

(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
18. Juli 2019 (18.07.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2019/138119 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G02B 21/00 (2006.01) *G02F 1/11* (2006.01)
G01J 3/12 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/050868
- (22) Internationales Anmeldedatum:
15. Januar 2019 (15.01.2019)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2018 100 762.0
15. Januar 2018 (15.01.2018) DE
- (71) Anmelder: **LEICA MICROSYSTEMS CMS GMBH**
[DE/DE]; Ernst-Leitz-Str. 17 - 37, 35578 Wetzlar (DE).
- (72) Erfinder: **KREMER, Manuel**; Rohrbacher Strasse 106, 69181 Leimen (DE). **NEUGART, Felix**; Schwetzingener Platz 1, 68165 Mannheim (DE).
- (74) Anwalt: **SCHAUMBURG UND PARTNER PATENT-ANWÄLTE MBB**; Postbox 86 07 48, 81634 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,

(54) Title: ACOUSTO-OPTICAL DEVICE AND METHOD

(54) Bezeichnung: AKUSTOOPTISCHE VORRICHTUNG UND VERFAHREN

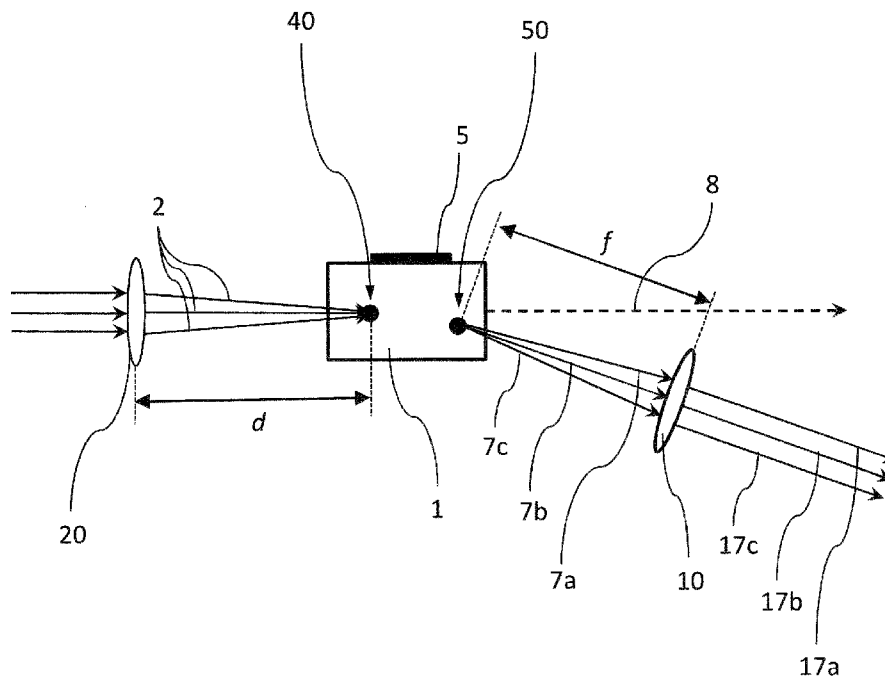


Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a device for reducing the chromatic spread angle of light (7) diffracted by an acousto-optical element (1), said device comprising an acousto-optical element (1), arranged in a beam path of an incident light beam (2), which produces the diffracted light from the incident light beam (2) that starts from a virtual interaction point (50) of the acousto-optical element (1), characterised in that the device comprises two focusing optics (10, 20), the first focusing optics (20) being arranged in the beam path upstream of the acousto-optical element (1) and the second focusing optics (10) being arranged in the diffracted light (7), and a focus (40) of the incident light beam (2) being located downstream of the first focusing optics (20) in the acousto-optical element (1), and the virtual interaction point (50) being in the front focal point of the second focusing optics (10).



WO 2019/138119 A1

SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von einem an einem akustooptischen Element (1) gebeugten Licht (7) umfassend ein akustooptisches Element (1) angeordnet in einem Strahlengang eines einfallenden Lichtstrahls (2), das das gebeugte Licht aus dem einfallenden Lichtstrahl (2) erzeugt, das von einem virtuellen Interaktionspunkt (50) des akustooptischen Elements (1) ausgeht, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung zwei fokussierende Optiken (10, 20) umfasst, wobei die erste fokussierende Optik (20) im Strahlengang vor dem akustooptischen Element (1) angeordnet ist und die zweite fokussierende Optik (10) im gebeugten Licht (7) angeordnet ist, und sich ein Fokus (40) des einfallenden Lichtstrahls (2) hinter der ersten fokussierenden Optik (20) im akustooptischen Element (1) befindet und der virtuelle Interaktionspunkt (50) im vorderen Brennpunkt der zweiten fokussierenden Optik (10) liegt.

Akustooptische Vorrichtung und Verfahren

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Lichtmikroskopie, insbesondere der Multiphotonenmikroskopie.

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von an einem akustooptischen Element gebeugten Licht umfassend das akustooptische Element und zwei fokussierende Optiken. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von an einem akustooptischen Element gebeugtem Licht.

Eine wesentliche Herausforderung in vielen Bereichen der Lichtmikroskopie ist, unabhängig vom eingesetzten Verfahren, die Bereitstellung von Anregungslicht mit einer oder mehreren vorgegebenen Wellenlängen. Je nach Art des Mikroskopieverfahrens und/oder nach Art der Probe können ein oder mehrere Anregungslichtstrahlen, welche in der Regel vorgegebene spektrale Eigenschaften aufweisen müssen, notwendig sein.

Beispielsweise ist es auf dem Gebiet der Fluoreszenzmikroskopie wichtig, Licht mit derjenigen Wellenlänge zu verwenden, die die Fluoreszenz anregt. Verschiedene Wellenlängen werden insbesondere dann gebraucht, wenn die Probe Fluoreszenzstoffe mit unterschiedlichen Anregungsspektren enthält.

Auf den Gebieten der Multiphotonenmikroskopie und der konfokalen Rastermikroskopie (Konfokalmikroskopie) ist es von besonderem Interesse, die Intensitäten für bestimmte Wellenlängen anzupassen oder bestimmte Wellenlängen ein- oder auszuschalten.

Zu diesem Zweck können wellenlängenselektive Elemente zum Einsatz kommen, welche auf dem akustooptischen Effekt basieren. Derartige akustooptische Elemente weisen in der Regel einen sogenannten akustooptischen Kristall auf, welcher mittels eines akustischen Signalgebers, auch als Wandler oder „Transducer“ bezeichnet, in Schwingung versetzt wird. In der Regel weist ein derartiger Wandler ein piezoelektrisches Material sowie zwei oder mehrere dieses Material kontaktierende Elektroden auf. Durch elektrisches Beschalten der Elektroden mit Hochfrequenzen, die typischerweise im Bereich zwischen 10 MHz und 10 GHz liegen, wird das piezoelektrische Material zum Schwingen angeregt, so dass eine akustische Welle entstehen

kann, die den Kristall durchläuft. Akustooptische Kristalle zeichnen sich dadurch aus, dass die entstehende Schallwelle die optischen Eigenschaften des Kristalls verändert. Insbesondere wird eine periodische Modulation des lokalen Brechungsindex erreicht. Diese Modulation wirkt wie ein (Bragg-)Gitter und kann Licht entsprechender Wellenlänge beugen.

5 Beispiele für solche akustooptischen Elemente sind akustooptische Modulatoren (AOM), akustooptische Deflektoren (AOD), akustooptische abstimmbare Filter (AOTF), akustooptische Strahlteiler (AOBS) und akustooptische Strahlvereiner (AOBM). Im Rahmen dieser Anmeldung ist unter einem AOM allgemein ein akustooptisches Element zu verstehen, das einfallendes Licht in Frequenz und/oder Ausbreitungsrichtung und/oder Intensität in Abhängigkeit von der in ihm
10 erzeugten Schallwelle beeinflusst bzw. moduliert. So stellt beispielsweise ein AOD eine spezielle Ausprägungsform eines AOM dar, die auf die Beeinflussung der Ausbreitungsrichtung spezialisiert ist, während ein AOTF ein AOM ist, das insbesondere die Filtereigenschaften des akustooptischen Modulators ausnutzt. Die relativ schnelle Modulierbarkeit der akustischen Welle zusammen mit den, verglichen mit anderen Methoden (beispielsweise über elektrooptische Effekte), geringen
15 Kosten, machen AOMs zum Standardwerkzeug für die Lichtmodulation in Laser-Raster-Mikroskopen.

Weit verbreitet sind AOMs in der Multiphotonenmikroskopie. Hierbei werden üblicherweise Femtosekundenlaser mit Wellenlängen im roten bis zum nahem infraroten Bereich verwendet (F. Helmchen und W. Denk, „Deep tissue two-photon microscopy“, Nature Methods 2, 932–940
20 (2005)). Typische Werte sind Wellenlängen zwischen 650 nm und 1300 nm, Pulslängen zwischen 50 fs und 200 fs, Pulsenergien von einigen 100 nJ bei Repetitionsraten in einer Größenordnung von 100 MHz und linearer Polarisierung.

Je nach Einsatzgebiet und Anforderungen können AOMs und allgemein akustooptische Elemente bzw. Akustooptiken auf unterschiedliche Parameter hin optimiert werden. Designparameter sind
25 unter anderem:

- Chromatische Kollinearität der plus/minus ersten Beugungsordnung (der sog. Nutzstrahlen)
- Beugungseffizienz

- spektrale Bandbreite (spektrale Breite) des effizient gebeugten Lichtes bei einer angelegten Radiofrequenz
- Winkelempfindlichkeit des Eingangsstrahls
- Frequenz- und Amplitudenbereich der Radiofrequenzen

5 Insbesondere die chromatische Kollinearität der plus/minus ersten Beugungsordnung (im Folgenden auch kurz ± 1 . Beugungsordnung), also die Kollinearität der Nutzstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge untereinander, ist für den Einsatz in der Multiphotonenmikroskopie von erhöhter Wichtigkeit. Anders ausgedrückt meint chromatische Kollinearität der ± 1 . Beugungsordnung im Rahmen dieser Anmeldung die Kollinearität der
10 gebeugten Strahlen der plus ersten Beugungsordnung, aber unterschiedlicher Wellenlänge, untereinander oder der minus ersten Beugungsordnung, aber unterschiedlicher Wellenlänge, untereinander. Diese Definition der chromatischen Kollinearität gilt äquivalent auch für höhere Beugungsordnungen (also allgemein $\pm n$. Beugungsordnung mit $n \geq 1$).

Wird ein AOM von einem Lichtpuls mit einer gegebenen Zentralwellenlänge λ und einer
15 spektralen Breite $\Delta\lambda$ getroffen, wird eine ± 1 . Beugungsordnung erzeugt, die üblicherweise als Nutzstrahl dient. Aufgrund der endlichen Beugungseffizienz lässt sich in der Regel auch noch die nullte Beugungsordnung nachweisen, die aber auf Grund der im Vergleich zur ± 1 . Beugungsordnung schlechten Modulierbarkeit durch den AOM typischerweise keine Verwendung findet.

20 Auf Grund der endlichen spektralen Bandbreite des Lichtpulses erfolgt eine Winkelaufspaltung der ± 1 . Beugungsordnung durch das akustooptische Element: Die verschiedenen Farbanteile des Lichtpulses werden durch das akustooptische Element in leicht unterschiedliche Richtungen gebeugt. Es liegt folglich keine chromatische Kollinearität der ± 1 . Beugungsordnung vor. Die Aussagen der vorherigen Absätze gelten äquivalent natürlich auch für höhere
25 Beugungsordnungen.

Die Größe dieser Auffächerung durch das akustooptische Element wird im Folgenden als „Chromatic Spread Angle“ (CSA) bezeichnet und ist definiert als die Ableitung des Beugungswinkels φ des gebeugten Lichts nach dessen Wellenlänge λ : $CSA = d\varphi / d\lambda$. Der CSA ist

also ein Maß für die Stärke der Abweichung von einer perfekten chromatischen Kollinearität innerhalb einer Beugungsordnung und er hat die Einheit mrad/nm. Je größer die spektrale Bandbreite des auf das akustooptische Element eingestrahlten Lichts, desto größer ist auch der Winkelbereich, in den Licht gebeugt wird (bei gleichbleibendem CSA). Somit wird ein Ausgleich
5 oder eine Reduzierung des CSA bei Licht mit einer großen spektralen Bandbreite für eine effiziente Nutzung des gebeugten Lichts besonders wünschenswert, da mit dem CSA auch dieser Winkelbereich verringert wird.

Für den Einsatz in der (Multiphotonen-)Mikroskopie ist ein zu großer CSA aus zwei Gründen problematisch: Erstens sorgen die unterschiedlichen Propagationsrichtungen der Farbanteile
10 eines Femtosekunden-Lichtpulses dafür, dass das Strahlprofil mit fortschreitender Propagation elliptisch wird und somit die Eintrittspupille des Anregungsobjektives nicht optimal ausgeleuchtet wird, was unter anderem zu einer verschlechterten Auflösung oder Verringerung der Leistung (bei Überleuchtung der Eintrittspupille) führt. Zweitens treffen die verschiedenen Farbanteile des Lichtpulses unter verschiedenen Winkeln auf die Eintrittspupille, was zur Folge hat, dass sie in der
15 Probe räumlich getrennt sind. Diese räumliche Trennung (man spricht auch von einem „räumlich gechirpten Lichtpuls“ oder „räumlichem Chirp“) reduziert, ebenso wie ein nicht gleichzeitiges Auftreffen der Farbanteile („zeitlicher Chirp“), die Spitzenintensität und damit die Effizienz der Mehrphotonenanregung.

Die Nachteile, die durch den ersten Punkt, die von der Propagationsstrecke abhängige Elliptizität
20 (bzw. den „räumlichen Chirp“) entstehen, lassen sich dem Stand der Technik nach ausgleichen, indem der virtuelle Interaktionspunkt des AOM durch eine geeignete Relayoptik in die Eintrittspupille des Objektives abgebildet wird und eine Elliptizität gar nicht erst entsteht. Im Rahmen dieser Anmeldung ist unter dem virtuellen Interaktionspunkt (Beugungspunkt) eines akustooptischen Elements, insbesondere eines AOMs, der Punkt zu verstehen, den man erhält,
25 wenn man die Strahlverläufe der aus dem akustooptischen Element ausgetretenen Strahlen entgegen der physikalischen Ausbreitungsrichtung des Lichts verlängert und deren Schnittpunkt bestimmt.

Insbesondere zur Lösung des zweiten Problems („zeitlicher Chirp“) werden im Stand der Technik

Prismen (S. Zeng et al., „Simultaneous compensation for spatial and temporal dispersion of acousto-optical deflectors for two-dimensional scanning with a single prism“, Opt. Lett. 31, 1091–1093 (2006)), Gitter oder weitere akustooptische Bauteile (Y. Kremer et al., „A spatio-temporally compensated acousto-optic scanner for two-photon microscopy providing large field of view“, Opt. Express 16, 10066–10076 (2008)) eingesetzt, die in geeigneten Anordnungen im Wesentlichen dafür sorgen, den durch den AOM entstehenden CSA wieder auszugleichen. Diese Ansätze sind jedoch entweder relativ teuer oder unflexibel (beispielsweise bei Änderungen der Laserwellenlänge).

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, eine kostengünstige und flexible Vorrichtung anzugeben, die den oben beschriebenen CSA des Lichts, das von einem akustooptischen Element, insbesondere eines AOM, gebeugt wurde, stark verringert, so dass qualitativ hochwertige Multiphotonenmikroskopie möglich ist. Ferner ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein entsprechendes Verfahren anzugeben.

Im Gegensatz zu den oben genannten Lösungsansätzen aus dem Stand der Technik, in denen durch geeignete optische Bauteile die spektralen Anteile eines Lichtstrahls bzw. Laserpulses in Ort und Richtung gegenüber dem akustooptischen Element kompensiert werden, wird in der vorliegenden Erfindung lediglich die Kollinearität der chromatischen Anteile am Ort der Objektivpupille sichergestellt. Diese werden dann probenseitig auf den gleichen Ort abgebildet.

Auf Basis dieses erfindungsgemäßen Ansatzes wurde eine technische Umsetzung nach Anspruch 1 für ein überraschend einfach aufgebautes und somit kostengünstig produzierbares Linsensystem gefunden, das flexibel mit einem akustooptischen Element zusammenarbeiten kann und hohen Qualitätsansprüchen bezüglich des Ausgleichens des CSAs des gebeugten Lichts genügt. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung.

Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung umfasst eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von an einem akustooptischen Element gebeugtem Licht das akustooptische Element, angeordnet im Strahlengang eines einfallenden Lichtstrahls, das das gebeugte Licht aus dem einfallenden Lichtstrahl erzeugt, das von einem virtuellen

Interaktionspunkt des akustooptischen Elements ausgeht, und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung des Weiteren zwei fokussierende Optiken umfasst, wobei die erste fokussierende Optik im Strahlengang vor dem akustooptischen Element angeordnet ist und die zweite fokussierende Optik im gebeugten Licht angeordnet ist, und sich ein Fokus des einfallenden Lichtstrahls hinter der ersten fokussierenden Optik im akustooptischen Element befindet und der virtuelle Interaktionspunkt im vorderen Brennpunkt der zweiten fokussierenden Optik liegt.

Prinzipiell ist eine Umsetzung der Erfindung mit möglichst kurzbrennweitigen Optiken zu bevorzugen, da dadurch der chromatische Parallelversatz verringert wird. Allerdings kann dies, abhängig vom Design des jeweiligen akustooptischen Elements, zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten reduzierten Beugungseffizienz führen: bei größer werdendem spezifischen Eintrittswinkels des einfallenden Lichts (Winkel zwischen optischer Achse und Strahlverlauf), beugt das akustooptische Element das einfallende Licht typischerweise ineffizient. In der Praxis muss daher unter Berücksichtigung des konkreten Anwendungsfalls ein Kompromiss zwischen Parallelversatz und Beugungseffizienz eingegangen werden.

Durch die zweite Optik hinter dem akustooptischen Element mit dem Abstand ihrer Brennweite zum virtuellen Interaktionspunkt propagieren die chromatischen Anteile (ein chromatischer Anteil meint hier das gebeugte Licht einer Wellenlänge) im Wesentlichen kollinear zueinander und zur optischen Achse. Da eine solche Anordnung allerdings die chromatischen Anteile bzw. den resultierenden Lichtstrahl fokussiert und mittelbar somit zu einer der Divergenz des resultierenden Lichtstrahls führt, ist eine erste Optik vor der Akustooptik erforderlich, die dieser Divergenz des Lichtstrahls entgegenwirkt. Die erste Optik vor dem akustooptischen Element sorgt durch eine Fokussierung des einfallenden Lichtstrahls dafür, dass das gebeugte Licht jeder Wellenlänge (also alle chromatischen Anteile), jeweils einen möglichst geringen Strahldurchmesser im akustooptischen Element besitzen.

Die erfindungsmäße Vorrichtung ist insbesondere im Fall eines gepulsten einfallenden Lichtstrahls mit besonders geringen Pulsdauern vorteilhaft einsetzbar, da bei kleiner werdenden Pulsdauern die spektrale Breite und somit der Winkelbereich, in den Licht gebeugt wird, größer wird. Eine Reduzierung des CSA wird also erforderlich oder zumindest wünschenswert.

Beispielhaft sei hier die Anwendung der Vorrichtung in einem Multiphotonenmikroskop beziehungsweise im Bereich der Multiphotonenmikroskopie genannt, die typischerweise Pulsdauern des benutzten Lichtes im Bereich weniger hundert Femtosekunden verwendet. Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung handelt es sich beim einfallenden Lichtstrahl folglich um gepulstes Licht, insbesondere aus einer gepulstes Licht emittierenden Laserlichtquelle

5 stammend (gepulste Laserlichtquelle, gepulster Laser, Pulslaser), mit einer Pulsdauer von höchstens 1000 fs (≤ 1000 fs), vorzugsweise höchstens 800 fs (≤ 800 fs), vorzugsweise höchstens 500 fs (≤ 500 fs), vorzugsweise höchstens 300 fs (≤ 300 fs), besonders vorzugsweise höchstens 200 fs (≤ 200 fs), und ganz besonders vorzugsweise höchstens 100 fs (≤ 100 fs).

10 Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung handelt es sich bei dem gebeugten Licht um gebeugtes Licht plus/minus erster Ordnung, da Licht dieser Ordnungen vorzugsweise für mikroskopische Zwecke verwendet wird.

Das Prinzip lässt sich beispielsweise mit Zylinderlinsen und/oder mit sphärischen Linsen umsetzen. Der Vorteil beim Einsatz von Zylinderlinsen liegt in geringeren Spitzenintensitäten (Maximalintensitäten) im Kristall und vor allem auf den Kristalloberflächen. Um die

15 Abbildungseigenschaften zu verbessern sind beispielsweise auch achromatische und/oder asphärische Linsen möglich. Auch mit gekrümmten Spiegeln lässt sich die beschriebene Erfindung umsetzen, wobei hier im Vergleich zum Einsatz von Standardlinsen die nicht auftretenden chromatischen Aberrationen von Vorteil sind. Solche Spiegel können in sphärischer Bauform oder

20 (zur Vermeidung von sphärischen Aberrationen) als Parabolspiegel ausgeprägt sein. Aus Geometrie Gründen bietet sich unter Umständen auch ein Parabolspiegel in „off-axis“ parabolischer (OAP) Bauform an. Allgemein können die verwendeten Optiken ein oder mehrere Linsen und/oder Spiegel und/oder weitere optische Elemente wie Filter oder Prismen beinhalten, wobei verschiedenste Kombinationen denkbar sind.

25 Folglich umfassen gemäß weiteren bevorzugten Umsetzungen der Erfindung die erste fokussierende Optik und/oder die zweite fokussierende Optik mindestens einen Spiegel und/oder mindestens eine Linse.

Gemäß einer besonders bevorzugten, da konstruktiv einfachen und kostengünstigen Umsetzung

der erfindungsgemäßen Vorrichtung besteht die erste fokussierende Optik und/oder die zweite fokussierende Optik aus einer Linse, insbesondere einer sphärischen Linse oder einer Zylinderlinse. Der Einsatz einer Zylinderlinse wird dadurch zweckmäßig, da der AOM die Rotationssymmetrie des Strahlverlaufs bricht, da er nur in einer Raumrichtung eine Aufspaltung
5 bewirkt. Im Fall, dass beide fokussierende Optiken durch einzelne Linsen umgesetzt werden, bestehen vorzugsweise die fokussierenden Optiken entweder beide aus sphärischen Linsen oder beide aus Zylinderlinsen. Dies stellt sicher, dass der Strahl nicht unnötig in einer Dimension fokussiert oder divergiert.

Wie bereits oben erwähnt, wird die Erfindung besonders bevorzugt unter Verwendung eines
10 akustooptischen Modulators (AOM) umgesetzt.

Wie oben dargelegt, eignet sich eine erfindungsgemäße Vorrichtung insbesondere für einen Einsatz in der Mikroskopie und dort im Bereich der Rastermikroskopie, insbesondere der Multiphotonenmikroskopie. Nach einem weiteren Aspekt der Erfindung beinhaltet also ein Mikroskop, insbesondere ein Multiphotonenmikroskop, eine Vorrichtung nach einem der
15 Ansprüche 1 bis 7.

Hierbei kann das Mikroskop (bzw. Mikroskopsystem) mit einer solchen Vorrichtung (beispielsweise ein Multiphotonenmikroskop) eine gepulstes Licht emittierende Laserlichtquelle zur Probenbeleuchtung umfassen, die den in die Vorrichtung eintretenden Lichtstrahl mit einer Pulsdauer von höchstens 1000 fs (also ≤ 1000 fs), vorzugsweise höchstens 800 fs (≤ 800 fs),
20 vorzugsweise höchstens 500 fs (≤ 500 fs), vorzugsweise höchstens 300 fs (≤ 300 fs), besonders vorzugsweise höchstens 200 fs (≤ 200 fs), und ganz besonders vorzugsweise höchstens 100 fs (≤ 100 fs) erzeugen kann. Die erfindungsgemäße Vorrichtung verringert den CSA von an dem akustooptischen Element der Vorrichtung gebeugten Licht, das aus dem einfallenden gepulsten Lichtstrahl erzeugt wird. In diesem Zusammenhang sei noch einmal angemerkt, dass die spektrale
25 Breite und somit der Winkelbereich, in den das Licht gebeugt wird, bei kleiner werdenden Pulsdauern größer wird, der Einsatz eines Mikroskops mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Reduzierung des CSA also bei geringen Pulsdauern besonders vorteilhaft ist.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles (CSA) von

gebeugtem Licht, dass durch ein akustooptisches Element gebeugt wurde, erfolgt vorzugsweise unter Verwendung einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7.

Ein auf dem Gebiet der vorliegenden Erfindung tätiger Fachmann wird, bei Kenntnis der oben beschriebenen Vorrichtungsmerkmale der erfindungsgemäßen Lösung, den
5 Vorrichtungsmerkmalen entsprechende Verfahrensschritte, vorzugsweise zum Verwenden der oben beschriebenen Vorrichtung, ausgestalten. Insoweit wird zur Vermeidung von Wiederholungen auf den vorangegangenen Teil der Beschreibung verwiesen.

Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, die Lehre der vorliegenden Erfindung in vorteilhafter Weise auszugestalten und weiterzubilden. Dazu ist einerseits auf die dem Patentanspruch 1
10 nachgeordneten Patentansprüche und andererseits auf die nachfolgende Erläuterung der Erfindung anhand der Zeichnungen zu verweisen. In Verbindung mit der Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen werden auch im Allgemeinen bevorzugte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Lehre erläutert.

Figur 1 zeigt schematisch den typischen Beleuchtungsstrahlengang eines Scanmikroskops.

15 Figur 2 zeigt schematisch den Beugungsvorgang an einem AOM.

Figur 3 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

Figur 4 zeigt schematisch und ausschnittsweise den Strahlverlauf bei Einsatz einer Zylinderlinse als zweite Optik.

Figur 1 zeigt in stark vereinfachter Form den typischen Beleuchtungsstrahlengang eines
20 Scanmikroskops, beispielsweise eines Multiphotonenmikroskops, mit einem akustooptischen Element 1, insbesondere einem AOM, als Strahlmodulationsmittel. Ausgehend von einer Lichtquelle 22, beispielsweise einem Laser, insbesondere einem Puls laser, gelangt ein einfallender Lichtstrahl 2, optional über eine Strahlführungs- und Anpassungsoptik 24, zum akustooptischen Element 1. Von dort gelangt das am akustooptischen Element 1 gebeugte Licht 7
25 über eine optionale Abbildungs- und Scanoptik 26 zum Objektiv 28 und schließlich zur Probe 30.

Figur 2 zeigt schematisch den Beugungsvorgang an einem AOM 1, der von einem einfallenden

Lichtstrahl 2 mit einer gegebenen Zentralwellenlänge λ und einer spektralen Breite $\Delta\lambda$ getroffen wird. An den Kristall des AOM 1 ist ein Transducer 5 angebracht, der eine Radiofrequenz (RF) in den Kristall einprägt. An dem dadurch entstehenden Gitter wird eine ± 1 . Beugungsordnung des gebeugten Lichts 7 erzeugt, die üblicherweise als Nutzstrahl dient. Aufgrund der endlichen Beugungseffizienz lässt sich in der Regel auch noch die nullte Beugungsordnung 8 nachweisen. Auf Grund der nicht perfekten chromatischen Kollinearität der ersten Beugungsordnung und der endlichen spektralen Bandbreite des einfallenden Lichtpulses 2 ist eine Winkelaufspaltung 9 der ersten ± 1 . Beugungsordnung gegeben, bei der die verschiedenen Farbanteile des Lichtpulses in leicht unterschiedliche Richtungen gebeugt werden. Exemplarisch ist dies für drei Teilstrahlen 7a, 7b, 7c mit drei verschiedenen Wellenlängen λ_1 , λ_2 und λ_3 gezeigt. Die Größe dieser Auffächerung des gebeugten Lichts wird über den Chromatic Spread Angle (CSA) in der Einheit mrad/nm angegeben. Diese gebeugten Teilstrahlen 7a, 7b, 7c gehen von einem virtuellen Interaktionspunkt 50 des AOM 1 aus, den man erhält, wenn man die Strahlverläufe entgegen der physikalischen Ausbreitungsrichtung verlängert und den Schnittpunkt bestimmt, ohne etwaige Brechungseffekte an dem Übergang zwischen Kristall des AOM 1 und dem Umgebungsmedium zu berücksichtigen.

Figur 3 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, bei der sich eine erste Optik 20 (beispielsweise eine einzelne Linse) vor einem AOM 1 und eine zweite Optik 10 (ebenfalls beispielsweise eine einzelne Linse) nach dem AOM 1 befindet. Die erste Optik 20 wird so positioniert, dass die von ihr fokussierten Lichtstrahlen des einfallenden Lichts 2 im AOM 1 in einem Fokus 40 im Abstand d von der ersten Optik 20 fokussiert werden, d.h. die Strahlverläufe der Lichtstrahlen des einfallenden Lichts 2 sich in einem Punkt im Kristall schneiden. (In der Zeichnung sind Brechungseffekte beim Übergang des Lichts vom umgebenen Medium in den Kristall der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt, diese sind allerdings natürlich bei der Platzierung der ersten Optik 20 zu berücksichtigen. Der Abstand d entspricht typischerweise nicht der Brennweite der Optik 20 im umgebenden Medium, bspw. in Luft.) Die zweite Optik 10 hinter dem AOM 1 wird so positioniert, dass die chromatischen Anteile der beispielsweise ± 1 . Beugungsordnung, beispielhaft gezeigt an den Teilstrahlen 7a, 7b, 7c, chromatisch kollinear zueinander verlaufen (chromatische Kollinearität). Diese chromatischen Teilstrahlen 7a, 7b, 7c gehen in die Teilstrahlen 17a, 17b, 17c über. Der so generierte kollimierte

Strahl (der die Teilstrahlen 17a, 17b, 17c beinhaltet) wird zur Probe 30 weitergeleitet. Der Abstand zwischen der zweiten Optik 10 und dem virtuellen Interaktionspunkt 50 entspricht folglich der Brennweite f der zweiten Optik 10. Die zweite Optik 10 dient hierbei zur Erreichung der chromatischen Kollinearität der ± 1 . Beugungsordnung und damit der Kollimierung des
5 gebeugten Lichts, während die erste Optik 20 unerwünschte Divergenzen der chromatischen Teilstrahlen 17a, 17b, 17c (siehe Figur 4) und des resultierenden Lichtstrahls bestmöglich ausgleicht oder zumindest diesen entgegenwirkt.

Figur 4 zeigt schematisch und ausschnittsweise den Strahlverlauf bei Einsatz einer Zylinderlinse als zweite Optik 10 im Detail, wobei in den Teilfiguren a) und b) die Anordnung aus zwei
10 Perspektiven dargestellt ist, die zueinander um 90° bezüglich der optischen Achse 3 gedreht sind. Die chromatischen Teilstrahlen 7a, 7b, 7c werden jeweils durch die Zylinderlinse 10 fokussiert, was zu unerwünschten Divergenzen der Teilstrahlen 17a, 17b, 17c und des resultierenden Lichtstrahls in einer Raumrichtung hinter der Zylinderlinse 10 führt (siehe Teilfigur a)). Diese Divergenzen werden bestmöglich durch die erste Optik 20 vor dem AOM 1 ausgeglichen, indem
15 diese erste Optik 20 durch die von ihr durchgeführte Fokussierung dafür sorgt, dass das gebeugte Licht jeder Wellenlänge (also die chromatischen Anteile), in Figur 3 beispielhaft dargestellt durch die Teilstrahlen 7a, 7b, 7c, jeweils für sich einen möglichst geringen Strahldurchmesser besitzt.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von an einem akustooptischen Element (1) gebeugten Licht (7)
- 5 umfassend
- das akustooptische Element (1),
- angeordnet in einem Strahlengang eines einfallenden Lichtstrahls (2),
- das das gebeugte Licht (7) aus dem einfallenden Lichtstrahl (2) erzeugt, das von einem virtuellen Interaktionspunkt (50) des akustooptischen Elements (1) ausgeht,
- 10 dadurch gekennzeichnet, dass
- die Vorrichtung zwei fokussierende Optiken (10, 20) umfasst,
- wobei die erste fokussierende Optik (20) im Strahlengang vor dem akustooptischen Element (1) angeordnet ist und die zweite fokussierende Optik (10) im gebeugten Licht (7) angeordnet ist
- 15 und
- sich ein Fokus (40) des einfallenden Lichtstrahls (2) hinter der ersten fokussierenden Optik (20) im akustooptischen Element (1) befindet und der virtuelle Interaktionspunkt (50) im vorderen Brennpunkt der zweiten fokussierenden Optik (10) liegt.
- 20 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der einfallende Lichtstrahl (2) ein gepulster Lichtstrahl, insbesondere aus einer gepulstes Licht emittierenden Laserlichtquelle, mit einer Pulsdauer ≤ 1000 fs, vorzugsweise ≤ 300 fs und besonders vorzugsweise ≤ 100 fs ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das gebeugte Licht (7) gebeugtes Licht plus/minus erster Ordnung ist.
- 25 4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) mindestens einen Spiegel umfasst.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) mindestens eine Linse umfasst.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) aus einer Linse, insbesondere einer sphärischen Linse oder einer Zylinderlinse, besteht.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem akustooptischen Element um einen akustooptischen Modulator handelt.
8. Mikroskop, insbesondere Multiphotonenmikroskop, beinhaltend eine Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7.
9. Mikroskop nach Anspruch 8, umfassend einer gepulstes Licht emittierenden Laserlichtquelle, wobei die Laserlichtquelle den einfallenden Lichtstrahl (2) mit einer Pulsdauer ≤ 1000 fs, vorzugsweise ≤ 300 fs und besonders vorzugsweise ≤ 100 fs zur Verfügung stellt.
10. Verfahren zur Reduzierung des Chromatic Spread Angles von an einem akustooptischen Element (1) gebeugtem Licht (7), vorzugsweise unter Verwendung einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei
- das akustooptische Element (1) im Strahlengang eines einfallenden Lichtstrahls (2) angeordnet ist und das gebeugte Licht (7) aus dem einfallenden Lichtstrahl (2) erzeugt wird, wobei das gebeugte Licht (7) von einem virtuellen Interaktionspunkt (50) des akustooptischen Elements (1) ausgeht,
- umfassend
- das Fokussieren des Lichtstrahls (2) durch eine erste fokussierende Optik (20) in einen Fokus (40), wobei sich der Fokus (40) im akustooptischen Element (1) befindet,

das Erzeugen von gebeugtem Licht (7) aus dem Lichtstrahl (2) durch das akustooptische Element (1), wobei das gebeugte Licht (7) von einem virtuellen Interaktionspunkt (50) des akustooptischen Elements (1) ausgeht,
das Durchlaufen des gebeugten Lichts (7) durch eine zweite fokussierende Optik (10),
5 wobei der virtuelle Interaktionspunkt (50) im vorderen Brennpunkt der zweiten fokussierenden Optik (10) liegt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der einfallende Lichtstrahl (2) ein gepulster Lichtstrahl, insbesondere aus einer gepulstes Licht emittierenden Laserlichtquelle, mit einer Pulsdauer ≤ 1000 fs, vorzugsweise ≤ 300 fs und besonders vorzugsweise ≤ 100 fs ist.

10 12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass das gebeugte Licht (7) gebeugtes Licht plus/minus erster Ordnung ist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) mindestens einen Spiegel umfasst.

15 14. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) mindestens eine Linse umfasst.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die erste fokussierende Optik (20) und/oder die zweite fokussierende Optik (10) aus einer Linse,
20 insbesondere einer Zylinderlinse, besteht.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem akustooptischen Element um einen akustooptischen Modulator handelt.

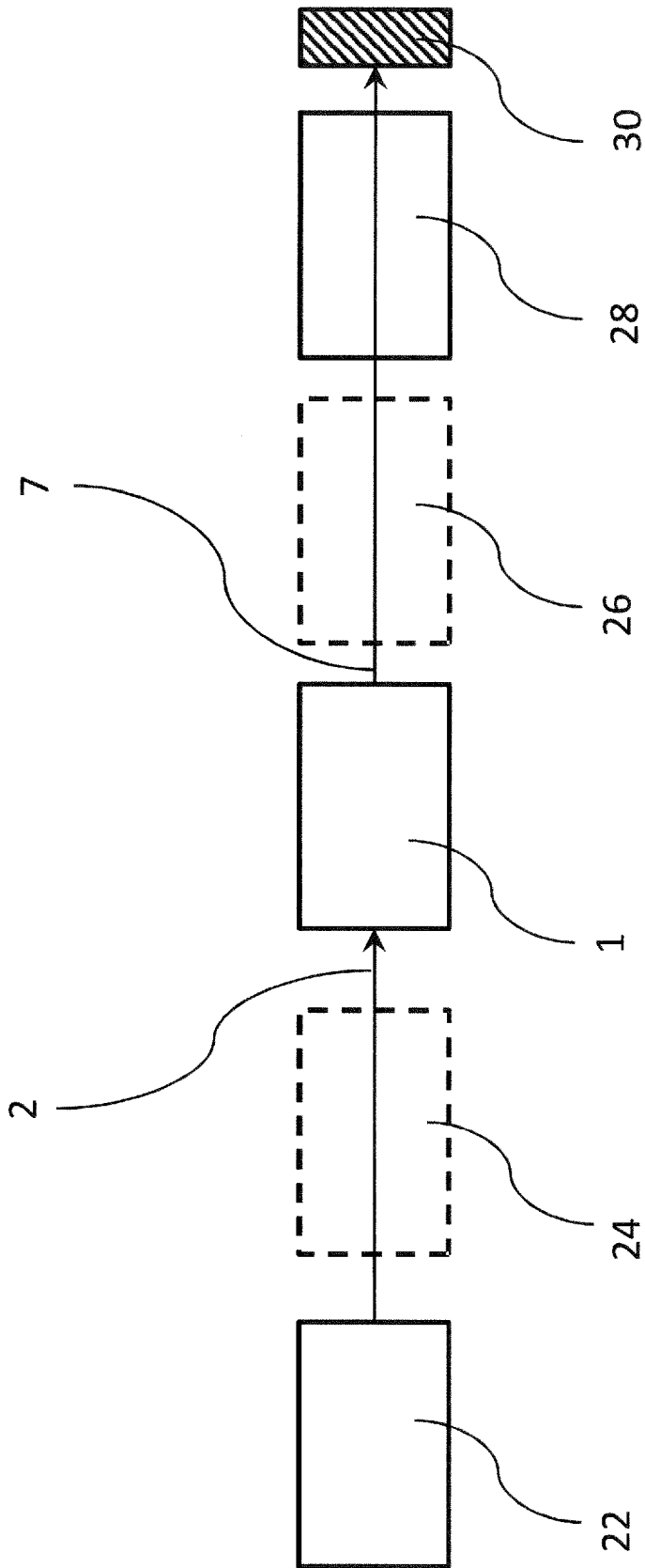


Fig. 1

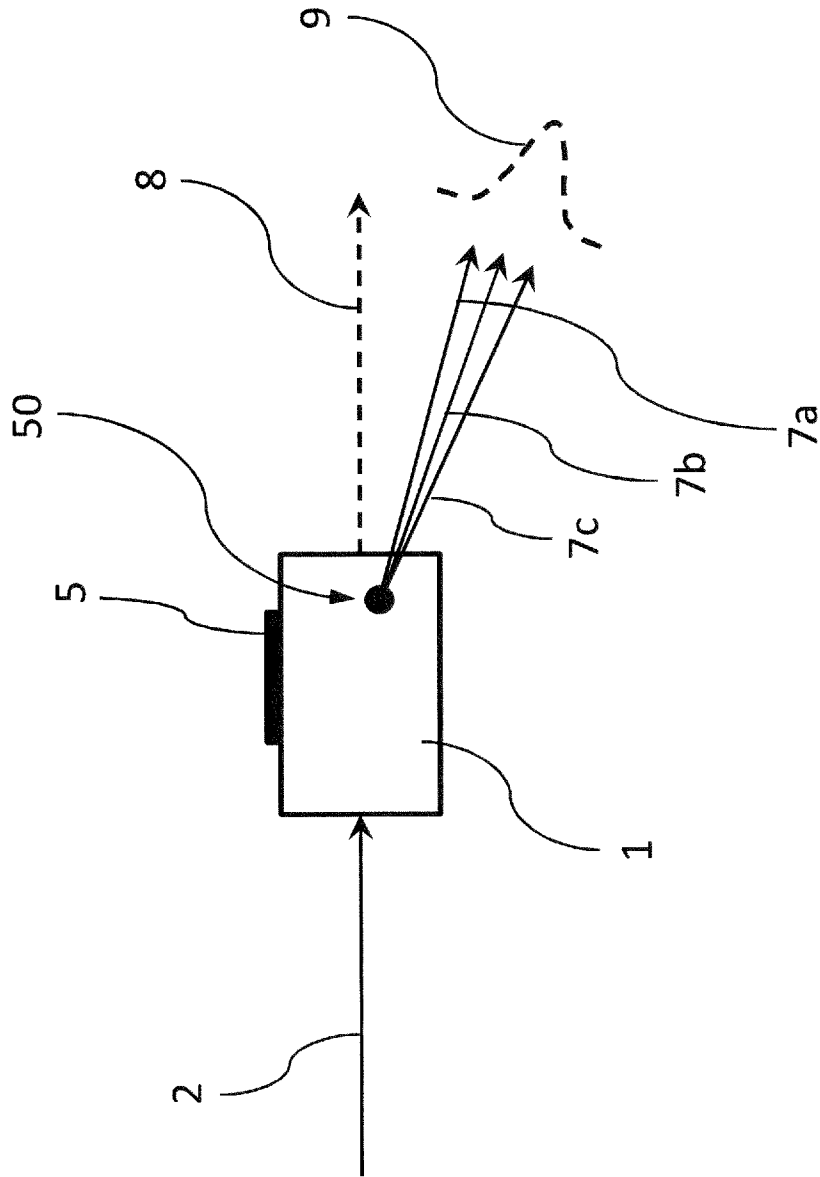


Fig. 2

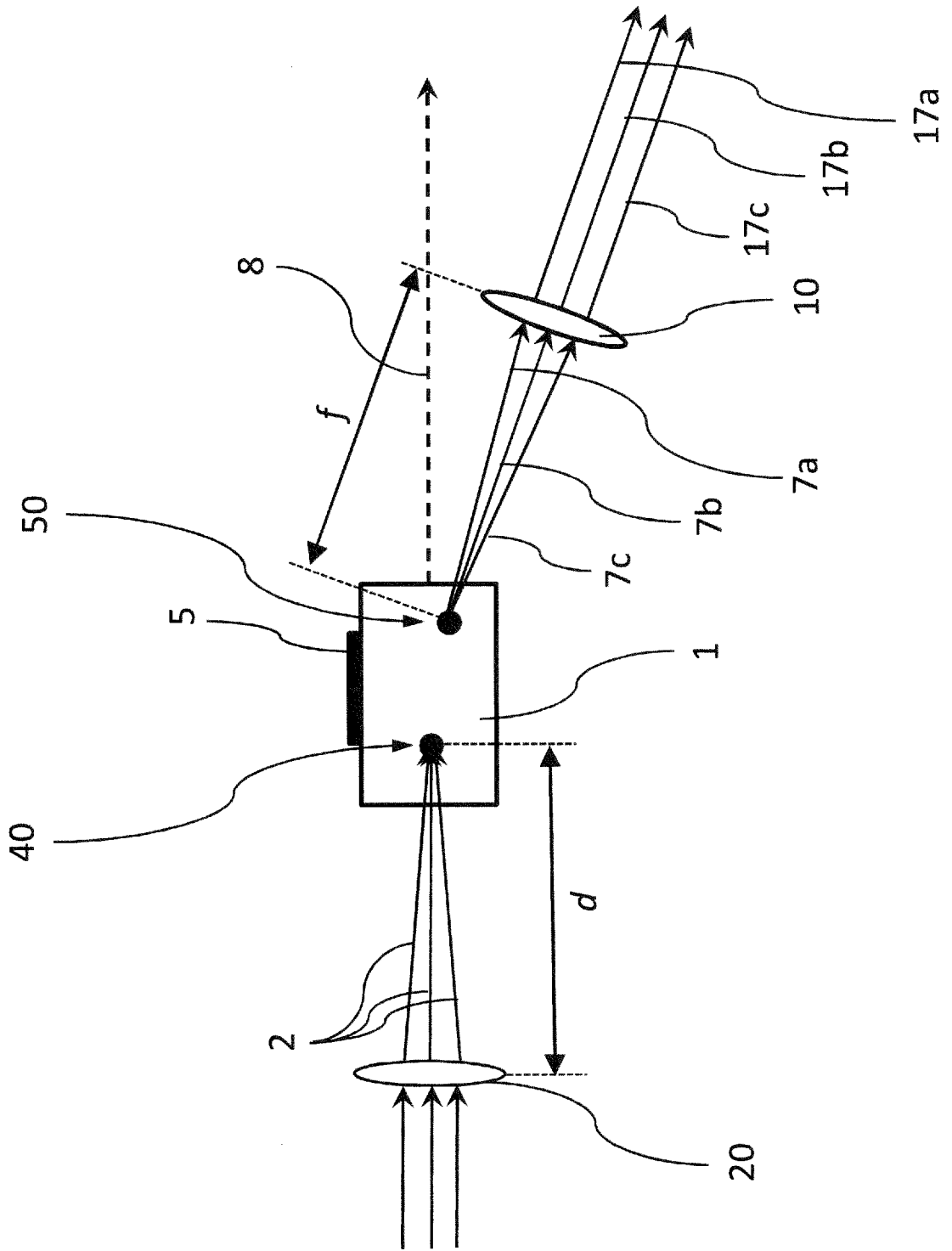


Fig. 3

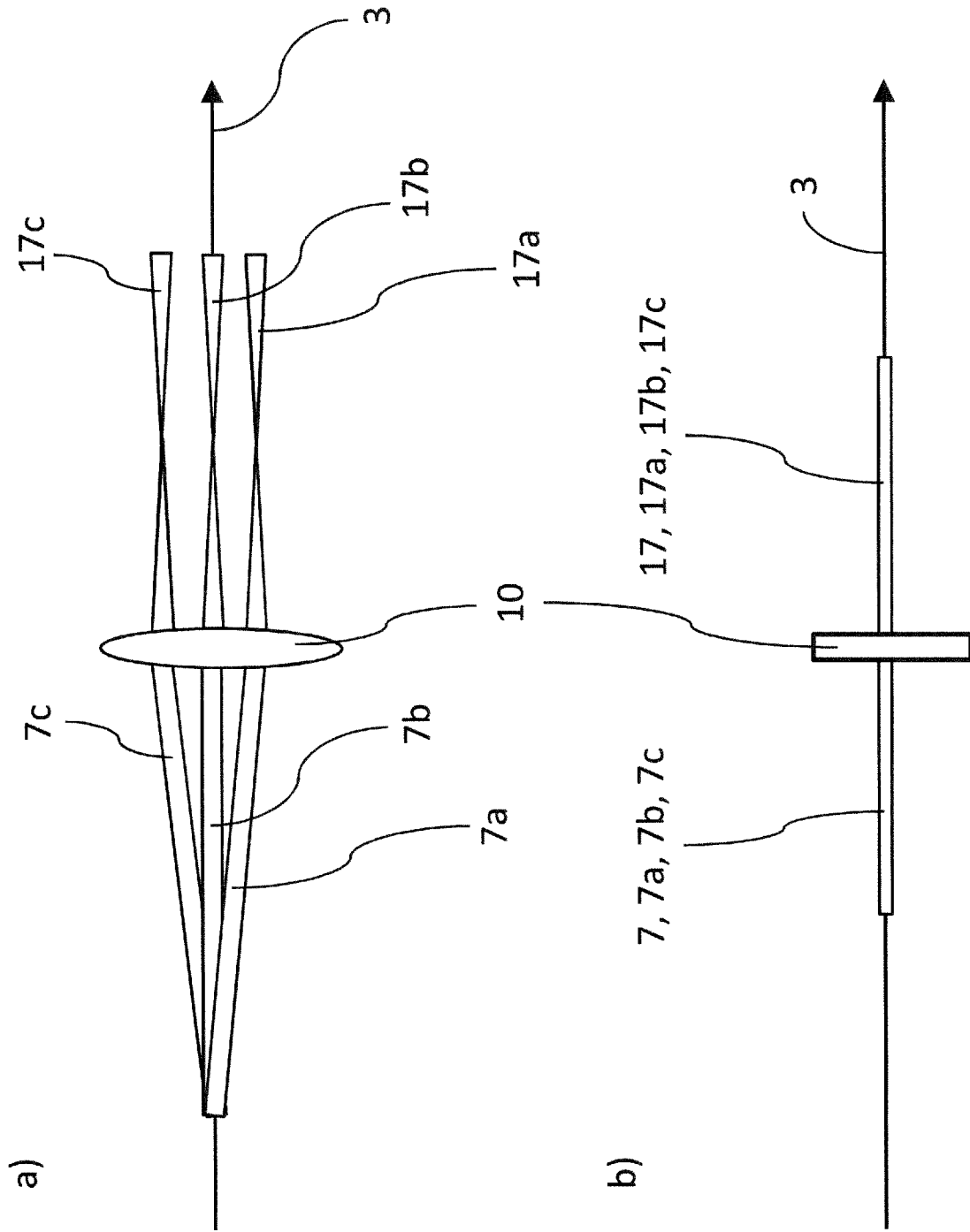


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/050868

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G02B 21/00</i> (2006.01)i; <i>G01J 3/12</i> (2006.01)i; <i>G02F 1/11</i> (2006.01)i 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) G02B; G02F; G01J 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 practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2003065850 A (SHIKOKU RESEARCH INST INC) 05 March 2003 (2003-03-05) abstract; figures 1,2	1-5,7,10-14,16
X	JP H01265131 A (HAMAMATSU PHOTONICS KK) 23 October 1989 (1989-10-23) abstract; figures 1,2	1,6,15
X	US 5694216 A (RIZA NABEEL A [US]) 02 December 1997 (1997-12-02) column 7, lines 54-66; figures 2C,2D, 4A-4F column 13 - column 15	1,8,9
A	CN 201017131 Y (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH [CN]) 06 February 2008 (2008-02-06) abstract; figure 11	8,9
A	US 4498770 A (CORWIN RICHARD R [US] ET AL) 12 February 1985 (1985-02-12) column 5, line 58 - column 7, line 40; figures 4-6	1
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family 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 application or patent 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 30 April 2019		Date of mailing of the international search report 14 May 2019
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Feeny, Orla Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/050868

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
JP	2003065850	A	05 March 2003	JP	5038562	B2	03 October 2012
				JP	2003065850	A	05 March 2003
JP	H01265131	A	23 October 1989	JP	2560077	B2	04 December 1996
				JP	H01265131	A	23 October 1989
US	5694216	A	02 December 1997	NONE			
CN	201017131	Y	06 February 2008	NONE			
US	4498770	A	12 February 1985	NONE			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G02B21/00 G01J3/12 G02F1/11 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G02B G02F G01J		
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, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	JP 2003 065850 A (SHIKOKU RESEARCH INST INC) 5. März 2003 (2003-03-05) Zusammenfassung; Abbildungen 1,2 -----	1-5,7, 10-14,16
X	JP H01 265131 A (HAMAMATSU PHOTONICS KK) 23. Oktober 1989 (1989-10-23) Zusammenfassung; Abbildungen 1,2 -----	1,6,15
X	US 5 694 216 A (RIZA NABEEL A [US]) 2. Dezember 1997 (1997-12-02) Spalte 7, Zeilen 54-66; Abbildungen 2C,2D, 4A-4F Spalte 13 - Spalte 15 -----	1,8,9
A	CN 201 017 131 Y (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH [CN]) 6. Februar 2008 (2008-02-06) Zusammenfassung; Abbildung 11 ----- -/--	8,9
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. 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 Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts	
30. April 2019	14/05/2019	
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Feeney, Orla	

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 4 498 770 A (CORWIN RICHARD R [US] ET AL) 12. Februar 1985 (1985-02-12) Spalte 5, Zeile 58 - Spalte 7, Zeile 40; Abbildungen 4-6 -----	1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/050868

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 2003065850 A	05-03-2003	JP 5038562 B2 JP 2003065850 A	03-10-2012 05-03-2003
JP H01265131 A	23-10-1989	JP 2560077 B2 JP H01265131 A	04-12-1996 23-10-1989
US 5694216 A	02-12-1997	KEINE	
CN 201017131 Y	06-02-2008	KEINE	
US 4498770 A	12-02-1985	KEINE	