. Mai 2004 (2004-05-21), Seite 2 pp., XP002329449 International Quantum Electronics Conference (IQEC) (IEEE Cat. No.04CH37598) IEEE Piscataway, NJ, USA das ganze Dokument -----	1-3
X	KAZMERSKI L L ET AL: "Growth, environmental, and electrical properties of ultrathin metal films" Journal of Applied Physics USA, Bd. 46, Nr. 2, Februar 1975 (1975-02), Seiten 791-795, XP002329450 ISSN: 0021-8979 Seite 791, linke Spalte - Seite 793, linke Spalte Abbildungen 1,2 -----	1-10