



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 02 027 T2 2006.03.02**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 283 413 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 02 027.1**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 255 132.9**

(96) Europäischer Anmeldetag: **22.07.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.02.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **24.11.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **02.03.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G01J 3/44 (2006.01)**

A61B 1/00 (2006.01)

G02B 3/00 (2006.01)

G02B 23/24 (2006.01)

G01N 21/64 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

310917 P 08.08.2001 US

82870 25.02.2002 US

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(73) Patentinhaber:

Lucent Technologies Inc., Murray Hill, N.J., US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

Schnitzer, Mark J., New Jersey, US

(54) Bezeichnung: **Multi-Photonen-Endoskop**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

GEBIET DER ERFINDUNG

[0001] Diese Erfindung betrifft die optische Endoskopie.

ERÖRTERUNG DER VERWANDTEN TECHNIK

[0002] Multi-Photonen-Bilderzeugung nutzt nichtlineare optische Eigenschaften einer Probe, um ein Bild der Probe zu erzeugen. Eine Art von Multi-Photonen-Bilderzeugung ist die Zweiphotonen-Fluoreszenzmikroskopie, bei welcher abtastendes Licht auf Grund von Zweiphotonen-Absorptionsereignissen in der Probe Bereiche einer Probe zum Fluoreszieren bringt. Bei weiteren Arten von Multiphotonen-Bilderzeugung werden andere Multiphotonen-Verfahren verwendet, z. B. Dreiphotonen-Fluoreszenz, Erzeugung von zweiten oder dritten Oberwellen und Raman-Absorption, um Bilder zu erzeugen. Diese Multiphotonen-Verfahren ermöglichen, abgetastete Bilder von Proben zu erzeugen.

[0003] Auf nichtlinearen optischen Eigenschaften beruhende Bilderzeugungstechniken weisen mehrere gemeinsame Merkmale auf. Ein gemeinsames Merkmal besteht darin, dass die erzeugten Bilder von der chemischen Zusammensetzung der Probe abhängen. Somit ermöglichen die Bilder, Daten über die chemische Zusammensetzung einer Probe zu gewinnen, dies bedeutet Daten, die durch andere Bilderzeugungstechniken nicht verfügbar wären, die auf linearen optischen Prozessen beruhen. Ein weiteres gemeinsames Merkmal besteht in der Verwendung von Photonen geringerer Energie als in Bilderzeugungstechniken, die auf linearen optischen Prozessen beruhen. Photonen geringerer Energie werden verwendet, weil mehr als ein Photon die Anregungsenergie für die nichtlinearen optischen Verfahren bereitstellt. Die Photonen geringerer Energie haben längere Wellenlängen, die typischerweise besser in dichtes Probenmaterial eindringen, wie zum Beispiel biologisches Gewebe. Ein weiteres gemeinsames Merkmal besteht darin, dass die optischen Bilderzeugungsereignisse kleinere optische Querschnitte aufweisen, als diejenigen, die in Bilderzeugungstechniken verwendet werden, die auf linearen optischen Verfahren beruhen. Die kleineren optischen Querschnitte erfordern üblicherweise höhere Beleuchtungsintensitäten als die Bilderzeugungstechniken, die auf linearen optischen Verfahren beruhen. Für die höheren Beleuchtungsintensitäten benötigen nichtlineare optische Bilderzeugungssysteme typischerweise ultraschnell gepulste Laser, z. B. Laser, die mit Femtosekunden gepulst sind, oder Laser, die mit Picosekunden gepulst sind.

[0004] Die Pulse solcher ultraschnell gepulster Laserquellen unterliegen Qualitätsverlust durch Dispersion und nichtlineare optische Prozesse, welche in den Bilderzeugungsinstrumenten vorkommen. Dispersion und nichtlineare optische Prozesse erzeugen zeitliche und spektrale Veränderungen an optischen Pulsen. Diese Qualitätsverschlechternden Auswirkungen vermindern die Fähigkeit der Pulse, in einer Probe Multiphotonen-Ereignisse zu erzeugen. Obwohl Dispersion vorkompensiert werden kann, können nichtlineare optische Prozesse üblicherweise nicht vorkompensiert werden. Aus diesem Grund beeinträchtigen nichtlineare Prozesse Multiphotonen-Bilderzeugungstechniken und haben die Verwendung von optischen Endoskopen bei der Multiphotonen-Bilderzeugung behindert.

[0005] WO-A-98 38 907 beschreibt vorwärts gerichtete, optische Bilderzeugungssysteme. Die unterschiedlichen Systeme schließen vorwärts gerichtete Optische Kohärenz Tomografie (OCT, optical coherence tomography) und nichtretroreflektierende Vorwärtsabtastungs-OCT ein, und außerdem können interferometrische Bilderzeugungs- und Längenmesstechniken und fluoreszierende, Raman-, Zweiphotonen-, und diffuse Wellen-Bilderzeugung verwendet werden.

[0006] US-A-5,804,813 beschreibt konfokale Mikroskopsysteme. Bei diesen Systemen werden räumlich kohärente Lichtquellen, Fokussierungseinrichtungen mit großer numerischer Öffnung, und optische Detektoren verwendet, um die axiale Reaktion konfokaler Bilderzeugung zu erzeugen. Einige der Systeme stellen dreidimensionale Bilder von Profilen der Probenoberflächen zur Verfügung.

[0007] WO-A-94 07 142 beschreibt Verfahren, Zusammensetzungen und Geräte zum Durchführen sensitiver Erfassung von Analyten, indem ein Sondenmolekül mit einer aufwärts wandelnden Kennzeichnung markiert wird. Die aufwärts wandelnde Kennzeichnung absorbiert Strahlung einer Beleuchtungsquelle und sendet Strahlung aus, die eine oder zwei Frequenzen höher liegt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0008] Ein Verfahren und ein Gerät gemäß der Erfindung, so wie in den unabhängigen Ansprüchen aufgezeigt. Bevorzugte Ausführungsformen werden in den abhängigen Ansprüchen aufgezeigt.

[0009] Qualitätsverlust durch nichtlineare optische Prozesse mit optischen Monomodalen Fasern beeinträchtigt die Verwendung von optischen Pulsen bei Multiphotonen-Bilderzeugung. Um derartigen Qualitätsverlust zu vermeiden, werden in unterschiedlichen Ausführungsformen von Prüfköpfen Linsen mit abgestuften Brechungskoeffizienten (GRIN, graded

refractive index) verwendet, das bedeutet Linsen mit radial abgestuften Brechungskoeffizienten, um Beleuchtungslicht zu den Proben zu liefern. Die GRIN-Linsen weisen breitere Kerndurchmesser als die optischen Monomodens-Fasern auf. Die größeren Kerndurchmesser der GRIN-Linsen reduzieren Lichtintensitäten, so dass Querschnitte für nichtlineare optische Prozesse nicht so groß sind wie diejenigen in Prüfköpfen, die auf optischen Monomodens-Fasern oder Anordnungen von Monomodens-Fasern beruhen.

[0010] Gemäß einem Aspekt beinhaltet die Erfindung ein Gerät, welches eine gepulste Laserquelle, ein optisches Sammelement, einen endoskopischen Prüfkopf und einen Detektor enthält. Das optische Sammelement ist so ausgelegt, dass es von der gepulsten Laserquelle empfangenes Licht über eine optische Öffnung ausgibt. Der endoskopische Prüfkopf weist ein erstes und ein zweites Ende auf. Das erste Ende ist so angeordnet, dass es von der optischen Öffnung des optischen Sammelementes Beleuchtungslicht empfängt. Der Prüfkopf enthält eine zusammengesetzte GRIN-Linse, die so ausgelegt ist, dass sie das Beleuchtungslicht über eine Entfernung transportiert, die ungefähr gleich der Länge des Prüfkopfes ist. Der Detektor ist so ausgelegt, dass er Werte einer Eigenschaft von Licht misst, das von dem ersten Ende des Prüfkopfes als Reaktion auf das Beleuchtungslicht von der zusammengesetzten GRIN-Linse ausgesendet wird, wodurch Ereignisse in einer Probe verursacht werden. Der Detektor ist so ausgelegt, dass er ein Ausgabesignal für ein Bild der Probe ausgehend von den gemessenen Werten als Reaktion auf die Ereignisse erzeugt, welche Multiphotonen-Absorptionsereignisse sind. Die zusammengesetzte GRIN-Linse enthält eine GRIN-Relaislinse und eine GRIN-Objektivlinse, die seriell mit der GRIN-Relaislinse gekoppelt ist. Die GRIN-Objektivlinse weist einen kleineren Pitch als die GRIN-Relaislinse auf.

[0011] In einigen Ausführungsformen werden lange GRIN-Linsen, zum Beispiel länger als ein Zentimeter, verwendet. Diese GRIN-Linsen sind lang genug, um Beleuchtungslicht an einer Endseite zu empfangen, die außerhalb einer Probe liegt, und um Licht von einer zweiten Endseite auszusenden, die tief unter der Oberfläche der Probe liegt.

[0012] Die Erfindung beinhaltet ein Verfahren zum Abtasten eines Bereiches einer Probe mit einem endoskopischen Prüfkopf, welcher eine zusammengesetzte GRIN-Linse mit einer ersten und einer zweiten Endseite aufweist. Das Verfahren beinhaltet das Anordnen der ersten Endseite der GRIN-Linse in der Nähe des Gebietes der Probe und das Übertragen von gepulstem Laserlicht zu der zweiten Endseite der GRIN-Linse. Die Länge der GRIN-Linse entspricht ungefähr der Länge des Prüfkopfes. Das Verfahren

umfasst des Weiteren das Abtasten entweder einer Einfallsstellung oder eines Einfallswinkels des Lichtes an der zweiten Endseite der GRIN-Linse, während die Übertragung durchgeführt wird, um eine Abtastung des Gebietes der Probe zu erzeugen. Die zusammengesetzte GRIN-Linse enthält eine GRIN-Relaislinse und eine GRIN-Objektivlinse. Die GRIN-Objektivlinse ist seriell mit der GRIN-Relaislinse gekoppelt und weist einen kleineren Pitch als die GRIN-Relaislinse auf.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0013] [Fig. 1A](#) ist eine Querschnittsansicht eines endoskopischen Prüfkopfes mit einer GRIN-Linse, deren Länge kürzer als ein $\frac{1}{2}$ Pitch ist;

[0014] [Fig. 1B](#) ist eine Querschnittsansicht eines endoskopischen Prüfkopfes mit einer GRIN-Linse, deren Länge länger als ein $\frac{1}{2}$ Pitch ist;

[0015] [Fig. 1C](#) ist eine Querschnittsansicht eines endoskopischen Prüfkopfes mit einer zusammengesetzten GRIN-Linse;

[0016] [Fig. 1D](#) ist eine Querschnittsansicht eines alternativen endoskopischen Prüfkopfes mit einer zusammengesetzten GRIN-Linse;

[0017] [Fig. 1E](#) ist eine Querschnittsansicht eines endoskopischen Prüfkopfes mit einer zusammengesetzten GRIN-Linse und einem Prisma;

[0018] [Fig. 2A](#) zeigt, wie das Abtasten von einfallendem Licht über einer Seite eines endoskopischen Prüfkopfes eine Abtastung in einer Fokusebene erzeugt, die in einer Probe liegt;

[0019] [Fig. 2B](#) zeigt, wie das Drehen der Ausrichtung von einfallendem Licht auf einer Seite eines endoskopischen Prüfkopfes eine Abtastung in einer Fokusebene erzeugt, die in einer Probe liegt;

[0020] [Fig. 3](#) ist ein Blockdiagramm eines endoskopischen Multiphotonen-Bilderzeugungssystems; und

[0021] [Fig. 4](#) ist ein Ablaufdiagramm, welches ein Verfahren zum Erzeugen von Bildern einer Probe mit dem System von [Fig. 3](#) darstellt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0022] Unterschiedliche Ausführungsformen enthalten Prüfköpfe, die zum Eintauchen in eine Probe oder einen Körper ausgelegt sind, d. h. endoskopische Prüfköpfe. Die endoskopischen Prüfköpfe transportieren Licht, das verwendet wird, um die Probe zu beleuchten und abzutasten und das von der Probe ausgesendete Licht aufzunehmen. Das ausgesendete

Licht wird verwendet, um ein abgetastetes Bild eines Bereiches der Probe zu erzeugen.

[0023] [Fig. 1A](#) zeigt einen endoskopischen Prüfkopf **2**, welcher auf einer GRIN-Linse **4** beruht. Die GRIN-Linse **4** liefert dem Inneren der Probe **10** Laserlichtpulse. Die Laserlichtpulse stellen Beleuchtung zur Verfügung, um abgetastete Multiphotonen-Bilder der Probe **10** zu erzeugen. Die GRIN-Linse **4** weist einen zylinderförmigen Querschnitt und ein radial abgestuftes Brechungskoeffizientenprofil auf. Beispielhafte GRIN-Linsen **4** enthalten zylinderförmige Linsen mit Durchmessern in einem Bereich von ungefähr 0,125 Millimetern (mm) bis ungefähr 3 mm und optische GRIN-Fasern.

[0024] Die GRIN-Linse **4** weist ein Brechungskoeffizientenprofil auf, dessen radiale Veränderung Lichtstrahlen **5** beugt, die sich darin ausbreiten. Beispielhafte Brechungskoeffizientenprofile weisen parabolische oder hyperbolische Sekantenabhängigkeiten von der Entfernung der Achse der GRIN-Linse **4** auf.

[0025] Innerhalb der GRIN-Linse **4** folgen die Lichtstrahlen **5** einer fast sinusförmigen Bahn um die Mittelachse der GRIN-Linse.

[0026] In diesem Fall bezieht sich die Pitchlänge einer GRIN-Linse auf die Linsenlänge, so wie sie entlang der Linsenachse in vollen Perioden einer Strahlenstrecke in der GRIN-Linse gemessen wird. In einer GRIN-Linse mit einer Pitchlänge **1** erfährt der Durchmesser eines Lichtstrahls während der Ausbreitung durch die Linse zwei vollständige Oszillationen. Bei einer GRIN-Linse bedeutet der Pitch die Länge des Objektivmaterials, welches zwei vollständige Oszillationen in einer Breite eines Lichtstrahls erzeugen würde, und somit ist die Pitch-Länge die Länge in Pitch-Einheiten. Eine erste GRIN-Linse beugt Lichtstrahlen stärker als eine zweite GRIN-Linse, wenn die erste GRIN-Linse einen kürzeren Pitch aufweist als die zweite GRIN-Linse.

[0027] Unterschiedliche endoskopische Prüfköpfe verwenden Ausbreitungs- und Fokussierungseigenschaften von GRIN-Linsen, um unerwünschte, nicht-lineare Effekte auf transportierte Lichtpulse zu reduzieren. Die sinusförmige Veränderung eines Lichtstrahldurchmessers in einer GRIN-Linse weist insbesondere darauf hin, dass Lichtintensitäten entlang mindestens eines Teiles der Strahlenbahn schwächer sind, das bedeutet entlang von Bahnabschnitten, die von der Mittelachse der GRIN-Linse entfernt liegen. Weil nichtlineare Effekte höhere Lichtintensitäten erfordern, sind derartige Effekte in GRIN-Linsen weniger wahrscheinlich als in optischen Monomoden-Fasern, weil ein Abschnitt einer Strahlenbahn in einer GRIN-Linse typischerweise in einem Gebiet liegt, in welchem die Lichtintensitäten schwächer sind. Deswegen erzeugen nichtlineare Effekte typi-

scherweise weniger Veränderung an einer Pulsform in GRIN-Linsen als in optischen Monomoden-Fasern gleicher Länge.

[0028] Zur Verwendung des Prüfkopfes **2** wird ein optischer Beleuchtungsstrahl **3** in die GRIN-Linse **4** hinein fokussiert. Der Beleuchtungsstrahl **3** bildet in der Nähe oder an einer Endseite der GRIN-Linse **4** eine Fokustaille **6**, die außerhalb der Probe **10** liegt. Die GRIN-Linse **4** weist eine Länge auf, die geringfügig weniger als $\frac{1}{2}$ Pitch beträgt, so dass der endoskopische Prüfkopf einen Strahl **3'** aussendet, der eine zweite Fokustaille **8** in der Nähe einer anderen Endseite der GRIN-Linse **4** bildet. Die zweite Fokustaille **8** ist unterhalb der Oberfläche der Probe **10** und in einer Entfernung, f , von der Endseite der GRIN-Linse **4** angeordnet. Die Entfernung, f , definiert die Entfernung der Endseite der GRIN-Linse **4** von der Brennebene, die während der Multiphotonen-Bilderzeugung abgetastet wurde.

[0029] Als Reaktion auf Beleuchtung durch die GRIN-Linse **4** senden Punkte der Probe Licht aus. Ein Teil des ausgesendeten Lichtes wird durch die GRIN-Linse **4** aufgenommen, welche das Licht einer dichroitischen Platte **7** liefert. Die dichroitische Platte **7** überträgt Beleuchtungslicht und reflektiert Licht, das durch die Probe **10** ausgesendet wird. Auf diese Weise lenkt die dichroitische Platte **7** das Licht, welches die GRIN-Linse **4** von der Probe **10** aufnimmt, zu einem externen optischen Detektor **9** ab. Der Detektor **9** misst eine optische Eigenschaft des aufgenommenen, ausgesendeten Lichtes, beispielsweise die Intensität oder die Phase. Die gemessene Eigenschaft stellt Daten zum Herstellen eines abgetasteten Bildes des Bereiches der Probe **10** zur Verfügung, die das Licht ausgesendet hat.

[0030] Da Multiphotonen-Absorptionsereignisse hohe Lichtintensitäten erfordern, ist die Wahrscheinlichkeit solcher Ereignisse in Gebieten sehr gering, in denen Lichtintensitäten schwach sind. Für den endoskopischen Prüfkopf **2** sind Multiphotonen-Ereignisse in Gebieten der Probe **10** selten, die von den Fokustailen **6**, **8** entfernt liegen, d. h. von den Gebieten hoher relativer Lichtintensität. Infolgedessen verursachen Multiphotonen-Absorptionen eine Lichtemission von Bereichen der Probe **10**, die an dem Brennpunkt liegen. An dem Brennpunkt weist der Strahl eine Taille, w , und einen Rayleigh-Bereich, z , auf. Die Größen w und z bestimmen die jeweiligen Seiten- und Tiefenaufösungen bei der Multiphotonen-Bilderzeugung.

[0031] Beispielhafte GRIN-Linsen **4** weisen Längen L auf, die kürzer oder gleich $\frac{1}{2}$ Pitch sind. Die Länge L bestimmt, wie tief der endoskopische Prüfkopf **2** von [Fig. 1A](#) in die Probe **10** eingeführt werden kann. Typische $\frac{1}{2}$ Pitch-Linsen weisen Längen, L , mit Werten in dem Bereich von ungefähr 500 Mikron bis 5 Zentimetern auf. Vorzugsweise beträgt L ungefähr 1

Zentimeter oder mehr.

[0032] Eine GRIN-Linse, deren Pitch-Länge weniger als $\frac{1}{2}$ beträgt, weist keine internen Fokustailen auf, wo Lichtintensitäten auf Grund von fokussiertem Strahl relativ hoch werden würden. Infolgedessen bleiben bei einer GRIN-Linse mit einer Pitch-Länge von weniger als $\frac{1}{2}$ die internen Lichtintensitäten niedrig und unerwünschte, nichtlineare optische Effekte innerhalb der GRIN-Linse werden reduziert. Derartige Effekte könnten ansonsten die Qualität von optischen, durch die GRIN-Linse übertragenen Pulse beeinträchtigen und infolgedessen die Qualität von derartigen Pulsen für die Multiphotonen-Abtastung beeinträchtigen.

[0033] Bei einigen endoskopischen Prüfköpfen werden GRIN-Linsen mit längeren Pitch-Längen als $\frac{1}{2}$ verwendet. Diese endoskopischen Prüfköpfe sind in der Lage, Gebiete abzubilden, welche tiefer unter der Oberfläche einer Probe liegen, weil die GRIN-Linsen, welche das Beleuchtungslicht liefern, länger sind. Allerdings weisen die längeren GRIN-Linsen auch mindestens eine interne Fokustaille auf, das bedeutet, die innerhalb der GRIN-Linse liegt. Aufgrund der relativ verstärkten Lichtintensitäten sind Multiphotonen-Ereignisse an der internen Fokustaille wahrscheinlicher. Infolgedessen unterliegen Multiphotonen-Bilderzeugungssysteme, die auf längeren GRIN-Linsen beruhen, auf Grund von nichtlinearen optischen Effekten eher einer Pulsverbreiterung. Nichtsdestoweniger verursachen nichtlineare Effekte weniger Qualitätsverlust an Pulsen in den längeren GRIN-Linsen, als bei optischen Monomod-Fasern gleicher Länge, weil die Lichtintensitäten nur an internen Fokustailen in den GRIN-Linsen hoch sind. Bei optischen Monomod-Fasern sind die Lichtintensitäten entlang der gesamten Länge der Faser hoch. Das Verwenden einer GRIN-Linse anstatt einer optischen Monomod-Faser reduziert die Verbreiterung von Beleuchtungspulsen während der Lieferung der Pulse an die Probe **10**, die abgetastet werden soll.

[0034] Obwohl längere GRIN-Linsen einen kleinen Anstieg von unerwünschten nichtlinearen Effekten, wie beispielsweise Phasenselbstmodulation erzeugen, ermöglichen die längeren GRIN-Linsen die Herstellung von längeren endoskopischen Prüfköpfen. Beispielhafte GRIN-Linsen ergeben Endoskope mit Längen von 30 bis 200 Millimetern, ohne dass die kurzen optischen Pulse durch nichtlineare Prozesse bedeutenden Qualitätsverlust erfahren. Der Qualitätsverlust ist niedrig, weil die Multiphotonen-Effekte auf die Gegenden mit kurzen Fokustailen in den GRIN-Linsen begrenzt sind.

[0035] [Fig. 1B](#) zeigt einen längeren endoskopischen Prüfkopf **2'**, welcher auf einer GRIN-Linse **4'** mit einer Pitch-Länge von zwischen ungefähr 0,75 und 1 beruht. Die GRIN-Linse **4'** besteht entweder

aus einer zylinderförmigen GRIN-Linse oder aus einer optischen GRIN-Faser. Die GRIN-Linse **4'** weist eine interne Fokustaille **11** und eine externe Fokustaille **8'** auf, welche in der Probe **10** liegt. Weil die GRIN-Linse **4'** länger als die GRIN-Linse **4** von [Fig. 1A](#) ist, erzeugt die GRIN-Linse **4'** eine höhere chromatische Dispersion von den optischen Pulsen. Die chromatische Dispersion kann durch Techniken der Vorkompensation, welche den Fachleuten bekannt sind, reduziert werden.

[0036] Bei GRIN-Linsen verschwinden die oszillierenden Veränderungen im Strahlendurchmesser mit der Länge der GRIN. Infolgedessen nimmt die Fokussierungsfähigkeit in dem Maße ab, wie die Länge der GRIN-Linse ansteigt. Um derartigen Qualitätsverlust zu vermindern, werden bei einigen endoskopischen Prüfköpfen schwache GRIN-Linsen verwendet, d. h. GRIN-Linsen mit langen Pitches, beispielsweise zwischen ungefähr 1 Millimeter und 1 Dezimeter. Ein endoskopischer Prüfkopf, welcher auf einer schwachen GRIN-Linse beruht, kann lang sein und immer noch eine Länge aufweisen, die nur ein kleines Vielfaches von dem Pitch der GRIN-Linse aufweist. Ein derartiger endoskopischer Prüfkopf schließt wenige interne Fokustailen ein, bei denen Pulsqualitätsverlust vorkommt. Nichtsdestoweniger weisen diese schwachen GRIN-Linsen außerdem lange Rayleigh-Bereiche und Brenntiefen auf. Die langen Brennweiten und Rayleigh-Bereiche reduzieren die maximal erreichbaren Lichtintensitäten an externen Fokustailen und die Tiefentrennschärfe von Bildern, d. h. die Möglichkeit, optisch unterteilte Bilder herzustellen. Lange Brennweiten sind außerdem bei Bilderzeugung von Probengebieten unerwünscht, die in der Nähe des Endes der GRIN-Linse liegen, d. h. innerhalb weniger Hundert Mikron.

[0037] [Fig. 1C](#) zeigt einen endoskopischen Prüfkopf **2''**, für welchen eine zusammengesetzte GRIN-Linse verwendet wird, um einige der Probleme zu meistern, die mit schwachen GRIN-Linsen zusammenhängen. In der zusammengesetzten GRIN-Linse sind eine GRIN-Relaislinse **14**, d. h. eine schwache GRIN-Linse und eine GRIN-Objektivlinse **16**, d. h. eine relativ stärkere GRIN-Linse seriell kombiniert. Die GRIN-Relaislinse **14** und die GRIN-Objektivlinse **16** sind zylinderförmige GRIN-Linsen oder optische GRIN-Fasern. Die GRIN-Relaislinse **14** weist einen längeren Pitch als die GRIN-Objektivlinse **16** auf, zum Beispiel fünfmal länger oder mehr. Die GRIN-Objektivlinse **16** ist stärker und weist eine kürzere Brennweite, f , als die GRIN-Relaislinse **14**, von beispielsweise $f \leq 1$ mm auf. Die GRIN-Relaislinse **14** bildet außerdem einen längeren Abschnitt des endoskopischen Prüfkopfes **2''** als die GRIN-Objektivlinse **16**. Beispielhafte GRIN-Relaislinsen **14** sind mindestens 0,5 cm lang, und vorzugsweise mindestens 1 bis 5 cm lang oder länger, oder sind sogar noch länger, beispielsweise 5 bis 100 cm lang.

[0038] Während der Datenaufnahme ist die GRIN-Objektivlinse **16** unterhalb der Oberfläche der Probe **10** angeordnet. Die GRIN-Objektivlinse **16** fokussiert Beleuchtungslicht an der Fokustaille **8^{II}** auf eine Weise, die einer Mikroskopobjektivlinse ähnlich ist. Die GRIN-Objektivlinse **16** erzeugt eine kleine äußere Fokustaille, w' , und eine kleine Brennweite, $2z'$, d. h. w' und $2z'$ sind kleiner als jeweils ungefähr 1 Mikron und ungefähr 3 Mikron. Die kleinen Werte für w' und $2z'$ erzeugen hohe Beleuchtungsintensitäten an der Fokustaille **8^{II}**, das bedeutet Intensitäten, die hoch genug für Multiphotonen-Bilderzeugung und Tiefenaufgliederung sind.

[0039] Weil die GRIN-Objektivlinse **16** stärker als die GRIN-Relaislinse **14** ist, weist die GRIN-Objektivlinse **16** eine größere numerische Öffnung als die GRIN-Relaislinse **14** auf. Infolgedessen kann sich ein Teil des Lichtes, das von der GRIN-Objektivlinse **16** aufgenommen wird, nicht in der GRIN-Relaislinse **14** ausbreiten. Insbesondere wird aufgenommenes Licht sich darin nicht ausbreiten, welches einen größeren Winkel als dem Akzeptanzwinkel für die GRIN-Relaislinse **14** mit dem normalen Vektor zu der Grenzfläche **17** bildet. Das Gegenteil trifft für das Erregungslicht zu, das bedeutet, dass das Licht, welches von dem Relaisobjektiv **14** geliefert wird, den Eintrittskegel der Objektivlinse **16** nicht ausfüllen wird. Infolgedessen wird dann die numerische Öffnung der GRIN-Objektivlinse **16** nicht von sich aus die maximale Bildauflösung für den endoskopischen Prüfkopf **2^{III}** bestimmen.

[0040] [Fig. 1D](#) zeigt einen endoskopischen Prüfkopf **2^{III}** dessen Kopplung an externe optische Quellen nicht bedeutend durch die Eigenschaften der GRIN-Relaislinse **14'** begrenzt ist. Bei dem endoskopischen Prüfkopf **2^{III}** sind die GRIN-Relaislinse **14'** mit der GRIN-Kopplungslinse **15'** und der GRIN-Objektivlinse **16'** seriell kombiniert. Die GRIN-Kopplungslinse **15'** und die GRIN-Objektivlinse **16'** weisen größere numerische Öffnungen als die GRIN-Relaislinse **14'** auf. Nichtsdestoweniger ist der Verlust von Licht, das durch die GRIN-Kopplungslinse **15'** oder die GRIN-Objektivlinse **16'** aufgenommen wird, an den Grenzflächen **19', 17'** zu der GRIN-Relaislinse **16** nicht besonders hoch, weil das Licht an den Grenzflächen **19', 17'** kollimiert wird. Um das einfallende Licht an den Grenzflächen **17', 19'** zu kollimieren, sind die Grenzfläche **17'** und die Grenzfläche **19'** dergestalt aufgebaut, dass sie im Verhältnis zu der Fokustaille **8^{II}** und der Fokustaille **6** jeweils aus Fourier-konjugierten-Zahlen bestehen. Weil das Licht an den Grenzflächen **17', 19'** kollimiert wird, breiten sich die gesamten Lichtkegel, welche durch die GRIN-Kopplungslinse **15'** und die GRIN-Objektivlinse **16'** aufgenommen werden, in der GRIN-Relaislinse **14'** aus. Aus diesem Grund bestimmt allein die numerische Öffnung der GRIN-Objektivlinse **16'** die Bildauflösung. Auf ähnliche Weise bestimmt die nu-

merische Öffnung der GRIN-Kopplungslinse **15'** alleine die Leistungsfähigkeit der Kopplung zwischen dem endoskopischen Prüfkopf **2^{III}** und einer (nicht dargestellten) externen gepulsten Laserquelle. Insbesondere kann die numerische Öffnung der GRIN-Kopplungslinse **15'** so ausgewählt werden, dass keine bedeutenden Einführungsverluste entstehen, selbst wenn eine Linse mit größerer numerischer Öffnung einen Lichtstrahl von der gepulsten Laserquelle auf die Endseite des endoskopischen Prüfkopfes **2^{III}** fokussiert.

[0041] Einige endoskopische Prüfköpfe tasten Gebiete von Proben seitlich der Prüfköpfe ab.

[0042] [Fig. 1E](#) zeigt einen endoskopischen Prüfkopf **2^{IV}**, welcher Abschnitte der Probe **10** seitlich des Prüfkopfes **2^{IV}** abtastet. Der Prüfkopf **2^{IV}** enthält eine GRIN-Relaislinse **18**, eine GRIN-Objektivlinse **20** und ein optisches Prisma **22**. Das optische Prisma **22** weist eine Seite **23** auf, welche in Bezug auf die mittlere Achse des endoskopischen Prüfkopfes **2^{IV}** in einem Winkel ausgerichtet ist. Beispielhafte Seitenwinkel liegen in einem Bereich von ungefähr 15 Grad bis ungefähr 75 Grad. Die Abwinklung der Seite **23** veranlasst das Prisma **22**, einen Beleuchtungsstrahl in einem Winkel zu der Achse des endoskopischen Prüfkopfes **2^{IV}** abzulenken, wodurch ein seitlicher Abschnitt der Probe **10** beleuchtet wird. Das Prisma **22** nimmt außerdem Licht auf, das von denselben seitlichen Gebieten der Probe **10** ausgestrahlt wird. Durch Drehen des Prüfkopfes **2^{IV}** um seine Achse, kann eine Bedienungsperson das beleuchtete und durch den endoskopischen Prüfkopf **2^{IV}** abgebildete seitliche Gebiet der Probe **10** verändern, d. h. durch Verändern der seitlichen Position der Strahlentaille **8^{IV}**.

[0043] Weil Multiphotonen-Bilderzeugungssysteme ein Gebiet einer Probe abtasten, um Bilddaten zu erhalten, tasten diese Bilderzeugungssysteme Beleuchtungspunkte über einem Gebiet der abzubildenden Probe ab.

[0044] [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) stellen Verfahren zum Abtasten einer Probe mit einem endoskopischen Prüfkopf dar, der auf einer einfachen GRIN-Linse beruht, z. B. Prüfköpfe **2, 2'** von [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#). Das Anpassen dieser Verfahren, um das Abtasten einer Probe mit den endoskopischen Prüfköpfen **2^{II}, 2^{III}, 2^{IV}** von [Fig. 1C, Fig. 1D](#) und [Fig. 1E](#) zu ermöglichen, wird für die Fachleute offensichtlich sein.

[0045] In [Fig. 2A](#) tastet ein fokussierter Lichtstrahl eine externe Endseite der GRIN-Linse **4^V** ab. Die GRIN-Linse **4^V** erzeugt von jedem Lichtpunkt **6^{IV}, 6^V** auf der äußeren Endseite einen zweiten fokussierten Lichtpunkt **8^{IV}, 8^V** in einer Ebene **12^V** der Probe **10**. Infolgedessen erzeugt das Abtasten der äußeren Endseite der GRIN-Linse **4^V** ein Abtasten eines Abschnittes der Probe **10** in einer Ebene **12^V**. Beispielhafte

GRIN-Linsen 4^V weisen gesamte Pitch-Längen in einem Bereich von $\frac{1}{4}$ bis zu $\frac{1}{2}$ modulo eine halbe ganze Zahl auf. Die numerische Öffnung der GRIN-Linse 4^V sollte groß genug sein, um den gesamten auf seiner äußeren Endseite einfallenden Lichtkegel aufzunehmen, damit Licht zum Erregen von Multiphotonen-Prozessen nicht an der äußeren Endseite verloren geht.

[0046] Ein alternatives Abtastverfahren, bei welchem die Notwendigkeit einer Kopplungslinse, um die Auflösung beizubehalten, nicht mehr besteht, ist in [Fig. 2B](#) dargestellt. In [Fig. 2B](#) wird das Abtasten durch Drehen des Einfallswinkels eines kollimierten Beleuchtungsstrahls 3^{VI} , 3^{VII} auf die äußere Seite der GRIN-Linse 4^V erzeugt. Durch Drehen der einfallenden Ausrichtung des Beleuchtungsstrahls 3^{VI} , 3^{VII} zwischen der Richtung 18 und der Richtung $18'$ wird ein fokussierter Punkt veranlasst, die Probe 10 von dem Punkt 8^{VI} bis zu dem Punkt 8^{VII} in der Fokusebene 12^{VI} der GRIN-Linse 4^V abzutasten. Der Bereich, auf welchen der Beleuchtungslichtstrahl auf der äußeren Seite der GRIN-Linse 4^V auftrifft, bleibt während des Drehvorganges, mit welchem die Abtastung erzeugt wird, ungefähr konstant. Beispielhafte GRIN-Linsen 4^V weisen eine Pitch-Länge in einem Bereich von 0 bis zu $\frac{1}{4}$ modulo eine halbe ganze Zahl auf.

[0047] [Fig. 3](#) zeigt ein Abtastungssystem 19 , bei welchem Zweiphotonen-Absorptionsereignisse verwendet werden, um ein abgetastetes Bild eines Abschnittes von Probe 40 zu erzeugen. Das Abtastungssystem 19 enthält einen gepulsten Laser 20 , der die optischen Pulse hoher Intensität zur Verfügung stellt, welche benötigt werden, um die Zweiphotonen-Absorptionsereignisse in der Probe 40 zu erzeugen. Beispielhafte gepulste Laser 20 enthalten ultraschnell gepulste Ti-Saphirlaser, welche Pulse mit Femtosekunden- und Pikosekundenlängen erzeugen. Der gepulste Laser 20 sendet die optischen Pulse an einen Kompensator 22 , welcher für die chromatische Dispersion vorkompensiert. Der Kompensator 22 sendet die vorkompensierten optischen Pulse an ein optisches Ausgabesystem, welches dem optischen Prüfkopf 38 die Pulse übermitteln. Der endoskopische Prüfkopf 38 enthält eine GRIN-Relaislinse 37 und eine GRIN-Objektivlinse 39 , z. B. den endoskopischen Prüfkopf 2^{II} aus [Fig. 1C](#). Der endoskopische Prüfkopf 38 liefert die optischen Pulse hoher Intensität an den Abschnitt der Probe 40 , die abgetastet werden soll.

[0048] Der Kompensator 22 enthält ein Paar Brewster-Winkelprismen 24 , 26 , einen Reflektor 27 , und einen Abgriffspiegel 28 . Der Kompensator 22 funktioniert als eine zweifach zu passierende Vorrichtung, bei welcher das Licht durch jedes Prisma 24 , 26 zweimal hindurch geht. Der Abgriffspiegel 28 lenkt einen Teil des Strahls aus von dem Kompensator 22 vor-

kompensierten Pulsen ab und sendet den abgeleiteten Teil des Strahles an das optische Ausgabesystem.

[0049] Das optische Ausgabesystem enthält ein Paar Strahlendeflektoren 30 für die x-Richtung und die y-Richtung, ein Paar teleskopische Linsen 32 , 34 , einen dichroitischen Spiegel 42 und eine Eintauchlinse 36 .

[0050] Beispielhafte Strahlendeflektoren 30 für die x-Richtung und die y-Richtung enthalten Galvanometer gesteuerte Spiegel, akusto-optische Deflektoren, elektro-optische Deflektoren. Die Strahlendeflektoren 30 für die x-Richtung und die y-Richtung steuern den Strahl in senkrechte seitliche Richtungen, wodurch eine zweidimensionale Abtastung eines Abschnittes der Probe 40 erzeugt wird. Ein programmierbarer Computer 50 steuert die Ablenkungen in x-Richtung und y-Richtung der Strahlen, die durch die Strahlendeflektoren 30 erzeugt werden. Infolgedessen steuert der Computer 50 das Abtasten der Probe in seitlichen Richtungen zu der Strahlenausrichtung.

[0051] Von den Strahlendeflektoren 30 gehen optische Pulse durch ein Paar teleskopischer Linsen 32 , 34 , die den Strahlendurchmesser erweitern, um einen erweiterten Beleuchtungsstrahl 35 zu erzeugen. Der erweiterte Strahl 35 geht durch den dichroitischen Spiegel 42 hindurch und wird zu der Eintauchlinse 36 übermitteln, d. h. eine Linse mit großer numerischer Öffnung. Der Durchmesser des erweiterten Strahls 35 passt zu der Eintrittspupille der Eintauchlinse 36 . Die Eintauchlinse 36 fokussiert den erweiterten Beleuchtungsstrahl 35 auf einen Punkt an oder in der Nähe der äußeren Endseite des endoskopischen Prüfkopfes 38 .

[0052] Das Bilderzeugungssystem 19 weist einen (nicht dargestellten) dualen Fokussierungsmechanismus auf, welcher das unabhängige Einstellen der Entfernung zwischen dem endoskopischen Prüfkopf 38 und der Oberfläche der Probe 40 und der Entfernung zwischen der Eintauchlinse 36 und dem endoskopischen Prüfkopf 38 ermöglicht. Der duale Fokussierungsmechanismus ermöglicht Feineinstellungen der Tiefe der Fokusebene des Prüfkopfes in der Probe 40 , ohne dass Bewegungen des endoskopischen Prüfkopfes 38 selbst erforderlich sind.

[0053] Abschnitte der Probe 40 senden als Reaktion auf die Zweiphotonen-Absorptionsereignisse Licht aus. Ein Teil des ausgesendeten Lichtes wird von dem endoskopischen Prüfkopf 38 wieder aufgenommen, welcher das aufgenommene Licht an die Eintauchlinse 36 liefert. Von der Eintauchlinse lenkt der dichroitische Spiegel 42 das aufgenommene Licht zu einem chromatischen Filter 44 ab. Der chromatische Filter 44 entfernt Wellenlängen außerhalb des Sendespektrums der Probe 40 und liefert einer Fokussie-

ungslinse **46** das verbleibende Licht. Die Fokussierungslinse **46** fokussiert das verbleibende Licht auf einen Fotointensitätsdetektor **48**, z. B. einen Fotovervielfacher oder eine Lawinen-Fotodiode. Der Fotointensitätsdetektor **48** erzeugt als Hinweis auf die Intensität des empfangenen Lichtes ein elektrisches Signal und übermittelt einem Computer **50** das elektrische Signal, d. h. einem Datenprozessor und einer Steuereinheit. Der Computer **50** verwendet die Intensitätsdaten des Fotointensitätsdetektors **48** und Daten der x- und y-Ableitungen des Beleuchtungsstrahls **35**, um ein abgetastetes Bild der Probe **40** zu erzeugen.

[0054] **Fig. 4** ist ein Ablaufdiagramm, welches ein Abtastungsverfahren **60** zum Erzeugen eines Bildes der Probe **40** mit dem System **19** von **Fig. 3** darstellt. Das Verfahren **60** beinhaltet das Anordnen eines ersten Endes des endoskopischen Prüfkopfes **38** in der Probe **40** (Schritt **62**). Das Verfahren **60** beinhaltet außerdem das Übermitteln von Licht, d. h. Pulse von dem gepulstem Laser **20** zu der Eintauchlinse **36** und in ein zweites Ende des endoskopischen Prüfkopfes **38** (Schritt **64**). Der Schritt des Übermittels beinhaltet das Fokussieren des Lichtes auf eine äußere Endseite der GRIN-Relaislinse **37**, das Liefern des Lichtes an die GRIN-Objektivlinse **38**, und das Aussenden des Lichtes von einer zweiten Endseite der GRIN-Objektivlinse **38**. Die zweite Endseite liegt innerhalb der Probe **40**.

[0055] Das Verfahren **60** beinhaltet außerdem das Abtasten von entweder dem Einfallswinkel oder der Einfallsstellung des Laserlichtstrahls auf die äußere Endseite der GRIN-Relaislinse **37** (Schritt **66**). Das Abtasten des einfallenden Laserlichtstrahls veranlasst das Licht, welches von der zweiten Endseite der GRIN-Objektivlinse **39** ausgesendet wird, ein räumliches Gebiet der Probe **40** abzutasten.

[0056] Das Verfahren **60** beinhaltet außerdem das Empfangen von Licht in demselben endoskopischen Prüfkopf **38**, welches die Probe **40** als Reaktion darauf, dass sie abgetastet wird, aussendet (Schritt **68**). Bei alternativen Ausführungsformen wird das Licht, das durch die Probe **40** ausgesendet wird, durch eine zweite optische Leitung aufgenommen, z. B. eine optische Monomodens-Faser oder eine zweite GRIN-Linse (beide nicht dargestellt). Das Verfahren **60** beinhaltet außerdem das Messen der Intensität oder der Phase des Lichtes, welches durch den endoskopischen Prüfkopf **38** aufgenommen wird, in dem Fotodetektor **48** (Schritt **70**). Der Fotodetektor **48** misst eine optische Eigenschaft des Lichtes, das von der Probe **40** als Reaktion auf die Zweiphotonen-Absorptionsereignisse ausgesendet wird, d. h. einer Eigenschaft von Licht, das eine kürzere Wellenlänge als diejenige des gepulsten Lasers **20** aufweist. Das Verfahren **60** beinhaltet außerdem das Aufbauen eines abgetasteten Bildes der Probe **40** aus der

gemessenen optischen Eigenschaft des ausgesendeten Lichtes und der seitlichen Koordinaten der abgetasteten Gebiete der Probe, z. B. ein abgetastetes Bild der Intensität (Schritt **72**).

[0057] Weitere Ausführungsformen der Erfindung werden für die Fachleute aus der Offenbarung, den Zeichnungen und den Ansprüchen offensichtlich sein.

Patentansprüche

1. Vorrichtung, umfassend:
eine gepulste Laserquelle (**20**);
ein optisches Sammelement (**36**), das so ausgelegt ist, dass es von dem gepulsten Laser empfangenes Licht über eine optische Öffnung ausgibt;
einen endoskopischen Prüfkopf (**38**), der ein erstes und ein zweites Ende aufweist, wobei das erste Ende so angeordnet ist, dass es Beleuchtungslicht von der optischen Öffnung des optischen Sammelementes empfängt, wobei der Prüfkopf eine zusammengesetzte GRIN-Linse umfasst, die so ausgelegt ist, dass sie das Beleuchtungslicht über eine Entfernung transportiert, die ungefähr gleich der Länge des Prüfkopfes ist; und
einen Detektor (**48, 50**), der so ausgelegt ist, dass er Werte einer Eigenschaft von Licht misst, das von dem ersten Ende des Prüfkopfes als Reaktion auf das Beleuchtungslicht von der zusammengesetzten GRIN-Linse ausgesendet wird, wodurch Ereignisse in einer Probe (**40**) verursacht werden;
dadurch gekennzeichnet, dass
der Detektor so ausgelegt ist, dass er ein Ausgabesignal für ein Bild der Probe ausgehend von den gemessenen Werten als Reaktion auf die Ereignisse erzeugt, welche Multiphotonen-Absorptionsereignisse sind;
die zusammengesetzte GRIN-Linse eine GRIN-Relaislinse (**37**) und eine GRIN-Objektivlinse (**39**) umfasst, die seriell mit der GRIN-Relaislinse gekoppelt ist; und
die GRIN-Objektivlinse einen kürzeren Pitch als die GRIN-Relaislinse aufweist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die GRIN-Linse des Weiteren umfasst:
eine GRIN-Kopplungslinse (**15'**), die seriell mit einem dem Ende der GRIN-Objektivlinse gegenüberliegenden Ende der GRIN-Relaislinse gekoppelt ist; und
wobei die GRIN-Kopplungslinse einen kürzeren Pitch als die GRIN-Relaislinse aufweist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Vorrichtung so ausgelegt ist, dass sie das Licht für den gepulsten Laser zu der Probe liefert, ohne dass sich das Licht in einer optischen Monomodens-Faser ausbreitet.

4. Verfahren zum Abtasten eines Gebietes einer

Probe (40) mit einem endoskopischen Prüfkopf, wobei der Prüfkopf (38) eine zusammengesetzte GRIN-Linse mit einer ersten und einer zweiten Endseite aufweist, umfassend:

Anordnen (62) der ersten Endseite der GRIN-Linse in der Nähe des Gebietes der Probe (40); und Übertragen (64) von gepulstem Laserlicht zu der zweiten Endseite der GRIN-Linse, wobei die Länge der GRIN-Linse ungefähr gleich der Länge des Prüfkopfes ist; dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren des Weiteren das Abtasten (66) von entweder einer Einfallsstellung oder eines Einfallswinkels des Lichtes an der zweiten Endseite der GRIN-Linse umfasst, während die Übertragung durchgeführt wird, um eine Abtastung des Gebietes der Probe zu erzeugen; die zusammengesetzte GRIN-Linse des Weiteren eine GRIN-Relaislinse (37) und eine GRIN-Objektivlinse (39) umfasst, die seriell mit der GRIN-Relaislinse gekoppelt ist; und die GRIN-Objektivlinse einen kürzeren Pitch als die GRIN-Relaislinse aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, des Weiteren umfassend: Empfangen (68) von Licht, das durch das Gebiet der Probe als Reaktion auf das Abtasten ausgesendet wird; und Messen (70) von Werten einer Menge, die als Hinweis auf eine Intensität oder eine Phase des ausgesendeten Lichts als Reaktion auf das Empfangen dient.

6. Verfahren nach Anspruch 5, des Weiteren umfassend: Bilden (72) eines Bildes des Gebietes der Probe ausgehend von den gemessenen Werten und Positionen von Bereichen der Probe, welche das ausgesendete Licht erzeugt haben.

7. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das Anordnen dazu führt, dass die erste Endseite in der Probe angeordnet ist und die zweite Endseite außerhalb der Probe angeordnet ist.

8. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das Messen das Bestimmen der Werte der Menge für Licht einschließt, dessen Wellenlänge kürzer als die Wellenlänge des übertragenen Lichtes ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Pitch der GRIN-Objektivlinse mindestens fünf Mal kürzer ist als der Pitch der GRIN-Relaislinse.

10. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der Pitch der GRIN-Objektivlinse mindestens fünf Mal kürzer ist als der Pitch der GRIN-Relaislinse.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

FIG. 1 A

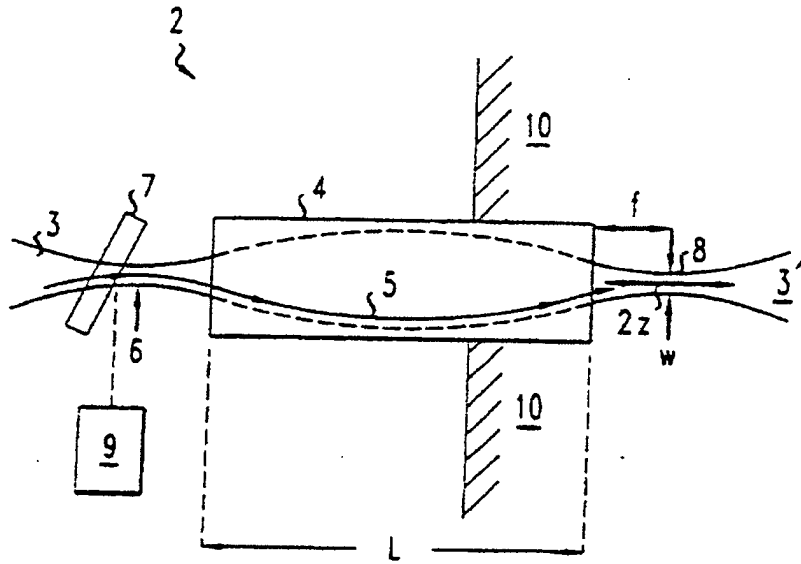


FIG. 1 B

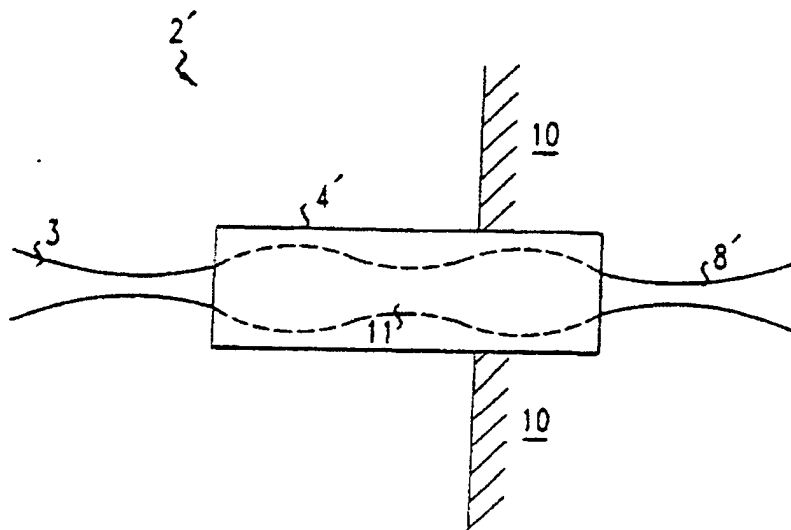


FIG. 1C

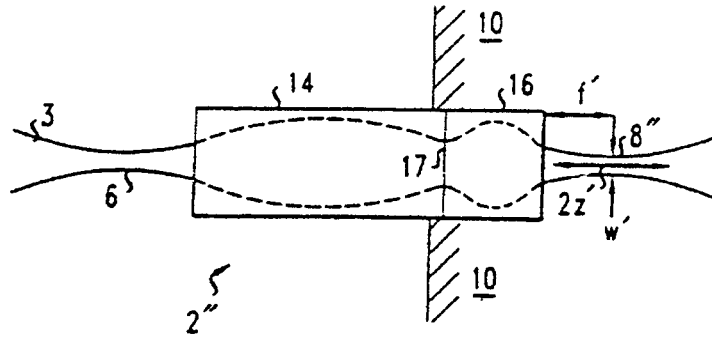


FIG. 1D

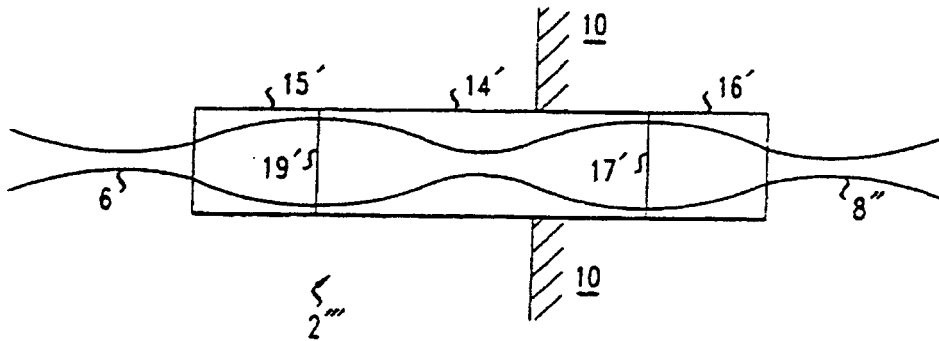


FIG. 1E

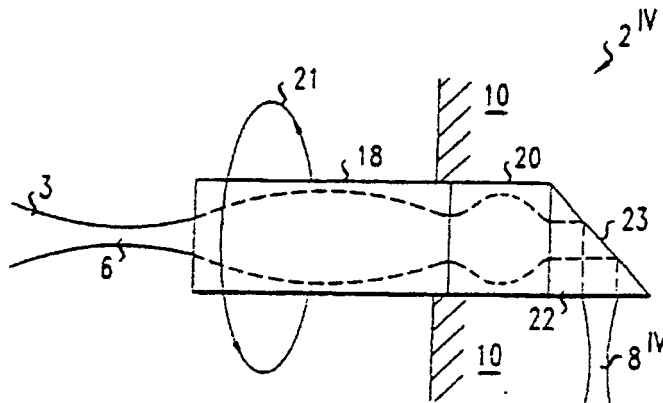


FIG. 2A

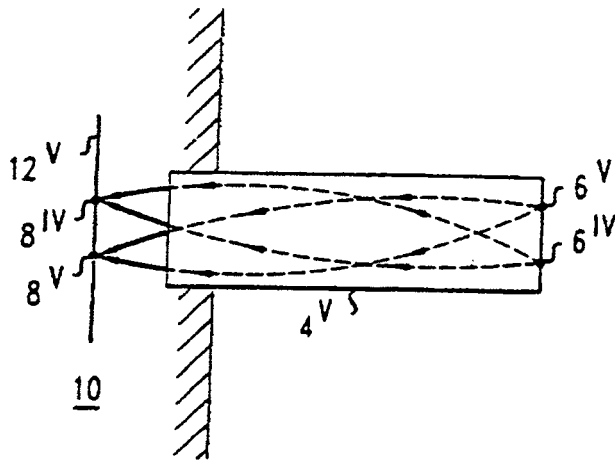


FIG. 2B

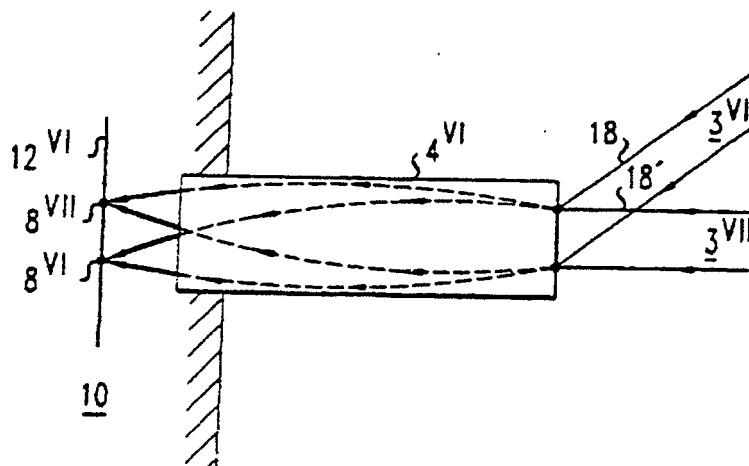


FIG. 3

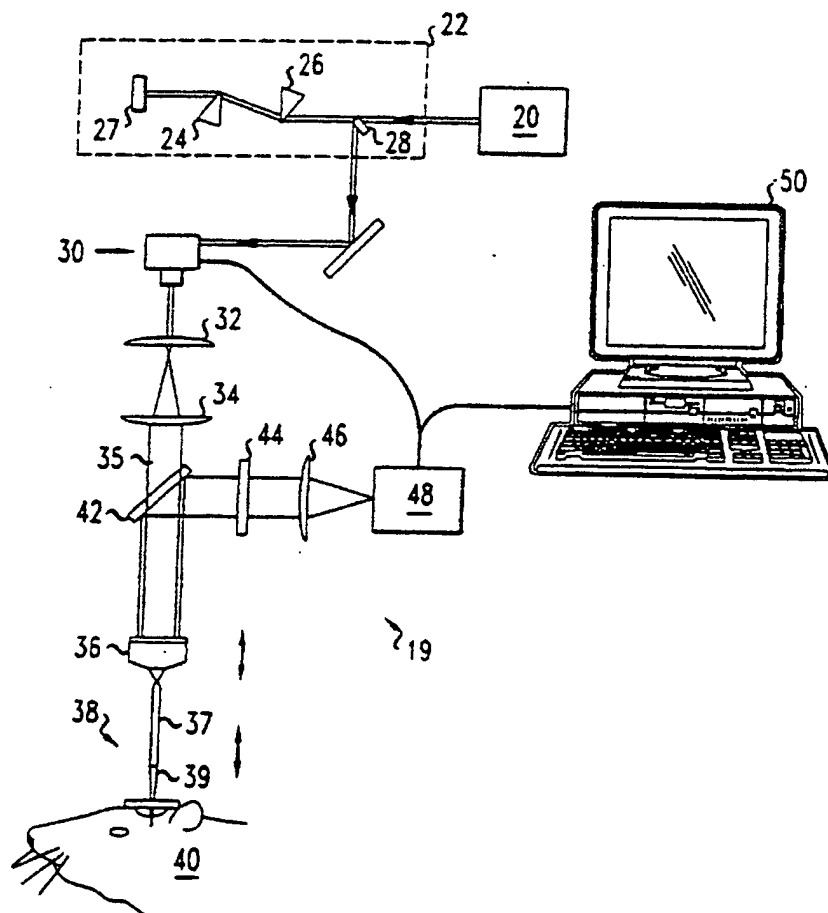
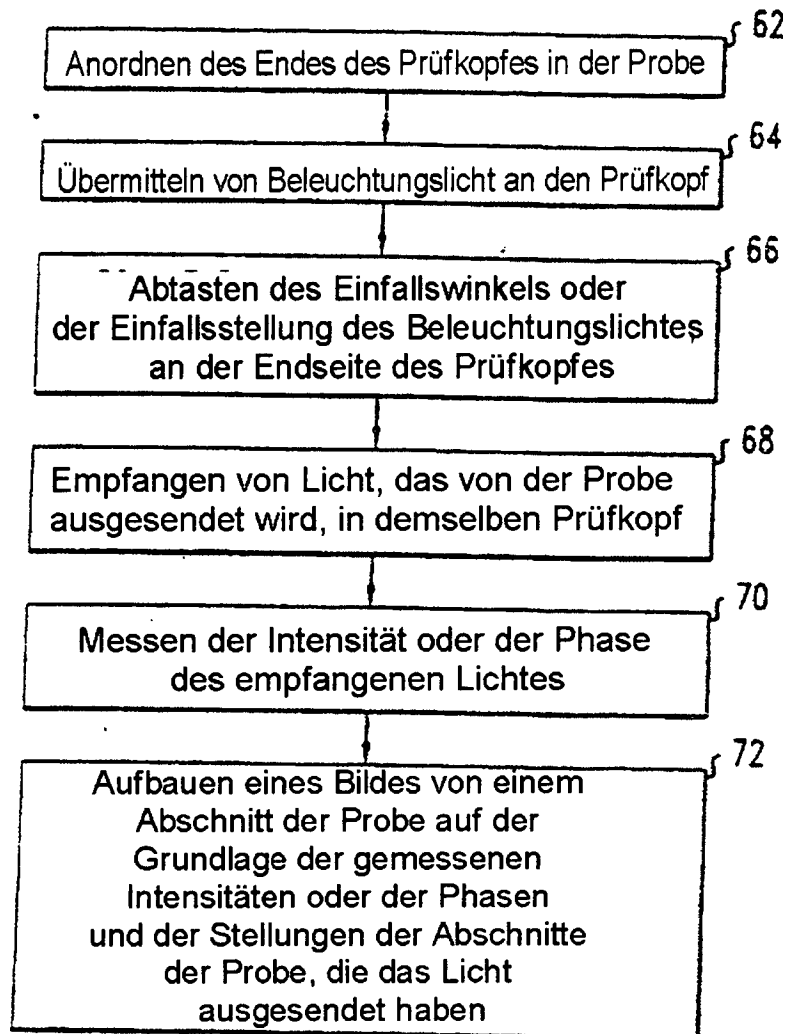


FIG. 4



60