



(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: A 312/2002  
(22) Anmeldetag: 28.02.2002  
(42) Beginn der Patentdauer: 15.06.2003  
(45) Ausgabetaag: 26.01.2004

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: H01S 3/08

H01S 5/062, 5/125,  
H01L 31/00, 49/00, H03B 28/00

(56) Entgegenhaltungen:

SARUKURA ET AL., "ALL-SOLID-STATE, THZ RADIATION SOURCE USING A SATURABLE BRAGG REFLECTOR IN A FEMTOSECOND MODE-LOCKED LASER", JPN. J. APPL. PHYS., VOL. 36, PART 2, NR. 5A, 1 MAY 1997, S. L560-L562

SARUKURA ET AL., "THZ-RADIATION GENERATION FROM AN INTRACAVITY SATURABLE BRAGG REFLECTOR IN A MAGNETIC FIELD", JPN. J. APPL. PHYS., VOL. 37, NR. 2A, 1. FEB. 1998, S. L125-L126

LIU ET AL., "EFFICIENT TERAHERTZ RADIATION GENERATION FROM BULK INAS MIRROR AS AN INTRACAVITY TERAHERTZ RADIATION EMITTER", JPN. J. APPL. PHYS., VOL. 39, PART 2, NR. 4B, 15. APRIL 2000, S. L366-L367

FATTINGER ET AL, "TERAHERTZ BEAMS", APPL. PHYS. LETT., VOL. 54, NR. 6, 6 FEB. 1989, S. 490-492

MITROFANOV ET AL., "THIN TERAHERTZ DETECTORS AND EMITTERS BASED ON LOW-TEMPERATURE-GROWN GAAS ON SAPPHIRE", CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO 2000)

TECHNICAL DIGEST. POSTCONFERENCE  
EDITION. TOPS VOL. 39; IEEE CAT. NO.  
00CH37088. OPT. SOC. AMERICA, SALEM,  
MA, USA: MAY 2000: S 528-529

MA, USA, MAY 2000, C. 325-329  
LIU ET AL., "HIGH AVERAGE POWER MODE  
LOCKED Ti:SAPPHIRE LASER WITH  
INTRACAVITY CONTINUOUS-WAVE  
AMPLIFIER AND STRAINED SATURABLE  
BRAGG REFLECTOR". JPN. J. APPL. PHYS.,  
VOL 38, PART 2, NO. 10A, 1 OKTOBER 1999,  
S. 1109-1111

LIU ET AL., "THZ RADIATION FROM INTRACAVITY SATURABLE BRAGG REFLECTOR IN MAGNETIC FIELD WITH SELF-STARTED MODE-LOCKING BY STRAINED SATURABLE BRAGG REFLECTOR", JPN. J. APPL. PHYS., VOL. 38, PART 2, NO. 11B, 15 NOVEMBER 1999, S. L1333-L1335  
US 5729017A  
EP 606776A

(73) Patentinhaber:

FEMTOLASERS PRODUCTIONS GMBH  
A-2100 KORNEUBURG,  
NIEDERÖSTERREICH (AT).

(54) EINRICHTUNG ZUR ERZEUGUNG VON TERAHERTZ-STRAHLUNG SOWIE  
HABILITATIONSBESTÄTIGUNG

(57) Einrichtung zur Erzeugung von Terahertz(THz)-Strahlung mit einem Kurzpuls laser (1) mit Modenverkopplung, dem ein Pumpstrahl zugeführt wird, und mit einem einen Resonatorspiegel (M4) aufweisenden Halbleiterbauelement, das zugleich zur Herleitung der THz-Strahlung auf Basis von auftreffenden Laserpulsen des Kurzpuls lasers ausgebildet ist, wobei der Resonatorspiegel (M4), vorzugsweise ein Resonatorenendspiegel, mit einer für die Laserstrahlung (7), des Kurzpuls lasers (1) teilweise durchlässigen Halbleiterschicht (8) versehen ist, deren Absorptionskante unterhalb der Energie der Laserstrahlung (7) des Kurzpuls lasers (1) liegt, und auf der in an sich bekannter Weise mit einer Vorspannungsquelle verbindbare Elektroden (9,10) angebracht sind, um die THz-Strahlung im elektrischen Feld zu erzeugen und abzustrahlen.

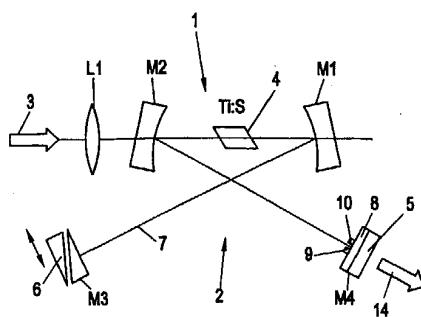


FIG. 1

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung zur Erzeugung von Terahertz(THz)-Strahlung mit einem Kurzpulslaser mit Modenverkopplung, dem ein Pumpstrahl zugeführt wird, und mit einem Resonatorspiegel aufweisenden Halbleiterbauelement, das zugleich zur Herleitung der THz-Strahlung auf Basis von auftreffenden Laserpulsen des Kurzpulslasers ausgebildet ist.

5 Weiters bezieht sich die Erfindung auf ein Halbleiterbauelement mit einem Resonatorspiegel zur Verwendung in einem Kurzpulslaser, welcher Resonatorspiegel eingerichtet ist, einen modenverkoppelten Betrieb des Lasers zu ermöglichen, wobei das Halbleiterbauelement zugleich zur Erzeugung einer Terahertz(THz)-Strahlung auf Basis von auftreffenden Laserpulsen des Kurzpulslasers ausgebildet ist.

10 Elektromagnetische Strahlung im Terahertz-Bereich ( $10^{11}$  Hertz bis  $10^{13}$  Hertz), und zwar in Form von kontinuierlichen Wellen ebenso wie in Form von Pulsen, wäre beispielsweise in der Spektroskopie, aber auch auf anderen Gebieten, z.B. in zukünftigen Rechnern, mit großem Vorteil verwendbar. Zur Erzeugung einer solchen Terahertz-Strahlung wurden bereits verschiedene Vorschläge gemacht, wie etwa in Sarukura et al., "All-Solid-State, THz Radiation Source Using a 15 Saturable Bragg Reflector in a Femtosecond Mode-Locked Laser", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, Part 2, No. 5A, 1. May 1997, S. L560-L562. In diesem Artikel wird die Verwendung eines modenverkoppelten Lasers zur Erzeugung von kurzen Laserimpulsen in Verbindung mit einem Halbleiter-Spiegel, einem sättigbaren Bragg-Reflektor (SBR-Element) beschrieben, der eine Quantenquelle (engl. quantum well) zur Erzeugung der Terahertz-Strahlung umfasst. Das SBR-Element wird innerhalb des Resonators des modenverkoppelten Lasers eingebaut, wobei der Auftreffwinkel des Laserstrahls annähernd dem sog. Brewster-Winkel entspricht. Auf diese Weise kann die Terahertz-Strahlung ausgekoppelt werden. Von Nachteil ist dabei jedoch, dass jeder Laserimpuls auf das SBR-Element während seines Umlaufs im Resonator zweimal auftrifft, wodurch die Terahertz-Strahlung in vier verschiedenen Richtungen abgestrahlt wird. Dadurch ist eine effiziente Bündelung 20 und Nutzung der erzeugten Strahlung nicht möglich, und es werden nur äußerst geringe Leistungen der Terahertz-Strahlung - im Bereich von nW - erzielt.

25

In einem weiteren Artikel von Sarukura et al., "THz-radiation Generation from an Intracavity Saturable Bragg Reflector in a Magnetic Field", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, Nr .2A, 1. Feb. 1998, S. L125-L126, wird eine etwas modifizierte Anordnung eines SBR-Elements in Verbindung mit einem Kurzpulslaser mit Modenverkopplung geoffenbart, wobei das SBR-Element als Endspiegel des Laserresonators eingesetzt wird. Das SBR-Element wird dabei im Feld eines permanenten Magneten angebracht, wobei das Magnetfeld das Abstrahlungsmuster der Hauptkeulen der Terahertz-Strahlung steuert, um so ein Einfangen der Strahlung innerhalb des Substrats des SBR-Elements zu vermeiden. Bei dieser Anordnung des SBR-Elements als Resonator-Endspiegel 30 wurde zwar eine Erhöhung der Leistung der Terahertz-Strahlung, bis zu einem Wert von  $0,8 \mu\text{W}$ , erzielt, jedoch wäre eine höhere Leistung für praktische Anwendungen weiterhin wünschenswert, abgesehen davon, dass das Vorsehen eines Magnetfeldes in der Praxis aufwendig ist.

35 Eine ähnliche Anordnung mit einem InAs(Indiumarsenid)-Spiegel in einem Magnetfeld ist in Liu et al., "Efficient Terahertz Radiation Generation from Bulk InAs Mirror as an Intracavity Terahertz Radiation Emitter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 2, Nr. 4B, 15. April 2000, S.L366-L367, geoffenbart. Dabei ist der Auftreffwinkel des Laserstrahls am InAs-Spiegel sehr groß, im Bereich von  $85^\circ$ . Dieser Spiegel ist wieder innerhalb des Laserresonators angeordnet, so dass der bereits vorstehend erwähnte Nachteil gegeben ist, dass jeder Laserpuls zweimal den Spiegel trifft, und dass somit die Terahertz-Strahlung in vier Richtungen erzeugt wird. Die erzielte durchschnittliche 40 Leistung der Terahertz-Strahlung lag bei Durchführung von Experimenten im Bereich von 5 nW, bei einer durchschnittlichen Laserresonator-Leistung von 4,5 W. Ein weiterer Nachteil ist, dass mit dem In-As-Spiegel ein eigenes Bauelement zusätzlich in den Laserresonator eingeführt wird. Die Anordnung eines SBR-Elements in einem Magnetfeld ist im Übrigen auch aus dem früheren Artikel 45 von Liu et al., "THz Radiation from Intracavity Saturable Bragg Reflector in Magnetic Field with Self-Started Mode-Locking by Strained Saturable Bragg Reflector", Jpn.J.Appl.Phys., Vol.38, Part 2, Nr. 11B, 15. November 1999, S. L1333-L1335, bekannt.

50 Ein modenverkoppelter Laser mit einem SBR-Element ist ferner in Liu et al., "High Average Power Mode Locked Ti:Sapphire Laser with Intracavity Continuous-Wave Amplifier and Strained Saturable Bragg Reflector", Jpn.J.Appl.Phys., Vol.38, Part 2, Nr. 10A, 1. Oktober 1999, S. L1109-L1111, beschrieben.

Aus der EP 606 776A ist weiters eine Einrichtung zur Abgabe von Terahertz-Strahlung bekannt, bei der eine Übereinander-Anordnung von zwei Elektroden auf einem Substrat vorgesehen ist, wobei dazwischen ein LT-GaAs-Material vorliegen soll. Bei Auftreten von Laserimpulsen wird in der Ebene des Substrats die Terahertz-Strahlung erzeugt, was technologische Nachteile und eine geringe Robustheit mit sich bringt.

Eine andere Art der Erzeugung von Terahertz-Strahlung, unter Verwendung einer Antenne mit großer Apertur, ist in Fattinger et al., "Terahertz beams", Appl. Phys. Lett. Vol.54, Nr.6, 6. Feb. 1989, S.490-492, beschrieben. Hier beruht die Erzeugung der Terahertz-Strahlung auf einem transienden Fotostrom der durch optisch erzeugte Ladungsträger erhalten wird, die sich in einem elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden bewegen. Das für den Emitter verwendete Halbleitermaterial hat typisch einen hohen Widerstand, wobei die Lebensdauer der Ladungsträger sehr kurz ist. Eine entsprechende Anordnung ist auch in US-5 729 017 A beschrieben. Dabei ist es auch bekannt, für das Halbleitermaterial, in dem die Ladungsträger erzeugt werden, Verbindungen wie GaAs (Gallium-Arsenid)-Verbindungen, AlGaAs (Aluminium-Gallium-Arsenid)-Verbindungen, LT-GaAs-Verbindungen und LT-AlGaAs-Verbindungen (LT-low temperature - Niedertemperatur) zu verwenden, vgl. auch Mitrofanov et al., "Thin terahertz detectors and emitters based on low-temperature-grown GaAs on sapphire", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000). Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol.39; IEEE Cat. No. 00CH37088. Opt. Soc. America, Salem, MA, USA; May 2000; S. 528-529.

Die vorstehend erwähnten Niedertemperatur-Halbleitermaterialien werden bei niedrigen Temperaturen, in der Größenordnung von 200°C bis 500°C, aufgebracht, und sie zeichnen sich durch kurze Rekombinationszeiten der Foto-Ladungsträger aus.

Hiebei ist insbesondere auch bekannt, dass im Fall von LT-GaAs-Material mit der Licht-induzierten transienden Terahertz-Strahlung eine Rekombinationszeit der Ladungsträger von wenigen ps oder unter 1 ps erzielbar ist.

Es ist nun Aufgabe der Erfindung, ausgehend von den bekannten Untersuchungen eine Einrichtung bzw. ein Halbleiterbauelement vorzusehen, mit der bzw. mit dem die Erzeugung von Terahertz-Strahlung unter Verwendung eines modenverkoppelten Kurzpulslasers in effizienter Weise ermöglicht wird, wobei auch die Leistung der Terahertz-Strahlung wesentlich höher als bei den bekannten Anordnungen und bevorzugt auch steuerbar sein soll. Insbesondere sollen dabei Leistungen im Bereich von mW für die Terahertz-Strahlung ermöglicht werden.

Die erfindungsgemäße Einrichtung der eingangs angeführten Art ist demgemäß dadurch gekennzeichnet, dass der Resonatorspiegel, vorzugsweise ein Resonatorenspiegel, mit einer für die Laserstrahlung des Kurzpulslasers teilweise durchlässigen Halbleiterschicht versehen ist, deren Absorptionskante unterhalb der Energie der Laserstrahlung des Kurzpulslasers liegt, und auf der in an sich bekannter Weise mit einer Vorspannungsquelle verbindbare Elektroden angebracht sind, um die THz-Strahlung im elektrischen Feld zu erzeugen und abzustrahlen.

In entsprechender Weise ist das erfindungsgemäße Halbleiterbauelement der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Resonatorspiegel, vorzugsweise einem Resonatorenspiegel, eine für die Laserstrahlung des Kurzpulslasers teilweise durchlässige Halbleiterschicht vorgesehen ist, deren Absorptionskante unterhalb der Energie der Laserstrahlung des Kurzpulslasers liegt, und auf der in an sich bekannter Weise mit einer Vorspannungsquelle verbindbare Elektroden angebracht sind, um die THz-Strahlung im elektrischen Feld zu erzeugen und abzustrahlen.

Das erfindungsgemäße Konzept basiert somit allgemein darauf, den Halbleiter-Resonatorspiegel des Kurzpulslasers mit einer Halbleiterschicht mit Elektroden, die auch als Antennen für die THz-Strahlung dienen, zu kombinieren und mit Hilfe des Laserstrahls die gewünschte Terahertz-Strahlung in dieser Halbleiterschicht auf dem Resonatorspiegel zu erzeugen. Dabei kann einfach mit Hilfe der an die Elektroden angelegten Spannung, d.h. des angelegten elektrischen Felds, die Leistung der Terahertz-Strahlung eingestellt oder sogar moduliert werden.

Mehr im Einzelnen erzeugt dabei der intensitätsreiche Laserpuls bewegliche Ladungsträger im auf dem Halbleiter-Resonatorspiegel aufgebrachten Halbleitermaterial; von Bedeutung ist dabei natürlich, dass die Energie des Laserstrahls hoch genug ist, um die Ladungsträger zu erzeugen, d.h. die Energie der Laserstrahlung liegt über der Absorptionskante (d.i. jenes Energieniveau, ab dem Elektronen in das Leitungsband gehoben werden) des Halbleitermaterials, das daher dement-

sprechend - je nach Laserart - auszuwählen ist, was auf Grund von vorhandenen Halbleitermateri-  
 aldaten ohne weiteres vorgenommen werden kann. Durch das angelegte elektrische Feld werden  
 die so erzeugten Elektronen und Löcher aus ihrer Ruhelage gebracht und je nach ihrer Ladung in  
 5 entgegengesetzte Richtungen beschleunigt. Die dadurch entstehende Polarisierung führt zu einer  
 Rückstellkraft, wodurch eine Plasmaoszillation erhalten wird. Dadurch entsteht ein transienter  
 10 Fotostrom, der die gewünschte Terahertz-Strahlung erzeugt, die beispielsweise durch den Resona-  
 torspiegel hindurch abgestrahlt wird. Durch die angelegte Spannung kann dabei das Ausmaß der  
 15 Beschleunigung der Ladungsträger und in der Folge die Intensität bzw. die Leistung der Terahertz-  
 Strahlung gesteuert bzw. geregelt werden. Für die Erzeugung der Terahertz-Strahlung werden  
 dabei in effizienter Weise die intensitätsreichen optischen Pulse des Kurzpulsasers genutzt, ähn-  
 20lich wie in den Vorschlägen von Sarukura et al., wie vorstehend erläutert, jedoch wird ein demge-  
 genüber anderes Prinzip der Erzeugung der Terahertz-Strahlung, mit der gesonderten Halbleiter-  
 schicht auf dem Resonatorspiegel, und mit der Erzeugung der beweglichen Ladungsträger in  
 25 diesem Halbleitermaterial durch die Laserpulse, ähnlich wie an sich beispielsweise in der vorge-  
 nannten US 5 729 017 A beschrieben, angewandt.

Die auf dem Resonatorspiegel aufgebrachte Halbleiterschicht soll naturgemäß die Laserstrah-  
 lung im Wesentlichen zum Resonatorspiegel durchlassen, wobei jedoch ein Teil der Energie der  
 20 Laserstrahlung in der Halbleiterschicht zur Erzeugung der Ladungsträger verwendet wird. Anderer-  
 seits ist das Material des Resonatorspiegels, wenn die Terahertz-Strahlung durch ihn hindurch  
 25 abgegeben wird, so zu wählen, dass es für die erzeugte Terahertz-Strahlung im Wesentlichen  
 durchlässig ist.

Der Resonatorspiegel ist bevorzugt ein Endspiegel, und er ist insbesondere durch einen an  
 sich bekannten sättigbaren Bragg-Reflektor (kurz SBR-Element) gebildet. Um unerwünschte Sätti-  
 25 gungseffekte zu vermeiden, ist es von Vorteil, wenn die Halbleiterschicht aus einem Halbleiterma-  
 terial mit kurzer Rekombinationszeit für freie Elektronen besteht. Das Material der Halbleiterschicht  
 wird zweckmäßig in Anpassung an das Material des Resonatorspiegels gewählt, wobei es günstig  
 30 ist, wenn die Halbleiterschicht eine Gallium-Arsenid (GaAs)-Schicht, insbesondere eine Nieder-  
 temperatur-Gallium-Arsenid (LT-GaAs)-Schicht, ist. Andererseits kann auch mit Vorteil vorgesehen  
 werden, dass die Halbleiterschicht eine Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs)-Schicht, insbeson-  
 35 dere eine Niedertemperatur-Aluminium-Gallium-Arsenid (LT-AlGaAs)-Schicht ist. Derartige Halbleiter-  
 Materialien können auf einem Bragg-Reflektor aufgewachsen werden, der seinerseits in Schichten  
 aus Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs)/Aluminium-Arsenid (AlAs) aufgebaut ist, wobei diese  
 40 Schichten epitaktisch auf einem Gallium-Arsenid (GaAs)-Substrat aufgebracht sind. Mit Vorteil  
 kann dabei Molekularstrahlepitaxie zur Anbringung der Schichten angewandt werden.

Zur Bündelung der erzeugten Terahertz-Strahlung kann es weiters günstig sein, wenn auf der  
 von den Elektroden abgewandten Seite des Resonatorspiegels als Strahlsteuerelement eine  
 45 dielektrische Linse für die abgegebene THz-Strahlung, z.B. aus Silizium (Si), Gallium-Arsenid  
 (GaAs) oder dergl., angebracht ist.

Die Elektroden sind insbesondere streifenförmig ausgebildet und zueinander parallel angeord-  
 40 net, wobei sie eine Breite von 5 µm bis einigen 10 µm aufweisen können, und wobei der Abstand  
 zwischen den Elektroden von 30 µm bis zu einigen mm betragen kann. Der Abstand zwischen den  
 Elektroden ist typisch größer als der Durchmesser des Laserstrahls, zumindest sollten die Abmes-  
 45 sungen so gewählt sein, dass der Intensitäts-Schwerpunkt des Strahlquerschnitts des Laserstrahls  
 zwischen den Elektroden liegt. Die Elektroden können beispielsweise aus Metall, wie Gold, Alumi-  
 nium, Chrom, Platin-Gold-Schichtsystemen oder Titan-Gold-Schichtsystemen bestehen, es ist aber  
 auch möglich, die Elektroden aus dotiertem Halbleitermaterial zu bilden, wobei die Halbleiterma-  
 50 terial-Elektroden ihrerseits mit metallischen Kontakten verbunden werden.

Bei derartigen Elektroden bzw. Antennenelementen für die Erzeugung der Terahertz-Strahlung  
 und den vorstehenden Abmessungen bzw. Abständen können zur Erzeugung des elektrischen  
 55 Feldes Vorspannungen in der Größenordnung von 150 Volt und mehr, praktisch sogar bis zu  
 400 Volt, angelegt werden. Die Grenze ist hier durch die Durchbruchsspannung im Halbleiterma-  
 terial gegeben. Bevorzugt ist die Vorspannungsquelle zur Abgabe variabler Vorspannungen, zwecks  
 Einstellung der Intensität der THz-Strahlung und/oder zur Modulation der THz-Strahlung, eingerich-  
 tet.

55 Die Erfindung wird nachstehend anhand von in der Zeichnung veranschaulichten, bevorzugten

Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, noch weiter erläutert. Es zeigen: Fig. 1 ein Schema einer Einrichtung mit einem Kurzpuls laser mit Modenverkopplung und mit einem als Resonatorenendspiegel eingesetztem Halbleiterbauelement, das zur Erzeugung von Terahertz-Strahlung eingerichtet ist; Fig. 2 schematisch eine Ansicht eines solchen Halbleiterbauelements; Fig.3 schematisch eine Draufsicht auf dieses Halbleiterbauelement, wobei auch das Anlegen einer Vorspannung an Elektroden dieses Halbleiterbauelements gezeigt ist; Fig.4 in einem Diagramm den Zusammenhang zwischen angelegter Vorspannung und Impulsamplitude der erzeugten THz-Strahlung; Fig.5 in einem Diagramm einen typischen Impuls der THz-Strahlung über der Zeit; Fig.6 ein zugehöriges Frequenzspektrum der THz-Strahlung; und Fig.7 in einer schematischen, schaubildlichen Darstellung ein modifiziertes Halbleiterbauelement mit zugehöriger Schaltung zum Anlegen einer elektrischen Vorspannung.

In Fig.1 ist schematisch ein Kurzpuls laser 1 veranschaulicht, in dem für die Kurzpulserzeugung z.B. das an sich bekannte "Kerr-lens mode locking"-Prinzip verwendet wird.

Der Kurzpuls laser 1 weist gemäß Fig.1 einen Laserresonator 2 auf, dem ein Pumpstrahl 3, z.B. ein Argonlaserstrahl, zugeführt wird. Der Pumpstrahl (z.B. Argonlaser) selbst ist der Einfachheit halber weggelassen und gehört dem Stand der Technik an.

Nach Durchlaufen einer Linse L1 und eines dichroitischen Spiegels M2 regt der Pumpstrahl 3 einen Laserkristall 4 an, im vorliegenden Beispiel einen Titan:Saphir(in der Literatur üblicherweise kurz Ti:S bezeichnet)-Festkörperlaserkristall. Der dichroitische Spiegel M2 ist für den Pumpstrahl 3 durchlässig, jedoch hochreflektierend für den Ti:S-Laserstrahl. Dieser Laserstrahl, der Resonatorstrahl, trifft auf einen Laserspiegel M1 auf und wird von diesem zu einem auch zum Auskoppeln dienenden Laserspiegel M3 reflektiert. Dieser Laserspiegel M3 reflektiert den Laserstrahl wieder zum Spiegel M1 zurück, von wo der Laserstrahl zum Laserspiegel M2 reflektiert wird, wobei er den Laserkristall 4 ein zweites Mal durchläuft. Von dort wird der Laserstrahl dann zu einem Resonatorenendspiegel M4 mit einem sättigbaren Bragg-Reflektor 5, nachstehend kurz SBR-Element genannt, reflektiert, wodurch ein an sich üblicher X-gefalteter Laserresonator 2 gebildet ist. Über den Auskoppelspiegel M3 wird der Laserstrahl unter Vorsehen einer Kompensationsmöglichkeit ausgekoppelt, wobei ein Kompensationsplättchen 6 sowie nicht näher gezeigte Spiegel in Dünnschichttechnik für eine Dispersionskompensation sowie dafür sorgen, dass keine unerwünschten Reflexionen in Richtung Laserresonator 2 auftreten. Der auf die beschriebene Weise im Laserresonator 2 erhaltene Laserstrahl ist in Fig.1 mit 7 bezeichnet.

Der Laserkristall 4 ist ein planparalleler Körper, welcher optisch nichtlinear ist und ein Kerrelement bildet, welches für höhere Feldstärken des Laserstrahls 7 eine größere wirksame optische Dicke besitzt, hingegen eine geringere wirksame Dicke aufweist, wenn die Feldstärke bzw. Intensität des Laserstrahls 7 geringer ist. Dieser an sich bekannte Kerreffekt wird zur Selbstfokussierung des Laserstrahls 7 ausgenutzt, d.h. der Laserkristall 4 bildet für den Laserstrahl 7 eine Fokussierungslinse.

Zur Modenverkopplung (engl.: mode-locking) wird weiters im gezeigten Ausführungsbeispiel der sättigbare Bragg-Reflektor 5 in an sich herkömmlicher Weise verwendet.

Die Spiegel M1, M2 sind in an sich bekannter Dünnschichttechnik ausgeführt, d.h. sie sind je aus vielen Schichten aufgebaut, die bei der Reflexion des eine große spektrale Bandbreite aufweisenden ultrakurzen Laserpulses ihre Funktion ausüben. Die verschiedenen Wellenlängenkomponenten des Laserstrahls dringen unterschiedlich tief in die Schichten des jeweiligen Spiegels ein, bevor sie reflektiert werden. Dadurch werden die verschiedenen Wellenlängenkomponenten verschieden lang am jeweiligen Spiegel verzögert; die kurzwelligen Komponenten werden weiter außen reflektiert, die langwelligen Anteile hingegen tiefer im Spiegel. Dadurch werden die langwelligen Komponenten gegenüber den kurzwelligen Komponenten zeitlich verzögert. Auf diese Weise wird eine Dispersionskompensation insofern erhalten, als im Zeitbereich besonders kurze Pulse (vorzugsweise im Bereich von 10 Femtosekunden und darunter) ein breites Frequenzspektrum besitzen; dies kommt daher, dass die verschiedenen Frequenzkomponenten des Laserstrahls im Laserkristall 4 einen unterschiedlichen Brechungsindex "sehen", d.h. die optische Dicke des Laserkristalls 4 ist für die verschiedenen Frequenzkomponenten verschieden groß, und die verschiedenen Frequenzkomponenten werden daher beim Durchlaufen des Laserkristalls 4 verschieden verzögert. Diesem Effekt wird durch die genannte Dispersionskompensation an den Dünnschicht-Laserspiegeln M1, M2 begegnet.

Soweit vorstehend beschrieben handelt es sich um einen an sich herkömmlichen Aufbau eines Kurzpulsasers mit Modenverkopplung, und eine detailliertere Beschreibung desselben kann sich daher erübrigen.

Wesentlich für die angestrebte Erzeugung von Terahertz-Strahlung 14 ist nun, dass der Resonatorspiegel M4 in einer besonderen Weise mit zusätzlichen Mitteln ausgestattet ist, wie nunmehr unter Bezugnahme auch auf die Figuren 2 und 3 näher ausgeführt werden soll.

Im Einzelnen weist der Resonatorspiegel M4 als Halbleiterbauelement auf dem eigentlichen SBR-Element 5 (vgl. außer Fig.1 auch Fig.2) eine Halbleiterschicht 8 auf, die aus einem Halbleitermaterial mit kurzer Rekombinationszeit für freie Elektronen besteht. Auf dieser Halbleiterschicht 8 sind zwei im Wesentlichen streifenförmige, zueinander parallel verlaufende Elektroden 9,10 angebracht, die mit Anschlüssen 11 bzw. 12 (s. Fig.3) zum Anlegen einer Vorspannung U an die Elektroden 9, 10 verbunden sind. Der Abstand zwischen den streifenförmigen Elektroden 9, 10 ist in Fig. 3 mit D bezeichnet, und er wird so gewählt, dass der auftreffende Laserstrahl 7 mit seinem Strahlquerschnitt 7' (s. auch Fig.3) im Betrieb im Wesentlichen zwischen den Elektroden 9, 10 zu liegen kommt - zumindest sollte der Intensitätsschwerpunkt des Strahlquerschnitts 7' des Laserstrahls 7 zwischen den Elektroden 9, 10 liegen, um unnötige Verluste zu vermeiden. Dieser Abstand D kann beispielsweise 30  $\mu\text{m}$  bis zu einige mm betragen. Die streifenförmigen Elektroden 9, 10 können andererseits eine Breite B von beispielsweise 5  $\mu\text{m}$  bis zu einigen 10  $\mu\text{m}$  aufweisen.

Das SBR-Element 5 als Spiegel und sättigbarer Absorber ist in üblicher Weise aus einer Vielzahl von dielektrischen Schichten aufgebaut, die in der Zeichnung jedoch nicht näher dargestellt sind, und die auf einem ebenfalls nicht näher ersichtlichen Substrat angebracht sind. Das Substrat kann aus einem herkömmlichen, für elektromagnetische Strahlung im THz-Bereich, insbesondere  $10^{11}$  Hz bis  $10^{13}$  Hz, im Wesentlichen durchlässigen Material bestehen, und es dient als Träger für den Bragg-Reflektor. Beispielsweise wird ein übliches Gallium-Arsenid(GaAs)-Substrat mit hohem Widerstand verwendet, das Schichten aus Aluminium-Gallium-Arsenid bzw. Aluminium-Arsenid trägt, welche epitaktisch auf dem Gallium-Arsenid-Substrat aufgewachsen werden. Selbstverständlich sind jedoch auch andere Kombinationen von Halbleitermaterialien und dielektrischen Materialien möglich, um den Bragg-Reflektor aufzubauen, wobei auch andere herkömmliche Herstellungsverfahren (Dünnschicht-Techniken) verwendet werden können.

Die Halbleiterschicht 8 bildet einen sättigbaren Absorber, und sie besteht beispielsweise im Fall eines Bragg-Reflektors mit Aluminium-Gallium-Arsenid- bzw. Aluminium-Arsenid-Schichten aus einem bei niedriger Temperatur angebrachten Gallium-Arsenid, einer sog. LT(low temperature-Niedertemperatur)-GaAs-Schicht, die beispielsweise durch Molekularstrahlepitaxie (MBE - Molecular Beam Epitaxy) aufgebracht wird und eine sättigbare Absorption bei einer Wellenlänge von beispielsweise ungefähr 800 nm und eine Rekombinationszeit in der Größenordnung von Pikosekunden aufweist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, für die Halbleiterschicht 8 LT-AlGaAs zu verwenden, wenn kürzere Laser-Wellenlängen verwendet werden. Die Dicke der Halbleiterschicht 8 wird im Hinblick auf die angestrebte Impulsenergie gewählt, die absorbiert wird, wobei die Funktion des Bragg-Reflektors 5 nicht verschlechtert werden sollte. In einem konkreten Ausführungsbeispiel wurde als Halbleiterschicht 8 eine LT-GaAs-Schicht mit einer Dicke von 326 nm bei 220°C auf einer AlGaAs/AlAs-Bragg-Reflektor-Struktur mit einer GaAs-Quantenquelle aufgewachsen. Die Halbleiterschicht 8 wurde danach in an sich bekannter Weise bei 600°C 10 Minuten lang wärmebehandelt, und daraufhin wurden Elektroden 9,10 aus Titan-Gold an der Oberseite der Halbleiterschicht 8 angebracht. Alternativ könnten Metallelektroden 9,10 aus Aluminium, Chrom, Platin-Gold etc. eingesetzt werden; die Wahl des Metalls für die Elektroden 9, 10 ist dabei nicht kritisch.

Die Breite B der Elektroden betrug 10  $\mu\text{m}$ , und der Abstand D zwischen den Elektroden betrug 50  $\mu\text{m}$ . Als Vorspannung U wurde eine Gleichspannung von 150 Volt an den so erhaltenen THz-Emitter angelegt.

Zur Bündelung der erzeugten und abzugebenen THz-Strahlung 14 kann, wie in Fig.2 mit strichpunktuierten Linien veranschaulicht ist, an der den Elektroden 9,10 gegenüberliegenden Rückseite oder Außenseite des Resonatorspiegels M4 (also an der Rückseite des Substrats des SBR-Elements 5) ein Kollimator-Strahlsteuerelement in Form einer dielektrischen Linse 13 angebracht sein, wobei diese dielektrische Linse 13 die THz-Strahlung 14 in der gewünschten Richtung bündelt. Als Material für dieses Strahlsteuerelement 13 kommt beispielsweise Silizium mit hohem Widerstand, halbisolierendes Gallium-Arsenid oder Saphir in Frage. Eine derartige dielektrische

Linse 13 war auch bei dem vorbeschriebenen praktischen Ausführungsbeispiel vorhanden.

Im Fall des vorbeschriebenen praktischen Ausführungsbeispiels wurde der so gebildete Resonatorspiegel M4 als Endspiegel im Laserresonator 2 des Kurzpulsasers mit Modenverkopplung angebracht, und die Elektroden 9,10 wurden an eine in Fig.2 bzw. 3 nicht näher gezeigte externe Spannungsversorgungseinheit zum Anlegen der Vorspannung U angeschlossen. Zu Folge des sättigbaren Absorbers (GaAs-Quantenquelle) im Laserresonator 2 wurde unabhängig von der Vorspannung an den Elektroden 9,10 eine Modenverkopplung erzielt. Ohne Vorspannung U an den Elektroden 9,10 wurde keine messbare THz-Strahlung festgestellt, bei Anlegen der Vorspannung U an die Halbleiterschicht 8 über die Elektroden 9,10 ergab sich jedoch eine THz-Strahlung, deren Intensität mit der Vorspannung stieg.

In Fig.4 ist der sich ergebende, im Wesentlichen lineare Zusammenhang zwischen der Impulsamplitude der THz-Strahlung (in UV) und der angelegten Vorspannung (in V) ersichtlich. Die durchschnittliche Strahlungsleistung wurde mit einem kalibrierten Silizium-Bolometer gemessen, wobei bei der vorliegenden einfachen Testausführung bereits ein Wert von 1,5  $\mu$ W bei einer durchschnittlichen Resonatorleistung von 900 mW erhalten wurde. Die typische Form des transienten THz-Signals, das auf diese Weise im Resonatorspiegel M4, d.h. Halbleiterbauelement, erzeugt wird, ist in Fig.5 dargestellt. Wie ersichtlich ist im Wesentlichen ein einzelner schmaler Impuls vorhanden, was bedeutet, dass ein breitbandiges Signal erzielt wird. Für dieses angestrebte Auftreten eines einzelnen Impulses (anstatt mehrerer ausschwingender Impulse) ist die kurze Rekombinationszeit der Ladungsträger im Halbleitermaterial mitverantwortlich, und diese wird insbesondere im Fall einer Niedertemperatur-Aufbringung der Halbleiterschicht 8 erzielt.

Die in Fig.5 dargestellte Wellenform des THz-Impulses (die Amplitude ist in willkürlichen Einheiten gezeigt) wurde mit Hilfe eines elektrooptischen Detektors registriert. Im Frequenzbereich ergibt sich ein entsprechender Amplitudenverlauf (wiederum mit der Amplitude in willkürlichen Einheiten) wie in Fig.6 gezeigt. Das Frequenzspektrum hat ein Maximum bei ungefähr 0,5 THz und erstreckt sich bis ca. 2,5 THz. Diese THz-Strahlung wird mit der Vorspannung U an den Emitter-Elektroden 9,10 spannungsgesteuert, wobei auch eine Modulation mit Frequenzen bis zu 50 kHz (vgl. die nachfolgende Erläuterung zu Fig.7) getestet wurde.

Die erzeugte THz-Strahlung 14 ist in Fig.2 mit einem Pfeil und mit strichlierten Linien und in Fig.1 mit einem Pfeil 14 angedeutet.

Anstelle metallischer Elektroden sind zur Erzeugung der THz-Strahlung 14 auch Elektroden 9,10 aus hoch-dotiertem Halbleitermaterial, wie z.B. aus Gallium-Arsenid-Schichten, denkbar. Eine solche Ausführung ist dann von Vorteil, wenn der Strahlquerschnitt 7' der Laserstrahlung 7 einen größeren Durchmesser als der Abstand zwischen den Elektroden 9,10 aufweist und Reflexionen an den metallischen Elektroden 9,10 die Lasertätigkeit beeinträchtigen würden. Die Elektroden 9,10 werden dann beispielsweise in einem Ätzverfahren (Nassätzen oder trockenes chemisches Ätzen) hergestellt, und außerhalb des Auftreffbereichs dieser Laserstrahlung 7 können metallische Kontakte 9',10' an den Elektroden 9,10 aus Halbleiter-material angebracht werden, wie dies schematisch in Fig.7 bei einem modifizierten Resonatorendspiegel M4 dargestellt ist.

Die Breite der streifenförmigen Elektroden 9,10 kann wie erwähnt ganz allgemein beispielsweise von 5  $\mu$ m bis zu mehreren 10  $\mu$ m betragen, um den Gesamtwiderstand niedrig zu halten. Der Abstand zwischen den Elektroden 9,10 kann von 10  $\mu$ m oder mehreren 10  $\mu$ m bis zu mehreren mm betragen. Die Grenze wird hier zum einen durch die gewünschte Durchbruchsspannung gegeben sein und zum anderen durch den Strahlquerschnitt 7' des Laserstrahls 7 am THz-Emitter. Zumeist wird der Abstand zwischen den Elektroden 9,10 größer sein als der Durchmesser des Laserstrahls 7.

Im Übrigen ist in Fig.7 wiederum die Ausführung des Resonatorendspiegels M4 mit dem SBR-Element 5 und der Halbleiterschicht 8 ersichtlich. Weiters ist in Fig.7 dargestellt, dass die eine Elektrode 10 über den metallischen Kontakt 10' mit Masse 15 verbunden ist, wogegen die andere Elektrode 9 über ihren metallischen Kontakt 9' an eine Signalquelle 16 mit variabler Frequenz - unter Zwischenschaltung eines Hochspannungsverstärkers 17 - angeschlossen ist. Auf diese Weise kann die erzeugte THz-Strahlung (14 in Fig.1 und 2) entsprechend der Frequenz der Vorspannung U in der Intensität gesteuert werden. Selbstverständlich können hier zur Frequenzvariation bekannte, in der Fig.7 nicht näher ersichtliche Schaltungen 18 in Verbindung mit der Signalquelle, d.h. Vorspannungsquelle 16, eingesetzt werden.

## PATENTANSPRÜCHE:

1. Einrichtung zur Erzeugung von Terahertz(THz)-Strahlung mit einem Kurzpuls laser mit Modenverkopplung, dem ein Pumpstrahl zugeführt wird, und mit einem einen Resonator spiegel aufweisenden Halbleiterbauelement, das zugleich zur Herleitung der THz-Strahlung auf Basis von auftreffenden Laserpulsen des Kurzpuls lasers ausgebildet ist, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonator spiegel (M4), vorzugsweise ein Resonatorendspiegel, mit einer für die Laserstrahlung (7) des Kurzpuls lasers (1) teilweise durchlässigen Halbleiter schicht (8) versehen ist, deren Absorptionskante unterhalb der Energie der Laserstrahlung (7) des Kurzpuls lasers (1) liegt, und auf der in an sich bekannter Weise mit einer Vorspannungsquelle verbindbare Elektroden (9,10) angebracht sind, um die THz-Strahlung im elektrischen Feld zu erzeugen und abzustrahlen.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonator spiegel (M4) ein an sich bekannter sättigbarer Bragg-Reflektor (5) ist.
3. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiter schicht (8) aus einem Halbleiter material mit kurzer Rekombinationszeit für freie Elektronen besteht.
4. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiter schicht (8) eine Gallium-Arsenid-(GaAs-)Schicht ist.
5. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiter schicht (8) eine Niedertemperatur-Gallium-Arsenid-(LT-GaAs-)Schicht ist.
6. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiter schicht (8) eine Aluminium-Gallium-Arsenid-(AlGaAs-)Schicht ist.
7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiter schicht (8) eine Niedertemperatur-Aluminium-Gallium-Arsenid-(LT-AlGaAs-)Schicht ist.
8. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 1, dadurch gekennzeichnet, dass auf der von den Elektroden (9,10) abgewandten Seite des Resonator spiegels (M4) eine dielektrische Linse (13) für die abgegebene THz-Strahlung, z.B. aus Silizium, Gallium-Arsenid (GaAs) oder dergl., angebracht ist.
9. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9, 10) streifenförmig und zueinander parallel sind und einen Abstand (D) von 30 µm bis zu einigen mm voneinander haben (Fig.3).
10. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) streifenförmig sind und eine Breite (B) von 5 µm bis einigen 10 mm aufweisen (Fig.3).
11. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) aus Metall, z.B. Gold, Aluminium, Chrom, Platin-Gold- oder Titan-Gold- Schichtsystemen, bestehen.
12. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) durch dotierte Halbleiter material-Elektroden gebildet sind, die mit metallischen Kontakten verbunden sind.
13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest der Intensitätsschwerpunkt des Strahlquerschnitts (7') des Laserstrahls (7) zwischen den Elektroden (9,10) liegt.
14. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorspannungsquelle (16) zur Abgabe variabler Vorspannungen eingerichtet ist.
15. Halbleiterbauelement mit einem Resonator spiegel zur Verwendung in einem Kurzpuls laser, welcher Resonator spiegel eingerichtet ist, einen modenverkoppelten Betrieb des Lasers zu ermöglichen, wobei das Halbleiterbauelement zugleich zur Erzeugung einer Terahertz(THz)-Strahlung auf Basis von auftreffenden Laserpulsen des Kurzpuls lasers ausgebildet ist, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Resonator-Spiegel (M4), vorzugsweise einem Resonatorendspiegel, eine für die Laserstrahlung (7) des Kurzpuls lasers (1) teilweise durchlässige Halbleiter schicht (8) vorgesehen ist, deren Absorptionskante unterhalb der Energie der Laserstrahlung (7) des Kurzpuls lasers (1) liegt, und auf der in an sich bekannter Weise mit einer Vorspannungsquelle verbindbare Elektroden (9,10) angebracht

- sind, um die THz-Strahlung im elektrischen Feld zu erzeugen und abzustrahlen.
- 16. Halbleiterbauelement nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Resonatorspiegel (M4) ein an sich bekannter sättigbarer Bragg-Reflektor (5) ist.
  - 5 17. Halbleiterbauelement nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterschicht (8) aus einem Halbleitermaterial mit kurzer Rekombinationszeit für freie Elektronen besteht.
  - 10 18. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterschicht (8) eine Gallium-Arsenid-(GaAs-)Schicht ist.
  - 19. Halbleiterbauelement nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterschicht (8) eine Niedertemperatur-Gallium-Arsenid-(LT-GaAs-)Schicht ist.
  - 10 20. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterschicht (8) eine Aluminium-Gallium-Arsenid-(AlGaAs-)Schicht ist.
  - 15 21. Halbleiterbauelement nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterschicht (8) eine Niedertemperatur-Aluminium-Gallium-Arsenid(LT-AlGaAs-)Schicht ist.
  - 22. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass auf der von den Elektroden (9,10) abgewandten Seite des Resonanzspiegels (M4) eine dielektrische Linse (13) für die abgegebene THz-Strahlung, z.B. aus Silizium, Gallium-Arsenid (GaAs) oder dergl., angebracht ist.
  - 20 23. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) streifenförmig und zueinander parallel sind und einen Abstand von 30 µm bis zu einigen mm voneinander haben.
  - 24. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) streifenförmig sind und eine Breite von 5 µm bis einigen 10 µm aufweisen.
  - 25 25. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) aus Metall, z.B. Gold, Aluminium, Chrom, Platin-Gold- oder Titan-Gold-Schichtsystemen, bestehen.
  - 26. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (9,10) durch dotierte Halbleitermaterial-Elektroden gebildet sind, die mit metallischen Kontakten verbunden sind.
  - 30 27. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 26, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest der Intensitätsschwerpunkt des Strahlquerschnitts (7') des Laserstrahls (7) zwischen den Elektroden (9,10) liegt.

35

**HIEZU 3 BLATT ZEICHNUNGEN**

40

45

50

55

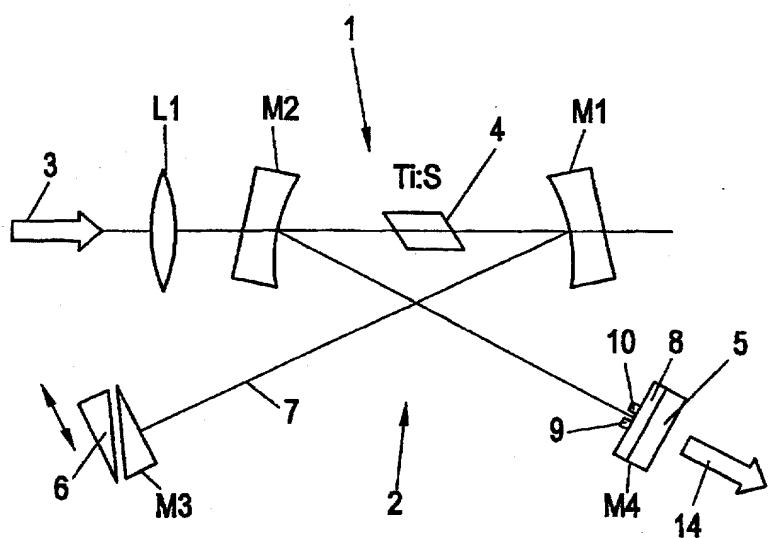
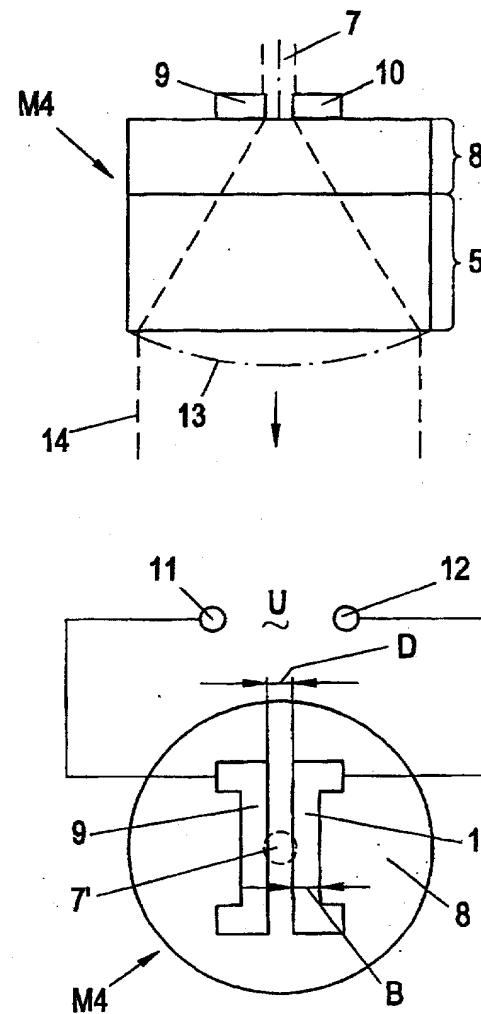


FIG. 3

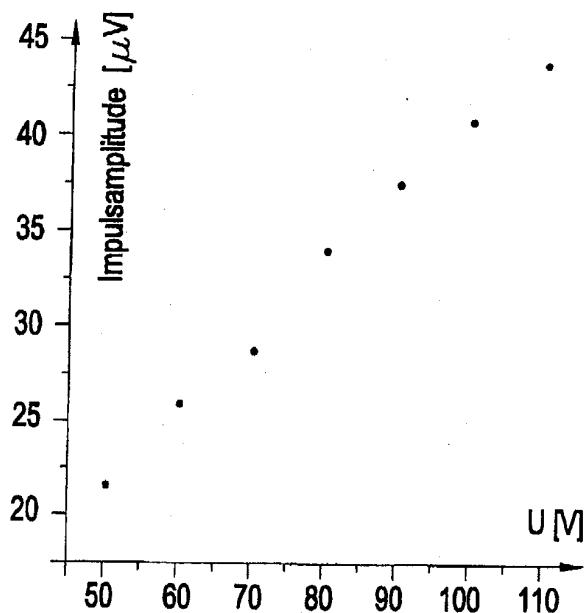


FIG. 4

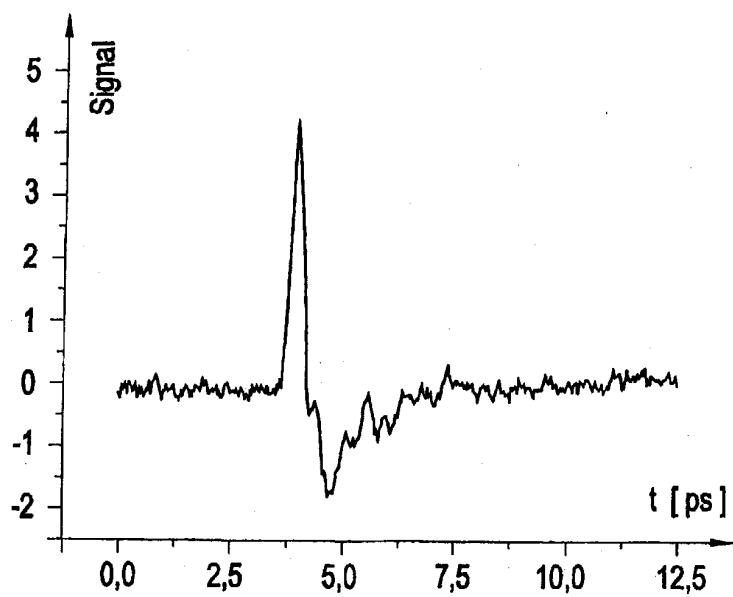


FIG. 5

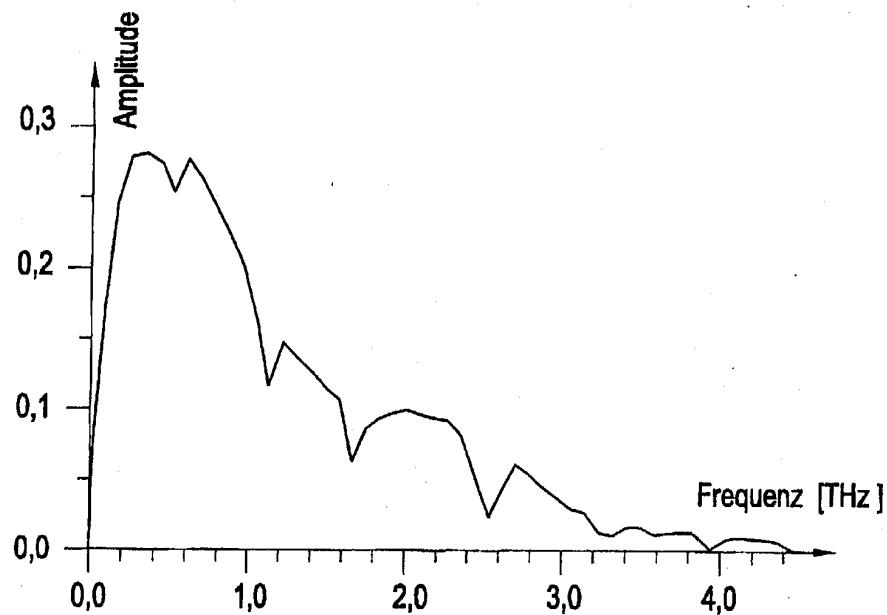


FIG. 6

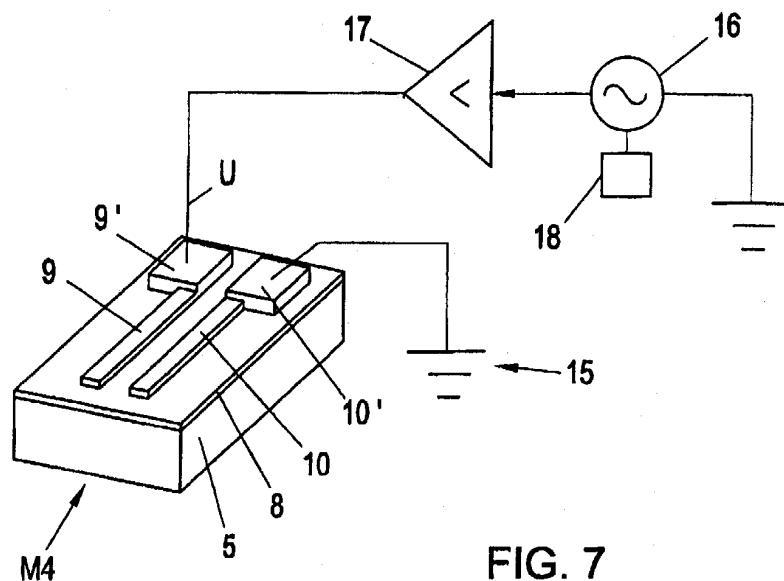


FIG. 7