



(10) **AT 521943 A1 2020-06-15**

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21)	Anmeldenummer:	A 373/2018	(51)	Int. Cl.:	H01S 3/00	(2006.01)
(22)	Anmeldetag:	14.12.2018			H01S 3/11	(2006.01)
(43)	Veröffentlicht am:	15.06.2020			H01S 3/131	(2006.01)
					H01S 3/0941	(2006.01)
					H01S 3/06	(2006.01)
					H01S 3/08	(2006.01)

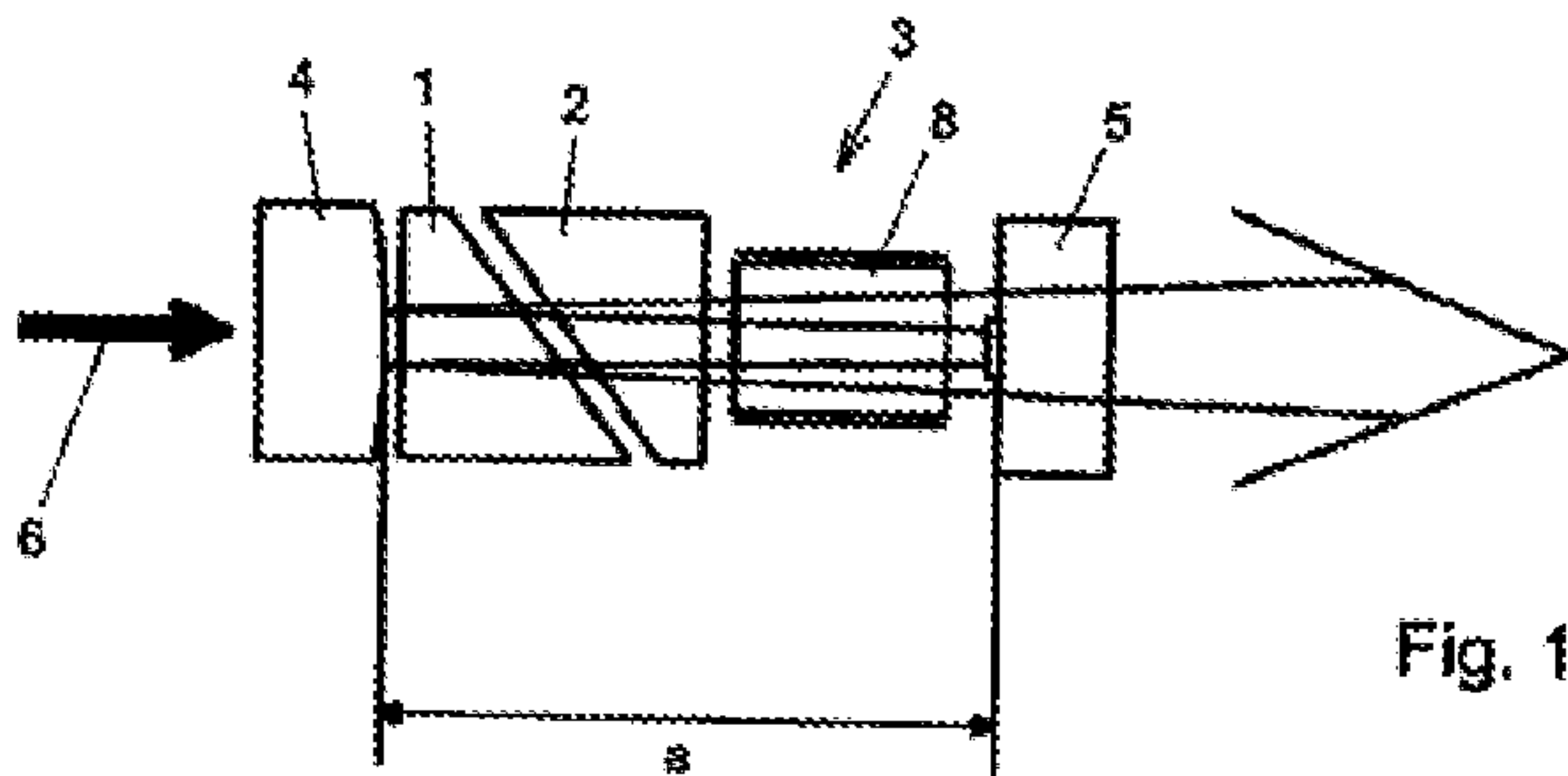
(56) Entgegenhaltungen:
CN 104158082 A
CN 1645691 A
WANG, Xuejun et al. "Single-longitudinal-mode Operation of a 1 W combined actively and passively Q-switched Cr,Nd:YAG Laser" 5. September 2005 (05.09.2005) OPTICS EXPRESS 6697 Vol. 13, No. 18, pp. 6693-6698 <URL: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.006693>>

(71) Patentanmelder:
Kopf Daniel Dr.
6832 Röthis (AT)

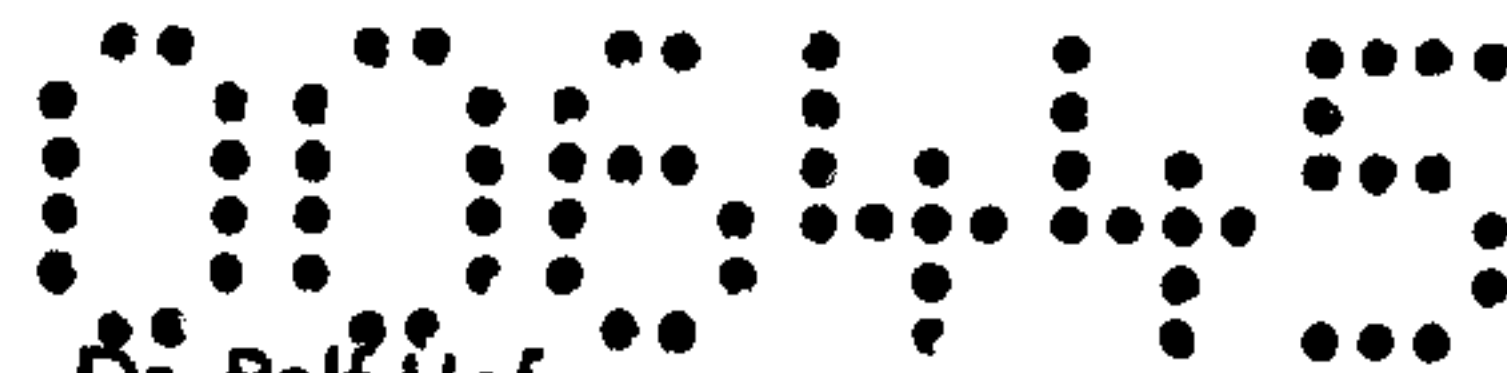
(74) Vertreter:
Hofmann Ralf Dr.
Fechner Thomas Dr.
6830 Rankweil (AT)

(54) **Gütegeschalteter Festkörperlaser**

(57) Bei einem gütegeschalteten Festkörperlaser weist der Resonator (3) des Festkörperlaser sowohl einen passiven Güteschalter (2) als auch einen aktiven Güteschalter (8) auf.



Patentanwälte
Hofmann & Fechner



Dr. Ralf Hofmann
Dr. Thomas Fechner
Hörnlingerstr. 3, Postfach 5
6830 Rankweil, Austria

T +43 (0)5522 73 137
F +43 (0)5522 73 137-10
M office@vpat.at
I www.vpat.at

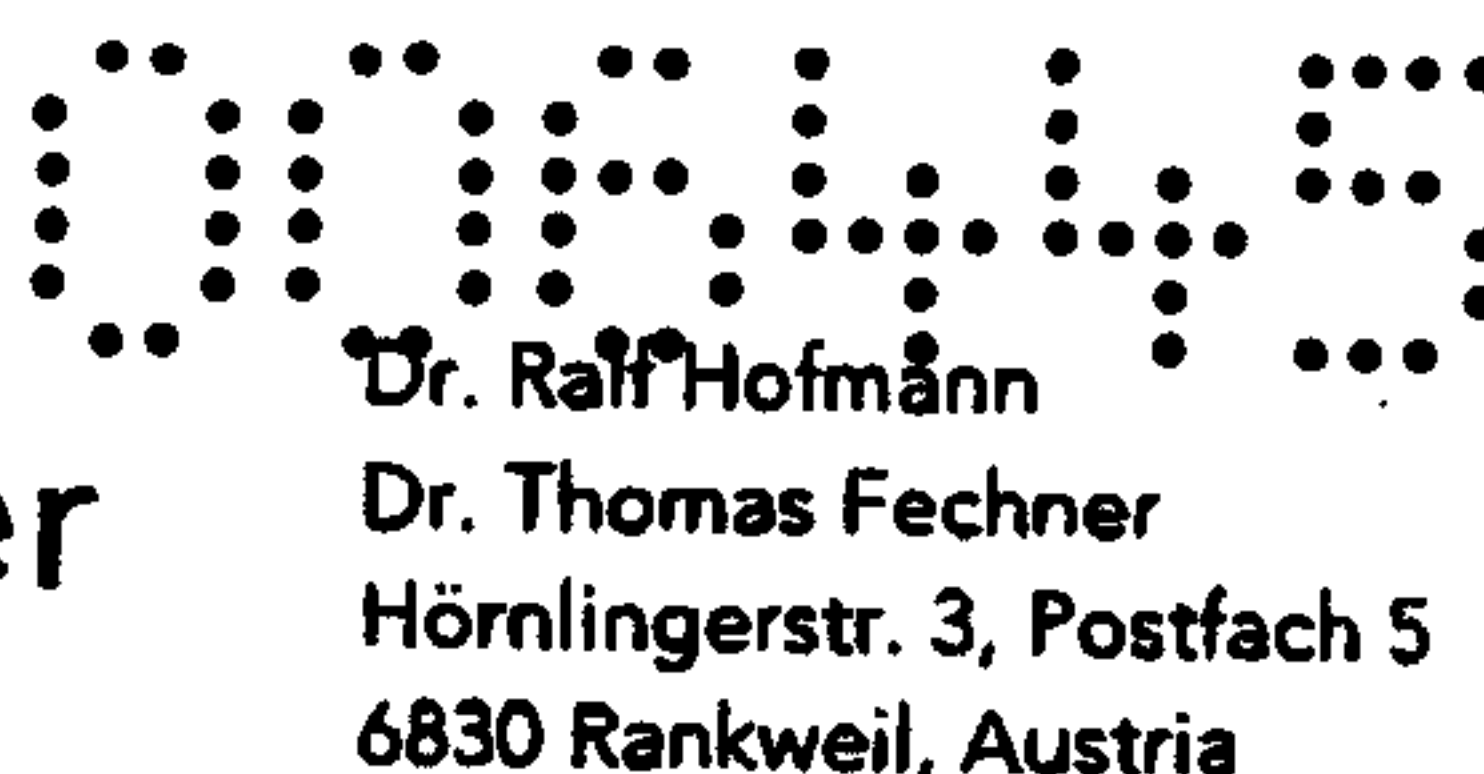
29126/33/ss
20180924

25

Zusammenfassung

Bei einem gütegeschalteten Festkörperlaser weist der Resonator (3) des Festkörperlaser sowohl einen passiven Güteschalter (2) als auch einen aktiven Güteschalter (8) auf. (Fig. 1)

Patentanwälte
Hofmann & Fechner



Dr. Ralf Hofmann
Dr. Thomas Fechner
Hörnlingerstr. 3, Postfach 5
6830 Rankweil, Austria

T +43 (0)5522 73 137
F +43 (0)5522 73 137-10
M office@vpat.at
I www.vpat.at

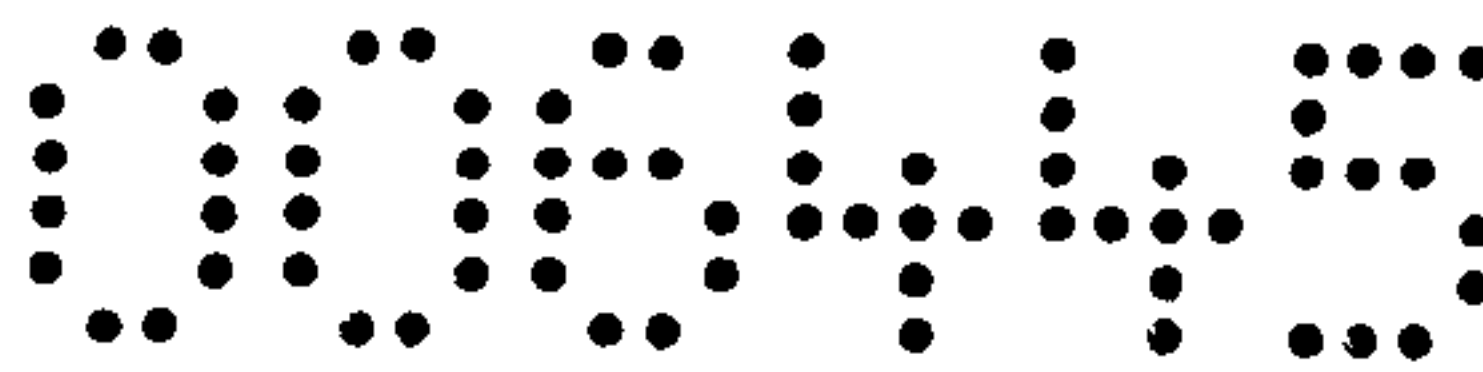
29126/33/ss
20180924

1

Die Erfindung bezieht sich auf einen gütegeschalteten Festkörperlaser.

Güteschalter („Q-switch“) dienen zur Erzeugung von gepulster Laserstrahlung. Im Vergleich zu einer lediglich gepulsten Anregung werden mittels Güteschaltern kürzere Pulse erzeugt. Auch können die Spitzenleistungen höher sein. Güteschalter sind als aktive und passive Güteschalter bekannt. Aktive Güteschalter haben den Nachteil, dass eine entsprechende Steuerelektronik erforderlich ist. Außerdem wird die minimale Resonator-Länge durch die Baugröße dieser Güteschalter begrenzt. Sehr kurze Resonatoren sind beispielsweise erforderlich, wenn ein Betrieb des Lasers mit einem einzigen longitudinalen Mode gewünscht ist. Bei passiven Güteschaltern entfällt das Erfordernis der elektronischen Ansteuerung. Auch können passive Güteschalter so klein ausgebildet sein, dass ein Single-Mode-Betrieb ermöglicht wird. Ein Nachteil bei passiven Güteschaltern für bestimmte Anwendungen besteht aber darin, dass diese einen größeren Jitter aufweisen, d.h. der genaue Zeitpunkt der Auslösung variiert von einem Puls zum nächsten.

Ein passiv gütegeschalteter Festkörperlaser mit einer hohen Pulsenergie geht beispielsweise aus Bhandari R. und Taira T., „Palm-top size megawatt peak power ultraviolet microlaser“, Optical Engineering, July 2013/Vol. 52(7), 076102-1 – 076102-6 hervor. Als aktives Lasermaterial wird Nd:YAG verwendet und als passiver Güteschalter wird ein Absorber verwendet, der von einem dotierten Festkörpermateriale in Form von Cr:YAG gebildet wird. Mit einer Länge des Resonators von 10mm wird ein „free spectral range“, also ein Abstand zwischen den Wellenlängen von möglichen benachbarten longitudinalen Moden erreicht, der so groß ist, dass nur einer der longitudinalen Moden derart im Verstärkungsmaximum liegt, dass dieser anschwingt. Mit diesem Laser wird eine Pulsenergie von 3mJ bei einer Pulsbreite von 230 ps und einer Wiederholrate von 100 Hz erreicht. Die

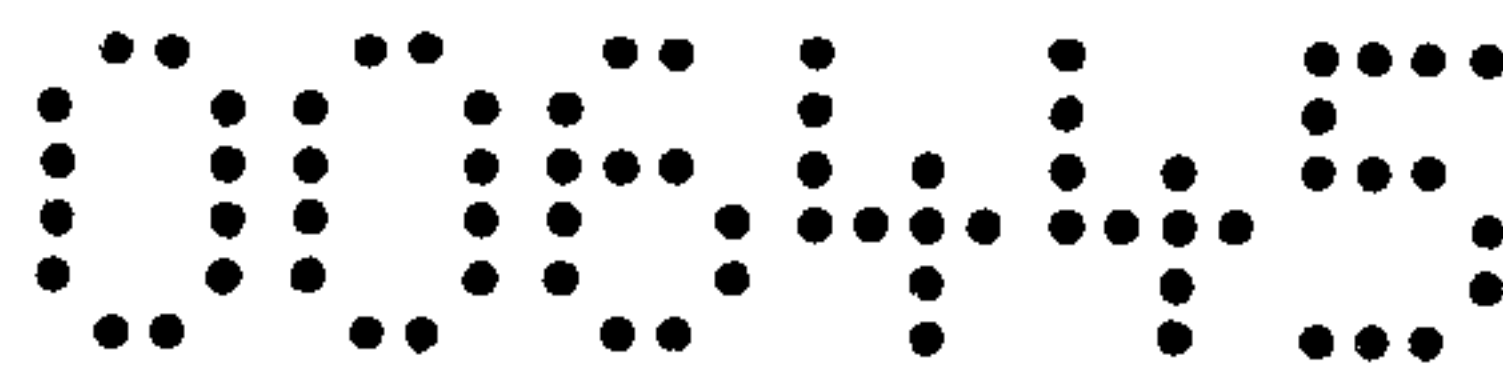


Wellenlänge des Lasers liegt bei 1064 nm. Die Auslegung des Resonators ist so, dass dieser optisch stabil („stable resonator“) ist. Die Ausbildung des Resonators kann monolithisch sein, wobei beide Endspiegel plan sind und im Betrieb vom aktiven Lasermaterial eine thermische Linse mit sammelnder Wirkung ausgebildet wird.

Passiv gütegeschaltete Festkörperlaser mit „single longitudinal mode“-Betrieb und demgegenüber viel kleineren Pulsenergien im Bereich von einigen 10 nJ sind in Form von sehr kleinen monolithischen Mikrochip-Lasern mit Nd:YVO₄ als aktivem Lasermaterial bekannt, vgl. z.B. WO 2016/004446 A1. Die Resonatorlängen können hier kleiner als 150 µm sein und es können Pulslängen von weniger als 100 ps erreicht werden. Auch diese Resonatoren sind stabil mit planen Endspiegeln und der Ausbildung einer thermischen Linse im Betrieb.

Aus Lee H.C. et al., „High energy, sub-nanosecond linearly polarized passively Q-switched MOPA laser system“, Optics and Laser Technology 95 (2017) 81-85, geht ein passiv gütegeschalteter Nd:YAG/Cr:YAG-Laser mit stabilem Resonator hervor, dessen Ausgangspulse, welche ca. 2,5 mJ-Pulsenergie und eine Pulsdauer von ca. 550 ps aufweisen, nachverstärkt werden. Das aktive Lasermaterial und der Absorber weisen hier an ihren einander zugewandten Seiten gegenseitig im Brewster-Winkel angeordnete Flächen auf, um eine Polarisationsselektion des Laserstrahls zu bewirken.

Bekannte passiv gütegeschaltete Festkörperlaser mit optisch instabilen Resonatoren weisen wesentlich größere Resonatorlängen mit einer Vielzahl von longitudinalen Moden auf. Es können bei solchen bekannten Lasern hohe Pulsenergien bei einer relativ geringen Kippempfindlichkeit der optischen Elemente des Resonators und einer relativ geringen Empfindlichkeit auf Veränderungen der thermischen Linse erreicht werden. Die Intensitätskurve der abgestrahlten Pulse weist aber aufgrund der Überlagerung der verschiedenen Moden Oszillationen und Spikes auf. Derartige Laser mit einem instabilen Resonator gehen beispielweise aus WO 2014/019003 A1, EP 3 117 494 A1 oder WO 2015/021488 A1 hervor.



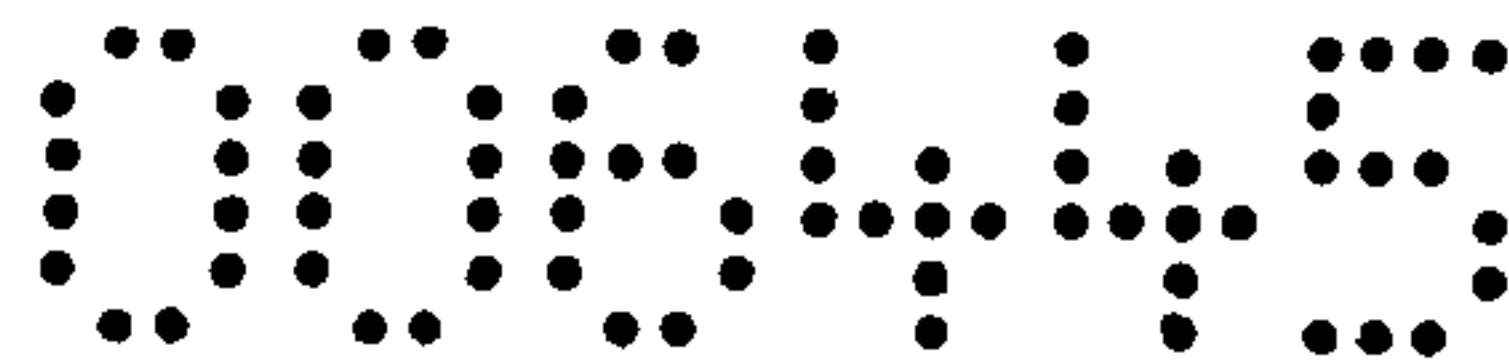
Aktive Güteschalter sind in Form von akusto-optischen Modulatoren (AOM) und elektro-optischen Modulatoren (EOM), insbesondere Pockels-Zellen bekannt. In Pockels-Zellen kommt beispielsweise Beta-Barium-Borat (BBO) zum Einsatz. Akusto-optische Modulatoren erreichen kurze Schaltzeiten bei kleinen Strahlradian, während solche kurze Schaltzeiten bei elektro-optischen Modulatoren auch bei größeren Strahlradian erreicht werden. Zum Einsatz eines elektro-optischen Modulators ist außerdem ein polarisierendes Element im Resonator erforderlich.

Aus Stafsudd O.M. et al., „CO₂ Laser with Simultaneous Active and Passiv Q-Switching“, APPLIED OPTICS, Vol.10, No. 1 (1971) 141-143 geht ein CO₂ Laser hervor, der zur aktiven Güteschaltung einen langsam rotierenden Spiegel aufweist. Es wird ein Auftreten von Mehrfachpulsen beobachtet, welche durch zusätzliches Einführen eines sättigbar absorbierenden Gases, von welchem ein passiver Güteschalter ausgebildet wird, eliminiert werden können. Bei langsamen Wiederholraten kann hierbei auch eine Verkürzung der Pulsdauer und Erhöhung der Maximal-Intensität erreicht werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen verbesserten gütegeschalteten Festkörperlaser bereitzustellen. Erfindungsgemäß gelingt dies durch die Merkmale des Anspruchs 1.

Gemäß der Erfindung weist der Resonator des Festkörperlaser sowohl einen passiven als auch einen aktiven Güteschalter auf.

In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung kann hierbei ein Festkörperlaser mit so kurzem Resonator bereitgestellt werden, dass dieser nur einen einzigen longitudinalen Mode aufweist, wobei die Pulse zu genau definierten Zeitpunkten ausgelöst werden. Der Resonator kann hierbei als linearer Resonator ausgebildet sein und eine Resonatorlänge von weniger als 50 mm, vorzugsweise von weniger als 25 mm aufweisen. Auch eine Ausbildung in Form eines Ringresonators mit einer Resonatorlänge von weniger als 100 mm, vorzugsweise weniger als 50 mm ist möglich. Der vom passiven Güteschalter maximal bewirkte Verlust (wenn der Absorber vollständig ungesättigt ist) kann hierbei größer, beispielsweise mehr als

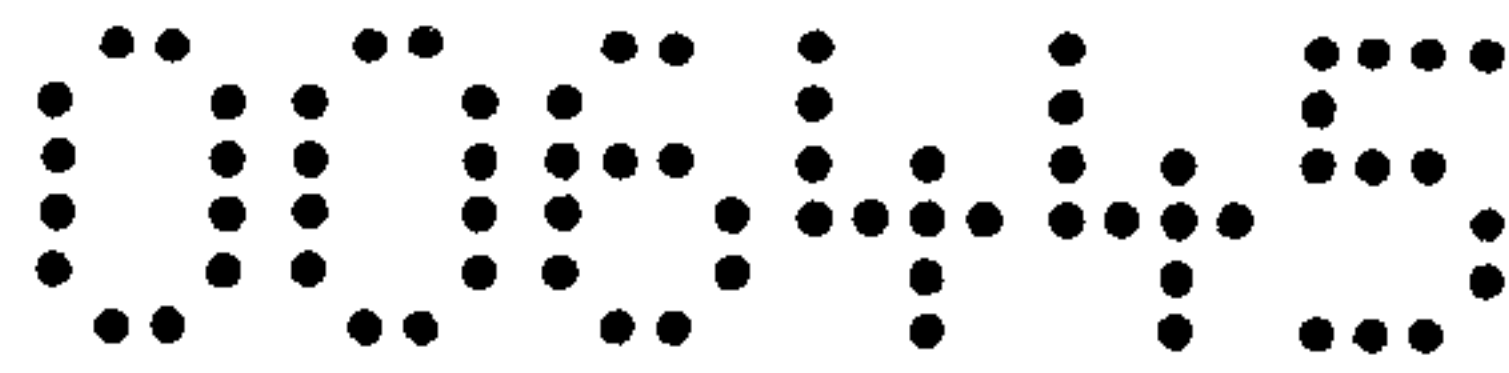


doppelt so groß, als der vom aktiven Güteschalter im aktivierten Zustand bewirkte Verlust sein. Z.B. kann der vom passiven Güteschalter maximal bewirkte Verlust 90% und der vom aktiven Güteschalter im aktivierten Zustand bewirkte Verlust 10% betragen. Da der vom aktiven Güteschalter zu bewirkende Verlust relativ gering ist, kann dieser mit einer kleinen Baugröße ausgebildet werden. Die vom aktiven und passiven Güteschalter zusammen im Resonator eingenommene Baulänge kann hierbei immer noch deutlich geringer sein als die Baulänge von herkömmlichen aktiven Güteschaltern, die mit einem hohen Verlust im aktivierten Zustand, beispielsweise von mehr als 99%, ausgebildet sind. Gleichzeitig kann durch den Einsatz des aktiven Güteschalters zusätzlich zum passiven Güteschalter der Zeitpunkt der Auslösung des Laserpulses genau festgelegt werden, während sich durch den Einsatz allein eines passiven Güteschalters ein wesentlich größerer Jitter ergibt.

Wenn vom Verlust des aktiven oder passiven Güteschalters die Rede ist, so bezieht sich dieser Verlust bei der Ausbildung als linearer Resonator auf den Hin- und Rückweg zusammengekommen (also auf einen doppelten Durchlauf), während er sich bei der Ausbildung als Ringresonator auf einen Umlauf um den Resonator bezieht (also auf einen einzelnen Durchlauf).

In einer anderen möglichen Ausführungsform kann die Erfindung bei einem Festkörperlaser mit einem „langen“ Resonator eingesetzt werden, der im Betrieb eine Vielzahl von longitudinalen Moden aufweist. Wenn ein solcher Laser mit einem aktiven Güteschalter, insbesondere in Form einer Pockels-Zelle ausgebildet ist, so kann bei einer leichten Fehl-Justage der Pockels-Zelle (beispielsweise auch in Folge von Vibrationen oder Temperaturschwankungen) die Gefahr bestehen, dass die Laserschwelle auch im nicht-aktivierten Zustand des aktiven Güteschalters überschritten wird. Durch den zusätzlichen Einsatz eines passiven Güteschalters kann eine zusätzliche Absicherung gegen ein unerwünschtes Einsetzen der Laserstrahlung erreicht werden. Dies kann als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme, beispielsweise bei einer medizinischen Anwendung dienen.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden im Folgenden anhand der



5

beiliegenden Zeichnung erläutert. In dieser zeigen:

- Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 2a) – e) und Fig. 3 a) – c) Diagramme zur Erläuterung des Betriebs des Lasers;
- Fig. 4 ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 5 ein drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 6 ein viertes Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 7 ein fünftes Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung ist schematisch in Fig. 1 dargestellt. Es handelt sich um einen Festkörperlaser mit einem aktiven Lasermaterial 1, welches beispielsweise von Nd:YAG gebildet wird. Die Dotierung kann beispielsweise bei 1,1% liegen.

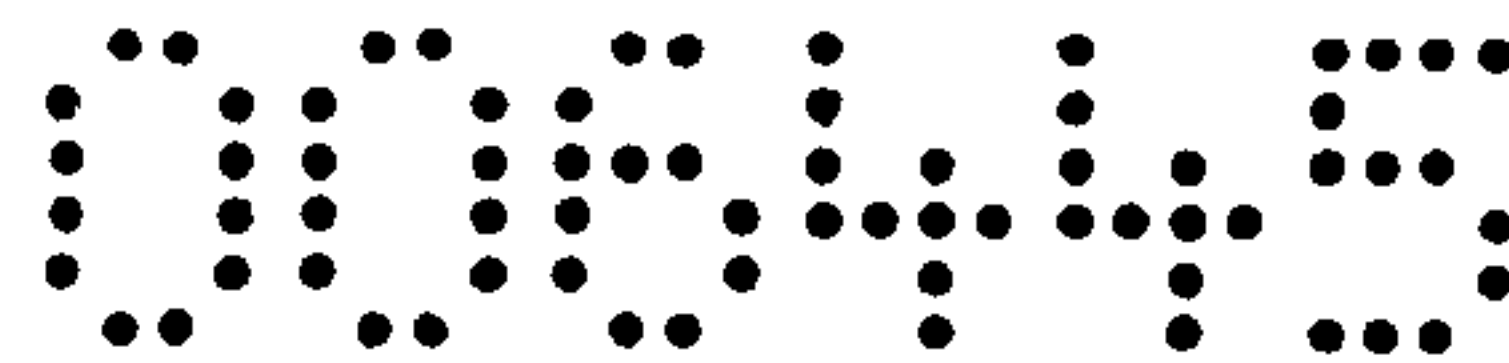
Das aktive Lasermaterial 1 ist zwischen einem ersten und einem zweiten Spiegel 4, 5 angeordnet, welche die Endspiegel des Resonators 3 bilden. Zwischen den Spiegeln 4, 5 sind im Weiteren ein passiver Güteschalter 2 und ein aktiver Güteschalter 8 angeordnet.

Der Resonator 3 umfasst im Ausführungsbeispiel also die Spiegel 4, 5, das aktive Lasermaterial 1, den passiven Güteschalter 2 und den aktiven Güteschalter 8.

Der passive Güteschalter 2 wird von einem sättigbaren Absorber gebildet, der insbesondere als ein dotiertes Festkörpermateriale ausgebildet ist, im Ausführungsbeispiel Cr:YAG (genauer Cr^{4+} :YAG).

Der aktive Güteschalter 8 wird im Ausführungsbeispiel von einem elektro-optischen Modulator gebildet, insbesondere einer Pockels-Zelle, die z.B. Beta-Barium-Borat aufweist.

Im Ausführungsbeispiel dient der erste Spiegel 4 auch zur Einkopplung der in Fig. 1 nur schematisch durch einen Pfeil angedeuteten Pumpstrahlung 6, sodass das aktive



6

Lasermaterial 1 longitudinal gepumpt ist (=Pumpstrahlung propagiert auf der gleichen Achse wie die Laserstrahlung). Dazu ist der erste Spiegel 4 dichroitisch beschichtet, wobei er für die Pumpstrahlung 6 zumindest weitgehend durchlässig ($T > 95\%$), während er für die Wellenlänge des Laserstrahls möglichst stark reflektierend ($R > 99,9\%$) und dementsprechend wenig durchlässig ist.

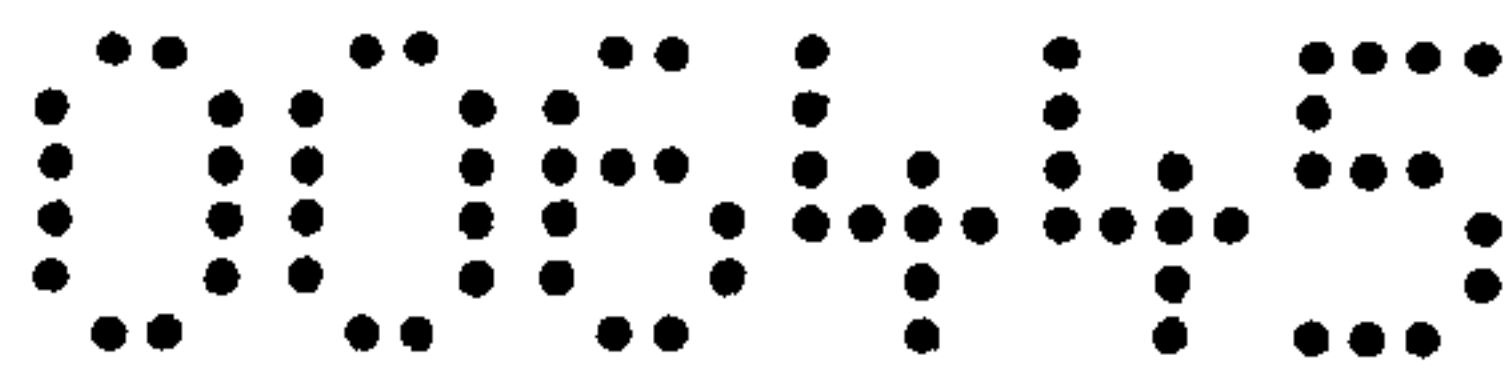
Beispielsweise beträgt die Wellenlänge der Pumpstrahlung 808 nm.

Die Wellenlänge des Laserlichts beträgt im Ausführungsbeispiel 1064 nm.

Die Einrichtung zum Pumpen selbst ist in Fig. 1 nicht dargestellt. Es kann sich um eine herkömmliche fasergekoppelte Laserdiode mit QCW („quasi continuous wave“)-Leistung von beispielsweise bis zu 150 W (für 250 μ s Pulsdauer) handeln, die mit einer Pulswiederholrate im Bereich von 0-100 Hz betrieben wird. Der Strahldurchmesser der Pumpstrahlung kann z.B. ca. 2,5 mm betragen.

Beim Resonator 3 handelt es sich um einen linearen Resonator oder stehende Wellenresonator. Der Begriff „linearer Resonator“ umfasst auch solche, bei denen der Strahlenverlauf im Resonator durch mindestens eine Reflektion innerhalb der Kavität des Resonators geknickt ist, also auch gefaltete Resonatoren. Ein anderes Funktionsprinzip stellt dagegen der Ringresonator dar, in welchem ein Umlauf der Strahlung erfolgt. Die Baulänge des Resonators von Spiegel 4 zu Spiegel 5 entspricht in diesem Ausführungsbeispiel der entlang der Achse 7 des Laserstrahls im Resonator gemessenen Länge (= Resonatorlänge a) von einem Spiegel 4 zum anderen Spiegel 5. Diese Resonatorlänge a beträgt weniger als 50 mm, vorzugsweise weniger als 25 mm. Würde der Laserstrahl im Resonator reflektiert (wie z.B. in den Ausführungsbeispielen gemäß den Fig. 4 und 5), so müsste als Resonatorlänge a die „entfaltete“ Länge des Resonators herangezogen werden, also wiederum die entlang der Achse des Laserstrahls gemessene Länge des Resonators von einem Spiegel zum anderen Spiegel.

Der erste Spiegel 4 ist als optisches Element mit negativer Brechkraft ausgebildet.



7

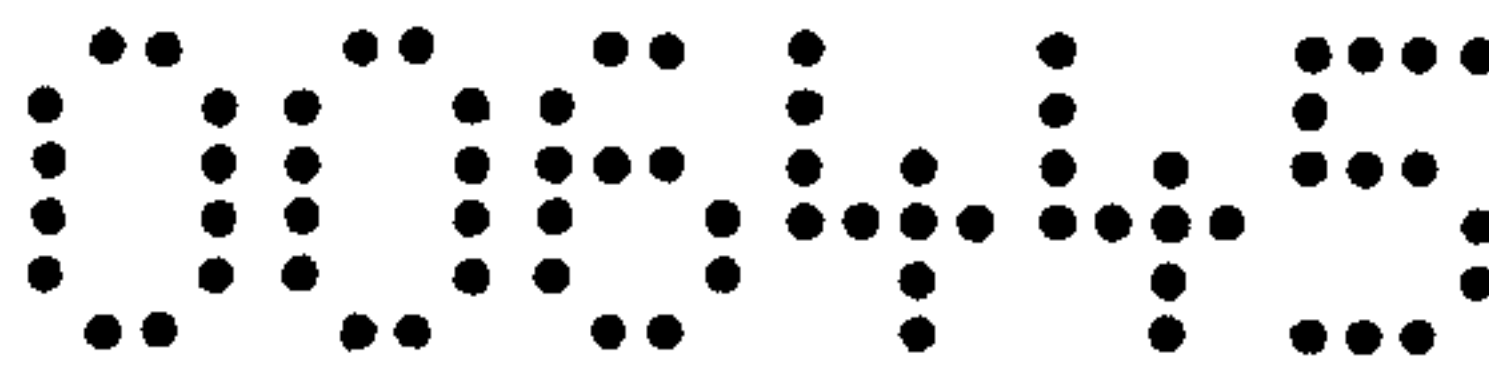
Die Fokusslänge besitzt somit einen negativen Wert, wobei der Betrag der Fokusslänge kleiner als 500 mm, vorzugsweise kleiner als 250 mm, besonders bevorzugt kleiner als 150 mm ist. Ein auf den ersten Spiegel 4 auftreffender Strahl wird also mit einer hohen Divergenz reflektiert.

Beim zweiten Spiegel 5 handelt es sich um einen Gradientenspiegel („gradient reflectivity mirror“; auch als „variable reflectivity mirror“ bezeichnet). Derartige Gradientenspiegel sind bekannt. Die zentrale Reflektivität des Gradientenspiegels kann günstigerweise im Bereich von 30% bis 60%, z.B. bei 40%, liegen. Der Radius, bei welchem die Reflektivität des Gradientenspiegels auf e^{-2} abgefallen ist, kann günstigerweise im Bereich von 0,5 mm bis 2 mm liegen, z.B. bei 0,75 mm.

Die Reflektivitätskurve des Gradientenspiegels (=Reflektivität als Funktion des Radius) kann insbesondere die Form einer Gaußkurve oder einer Super-Gaußkurve aufweisen.

Der Resonator 3 ist somit optisch instabil. Die Magnifikation des Resonators ist hierbei >1.2 , im Ausführungsbeispiel beträgt sie ca. 2. Die Magnifikation ist ein Maß für die geometrische Spreizung der umlaufenden Strahlen im instabilen Resonator, d.h. bei $M=2$ sind die geometrischen Strahlen des Eigenmodes des instabilen Resonators bei einem Umlauf um den Faktor 2 weiter von der Achse entfernt.

Die insgesamt Brechkraft des Resonators (= die addierten Brechkräfte der optischen Elemente für einen Hin- und Rückweg durch den Resonator 3 zusammengekommen, wobei jeder der Spiegel 4, 5 nur einmal eingeht) entspricht in diesem Ausführungsbeispiel im Wesentlichen der Brechkraft des ersten Spiegels 4, da die Brechkraft der im Betrieb vom aktiven Lasermaterial 1 gebildeten thermischen Linse demgegenüber wesentlich geringer ist. Die insgesamt Brechkraft des Resonators ist somit negativ, wobei ihr Betrag größer als 2 dpt, vorzugsweise größer als 4 dpt ist. Beispielsweise kann die insgesamt Brechkraft im Bereich von -5 dpt bis -15 dpt liegen.

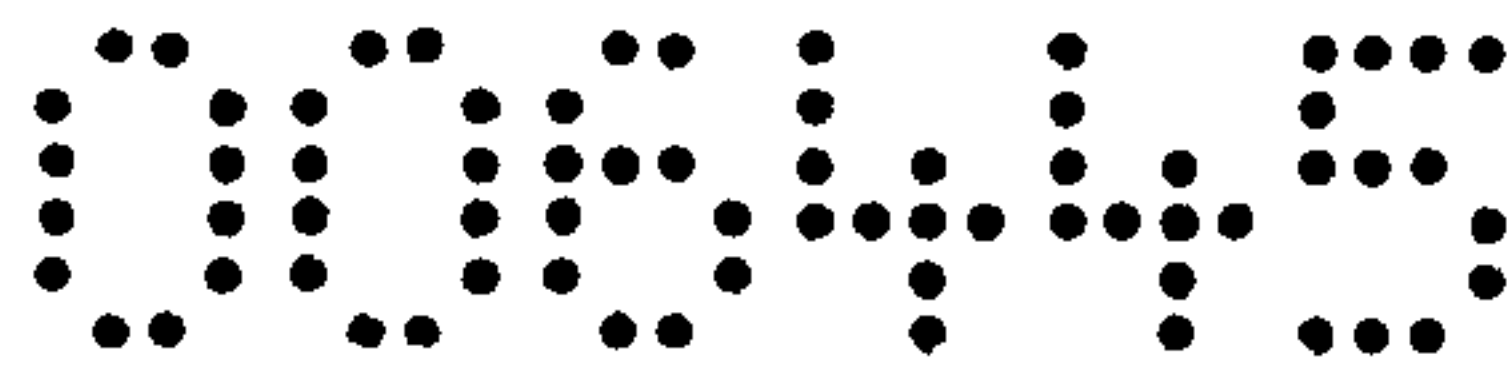


Der Resonator 3 ist von seiner Länge a her so abgestimmt, dass ein longitudinaler Mode der Laserstrahlung gerade beim Verstärkungsmaximum des aktiven Lasermaterials 1, im Ausführungsbeispiel bei 1064 nm liegt. Hierzu ist der Laser zweckmäßigerweise auch temperaturstabilisiert. Durch die Kürze des Resonators 3 ist der „free spectral range“ so groß, dass die benachbarten longitudinalen Moden so weit außerhalb des Verstärkungsmaximums liegen, dass diese zumindest im Wesentlichen nicht anschwingen (d.h. ihre Energie beträgt weniger als 10% derjenigen des Grundmodes), insbesondere gar nicht anschwingen (d.h. die Laserschwelle wird nicht überschritten). Auch die Breite des Verstärkungsmaximums des aktiven Lasermaterials ist hierzu entsprechend klein. Der Laser weist im Betrieb also zumindest im Wesentlichen nur einen einzelnen longitudinalen Mode auf. Auch weist der Laser im Betrieb zumindest im Wesentlichen nur einen einzigen transversalen Mode auf. Die Ausbildung als instabiler Resonator begünstigt hierbei, dass transversale Moden höherer Ordnung zumindest im Wesentlichen nicht anschwingen. Der Laser ist also sowohl bezüglich transversaler als auch bezüglich longitudinaler Moden ein „single mode“-Laser.

Durch die Ausbildung mit einer negativen Brechkraft, die einen hohen Betrag aufweist, kann hierbei trotz der Kürze des Lasers eine große Modengröße erreicht werden. Günstigerweise ist der Strahlradius des Laserstrahls im aktiven Lasermaterial 1 größer als 500 μm . Es kann dadurch eine hohe Pulsenergie erreicht werden, ohne dass es zu einer optischen Zerstörung kommt. Die Pulsenergie beträgt vorzugsweise mehr als 10 mJ.

Die Verwendung von Cr:YAG als sättigbarer Absorber kann eine stabilisierende Wirkung haben. Der Absorber sättigt zunächst an den Stellen der Schwingungsbäuche des Hauptmodes (= „Lochbrennen“). Dadurch wird für Nebenmoden eine höhere Absorption verursacht, weil diese vermehrt in einem nicht gesättigten Bereich ihre Schwingungsknoten haben.

Die Ein- und Austrittsflächen des aktiven Lasermaterials 1 und Absorbers 2 sind vorteilhafterweise für die Wellenlänge des Laserstrahls antireflektionsbeschichtet.

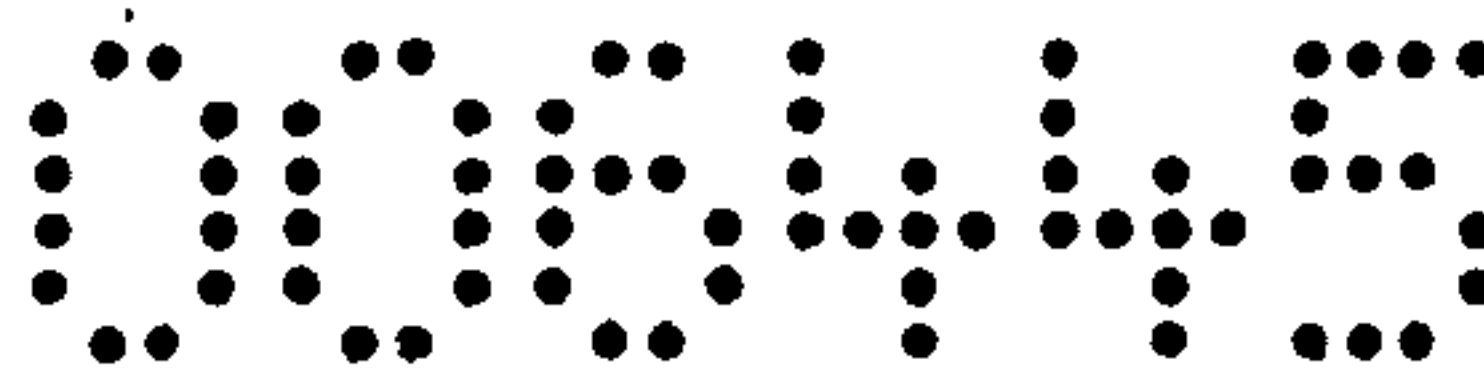


In diesem Ausführungsbeispiel sind das aktive Lasermaterial 1 und der passive Güteschalter 2 jeweils in einer sogenannten „flat-brewster“-Konfiguration geschnitten und poliert. Das aktive Lasermaterial 1 und der passive Güteschalter 2 weisen also an ihren zueinander gerichteten Seiten jeweils einen Brewster-Winkel auf, wobei diese Seiten zumindest im Wesentlichen parallel zueinander liegen, und die gegenüberliegende Seiten stehen rechtwinkelig zur Achse 7 des Laserstrahls. Die Flat-Seite ist günstigerweise wiederum mit einer Antireflektionsbeschichtung für die Laserwellenlänge beschichtet (gegebenenfalls auch für die Wellenlänge der Pumpstrahlung). Die Brewster-Flächen sind nicht notwendigerweise beschichtet. Die beiden Brewster-Flächen lassen die p-Polarisation ungehindert durch, ergeben aber einen Verlust für die s-Polarisation, sodass diese zumindest im Wesentlichen nicht anschwingt (d.h. die Energie beträgt weniger als 10% von derjenigen der p-Polarisation), insbesondere gar nicht anschwingt (d.h. die Laserschwelle wird nicht überschritten). Damit wird erzwungen, dass der Laser zumindest im Wesentlichen in der p-Polarisation läuft.

Um einen Etalon-Effekt für die s-Polarisation zu vermeiden, der die Verluste für die s-Polarisation verringern oder ausschalten könnte, muss der Abstand zwischen den beiden Brewster-Flächen genau gewählt werden, sodass sich keine hohe Transmission der s-Polarisation für die Wellenlängen jener s-polarisierten Moden vorliegt, die dem Verstärkungsmaximum des aktiven Lasermaterials 1 nahe sind. Stattdessen oder zusätzlich kann auch eine gegenseitige leichte Verkipfung der Brewster-Flächen vorgesehen sein.

Das aktive Lasermaterial 1 und der passive Güteschalter 2 können monolithisch ausgebildet sein, wobei dann zwischen den Brewster-Flächen eine dielektrische Beschichtung vorzusehen ist (ähnlich den bekannten „polarizing cubes“).

Beispielsweise kann die Transmission des den passiven Güteschalter 2 ausbildenden Absorbers im ungesättigten Zustand bei ca. 30% liegen. Über den Hin- und Rückweg durch den Resonator ergibt sich somit eine Transmission von ca. 10%, sodass der



vom Absorber im ungesättigten Zustand bewirkte Verlust etwa bei 90% liegt.

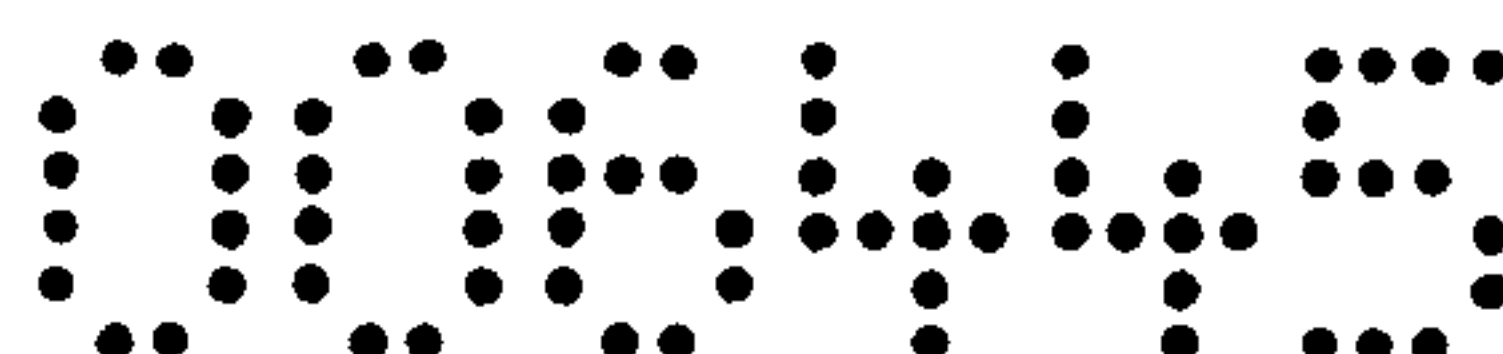
Wie bereits zuvor beschrieben haben die Brewster-Flächen des passiven Güteschalters 2 und des aktiven Lasermaterials 1 eine zumindest so stark polarisierende Wirkung, dass zumindest im Wesentlichen nur eine der Polarisierungen im Resonator anschwingen kann, im Ausführungsbeispiel die p-Polarisation. Wird der aktive Güteschalter 8 durch Anlegung einer Hochspannung aktiviert, so wird die Polarisation der Laserstrahlung bei ihrem Durchtritt durch den aktiven Güteschalter so stark verändert, dass es im Zusammenhang mit den Brewster-Flächen zu einem Verlust auch bezüglich der Polarisationsrichtung, welche ungehindert durch die Brewster-Flächen durchtreten kann (im Ausführungsbeispiel die p-Polarisation), kommt. Dieser im aktivierten Zustand des aktiven Güteschalters 8 eingeführte Verlust (bezogen auf den Hin- und Rückweg zusammengekommen) kann beispielsweise im Bereich von 10% liegen.

Der im Ausführungsbeispiel von einer BBO-Pockels-Zelle gebildete aktive Güteschalter 8 kann z.B. 3mm bis 7 mm lang sein, einen Querschnitt von 3 x 3 mm aufweisen. Die Oberflächen können vergoldet sein, um die Hochspannung flächig anzubringen. Die Schaltspannung kann beispielsweise im Bereich von 1000 V bis 3000 V liegen.

Da der aktive Güteschalter 8 nur eine relativ geringfügige Änderung der Polarisation bewirken muss, um den gewünschten, relativ kleinen Verlust von z.B. 10% zu bewirken wird eine kleine Baugröße des aktiven Güteschalters 8 ermöglicht.

Die Funktionsweise des Lasers wird im Folgenden anhand der Diagramme von Fig. 2 und 3 erläutert.

Fig. 2 a) zeigt einen Puls der anliegenden Pumpleistung (die Leistung P ist gegen die Zeit t aufgetragen). Beispielsweise liegt die Pumpleistung für 250 μs an (da die Speicherzeit bei Nd:YAG bei rund 240 μs liegt).



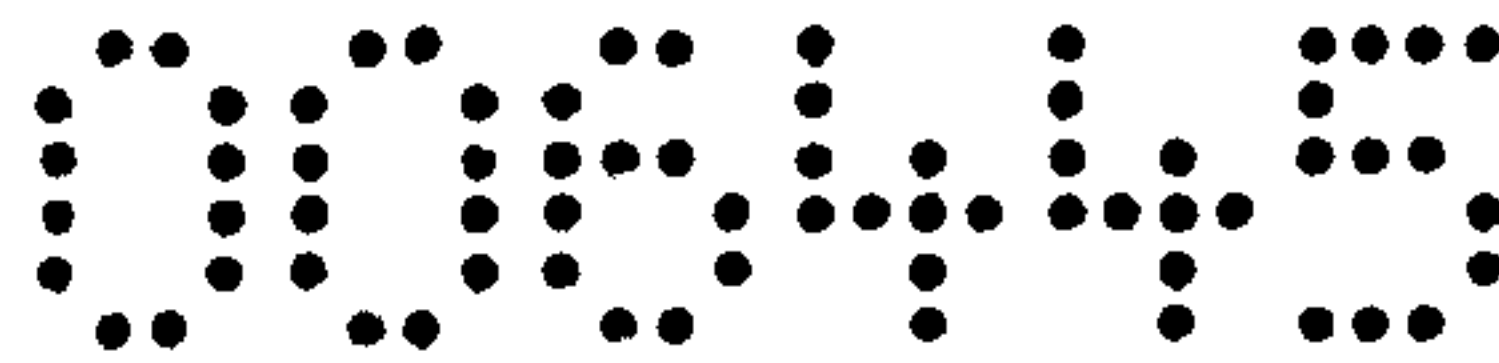
In Fig. 2 ist nur ein Puls der Pumpleistung dargestellt. Solche Pulse werden mit der gewünschten Frequenz der Laserpulse periodisch wiederholt, z.B. mit einer Frequenz im Bereich von 10 bis 100 Hz.

Fig. 2 b) zeigt den Aufbau der Inversion (I). Dieser folgt einer Aufladungskurve, da die Inversion laufend durch spontane Emission abgebaut wird. Entsprechend steigt die Verstärkung („gain“) an.

In Fig. 2 c) ist die Laserleitung dargestellt (Darstellung der Leistung P gegen die Zeit t), wie sie sich ohne aktiven Güteschalter ergeben würde. Es sind hierbei die Laserpulse von drei Pumpzyklen eingezeichnet. Aufgrund von Rauschen in der Pumpleistung, Vibrationen, Pumpwellenlängen-Ungenauigkeiten von Puls zu Puls, Instabilitäten im Laserdiodenstrom, usw., werden diese Laserpulse nicht zum genau gleichen Zeitpunkt innerhalb des Pumpulses (dessen Zeitfenster in Fig. 2 c) schematisch durch eine gestrichelte Linie dargestellt ist) ausgelöst. Vielmehr entsteht typisch ein Jitter im Bereich von z.B. 1-2 μ s von Puls zu Puls.

Fig. 2 d) zeigt die Situation, wie sie sich mit aktivem Güteschalter ergeben würde, der über die gesamte Dauer des Pumpulses und darüber hinaus aktiviert bleibt. D.h. die Hochspannung wird vor Beginn des Pumpulses an den elektro-optischen Modulator angelegt und bis über das Ende des Pumpulses hinaus beibehalten. Aus Fig. 2 d) ist ersichtlich, dass aufgrund des durch den aktiven Güteschalter in dessen aktiviertem Zustand zusätzlich eingeführten Verlustes die Auslösung des Laserpulses in Richtung zum Ende des Pumpulses verschoben wird, wobei der Jitter nach wie vor auftritt. Je nach Auslegung könnte die Auslösung des Laserpulses in diesem Fall auch vollständig unterdrückt sein.

Fig. 2 e) zeigt nun den erfindungsgemäßen Betrieb. Der aktive Güteschalter wird zum Aktivierungszeitpunkt t_a aktiviert. Der Aktivierungszeitpunkt t_a liegt im Ausführungsbeispiel vor Beginn des Pumpulses. Die Aktivierung des aktiven Güteschalters könnte auch erst nach Beginn des Pumpulses erfolgen. Der Aktivierungszeitpunkt t_a liegt aber jedenfalls vor dem frühesten Zeitpunkt des



Auftretens eines Laserpulses ohne Aktivierung des aktiven Güteschalters. Der aktive Güteschalter bleibt über den Zeitpunkt hinaus aktiviert, zu welchem der Laserpuls ohne Aktivierung des aktiven Güteschalters unter Berücksichtigung des Jitters spätestens ausgelöst würde. In der Folge, aber vor Ende des Pumpulses erfolgt die Deaktivierung des aktiven Güteschalters (zum Deaktivierungszeitpunkt t_0). Damit wird der Laserpuls ausgelöst. Die Deaktivierung erfolgt natürlich vor dem Zeitpunkt, zu welchem ein Laserpuls frühestens im aktivierten Zustand des aktiven Güteschalters ausgelöst würde.

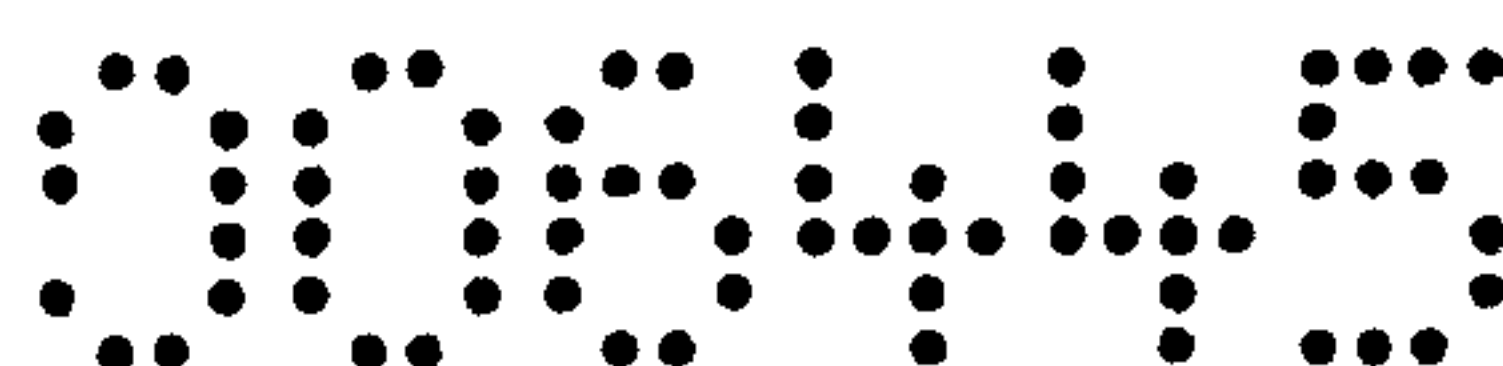
Die kurze Zeitspanne zwischen der Deaktivierung des aktiven Güteschalters und der Auslösung des Laserpulses variiert von Puls zu Puls nur minimal. Der Zeitpunkt der Auslösung des Laserpulses ist damit genau definiert. Der verbleibende Jitter liegt jedenfalls mehr als eine Größenordnung unter dem Jitter, der bei alleinigem Einsatz eines passiven Güteschalters auftreten würde.

Die Aktivierung des aktiven Güteschalters erfolgt im Ausführungsbeispiel durch Anlegen einer Hochspannung und die Deaktivierung durch Abschalten der Hochspannung.

Fig. 3 a) zeigt den Verlust („loss“), aufgrund des aktiven Güteschalters. Dieser beträgt im aktivierten Zustand des aktiven Güteschalters im Ausführungsbeispiel 10%. Wenn der aktive Güteschalter deaktiviert wird sinkt der durch den aktiven Güteschalter bewirkte Verlust auf vorzugsweise unter 1% ab (in Fig. 3 a) wurde der verbleibende Verlust vernachlässigt).

Fig. 3 b) zeigt den durch den passiven Güteschalter bewirkten Verlust. Maximal, also im vollständig ungesättigten Zustand des Absorbers, liegt dieser im Ausführungsbeispiel bei ca. 90%. Wenn der Absorber gesättigt ist, sinkt der durch den passiven Güteschalter bewirkte Verlust auf vorzugsweise unter 1% ab (in Fig. 3 b) wurde der verbleibende Verlust vernachlässigt).

Fig. 3 c) zeigt das Einsetzen des Laserpulses in Relation zum zeitlichen Verlauf der



durch den aktiven und passiven Güteschalter bewirkten Verluste. Zwischen der Deaktivierung des aktiven Güteschalters und dem Intensitätsmaximum des Laserpulses liegt eine Verzögerungszeit t_v , welche wie gesagt von Puls zu Puls weitgehend konstant ist.

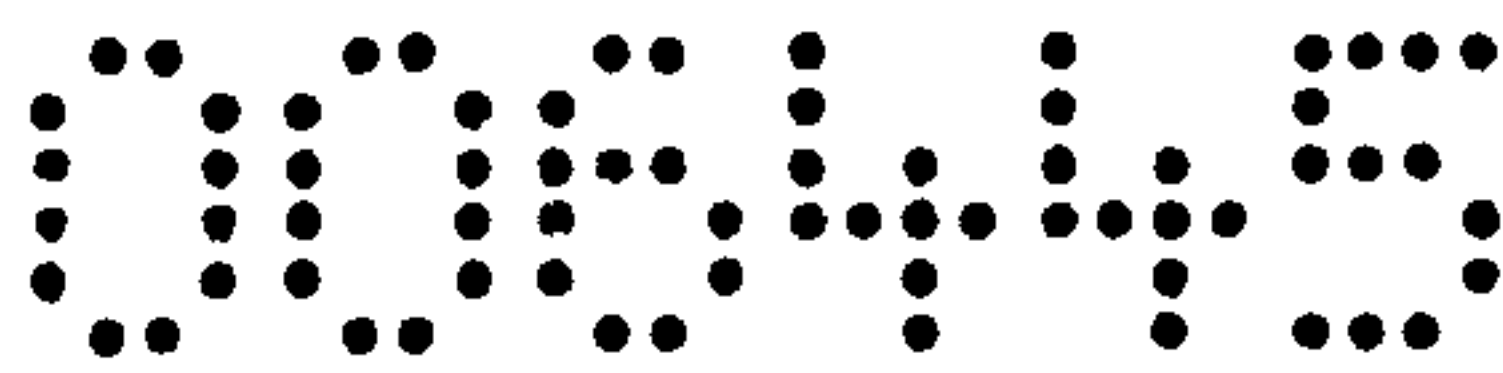
Aus Fig. 3 ist auch ersichtlich, dass unmittelbar vor Deaktivierung des aktiven Güteschalters der durch den passiven Güteschalter bewirkte Verlust immer noch größer als der durch den aktiven Güteschalter bewirkte Verlust ist.

Vorteilhafterweise kann die Pulsenergie größer als 1 mJ sein. Die Pulsdauer kann weniger als 500 ps betragen.

Die Brewster-Flächen des aktiven Lasermaterials 1 und passiven Güteschalters 2 könnten auch entfallen und stattdessen könnte ein anderes polarisierendes Element im Resonator angeordnet sein.

Ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in Fig. 4 dargestellt. Abgesehen von den im Folgenden beschriebenen Unterschieden entspricht die Ausbildung des Lasers und der Betrieb des Lasers dem ersten Ausführungsbeispiel und die Beschreibung des ersten Ausführungsbeispiels kann insoweit in analoger Weise herangezogen werden.

Die im Zusammenhang mit dem ersten und zweiten Ausführungsbeispiel eingesetzten fasergekoppelten Laserdiodenmodule als Pumpquellen haben eine limitierte Leistung und sind verhältnismäßig teuer für die verfügbare Leistung. Um die Leistung bei geringeren Kosten und geringerer Komplexität zu erhöhen, werden in diesem Ausführungsbeispiel QCW-Laserdioden-Stacks als Quelle der Pumpstrahlung verwendet. Es sind Ausbildungen bekannt, bei denen mehrere z.B. 1 cm breite, Laserdioden-Barren zu einem Laserdiodenmodul mit hoher Leistung zusammengefasst sind, das in QCW („quasi continuous wave“) betrieben wird. Es ist dabei auch bekannt, die Barren direkt aufeinander zu bonden, sodass ein geringer Abstand zwischen den Barren besteht, z.B. 140 μm . Ein Stack mit 10 Barren kann



somit auf einer Fläche von 10 mm x 1,4 mm emittieren, wobei der Abstrahlwinkel in der x-Richtung ca. $\pm 5^\circ$ beträgt und jener in der y-Richtung ca. $\pm 25^\circ$, sofern keinerlei Optik verwendet wird.

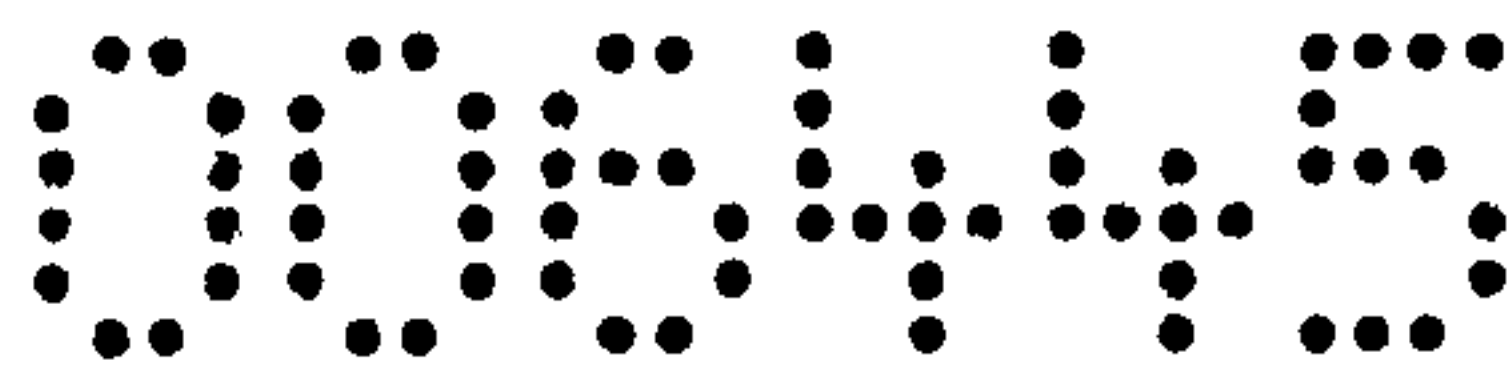
Ein wesentlicher Unterschied zu den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen besteht darin, dass in diesem Ausführungsbeispiel das aktive Lasermaterial seitengepumpt ist (also durch eine Fläche, die winkelig zur Achse des Laserstrahls steht). Hierzu kann ein zuvor beschriebener Stack 11, der in Fig. 4 schematisch angedeutet ist, eingesetzt werden, mit dem die Pumpstrahlung 6 direkt in das aktive Lasermaterial 1 eingestrahlt wird.

Der Laserstrahl im aktiven Lasermaterial 1 wird hierbei an dieser Seitenfläche 9, durch welche die Einstrahlung der Pumpstrahlung 6 erfolgt, durch interne Totalreflektion reflektiert.

Besonders bevorzugt ist ein Einfallswinkel des Laserstrahls von 45° , sodass die Achse 7 des Laserstrahls um 90° abgewinkelt wird. Bei einem solchen Einfallswinkel und p-Polarisation ergibt sich der Effekt, dass der einfallende und ausfallende Strahl nicht miteinander interferieren, da ihre E-Feld-Vektoren rechtwinkelig zueinander stehen. Dadurch erzeugen der einfallende und ausfallende Strahl für sich betrachtet keinerlei räumliches Lochbrennen im angeregten aktiven Lasermaterial 1, was die Modenstabilität und die Effizienz erhöht. Andernfalls könnte sogenanntes SHB („spacial hole burning“) den gain der Nebenmoden deutlich erhöhen.

Um die erwünschte p-Polarisation zu erzwingen, können das aktive Lasermaterial 1 und der passive Güteschalter 2 wie dargestellt jeweils eine Brewster-Fläche aufweisen, analog wie im zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel.

Die entlang der Achse 7 des Laserstrahls gemessene Länge (=Resonatorlänge a) des Resonators 3 vom ersten Spiegel 4 zum zweiten Spiegel 5 (=entfaltete Länge des Resonators) kann in diesem Ausführungsbeispiel beispielsweise 20 mm betragen. Diese Resonatorlänge a ist in Fig. 3 durch winkelig zueinander stehende



15

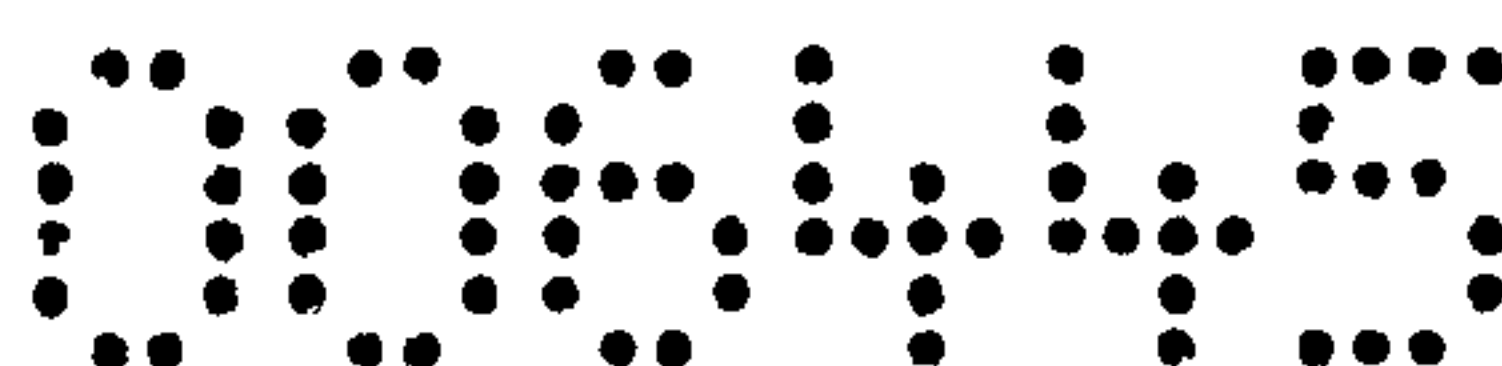
Dimensionierungslinien und -pfeile angedeutet.

Ein zuvor beschriebener Laserdioden-Stack kann z.B. 2000 W Leistung für 250 μ s abstrahlen, was einer Pumpenergie von 500 mJ entspricht. Es kann damit eine Energie des Laserpulses im Bereich von 100 mJ erreicht werden.

Um eine ausreichender Aufweitung der Pumpstrahlung in y-Richtung zu erzielen, kann die Luftstrecke zwischen dem Laserdioden-Stack und der Eintrittsfläche in das aktive Lasermaterial 1 beispielsweise im Bereich von 2-3 mm liegen.

Die insgesamt negative Brechkraft des Resonators 3 wird so ausgelegt, dass sich ein ausreichend großer Modenradius der Laserstrahlung ergibt. Beispielsweise liegt die Fokusslänge des ersten Spiegels 4 im Bereich von -50 mm. Es ergibt sich damit eine Magnifikation von ca. 2. Der Modenradius der Laserstrahlung kann beim Auftreffen auf den zweiten Spiegel 5 im Bereich von 3,5 mm liegen. Der Gradientenspiegel wird entsprechend ausgelegt. Der Radius, bei welchem die Reflektivität des Gradientenspiegels auf e^{-2} abgefallen ist, kann hierbei im Bereich von 1,75 mm liegen.

Die Polarisationsselektion kann zusätzlich durch eine Phasenverschiebung zwischen der s- und p-Polarisation bei der totalen internen Reflektion an der Oberfläche des aktiven Lasermaterials 1 unterstützt werden. Die entfaltete Länge des Resonators 3 kann hierbei durch Feinjustage so eingestellt werden, dass nur für eine der beiden Polarisierungen ein longitudinaler Mode im Verstärkungsmaximum des aktiven Lasermaterials 1 liegt, während die longitudinalen Moden für die andere Polarisation demgegenüber soweit verschoben sind, dass diese zumindest im Wesentlichen nicht anschwingen (d.h. die Energie beträgt weniger als 10%, vorzugsweise weniger als 1%, von derjenigen des Grundmodes mit der Polarisation, die eine Lage im Verstärkungsmaximum ergibt), insbesondere gar nicht anschwingen (d.h. die Laserschwelle wird nicht überschritten). Eine solche Feinjustage der Resonatorlänge kann beispielsweise durch Einstellung der Temperatur der Basisplatte, auf welcher der Laser montiert ist, erfolgen.



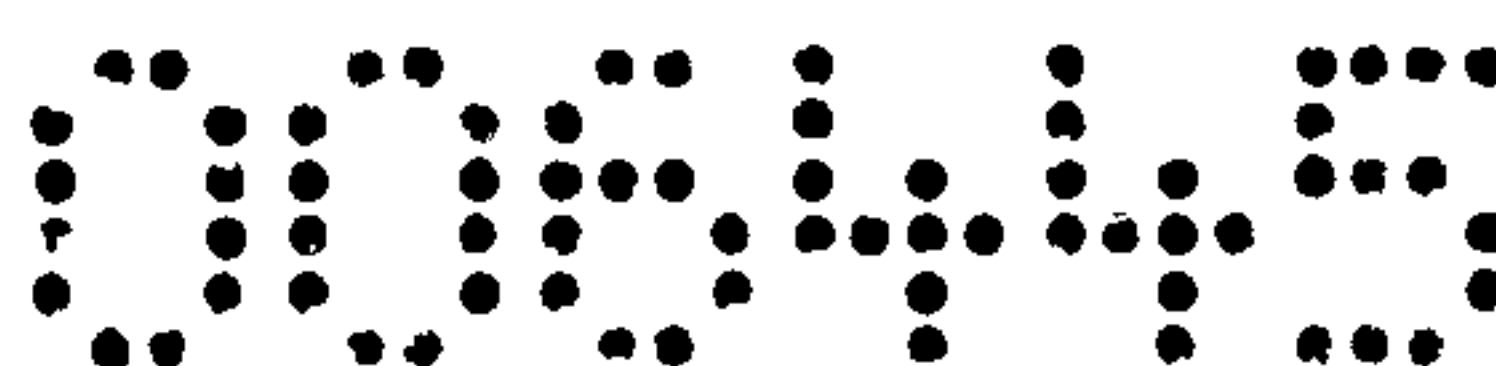
Der durch die totale innere Reflektion bewirkte Phasenunterschied zwischen der s- und p-Polarisation beträgt bei einem Einfallswinkel von 45° etwa 116° . Denkbar wäre auch eine Beschichtung dieser Seitenfläche 8, um einen gezielten Phasenunterschied hervorzurufen, beispielsweise von 90° . Diese Beschichtung müsste für die Wellenlänge der Pumpstrahlung durchlässig sein.

Die Brewster-Flächen des aktiven Lasermaterials 1 und des passiven Güteschalters 2 könnten auch entfallen und die Polarisationsselektion könnte ausschließlich aufgrund des durch die totale innere Reflektion bewirkten Phasenunterschieds zwischen der s- und der p-Polarisation der Laserstrahlung erfolgen. Auch ein weiteres oder ein anderes polarisierendes Element könnte vorgesehen sein.

Fig. 5 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung. Die Ausbildung entspricht derjenigen des zweiten Ausführungsbeispiels, abgesehen von den im Folgenden beschriebenen Unterschieden. Im Übrigen kann die Beschreibung des zweiten Ausführungsbeispiels in analoger Weise herangezogen werden.

In diesem Ausführungsbeispiel weist das aktive Lasermaterial 1 eine andere Form als im zweiten Ausführungsbeispiel auf, und zwar ist es derart länger ausgebildet, dass es zu zwei totalen internen Reflektionen kommt. Wenn der Laserstrahl ausgehend vom ersten Spiegel 4 in das aktive Lasermaterial 1 eintritt (nach Durchtritt durch den passiven Güteschalter 2) erfolgt zunächst eine Totalreflektion an der Seitenfläche 9, durch welche die Pumpstrahlung eingestrahlt wird. Im Weiteren erfolgt eine Totalreflektion an der gegenüberliegenden Seitenfläche 10. In der Folge tritt der Laserstrahl eine vorzugsweise im Brewster-Winkel stehende Endfläche des aktiven Lasermaterials 1 aus und gelangt von dort durch den aktiven Güteschalter 8 zum zweiten Spiegel 5. Die Abwinkelungen der Achse 7 des Laserstrahls bei den beiden totalen internen Reflektionen betragen vorzugsweise jeweils 90° . Andere Winkel sind aber grundsätzlich ebenfalls denkbar und möglich.

Die gegenüberliegenden Brewster-Flächen des passiven Güteschalters 2 und des



aktiven Lasermaterials 1 wurden hier weggelassen. Stattdessen sind gegenüberliegende Brewster-Flächen zwischen dem aktiven Lasermaterial 1 und dem aktiven Güteschalter 8 vorgesehen. Stattdessen oder zusätzlich könnten auch gegenüberliegende Brewster-Flächen zwischen dem passiven Güteschalter 2 und dem aktiven Lasermaterial 1 vorgesehen sein.

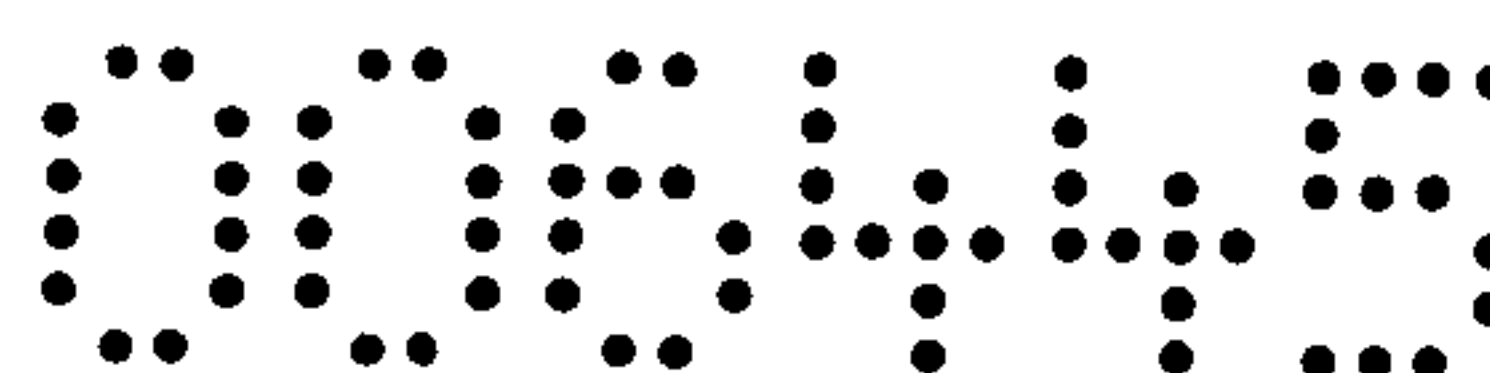
Das in dieser Weise ausgebildete aktive Lasermaterial kann in einfacher Weise auf einer Grundplatte montiert werden. Es können auch Vorteile dieser Ausbildung in Hinblick auf ein „parasitäres Lasern“ bestehen. Ein gewisser Nachteil besteht in der größeren Länge des aktiven Lasermaterials 1.

Wenn die insgesamt entfaltete Länge des Resonators kurz genug gehalten werden kann, wäre auch eine weitere totale interne Reflektion des Laserstrahls im aktiven Lasermaterial grundsätzlich denkbar und möglich.

Fig. 6 zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel der Erfindung. Die Unterschiede zum ersten Ausführungsbeispiel werden im Folgenden erläutert. Im Übrigen kann die Beschreibung zum ersten Ausführungsbeispiel in analoger Weise herangezogen werden.

In diesem Ausführungsbeispiel ist der Resonator als stabiler Resonator ausgebildet. Die Spiegel 4, 5, die wiederum die Endspiegel des Resonators bilden, können in diesem Ausführungsbeispiel plan ausgebildet sein, wobei im Betrieb von der thermischen Linse ein fokussierendes Element ausgebildet wird. Auch ein weiteres fokussierendes (= eine positive Brechkraft aufweisendes) Element kann im Resonator angeordnet sein. Es kann auch mindestens einer der beiden Spiegel 4, 5 fokussierend ausgebildet sein. Im Ausführungsbeispiel ist dies für den Spiegel 5 angedeutet.

Der einzige longitudinale Mode des Lasers könnte hier im Vergleich zum ersten Ausführungsbeispiel einen relativ kleinen Strahlradius aufweisen, z.B. wenige 10 µm beim planen Spiegel 4. Die Pulsraten können relativ hoch sein, insbesondere über 8



18

kHz. Die Pulsenergien können hier z.B. im Bereich $1 \mu\text{J}$ bis $100 \mu\text{J}$ liegen.

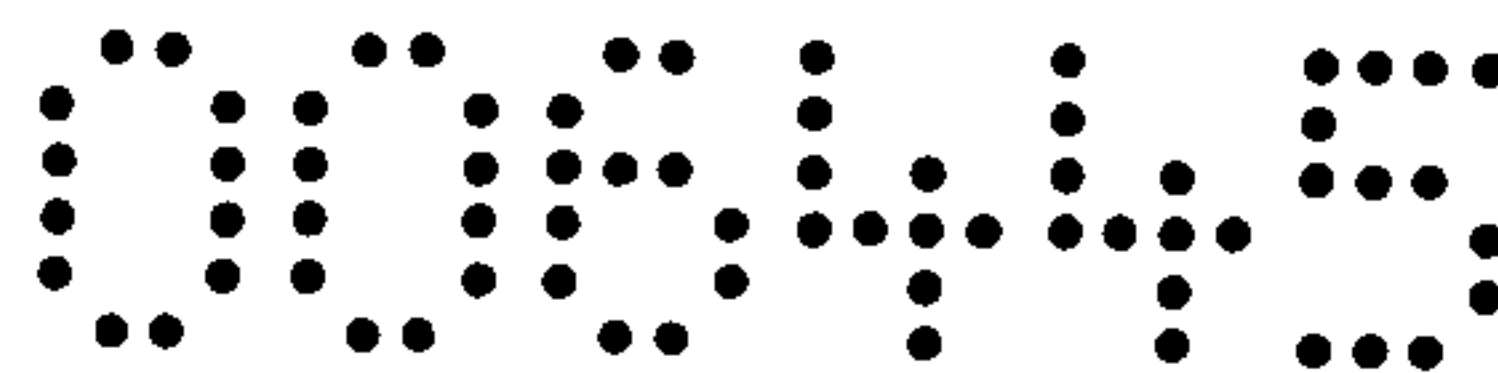
Die Brewster-Flächen des aktiven Lasermaterials 1 und des passiven Güteschalters 2 sind in diesem Ausführungsbeispiel nicht vorhanden. Da kein polarisierendes Element vorhanden ist, ist der aktive Güteschalter 8 hier in Form eines akusto-optischen Modulators ausgebildet. Dieser wird durch einen Piezo angetrieben (durch die horizontalen Linien angedeutet).

In einer Modifikation dieses Ausführungsbeispiels könnte ein polarisierendes Element im Resonator angeordnet sein, beispielsweise könnte dies durch eine „flat-brewster“-Konfiguration analog zum ersten Ausführungsbeispiel ausgebildet werden. In diesem Fall könnte der aktive Güteschalter 8 auch von einem elektro-optischen Modulator gebildet werden.

In diesem Ausführungsbeispiel ist der Spiegel 5 teildurchlässig ausgebildet, um den Laserstrahl auszukoppeln. Beispielsweise kann der Spiegel 5 eine Transmission von 30% bei 1064 nm aufweisen.

Der passive Güteschalter 2 und das aktive Lasermaterial 1 sind in Fig. 6 durch einen Spalt getrennt dargestellt. Vorzugsweise sind diese beiden Elemente zu einer Einheit verbunden, z.B. durch Diffusion-Bonding an der jeweils polierten Fläche zusammengebondet. Wenn keine „flat-brewster“-Konfiguration vorhanden ist, kann eine dielektrische Schicht zwischen den beiden Elementen entfallen.

Fig. 7 zeigt ein fünftes Ausführungsbeispiel der Erfindung. In diesem ist der Resonator 30 als Ringresonator ausgebildet. In Ringresonatoren laufen mögliche Moden im Resonator um. Es kann beispielsweise wie dargestellt eine im Wesentlichen „dreieckförmige“ Struktur ausgebildet sein, wobei an zwei Ecken des Dreiecks eine Reflektion an den Spiegeln 4, 5 erfolgt und an der dritten Ecke des Dreiecks eine totale interne Reflektion im aktiven Lasermaterial 1 erfolgt. Weitere Reflektionen an spiegelnden Flächen sind denkbar und möglich, z.B. zur Ausbildung einer im Wesentlichen „viereckförmigen“ Ringstruktur. Durch einen der Spiegel 4, 5



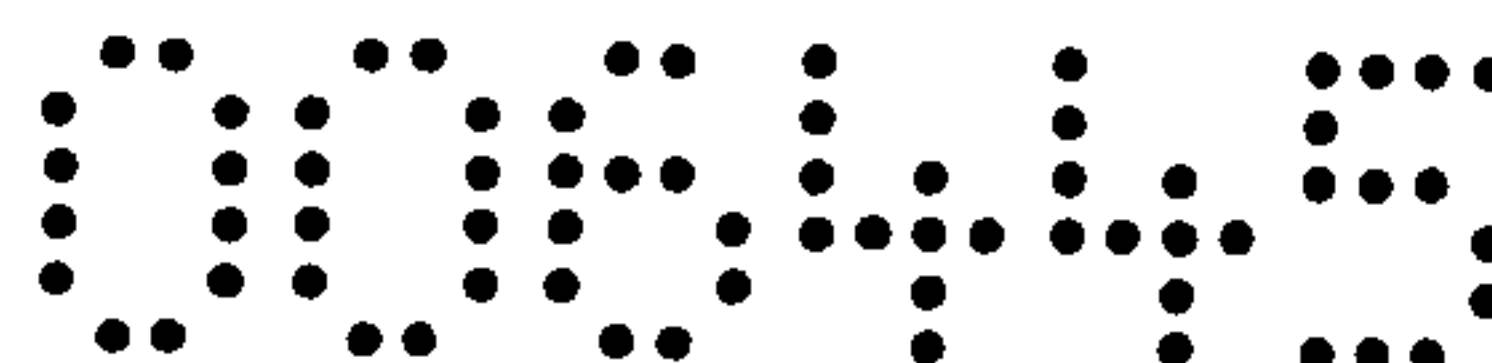
kann die Auskopplung der Laserstrahlung erfolgen. Im Falle der Ausbildung als instabiler Resonator, wie dies in Fig. 7 dargestellt ist, ist dieser Spiegel 5 als Gradientenspiegel ausgebildet. Das Pumpen kann beispielsweise in analoger Weise wie im zweiten Ausführungsbeispiel beschrieben erfolgen, d.h. das aktive Lasermaterial 1 ist seitengepumpt.

Im Falle eines Ringresonators ist die Resonatorlänge die entlang der Achse des Laserstrahls im Resonator 30 gemessene Länge über einen Umlauf durch den Resonator 30. Damit in einer vorteilhaften Ausbildung zumindest im Wesentlichen nur ein einziger longitudinaler Mode im Resonator anschwingt, beträgt die Resonatorlänge vorzugsweise weniger als 100 mm. Vorteilhafterweise weist der Laser hierbei im Betrieb zumindest im Wesentlichen auch nur einen einzigen transversalen Mode auf. Bezüglich der Ausbildung und Auslegung des passiven und aktiven Güteschalters 2, 8 im Resonator gelten die in diesem Zusammenhang gemachten Ausführungen zu den Ausführungsbeispielen mit linearem Resonator. Der Verlust des aktiven bzw. passiven Güteschalters bezieht sich hier auf einen einzelnen Umlauf im Ringresonator (also auf nur einen einzigen Durchgang durch den jeweiligen Güteschalter).

Ein Ringlaser (=Laser mit Ringresonator) hat den Vorteil, dass das „spacial hole burning“ zur Gänze entfallen kann, was die Modenstabilität gegenüber den Nebenmoden erhöht. In den Ringresonator könnte man optische Kristalle mit „second harmonic generation“ einbauen und somit beispielsweise aus 1064 nm grüne 532 nm-Pulse erzeugen.

Unterschiedliche weitere Modifikationen sind denkbar und möglich, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. So könnte beispielsweise auch bei den anderen Ausführungsbeispielen als dem in Fig. 6 gezeigten ein akusto-optischer Modulator anstelle eines elektro-optischen Modulators als aktiver Güteschalter eingesetzt werden.

Die Reihenfolge der Elemente im Resonator kann unterschiedlich gewählt werden.



Die Pumpstrahlung könnte in anderer Weise eingekoppelt werden, z.B. durch einen zusätzlichen dichroitischen Spiegel (bei longitudinalem Pumpen).

Zur Verbesserung der Performance und/oder um „parasitic lasing“ zu vermeiden, können entsprechende Beschichtungen, wie Antirefleksionsbeschichtungen vorgesehen werden, wie dies im Stand der Technik bekannt ist.

Zur Polarisationsselektion des Laserlichts könnten andere Winkel anstelle des Brewster-Winkels verwendet werden, z.B. 45° Winkel. Es können hierbei auch verschiedene Teile mit dazwischenliegender dielektrischer Schicht gebondet sein.

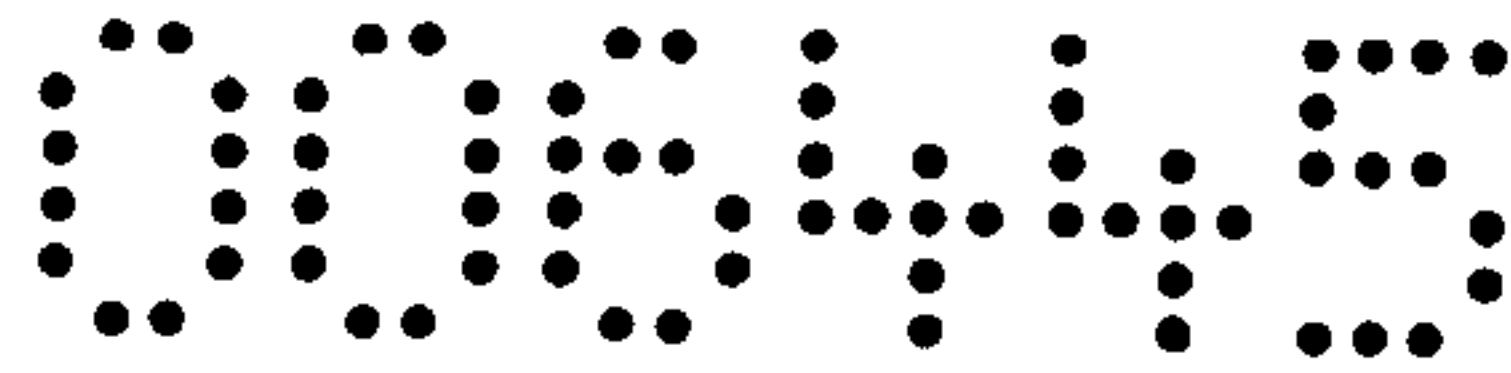
Die Polarisationsselektion könnte auch in anderer Weise als gezeigt durchgeführt werden, beispielsweise auch durch eine auf eine Beschichtung eines optischen Elements des Resonators aufgebrachte oder in diese eingebrachte Gitterstruktur. Polarisationsselektionen des Laserlichts sind in unterschiedlicher Weise bekannt.

Es könnte ein anderes aktives Lasermaterial 1 als Nd:YAG vorgesehen sein, z.B. Yb:YAG oder Er:YAG.

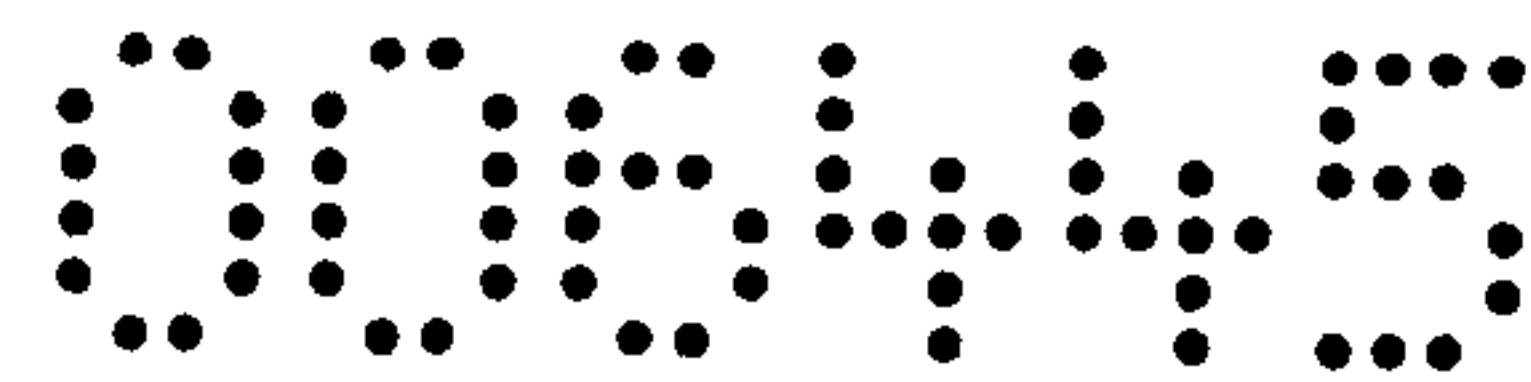
Für den passiven Güteschalter 2 können andere sättigbare Absorbermaterialien verwendet werden, z.B. Co:MALO (für Wellenlängen $> 1,2 \mu\text{m}$), gegebenenfalls in Verbindung mit Nd:YAG, welches bei der Nebenlinie von 1440 nm betrieben wird.

Für einen Elektro-optischen Modulator könnte ein anderes Material als BBO eingesetzt werden, z.B. RTP, KTP, KD*P usw.

Ein erfindungsgemäßer Laser könnte auch mit einem Resonator ausgebildet sein, der eine Resonatorlänge von mehr als 50 mm (im Fall der Ausbildung als linearer Resonator) bzw. mehr als 100 mm (im Fall der Ausbildung als Ringresonator) aufweist. Der Resonator könnte somit mit einer Mehrzahl von longitudinalen Moden betrieben werden. Die Verwendung eines passiven Güteschalters zusätzlich zum



aktiven Güteschalter könnte in diesem Fall eingesetzt werden, damit abgesichert wird, dass im aktivierten Zustand des aktiven Güteschalters keine Laserpulse erzeugt werden. Der maximale Verlust des passiven Güteschalters könnte in diesem Fall vorteilhafterweise auch unter 50% liegen. Der Verlust des aktiven Güteschalters im aktivierten Zustand könnte in diesem Fall über 50% liegen, beispielsweise auch über 90% liegen.

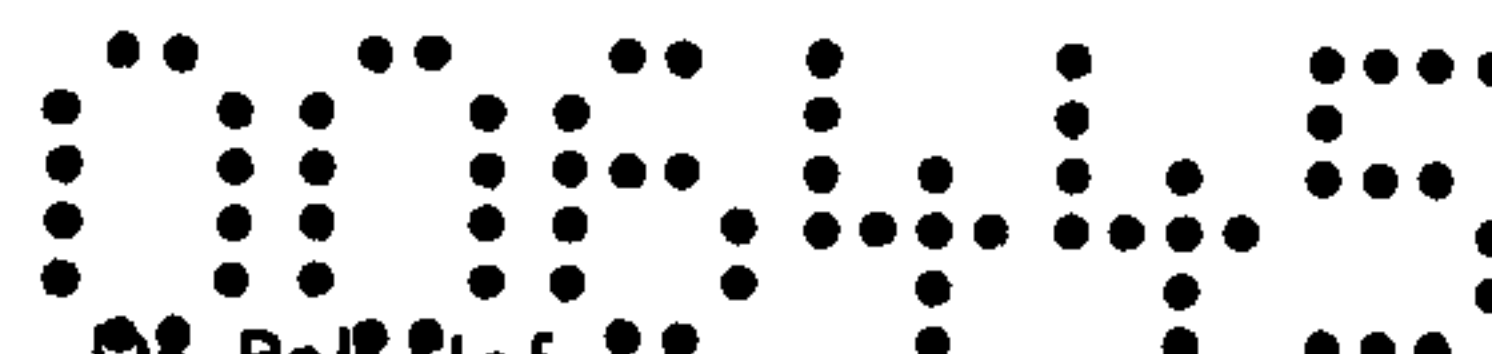


22

Legende
zu den Hinweisziffern:

- 1 aktives Lasermaterial
- 2 passiver Güteschalter
- 3 Resonator
- 4 Spiegel
- 5 Spiegel
- 6 Pumpstrahlung
- 7 Achse
- 8 aktiver Güteschalter
- 9 Seitenfläche
- 10 Seitenfläche
- 11 Stack

Patentanwälte
Hofmann & Fechner


Dr. Ralf Hofmann
Dr. Thomas Fechner
Hörnlingerstr. 3, Postfach 5
6830 Rankweil, Austria

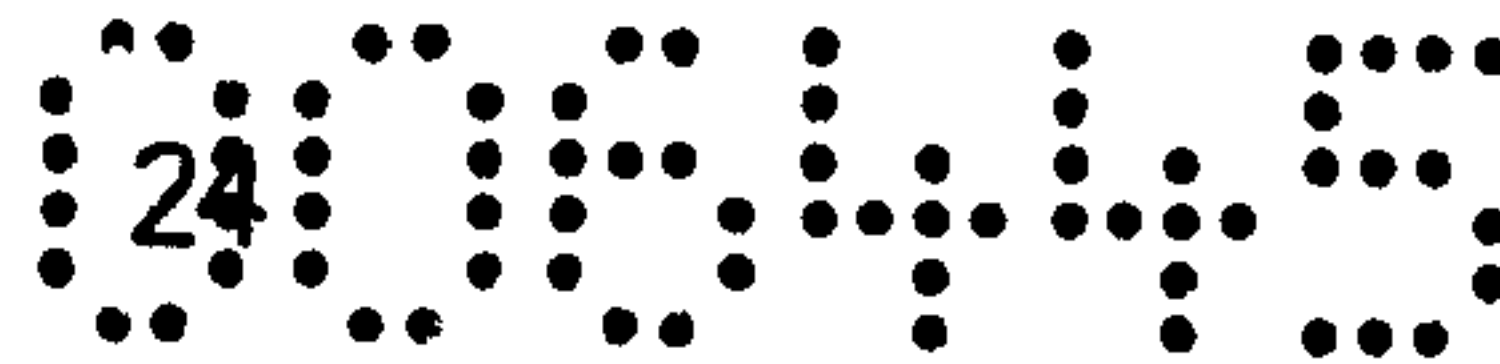
T +43 (0)5522 73 137
F +43 (0)5522 73 137-10
M office@vpat.at
I www.vpat.at

29126/33/ss
20180924

23

Patentansprüche

1. Gütegeschalteter Festkörperlaser, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonator (3, 30) des Festkörperlaser sowohl einen passiven Güteschalter (2) als auch einen aktiven Güteschalter (8) aufweist.
2. Festkörperlaser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der aktive Güteschalter (8) ein elektro-optischer Modulator, vorzugsweise eine Pockels-Zelle, oder ein akusto-optischer Modulator ist.
3. Festkörperlaser nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der vom passiven Güteschalter (2) maximal bewirkte Verlust größer als der vom aktiven Güteschalter (8) im aktivierten Zustand bewirkte Verlust ist.
4. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der vom aktiven Güteschalter (8) im aktivierten Zustand bewirkte Verlust, bezogen auf einen Hin- und einen Rückweg durch den Resonator (3) im Fall der Ausbildung als linearer Resonator und bezogen auf einen Umlauf um den Resonator (30) im Fall der Ausbildung als Ringresonator, weniger als 50%, vorzugsweise weniger als 30% beträgt.
5. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der vom passiven Güteschalter (2) maximal bewirkte Verlust, bezogen auf einen Hin- und einen Rückweg durch den Resonator (3) im Fall der Ausbildung als linearer Resonator und bezogen auf einen Umlauf um den Resonator (30) im Fall der Ausbildung als Ringresonator, mehr als 50%, vorzugsweise mehr als 70% beträgt.



6. Gütegeschalteter Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonator (3, 30) eine Resonatorlänge (a) im Fall der Ausbildung als linearer Resonator von weniger als 50 mm, vorzugsweise weniger als 25 mm, und im Fall der Ausbildung als Ringresonator von weniger als 100 mm, vorzugsweise weniger als 50 mm aufweist, wobei im Resonator (3) zumindest im Wesentlichen nur ein einziger longitudinaler Mode anschwingt.
7. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonator (3, 30) als instabiler Resonator ausgebildet ist, wobei einer der Spiegel (4, 5) ein Gradientenspiegel ist.
8. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das aktive Lasermaterial (1) seitengepumpt ist.
9. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das aktive Lasermaterial (1) longitudinal gepumpt ist.
10. Verfahren zum Betreiben eines gütegeschalteten Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser durch wiederholte Pumppulse gepumpt wird und der aktive Güteschalter (8) zu einem Aktivierungszeitpunkt (t_A) vor einem jeweiligen Pumppuls oder während eines jeweiligen Pumppulses vor dem Auftreten eines Laserpulses aktiviert wird und zu einem Deaktivierungszeitpunkt (t_D) während des jeweiligen Pumppulses deaktiviert wird, der nach einem Zeitpunkt innerhalb des Pumppulses liegt, zu welchem spätestens ein Laserpuls im dauerhaft deaktivierten Zustand des aktiven Güteschalters (8) auftreten würde.

00545

1/4

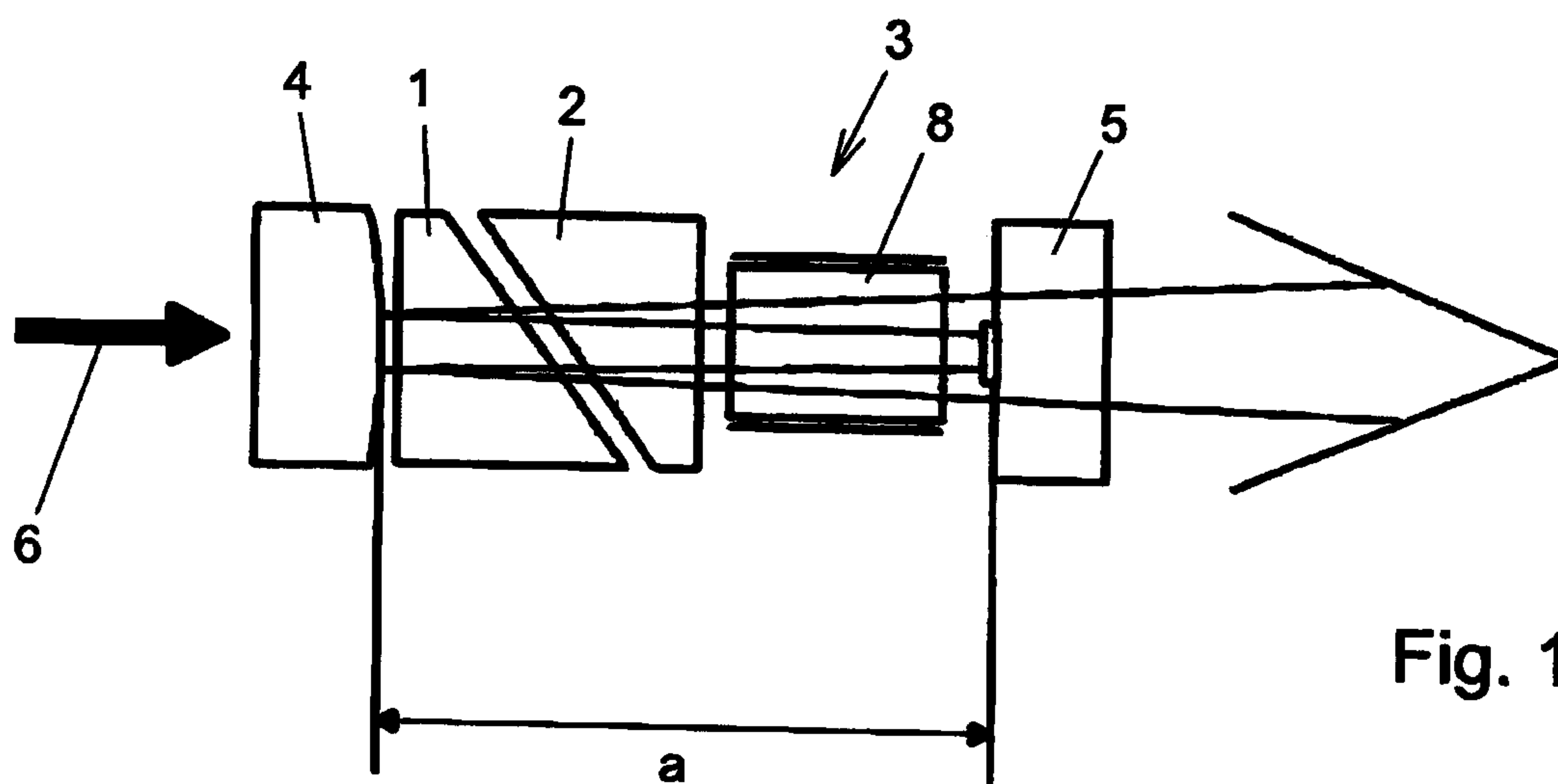
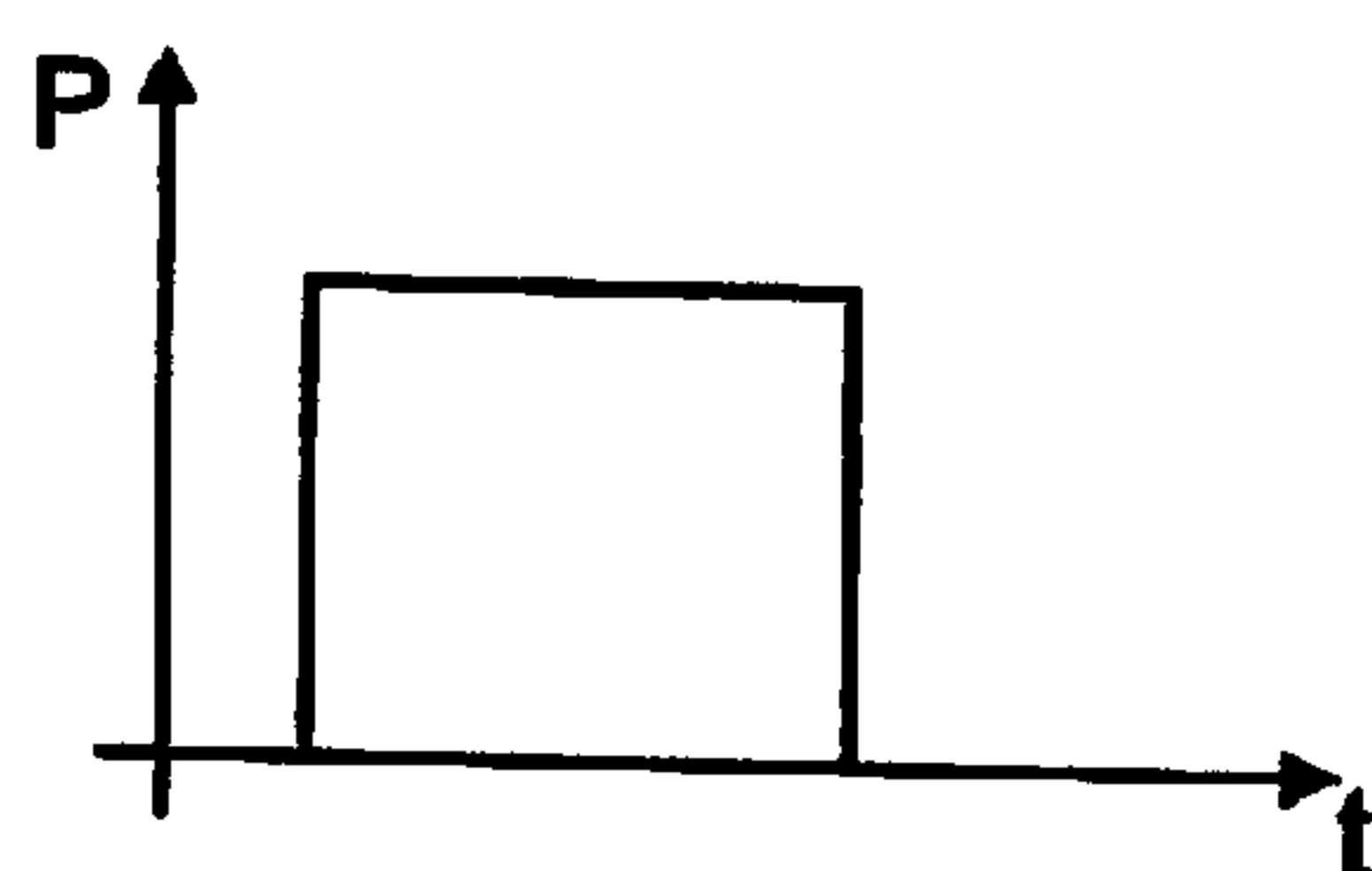
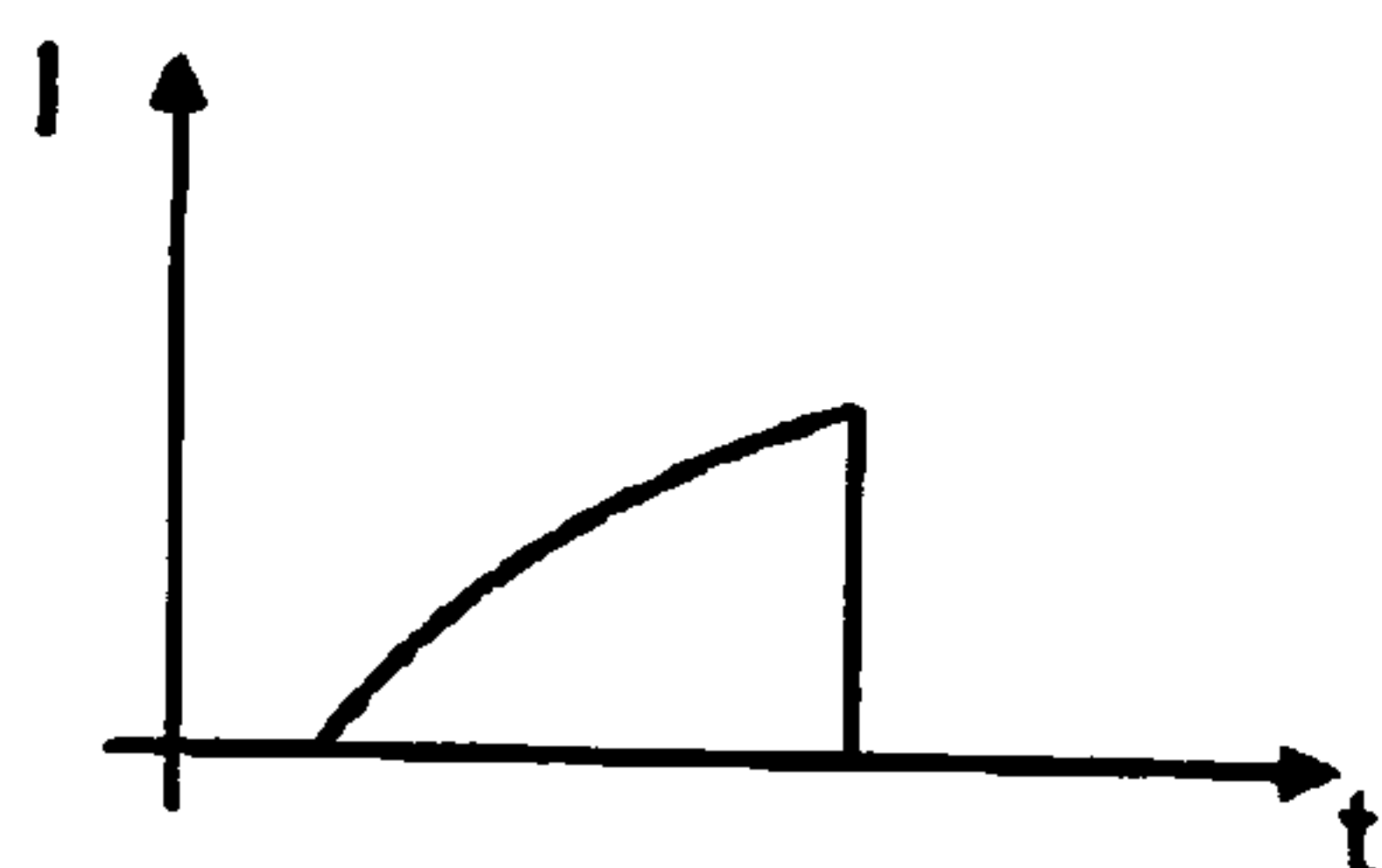


Fig. 1

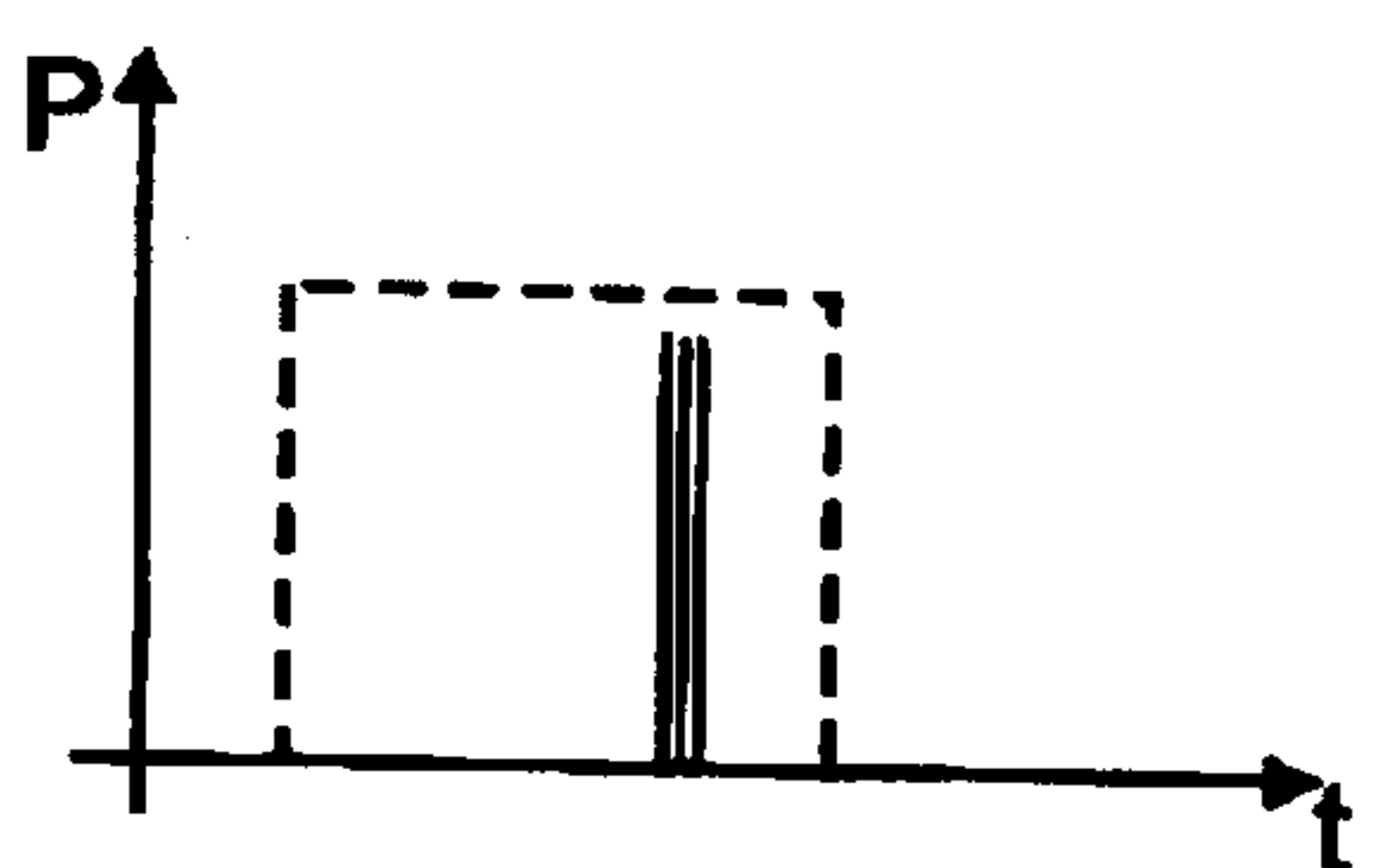
Fig. 2



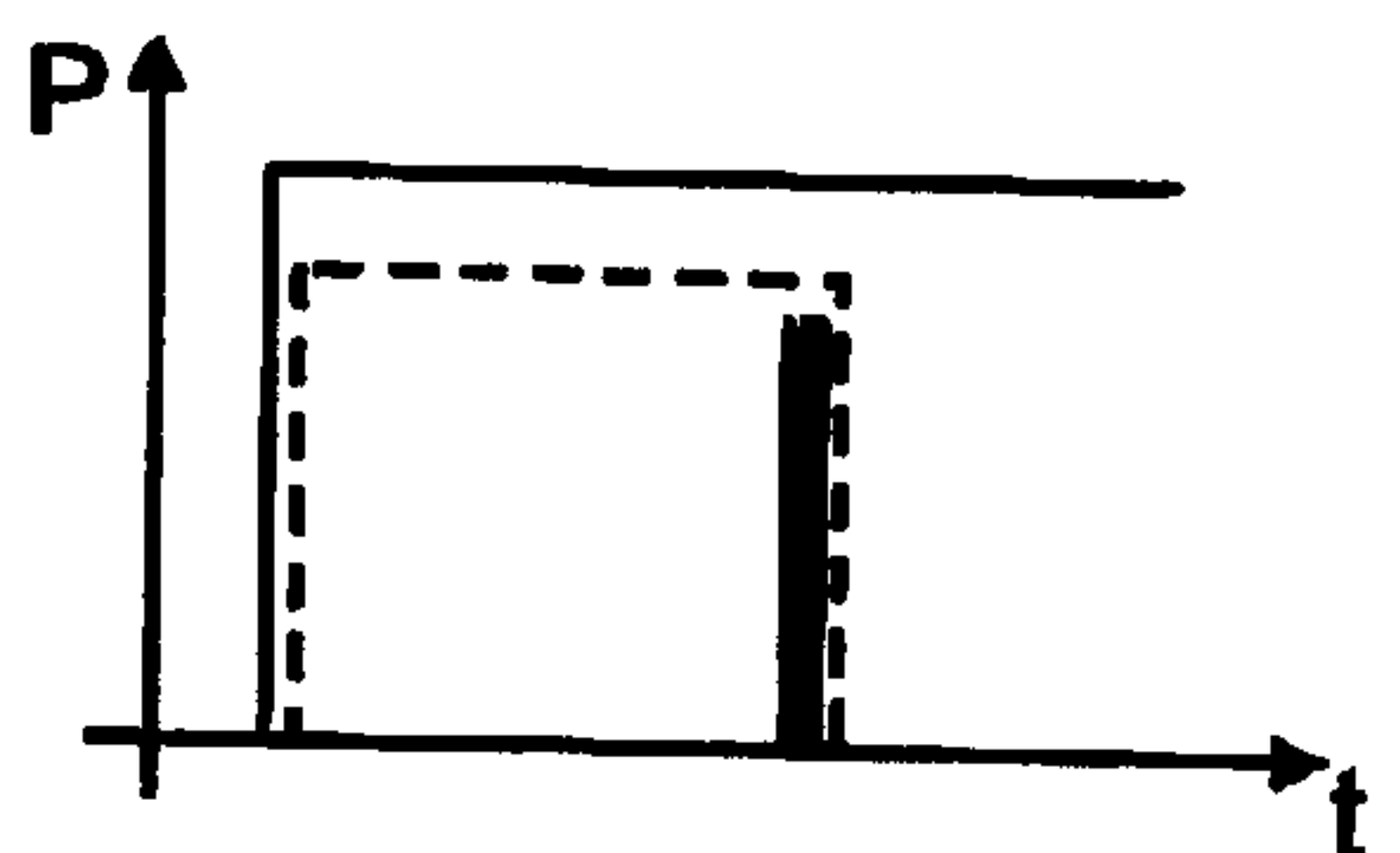
a)



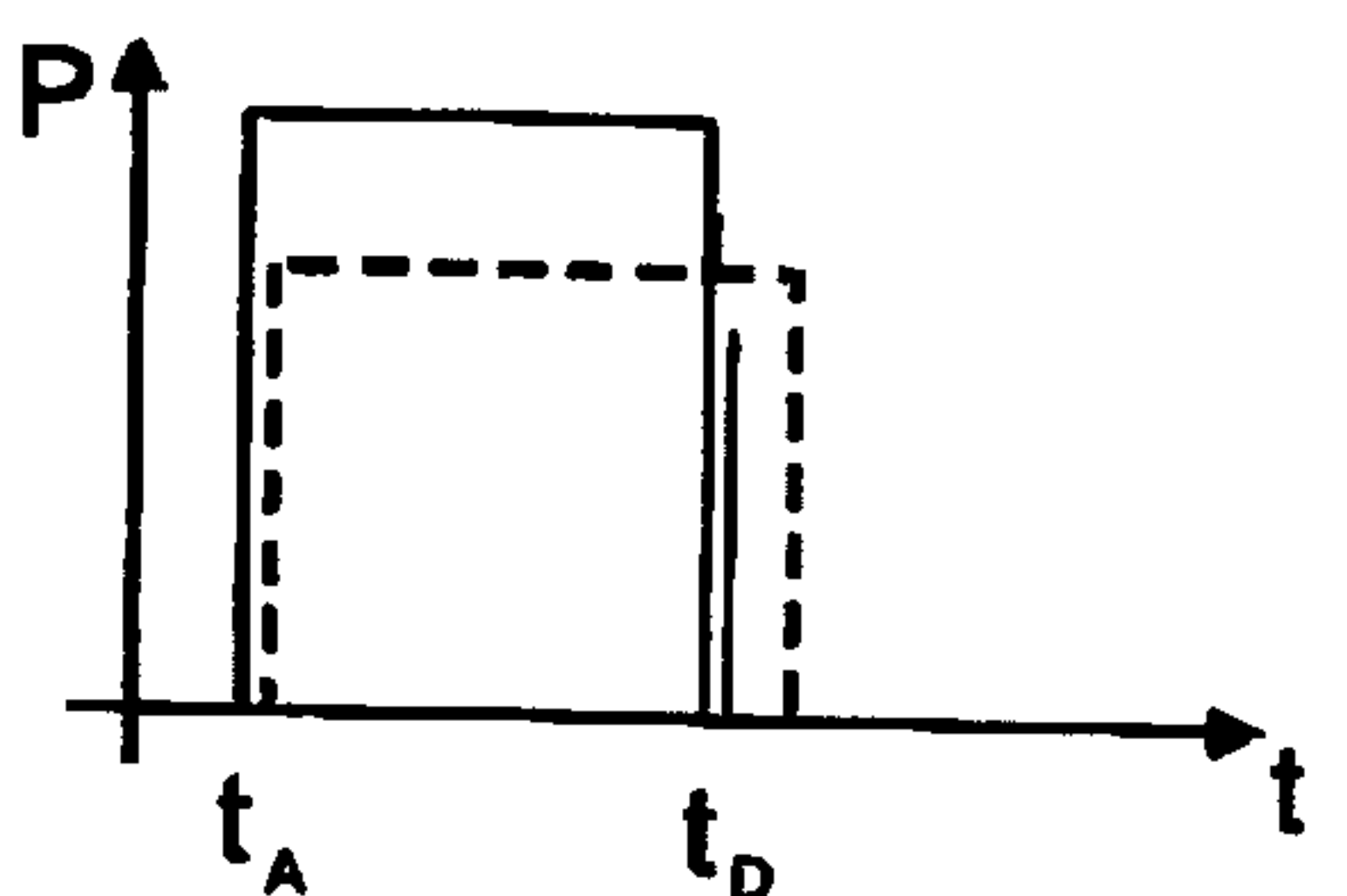
b)



c)



d)

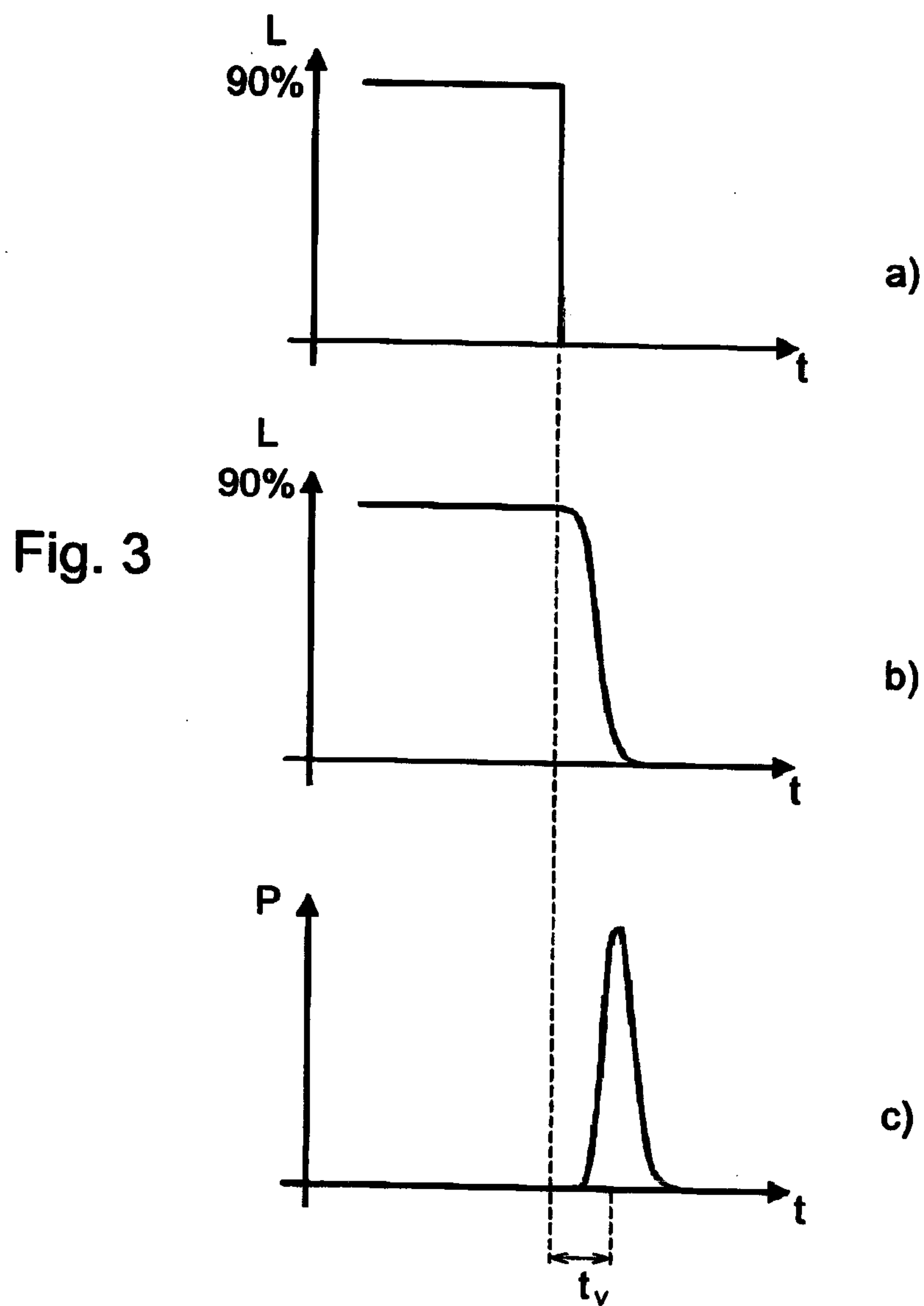
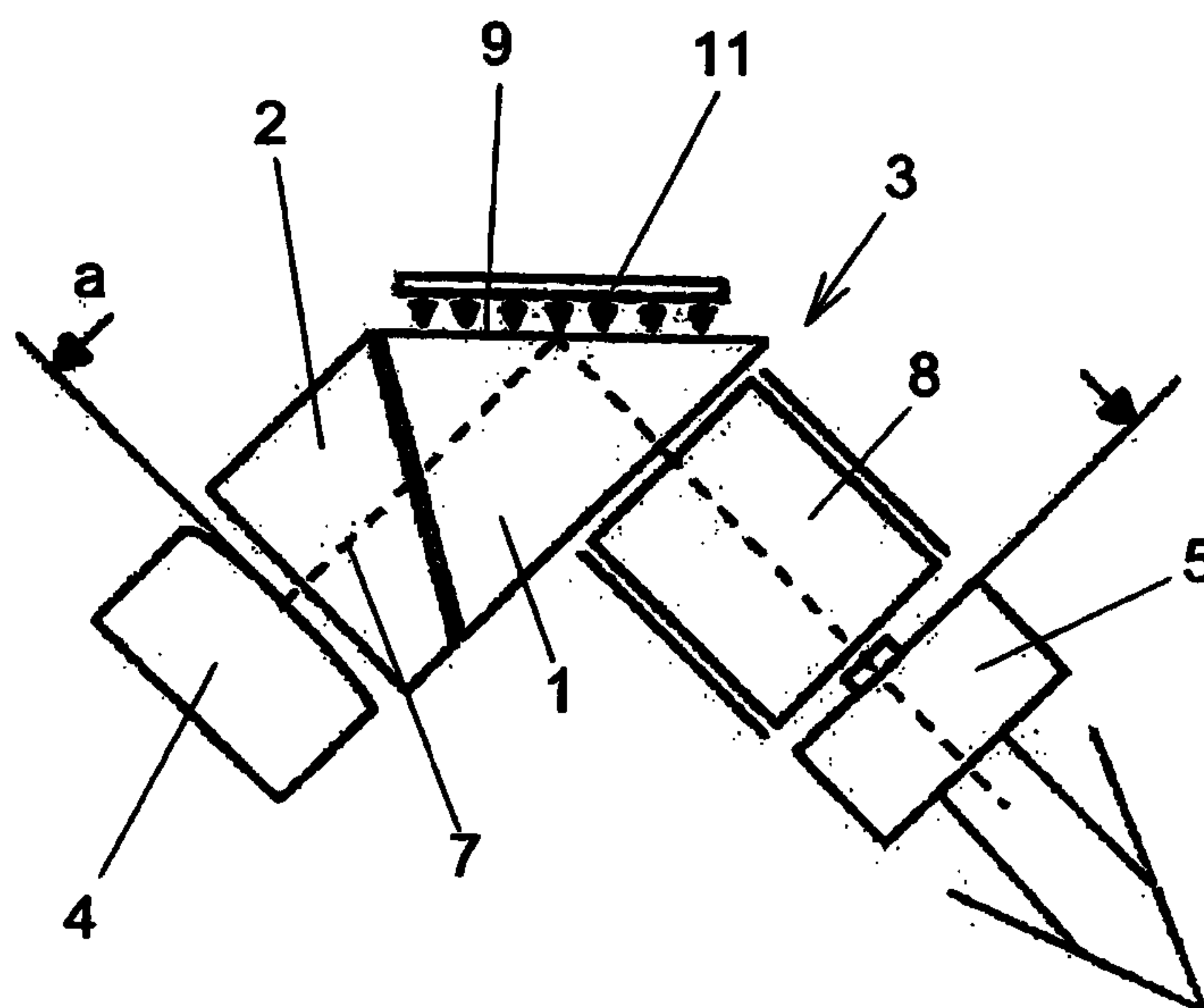


e)

29126

00545

2/4

**Fig. 4**

29126

003445

3/4

Fig. 5

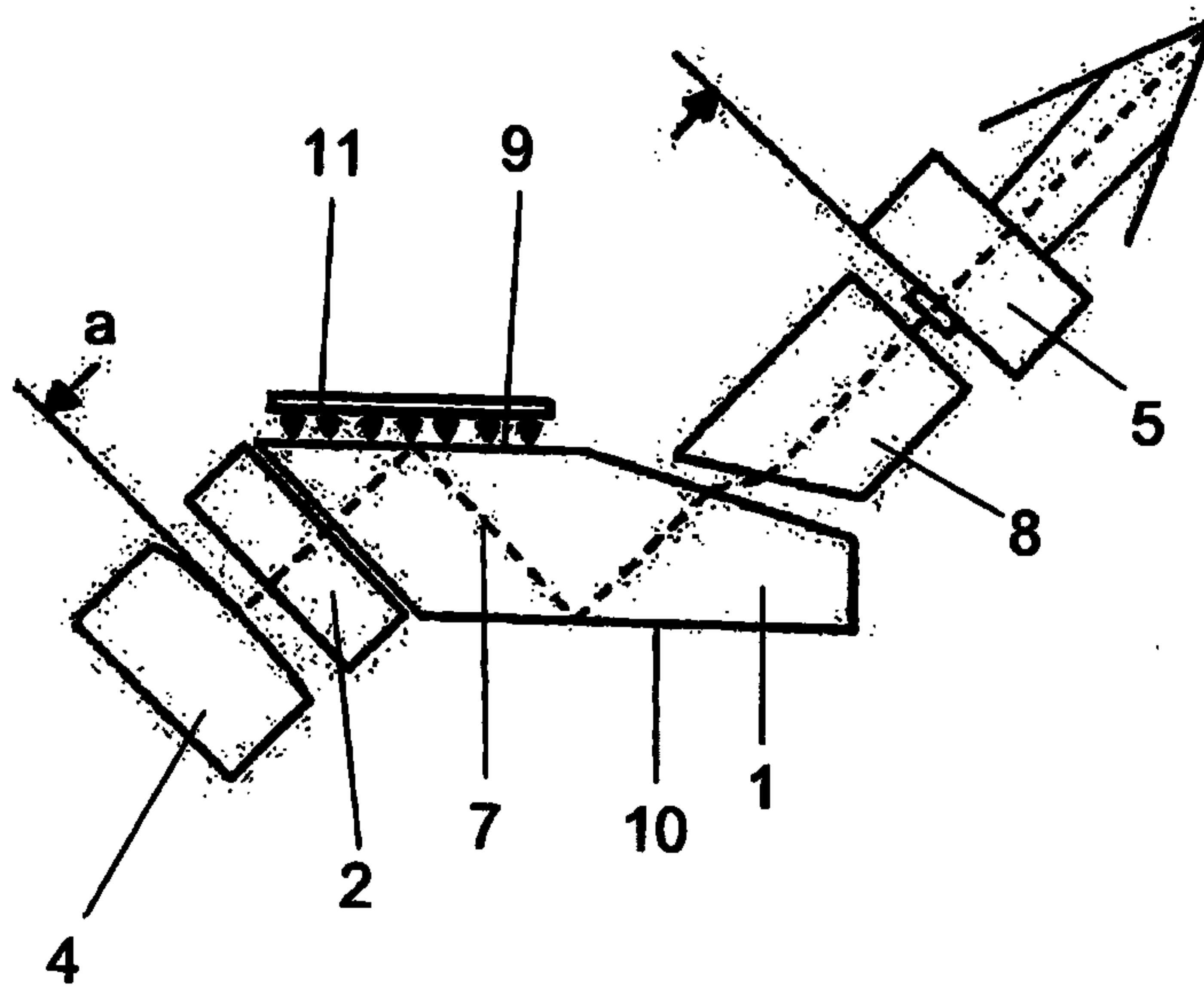
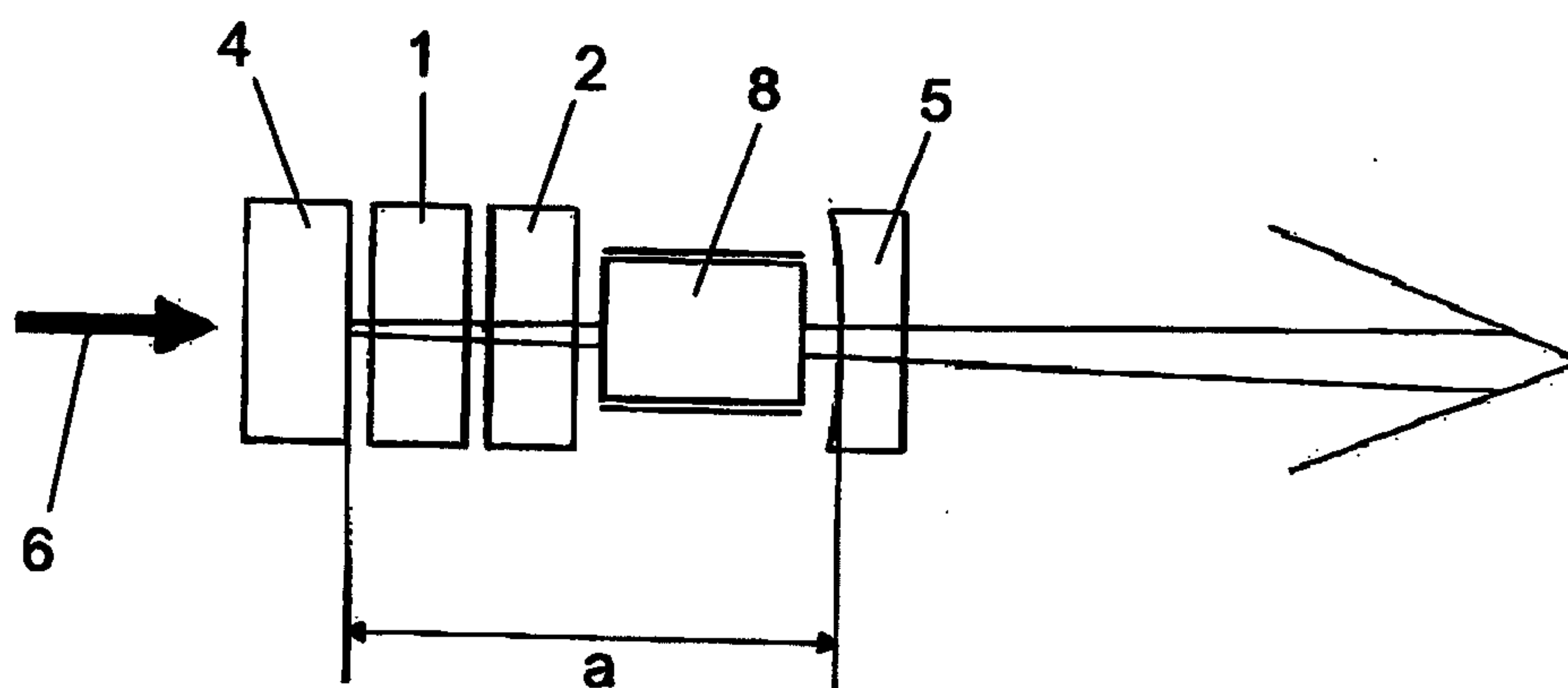


Fig. 6



29126

005445

4/4

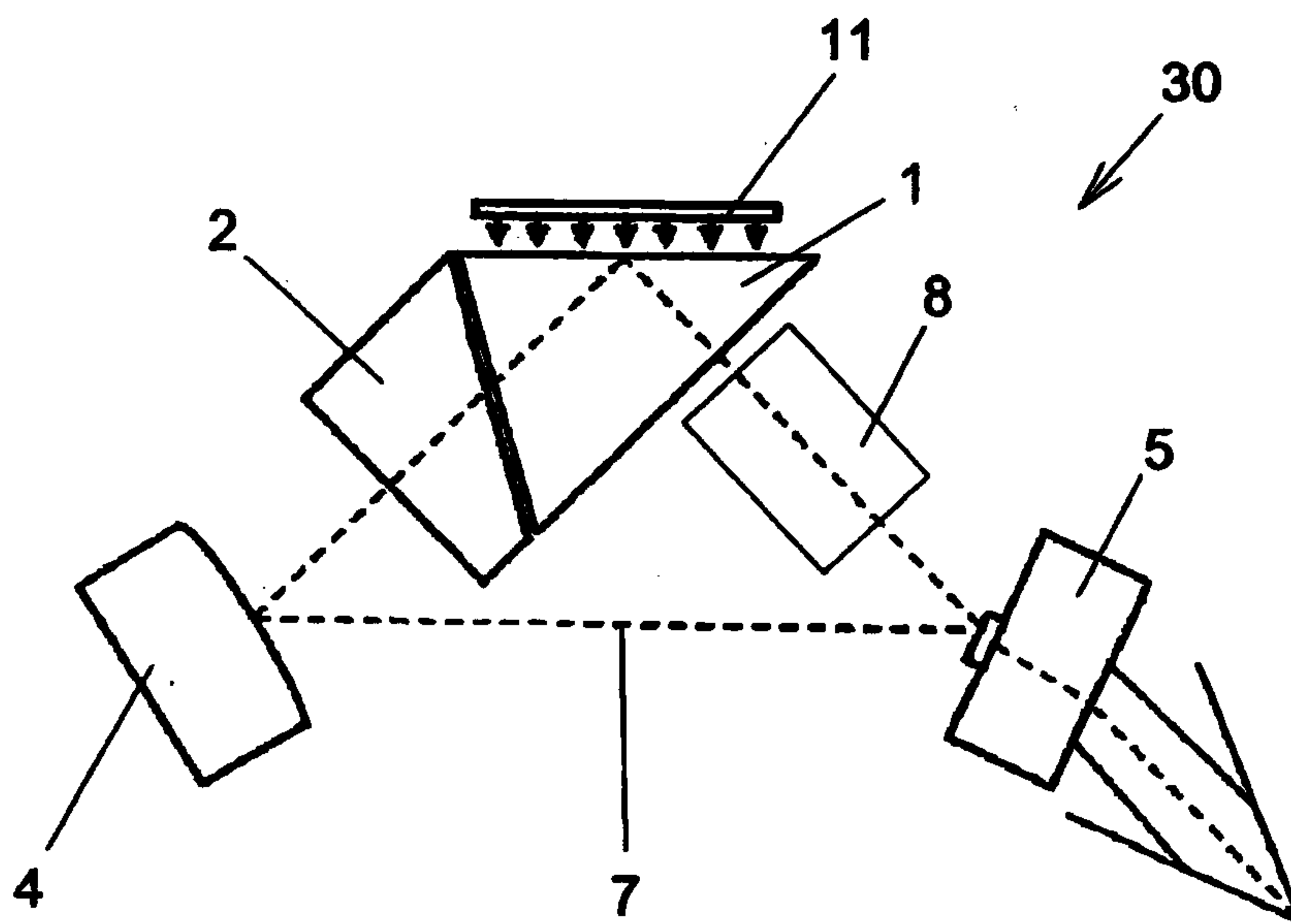


Fig. 7

29126

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:

H01S 3/00 (2006.01); **H01S 3/11** (2006.01); **H01S 3/131** (2006.01); **H01S 3/0941** (2006.01); **H01S 3/06** (2006.01); **H01S 3/08** (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:

H01S 3/00 (2019.01); **H01S 3/11** (2013.01); **H01S 3/1312** (2013.01); **H01S 3/0941** (2013.01); **H01S 3/0627** (2013.01); **H01S 3/08** (2019.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):

H01S

Konsultierte Online-Datenbank:

EPODOC, WPIAP, PATDEW, PATENW, NPL, IEEE, Internet: Google Patents, Scholar, Espacenet

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am **14.12.2018** eingereichten Ansprüchen **1 - 10** erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
X	CN 104158082 A (SICHUAN ZHUOZHONG TECHNOLOGY CO LTD, ANSHAN ZY LASER TECHNOLOGY CO LTD) 19. November 2014 (19.11.2014) Zusammenfassung; Beschreibung Figur 1, Ansprüche 1 und 2 der Englischen Maschinenübersetzung.	1, 2, 9
A		3 - 8, 10
X	CN 1645691 A (CHINESE ACAD PHYSICS INST) 27. Juli 2005 (27.07.2005) Zusammenfassung; Paragraph "Background Technology"; Figuren 1, 2, 9 - 11 und zugehörige Beschreibung der Englischen Maschinenübersetzung.	1, 2, 9
A		3 - 8, 10
X	WANG, Xuejun et al. "Single-longitudinal-mode Operation of a 1 W combined actively and passively Q-switched Cr,Nd:YAG Laser" 5. September 2005 (05.09.2005) OPTICS EXPRESS 6697 Vol. 13, No. 18, pp. 6693-6698 <URL: https://doi.org/10.1364/OPEX.13.006693 > Der gesamte Artikel, insbesondere der Paragraph 2 Experimental Setup.	1, 2, 9

Datum der Beendigung der Recherche:

12.11.2019

Seite 1 von 1

Prüfer(in):

WALTER Peter

*) Kategorien der angeführten Dokumente:

X Veröffentlichung **von besonderer Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
Y Veröffentlichung **von Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese **Verbindung für einen Fachmann naheliegend** ist.

A Veröffentlichung, die den allgemeinen **Stand der Technik** definiert.
P Dokument, das von **Bedeutung** ist (Kategorien **X** oder **Y**), jedoch **nach dem Prioritätstag** der Anmeldung veröffentlicht wurde.
E Dokument, das **von besonderer Bedeutung** ist (Kategorie **X**), aus dem ein „**älteres Recht**“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen).
& Veröffentlichung, die Mitglied der selben **Patentfamilie** ist.