

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
13. Februar 2003 (13.02.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/012941 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01S 5/00

MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO,
RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/08104

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. Juli 2002 (20.07.2002)

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): ARIPO-Patent (GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT,
SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
101 35 453.3 20. Juli 2001 (20.07.2001) DE

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu
beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) für die
folgenden Bestimmungsstaaten AE, AG, AL, AM, AT, AU,
AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,
MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI,
SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA,
ZM, ZW, ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD,
SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY,
KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE,
BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): UNIVERSITÄT KARLSRUHE [DE/DE]; Kaiser-
strasse 12, 76128 Karlsruhe (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): KÄRTNER, Franz,
Xaver [DE/US]; 77 Newtonville Ave, Newton, MA 02458
(US). MORGNER, Uwe [DE/DE]; Wörthestr. 1 c,
76776 Neuburg (DE). SCHIBLI, Thomas [DE/US]; 81
Essex St., Apt. 41, Boston, MA 02111 (US). SEITZ,
Wolfgang [DE/DE]; Südenstr. 1, 76474 Au am Rhein
(DE).

(74) Anwalt: PIETRUCK, Claus, Peter; Heinrich-Lilien-
fein-Weg 5, 76229 Karlsruhe (DE).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM,
AT (Gebrauchsmuster), AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE (Ge-
brauchsmuster), DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,

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

(54) Title: DEVICE FOR CONTROLLING THE DYNAMICS OF LASER SYSTEMS

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG ZUR KONTROLLE DER DYNAMIK VON LASERSYSTEMEN

(57) Abstract: The invention relates to a dynamically controlled laser comprising a resonator and a laser power detector. The invention is characterised in that to control the dynamics, a light source that controls an optical modulator in response to the detected laser power is provided and that the laser power detector is configured to detect the mean laser power over a resonator cycle. The optical modulator can thus be configured in such a way that it undergoes a modification to the optical refractive index by light irradiation, specifically by control light irradiation, in particular based on the principle of the free absorption of charge carriers within a semiconductor layer or a quantum well.

(57) Zusammenfassung: Beschrieben wird ein dynamikkontrollierter Laser mit einem Resonator und einer Laserleistungserfassung. Es wird vorgeschlagen, dass zur Dynamikkontrolle eine optische Modulator im Ansprechen auf die erfasste Laserleistung steuernde Lichtquelle vorgesehen ist und die Laserleistungserfassung zur Erfassung der resonatorumlaufmittelten Laserleistung ausgebildet ist. Dabei kann der optische Modulator so ausgebildet sein, dass er eine optische Brechzahländerung durch Lichteinstrahlung, insbesondere durch Steuerlichteinstrahlung erfährt, insbesondere basierend auf dem Prinzip der freien Ladungsträgerabsorption innerhalb einer Halbleiterschicht oder eines Potentialtopfes.



WO 03/012941 A2

Titel: Vorrichtung zur Kontrolle der Dynamik von Lasersystemen

5 Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft das oberbegrifflich Beanspruchte. Damit befaßt sie sich mit der Kontrolle der Laserdynamik, insbesondere die Kontrolle gegen schnelle Instabilitäten.

Es ist bei Lasersystemen oft erforderlich, das Verhalten des emittierten Laserlichtes genau kontrollieren zu können, und zwar u.a. sowohl hinsichtlich der Intensität der emittierten Leistung als auch bezüglich des zeitlichen Verlaufs.

Für eine Anwendung wird jeweils ein bestimmtes Verhalten optimal sein; über eine geeignete Auslegung des Lasersystems kann versucht werden, dieses optimale Verhalten wenigstens annäherungsweise zu erhalten; dies gilt auch für ein gewünschtes dynamisches Verhalten. Nun sind aber bei der Auslegung eines Lasersystems die frei wählbaren Parameter hinsichtlich ihrer endlichen Variationsmöglichkeiten und Anzahl oftmals nicht ausreichend, damit die dynamischen Eigenschaften des Lasersystems die gewünschten Anforderungen erreichen.

Insbesondere bei gepulsten Systemen müssen nämlich eine Vielzahl von Problemen gelöst werden, welche zu Fluktuationen oder Instabilitäten der mittleren Ausgangsleistung führen können. Gerade diese Probleme lassen sich nicht, jedenfalls nicht immer vollständig und/oder ausreichend durch Wahl eines

geeigneten Satzes der Laserparameter beheben. Häufig lassen sich daher Instabilitäten insbesondere bei gepulsten Systemen mit hohen Puls-Wiederholraten und/oder hohen Ausgangsleistungen durch passive Maßnahmen nicht beheben.

5

Ein weiteres Problem tritt insbesondere bei passiv modengekoppelten Systemen auf, und zwar dahingehend, dass diese Systeme nicht immer selbständig anschwingen und/oder sich die gewünschten Pulse nicht selbstständig formen.

10

Die Instabilitäten und Leistungsfluktuationen lassen sich zwar durch eine aktive Rückkopplung kontrollieren. So läßt sich das Anschwingverhalten von passiv modengekoppelten Lasern durch geeignete Modulation der Verluste und/oder der Nettoverstärkung innerhalb des Resonators verbessern oder es läßt sich die Modenkopplung ganz durch eine Verlustmodulation und/oder eine Modulation der Nettoverstärkung realisieren, was dann als aktive Modenkopplung bezeichnet wird.

20

Zur Unterdrückung von Fluktuationen der Ausgangsleistung und zur Unterdrückung von Instabilitäten der Laserdynamik wurde auch schon von T. R. Schibli, U. Morgner und F. X. Kärtner in "Control of Q-switched mode locking by active feedback," Optics Letters (OSA), Vol. 26, No. 3, Feb. 1/2001, eine Methode vorgestellt, welche durch aktive Rückkopplung einen oder mehrere Parameter des Lasersystems dynamisch verändert. So kann die Rückkoppelschleife die Pumpleistung des Lasersystems modulieren.

30

Aus der US-PS 5,408,480 ist auch schon ein optisch gesteuerter interaktiver Q-switch bekannt, der auf einen kurzen Lichtpuls anspricht, zum Beispiel von externen lichtemittie-

renden Dioden oder Diodenlasern, um einen Ausgangslaserpuls aus in einem Laser gespeicherte elektronische Energie zu erzeugen. Die Zuschaltungsfrequenz soll eine unabhängige Regelung der Ausgangslaserpulsbreite mit einer schnellen Anstiegszeit für jeden Ausgangslaserpuls vorsehen.

Laut der US-PS 5,339,323 ist weiter ein Lasersystem bekannt, in dem die Laserpulsenergie durch Rückkopplung des Laser-Q-switches kontrolliert wird. Ein Rückkopplungssignal wird verwendet, um die Zeitdauer des Zustandes mit hohem Verlust des Q-Schalters zu kontrollieren, um automatisch die Ausgangspulsenergie einzustellen.

Aus der US-PS 5,844,932 ist eine Microlaser cavity bekannt und ein extern gesteuerter, passiv schaltender Microlaser für Pulse mit einem sättigbaren Absorber und einer Vorrichtung zum Einführen eines Strahles in die Microlasercavity, die die Sättigung des sättigbaren Absorbers auslöst.

Auch ist aus der DE 199 62 047 A1 eine Vorrichtung zur schnellen aktiven Stabilisierung der Ausgangslaserleistung bekannt, wobei ein Bruchteil des Ausgangssignals des Lasers, geregelt durch aktive Rückkopplung, derart dem Eingang des Lasers zugeführt wird, daß die über die Resonatorumlaufzeit gemittelte Laser-Ausgangsleistung konstant bleibt.

Die DE 196 07 689 A1 zeigt einen gütegesteuerter Festkörperlaser, der eine schmalbandige Laserdiode aufweist, die eine schmalbandige Ausgangsstrahlung als Seed-Strahlung zur Anregung eines Festkörpers liefert, so daß in dem Resonator des Festkörperlasers nur eine einzige wellenlängenstabile Longi-

tudinalmode anschwingt und entsprechende Strahlung emittiert wird.

Bekannte Ansätze zur Fluktuationsunterdrückung der Ausgangsleistung und Instabilitätsunterdrückung der Laserdynamik sind
5 jedoch oftmals unzureichend.

Wenn etwa Verlustmodulatoren eingesetzt werden, ergeben sich eine Reihe von Problemen. Es sind etwa Verlustmodulatoren be-
10 kannt, die auf dem elektrooptischen oder akustooptischen Effekt basieren. Diese erfordern jedoch häufig Spannungen im Bereich von einigen Kilovolt, was in Hinblick auf hohe Bandbreiten einen limitierenden Faktor darstellt. Weiter sind auch bekannte Verlustmodulatoren, die zum Beispiel auf dem
15 elektrooptischen oder dem akustooptischen Effekt basieren, nicht geeignet, um in einen Laserresonator mit hoher Repetitionsrate eingesetzt zu werden, denn die optische Weglänge dieser Modulatoren beträgt in der Regel einige Zentimeter. Dies macht deren Einsatz in Laserresonatoren von 1,5 cm opti-
20 scher Länge, entsprechend einer Pulswiederholrate von 10 GHz, unmöglich. Auch beeinflussen bekannte Verlustmodulatoren, die zum Beispiel auf dem elektrooptischen, elektroabsorptiven oder dem akustooptischen Effekt basieren, aufgrund ihrer optischen Eigenschaften, insbesondere ihrer Einfügeverluste,
25 optischen Dispersion, thermisch induzierter Linse oder beschränkter Bandbreite die Eigenschaften eines Lasers in der Regel auf eine solche negative Weise, daß deren Einsatz weiter eingeschränkt ist.

30 Auch wenn, wie prinzipiell möglich, elektrooptische und/oder akustooptische Modulatoren für den Einsatz in Laserresonatoren vorgesehen werden, ergeben sich Probleme, denn aufgrund

der Konstruktionsweise und insbesondere im Hinblick auf die typisch komplizierte elektrische Ansteuerung sind derartige Konstruktionen typisch kompliziert und/oder teuer.

- 5 Soll hingegen die Pumpleistung des Lasersystems moduliert werden, besteht ein Hauptproblem darin, dass aufgrund der endlichen Lebensdauer der Inversion des Lasermediums die Regelbandbreite des Systems stark limitiert ist. Im Falle von Festkörperlasern beträgt diese Lebensdauer Mikro- bis Milli-
- 10 sekunden, was eine effiziente Modulation auf einige wenige Megahertz beschränkt. Darüber hinaus müssen bei diesem Modulationsverfahren häufig große Stromstärken geregelt werden, wodurch die Bandbreite des Systems weiter eingeschränkt wird.
- 15 Es bestehen also insgesamt gerade dann Probleme, wenn hohe Leistungen und/oder kurze und/oder schnell folgende Pulse gewünscht werden.

Es sind zur Erzielung von kurzen Pulsen bereits passiv moden-

20 gekoppelte Lasersysteme bekannt, die sog. sättigbare Halbleiterabsorber zur passiven Modenkopplung verwenden. Dazu gehören insbesondere sogenannte "SBR", d.h. "Saturable Bragg Reflector" (siehe S. Tsuda, W. H. Knox, S. T. Cundiff, W. Y. Jan und J. E. Cunningham in " Mode-Locking Ultrafast Solid-

25 State Lasers with Saturable Bragg Reflectors," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 2, No. 3, pp. 454-464, 1996), "SAM", d.h. "Saturable Absorber Mirror" oder "SESAM", d.h. "SEmiconductor Saturable Absorber Mirror" (siehe U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kärtner, D. Kopf, B.

30 Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Hänninger, N. Matuscheck und J. Aus der Au in "Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in

Solid-State Lasers," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 2, No. 3, pp. 435-453, 1996). Die Dynamikkontrolle solcher Systeme ist jedoch noch verbesserungswürdig.

5

Das Ziel vorliegenden Erfindung besteht darin, Neues für die gewerbliche Anwendung bereitzustellen.

Die Lösung dieser Aufgabe wird unabhängiger Form beansprucht.
10 Bevorzugte Ausgangsformen sind in den Unteransprüchen enthalten.

Vorgeschlagen wird somit ein dynamikkontrollierter Laser mit einem Resonator und einer Laserleistungserfassung, welcher
15 dadurch gekennzeichnet ist, daß zur Dynamikkontrolle eine einen optischen Modulator im Ansprechen auf die erfaßte Laserleistung steuernde Lichtquelle vorgesehen ist und die Laserleistungserfassung zur Erfassung der resonatorumlaufgemittelten Laserleistung ausgebildet ist.

20

Es sind nun verschiedene optische Modulatoren einsetzbar. Prinzipiell ist es so möglich, über die Modulation einer Steuerlichtquelle die Emission des dynamikkontrollierten Lasers zu beeinflussen. Die Modulation einer Steuerlichtquelle
25 ist oft sehr schnell, also mit hohen Frequenzen möglich; da auch die Beeinflußung eines optischen Modulators durch Steuerlicht ein Vorgang ist, der sehr schnell ablaufen kann, etwa weil schnelle festkörperphysikalische Vorgänge wie Bandübergänge in Halbleitern oä. ausgenutzt werden, ist insgesamt
30 eine besonders hochfrequente Dynamikkontrolle möglich.

Die vorliegende Erfindung erlaubt somit den Aufbau eines schnellen und kostengünstigen Verlust- oder Gewinnmodulators, der innerhalb eines Laserresonators eingesetzt werden kann, ohne dessen optische Eigenschaften - abgesehen von den modulierbaren Verlusten oder Gewinnen - negativ zu beeinflussen.

Es ist möglich, daß der optische Modulator ein Verlustmodulator ist, der durch die Lichtquellensteuerung einen Verlust insbesondere im Resonator vorsieht.

10

Es kann dann der optische Modulator aus einem Halbleitermaterial bestehen, das bei der Wellenlänge der steuernden Lichtquelle eine vorgegebene Mindestabsorbtion aufweist, die ausreicht, eine solche Ladungsträgermenge und/oder -dichte zu erzeugen, daß das Laserlicht des bezüglich seiner Dynamik zu kontrollierenden Lasers in gewünschtem Maße absorbiert und/oder verstärkt wird, während das nicht steuerlichtquellenlichtbeaufschlagte Halbleitermaterial für das Laserlicht des bezüglich seiner Dynamik zu kontrollierenden Lasers zu-

15

20

Es kann eine Vorrichtung zur Laserdynamikkontrolle sowohl innerhalb als auch ausserhalb eines Laserresonators eingesetzt werden und es ist möglich und bevorzugt, wenn dem dynamikkontrollierte Laser ein Absorberspiegel, der einen sättigbaren Bragg-Reflektor umfaßt und/oder darstellt, ein halbleitender sättigbarer Absorberspiegel und/oder ein Fabry-Perot-Resonator zugeordnet ist, dessen Transmissionsverhalten und/oder Reflexionsverhalten durch die Steuerlichtquelle ver-

25

30

Wenn wie in einer bevorzugten Variante möglich, der Einsatz eines sättigbaren Absorberspiegels vorgesehen ist, kann der sättigbare Absorberspiegel typischerweise aus einem Schichtstapel von zwei Materialien bestehen, die sich im optischen Brechungsindex unterscheiden. Die Schichtdicken dieses Stapels sind jeweils so gewählt, dass deren optische Dicken einer viertel Wellenlänge des Laserlichts entsprechen. Durch diese Struktur, welche als "Bragg-Spiegel" bezeichnet wird, entsteht ein hochreflektierender Spiegel bei der Wellenlänge des Lasers. Auf diese Struktur wird typischerweise ein sättigbarer Absorber aufgebracht, der die Eigenschaft besitzt, dass dessen Verluste bei Beleuchtung mit hoher Intensität gering und bei Beleuchtung mit niedriger Intensität hoch sind. Diese sättigbaren Absorber können durch eine Vielzahl von Anordnungen erreicht werden.

Besonders vorteilhaft an den erfindungsgemäßen Vorrichtungen ist die bevorzugt implementierte Möglichkeit, die extern steuerbare freie Ladungsträger-Absorption gezielt mit einem Verlustmodulator auszunutzen. In einer besonders bevorzugten Variante der vorliegenden Erfindung nutzt der optische Modulator das Prinzip der freien Ladungsträgerabsorption, die auch als "FCA" für "Free Carrier Absorption" bezeichnet wird, bzw. das Prinzip der durch die freien Ladungsträger verursachten optischen Brechzahländerung innerhalb einer Halbleiterschicht oder innerhalb eines Potentialtopfes, der auch "QW" für "Quantum-Well" genannt wird.

Vorzugsweise wird also ein erfindungsgemäßer sättigbarer Absorber mit einer "Quantum Well"-Struktur (QW) realisiert. Zu diesem Zweck kann typischerweise ein für die Wellenlänge des Lasers transparentes Material auf den sogenannten "Bragg-

Spiegel" aufgebracht sein, in dem die QW-Struktur in geeignetem Abstand zum Bragg-Spiegel eingebettet ist. Diese transparente Schicht kann nun so gewählt werden, dass diese Licht der Hilfs- bzw. Steuerlichtquelle absorbiert, durch dieses freie Ladungsträger erzeugt werden und die freien Ladungsträger in dieser Schicht für das Laserlicht zu zusätzlichen Verlusten führen. Auf die Schicht können schliesslich weitere Schichten aufgebracht werden, welche zum Beispiel zu einer Felderhöhung bzw. einer Felderniedrigung innerhalb der optisch modulierbaren Schicht und der darin eingebetteten QW-Struktur führen. Es ist beispielsweise möglich, eine zusätzliche Schicht vorzusehen, die den Fresnel-Reflex an der optisch modulierbaren Schicht für Wellenlängen im Bereich von 1530 nm minimiert, d.h. als Antireflex-Beschichtung dient, wenn sie mit einem auf oder bei dieser Wellenlänge emittierenden Laser verwendet wird.

In einer besonders bevorzugten Variante ist dabei ein Verlustmodulatormittel vorgesehen, das dünne Halbleiterschichten aufweist, etwa im Bereich von einigen Hundert nm bis einigen μm Dicke. Die zur Steuerung der Verluste innerhalb der dünnen, vorzugsweise einige hundert Nanometer bis einige Mikrometer dünnen Schicht erforderlichen Leistungen liegen nur im Bereich von einigen zehn Milliwatt. Dadurch kann zum Beispiel das Licht einer kostengünstigen Laserdiode kleiner Leistung eingesetzt werden, welche eine direkte Modulation im Bereich von bis zu mehreren GHz zulässt. Dies bedeutet wiederum eine erhebliche Vereinfachung der elektronischen Treiberstufe, und zwar insbesondere sowohl im Vergleich zur direkten Modulation der Ströme der Pumpdioden, die im Bereich von einigen Watt bis einigen zehn Watt emittieren, als auch im Vergleich zu

den elektro- und akustooptischen Modulatoren, welche Spannungen im Bereich von Kilovolt benötigen.

Die Halbleiterschichten selbst sind dabei bevorzugt so gewählt, daß die Lebensdauer der freien Ladungsträger darin nur kurz ist. Aufgrund der kurzen Lebensdauer der freien Ladungsträger in dünnen Halbleiterschichten von typischerweise 10 ps bis 1 ns lassen sich solche erfindungsgemäße Vorrichtungen wesentlich schneller ansteuern, als dies zum Beispiel im Falle einer direkten Modulation des Gewinns des Lasermediums, d.h. einer Modulation der Pumpleistung, der Fall ist, da hier die relevante charakteristische Zeit die Lebensdauer der Inversion des Gewinnmediums ist, die bei den gebräuchlichen Festkörpermaterialeien zwischen 1µs und 10ms liegt.

Es wurde auch erkannt, daß es möglich und bevorzugt ist, die vorerwähnten Absorber aus der passiven Modenkopplung als steuerbare Verlustmodulatoren einzusetzen. Um den Effekt der steuerbaren Modulation effizienter zu gestalten, ist in der Regel, insbesondere im Falle der SBR oder SESAM, das Design dieser Absorber zwar anzupassen, aber typisch nur geringfügig. Da sich die SBR oder SESAM dadurch aber weder verteuern noch in ihren Eigenschaften verschlechtern, können diese Änderungen bei einem Neudesign besonders einfach mitberücksichtigt werden.

Durch die mögliche Integration von erfindungsgemäßen Vorrichtungen zum Beispiel in einen SBR bzw. die erfindungsgemäße Herrichtung eines solchen wird weder der Verlust des SBR noch dessen optische Dispersion merklich beeinflusst. Aufgrund der möglichen geringen Dicke, die vorzugsweise im Bereich einiger hundert Nanometer bis einiger Mikrometer liegt,

sind im Vergleich zu bestehenden Anordnungen auch die thermischen Effekte, wie etwa thermisch induzierte Linsen, bedeutend kleiner oder in vielen Fällen völlig vernachlässigbar.

5 Die erfindungsgemäße Vorrichtungen können sowohl zur Unterdrückung der Leistungsfluktuationen und dynamischen Instabilitäten, wie etwa Güteschaltungsinstabilitäten, eines Lasersystems eingesetzt werden können, als auch zum Starten der passiven Modenkopplung und/oder zur aktiven Modenkopplung
10 sowie zur Kontrolle und/oder Unterdrückung von niederfrequenten und/oder Unterdrückung von niederfrequenten und/oder hochfrequenten Fluktuationen und/oder zur externen Rauschunterdrückung und/oder zur externen Intensitätsmodulation verwendet werden. Bevorzugt lassen lassen sich Verlustmodulatoren der Erfindung beispielsweise zur aktiven Modenkopplung,
15 zur aktiven Stabilisierung und zum Starten von Lasersystemen einsetzen. In vielen Fällen werden durch den Einsatz eines solchen Verlustmodulators die Eigenschaften des Lasersystems - außer der neu erhaltenen Möglichkeit der steuerbaren Absorption - nicht bzw. nur unwesentlich beeinflusst.
20

Aufgrund der möglichen äußerst geringen Dicke der offenbarten Verlustmodulatoren, die vorzugsweise nur einige hundert Nanometer bis einige Mikrometer Dicke aufweisen und erfordern,
25 sind die Prinzipien der Erfindung auch und gerade bei Lasersystemen mit hohen Repetitionsraten anwendbar.

Um eine besonders schnelle Regelung bzw. Dynamikkontrolle zu reealisieren, wird also einem Laser bevorzugt eine Laserleistungserfassung zur Erfassung der instantanen Laserausgangsleistung und eine lineare oder nichtlineare Regelstrecke zugeordnet, die dazu ausgebildet und vorgesehen ist, die Steu-

30

erlichtquelle zur optischen Steuerung des optisch gesteuerten Verlust- oder Geringmodulators im Laserresonator zu steuern.

Es ist bevorzugt, wenn die Laserleistungserfassung zur Erfassung der über einen resonatorumlaufgemittelten Laserleistung ausgebildet ist; die Modulatorsteuerung kann zum linearen und/oder nichtlinearen Ansprechen auf die erfaßte Laserleistung ausgebildet sein, um so eine lineare oder nichtlineare Regelstrecke zu bilden.

10

Die Steuerlichtquelle und/oder deren Ansteuerung kann und wird nun bevorzugt so ausgebildet, daß es möglich ist, damit den Modenkopplungsprozeß des Lasersystems zu starten und/oder eine regenerative Lasersystemmodenkopplung zu bewirken und/oder unterstützen. Gleichfalls wird Schutz beansprucht für eine Vorrichtung zur Kontrolle der Dynamik eines Lasers in einem dynamikkontrollierten Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

Es wird auch vorgeschlagen, daß bei einer Laserleistungserfassung zur Erfassung der instantanen Ausgangsleistung des ersten Lasers eine Regel- und/oder Steuerstrecke zur linearen und/oder nichtlinearen optischen und/oder elektronischen Regelung und/oder Steuerung eines optisch gesteuerten Verlust- und/oder Gewinnmodulators und ein zweiter Laser vorgesehen wird, dessen Dynamik abhängig vom Verlust- und/oder Gewinnmodulator gesteuert wird, wobei insbesondere der Verlust- und/oder Gewinnmodulator im Laserresonator des zweiten Lasers angeordnet ist.

30

Diese Vorrichtung wird bevorzugt zum Starten des Modenkopplungsprozesses und/oder zur Kontrolle von Instabilitäten,

insbesondere von Q-switching und/oder zur Kontrolle und/oder Unterdrückung von niederfrequenten Fluktuationen und/oder hochfrequenten Fluktuationen und/oder zeitlichen Fluktuationen im Puls-zu-Pulsabstand und/oder zur Synchronisation von wenigstens zwei Lasersystemen verwendet.

Die Erfindung wird im folgenden nur beispielsweise anhand der Zeichnung erläutert. In dieser ist gezeigt durch

10 Fig. 1. eine erfindungsgemäße Vorrichtung, die einen sogenannten Micro-Chip Laser verwendet, der Pulswiederholraten im Bereich von 10GHz aufweist;

15 Fig. 2 ein Bragg-Spiegel, auf dem eine "Quantum Well"-Struktur aufgebracht ist.

In Figur 1 ist als erfindungsgemäßer Laser ein Micro-Chip-Laser mit kontrollierter Dynamik gezeigt, der dazu ausgebildet ist, Pulswiederholraten im Bereich von um 10 GHz vorzusehen.

Zum Laser gehört ein kontinuierlich betriebener Nd:YVO₄ Pump-
plaser 1, der Pumplicht über eine zwischengeschaltete Optik
auf einen Cr⁴⁺:YAG-Laserkristall 8 einstrahlt. Dieses Laser-
system 1 liefert die für den Laserprozess benötigte Energie
mit max. 16 W bei einer Wellenlänge von 1064 nm und M₂ < 1.1.

Die zwischengeschaltete Optik, über welche Pumplicht aus dem
kontinuierlich betriebenen Pumplaser 1 auf den Cr⁴⁺:YAG-
30 Laserkristall 8 eingestrahlt wird, umfaßt im Strahlengang des
Pumpstrahls 4 zunächst eine sogenannte optische Diode bzw.
einen optischen Isolator 2, der Licht nur in die dargestellte

Pfeilrichtung durchlässt, also weg vom Pumplaser. Es ist nachfolgend hinter dem optischen Isolator 2 weiter eine $\lambda/2$ Platte 3 zur Polarisationsdrehung des Pumpstrahls in eine gewünschte Richtung und danach eine dichroitische Platte 5 vorgesehen.

Die dichroitische Platte 5 ist so ausgebildet, daß Pumplicht bei 1064 nm in Richtung auf den Laserkristall weiter transmittiert wird, aber das im Laserkristall 8 erzeugte Laserlicht um 1500 nm reflektiert wird.

Im Strahlengang des Pumpstrahls 4 ist dann eine fokussierende Optik angeordnet, die durch Linsen 6 dargestellt ist, wobei der fokussierte Pumplaserstrahl auf den Cr⁴⁺:YAG-Laserkristall 8 gerichtet ist.

Der Cr⁴⁺:YAG-Laserkristall 8 ist zwischen zwei Spiegeln 7, 10 in einem gekühlten Kristallhalter 9 angeordnet und besitzt hier eine Länge von 8,2 mm. Es ist somit ein besonders kompakter Festkörper-Laser gebildet. Diese Art von Lasern wird als "Mikrochip-Laser" bezeichnet.

Bei dem Spiegel 7 handelt es sich um einen Auskoppelspiegel mit TP > 80 % bei 1064 nm und TL = 0,25 % bei 1500 nm.

Das über den Auskoppel-Spiegel 7 ausgekoppelte Laserlicht aus dem Laserkristall 8 wird auf einen teildurchlässigen Spiegel 12 eingestrahlt, der einen Teil des Lichtes auf einen intensitätsempfindlichen Photodetektor 14 einstrahlt.

Aus dem intensitätsempfindlichen Photodetektor 14 ist ein Ausgangssignal auf eine elektronische Regelung mit einer Rege-

elektronik 15 geführt, die dazu ausgebildet ist, ein geeignetes Stromsignal zu erzeugen, das zur Ansteuerung einer weiteren Laserdiode 11 geeignet ist. Die weitere Laserdiode 11 strahlt Laserlicht geringer Intensität, etwa einige zehn Milliwatt, über eine geeignete Fokussierungsoptik auf den steuerbaren Absorber-Spiegel 10 des Laserresonators, in dem sich der Laserkristall 8 befindet. Diese geringe Leistung der Laserdiode 11 erlaubt eine erhebliche Vereinfachung der elektronischen Treiberstufe, und zwar sowohl im Vergleich zur direkten Modulation der Ströme der Pumpdioden, die im Bereich von einigen Watt bis einigen zehn Watt emittieren, als auch im Vergleich zu den elektro- und akustooptischen Modulatoren, welche Spannungen im Bereich von Kilovolt benötigen. Zugleich ist die Laserdiode 11 dank ihrer kleinen Leistung kostengünstig, und sie ist für eine direkte Modulation im Bereich von bis zu mehreren GHz ausgebildet.

Der Absorberspiegel 10 ist in dem in Fig. 1 skizzierten Ausführungsbeispiel als steuerbarer Absorber-Spiegel 10 ausgebildet und als ein erfindungsgemäßes Element wie nach Fig. 2 realisiert. Fig. 2 zeigt, daß ein erfindungsgemäßer sättigbarer Absorber für einen dynamikkontrollierten Laser bzw. eine Vorrichtung zur Dynamikkontrolle eines Lasers mit einer Quantum-Well-Struktur realisierbar ist.

Dazu ist, wie aus Fig. 2 ersichtlich, ein für die Wellenlänge des Lasers transparentes Material als Schicht auf einen sogenannten Bragg-Spiegel aufgebracht, in dem eine QW-Struktur in geeignetem Abstand zum Bragg-Spiegel eingebettet ist. Die Transparenz der Schicht ergibt sich dabei vorliegend daraus, daß die Schicht als Halbleiterschicht gebildet und der Halbleiter so gewählt und entworfen ist, daß die Bandlücke des

Halbleitermaterials energetisch größer ist als die Energie der einzelnen Photonen des Laserermodes. Die Halbleiterschicht ist zugleich so gebildet, daß sie Licht aus der als Hilfslichtquelle dienenden weiteren Laserdiode 11 absorbiert und die dadurch erzeugten freien Ladungsträger in dieser Schicht für das Laserlicht zu zusätzlichen Verlusten führen. Auf diese Schicht sind schliesslich weitere Schichten aufgebracht, welche hier zum Beispiel zu einer Felderhöhung bzw. einer Felderniedrigung innerhalb der optisch modulierbaren Schicht und der darin eingebetteten QW-Struktur führen.

In Fig. 2 ist nur beispielsweise eine zusätzliche Schicht gezeigt, die den Fresnel-Reflex an der optisch modulierbaren Schicht für Wellenlängen im Bereich von 1530 nm minimiert, d.h. als Antireflex-Beschichtung dient.

Die erfindungsgemäße Anordnung wird nun verwendet, indem Licht aus dem Pumplaser 1 in den Laserkristall 8 eingestrahlt wird. Das im "Mikrochip-Laser" erzeugte Licht wird teilweise durch den Auskoppelspiegel 7 aus dessen Resonator ausgekoppelt und mit Hilfe eines dichroitischen Spiegels 5, der transmittierend für eine Wellenlänge von 1064nm und reflektierend für das erzeugte Laserlicht um 1500nm wirkt, vom Pumplicht 4 getrennt. Ein kleiner Teil dieses Lichtes beaufschlagt mit Hilfe eines teildurchlässigen Spiegels 12 einen Photodetektor 14, während der andere Teil dieses Lichts als Ausgangsstrahl 13 des "Mikrochip-Lasers" für eine Anwendung zur Verfügung steht.

Das Signal des Photodetektors 14 wird dabei über die lineare und/oder nichtlineare Regelelektronik 15 zur Erzeugung des beschriebenen Hilfs- bzw. Steuerlicht der beispielhaft als

Steuerlichtquelle offenbarten Laserdiode 11 zugeführt, wobei die Parameter der elektronischen Regelung 15, die zur Ansteuerung der Laserdiode 11 dienen, so eingestellt und/oder gewählt sind, daß über das mit der Laserdiode 11 erzeugte
5 Hilfs- bzw. Steuerlicht, das schliesslich über eine geeignete Optik 6 auf den optisch steuerbaren Modulator 10 fokussiert wird eine wie erkennbare entstehende Modulation der Verluste innerhalb des Resonators des "Mikrochip-Lasers" so bewirkt, daß dieser modenkoppelt und/oder seine Güteschal-
10 tungsinstabilität unterdrückt wird.

Wie hierbei eine Dynamikkontrolle im Detail bewirkt wird, wird ersichtlich bei Betrachtung der Funktionsweise am Beispiel einer Halbleiterschicht, in welcher der Effekt der FCA
15 zur Veränderung der optischen Verluste ausgenutzt wird. Eine entsprechende Funktionsweise findet sich auch im Potentialtopf oder analogen Strukturen.

Wird eine dünne Halbleiterschicht in einen Laserresonator gebracht, bei der die Bandlücke des Halbleitermaterials energetisch größer ist als die Energie der einzelnen Photonen des Laserermodes, so bleiben die internen Verluste des Lasersystems zunächst nahezu unverändert gegenüber dem Fall ohne Halbleiterschicht. Dies gilt vor allem dann, wenn die Fresnel-Reflexionen an den Oberflächen der Schicht vermieden werden, zum Beispiel durch die Position der Schicht innerhalb
25 des Resonators oder durch geeignete Antireflex-Beschichtungen. All dies ist vorliegend der Fall, wo die Halbleiterschicht als Schicht am Absorberspiegel 10 in dem
30 Resonator des Microcavity-Lasers vorgesehen wird und die Antireflex-Beschichtungen ebenfalls realisiert sind.

Wird jedoch nun diese Schicht zusätzlich mit einer Lichtquelle, beleuchtet, deren Photonenenergie mindestens so groß ist wie die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband der Schicht, so werden hierdurch freie Ladungsträger innerhalb dieser Schicht erzeugt. Vorliegend dient die Steuerlichtquelle, die durch den Laser 11 realisiert ist, der Beleuchtung bzw. Modulation. Die sog. freien Ladungsträger innerhalb der Schicht werden nun ihrerseits durch Absorption von Photonen des Lasermodes weiter angeregt. Dadurch entstehen zusätzliche Verluste, welche durch die eingestrahelte Leistung der erwähnten zusätzlichen modulierenden Lichtquelle beeinflusst werden können. Es ergibt sich damit eine gesteuerte Absorption, d.h. eine Verlustmodulation.

Wird die Steuerlichtquelle ausgeschaltet, so endet auch die Erzeugung von weiteren freien Ladungsträgern. Damit nimmt die Absorption der Halbleiterschicht wieder ab, bis diese schließlich wieder für die Strahlung der Lasermoden transparent ist. Dies geschieht aufgrund der kurzen Lebensdauer der freien Ladungsträger in dünnen Halbleiterschichten von typischerweise 10 ps bis 1 ns extrem schnell. Aufgrund der äußerst geringen Dicke, vorzugsweise einige hundert Nanometer bis einige Mikrometer, finden erfindungsmäße Vorrichtungen so auch und vor allem in Lasersystemen mit hohen Repetitionsraten Anwendung.

Es sei erwähnt, daß einleuchtenderweise kein vollständiges Ausschalten der Steuerlichtquelle erforderlich ist, sondern eine gezielte Veränderung der Erzeugung von weiteren freien Ladungsträgern möglich ist.

Anstelle der Modulation einer Hilfslichtquelle über eine lineare oder nichtlineare Regelstrecke bei geeigneter Wellenlänge über ein Signal, das zur über die Resonatorumlaufszeit gemittelten Ausgangsleistung des Lasers 1 proportional ist, wird in einer weiteren Ausführungsform über ein Signal, das zur instantanen Ausgangsleistung des Lasers 1 proportional ist, moduliert. Die Bedingung für "instantan" wird dann erfüllt, wenn die Bandbreite des Photodetektors 14 größer ist als die Puls-zu-Puls Wiederholrate des Lasers 1.

10

Bezugszeichenliste

- 1 Kontinuierlich betriebener Nd:YVO4 Pumplaser
5 (max. 16W @1064nm Wellenlänge, M2 < 1.1)
- 2 Optischer Isolator: lässt Licht nur in Pfeilrichtung
 durch
- 3 $\lambda/2$ -Platte: dreht die Polarisierung des Pump-Strahls in
 die gewünschte Richtung
- 10 4 Pump-Strahl
- 5 Dichroitische Platte: transmittierend für 1064nm;
 reflektierend für das erzeugte Laserlicht um 1500nm
- 6 Linsen zur Fokussierung des Pump-Strahls und des
 Hilfslasers
- 15 7 Auskoppel-Spiegel: TP > 80% @1064nm; TL = 0.25%
 @1500nm
- 8 Laserkristall: Cr4+:YAG, 8.2mm lang
- 9 Gekühlter Kristall-Halter
- 10 Steuerbarer Absorber-Spiegel (z. B. gemäß Fig. 2)
- 20 11 Laserdiode zur Modulation der Absorption von 10
12 Teildurchlässiger Spiegel
- 13 Laser-Ausgang
- 14 Photodetektor
- 15 Elektronische Regelung zur Ansteuerung der
25 Laserdiode 11

Patentansprüche

1. Dynamikkontrollierter Laser mit einem Resonator und einer
5 Laserleistungserfassung, dadurch gekennzeichnet, daß zur
Dynamikkontrolle eine einen optischen Modulator im an-
sprechen auf die erfaßte Laserleistung steuernde Licht-
quelle vorgesehen ist und die Laserleistungserfassung zur
10 Erfassung der resonatorumlaufgemittelten Laserleistung
ausgebildet ist.
2. Dynamikkontrollierter Laser nach dem vorhergehenden An-
spruch, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modula-
tor ein Halbleitermaterial umfaßt, das bei der Wellenlän-
15 ge der steuernden Lichtquelle eine vorgegebene Mindestab-
sorbtion aufweist, die ausreicht, eine solche Ladungsträ-
germenge und/oder -dichte zu erzeugen, daß das Laserlicht
des bezüglich seiner Dynamik zu kontrollierenden Lasers
in gewünschtem Maße absorbiert und/oder verstärkt wird,
20 während das nicht Steuerlichtquellenlicht beaufschlagte
Halbleitermaterial für das Laserlicht des bezüglich sei-
ner Dynamik zu kontrollierenden Lasers zumindest weitge-
hend transparent ist.
- 25 3. Dynamikkontrollierter Laser nach dem vorhergehenden An-
spruch, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitermateri-
al eine Dicke von unter $100\mu\text{m}$, insbesondere unter $10\mu\text{m}$,
insbesondere zwischen einigen 100nm und wenigen μm
und/oder freie Ladungsträger mit Lebensdauern von unter
30 allenfalls wenigen 10ns , typischerweise 10 ps bis 1 ns
aufweist.

4. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modulator so ausgebildet ist, daß er eine optischen Brechzahländerung durch Lichteinstrahlung, insbesondere durch Steuerlichteinstrahlung erfährt, insbesondere basierend auf dem Prinzip der freien Ladungsträgerabsorption innerhalb einer Halbleiterschicht oder eines Potentialtopfes.
5
5. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserleistungserfassung zur Erfassung der über einen resonatorumlaufgemittelten Laserleistung ausgebildet ist.
10
6. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Modulatorsteuerung zum linearen und/oder nichtlinearen Ansprechen auf die erfaßte Laserleistung ausgebildet ist, um so eine lineare oder nichtlineare Pegelstrecke zu bilden.
15
7. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modulator resonatorintern vorgesehen ist.
20
8. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modulator ein Verlustmodulator ist, der durch die Lichtquellensteuerung einen Verlust im Resonator vorsieht.
25
9. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modulator eine optisch steuerbare Verstärkung vorsieht.
30

10. Dynamikkontrollierter Laser, worin der optische Modulator mit einem auf einen Absorberspiegel integrierten Medium, insbesondere im Halbleitermedium des vorhergehenden An-
5 spruches, integriert ist.
11. Dynamikkontrollierter Laser nach dem vorhergehenden An-
spruch, dadurch gekennzeichnet, daß der Absorberspiegel einen sättigbaren Bragg-Reflektor umfaßt und/oder dar-
10 stellt.
12. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modu-
lator einen halbleitenden sättigbaren Absorberspiegel um-
15 faßt.
13. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Modu-
lator einen Fabry-Perot-Resonator umfaßt, dessen Trans-
20 missionsverhalten und/oder Reflexionsverhalten durch die Steuerlichtquelle veränderbar ist.
14. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserlei-
25 stungserfassung zur Erfassung der instantanen Laserausgangsleistung ausgebildet ist und eine lineare oder nichtlineare Regelstrecke vorgesehen ist, um die Steuerlichtquelle zur optischen Steuerung des optisch gesteuerten Verlust- oder Gewinnmodulators im Laserresonator zu
30 steuern.

15. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerlichtquelle und/oder deren Ansteuerung so ausgebildet ist, den Modenkopplungsprozeß des Lasersystems zu starten.
- 5
16. Dynamikkontrollierter Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquellensteuerungsmodulation dazu ausgebildet, eine regenerative Lasersystemmodenkopplung zu bewirken und/oder unterstützen.
- 10
17. Vorrichtung zur Kontrolle der Dynamik eines Lasers in einem dynamikkontrollierten Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
- 15
18. Verwendung einer Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß sie zur Kontrolle und/oder Unterdrückung von niederfrequenten und/oder Unterdrückung von niederfrequenten und/oder hochfrequenten Fluktuationen und/oder zur externen Rauschunterdrückung und/oder zur externen Intensitätsmodulation verwendet wird.
- 20
19. Vorrichtung zur Laserdynamikkontrolle, worin ein erster Laser vorgesehen wird, um eine Laserleistungserfassung zur Erfassung der instantanen Ausgangsleistung des ersten Lasers, eine Regel- und/oder Steuerstrecke zur linearen und/oder nichtlinearen optischen und/oder elektronischen Regelung und/oder Steuerung eines optisch gesteuerten Verlust- und/oder Gewinnmodulators und ein zweiter Laser, dessen Dynamik abhängig vom Verlust- und/oder Gewinnmodulator gesteuert wird, wobei insbesondere der Verlust-
- 25
- 30

- und/oder Gewinnmodulator im Laserresonator des zweiten Lasers angeordnet ist.
20. Verwendung einer Vorrichtung nach dem vorhergehenden An-
5 spruch zum Starten des Modenkopplungsprozesses und/oder
zur Kontrolle von Instabilitäten, insbesondere von Q-
switching und/oder zur Kontrolle und/oder Unterdrückung
von niederfrequenten Fluktuationen und/oder hochfrequenten
10 Fluktuationen und/oder zeitlichen Fluktuationen im
Puls-zu-Pulsabstand verwendet wird und/oder zur Synchronisation
von wenigstens zwei Lasersystemen.

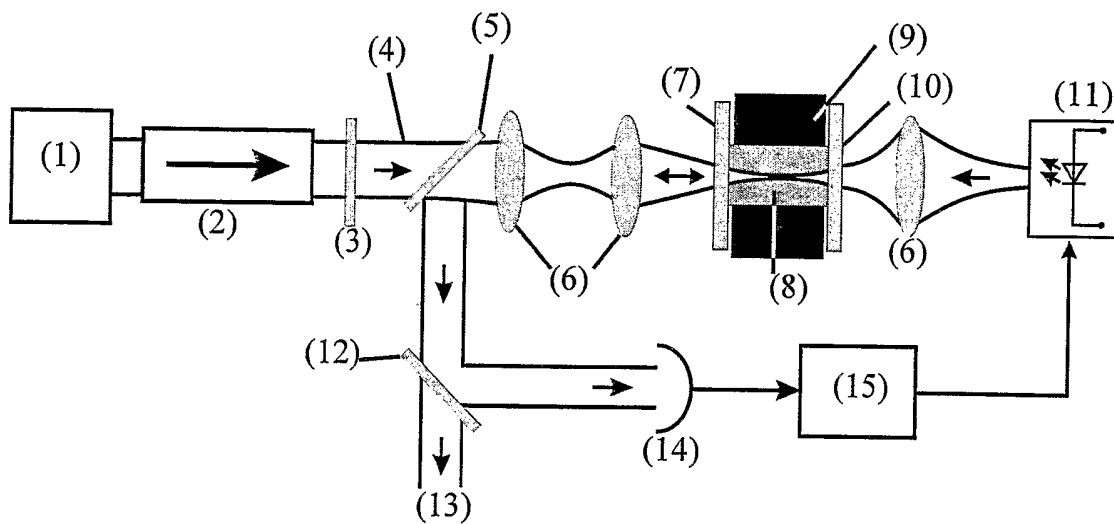


Fig.1

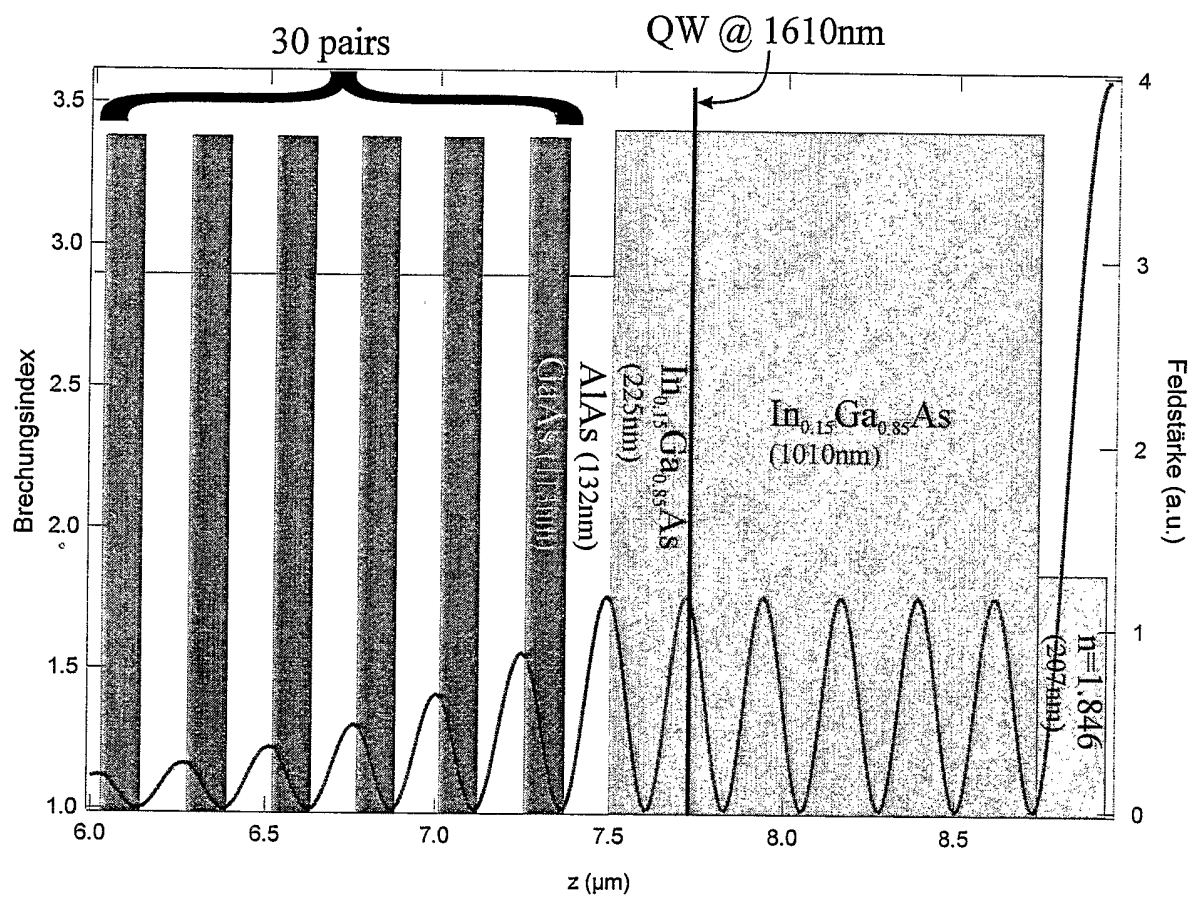


Fig.2