(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 698 12 119 T2** 2004.01.08

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 010 219 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 12 119.8**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US98/16722**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 945 754.4**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 99/013540**
(86) PCT-Anmeldetag: **12.08.1998**
(87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: **18.03.1999**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.06.2000**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **12.03.2003**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.01.2004**

(51) Int Cl.[7]: **H01S 3/02**
G05F 1/575, H01G 4/12, H01S 3/11

(30) Unionspriorität:
924176 **05.09.1997** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, ES, FR, GB, IT, NL, SE

(73) Patentinhaber:
Coherent, Inc., Santa Clara, Calif., US

(74) Vertreter:
Blumbach, Kramer & Partner GbR, 65187 Wiesbaden

(72) Erfinder:
CAPRARA, Andrea, Menlo Park, US; SPINELLI, A., Luis, Sunnyvale, US

(54) Bezeichnung: **WIEDERHOLT GEPULSTER FESTKÖRPERLASERRESONATOR MIT MEHREREN VERSCHIEDENEN VERSTÄRKUNGSMEDIEN**

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

Technischer Bereich der Erfindung

[0001] Die Erfindung bezieht sich allgemein auf wiederholt gepulste Festkörperlaser. Sie befasst sich insbesondere mit einem Lasersystem, in welchem ein kontinuierlich gepumpter, gütegeschalteter Resonator einen Strom von infraroten Laserstrahlungsimpulsen liefert.

Erörterung des technischen Hintergrundes

[0002] Eine bevorzugte Art eines bekannten Laserresonators zur Erzeugung eines Stromes von Laserstrahlungsimpulsen für mehrere Laseranwendungen ist ein kontinuierlich gepumpter, wiederholt gepulster, gütegeschalteter Resonator. In einer besonders bevorzugten bekannten Ausführungsart des Resonatortyps wird das kontinuierliche Pumpen von einer Vielzahl von Laserdioden an ein Festkörper-Verstärkungsmedium geliefert wie etwa Nd:YAG, Nd:YVO_4, Nd:YLF oder dergleichen. Resonatoren, die diese Verstärkungsmedien enthalten, liefern eine Grundlaserstrahlung bei Infrarot (IR) Wellenlängen, die entsprechend einer speziellen Anwendung bequem in eine Strahlung kürzerer Wellenlängen durch einen oder mehrere Frequenzverdopplungs- oder -Mischschritten in optischen nichtlinearen Medien (Kristallen) umgesetzt werden können. Ein derartiger Resonatortyp kann effizient arbeiten und kompakt sein, beispielsweise mit einer Resonatorlänge von etwa 0,5 Meter (m), oder weniger. Der Resonator kann zur Reduzierung seiner gesamten körperlichen Dimension oder zum Erleichtern des Pumpens gefaltet werden.

[0003] Trotz der vorstehend beschriebenen allgemeinen Vorteile an Effizienz, Größe und Wellenlängen-Flexibilität ist dennoch eine bekannte wiederholt gepulste Laserresonatoranordnung begrenzt im Bereich der Impulsparameter oder der Impulswiederholungsfrequenzen (Impulsfrequenzen), die wirksam abgegeben werden können. Diese Bereiche sind durch charakteristische Eigenschaften eines speziellen Verstärkungsmediums bestimmt, insbesondere die Lebensdauer des angeregten Zustandes (τ) und der Verstärkungsquerschnitt (σ). Wenn eine potentielle Laseranwendung eine gepulste Laserstrahlung mit Impuls- und Frequenzparametern verlangt, die durch ein bekanntes Verstärkungsmedium nicht wirksam bereit gestellt werden können, dann kann diese Anwendung bestenfalls unwirksam versorgt werden.

[0004] Für einen speziellen Impulsparameter oder -frequenzbereich kann der zur Verfügung stehende effiziente Leistungsausgang durch thermische Linsenbildung in welchem Verstärkungsmedium auch immer begrenzt sein. Die thermische Linsenbildung ist die in dem Verstärkungsmedium induzierte Brechungsleistung aufgrund der Brechungsindexveränderung mit dem Temperaturanstieg, der aus der absorbierten Pumpleistung resultiert. Thermische Linsenbildung kann signifikant mit Veränderungen der absorbierten Leistung variieren und weiterhin auch mit Variationen in der Impulsfrequenz. Während optische Komponenten eines Resonators so gewählt werden können, dass sie für einen bestimmten Pegel der thermischen Linsenbildung kompensieren, ist die Konfiguration typischerweise effektiv nur für einen begrenzten Bereich der Pumpleistung und der Impulsfrequenz.

[0005] Es besteht ein Bedarf an einer Laserresonatoranordnung, die mit den oben erwähnten Beschränkungen des Laserbetriebs nicht mehr behaftet ist, welche durch Eigenschaften des Verstärkungsmediums eingeprägt sind. Vorteilhafterweise sollte eine solche Anordnung auch Mittel zum aktiven Kompensieren von Variationen in der thermischen Linsenbildung in einem Verstärkungsmedium umfassen.

[0006] Erfindungsgemäß wird dazu ein kontinuierlich gepumpter, wiederholt gepulster Laser gemäß Patentanspruch 1 vorgeschlagen, auf den jetzt Bezug genommen wird.

[0007] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung können dadurch, dass zwei oder mehrere unterschiedliche Verstärkungsmaterialien in einem einzigen Resonator vorgesehen werden sowie durch unabhängiges und variables Pumpen dieser Verstärkungsmedien, impulsfrequenzabhängige Laserausgangsparameter in im wesentlichen jedem Bereich zwischen Grenzbereicheigenschaften jedes der Verstärkungsmedien bereit gestellt werden.

[0008] Eine Anwendung, für die Erfindung eingesetzt werden kann, besteht in der Frequenzmultiplikation zur Umsetzung einer Impulsstrahlung bei einer Grund-IR-Wellenlänge in eine ultraviolette (UV) Strahlung. Der Wirkungsgrad der Frequenzmultiplikation in optisch-nichtlinearen Medien ist proportional zum Produkt der Spitzenleistung P_{peak} und der durchschnittlichen Leistung (P_{ave}) in der Impulsstrahlung, die frequenzmultipliziert wird. Beispielsweise besitzt ein Nd:YAG-Resonator ein Spitzen-Mittelwertprodukt mit scharfer Spitze bei einer Impulsfrequenz von etwa 7 KHz. In einem Nd:YVO_4-Resonator besitzt das Spitzen-Durchschnittsprodukt eine scharfe Spitze bei einer Impulsfrequenz von etwa 25 KHz.

[0009] Dies lässt einen weiten Bereich von Impulsfrequenzen zu, über welchen eine wirksame Frequenz-Umsetzung praktisch nicht möglich ist. Experimentell wurde gefunden, dass durch Verwendung beider Verstärkungsmedien, die in einem Resonator seriell angeordnet sind, eine Impulsstrahlung erhalten werden kann, für die das Produkt aus Spitzenleistung und Durchschnittsleistung bei einer Impulszwischenfrequenz zwischen der höheren und der niedrigeren Impulsfrequenz einen Maximalwert hat. Durch separates und differentielles Pumpen der Verstärkungsmedien ist es möglich, das Spitzen-Durchschnittsleistungsprodukt irgendwo zwischen den Spitzen für die einzelnen Verstärkungsmedien zu lokalisieren.

[0010] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind Mittel zum Kompensieren von Variationen in der thermischen Linsenbildung vorgesehen, die Variationen in der Pumpleistung oder Impulsfrequenz zuzuschreiben sind. Der Laserresonator wird durch erste und zweite Spiegel gebildet. Die Kompensationsmittel umfassen den Ersatz eines der Resonatorspiegel durch ein System eines Spiegels und einer positiven Linse (Sammellinse), wobei der Spiegel und die positive Linse einen variablen Abstand voneinander aufweisen. Durch Variieren des Abstandes zwischen dem Spiegel und der positiven Linse wird das System veranlasst, als ein einziger Resonatorspiegel mit variabler Katoptrikleistung zu wirken.

[0011] Das Spiegellinsensystem kann durch eine Anordnung zur Feststellung einer Fleckengrößenveränderung (aufgrund einer Veränderung in der thermischen Linsenbildung) eines Strahles aktiv gesteuert werden, der in dem Resonator zirkuliert, und durch Erzeugen eines Signals aus der festgestellten Fleckgrößenveränderung, das die Trennung oder den Abstand zwischen dem ebenen Spiegel und der positiven Linse variiert, wodurch die Veränderung kompensiert wird.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0012] Die beigefügten Zeichnungen, die in die Beschreibung einbegriffen sind und einen Teil derselben bilden, erläutern schematisch eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung und dienen zusammen mit der vorstehend gegebenen allgemeinen Beschreibung und der nachfolgenden, ins Einzelne gehende Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform zur Erläuterung der tragenden Gedanken der Erfindung.

[0013] **Fig.** 1 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines wiederholt gepulsten gütegesteuerten Lasersystems entsprechend der Erfindung mit einer Resonanzkapazität, die zwei unterschiedliche Verstärkungsmedien aufweist;

[0014] **Fig.** 2 zeigt einen Graphen, der schematisch den Aufbau gespeicherter Energie in einem kontinuierlich gepumpten Verstärkungsmedium über der Zeit nach Auslösen des Pumpens zeigt;

[0015] **Fig.** 3 zeigt einen Graphen, der schematisch die Veränderung der Energie pro Impuls mit der Impulsfrequenz in dem Verstärkungsmedium der **Fig.** 2 erläutert;

[0016] **Fig.** 4 zeigt einen Graphen, der die relative Variation der Energie pro Impuls mit der Impulsfrequenz für YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 erläutert;

[0017] **Fig.** 5 zeigt einen Graphen, der schematisch die relative Variation der mittleren Leistung mit der Impulsfrequenz für YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 erläutert;

[0018] **Fig.** 6 zeigt einen Graphen, der schematisch die relative Variation der Spitzenleistung über der Impulsfrequenz für YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 erläutert;

[0019] **Fig.** 7 zeigt einen Graphen, der schematisch die Variation der Spitzenspannung, Durchschnittsspannung und des Produktes aus Spitzenspannung und Durchschnittsspannung mit der Impulsfrequenz für ein beliebiges Verstärkungsmaterial erläutert;

[0020] **Fig.** 8 zeigt einen Graphen, der schematisch die relative Variation des Produktes aus Spitzen- und Durchschnittsleistung mit der Impulsfrequenz für YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 zeigt, die alle mit der Variation des Produktes aus Spitzen- und mittlerer Leistung für einen Resonator verglichen werden, der sowohl Nd:YAG als auch Nd:YVO_4 aufweist;

[0021] **Fig.** 9 zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Lasersystems mit einem Resonator, der eine bevorzugte Ausführungsform der aktiven Mittel zum Kompensieren von Variationen der thermischen Linsenbildung in Verstärkungsmedien umfasst; und

[0022] **Fig.** 10 erläutert noch eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lasersystems mit einem Resonator , der eine weitere bevorzugte Ausführungsform der aktiven Mittel zum Kompensieren der Variationen der thermischen Linsenbildung in Verstärkungsmedien umfasst.

Ins Einzelne gehende Beschreibung der Erfindung

[0023] Unter Bezugnahme auf die Figuren, in denen gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet sind, zeigt **Fig.** 1 eine bevorzugte Ausführungsform eines kontinuierlich gepumpten wiederholt gepulsten und gütegeschalteten Lasersystems **30** entsprechend der Erfindung. Das Lasersystem **30** umfasst einen dreiarmigen oder X gefalteten Resonator **32**, der zwischen den Spiegeln **34** und **36** ausgebildet ist. Laserstrahlung zirkuliert zwischen dem Resonator, wie schematisch durch die Strahlen **33** angedeutet ist. Der Spiegel **36** ist teilweise transparent und wirkt als ein Ausgangskopplungsspiegeh des Resonators **32**. Im Resonator **32** sind erste und zweite Verstärkungsmedien (Stäbe) **38** bzw. **40** lokalisiert. Die Stäbe **38** und **40** sind aus unterschiedlichen Materialien mit verschiedenen charakteristischen Lebensdauern (angeregter Zustand) oder unterschiedlichen Verstärkungsquerschnitten gebildet, die jedoch mit etwa der gleichen Wellenlänge Laserstrahlen abgeben.

[0024] Während des Betriebs des Lasersystems **30** wird eine Pumpstrahlung **39** kontinuierlich durch nicht dargestellte erste und zweite Diodenlaserreihen oder -balken geliefert, deren kollektiver Ausgang durch Fasern **42** und **44** und Fokusierlinsen **40** bzw. **48** über die resonator-gefalteten Spiegeln **50** und **52** zu den Stäben **38** und **40** gerichtet sind. Die gefalteten Spiegel **50** und **52** sind natürlich mit einer Beschichtung versehen, welche Laserstrahlung **33** reflektiert und Pumplicht **39** überträgt. Ein durch Hochfrequenz (RF) angetriebener akustisch-optischer Güteschalter **54** ist im Resonator **32** in der Nähe des Ausgangskopplungsspiegels **36** lokalisiert. Während RF Leistung dem Güteschalter **54** zugeführt wird,

wird die Abgabe von Laserstrahlung im Resonator **32** gesperrt. Wiederholtes Ein- und Ausschalten der Hochfrequenzspannung bei einer bestimmten Frequenz lässt den Resonator **32** Laserimpulse mit der gleichen Impulsfrequenz erzeugen. Ein Faltspiegel **55** richtet infrarote Ausgangsstrahlung (bei der Grundstrahlungsfrequenz ω) auf einen ersten, nicht-linearen Kristall **57** zur Frequenzverdopplung (ω in 2ω). Die verdoppelte Frequenz wird dann mit der Grundfrequenz in einem zweiten nicht-linearen Kristall **59** gemischt und ergibt eine frequenzverdreifachte Strahlung (**3ω**).

[0025] In einem bevorzugten Beispiel des Resonators **32** ist der Spiegel **36** ein ebener Spiegel und der Spiegel **34** ist ein konvexer Spiegel mit einem Krümmungsradius von etwa 20,0 cm.

[0026] Der Stab **40** ist ein 0,6%-dotierter ND:YVO_4 Stab mit etwa 3,0 mm ×3,0 mm Querschnitt und einer Länge von etwa 7,0 mm. Stab **38** ist ein 1,0%-dotierter Nd:YAG Stab mit etwa 3,0 mm × 3,0 mm Querschnitt und einer Länge von etwa 10,0 mm. Der Spiegel **34** wird vorzugsweise so nahe wie möglich an dem Stab **38** mit einer Entfernung von etwa 2,0 bis 3,0 cm (des gefalteten Weges) platziert, was für die Unterbringung des gefalteten Spiegels **55** ausreicht. Die Gesamtlänge des Resonators (gefalteter Weg) beträgt etwa 22,0 cm. Nichtlineare Kristalle **57** und **59** sind Lithiumborat (LBO) Kristalle.

[0027] Die Form und die beispielhaften Komponentenspezifikationen des Resonators **32** sollten nicht als beschränkend angesehen werden. Aus der nachfolgenden detaillierten Beschreibung der Grundzüge der Erfindung wird der Fachmann einen großen Bereich von Resonatorkonfigurationen entwickeln, und zwar gefaltete oder ungefaltete, wobei die gleichen oder unterschiedlichen Kombinationen von Verstärkungsmedien entweder stirnseitig gepumpt oder quergepumpt und verschiedene Gütegeschaltete Medien gewählt sein können. Der Fachmann wird auch feststellen, dass die Anwendungen der Erfindung nicht auf jene beschränkt sind, die eine Frequenzmultiplikation umfassen. Weiterhin ist die Erfindung nicht beschränkt auf die Anwendung lediglich zweiter Verstärkungsmedien in einem Resonator. Drei oder mehr unterschiedliche Medien können im Resonator vorgesehen sein, vorausgesetzt, dass diese Medien bei etwa der gleichen Wellenlänge Laserstrahlung abgeben.

[0028] Es wird hier hervorgehoben, dass das Vorsehen von Stäben **38** und **40** unterschiedlicher Verstärkungsmaterialien, um im Endeffekt ein "Hybridverstärkungsmedium„ zu schaffen, nicht verwechselt werden sollte mit bekannten polarisationsgütegeschalteten Resonatoranordnungen, in denen zwei Stäbe des gleichen Verstärkungsmaterials vorgesehen worden sind, um die thermisch induzierte Doppelbrechung zu kompensieren. In diesen bekannten Anordnungen sind diejenigen Resonatorparameter, die durch das Verstärkungsmedium beschränkt sind, im wesentlichen die gleichen, ob nun ein oder zwei Stäbe verwendet werden. Die Art und Weise, in welcher unterschiedliche Verstärkungsmaterial-Charakteristiken in ergänzender Weise in einem Zweistab-Resonator entsprechend der Erfindung kombiniert werden können, wird nachstehend unter Bezugnahme auf die **Fig.** 2–8 beschrieben.

[0029] Gemäß zunächst **Fig.** 2 zeigt die Kurve A schematisch den Aufbau gespeicherter Energie in einem kontinuierlich gepumpten beliebigen Verstärkungsmedium oder Verstärkungsmaterial (m) über der Zeit. Die gespeicherte Energie baut sich anfänglich mit der Zeit relativ scharf linear auf und bildet sich danach in abnehmender Weise auf einen Grenzwert hin auf, der das Produkt aus Pumpleistung und charakteristischer Lebensdauer τ_m des Materials ist. τ_m entspricht ungefähr dem Schnitt einer Verlängerung (Linie B) des linearen Teils der Kurve A mit dem Grenzwert der gespeicherten Energie.

[0030] Kurve C gemäß **Fig.** 3 zeigt schematisch die Variation der Energie pro Impuls (ε) als Funktion der Impulsfrequenz (f). Sie bleibt im wesentlichen bis zu einer Frequenz von etwa $1/\tau_m$ konstant und fällt danach mit der Impulsfrequenz ab. Mittlere Ausgangsleistung, die das Produkt der Energie pro Impuls und der Impulsfrequenz ist, wird mit der Impulsfrequenz anfänglich linear durch einen Impulsfrequenzbereich 0 bis $1/\tau_m$ (entsprechend dem nahezu konstanten Teil der Kurve C und dann mit zunehmender Impulsfrequenz abfallend ansteigen.

[0031] **Fig.** 4 zeigt für Nd:YLF die relative Energie pro Impuls als Funktion der Frequenz für Nd:YLF (Kurve D), für Nd:YAG (Kurve E) und für Nd:YVO_4 (Kurve F). In der graphischen Darstellung der **Fig.** 4 wie in anderen Vergleichsgraphen, die weiter unten noch erläutert werden, ist angenommen, dass die Materialien mit der gleichen Leistung in der im wesentlichen gleichen Resonatorkonfiguration gepumpt werden. Nd:YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 haben charakteristische Lebensdauern von etwa 500, bzw. 32, bzw. 90 Microsekunden (μs). Relative Verstärkungsquerschnitte für diese drei Materialien sind in beliebigen Einheiten etwa 2, bzw. 3 beziehungsweise 15. Nd:YLF kann die höchste Energie pro Impuls liefern, jedoch kann diese scharf für Impulsfrequenzen jenseits von etwa 1 KHz abfallen. Nd:YVO_4 liefert die kleinste Maximalenergie pro Impuls, dies kann jedoch bis zu einer Impulsfrequenz von etwa 10,0 KHz aufrecht erhalten werden und fällt nur langsam mit der Impulsfrequenz danach ab. Nd:YAG hat eine Energie pro Impuls gegen Impulsfrequenzcharakteristik, die zwischen derjenigen von Nd:YLF und Nd:YVO_4 liegt.

[0032] Aus **Fig.** 5 entnimmt man, dass Nd:YLF (Kurve G) eine nahezu konstante maximale mittlere Leistung bei Impulsfrequenz oberhalb von 1 KHz liefern kann, während Nd:YAG (Kurve H) und Nd:YVO_4 (Kurve I) mit zunehmenden höheren Frequenzen zur maximalen durchschnittlichen Leistung ansteigen.

[0033] Aus **Fig.** 6 entnimmt man, dass bezüglich der Spitzenleistung als Funktion der Frequenz die Ei-

genschaften von Nd:YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4 mit den Energie pro Impuls Eigenschaften gemäß **Fig.** 4 im wesentlichen vergleichbar sind, wobei Nd:YLF (Kurve J) die höchste Spitzenleistung und Nd:YAG (Kurve K) und Nd:YVO_4 (Kurve L) geringere Spitzenleistung erbringen, jedoch mit einem zunehend schärferen Abfall der Spitzenleistung mit der Frequenz.

[0034] Welche der vorstehend erörterten frequenzabhängigen Eigenschaften von besonderer Bedeutung ist, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Bei bekannten Lasern besteht eine Hauptüberlegung in der Wahl des speziellen Verstärkungsmediums. Man sieht jedoch aus den graphischen Darstellungen der exemplarischen Lesematerialeigenschaften, dass die Eigenschaften einzelner Verstärkungsmaterialien sich wesentlich verändern können, wobei beträchtliche Löcher zwischen ihnen auftreten können. Deshalb kann es Anwendungsfälle geben, für welche kein spezielles Verstärkungsmaterial eine ideale Gruppe von Eigenschaften bietet.

[0035] In einem erfindungsgemäßen Lasersystem jedoch ist es möglich, eine Laserstrahlung zu erzeugen, die Parameter aufweist, die im wesentlichen irgendwo zwischen den Parametern der Laserstrahlung liegen, die durch Verwendung irgendeines Verstärkungsmediums allein erzeugt werden, und zwar in dem zwei unterschiedliche Verstärkungsmaterialien in einem einzelnen Resonator benutzt werden, speziell einem Resonator wie etwa der Resonator **32** aus **Fig.** 1, in welchem die Verstärkungsmedien individuell und daher wahlweise gepumpt werden können. Ein Beispiel der Gewinnung einer Lasersystemcharakteristik, bei der das erfindungsgemäße Verfahren benutzt wird, wird nachstehend erläutert. Dieses Beispiel bezieht sich insbesondere auf passende Laserstrahlungsanforderungen zum Bearbeiteten gedruckter Schaltungsplatinen mittels UV-Laserstrahlung.

[0036] Zunächst ist es hilfreich, diejenigen Strahlungsparameter zu bedenken, die zur Erzeugung einer UV-Strahlung aus einer IR-Strahlung durch Frequenzumsetzung in optisch nicht-linearen Materialien wichtig sind. Bei dem Frequenzverdoppeln ist die bei der doppelten Frequenz (**2ω**) verfügbare mittlere Leistung etwa gleich einer Konstanten mal dem Produkt aus der Spitzen- und der mittleren Leistung bei der Grundfrequenz (ω). In ähnlicher Weise bestimmt auch das Produkt der Spitzen- und mittleren Leistung bei der Grundfrequenz die optimale Umsetzung der verdoppelten Frequenz in die verdreifachte Frequenz (**3ω**) durch Mischen der Grundfrequenz und der verdoppelten Frequenz.

[0037] Zunächst zeigt **Fig.** 7 die allgemeine Form (Kurve M) des Produkts der Spitzen- und mittleren Leistung als Funktion der Impulsfrequenz schematisch. Entsprechende Durchschnitts- (gestrichelte Kurve N) und Spitzen- (gestrichelte Kurve O) Funktionen, deren allgemeine Formen schematisch in **Fig.** 5 und 6 dargestellt sind, erläutern, worum das Spitzen-Durchschnitts-Leistungs-Produkt von Null zu einem Maximum ansteigt und anschließend zurück auf Null oder nahe Null absinkt. In **Fig.** 8 erläutern die gestrichelten Kurven P, Q und R schematisch das normalisierte Spitzen-Durchschnittsleistungsprodukt als Funktion der Impulsfrequenz für Nd:YLF, Nd:YAG und Nd:YVO_4. Man sieht, dass die Kurven scharfe Maxima bei Impulsfrequenzen von etwa 1 KHz, 7 KHz und 25 KHz haben, wobei wesentliche Leerbereiche zwischen ihnen vorhanden sind.

[0038] Während die maschinelle Bearbeitung von bedruckten Schaltungskartenmaterialien mittels UV Laser, wie etwa Kupfer, Epoxyharz und Epoxy-imprägniertes Fieberglas, bevorzugt bei Impulsfrequenzen von 7 KHz bei einer Wellenlänge von etwa 0,355 µm ausgeführt werden kann; wäre es jedoch vorzuziehen, die maschinelle Bearbeitung bei einer höheren Impulsfrequenz durchzuführen. Während jedoch gemäß **Fig.** 8 die Umsetzungseffizienz von Nd:YVO_4 Strahlung bei einer Impulsfrequenz von etwa 25 KHz maximal ist, liegt die verfügbare Energie pro Impuls in der Nähe oder unterhalb einer Ablationsschwelle für zu bearbeitende Materialien. Diese Schwelle muss überschritten werden, um das maschinelle Bearbeiten durchzuführen.

[0039] Durch Einschluss beider Nd:YAG und Nd:YVO_4 Verstärkungsmedien in einen Resonator **32** hat es sich als möglich erwiesen, eine 1,064 µm Grundlaserstrahlung mit einem Spitzen-Durchschnittsleistungsprodukt (Frequenzumsetzungsspitzenwirksamkeit) zu erzeugen, deren Maximum bei einer Impulsfrequenz zwischen derjenigen für die einzelnen Verstärkungsmaterialien liegt. Es hat sich ferner ergeben, dass durch Verändern des Verhältnisses der Pumpleistungen, die von den Fasern **42** und **44** den verschiedenen Verstärkungsmedien zugeführt werden, die Frequenzumsetzungswirksamkeitsspitze zu höheren oder niedrigeren Impulsfrequenzen verschoben werden kann, je nach dem, ob das Nd:YVO_4- oder das Nd:YAG-Verstärkungsmedium bei der höheren Leistung gepumpt wird. Überraschenderweise wurde weiterhin beobachtet, dass wenigstens bei einer Frequenz von 15 KHz eine höhere Spitzenumsetzwirksamkeit erhalten wird mit Stäben aus den beiden unterschiedlichen Verstärkungsmedien, als erhalten worden wäre mit zwei Stäben des gleichen Verstärkungsmediums. In einem Beispiel liefert das Pumpen von Nd:YAG und Nd:YVO_4 Verstärkungsmedien mit etwa 10 Watt, jedes eine mittlere Leistung von etwa 2,5 Watt bei 355 nm, bei etwa 15 KHz liefert. Die 15 KHz Frequenz hat sich als ideal erwiesen für die Laserbearbeitung mit einer 0,355 µm Strahlung.

[0040] Aus der vorstehenden Beschreibung kann entnommen werden, dass durch Verwenden unterschiedlicher Verstärkungsmedien in einem Hybrid-Laserresonator die Resonatorausgangsparameter nicht länger durch die Eigenschaften eines bestimmten Verstärkungsmediums beschränkt werden müssen. Durch Variieren der Pumpleistung für die

verschiedenen Verstärkungsmedien wird ein Mittel zum Variieren der Hybridresonator-Ausgangsparamter geschaffen. Jedoch zeigen alle Verstärkungsmedien ein gewisses Ausmaß an thermischer Linsenbildung, die bis zu einem gewissen Grad mit der Pumpleistung und der Impulsfrequenz variiert. Bei bekannten Resonatoren wird das thermische Linsenbilden durch Abschätzen der dioptrischen Leistung aufgrund thermischer Linsenbildung und Auswahl geeigneter optischer Parameter der Resonatorspiegel oder durch Schaffen von gebogenen Eingangs- oder Ausgangsflächen (Enden) auf dem Verstärkungsmedium (Stab) fest kompensiert. Dementsprechend können bekannte Resonatoren nur mit einer optimalen Strahlqualität bei festen oder bestenfalls nur wenig variablen Pumpleistung und damit Ausgangsleistung arbeiten.

[0041] Um aus der erfindungsgemäßen Konzeption größtmöglichen Vorteil zu ziehen, ist es vorteilhaft, einen Resonator zu schaffen, für den die Ausgangsparameter einschließlich Leistung und Imposlfrequenz im wesentlichen unendlich und separat variabel (zwischen den durch die verschiedenen Verstärkungsmedien gegebenen Grenzen) bei einer im wesentlichen konstanten Strahlqualität veränderbar sind. In dieser Hinsicht wäre es vorteilhaft, Mittel zur aktiven Kompensation von Variationen in den thermischen Linseneffekten in den Verstärkungsmedien bereit zu stellen. Eine Beschreibung eines solchen Mittels findet sich nachstehend unter Bezugnahme auf **Fig.** 9.

[0042] **Fig.** 9 zeigt schematisch ein weiteres bevorzugtes Ausführungsbeispiel 31 eines Lasersystems entsprechend der Erfindung. Das Lasersystem **31** umfasst einen Resonator **32A**, der dem Resonator **32** (**Fig.** 1) zu ähnlich ist mit der Ausnahme, dass der Konvexspiegel **34** des Resonators **32**, dessen ursprüngliche Position in **Fig.** 9 gestrichelt angedeutet ist, durch eine gefaltete optische Relaisanordnung **58** ersetzt worden ist. Die Relaisanordnung **58** umfasst eine Sammellinse **60** mit einer Brennweite f_1 und einen ebenen Spiegel **34A**, der von der Linse **60** um einen Abstand $f_1 \pm h$ entfernt ist.

[0043] Spiegel **34A** bildet tatsächlich ein Ende der Resonanzkavität **32A**. Der Spiegel **34A** ist auf einer linearen Translationsstufe **62** befestigt, die eine kontinuierliche Variation von h ermöglicht, wie das durch die Pfeile U angedeutet ist.

[0044] Wenn das Relaissystem **58** so lokalisiert ist, dass deren Linse von der Ursprungsposition des Spiegels **34** um eine Entfernung f_1 entfernt ist, liefert das System das Äquivalent eines einzelnen Spiegels, der an der ursprünglichen Position des Spiegels **34** lokalisiert ist und einen Krümmungsradius R* hat, der beträgt

$$R^* = f_1^2/h \qquad (1)$$

was bedeutet, dass der äquivalente Einzelspiegel in der Krümmung von konkav (wenn $h > 0$) zu konvex (wenn $h < 0$) variabel ist. In einem Beispiel des Relaissystems **58** (kompatibel mit den obigen exemplarischen Beschreibungen des Resonators **32**) besitzt die Linse **60** eine Brennweite von etwa 8,9 cm, und $f_1 \pm h$ variiert von etwa 3,0 cm bis etwa 8,0 cm zwischen den Pumpextremen. Dieses Beispiel sollte jedoch nicht als beschränkend betrachtet werden.

[0045] In einer Resonatorkonfiguration der in **Fig.** 1 erläuterten Art ist es üblich, die Resonatorspiegel und eine erwartete thermische Linsenbildung so zu wählen, dass die Laserstrahlfleckgröße (Modus) an dem gepumpten Ende eines Verstärkungsmediumsstabes eine spezielle Beziehung zur Größe des Pumpstrahls an der gleichen Stelle hat. Diese Fleckgröße variiert monoton und vorhersehbar mit Variationen in der thermischen Linsenbildung in Verstärkungsmedien durch eine gewünschte Fleckgröße. Demzufolge können in dem System **31** durch Feststellung von Änderungen der Laserstrahlfleckgröße Veränderungen in der thermischen Linsenbildung festgestellt und dann kompensiert werden durch Verlagerung des Spiegels **34** in einer geeigneten Richtung.

[0046] In dem System **31** werden Fleckgrößen-Veränderungen durch Abtasten eines Teils **63** eines Ausgangsstrahles (IR) festgestellt, in dem ein partiell reflektierender Spiegel **64** verwendet wird. Eine Linse **66** bildet den Durchmesser des Resonanzstrahls **33** auf Spiegel **36** in einem 1 : 1 Verhältnis auf einer Fotodiode **68** ab sowie mittels eines partiell reflektierenden Spiegels **72** auf eine Fotodiode **70** ab. Spiegel **72** ist vorzugsweise etwa gleich reflektiv und transmissiv für Laserlicht bei Grundfrequenz ω.

[0047] Die Fotodiode **70** sieht ein volles Äquivalentbild, das sich in der Größe mit Veränderungen in der thermischen Linsenbildung verändert. Nichtsdestoweniger wird ein Signal durch Fotodiode **70** erzeugt, das die volle Leistung in dem Bild repräsentiert. Eine Nadellochapertur **74** ist vor der Fotodiode **68** so vorgesehen, dass der Teil eines darauf auffallenden Bildes fixiert ist. Wenn die Größe des äquivalenten Bildes auf dem Nadelloch zunimmt oder kleiner wird, wird die Fotodiode **68** einen kleineren oder größeren Teil der Leistung in dem Bild feststellen. Demzufolge liefert das Verhältnis der Signale aus den Fotodioden **68** und **70** ein Maß der Fleckgröße. Eine Verarbeitungselektronik **76** stellt das Verhältnis der Signale, die von den Fotodioden **68** und **70** erzeugt worden sind, in Abhängigkeit zu dem einfallenden Prüfstrahl fest. Ein nominales Zielverhältnis, das durch die Wahl der Nadellochöffnung **74** vorbestimmt ist, repräsentiert eine gewünschte Laserstrahlfleckgröße. Ein Anstieg oder Abfall in diesem Verhältnis wird durch die Verarbeitungselektronik **76** als Abfall oder Anstieg in der dioptischen Leistung der thermischen Linsenbildung interpretiert. Die Verarbeitungselektronik liefert ein Signal zur Transaktionsstufe **62**, um den Spiegel **34** von der Linse **60** weg oder auf die Linse zu zu bewegen, um die Veränderung der thermischen Linsenbildung zu kompensieren und die gewünschte Strahl-

fleckgröße wieder herzustellen.

[0048] **Fig.** 10 zeigt ein weiteres bevorzugtes Ausführungsbeispiel 35 eines erfindungsgemäßen Lasersystems, bei dem Mittel zur Kompensation von thermischen Linsenbildungsschwankungen in Verstärkungsmedien vorgesehen sind. Das System **35** umfasst einen Resonator **32B**, der dem Resonator **32** aus **Fig.** 1 ähnlich ist mit der Ausnahme, dass der konvexe Spiegel **34** des Resonators **32** durch ein System **61** mit einer Sammellinse **60** und einem konkaven Spiegel **34B** ersetzt worden ist. Der ebene Ausgangskopplungsspiegel **36** ist soweit wie möglich auf den Stab **40** zu bewegt worden, wie es der gefaltete Spiegel **52** und der Güteschalter **54** es erlauben. Die Linse **60** des optischen Systems **61** ist um eine Strecke (gefalteter Weg) von etwa einer Brennweite (f_1) der Linse von den Stab **38** entfernt.

[0049] Der Abstand zwischen dem konkaven Spiegel **34B** und der Linse **60** ist variabel, wie durch den Doppelpfeil U angedeutet ist. Der konkave Spiegel **34B** des optischen Systems **61** ist für einen gegebenen Betriebsmodus des Resonators **32B** an einem Abstand $f_1 + X – h_1$ von der Linse **60** beabstandet, wobei h_l eine Variable = 0 und X die Hälfte des Krümmungsradius des konkaven Spiegels **34B** sind. Wenn an einem beliebigen Augenblick im Betrieb des Resonators **32B** die thermische Linsenbildung aufgrund der Verstärkungsmedien (Stäbe) **38** und **40** eine kombinierte dioptische Leistung gleich $1/f_{thermal}$ liefert (wobei $f_{thermal}$ die äquivalente Brennweite der als eine einzelne Linse betrachteten Verstärkungsmedien ist), ist der Abstand h gegeben durch:

$$h_1 – f_1^2/f_{thermal} \quad (2)$$

,

woraus zu sehen ist, dass der Abstand X und entsprechend der Krümmungsradius des Spiegels **34B** vorteilhafterweise so gewählt ist, dass er wenigstens der beim Betrieb des Resonators **32B** erwarteten maximalen thermischen Linsenbildung entspricht. Wenn beispielsweise Linse **60** eine Brennweite von 10,0 cm hat und ein Maximalwert von $f_{thermal}$ von etwa 10 , 0 cm erwartet wird, dann hat der Spiegel **34B** vorzugsweise einen Krümmungsradius von etwa 20 cm.

[0050] Da jedenfalls die Brennweite f_1 bekannt ist und $f_{thermal}$ zu Beginn voraussagbar ist und zu jedem Augenblick gemäß Obigem aus einer Bestimmung der Laserstrahlfleckgröße bestimmt werden kann, ist die Bestimmung eines geeigneten Wertes von h_l für eine nominelle thermische Linsenbildung und folglich die Bestimmungen der Veränderungen in h_l , die zur Kompensation der Änderungen in den Linsenbildungen erforderlich sind, relativ direkt. Man bemerke jedoch, dass das optische System **61**, während die thermische Linsenbildungskompensationseinrichtung des optischen Systems **61** so wirksam in der Kompensation der thermischen Linsenbildungsvariationen wie das optische System **58** von **Fig.** 9 sein kann, erfordert, dass eine präzise Ausrichtung des Spiegels **34B** während der Translation erhalten bleibt und deshalb schwieriger in der Praxis zu verwirklichen ist.

[0051] Zusammengefasst, vorstehend wurde ein kontinuierlich gepumpter, wiederholt gepulster, gütegeschalteter Laserresonator mit zwei oder mehr verschiedenen Verstärkungsmedien beschrieben, die etwa an der gleichen Wellenlänge Laserlicht abgeben. Durch separates und variables Pumpen der verschiedenen Verstärkungsmedien kann der Laserresonator effektiv eine Ausgangsstrahlung erzeugen, deren Parameter über einen viel größeren Bereich der Impulsfrequenz konstant bleiben, als das bei der Verwendung des einen oder anderen Verstärkungsmediums alleine im Resonator möglich wäre. In zwei bevorzugten Ausführungsformen umfasst der Laserresonator Anordnungen, die eine nahe Realzeitkompensation von Variationen in der thermischen Linsenbildung in den Verstärkungsmedien ermöglichen, die sich aus Variationen in der Pumpleistung oder der Impulsfrequenz ergeben.

[0052] Die Erfindung wurde beschrieben und dargestellt anhand einer bevorzugten und anderen Ausführungsformen. Die Anmeldung ist jedoch nicht auf jene beschriebenen und dargestellten Ausführungsformen beschränkt. Vielmehr ist die Anmeldung definiert durch die hier beigeschlossenen Ansprüche.

Patentansprüche

1. Kontinuierlich gepumpter, wiederholt gepulster Laser mit einem Laserresonator (**32**), welcher an seinen gegenüberliegenden Enden durch einen ersten und einen zweiten Spiegel (**34**, **36**) abgeschlossen ist und der erste und zweite Halbleiter-Verstärkungsmaterialien (**38**, **40**) aufweist, die durch eine erste bzw. zweite Pumplichtquelle separat gepumpt werden, wobei jedes der ersten und zweiten Verstärkungsmaterialien eine Anregungswellenlänge besitzt, die ungefähr gleich einer vorgegebenen Wellenlänge ist, und jeweils erste und zweite charakteristische Lebensdauern und erste und zweite Verstärkungsquerschnitte aufweist, wobei wenigstens die charakteristischen Lebensdauern oder die Verstärkungsquerschnitte voneinander verschieden sind; und wobei Auslegungscharakteristiken des Resonators und des Ausstoßes aus den ersten und zweiten Pumplichtquellen derart gewählt sind, dass der Resonator bei der vorgegebenen Wellenlänge mit einem von der Pulswiederholungsfrequenz abhängigen Ausgangsparameter strahlt, der zwischen ersten und zweiten entsprechenden Ausgangsparametern, die erhalten worden wären, wenn der Resonator jeweils nur eines der ersten und zweiten Verstärkungsmaterialien enthalten würde, liegt.

2. Laser nach Anspruch 1, in welchem der frequenzabhängige Parameter wenigstens einer der Energie-pro-Puls-, Spitzenleistung- und Durch-

schnittsleistungsparameter ist.

3. Laser nach Anspruch 1, in welchem der frequenzabhängige Parameter das Produkt aus Spitzen- und Durchschnittsleistung ist.

4. Laser nach Anspruch 1, in welchem die ersten und zweiten Verstärkungsmaterialien Nd:YAG beziehungsweise Nd:YVO_4 sind.

5. Laser nach Anspruch 4, in welchem der frequenzabhängige Parameter wenigstens einer der Energie-pro-Puls-, Spitzenleistung- und Durchschnittsleistungsparameter ist.

6. Laser nach Anspruch 5, in welchem der frequenzabhängige Parameter das Produkt aus Spitzen- und Durchschnittsleistung ist.

7. Laser nach Anspruch 1, in welchem der Ausstoß (**39**) der ersten und zweiten Pumplichtquellen separat variabel sind.

8. Laser nach Anspruch 1, in welchem die ersten und zweiten Verstärkungsmaterialien pumpleistungsabhängige thermische Linseneigenschaften haben, und wobei der Laserresonator (**32A**) eine in ihm zwischen dem ersten Spiegel (**34A**) und den Verstärkungsmaterialien lokalisierte positive Linse (**60**) aufweist, wobei die Trennung zwischen dem ersten Spiegel und der Linse zur Kompensation von Veränderungen in den thermischen Linseneigenschaften der Verstärkungsmaterialien variabel ist.

9. Laser nach Anspruch 1, in welchem ein nicht linearer optischer Kristall (**57**) außerhalb des Laserresonators lokalisiert und so angeordnet ist, dass er die extrahierte Laserstrahlung zum Verdoppeln der Laserfrequenz aufnimmt.

10. Laser nach Anspruch 1, in welchem der Ausstoß (**39**) der ersten und zweiten Pumplichtquellen zum Variieren der Leistung des dadurch an das erste bzw. zweite Verstärkungsmaterial abgegebenen Pumplichtes unabhängig variabel sind, um dadurch den pulswiederholungsfrequenzabhängigen Ausgangsparameter wahlweise zu variieren.

11. Laser nach Anspruch 10, bei welchem die ersten und zweiten Verstärkungsmaterialien pumpleistungsabhängige thermische Linseneigenschaften haben, und in welchem der Laserresonator (**32A**) eine zwischen dem ersten Spiegel (**34A**) und den Verstärkungsmaterialien lokalisierte positive Linse (**60**) aufweist, wobei die Trennung zwischen dem ersten Spiegel und der Linse zur Kompensation von Veränderungen der thermischen Linseneigenschaften veränderlich ist.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

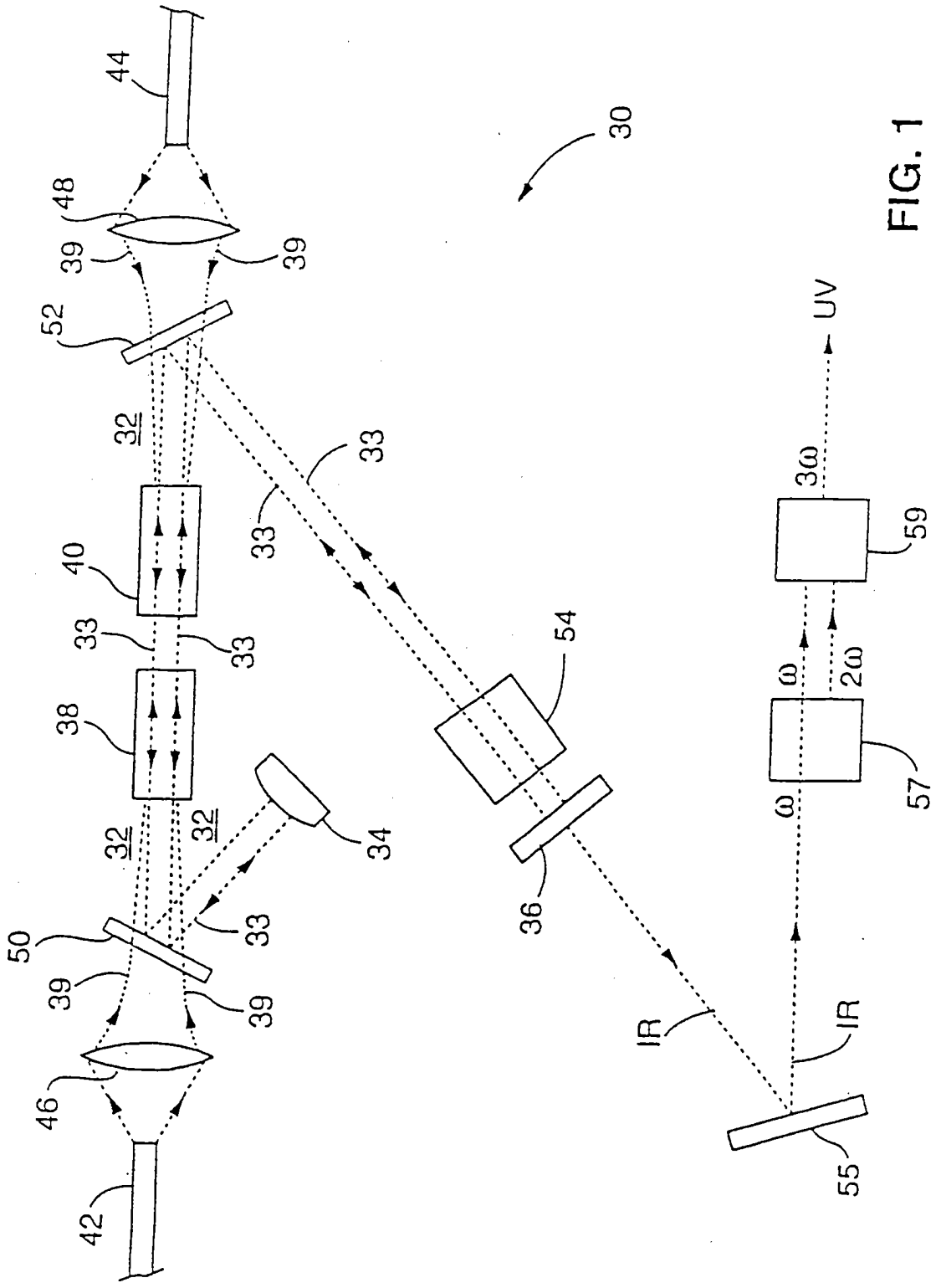

FIG. 1

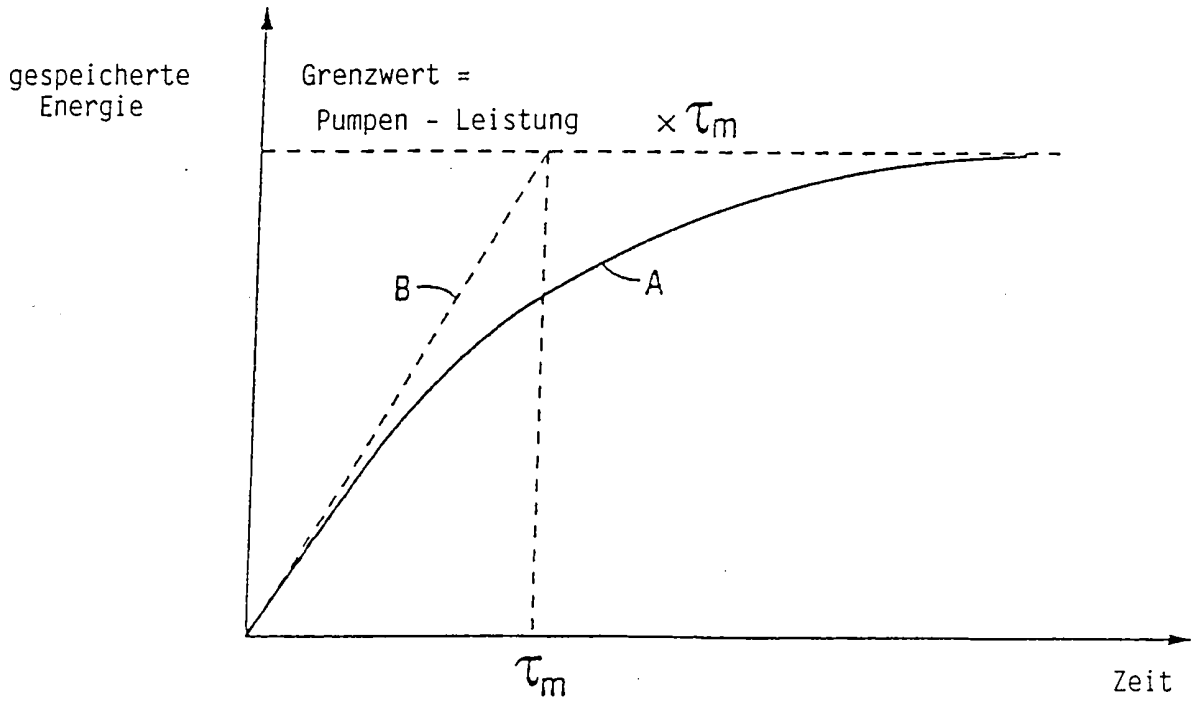
gespeicherte
Energie
Grenzwert =
Pumpen - Leistung
× τm
B
A
τm
Zeit

FIG. 2

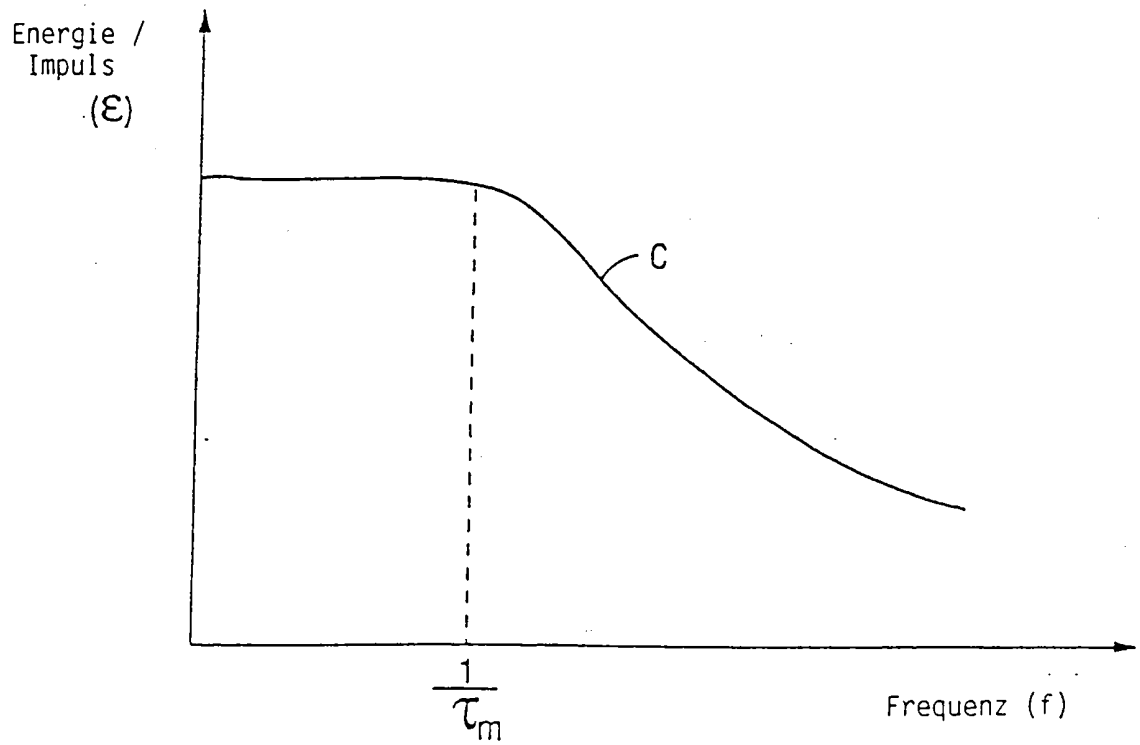
Energie /
Impuls
(ε)
C
1
τm
Frequenz (f)

FIG. 3

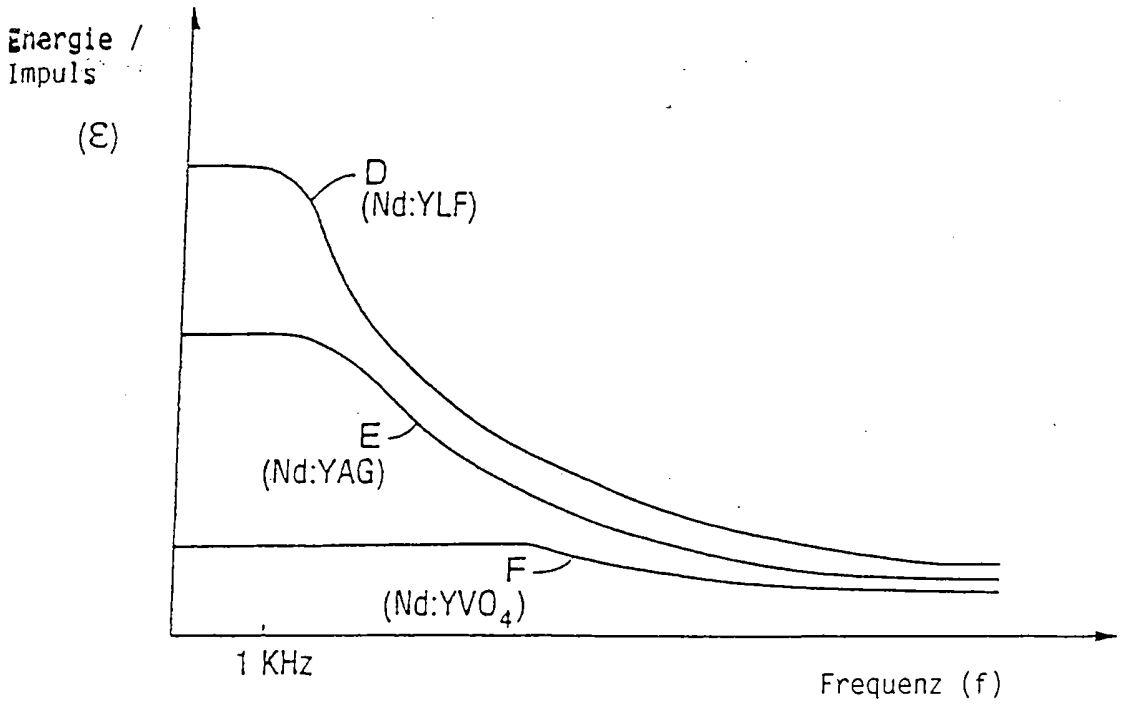
Energie /
Impuls
(E)
D
(Nd:YLF)
E
(Nd:YAG)
F
(Nd:YVO4)
1 KHz
Frequenz (f)

FIG. 4

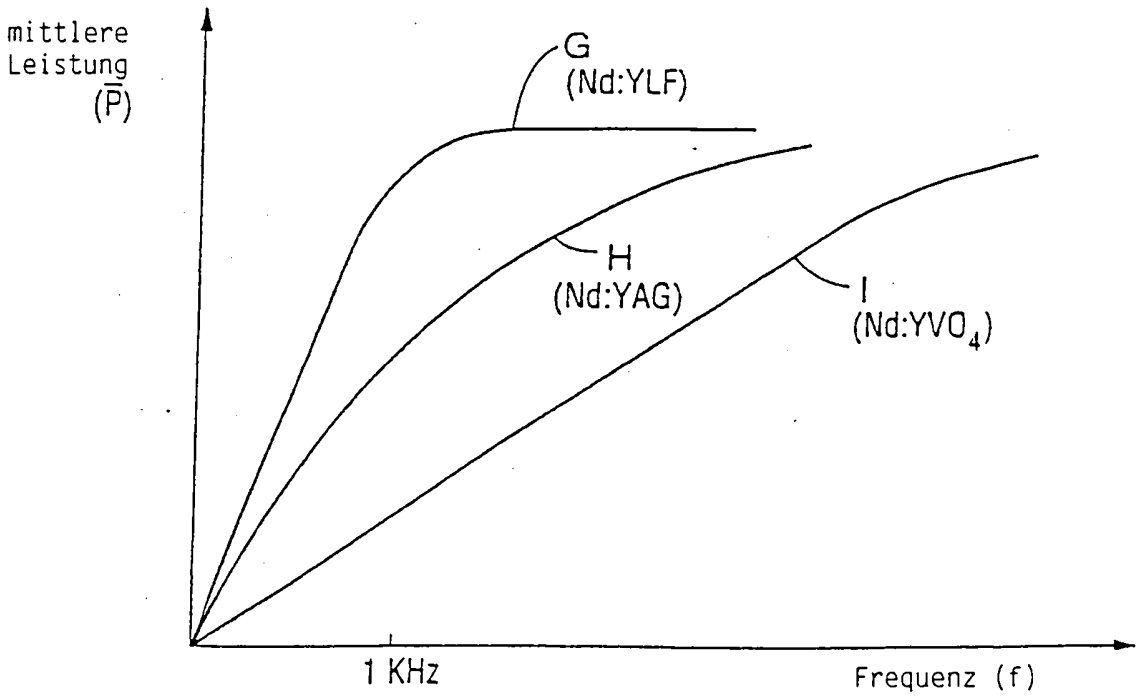
mittlere
Leistung
(P)
G
(Nd:YLF)
H
(Nd:YAG)
I
(Nd:YVO4)
1 KHz
Frequenz (f)

FIG. 5

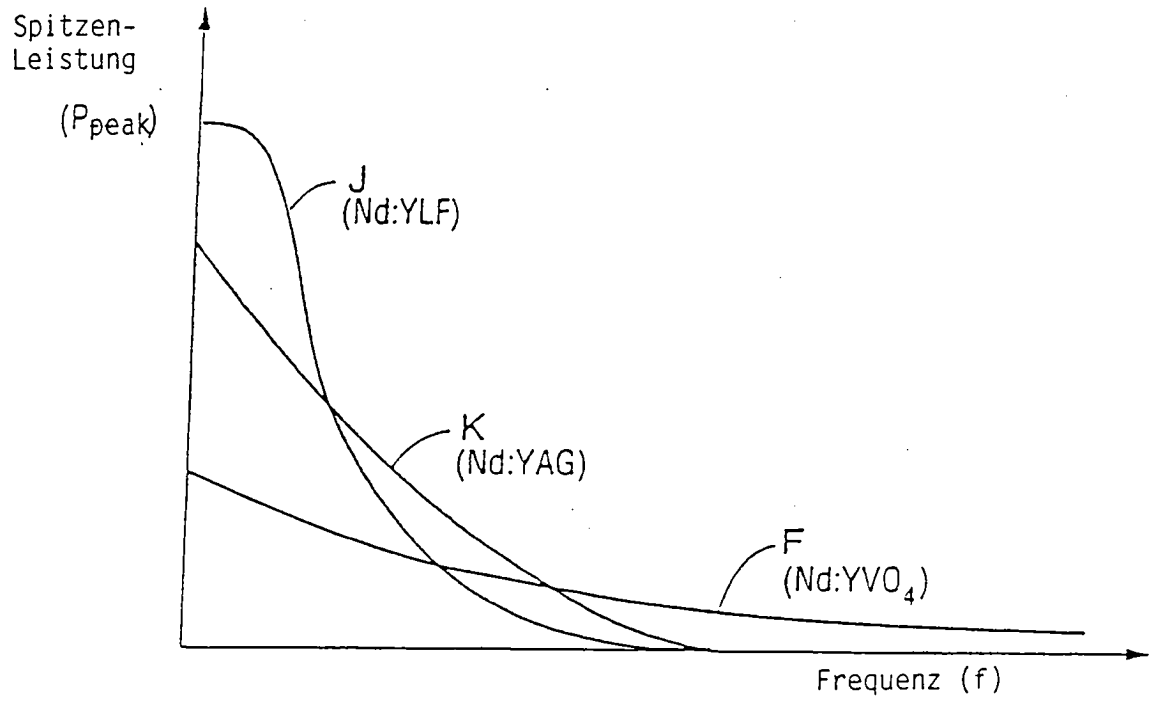
Spitzen-
Leistung
(P_{peak})
J
(Nd:YLF)
K
(Nd:YAG)
F
(Nd:YVO_4)
Frequenz (f)

FIG. 6

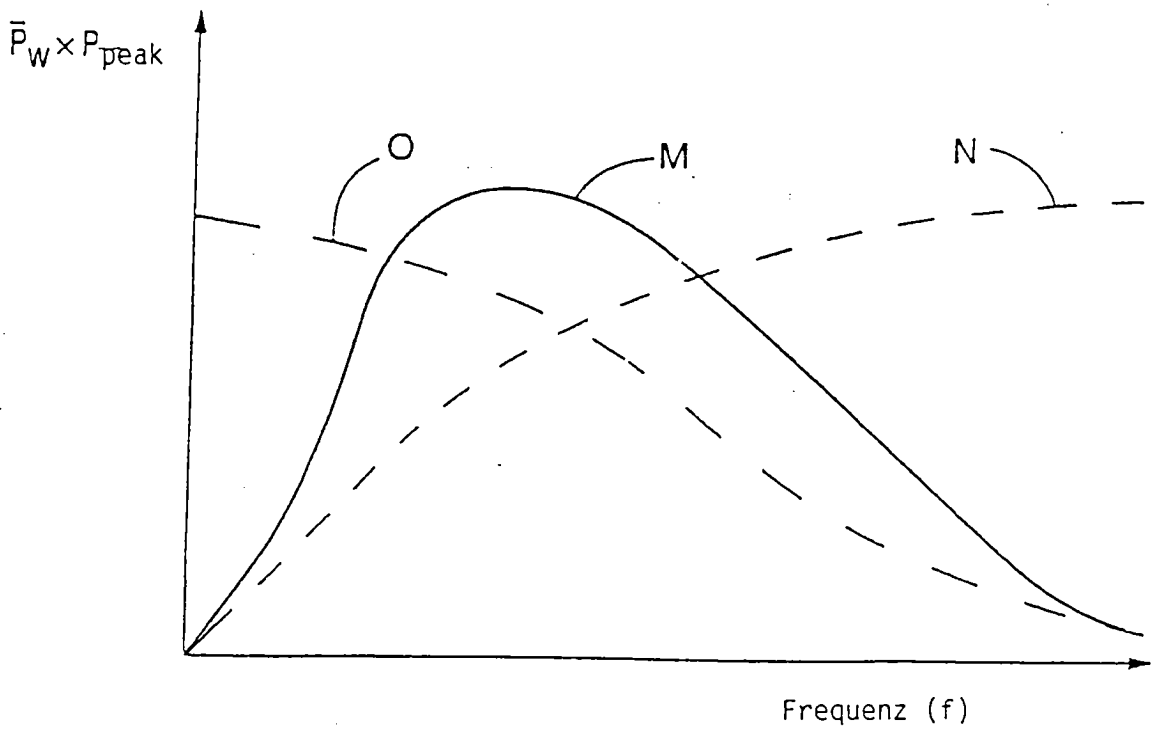
$\bar{P}_W \times P_{peak}$
O
M
N
Frequenz (f)

FIG. 7

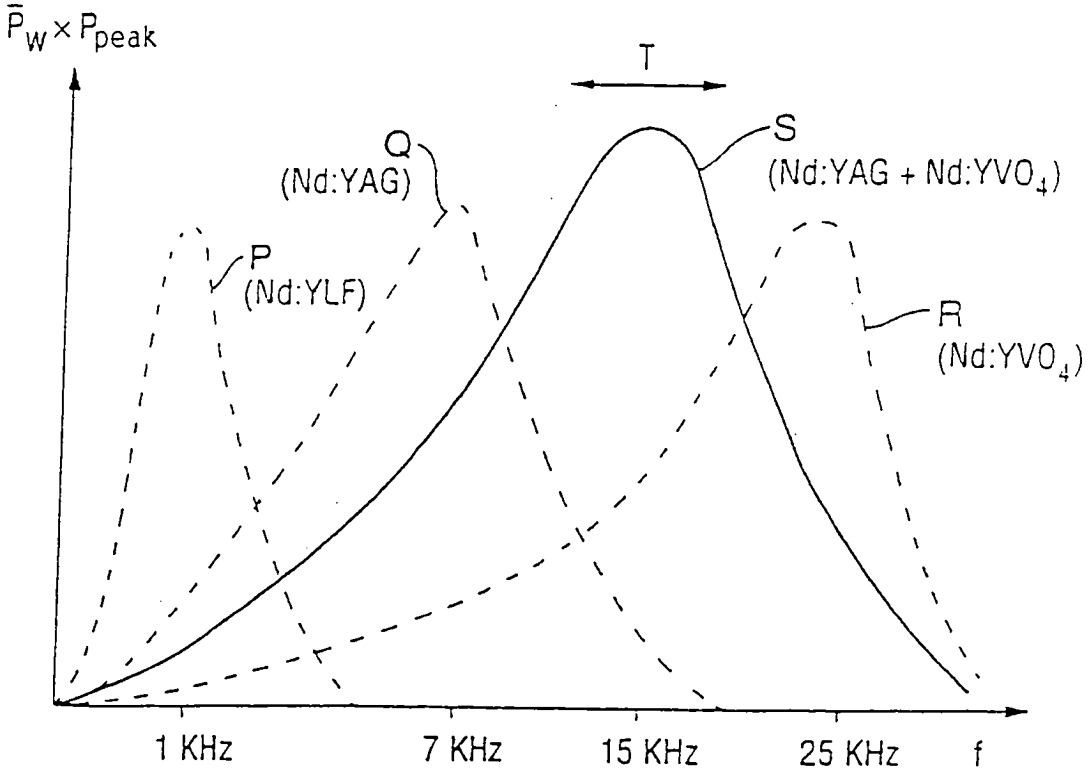
$\bar{P}_W \times P_{peak}$
T
Q
(Nd:YAG)
S
(Nd:YAG + Nd:YVO$_4$)
P
(Nd:YLF)
R
(Nd:YVO$_4$)
1 KHz
7 KHz
15 KHz
25 KHz
f

FIG. 8

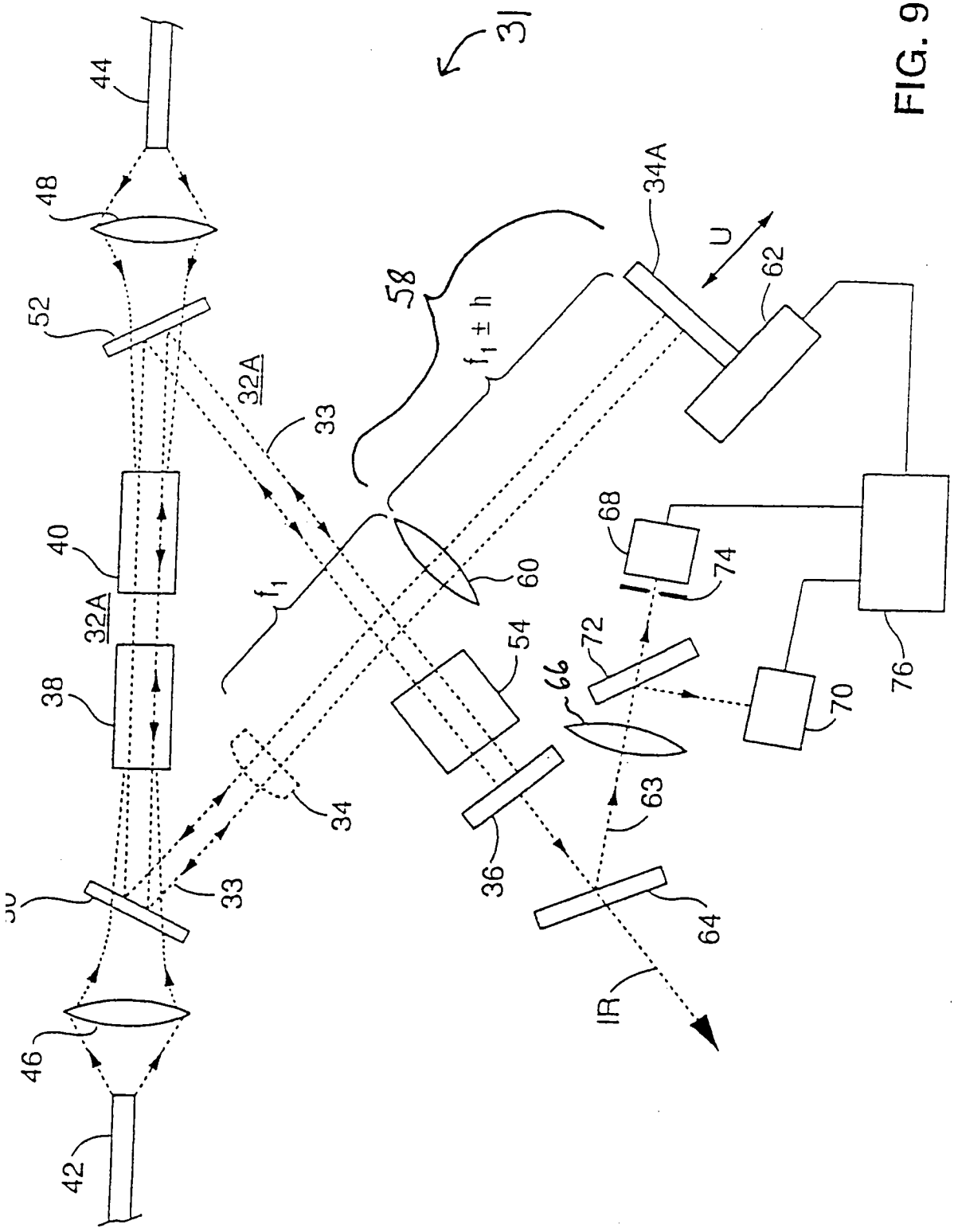
31
44
48
52
32A
33
40
32A
38
34
33
46
42
58
$f_1 \pm h$
34A
U
62
f_1
60
54
66
36
63
64
IR
68
74
72
70
76

FIG. 9

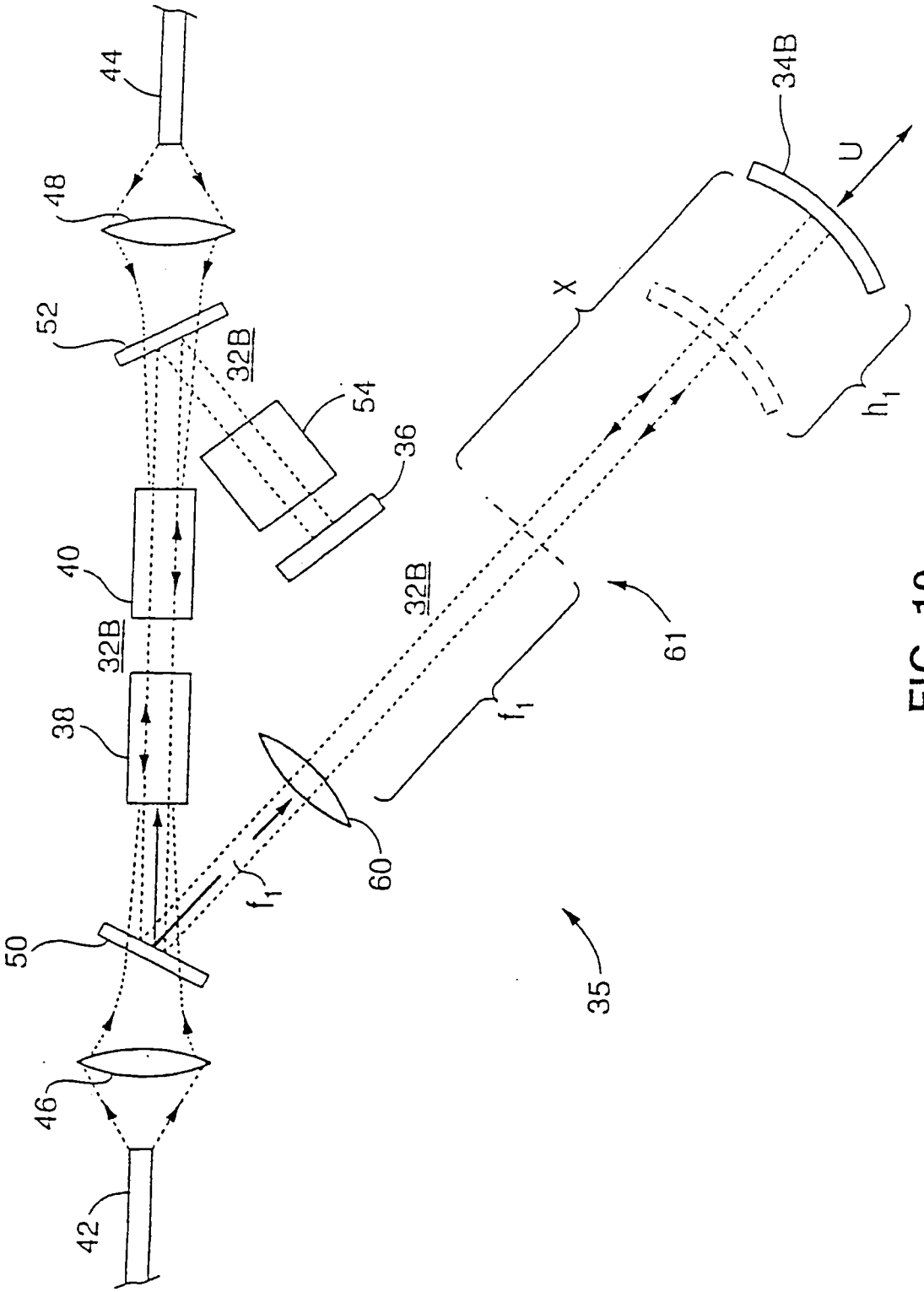

FIG. 10