



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 027 355 A1** 2006.12.14

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 027 355.6**

(22) Anmeldetag: **13.06.2005**

(43) Offenlegungstag: **14.12.2006**

(51) Int Cl.⁸: **A61F 9/008** (2006.01)

A61F 9/013 (2006.01)

A61B 18/20 (2006.01)

(71) Anmelder:

Femtotechnologies GmbH, 12489 Berlin, DE

(72) Erfinder:

Korn, Georg, Dr., 14532 Kleinmachnow, DE

(74) Vertreter:

BOEHMERT & BOEHMERT, 28209 Bremen

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

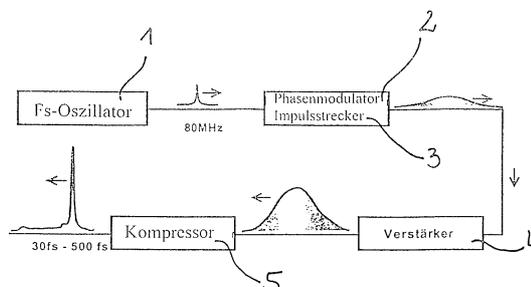
DE 101 48 784 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials, insbesondere eines biologischen Materials, bei dem das organische Material zum definierten Energieeintrag mit Laserlicht in Form ultrakurzer Impulse bestrahlt wird, welche hinsichtlich einer jeweiligen Impulslänge und einer Impulsenergie für das organische Material eingestellt sind, so dass eine Energiedichte von etwa 100 mJ/cm^2 bis etwa 100 J/cm^2 gebildet ist, wobei nacheinander mindestens zwei Impulse oder eine Impulsfolge auf eine Oberfläche des organischen Material eingestrahlt werden und wobei ein zeitlicher Abstand zwischen einem vorangehenden Impuls/einer vorangehenden Impulsfolge und einem folgenden Impuls/einer folgenden Impulsfolge kleiner oder gleich Piko-sekunden ist und der folgende Impuls/die folgende Impulsfolge noch in eine mittels des vorangehenden Impulses/der vorangehenden Impulsfolge bewirkte Änderung in dem organischen Material trifft, so dass eine dauerhafte Veränderung des organischen Materials gebildet wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials, insbesondere eines biologischen Materials.

[0002] Bisher bekannte Verfahren des Einsatzes von ultrakurzen Laserimpulsen zur Mikrostrukturierung von Materialien nutzen die Besonderheiten des schnellen Energieeintrages dieser Strahlung in das zu bearbeitende Material. Die Impulse sind typischerweise kürzer als die Elektron-Phonon-Kopplungsdauer des zu bearbeitenden Materials, die typischerweise unterhalb von 1 bis 2ps liegt. Das heißt, während der Einwirkung des Impulses findet nur ein sehr geringer Energietransfer an die Umgebung des lokalisierten Wechselwirkungsortes statt. Eine Zerstörung ist damit stark lokalisiert. Randschädigungen sind geringer als bei der Bearbeitung mit längeren Impulsen.

Stand der Technik

[0003] Bei Verwendung von längeren Impulsen ist während der Dauer des Impulses ein Wärmefluß in die Umgebung der bestrahlten Stelle möglich. Die räumliche Ausdehnung der zerstörten Stelle kann demzufolge deutlich größer als der Radius des einwirkenden Laserstrahls sein. Besonders drastisch beweisen das Untersuchungen mit CO₂-Lasern, die Einflußzonen bis 50µm unterhalb der bestrahlten ablatierten Oberfläche aufwiesen (siehe zum Beispiel DE 101 25 206 B4).

[0004] Weiterhin ist aufgrund der hohen Intensitäten ein ausgeprägtes deterministisches Verhalten bei der Zerstörung zu beobachten. Die Ursache hierfür liegt in der zuverlässigen Generation von anfänglichen freien Ladungsträgern (Elektronen) durch Multiphotonenionisation. Die weitere Zerstörung entsteht dann in Abhängigkeit von der Impulsbreite entweder aufgrund eines Avalancheprozesses bei längeren Impulsen oder eines direkten Multiphotonenprozesses bei kürzeren Impulsen mit einer Impulslänge von weniger als etwa 200fs (vgl. IEEE Vol. 31. S. 2241-2257 (1995); Appl. Phys. Lett. Vol. 64, S. 3071-3073, (1994)). Im Vergleich dazu ist bei längeren Impulsen mit einer Impulslänge von mehr als etwa 10ps von Nanosekunden ein statistischer Charakter zu beobachten, da der Impuls nicht über die Intensität verfügt, um die notwendigen anfänglichen Ladungsträger reproduzierbar zur Verfügung zu stellen. Die nahezu freien Ladungsträger sind dann statistisch im zu bearbeitenden Material durch leicht ionisierbare Defekte verteilt. Daraus folgt der nicht deterministische Vorgang der Zerstörung für längere Impulse.

[0005] Weiterhin erweist sich, dass die Zerstörungsschwelle (Maßeinheit J/cm²) bei längeren Impulsen proportional zu $(\tau)^{1/2}$ (τ – Impulsbreite) fällt. Für Impul-

se im Bereich oder kürzer der Elektron-Phonon-Kopplungszeit fällt die Kurve deutlich schwächer. Impulse mit Breiten einer ps oder von sub-ps benötigen ein deutlich geringere Fluence für die Zerstörung als ns-Impulse. Kurze Einzelimpulse im sub-ps-Bereich finden deswegen in der präzisen Mikrostrukturierung sowohl für die Bearbeitung von transparenten und nichttransparenten Materialien Anwendung für die Oberflächenbearbeitung als auch für die Modifikation im Volumen von Materialien Anwendung (vgl. US 5,656,186).

[0006] Aus dem Dokument DE 101 25 206 B4 ist ein Verfahren zur direkten Mikrostrukturierung von Materialien mittels ultrakurzer Einzelimpulse oder Impulsfolgen mit definiertem Energieeintrag bekannt. Bei dem bekannten Verfahren werden nacheinander zwei zeitlich geformte Laserimpulse oder Impulszüge auf die Oberfläche des zu bearbeitende Material gerichtet. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Impulse oder Impulszüge ist kleiner oder gleich Pikosekunden eingestellt, so daß der folgenden Impuls noch in die bewirkte Änderung des ersten Impulses im zu bearbeitenden Material trifft. Energie und Dauer des Impulses werden in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Material eingestellt. Das bekannte Verfahren wird genutzt, um transparente oder nichttransparente Materialien im Mikrobereich zu Strukturieren, konkrete Beispiele sind Festkörper wie Graphit und Quarzglas. Ein identisches Verfahren ist in dem Dokument EP 1 260 838 A2 beschrieben.

[0007] Der optimale Abstand der sub-ps-Impulse zur Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse hängt von dem komplexen Zusammenspiel von Energielokalisation und -dissipation im bestrahlten Material ab. Die Verwendung von speziell phasenmodulierten Impulsen oder Impulsfolgen erweitert die Bearbeitungsmöglichkeiten von Festkörpermaterialien durch eine mögliche Erhöhung der Intensität (eingestrahle Energie pro Fläche) und ein gezieltes „softening“ des Materials durch den ersten Impuls. Die folgenden Impulse spüren bei entsprechender Verzögerung die Änderungen des Materialzustandes durch den ersten Impuls. Das führt zu Erzeugung verbesserten Strukturen mit höherer Kantenschärfe im Inneren von Materialien und an Oberflächen durch Verringerung von Mikrorissen und Spannungen im Material.

Aufgabenstellung**Die Erfindung**

[0008] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials, insbesondere eines biologischen Materials, anzugeben, mit dem eine hochpräzise Bearbeitung ermöglicht ist, insbesondere zum Ausführen exakter auch komplexer dreidimensionaler Schnitte oder zum Ausbilden von Kavitäten oder Formveränderungen in transpa-

renten und nichttransparenten organischen Materialien.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren nach dem unabhängigen Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand von abhängigen Unteransprüchen.

[0010] Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials, insbesondere eines biologischen Materials, bei dem das organische Material zum definierten Energieeintrag mit Laserlicht in Form ultrakurzer Impulse bestrahlt wird, welche hinsichtlich einer jeweiligen Impulslänge und einer Impulsenergie für das organische Material eingestellt sind, so dass eine Energiedichte von etwa 100mJ/cm^2 bis etwa 100J/cm^2 gebildet ist, wobei nacheinander mindestens zwei Impuls oder eine Impulsfolge auf eine Oberfläche des organischen Materials eingestrahlt werden und wobei ein zeitlicher Abstand zwischen einem vorangehenden Impuls/einer vorangehenden Impulsfolge und einem folgenden Impuls/einer folgenden Impulsfolgen kleiner oder gleich Pikosekunden ist und der folgenden Impuls/die folgende Impulsfolge noch in eine mittels des vorangehenden Impulses/der vorangehenden Impulsfolge bewirkte Änderung in dem organischen Material trifft, so dass eine dauerhafte Veränderung des organischen Materials gebildet wird.

[0011] Der zeitliche Abstand der Impulse der aufeinanderfolgenden Impulse/Impulsfolgen und die Dauer der Einzelimpulse ist demzufolge kleiner als die Elektron-Phonon-Wechselwirkungsdauer einzustellen. Nur in diesem Fall kommen die Vorteile des hier beschriebenen Verfahrens zur Verbesserung von Materialbearbeitungsergebnissen mittels kurzer Laserimpulse zum Tragen.

[0012] Ein wesentlicher Vorteil der Erfindung besteht darin, dass mittels der zeitlichen Formung der eingestrahnten Lichtimpulse und der gezielten zeitlichen Abfolge der Impulse/Impulsfolgen für das zu bearbeitende organische Material die Strahlenbelastung für Bereich hinter dem Bestrahlungsort entlang der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls reduziert wird. Es ist auf diese Weise für organische Materialien ermöglicht, gezielt innerhalb des organischen Materials Veränderungen auszuführen, die nicht auf den Bereich der Oberfläche beschränkt sind, wie dies im Stand der Technik für andere Materialien der Fall ist (vgl. DE 101 25 206 B4).

[0013] Es ergibt sich weiterhin der Vorteil, dass im Vergleich zu bekannten Verfahren der Laserlichtbearbeitung die Genauigkeit der Bearbeitung erhöht werden kann, bis zu einer Genauigkeit von $< 1\ \mu\text{m}$, da die Zerstörung gezielt und beschränkt auf der Achse des Laserstrahls erzeugt wird. Das lässt sich durch den Abstand der Impulse und den Energieinhalt so-

wie die zeitliche Formung der verwendeten Impulse optimieren.

[0014] Bei dem geschaffenen Verfahren werden eine minimale Energiedichte und Intensität der eingestrahnten Impulse/Impulsfolgen gewahrt, um typische bei der Verwendung von Femtosekunden erzielte deterministische Zerstörungen zu erzielen. Insbesondere kann mit dem beschriebenen Verfahren die mittlere Intensität im Wechselwirkungsbereich der Strahlung mit dem Medium reduziert werden. Ein kurzer intensiver fs-Impuls mit geringerer Energie generiert die notwendige Startdichte der freien Ladungsträger, ein verzögerter zweiter längerer sub-ps-Impuls strahlt in die gleiche vorbehandelte Stelle ein. Dieser zweite Impuls kann die Funktion der eigentlichen Materialbearbeitung, beispielsweise des Schneidens oder des Materialabtragens, im Innern des bearbeiteten Materials oder an seiner Oberfläche übernehmen.

[0015] Ein besonderer Vorteil bei der Verwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zum Bearbeiten biologischer Materialien welcher aber auch für andere organische Materialien vorteilhaft sein kann, besteht darin, dass die Strahlenbelastung hinsichtlich der Intensität und der Energiedichte der eingestrahnten Impulse/Impulsfolgen optimiert und hierdurch gering gehalten werden kann, um die Zerstörung gut zu lokalisieren und Randeffekte wie Materialspannungen (im Volumen um die zerstörte Stelle) zu reduzieren, die durch zu starke Schockwellen entstehen können. Hierdurch bleibt bei transparenten Materialien die Transparenz nach der Bearbeitung (Behandlung) besser erhalten, und das Bilden von Streuzentren im Materialien werden reduziert. Die Homogenität des bearbeiteten Materials bleibt besser erhalten.

[0016] Dieser Vorteil entfaltet seine Wirkung insbesondere bei Verwendung des Verfahrens zur Modifizierung von Hornhautgewebe zum Schneiden eines sogenannten Flaps im Rahmen eines LASIK-Verfahrens (LASIK – Laser in situ Keratomileusis) und zur intrastromalen Korrektur von Fehlsichtigkeiten mittels Erzeugung speziell geformter Kavitäten zur Korrektur von Myopie, Hyperopie oder unterschiedlicher Formen des Astigmatismus sowie bei der wellenfrontgeführten Korrektur mit Reduzierung bzw. Eliminierung der höheren Aberrationen. Nach einer solchen Behandlung sollen ein hoher Kontrast (Sehschärfe) sowie die notwendige Refraktion des Auges hergestellt sein. Es wird erwartet, dass sich bei Patienten teilweise beobachtete Photophobien (starke Lichtempfindlichkeiten) des mit fs-Impulsen behandelten Auges reduzieren oder sogar gänzlich eliminieren lassen. Diese sind zumindest in einigen Fällen offensichtlich die Folge einer Kombination von zu hoher Strahlenbelastung der Netzhaut durch den schneidenden fs-Laser und der erhöhten Streuung des behandelten Stromas nach der Operation sowie der Störung der

Heilungsprozesse durch die Veränderung der Hornhaut bei Einwirkung eines intensiven fs-Impulses.

[0017] Eine wesentliche Besonderheit bei der Bestrahlung mit Femtosekunden zum Zweck der kontrollierten präzisen Zerstörung, beispielsweise einer Schnittführung oder einer Kavitätenerzeugung, ist die zeitliche Abfolge des ablaufenden Prozesses: Zu Beginn der Bestrahlung werden zunächst auf der Vorderflanke des Impulses aufgrund von Multiphotonenionisation freie Ladungsträger erzeugt. Das entstehende Plasma weist aber noch nicht die kritische Dichte auf. Deswegen kann ein Teil der angewendeten Strahlungsenergie durch den Wechselwirkungspunkt hindurchtreten. Das biologische Gewebe ist in diesem Fall transparent und die hindurchtretende Strahlung trifft im Fall einer Augenbehandlung ungehemmt auf die Netzhaut. Das kann zu Verblendungen der Photorezeptoren bis hin zur Schädigung der Netzhaut führen. Es ist also wünschenswert diese Belastungen der Netzhaut deutlich unterhalb eines kritischen Wertes ($1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$) zu senken.

[0018] Messungen haben gezeigt, dass eine Reduzierung der Impulsbreite von 3ps auf 125fs eine Verringerung der transmittierten Energie bei der Plasmabildung in Wasser um etwa 20% für Laserspotgrößen zwischen $7\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$ (vgl. Appl. Optics 3G(22)5630-5640, 1997). Das kann bei dem vorgeschlagenen Verfahren dadurch erreicht werden, dass ein erster kurzer Impuls mit geringerer Energie und hohem Kontrastverhältnis die Erzeugung der kritischen Plasmadichte übernimmt. Der Intensitätskontrast des ersten Impulses sollte etwa 10^3 betragen, um die Wechselwirkung der Impulse mit dem zu bearbeitenden Material auf gezielte Art und Weise zu gestalten, so dass die Vorteile der Lasermaterialbearbeitung mit Femtosekunden zum Tragen kommen. Der zweite eigentlich bearbeitende längere Impuls oder die nachfolgenden Teile des speziell phasenmodulierten Impulses werden dann in dem erzeugten dichten Plasma vollständig absorbiert, die im Fall der Augenbehandlung auf die Netzhaut durchtretende Laserenergie ist hierdurch reduziert, und die lokale präzise gesteuerte Zerstörung des Hornhautmaterials ist gewährleistet. Der zeitliche Intensitätsverlauf des zweiten Impulses/der Impulsfolge kann beispielsweise mittels adaptiver Steuerung des Phasenverlaufs optimal gestaltet werden. Optimal zur Reduzierung der Intensitätsbelastung sowie zur Minimierung der durch das Plasma transmittierten Energie ist beispielsweise ein verlängerter abfallender Intensitätsverlauf mit zeitlicher Dauer. Die eigentlich zur Zerstörung und Ablation notwendige Energie ist am lang auslaufenden Ende des Impulses konzentriert.

[0019] Weiterhin ist wichtig, dass die Hornhautschnitte oder die Erzeugung von Kavitäten zur intrastromalen Korrektur von Fehlsichtigkeiten mit relativ kurzer Dauer ausgeführt werden, weshalb die Ver-

wendung ein hochrepetierender Laser mit Energien im Bereich von einigen μJ , beispielsweise etwa 0.1 bis $1 \mu\text{J}$ für den ersten Impuls und etwa 1 bis $5\mu\text{J}$ für den folgenden Impuls, bevorzugt wird, um die Behandlungszeit auf kurze Zeiten zu reduzieren, bevorzugt deutlich kurzer als eine Minute. Die eines Lasersystems mit hoher Wiederholfrequenz ist aus vergleichbaren Gründen jedoch auch für andere Anwendungen zweckmäßig.

[0020] Ein weiteres beobachtetes Phänomen ist die Bildung von sogenannten „streaks“, bei denen es sich um Trübungen des Stroma im Bereich der Wechselwirkungszone handelt, für die eine laterale Ausdehnungen von etwa 500nm beobachtet wurde, die bis zu etwa $100\mu\text{m}$ in beiden Richtungen entlang der Strahlrichtung des Laserstrahls im mit fs-Impulsen behandelten Hornhautstroma sichtbar sind (siehe Heisterkamp, Appl. Phys. B74, 419-425). Dies ist Folge einer Selbstfokussierung der intensiven fs-Impulse vor dem beabsichtigten Wechselwirkungsort, da die Peakleistungen der fs-Impulse oberhalb eines kritischen Wertes liegen können. Die „streaks“ können zu Trübungen in der Hornhaut führen. Eine Reduzierung der mittleren Intensität, wie sie bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren möglich ist, sowie die Wahl eines geeigneten Fokussierungswinkels verringern diese unerwünschten Belastungseffekte oder eliminieren sie vollständig. Das führt zu einer klareren Hornhaut nach der Behandlung mit den fs-Impulsen. Es ist eine Reduzierung von Patientenfällen mit Photophobie nach fs-Behandlung zu erwarten.

[0021] Bei einer Wellenfront geführten Ablation werden mittels Erhöhung der Präzision des Schnittes sowie der verbesserten Repositionierung des Flaps nach der Behandlung mit dem hier vorgestellten Verfahren Verbesserungen hinsichtlich der Aberrationskorrektur erzielt. Bisher haben insbesondere bei der LASIK die mechanischen Verwerfungen durch den Schnitt mit dem Mikrokeratom einen starken, oft nicht reproduzierbaren Einfluß auf die entstehenden Restaberrationen des Auges nach der Behandlung. Eine Verbesserung der Genauigkeiten des fs-Laserschnitts und der erzielbaren Repositioniergenauigkeit des Flaps führt zur angestrebten mittleren quadratischen Wellenfrontdeformation in die Größenordnung unterhalb von $\lambda/10$ (RMS – „root mean square“) oder $\lambda/14$, wodurch sich dem theoretischen beugungsbegrenzten Auflösungsvermögen genähert wird. Das wird, wegen der Genauigkeitserhöhung des Verfahrens, der Wellenfront geführten Ablation mit ns-UV-Impulsen eine weitere Verbesserung ermöglichen.

[0022] Auch wenn einzelne Vorteile der Erfindung vorangehend in Verbindung mit einer Bearbeitung von biologischem Gewebe am Auge erläutert wurden, entfalten die jeweiligen Vorteile ihre positiven Wirkungen auch bei anderen organischen Materia-

lien entsprechend, beispielsweise im Zusammenhang mit Operationen im Gehörgang oder bei der Bearbeitung von Zahnmateriale.

Ausführungsbeispiele der Erfindung

[0023] Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf Figuren einer Zeichnung näher erläutert. Hierbei zeigen:

[0024] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines Lasersystems zur Verwendung beim Bearbeiten eines organischen Materials mit ultrakurzen Lichtimpulsen; und

[0025] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Erzeugen von Impulsen unter Nutzung eines Michelson-Interferometers zum Erzeugen einer zusätzlichen Phasenmodulation bei dem Lasersystem nach [Fig. 1](#).

Ausführungsbeispiel

[0026] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines CPA-Lasersystems (CPA – „chirped Impulse amplification“), mit dem ultrakurze Impulse zum Bearbeiten eines organischen Materials erzeugt werden. Die erzeugten Impulse/Impulsfolgen, die speziell phasenmoduliert sein können, können für Bearbeitung des jeweiligen organischen Materials hinsichtlich ihres zeitlichen Verlaufs und ihrer Energie eingestellt werden. Eine Modulation wird im Allgemeinen mittels Abstimmung des Oszillatorniveaus erreicht.

[0027] Von einem fs-Oszillator **1** mit einer Wiederholfrequenz von etwa 80 bis 100 MHz erzeugte Impulse werden auf einen Phasenmodulator **2** gegeben. Danach läuft der so behandelte Impuls in einen Impulsstrecke **3** der einen linearen „chirp“ zusätzlich zur bereits bestehenden Phasenmodulation aufprägt. Die anschließend in einem Verstärker **4** verstärkten Impulse werden danach in einem Kompressor **5** zu fs-Impulsen mit hoher Energie gewandelt. Die so erzeugten Impulse/Impulsfolgen, die aufgrund der nichtkompensierten zusätzlich aufgeprägten Phasenmodulation phasenmoduliert sind werden dann zur Bearbeitung des organischen Materials eingesetzt, beispielsweise im Rahmen eines Schnittes für ein LASIK-Verfahren oder einer Fehlsichtigkeitskorrektur durch intrastromale Veränderung am Auge.

[0028] Es ist also eine zusätzliche/separate Phasenmodulation vorgesehen. Bei herkömmlichen CPA-Lasersystemen im Bereich über 100fs wird hauptsächlich der lineare „chirp“ des Impulsstreckers **3** durch den Kompressor **5** beseitigt. Der so gebildete Impuls weist nach der Verstärkung nahezu seine ursprüngliche Impulslänge auf.

[0029] Ausgehend von dem Lasersystem nach [Fig. 1](#) kann beispielsweise mit einer Anordnung nach [Fig. 2](#) ein optimierter Doppelimpuls zur Verfügung gestellt werden, der die obengenannten Kriterien für eine möglichst schonende Behandlung des organischen Materials erfüllt. Für gleiche Merkmale werden in [Fig. 2](#) die gleichen Bezugszeichen wie in [Fig. 1](#) verwendet.

[0030] Vom fs-Oszillator **1** kommend wird der Impuls durch einen als Michelson-Interferometer ausgebildeten Phasenmodulator **2** geschickt. In einem optischen Arm **6** steht zusätzlich ein abstimmbares dispersives Element **7** zur Verfügung, welches einem der erzeugten Impulse neben einer Verzögerung eine abstimmbare Dispersion, die hauptsächlich 2. Ordnung ist, aufprägt. Danach erfahren die beiden abstimmbar zueinander verzögerbaren Impulse eine Dehnung auf einen Wert zwischen etwa 10ps bis 500ps in dem Impulsstrecke **3**.

[0031] Nach der Verstärkung ist der Kompressor **5** so eingestellt, dass nur der erste Impuls einen Wert von etwa 50 bis 500fs hinsichtlich der Impulsbreite aufweist. Der folgende Impuls kann in Abhängigkeit von der zusätzlich im Michelson-Interferometer **2** aufgeprägten Dispersion eine abstimmbare Breite zwischen etwa 100fs und 3ps bei einstellbarer zeitlicher Verzögerung zwischen den verstärkten Impulsen aufweisen. Die Optimierung des Bearbeitungsergebnisses wird mit Hilfe der Wahl der zeitlichen Verzögerung und der zusätzlich eingeführten Dispersion erzielt. Methoden der Phasenmodulation können mittels der gezielten Veränderung der Phasenverzögerung bei unterschiedlichen Wellenlängen beispielsweise in einem „zero dispersion stretcher“ oder mittels akusto-optischer Methoden erzielt werden. Das Ergebnis der Materialbearbeitung kann dann mit Hilfe einer Rückkopplungsschleife mittels Computer optimal gestaltet werden (A. M. Weiner, "Femtosecond Pulse Shaping Using Spatial Light Modulators", Rev. Sci Instrum. 71, pp. 1929-1960, 2000.)

[0032] Wesentlich ist, dass das beschriebene CPA-System den Impuls zum Zwecke der Verstärkung zeitlich im Strecke dehnt (vgl. US RE37,585). Dieser verlängerte Impuls kann dann im Verstärkersystem zu hohen Energien gebracht werden, ohne dass sich nichtlineare Effekte beider Verstärkung bemerkbar machen. Nach der Verstärkung wird der Impuls dann wieder zu seiner Originallänge komprimiert. Im Gegensatz dazu weist in dieser Schrift der oder die Impulse eine zusätzliche Phasenmodulation zum stretcher auf der durch den Kompressor nicht kompensiert werden kann bzw. soll und dadurch zur Ausbildung von Doppelimpulsen. Impulsfolgen oder speziell zeitlich geformten Impulsen führt, die variable Impulslängen oder Abstände aufweisen und es gestatten, den Bearbeitungsprozess in der oben beschriebenen Art und Weise zu optimieren.

[0033] Besonders geeignet zur Ausführung des Verfahrens sind direkt diodengepumpte Femtosekundenlasersysteme, deren Zentralwellenlänge im Bereich um etwa 1 μm liegt. Herauszuheben sind Yb-dotierte Materialien, die einen geringen Stoke-Verschiebung aufweisen und effizient und kostengünstig mit Dioden geringer Leistung gepumpt werden können. Die Bandbreite dieser Materialien gestattet die Erzeugung und die Verstärkung von Impulsen bis unter 100fs. Die Oszillatoren lassen sich mittels SESAMs (SESAM – „Semiconductor Saturable Absorber Mirror“) auslegen, was die Stabilität und Zuverlässigkeit dieser Systeme wesentlich verbessert hat. Insbesondere sind die Wellenlängen um etwa 1 μm gut zur Behandlung des Auges geeignet, da die Hornhaut eine gute Transparenz aufweist und die Empfindlichkeit der Photorezeptoren der Netzhaut stark reduziert ist im Vergleich zum nahen Infrarot (Ti:Saphir-Laser). Die Methoden der Phasenmodulation sind generell anwendbar für Femtosekundenlaser-Systeme.

[0034] Es findet keine Erhöhung der erzielbaren Energiedichte statt. Die Intensität soll insgesamt durch Aufteilung in Mehrfach-Impulse, Impulsfolgen bzw. speziell phasenmodulierte Impulse reduziert werden, um ein möglichst minimal invasives und weniger schädigendes und sehr präzises Verfahren zur Materialbearbeitung zu erzeugen.

[0035] Die in der vorstehenden Beschreibung, den Ansprüchen und den Zeichnungen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen von Bedeutung sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bearbeiten eines organischen Materials, insbesondere eines biologischen Materials, bei dem das organische Material zum definierten Energieeintrag mit Laserlicht in Form ultrakurzer Impulse bestrahlt wird, welche hinsichtlich einer jeweiligen Impulslänge und einer Impulsenergie für das organische Material eingestellt sind, so dass eine Energiedichte von etwa 100mJ/cm² bis etwa 100J/cm² gebildet ist, wobei nacheinander mindestens zwei Impuls oder eine Impulsfolge auf eine Oberfläche des organischen Materials eingestrahlt werden und wobei ein zeitlicher Abstand zwischen einem vorangehenden Impuls/einer vorangehenden Impulsfolge und einem folgenden Impuls/einer folgenden Impulsfolgen kleiner oder gleich Pikosekunden ist und der folgenden Impuls/die folgende Impulsfolge noch in eine mittels des vorangehenden Impulses/der vorangehenden Impulsfolge bewirkte Änderung in dem organischen Material trifft, so dass eine dauerhafte Veränderung des organischen Materials gebildet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass organische Material mittels einer Ablation oder einer Zerstörung bearbeitet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche des organischen Materials strukturiert wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberfläche des organischen Materials geschnitten wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere Schnitte im Inneren des organischen Materials geführt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass ein Schnitt nach einem vordefinierten dreidimensionalen Schema geführt wird.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das organische Material im Inneren strukturiert wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass organisches Material in einem Auge bearbeitet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass ein LASIK-Schnitt (LASIK-Laser-Assisted In Situ Keratomileusis) in einer Hornhaut ausgeführt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass bei dem LASIK-Schnitt eine wellenfrontgeführte Ablation ausgeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass der LASIK-Schnitt nach einem vordefinierten dreidimensionalen Schema lamellierend geführt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass Haupt- und Nebeninzisionen in einer Sklera und/oder einer Hornhaut zur Kataraktoperation ausgeführt werden.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass sklerale und/oder korneale Schnitte für die Vitrektomie (pars plana) sowie Inzisionen in einem Glaskörperraum und in einer Netzhaut ausgeführt werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass asymmetrische Schnitte in dreidimensionaler Form für die Keratoplastik ausgeführt werden.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis

14, dadurch gekennzeichnet, dass Gewebe für eine Glaukomchirurgie im Kammerwinkel (im Sinne einer Goniotomie) inzidiert wird oder fistulierende Schnitte durch andere Gewebsabschnitte angelegt werden.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass Linsengewebe zur Eindämmung von Presbyopie verändert wird und bei der Kataraktchirurgie bei geplanter Entfernung des Gewebes gelockert wird.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass bei einer Schieloperation der Muskel geschnitten wird mit der Zielstellung einer Verkürzung oder Verlängerung.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass verschlossene Tränenwege erweitert oder geöffnet werden

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass Entspannungsschnitte in horizontaler, vertikaler und anderer dreidimensionaler Richtung in der Hornhaut geführt werden, um Refraktionsanomalien zu korrigieren.

20. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in dem organischen Material Kavitäten und/oder Kanäle gebildet werden.

21. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die ultrakurzen Impulse mit Hilfe eines impulsformenden Verfahrens in einem Kurzimpulslaser erzeugt werden.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass ein impulsformendes, phasenmodulierendes Verfahren in einem CPA-Laser zur Verstärkung der ultrakurzen Impulse verwendet werden.

23. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein hochenergetischer „cavity-dumped“ Oszillator verwendet wird.

24. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein aktives Element eines Lasers aus direkt diodengepumpten Yb-dotierten Materialien wie beispielsweise Yb-Glas, $KY(WO_4)_2$, $KGd(WO_4)_2$, Sc_2O_3 , CaF_2 oder Y_2O_3 -Keramikmaterial in einem Oszillator und/oder einem Verstärker verwendet wird, mit Wellenlängen der Laserstrahlung im infraroten Spektralbereich von etwa $1.0\mu m$ bis etwa $1.2\mu m$.

25. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als ein impulserzeugender Laser ein mit seltenen Erden do-

tierter Faserlaser verwendet wird.

26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein Faserverstärker verwendet wird, welcher eine Doppelmantelstruktur aufweist.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

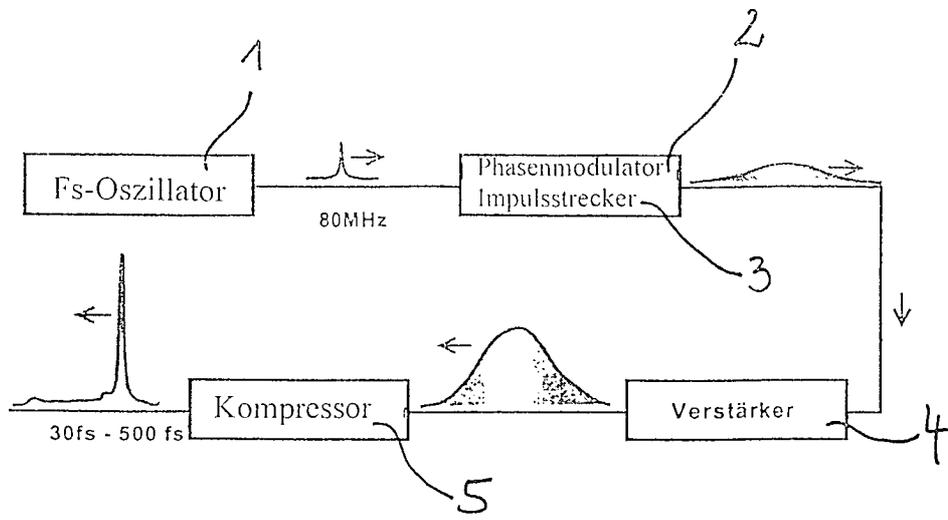


Fig. 1

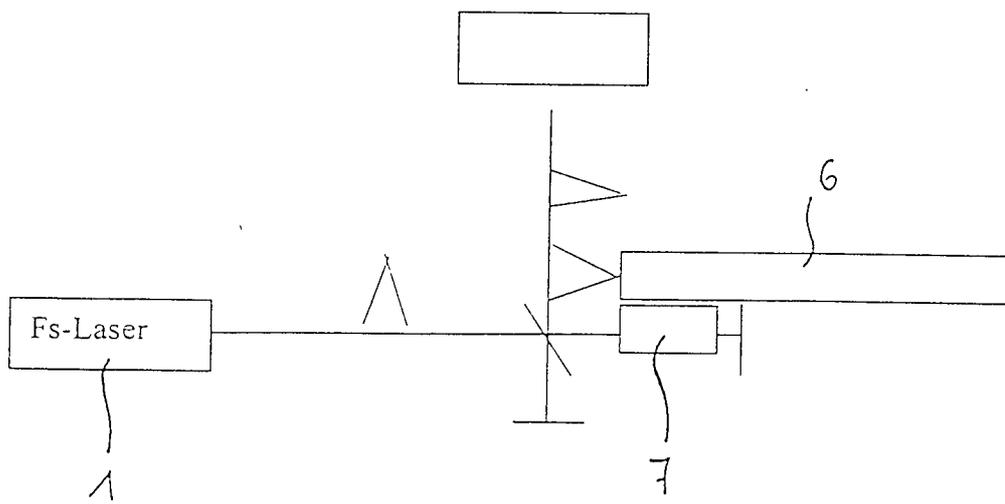


Fig 2.