

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
2. Februar 2006 (02.02.2006)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2006/010363 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01S 5/32 (2006.01) *H01S 1/00* (2006.01)
H01S 5/34 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2005/001305

(22) Internationales Anmeldedatum:

22. Juli 2005 (22.07.2005)

(25) Einreichungssprache:

Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache:

Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2004 035 635.1 22. Juli 2004 (22.07.2004) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG** [DE/DE]; Biegenstr. 10, 35032 Marburg (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KOCH, Stephan, W.** [DE/DE]; Hardtstr. 11, 35112 Fronhausen-Oberwalgern (DE). **MACKILLO, Kira** [FI/DE]; Pfarracker 9, 35043 Marburg-Bauerbach (DE).

(74) Anwälte: **OLBRICHT, Karl** usw.; Am Weinberg 15, 35096 Weimar (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii) für alle Bestimmungsstaaten

Veröffentlicht:

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

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

(54) **Title:** ELECTROMAGNETIC RADIATION EMITTER ELEMENTS AND METHOD FOR GENERATION OF POPULATION INVERSIONS IN SAID EMITTER ELEMENTS

(54) **Bezeichnung:** ERFINDUNG BETREFFEND EMITTERELEMENTE ELEKTROMAGNETISCHER STRAHLUNG SOWIE VERFAHREN ZUR ERZEUGUNG VON BESETZUNGSINVERSIONEN IN SOLCHEN EMITTERELEMENTEN

(57) **Abstract:** A novel method is disclosed, for generation of populations in excitonic p-states and hence a method for generation of population inversions of excitons, i.e. between the energetically discrete states thereof in materials, in which excitons (bonded electron/hole pairs) can be generated. Furthermore, emitter elements are disclosed, in the form of lasers or amplifiers (excitonic THz Lasers) or oscillators, using said method to generate or amplify electromagnetic radiation corresponding to the energetic separation of the excitonic states or for use as a clock (oscillator).

(57) **Zusammenfassung:** Es wird ein neuartiges Verfahren zur Erzeugung von Besetzungen in exzitonen p-Zuständen und damit ein Verfahren zur Erzeugung von Besetzungsinversionen von Exzitonen, d.h. zwischen deren energetisch beabstandeten Zuständen in Materialien vorgeschlagen, in welchen Exzitonen (gebundene Elektronen-Loch-Paare) erzeugt werden können. Weiterhin werden Emitterelemente und in Form von Lasern oder Verstärker („exzitonen THz Laser“) oder Oszillatoren vorgeschlagen, welchen das erfindungsgemäße Verfahren nutzen, um entsprechend den energetischen Abständen der Exzitonen-Zustände elektro-magnetische Strahlung zu erzeugen oder zu verstärken oder in Form eines Zeitmaßes (Oszillator) zu nutzen.

WO 2006/010363 A2

Patentanmeldung

Erfindung betreffend Emittierelemente elektromagnetischer Strahlung sowie 5 Verfahren zur Erzeugung von Besetzungsinversionen in solchen Emittierelementen

Die vorliegende Erfindung betrifft neuartige Emittierelemente in Form von Verstärkern und Lasern elektromagnetischer Strahlung unter Verwendung von
10 Materialien oder Mischungen solcher Materialien, unabhängig von deren Aggregatzustand, welche exzitonische Energiezustände aufweisen oder in denen solche ausgebildet werden können.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Herstellung einer Besetzung in Exziton-p-Zuständen und zur Herstellung einer Besetzungsinversion in solchen
15 exzitonischen Energiezuständen, sowie die Verwendung dieses Verfahrens zum Betrieb neuartiger Emittierelemente in Form von Verstärkern und Lasern zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung.

Unter Exzitonen werden im Folgenden gebundene Elektronen-Loch-Paare ver-
20 standen. Die Bindung der beiden Ladungsträger dieser Exzitonen erfolgt durch die Coulombsche Wechselwirkungskraft und die exzitonischen Energiezustände werden daher in Anlehnung an das Energietermschema des Wasserstoffatoms beschrieben. Unter der Exzitonen-Bindungs-Energie (oder Binding-Energy) E_B wird im Folgenden die Bindungsenergie des 1s-Exzitonen-Zustands verstanden.

25 Übergänge zwischen exzitonischen Energiezuständen sind bei der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung, insbesondere im Infrarotbereich mit Materie, insbesondere mit kondensierter Materie oder mit Festkörpern zur Beschreibung der Absorptionseigenschaften der Materie, insbesondere von Festkörpern entscheidend.

Insbesondere in Halbleitern, zu denen im festen Zustand auch manche organische Materialien, sowie Isolatoren, bis hin zu Gasen oder Edelgasen gezählt werden können, liefert die Anregung von Elektronen aus dem höchsten gefüllten Valenzband in das leere Leitungsband, welche durch eine Bandlückenenergie E_g von bis zu einigen eV getrennt sind, durch Coulomb-Wechselwirkung zwischen dem verbleibenden „Loch“ im Valenzband und Elektron im Leitungsband ein gebundenes Elektron-Loch-Paar (Exziton). Dieses liefert neben anderen bekannten Effekten einen Beitrag zum Absorptionsspektrum.

Die zugeordneten Energieniveaus oder die Energieniveaus des Anregungsspektrums der Exzitonen liegen bei einem Halbleiter im Bild der Darstellung der Anregungsenergie E über dem Impuls (siehe Fig. 1) knapp unterhalb der Energie der Leitungsbandkante, d.h. z.B. für einen GaAs-Halbleiter liegt das 1s-Exzitonen-Niveau bei ca. 1.4 (bei Zimmertemperatur) bis 1.5 eV (bei niedrigeren Temperaturen), d.h. in der Nähe der Energie der Bandlücke von GaAs.

Aus der wasserstoffartigen Beschreibung der Exzitonen ergibt sich ein Energieschema, das in Fig. 2 skizziert ist. Experimentell bestätigte Bindungsenergien E_B für Halbleiter sind im Bereich von meV (z.B. für InSb: $E_B =$ ca. 0.5 meV bei $E_g =$ ca. 0.2 eV oder für CuCl: $E_B =$ ca. 110 meV bei $E_g =$ ca. 3.1 eV), wobei ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Bindungsenergie und der Energie der Bandlücke festzustellen ist. Damit fallen die Bindungsenergien in Bereiche, bei denen durch interne Übergänge zwischen Exzitonen-Zuständen Energien im Bereich von Terahertz-Wellen und teilweise darüber hinaus absorbiert oder, im Falle von Besetzungsinversion auch abgestrahlt werden können.

Der Bereich der THz-Wellen wird im Allgemeinen auf der Skala (von energiearmen hin zu energiereichen elektromagnetischen Wellen), d.h. von

Radiowellen, Mikrowellen, Infrarot, Sichtbar, Ultraviolett, Röntgen
im Bereich zwischen Mikrowellen und Infrarot-Bereich eingeordnet.

Der Bereich der Terahertzwellen umfasst dabei mindestens den Frequenzbereich von 10^{10} bis 10^{13} Hz und entspricht damit mindestens dem Energiebereich von 0.04136 bis 41.36 meV oder mindestens dem Wellenlängenbereich von 2.998 cm bis 2.998 mm.

THz-Wellen werden bereits für vielfältige Anwendungszwecke genutzt. Innerhalb des Bereiches Forschung und kommerzielle Entwicklung können damit z.B. Rota-

tionsübergänge von polaren Molekülen in der Gasphase oder Schwingungsmoden von Makromolekülen oder Kristallen oder aber Vorgänge in Supraleitern untersucht werden.

Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass die DNA-Analyse, aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindices von Einzel- und Doppelstrang-DNA ebenso ein Einsatzgebiet für THz-Wellen wird. Damit könnten dann so genannte markerfreie Analyse oder Diagnoseverfahren für die Gentechnik ermöglicht werden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet stellt die Umweltanalytik, d.h. der Nachweis verschiedenster Stoffe in der Luft oder im Wasser oder in Nahrungsmitteln dar. Mit THz-Wellen wird es auch möglich sein die Qualitätssicherung von verpackten Lebensmitteln in der Produktion oder Lagerung (ohne Zerstörung der Verpackung) zu erhöhen. Generell ist durch die punktweise Durchleuchtung auch ausgedehnter Objekte mit THz-Wellen in zwei oder drei Dimensionen auch eine THz-Bildgebung (also 2- oder 3-dim. Abbildung, THz-Imaging bzw. -Tomography) der Objekte möglich. So gelang es einem englischen Forscherteam durch 2-dim. Durchleuchtung der menschlichen Haut eine relativ häufige Hautkrebsart mit hoher Sicherheit nachzuweisen. Der Einsatz von THz-Wellen im Rahmen der THz-Tomography ist aber auch im Bereich der Sicherheitstechnik, z.B. bei der Durchleuchtung von Gepäckstücken möglich.

Im Bereich der Kommunikation können THz-Wellen als Trägerfrequenzen für die drahtlose Kommunikation, z.B. mobiler Geräte genutzt werden. Ausgehend vom derzeitigen „Bluetooth“-Standard mit einer Frequenz von 2,45 GHz, wird es in naher Zukunft möglich sein Funksysteme mit 50 oder 100 GHz und durch THz-Wellen mit 1000 GHz zu betreiben, welche deutlich höhere Übertragungsraten als „Bluetooth“ aufweist.

Im Folgenden wird die Bezeichnung THz oder Terahertz synonym für den weiteren Bereich des gesamten Frequenzbereiches verwendet, welcher energetisch dem Übergang zwischen zwei Exzitonen-Zuständen beliebiger Materialien und Systeme entspricht, die Exzitonen-Zustände aufweisen oder ausbilden können.

30

Entscheidend für all diese Anwendung ist aber die Verfügbarkeit günstiger THz-Emitter in Form von Verstärkern oder Lasern

Stand der Technik

Im Bereich der Forschung verwendeten mehrere kürzlich durchgeführte Versuche Terahertz-(THz) Strahlungsfelder, um optisch gebildete Viel-Teilchen-Systeme direkt zu untersuchen. Diese Methode wurde bislang genutzt, um THz-Leitfähigkeitsmessungen [3], Plasmonen [4] und die Bildung von gebundenen Exzitationen [5] zu untersuchen.

So konnte in [5] (R.A. Kaindl et al.,) im Jahre 2002 an GaAs-Mehrfach-Quantenschichten (multiple quantum-wells) als Testsystem die Besetzung des 1s Exzitonen-Niveaus mit inkohärenten Exzitonen nachweisen. Die Besetzung dieser Niveaus gelang durch optische nicht-resonante Anregung, d.h. durch Anregung in das Kontinuum der ungebundenen Elektron-Loch-Paar-Zustände (Continuum), d.h. in das Leitungsband des Testsystems mit einem nah-infraroten (800 nm) Laser-Puls von 1ps Dauer. Aufgrund der Coulomb-Anziehung zwischen den positiv geladenen Löchern und den negativ geladenen Elektronen formen sich aus den optisch angeregten ungebundenen Elektron-Loch-Paaren, in Folge von Streuung an Phononen und Störstellen gebundene Elektronen-Loch-Paare, d.h. Exzitonen-Populationen in dem 1s-Zustand, welcher in dem GaAs-Quantenschicht-Testsystem energetisch unterhalb dem Leitungsband des Halbleiters oder unterhalb des Kontinuums der freien Elektron-Loch-Paar-Zustände liegt. Nach verschiedenen Wartezeiten von ca. 1 bis über 1.000 ps wurde anschließend das so optisch angeregte Testsystem einem breitbandigen THz-Puls mit 500fs Impulsdauer (Wellenlänge ca. 100-300 μm) ausgesetzt, um die Freiheitsgerade der zuvor gebildeten Exziton-Populationen zu testen. Bei Wartezeiten von ca. 1000 ps für das oben geschilderte System konnte ein Übergang vom 1s zum 2p-Exziton Zustand des Systems bei einer Energie von ca. 7 meV nachgewiesen werden.

Das in oben aus [5] geschilderte Verfahren zur Besetzung eines Exzitonen-Zustands (des 1s-Zustandes) und das in [5] geschilderte Verfahren, welches im Wesentlichen dem obigen entspricht, mit dem Unterschied der direkten optischen Anregung in den 1s-Zustand sowie die allgemein bekannte zwei Photonen-Absorption zur Besetzung auch von p-Zuständen und die ebenfalls allgemein bekannte Konversion zwischen ortho- und para-Exzitonen in Materialien wie Cu_2O bilden die einzigen bislang bekannt Verfahren zur Besetzung eines Exzitonen-Zustands.

Neben der im Bereich der Grundlagenforschung verwendeten Methode, THz Strahlung durch Mischen zweier, gegeneinander leicht verstimmter Laserstrahlen im optischen Bereich zu erzeugen, wurden überwiegend für spektroskopische Zwecke, im Bereich der Forschung, durchstimmbare THz-Quellen entwickelt, umfassend „freie-Elektron-Laser“ [6], „Quanten-Kaskaden-Laser“ [7] oder auch Quellen, welche zur THz-Erzeugung die Differenz-Frequenz-Methode nutzen [8]. Letztere Methode wurde z.B. in Martin Hofmann et al. [9] dargestellt.

Im Bereich der Technik sind zur Erzeugung von Strahlung im Bereich von THz schon Halbleiter-Emitterelemente bekannt. Halbleiter-Emitterelemente sind insbesondere als so genannte Halbleiter-Dioden oder auch in Halbleiter-Diodenlasern bekannt. Deren Funktionsprinzip beruht darauf, dass in eine –durch einen pn-Übergang gebildete– aktive Schicht Leitungs- und Valenzelektronen, welche durch die Bandlücke im Energieband des Halbleiters getrennt sind, injiziert werden und dann unter Abgabe von elektromagnetischer Strahlung rekombinieren.

Aus der DE 101 22 072 A1 (Infineon) ist ein Halbleiter-Emitterelement bekannt, welches zur Emission im ferninfraroten Spektralbereich geeignet ist. Das dort genannte Emitterelement weist ein erstes Halbleiterschichtssystem mit wenigstens einer ersten Halbleiterschicht auf einer ersten leitenden Schicht und einer zweiten Halbleiterschicht auf mit darin ausgebildeten Quantendots, ein auf dem ersten Halbleiterschichtssystem aufgewachsenes zweites Halbleiterschichtssystem mit auf einer dritten Halbleiterschicht aufgewachsener zweiter leitender Schicht und ein Ansteuerungselement zum Anlegen von Spannungspulsen zwischen der ersten und der zweiten leitenden Schicht auf, wobei Elektronentunneln durch die erste Halbleiterschicht verhindert wird. Die Quantendots dienen dabei –in bekannter Weise– zur Ausbildung von Energiespektren für die darin eingeschlossenen Ladungsträger.

Dort zitiert [11], ist auch eine weitere, bekannte Variante von Halbleiter-Emitterelementen zur Emission im ferninfraroten Spektralbereich, welche als so genannte „Quanten-Kaskadenlaser“ bekannt ist. Bei diesen Quanten-Kaskadenlasern bilden zweidimensionale Elektronensysteme, welche sich an den Grenzflächen von Halbleiter-Heterostrukturen bilden, eine Einschränkung von

Elektronenbewegungen, um elektronische Übergänge zwischen diskreten Energieniveaus im Leitungsband zu ermöglichen.

Ebenfalls im Bereich der Technik bekannt sind Vorrichtungen zur Emission von THz-Wellen, bei denen die Methode der Differenzen-Frequenz genutzt wird. Ein
5 Beispiel dafür ist die DE 102 17 826 A1 (Mitsubishi Denki), bei der zwei Erregungslaser-Lichtquellen mit unterschiedlichen Emissionswellenlängen und eine nichtlinearen Wellenlängen-Umwandlungsvorrichtung so angeordnet sind, dass die beiden optischen Achsen der Ausstrahlungsrichtung der beiden Wellenlängen sich im Bereich der Umwandlungsvorrichtung so überlappen, dass ein Terahertz-
10 strahl (Differenz der beiden Wellenlängen der Erregungslaser) in einer zu den beiden optischen Achsen coaxialen Richtung ausgestrahlt wird.

Weiterhin sind Quellen von THz-Wellen bekannt, welche auf fotoleitenden Substanzen beruhen. Wie z.B. in DE 102 17 826 A1 (Fig. 5 dort, Zitat aus [12]) beschrieben, weisen diese einen fotoleitenden Dünnsfilm aus einem Halbleiter und
15 einen Spalt auf, an welchen eine Gleichspannungsquelle angeschlossen ist, sowie eine Dipolantenne, so dass bei Auftreffen eines Laserstrahls auf den Halbleiter (Dünnsfilm) mit einer Energie, welche höher ist als der Bandabstand des Halbleiters, freie Träger erzeugt werden, welche in Folge der am Spalt angelegten Spannung einen impulsartigen Strom auslösen und damit die Aussendung einer elektromagnetischen Terahertzwelle zur Folge haben. Es ist auch bekannt kontinuierliche
20 Terahertzwellen zu erzeugen, indem die Strahlen zweier kontinuierlich arbeitender Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen auf einer fotoleitenden Vorrichtung optisch gemischt werden unter Ausbildung einer gemischten Welle (Schwebung), so das diese Welle im Terahertzbereich liegt.

25 Aus der Patentschrift US 2,879,439 („Production of Electromagnetic Energy“, Erfinder Charles H. Townes) mit Erteilungsdatum 24.3.1959, ist ein Apparat zur Erzeugung elektromagnetischer Energie bekannt, umfassend ein Ensemble oszillierender Partikel, welche sich normalerweise im thermischen Gleichgewichtszustand in mindestens zwei unterschiedlichen, diskreten Energiezuständen befinden und in
30 der Lage sind vom einem zum anderen Zustand unter Abgabe von Energie überzugehen und Mittel zur Erzeugung einer instabilen Ungleichgewichts-Verteilung von Partikeln in den mindestens zwei Energiezuständen, wobei die Mittel zur Erzeugung einer instabilen Ungleichgewichts-Verteilung zur Abstrahlung elektro-

magnetischer Energie einer Frequenz, welcher der Differenz zwischen den mindestens zwei Energiezuständen entspricht, geeignet sind, des Weiteren einen schwingenden, elektro-magnetischen Kreislauf mit einem Betriebsfrequenzbereich, welcher der Frequenz der elektro-magnetischen Energie entspricht und
5 umfassend Mittel zur Übertragung der abgestrahlten Energie in den elektro-magnetischen Kreislauf und umfassend Mittel zur Extraktion von Energie aus dem elektro-magnetischen Kreislauf.

In der vorgenannten Schrift wird aber vorwiegend auf die damals bekannt werden-
den MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) abge-
10 stellt, insbesondere auf Molekülstrahlmaser bei denen die „Anregung“ oder die Inversion der Besetzungszahlen in den diskreten Energiezuständen vorwiegend durch Separation eines Molekülstrahles in einen angeregten und einen unangeregten Teilstrahl mittels magnetischer Felder erfolgte.

Auch aus der Patentschrift US 4,161,436 („Method of Energizing a Material“, Erfinder Gordon Gould) basierend auf der US 804,539 vom 6.4.1959, mit Erteilungsdatum 26.4.1988, sind Methoden zur Erzeugung einer Besetzungsinversion und deren Verwendung in Vorrichtung zur „Energetisierung“ vornehmlich in chemischen Reaktionen, wie Dissoziation oder durch exotherme Reaktionen bekannt.

In der vorgenannten Schrift wird die Inversion der Besetzungszustände in Gasen
20 (als aktives Medium) z.B. durch Bestrahlung mit Gasentladungslampen (wobei die Atome der Gasentladungslampe durch Stöße mit Elektronen, welche aus der Entladung entstanden sind angeregt werden, „Stöße erster Ordnung“) oder durch direkte Entladungen innerhalb des Gases des aktiven Mediums (z.B. durch Radiowellen) oder durch Stöße „zweiter Ordnung“ zwischen den Atomen eines ersten
25 Gases und denen des als aktives Medium wirkenden Gases erzeugt (z.B. Na und Hg). Durch die beiden Verfahren, bei denen Stöße zur Anregung eingesetzt werden, konnten auch Besetzungen oder Populationen in solchen Energieniveaus erzeugt werden, welche nicht durch Lichtanregung –aufgrund der Auswahlregel für den Drehimpuls– besetzbar sind.

30 Darüber hinaus ist aus der DD 268 091 A1 (Akademie der Wissenschaften der DDR) ein Verfahren und eine Anordnung zur Erzeugung von Besetzungsinversion und Lasertätigkeit im Röntgen- bzw. vakuumultravioletten Spektralbereich bekannt. Bei dem dort beschriebenen Verfahren werden mittels Laserstrahlung er-

zeugte Plasmen genutzt, wobei zwei Plasmen zeitlich und räumlich unabhängig voneinander erzeugt werden und entgegengesetzte Expansionsrichtungen haben und ein Plasma als Wärmesenke zur Kühlung des anderen Plasmas bei Aufrechterhaltung der erforderlichen Elektronendichte dient, wobei der Dichtebereich, in dem Inversion auftritt, vergrößert wird.

In keiner der beiden letzt genannten US- oder der DD-Patentschrift werden jedoch Exzitonen-Zustände, d.h. Energiezustände gebundener Elektronen-Loch-Paare erwähnt.

Insgesamt sind keine Patentschriften oder Forschungsergebnisse, selbst aus der aktuellen Literatur bekannt, in denen der Gedanke verfolgt wird, die Energieschemata der Exzitonen-Zustände, welche meist durch die des Wasserstoffatoms approximiert werden, in Materialien in der Form von Festkörpern, wie z.B. Halbleitern, Flüssigkeiten oder Gasen oder deren geänderten Zuständen, wie suprafluiden Flüssigkeiten oder Plasmen zu nutzen, um darin durch direkte optische Anregung, d.h. durch Anregung einer s-artigen Polarisation und Umwandlung derselben durch Coulombwechselwirkung zur Erzeugung einer Exzitonenpopulation in einem p-Zustand, eine Besetzungsinversion (im Vergleich zum thermischen Gleichgewicht) zu erzeugen, um damit schließlich elektromagnetische Strahlung, insbesondere im Bereich der Terahertz-Wellen oder den angrenzenden Frequenzbereichen zu erzeugen oder zu verstärken.

Dies ist nicht weiter verwunderlich, da im Wesentlichen erst in den letzten Jahren die entscheidenden Schritte im Hinblick auf das Ziel die Bildung von Exzitonen zu verstehen, unternommen wurden. Die Ursachen dafür sind vielfältig, jedoch ist für den experimentellen Bereich festzuhalten, dass eine Ursache durch das Fehlen geeigneter spektroskopischer Methoden, d.h. der direkten THz-Spektroskopie an wohlcharakterisierten Testsystemen gegeben war.

Für den theoretischen Bereich liegt eine Ursache darin, dass die Beschreibung der Coulomb-Wechselwirkung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Wechselwirkung der Elektronen und Löcher mit dem Lichtfeld und mit Phononen, insbesondere im Hinblick auf die Erzeugung von Exzitonen-Populationen, in Vielteilchensystemen äußerst schwierig und rechnerisch aufwendig ist.

Nachteile im Stand der Technik

Die bekannten, vorgenannten Verfahren zur Erzeugung von Besetzungen von Exzitonen-p-Zuständen, speziell die 2-Photonen-Absorption sind für praktische Anwendungen nur schlecht geeignet, da dafür Lichtquellen mit Energien im Bereich der halben Bandlücke notwendig wären, diese aber in der Regel nicht oder nur sehr schwer kommerziell erhältlich sind.

Bei den vorgenannten Emitterelementen können zwar viele verschiedene Halbleitermaterialien mit relativ großer Bandlücke für den Einsatz im ferninfraroten Spektralbereich verwendet werden, jedoch weisen alle vorgenannten Halbleiter-Emitterelemente den Nachteil auf, dass der Herstellungsprozess sehr komplex und aufwendig ist (Herstellung von Heterostrukturen, d.h. dünnen Schichtfolgen mit Dimensionen im nm-Bereich).

Die anderen oben genannten Vorrichtungen oder Verfahren sind apparativ oder anderweitig aufwendig, da z.B. zwei Lichtquellen und weitere Elemente, wie z.B. Phasenanpassungsvorrichtung etc. notwendig sind.

In keinem Fall sind die genannten Vorrichtungen und Verfahren in der Lage Besetzungsinversionen in oder Übergänge zwischen Energiezuständen von Exzitonen auf einfache und damit steuerbare Art oder mit geringem Energieeinsatz zu erzeugen.

20

Aufgabe

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher ein Verfahren zur Erzeugung einer Besetzung oder Erhöhung der Besetzung eines Exzitonen-p-Zustands und damit auch ein Verfahren zur Erzeugung einer Besetzungsinversion in Exzitonen-Zuständen anzugeben, welche beide die obigen Nachteile vermeiden.

Die weiteren Aufgaben der vorliegenden Erfindung bestehen darin –unter Verwendung der Verfahren– baulich einfache Emittter auch in Form von Verstärkern oder Lasern für die Aussendung elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Energiedifferenzen exzitonischer Zustände anzugeben.

Lösung der Aufgabe

Die erste dieser Aufgaben (Angabe eines Verfahrens zur einfachen Besetzung eines Exzitonen-p-Zustands) wird erfindungsgemäß gelöst durch die Angabe des Verfahrens gemäß dem Anspruch 1.

- 5 Die zweite dieser Aufgaben (Angabe eines Verfahrens zur Erzeugung einer Besetzungsinversion zwischen exzitonischen Zuständen) wird erfindungsgemäß gelöst durch Angabe des Verfahrens gemäß Anspruch 5.

Die dritte und vierte dieser Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch die Gegenstände der Ansprüche 11 bis 15.

10

Es ist bekannt, dass resonante Laser Anregung von Halbleitern eine kohärente „Interband Polarisation“ zwischen Leitungsband-Elektron- und Valenzband-Loch-Zuständen induziert. Das Wort kohärent bedeutet hier, dass all diese Prozesse eine wohl definierte Phasenbeziehung haben, die vom anregenden Laser-Puls

15 aufgeprägt wird. Diese Phasenbeziehung ist in Form einer optischen Polarisation des Materials beobachtbar, die ihrerseits über die Maxwellgleichungen wieder an den anregenden Laserpuls zurückkoppelt. Eine solche Kohärenz kann im Allgemeinen jedoch nur für eine gewisse Zeit (in der Regel einige Picosekunden) aufrechterhalten werden, da immer auch phasenzerstörende Prozesse stattfinden. In

- 20 Festkörpern sorgen vor allem die langreichweitige Coulombwechselwirkung zwischen allen Elektronen und Löchern und die Wechselwirkung zwischen Ladungsträgern und Gitterschwingungen (Phononen), sowie in realen Systemen vorhandene Unordnungseffekte für den Zerfall der Polarisation. Im Allgemeinen bleiben die Elektron- und Lochdichten nach einem solchen Puls und dem nachfolgenden Zerfall der Polarisation im angeregten Zustand erhalten.
- 25

Weiterhin ist bekannt, dass durch Wechselwirkung und Streuprozesse diese „optische Polarisation“ in inkohärente Populationen von ungebundenen oder/und gebundenen Elektron-Loch-Paaren (Exzitonen) umgewandelt werden kann.

- Obwohl die exzitonischen Eigenschaften der kohärenten Polarisation einigermaßen gut verstanden sind, bildet die Untersuchung der Umwandlung der kohärenten Polarisierung in inkohärente Viel-Teilchen-Systeme einen Bereich aktueller
- 30 Forschung.

Kern der Erfindung

Überraschenderweise wurde nun festgestellt, dass exzitonische Kohärenzen, d.h. die durch resonante Anregung erzeugte optische Polarisation mit einer strikten s-Typ Radialsymmetrie, effektiv in inkohärente p-Typ-Populationen umgewandelt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass dieses Ergebnis durch Coulomb-Wechselwirkung induzierte Streuung verursacht wird.

Für diese Streuung wurde gefunden, dass sogar eine Besetzungs- (Populations-) Inversion (im Vergleich zum Gleichgewichtszustand) zwischen dem exzitonischen 2p- und 1s-Zustand und/oder weiteren, höheren p und darunter liegenden s-Zuständen entstehen kann, welche zu einer Erzeugung oder/und Verstärkung eines Strahlungsfeldes elektro-magnetischer Strahlung führt, wobei die Komponente der Strahlung entsprechend der Energie des Übergangs vom jeweiligen p- zum s-Zustand erzeugt oder/und verstärkt wird.

Um diese neue Art der Erzeugung einer Besetzung von p-Zuständen und damit – aufgrund der Art des genutzten Übergangs von p- auf s-Zustände – einer Besetzungsinversion zwischen einem p und darunter liegendem s-Zustand (z.B. 2p zu 1s) zu erzielen, wurde überraschenderweise gefunden, dass für den Fall der resonanten, optischen Anregung des 2s-Zustands, d.h. der Einstrahlung von Licht mit einer Energie entsprechend der 2s-Resonanz (d.h. im Falle eines Halbleiters einer Energie entsprechend der Differenz des 2s-Exzitonen-Zustands und der Oberkante des Valenzbandes) oder/und der entsprechend höheren s-Resonanzen zwar eine optische Polarisation mit s-artiger Symmetrie erzeugt wird, diese aber sehr effizient in p-artige Exzitonenpopulationen umgewandelt wird. Da sich im thermischen Gleichgewicht gar keine bzw. vernachlässigbar wenige Exzitonen im 2p-Zustand befinden, wird bei der Durchführung des Verfahrens zur Erzeugung einer Besetzung in einem exzitonischen Zustand (optische Anregung mit einer Energie entsprechend der 2s- oder höheren s-Resonanz) auch eine Besetzung des 2p- oder höheren p-Zustands und damit somit auch ein Verfahren zur Erzeugung einer Besetzungsinversion durchgeführt.

Dabei wurde festgestellt, dass das Verfahren auch bei Anregung mit höheren Energien etwa dem 1,5 bis zweifachen der Exzitonenbindungsenergie (welche der Bindungsenergie des 1s-Zustands entspricht) oberhalb der 2s oder einer entspre-

chen höheren s-Resonanz prinzipiell greift, jedoch deutlich geringere Ausbeuten im Sinne einer Erzielung einer Besetzungsinversion im Verhältnis eines 2p zu 1s oder 3p zu 1s etc. aufweist.

- Zur Durchführung des Verfahrens, wird das ausgewählte Material, welches zur
- 5 Ausbildung von Exzitonen geeignet ist, einer optischen Anregung ausgesetzt [Schritt 1, optische Anregung, in Fig. 6], so dass eine optische Polarisierung mit 2s-artiger Symmetrie induziert wird, was durch einfache Bestrahlung mit der Energie entsprechend der 2s-Resonanz erreicht wird. Durch Coulombwechselwirkungseffekte, welche sich dann zwangsläufig einstellen, wird diese s-artige Polarisierung
- 10 zum Teil in eine 2p-artige Population umgewandelt. [Schritt 2, Coulomb Streuung]. Dieses erfindungsgemäße Verfahren führt auch bei Anregung bei der 3s- oder 4s-Resonanz zu Besetzungen und damit gegenüber dem Gleichgewichtszustand und gegenüber dem 1s-Zustand oder 2s-Zustand oder beiden zu einer Besetzungsinversion.
- 15 Ausserdem muss die Anregung nicht exakt bei der 2s-Resonanz stattfinden, sondern sie kann bis zu dem zweifachen der Exzitonenbindungsenergie verstimmt sein. Bei zu grosser Verstimmung (nichtresonanter Anregung) funktioniert der Mechanismus allerdings nicht, da eine Umwandlung der optischen Anregung nicht direkt in Exzitonen, sondern in ungebundene Elektronen und Löcher erfolgt.
- 20 Durch spontane Emission oder stimulierte Emission mit Strahlung der entsprechenden Differenz der 2p-1s- oder 3p-1s-, etc. Zustände kann diese Besetzung dann unter Emission entsprechender elektro-magnetischer Strahlung wieder in den 1s Zustand abgebaut werden [Schritt 3, Emission von THz Strahlung].
- Durch spontane Rekombination der Elektronen-Loch-Paare des Materials können
- 25 die Ladungsträgerdichten wieder abgebaut werden und damit auch die gebundenen Elektronen-Loch-Paare (Exzitonen) [Schritt 4, Rekombination].
- Da die erfindungsgemäße Anregung in den 2s-Zustand bei geeigneter Wahl der Anregungsintensitäten nur unwesentlich zur Besetzung des 1s-Zustands führt und da Besetzungen im 1s-Exzitonen-Zustand in einem Zeitraum von nano-Sekunden
- 30 zerfallen, während der Übergang vom 2s in den 2p-Exzitonen-Zustand (wie oben beschrieben), schneller, d.h. im Bereich von pico bis femtosekunden stattfindet, kann eine bedeutende Inversion in p-Exzitonzuständen erzielt werden.

Für die Erzeugung von Exzitonen, z.B. in Halbleitern durch das Verfahren mit nicht resonanter Anregung von Ladungsträgern ins Leitungsband und die nachfolgenden Streuvorgänge wurden in der Literatur Zeiten von 20 ps bis zu mehreren hundert Picosekunden angegeben. Ausserdem kann nicht erwartet werden, dass in diesem Falle nennenswerte Besetzungen der p-Zustände erfolgen, so dass keine Besetzungsinversion zwischen p-artigen und s-artigen Zuständen erzeugt werden kann.

Diese Ergebnisse gelten für alle Materialien, unabhängig vom Aggregatzustand, sofern diese zur Ausbildung von Zuständen gebundener Exzitonen in der Lage sind, insbesondere für halbleitende Materialien (direkte oder indirekte Halbleiter), zu denen z.B. auch manche organische Systeme, wie z.B. Polymere oder Gase bei tiefen Temperaturen zählen.

Aufgrund des allgemeinen Verständnisses und der vorhandenen Vorurteile wäre zu erwarten gewesen, dass die exzitonische Polarisierung bei den 1s- oder 2s- (oder höheren s-) Resonanzen rein in inkohärente s-Typ-Populationen gewandelt werden. Man hätte zur Erzeugung der 2p- oder einer Population in einem höheren p-Exzitonen-Zustand auch versuchen können mittels zwei-Photonenabsorption direkt in diesen Zustand anzuregen, was aber, -wie oben dargestellt- aufgrund der dazu notwendigen Lichtenergien nur sehr schwierig möglich ist und dem Vorteil, der Einfachheit des hier besprochenen Prinzips widerspricht.

Im Folgenden werden die der Erfindung zu Grunde liegenden Untersuchungen dargestellt.

Bei Untersuchungen, die THz- oder exzitonischen Eigenschaften von resonant-angeregten Halbleitern zu analysieren, wurde der Aufbau von Exziton-Populationen in verschiedenen Quanten-Zuständen beobachtet.

Zur Untersuchung diene dabei eine Quantum-Wire Struktur, wobei die wesentlichen Resultate auch für eine Quantum-Well Struktur bestätigt werden konnten. Als Material wurde GaAs betrachtet, wobei die Abmessungen so gewählt wurden, dass der Energieabstand zwischen den beiden niedrigsten Exzitonen-Zuständen 5 meV beträgt. Die Gittertemperatur wurde bei ca. 10 K festgelegt, so dass nur ein Einfluss akustischer Phononen zu erwarten ist.

Um die Bildung von inkohärenten Exzitonen in den verschiedenen Quantenzuständen zu untersuchen, wurden die betrachteten Halbleiterstrukturen bei einer optischen Anregung, entsprechend einer Dauer von 4ps, gepulst und entsprechend einer Energie der 1s- und 2s-Resonanzen, untersucht. Die Untersuchungen wurden für verschiedene Anregungs- oder „Pump“-Intensitäten wiederholt und jeweils die endgültige quasi-stationäre Exzitonen-Fraktion $\Delta n_v/n$ mit n_v = Dichte der Exzitonen im Zustand $v = 1s, 2s, ..$ und n = Wert der erzeugten (Ladungs-)Trägerdichte dargestellt.

Die Ergebnisse dazu sind in den Figuren 3 bis 5 dargestellt.

Fig. 3 (a): Für eine Anregung bei der 1s-Exzitonenresonanz mit Hilfe eines 4ps-Laserimpulses (Strich-Punkt-Linie) werden gezeigt: die temporäre Entwicklung der optisch erzeugten Polarisierung $[P]^2$ (schattierter Bereich), zusammen mit der erzeugten inkohärenten 1s- (gestrichelte Linie) und 2p- (durchgezogene Linie) Exzitondichte $[10^{-4} \text{ cm}^{-1}]$. Das kleinere in Fig. 3a eingefügte Diagramm zeigt das Pumpen (schattierter Bereich) und das lineare Absorptionsspektrum (durchgezogene Linie); E_{1s} ist die 1s-Exzitonen-Energie.

Fig. 3 (b): Die Effizienz der Umwandlung der Polarisierung zur Population für 1s- (gestrichelte Linie) und 2p-Exzitonen (durchgezogene Linie) ist als Funktion der Anregungsdichte n (in 10^4 cm^{-1}) eingezeichnet. Der Pfeil zeigt die Dichte bei welcher die Dynamik in 2 (a) dargestellt wird. Der schattierte Bereich gibt die Umwandlungseffizienz ohne die Phononen-Streuung wieder.

In Fig. 3a wird der zeitliche Verlauf des Pump-Impulses, der induzierten optischen Polarisierung und der erzeugten 1s und 2p-Exzitonen-Dichte dargestellt. Fig. 2b stellt den relativen Anteil der Exzitonen in verschiedenen Quantenzuständen dar, wobei –nach dem bisherigen Stand der Erkenntnisse nicht verwunderlich– festzustellen ist, dass für die 1s-Anregung die optische Polarisierung hauptsächlich in inkohärente 1s-Exzitonen umgewandelt wird. Der Anteil $\Delta n_{1s}/n$ liegt für geringe Anregungsdichten n weit oberhalb von 90%. Dieser große Anteil war zu erwarten, da kohärente und inkohärente 1s-Exzitonen einen exzellenten energetischen „Match“ aufweisen. Allerdings ist auch festzuhalten, dass die generierte Exzitonenpopulation bei moderaten Anregungsdichten oberhalb 10^5 cm^{-1} abnimmt;

$\Delta n_{1s}/n$ ist dort nur noch 40%. Für höhere Anregungsdichten verschwindet $\Delta n_{1s}/n$, da die Exzitonen „ionisieren“.

Die Ergebnisse für resonante 2s-Anregung werden in **Fig. 4a, b, c** gezeigt, wo in der **Fig. 4c** die Verhältnisse $\Delta n_{2s}/n$, $\Delta n_{2p}/n$ und $\Delta n_{1s}/n$ dargestellt werden. Für nicht zu hohe Anregungsdichten n ist festzustellen, dass die 2s-Polarisation in einen Mix aus 2s und 2p-Populationen umgewandelt wird. Während der Wert der 2s-Population mit ansteigender Anregungsdichte monoton abfällt, wächst der Wert der 2p-Population zunächst bis zu 40%, bevor er auch bei höheren Anregungsdichten abfällt, wo die Erzeugung von 1s-Exzitonen graduell Bedeutung erlangt (gestrichelte Linie in 4c).

Durch Untersuchung der Dynamik der Bildung der Populationen, d.h. durch Bestrahlung des Testsystems entsprechend einem 150 fs THz-Puls konnte festgestellt werden, dass für kurze Zeiten (Betrachtungszeit bis ca. 11 ps) nach der Anregung im Wesentlichen nur eine THz-Absorption mit einem Maximum um den 1s-2p-Übergang bildet, wenn die 1s-Resonanz optisch angeregt wird. Diese Ergebnisse wurden auch schon in [5] experimentell bestätigt.

Bei Anregung in der 2s-Resonanz konnte jedoch festgestellt werden, dass anfänglich für sehr kurze Zeit nach der Anregung im Wesentlichen nur 2s-Exzitonen vorliegen (siehe Figur 4a), so dass nur Absorptionsübergänge vom 2s- in höhere Zustände vorliegen, wobei sich aber nach ca. 3 ps bereits inkohärente 2p-Exzitonen gebildet haben und sich damit ein deutlicher THz-Gain durch 2p zu 1s-Übergänge, als Konsequenz der Besetzungsinversion zwischen diesen beiden Zuständen, ausbildet. Durch davon unabhängige Berechnungen konnte ermittelt werden, dass für das Testsystem „Quantum-Wire“ ein Verhältnis der 2s zu 2p-Population von ca. 1,36 und für das Testsystem „Quantum-Well“ ein Verhältnis von 0.99 erzielt werden kann. Im thermischen Gleichgewicht befinden sich bei den untersuchten Temperaturen praktisch keine Exzitonen im 2p-Zustand, so dass der Quotient dann unendlich wäre. D.h. für die Test-Systeme „Quantum-Well“ und „Quantum-Wire“ kann davon ausgegangen werden, dass durch das erfindungsgemäße Verfahren, angewendet auf die 2s-Resonanz, eine Besetzungsinversion erzeugt werden kann, bei der im 2p-Zustand etwa genauso viele, oder sogar mehr Exzitonen vorhanden sind, wie im 2s-Zustand.

Diese Verfahren zur Besetzung von Exzitonen-p-Zuständen und zur Erzeugung einer Besetzungsinversion, ist generell anwendbar bei Materialien oder Gemischen davon oder Systemen, welche die Bildung von Exzitonen (oder Exzitonen-Zuständen) erlauben, insbesondere bei Halbleitern, zu denen aber auch manche organische Polymersysteme zu zählen sind. Aufgrund der Art der Erzeugung der Besetzung der p-Zustände, d.h. aufgrund der Tatsache, dass dabei auch im geringeren Maße s-Zustände besetzt werden, ist das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung eines 2p- oder höheren p-Zustands auch geeignet und nach dem vorgeschriebenen Stand der Technik neu und erfinderisch, wenn es als Verfahrens zur gleichzeitigen Besetzung von s- und zugeordneten p-Zuständen betrachtet wird. Die Begründung für die Neuheit und erfinderische Tätigkeit des Verfahrens ist dabei die gleiche, wie für das erfindungsgemäße Verfahren zur Besetzung von Exzitonen-p-Zuständen, da –wie das vorgenannte Verfahren- kein Verfahren bekannt ist, bei welchem im Wesentlichen zeitlich parallel eine Besetzung eines s- und des zugeordneten p-Zustands erzeugt wird. Dabei ist natürlich zu beachten, dass die erfindungsgemäßen Verfahren am wirkungsvollsten greift, wenn relativ scharfe, spektral gut ausgebildete exzitonische Resonanzen oder exzitonische Energiezustände vorliegen, was z.B. durch entsprechende Kühlung oder andere, z.B. aus der Spektroskopie bekannte Massnahmen leicht erreicht werden kann.

Die **Fig. 5 a, b, c** zeigt das Ausmass der durch das Verfahren erzielbaren Besetzungsinversion („THz-Gain vs. Detuning“) in Abhängigkeit von der „Verstimmung“ der Anregung in die 2s-Exzitonen-Resonanz in Einheiten von E_B , d.h. der Exzitonenbindungsenergie (d.h. der 1s-Exzitonen-Bindungsenergie) des untersuchten Testsystems.

Die **Fig. 5a** (oben links) zeigt, dass die Besetzungsinversion (2p zu 1s) bei einem Detuning $(E - E_{2s})/E_B$ von Null (d.h. bei exakter Resonanz) optimal, d.h. bei einem Wert von über 0.5 liegt (siehe y-Achse für Einheit) und bei einem Wert von $E = 1.5 \times E_B$ nahezu Null ist.

Die **Fig. 5b** (oben rechts) zeigt die Effektivität der Erzeugung von Ladungsträgern als Funktion der Verstimmung. D.h. es ist direkt proportional zu dem Absorptionsspektrum des untersuchten Testsystems.

Diese Ergebnisse sind aber auch –insbesondere was die Begrenzung des Wertes in welchem das Verfahren noch funktioniert, d.h. bei Anregung mit einer Verstimmung mit dem 1- bis zum 2-fachen der 2s-Exzitonen-Bindungsenergie auch– auf andere Systeme oder Materialien übertragbar.

- 5 **Fig. 5c** zeigt die Höhe der Besetzungsinversion „THz-Gain“ in willkürlichen Einheiten ("arbitrary units") für das untersuchte Testsystem (Quantum-Wire). Diese Darstellung ist vorteilhaft, da der absolute Gain von Dingen abhängt wie z.B. der Anzahl der Quantenfilme (bei einem 2D-System), der Anregungsintensität etc.
- 10 Vorteilhafte Ausführungsbeispiele werden in den folgenden und den folgenden Textabschnitten -- ohne abschließend zu sein -- beschrieben.

Es zeigen schematisch:

- Fig. 1: die Anregung und Entstehung von Exzitonen in einem Halbleiter
15 oder einer Halbleiter-Quantenstruktur,
- Fig. 2: das Energieschema eines Exzitons
- Fig. 3: die Ergebnisse der Untersuchungen an GaAs Quantenstrukturen (Quatum-Wire) bei Anregung in der 1s-Exzitonen-Resonanz,
- Fig. 4: wie Fig. 3, jedoch bei Anregung in der 2s-Exzitonen-Resonanz
- 20 Fig. 5: Besetzungsinversion (links oben), erzeugte Anregungsdichte (rechts oben) und THz Gain (unten) als Funktion der Verstimmung des Anregungslasers in Bezug auf die 2s-Exzitonenresonanz.
- Fig. 6: Das Niveauschema eines „exzitonischen THz-Lasers“ oder –Verstärkers
- 25 Fig. 7: einen prinzipiellen Aufbau eines „exzitonischen THz Verstärkers “
- Fig. 8: einen prinzipiellen Aufbau eines „exzitonischen THz Laserss“

- Die Bezeichnung „exzitonischer Emitter“ (Verstärker oder Laser) wird im Folgenden verwendet, um einerseits eine begriffliche Abgrenzung zu einem „exzitonischen Laser“, welcher nach allgemeinem Verständnis ausschließlich Energien
30 liefert, welcher einer Rekombination der Exzitonen entspricht und andererseits eine kürzere Begrifflichkeit für einen Frequenzbereich zu finden, welcher den her-

stellbaren Energiedifferenzen zweier Exzitonenzustände entspricht (siehe Definition „THz“ weiter oben).

Die **Fig. 1 bis Fig. 5** wurden in den obigen Textteilen bereits beschrieben.

- 5 **Fig. 6** zeigt eine erfindungsgemäße Erzeugung einer Besetzungsinversion und den Laser- bzw. Verstärkerprozess in exzitonischen Energiezuständen.

Fig. 7 zeigt schematisch die prinzipielle Konfiguration für einen exzitonischen THz Verstärker. Dabei wird die zu verstärkende elektromagnetische Strahlung im THz-Bereich in der von den Laser-Halbleiterdioden bekannten Art und Weise in das Halbleitermaterial eingestrahlt, wobei durch die zwischen den gewünschten Zuständen erzeugte Besetzungsinversion dann eine Verstärkung durch stimulierte Emission genau der Komponente der eingestrahlten Strahlung erfolgt, welche der Energiedifferenz der erzeugten Besetzungsinversion entspricht. Entsprechend bekannte optische Komponenten wie Linsen aus Silizium können genutzt werden, um die emittierte Strahlung dann zu bündeln oder in bekannter Weise weiter zu behandeln.

10
15

Fig. 8 zeigt die schematische Konfiguration eines exzitonischen THz Lasers.

Dabei wird die „Pumpleistung“ in Form von optischer Energie in gepulster oder cw-Form in bekannter Art und Weise in eine durch zwei Reflektoren (z.B. aus Aluminium oder Gold) angedeutete Kavität eingestrahlt. Zur Erzeugung des „Lasing“ ist dann in bekannter Weise die Pumpleistung auf die Durchlässigkeit des einen auskoppelnden Spiegels (Teildurchlässig im Bereich von typisch 2-3% oder mehr) und auf die sonstigen Energieverluste einzustellen. Alternativ kann die Kavität auch durch entsprechende Bearbeitung oder Beschichtung der Oberflächen des „aktiven Materials“ (Halbleiter etc.) gebildet werden. Die Abmessungen der Kavität (Abstand der Reflektoren) oder Abstand der Oberflächen des aktiven Materials sind entsprechend den gewünschten Moden oder Wellenlängen in der von den Laserdioden bekannten Weise zu wählen.

20
25

- 30 Wie dem Fachmann unmittelbar einsichtig, wenigstens aber aus dem Bereich der bekannten Halbleiteremitter oder Laserdioden bekannt ist, kann dieser Laser im cw- (continuous wave) oder im gepulsten Modus betrieben werden. Dabei wird bei

diesem Laser durch Pumpen nahe der 2s-Resonanz eine Besetzung von 2p-Exzitonen [Schritt (1) und (2)] erzeugt.

- Durch geeignete Spiegel (z.B. Aluminium oder Gold) für den entsprechenden Frequenzbereich der Übergänge zwischen den Exzitonen-Zuständen lässt sich eine
- 5 Kavität bauen, in welcher bei ausreichenden Pumpleistungen in Abhängigkeit von den Übergangsdauern, Verlusten der Spiegel und der sonstigen für gewöhnliche Licht-Laser bekannten Randbedingungen, eine stimulierte Emission elektromagnetischer Strahlung der entsprechenden Übergänge zwischen Exzitonenzuständen entsprechend der passend zu wählenden Geometrie erzielen.

10

In einem vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel für einen „Exzitonischen THz Laser“ ist als aktives Material für die Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Exzitonen-Zustände die Verwendung von Halbleitern vorgesehen.

- 15 Aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit des Übergangs eines Ladungsträgers ins Leitungsband durch Anregung mit elektromagnetischer Strahlung ist als weiteres Ausführungsbeispiel für einen „exzitonischen THz Laser“ die Verwendung von direkten Halbleitern besonders bevorzugt.

- 20 Wie dem Fachmann bekannt ist lässt sich aber auch für indirekte Halbleiter, wie Germanium, Silizium und Galliumphosphid (GaP) etc., die Ausbeute für Übergänge nach Anregung –allerdings mit mehr Aufwand– erhöhen, wenn bei geeigneter Dotierung die Übergänge von oder in Störstellen erfolgen. Für die technisch genutzten Halbleitermaterialien sind strahlende Übergänge unter Beteiligung von
- 25 Störstellen wichtig. Solche Störstellen werden durch Dotierung, z.B. mit so genannten Donatoren und Akzeptoren erzielt. Bis auf wenige Ausnahmen bestehen bekanntlich die meisten Lumineszenzdioden aus $A_{III}B_V$ – Halbleitern oder –Verbindungen, wie z.B. GaAs, wobei die entsprechenden Dioden elektromagnetische Strahlung im Infrarot-Bereich emittieren. Bei GaAs entstehen durch Silizium-
- 30 Dotierung bei Substitution auf Galliumplätzen Donatoren, bei Einbau auf Arsenplätzen Akzeptoren.

Eine spezielle Störstellenart entsteht, wenn ein Atom des Wirtsgitters durch ein anderes, das in derselben Gruppe des Periodensystems steht, ersetzt wird. Sol-

che Störstellen, die man als „isoelektronisch“ bezeichnet, halten Ladungsträger infolge geänderter Abschirmung des Atomkerns fest, während die Bindung von Ladungsträgern an Donatoren und Akzeptoren durch die Coulomb-Kräfte zustande kommt. Beispielweise bilden Stickstoffatome auf Phosphorplätzen in Galliumphosphid (GaP) isoelektronische Störstellen mit Akzeptorcharakter. Bekannterweise können sich an isoelektronischen Störstellen auch Exzitonen binden. D.h. auch solche Systeme sind als aktive Medien für das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäßen Emittierelemente geeignet. Durch zweckmäßige Wahl der Dotierungselemente kann damit auch das indirekte Halbleitermaterial Galliumphosphid (GaP) als aktives Material für die erfindungsgemäßen Emittierelemente verwendet werden.

In einem weiteren vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel für einen „exzitonischen THz Laser“ ist als aktives Material für die Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Exzitonen-Zustände die Verwendung von nanostrukturierten Materialien, bevorzugt von Halbleitern und ganz besonders bevorzugt in Form von quasi-zweidimensionalen Quantenfilmen ausgebildet vorgesehen. Damit lassen sich schärfer ausgeprägte Exzitonenresonanzen und damit höhere Besetzungsinversionen erzielen, als mit Volumenhalbleitern.

In einem weiteren vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel für einen „exzitonischen THz Laser“ ist als aktives Material für die Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Exzitonen-Zustände die Verwendung von solchen Materialien vorgesehen, welche unter dem Einfluss von Temperaturschwankungen oder/und Druckschwankungen eine Variation der Abstände der Exzitonen-Zustände aufweisen. Solche Materialien sind z.B. alle bekannten Materialien mit Exzitonenresonanzen. Damit lassen sich dann in der Wellenlänge einstellbare „exzitonische THz Laser“ herstellen.

In einem weiteren vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel für einen „exzitonischen THz Laser“ ist zur Verschiebung der Exzitonenenergie, d.h. der Exzitonenresonanz eine Kühlung vorgesehen, so dass auch das 2-s-Zustandsniveau

abgesenkt wird, sich jedoch die Energiedifferenzen zwischen den Exzitonenzuständen nicht verändern.

Weiterhin hat die Kühlung den Effekt Rauscheffekte, z.B. durch ungewollte Gitterschwingungen erzeugt, zu unterdrücken.

5

In einem weiteren vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel für einen „exzitonischen THz Laser“ ist zur Erhöhung der Abgabe elektromagnetischer Energie eine Steuerung oder/und Regelung vorgesehen, welche den Laser über eine gewisse Dauer unter der „Lasing“-Schwelle“ hält um dann diese zu Überschreiten und –zumindest für eine kurze Dauer– eine sehr hohe stimulierte Emission zu erreichen.

10

In einem weiteren vorteilhaften –nicht dargestellten– Ausführungsbeispiel ist vorgesehen, das erfindungsgemäße Verfahren in einer Oszillator-Konfiguration, etwa zur Etablierung eines Zeitmesssystems anzuwenden, wie dem Fachmann aus anderen optischen oder elektromagnetischen Systemen bekannt, mindestens jedoch aus der US 2,879,439 bekannt.

15

Es ist dem Fachmann unmittelbar ersichtlich, dass sich aus den vorgenannten Ausführungsbeispielen zu erfindungsgemäßen „exzitonischen THz Lasern“ durch einfaches Anwenden fachmännischen Wissens „exzitonische THz Verstärker“ und damit allgemein „exzitonische Emitterelemente“ realisieren lassen (siehe Figur 7), wobei –wie dem Fachmann bekannt– nur darauf zu achten ist, dass zwar eine exzitonische Inversion, wie oben beschrieben, erzeugt werden muss, jedoch ohne dass man das Material in eine Kavität einbringt.

20

25

[Bezugszeichenliste]

- 1 Aktives Medium
- 2 Pumpmittel zur Erzeugung von Exzitonen
- 3 Spiegel
- 4 Elemente der Kavität (des Resonators)

[Literaturverzeichnis]

- [3] M. Beard et al., Phys. Rev. B 62, 15764 (2000)
- 5 [4] R. Huber et al., Nature **414**, 286 (2001)
- [5] R.A. Kaundl et al., Nature **423**, 734 (2003)
- [6] J. Urata et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 516 (1998) ; M. Abo-Bakr et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 254801 (2002)
- [7] J. Faist et al., Science **264**, 553 (1994) ; B.S. Williams et al., Appl. Phys. Lett. **83**, 5142 (2003)
- 10 [8] T. Kleine-Ostmann et al., Electronics Lett. **37**, 1461 (2001).
- [9] M. Hofman et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 18, 3585 (2004)
- [11] J. Faist et al., Quantum Cascade Laser, Science, Vol. 264, S553-556, 1994.
- [12] „Laser Research“, Band 26, Nr. 7, Seiten 515-521, Juli 1998.

Ansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer Besetzung in mindestens einem Exzitonen-
5 p-Zustand (d.h. Energiezustand, gebundener Elektron-Loch-Paare) gekennzeichnet durch die folgenden prinzipiellen Verfahrensschritte:
 - a) Bereitstellen eines oder mehrerer Materialien, oder eines Materialgemisches, oder eines Materials oder Materialsystems geeigneter Morphologie oder Strukturierung, welches exzitonische Zustände ausbilden kann oder können,
 - 10 b) Aussetzung dieses Materials oder dieser Materialien oder des Gemisches einer optischen Anregung mit einem energetischen Wert, welcher im Bereich eines Wertes liegt, welcher der Energie der 2s-Exzitonen-Resonanz oder einer höheren s-typischen Zustands-Resonanz entspricht, bis hin zu einem Wert, welcher der Summe der Beträge der 2s- oder höheren Exzitonen-Resonanz und dem 2-fachen
15 der Exzitonenbindungsenergie (gleich der 1s-Exzitonenbindungsenergie) des jeweiligen Materials im jeweils vorliegenden Zustand entspricht.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet ist, dass als Anregungsenergie in Schritt b) ein Wert gewählt wird, welcher dem Betrag nach einem
20 Wert der 2s- oder der gewählten höheren s-Exzitonen-Resonanz bis hin zum 1.5-fachen, bevorzugt bis zum 1-fachen, besonders bevorzugt bis zum 0.5-fachen und ganz besonders bevorzugt bis zum 0.25-fachen der Exzitonenbindungsenergie entspricht.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet ist, dass die Anregung parallel mit einem Energiewert entsprechend der 2s- und mit mindestens einem weiteren Energiewert, welcher einer höheren s-Exzitonen-Resonanz entspricht erfolgt.
- 30 4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet ist, dass die Anregung gepulst oder kontinuierlich, oder im Falle des Verfahrens gemäß Anspruch 3 für je mindestens eine Exzitonen-Resonanz gepulst und kontinuierlich erfolgt.

5. Verfahren zur Herstellung einer Besetzungsinversion im Vergleich zum Gleichgewichtszustand zwischen zwei energetisch beabstandeten Exzitonen-Zuständen dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren gemäß den Verfahren der Ansprüche 1 bis 4 durchgeführt wird.

5

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet ist, dass die Anregungsintensität im Hinblick auf die Wandlung von s- in p-Exzitonen durch Variation der Anregungsintensität (d.h. Photonen pro Zeit-, oder Volumen- oder Flächeneinheit des verwendeten Materials) optimiert durchgeführt wird.

10

7. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet ist, dass Verfahren zur Herbeiführung der Änderung der Abstände der Exzitonen-Zustände oder der Exzitonen-Bindungsenergie unter gleichzeitiger temporärer oder permanenter oder permanent wiederholter Ausübung von Druck- oder Temperatur-Änderungen oder -Schwankungen auf das verwendete Material, durchgeführt wird.

15

8. Verfahren nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet ist, dass das Ausmaß der erzielten Besetzung oder/und Besetzungsinversion während der Durchführung des Verfahrens durch Einstrahlung von elektromagnetischer Strahlung entsprechend dem Energieabstand der zu betrachtenden Exzitonenzustände überwacht wird, wobei das Ausmaß anhand der Ermittlung der absorbierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung kontrolliert wird.

20

9. Verfahren zur Herstellung einer im Wesentlichen gleichzeitigen Besetzung in einem 2s oder höherem s-Zustand und dem jeweils zugehörigen 2p- oder höherem p-Zustand dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren gemäß den Verfahren der Ansprüche 1 bis 8 durchgeführt wird.

25

10. Verfahren zur Herstellung einer Besetzungsinversion im Vergleich zum Gleichgewichtszustand zwischen zwei energetisch beabstandeten Exzitonen-Zuständen oder zur Erhöhung der Besetzung eines 2p oder höheren p-Exzitonen-Zustands oder zur Herstellung einer im Wesentlichen gleichzeitigen Besetzung eine 2s und 2p oder höheren s- und zugeordneten p-Zustands dadurch gekenn-

30

zeichnet, dass das Verfahren gemäß den Verfahren der Ansprüche 1 bis 9 durchgeführt wird, wobei im Schritt a) eine oder mehrere Materialien, oder ein Materialgemisch, oder ein Material oder Materialsystem geeigneter Morphologie oder Strukturierung bereitgestellt wird, welches bereits eine Besetzung mindestens eines, zweier oder mehrerer exzitonischer Zustände aufweist.

11. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, aufweisend ein oder mehrere Materialien, oder ein Materialgemisch, oder ein Material oder Materialsystem geeigneter Morphologie oder Strukturierung, in dem exzitonische Zustände ausgebildet sind oder in dem exzitonische Zustände ausbildbar sind oder in dem bereits exzitonische Zustände besetzt sind (im Folgenden Aktives Material genannt), sowie aufweisend Mittel zur gepulsten oder permanenten Abgabe elektromagnetischer Strahlung (im Folgenden Pumpmittel genannt) auf das vorgenannte aktive Material, dadurch gekennzeichnet, dass die Pumpmittel geeignet zur Abgabe elektromagnetischer Strahlung im Bereich der 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz bis zum 2fachen, bevorzugt bis zum 1.5fachen, ganz besonders bevorzugt bis zum 1.25fachen des Wertes der Exzitonenbindungsenergie oberhalb der 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz, ausgeführt sind.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Pumpmittel geeignet zur gleichzeitigen Abgabe von elektromagnetischer Strahlung bei 2 oder mehr verschiedenen Wellenlängen auf das aktive Material, entsprechend 2 oder mehr Werten im Bereich der 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz bis zum 2fachen, bevorzugt bis zum 1.5fachen, ganz besonders bevorzugt bis zum 1.25fachen des Wertes der Exzitonenbindungsenergie oberhalb der 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz ausgeführt sind.

13. Exzitonischer THz-Verstärker, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker geeignet zur Durchführung der Verfahren gemäß den Ansprüchen 5 bis 10 ausgeführt ist, wobei der Verstärker ferner aufweist, ein oder mehrere Materialien, oder ein Materialgemisch, oder ein Material oder Materialsystem geeigneter Morphologie oder Strukturierung, in dem exzitonische Zustände ausgebildet sind oder in dem exzitonische Zustände ausbildbar sind oder in dem bereits exzitonische

Zustände besetzt sind (im Folgenden Aktives Material genannt), sowie aufweisend Mittel zur gepulsten oder permanenten Abgabe elektromagnetischer Strahlung (im Folgenden Pumpmittel genannt) auf das vorgenannte aktive Material und die Pumpmittel geeignet zur Abgabe elektromagnetischer Strahlung im Bereich der

5 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz bis zum 2fachen, bevorzugt bis zum 1.5fachen, ganz besonders bevorzugt bis zum 1.25fachen des Wertes der Exzitonenbindungsenergie oberhalb der 2s- oder höheren s-Exzitonen-Resonanz, ausgeführt sind, wobei das aktive Material oder eine vorgesehene Umfassung des aktiven Materials geeignet zur Einstrahlung und Ausstrahlung der durch spontane

10 und stimulierte Emission zu verstärkenden elektromagnetischen Strahlung ausgeführt ist.

14. Exzitonischer THz-Laser, dadurch gekennzeichnet, dass der Laser einen Verstärker gemäß Anspruch 13 umfasst und ferner eine Resonatoranordnung,

15 z.B. in Form einer Kavität aufweist, wobei der Resonator und die dem Resonator zugeordneten Reflektoren (z.B. aus Aluminium oder Gold bestehend) zur Aufrechterhaltung eines aus Energiedifferenzen der Exzitonen-Zustände durch stimulierte und spontane Emission entstehenden Laserfeldes, geeignet ausgeführt ist.

20 15. Exzitonischer THz-Laser nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Laser zur Erhöhung der Abgabe elektromagnetischer Energie eine Steuerung oder/und Regelung aufweist, welche den Laser über eine gewisse Dauer unter der „Lasing“-Schwelle halten, um dann diese zu überschreiten und – für eine kurze Dauer – eine sehr hohe stimulierte Emission zu erreichen.

25 16. Emittierelement nach Anspruch 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Emittierelement Mittel zur periodischen oder/und permanenten Abgabe von Druck- oder/und Temperaturschwankungen auf das aktive Material aufweist oder zugeordnet sind, um eine Veränderung der emittierten elektromagnetischen

30 Strahlung zu ermöglichen.

17. Verwendung der Verfahren nach Anspruch 1 bis 10 und der Vorrichtungen nach 11 bis 15 im Bereich der medizinischen Bildgebung, Diagnose und Therapie,

der DNA-Analyse, der Qualitätssicherung, der Sicherheitstechnik, wie z.B. zur Durchleuchtung von Gepäckstücken, der Spektroskopie und in Kommunikationsmitteln.

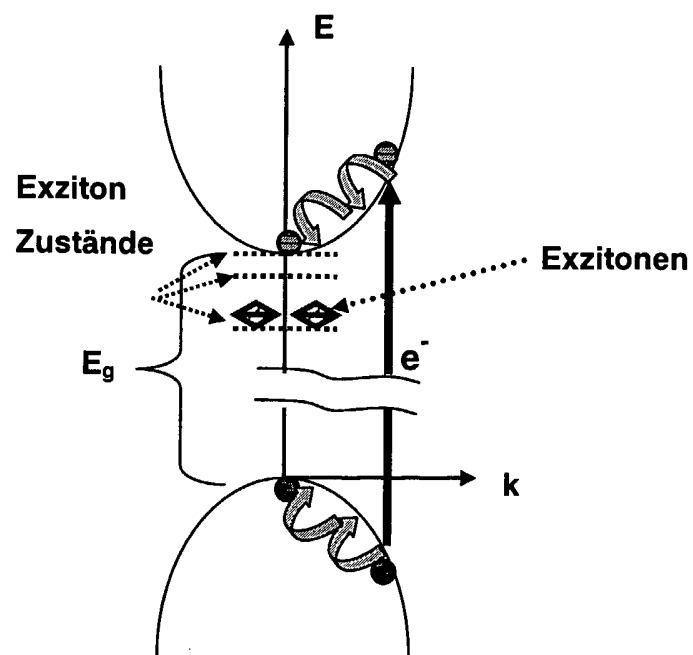


Fig. 1

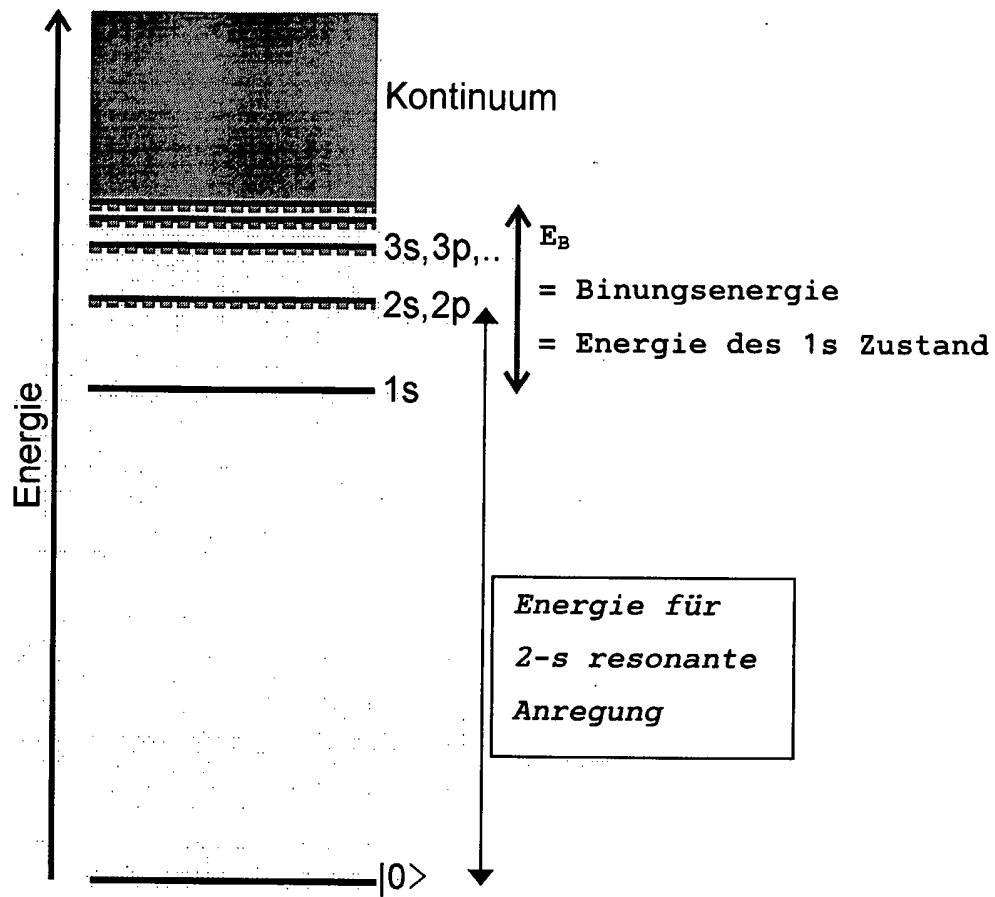


Fig. 2

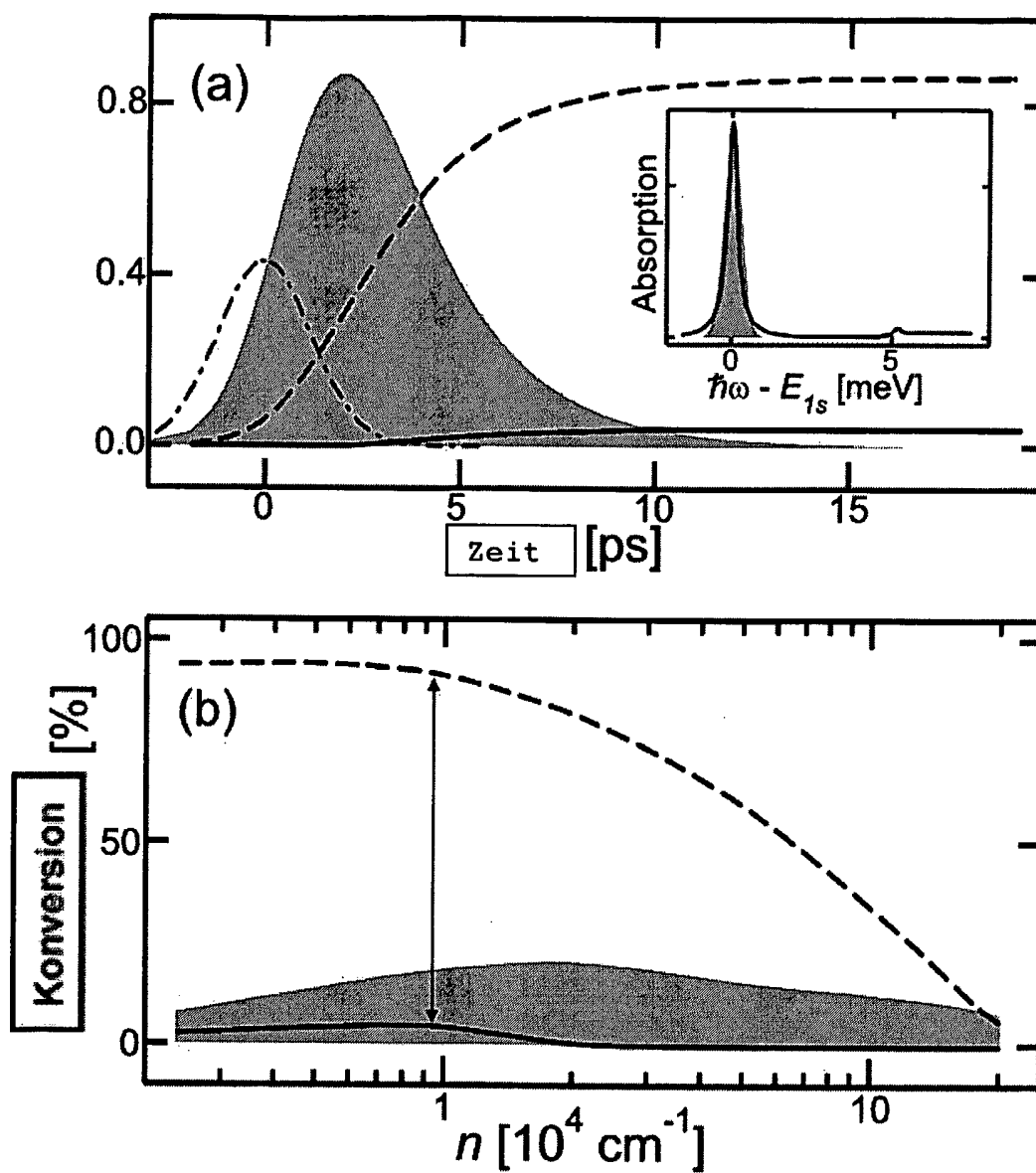


Fig. 3 a, b

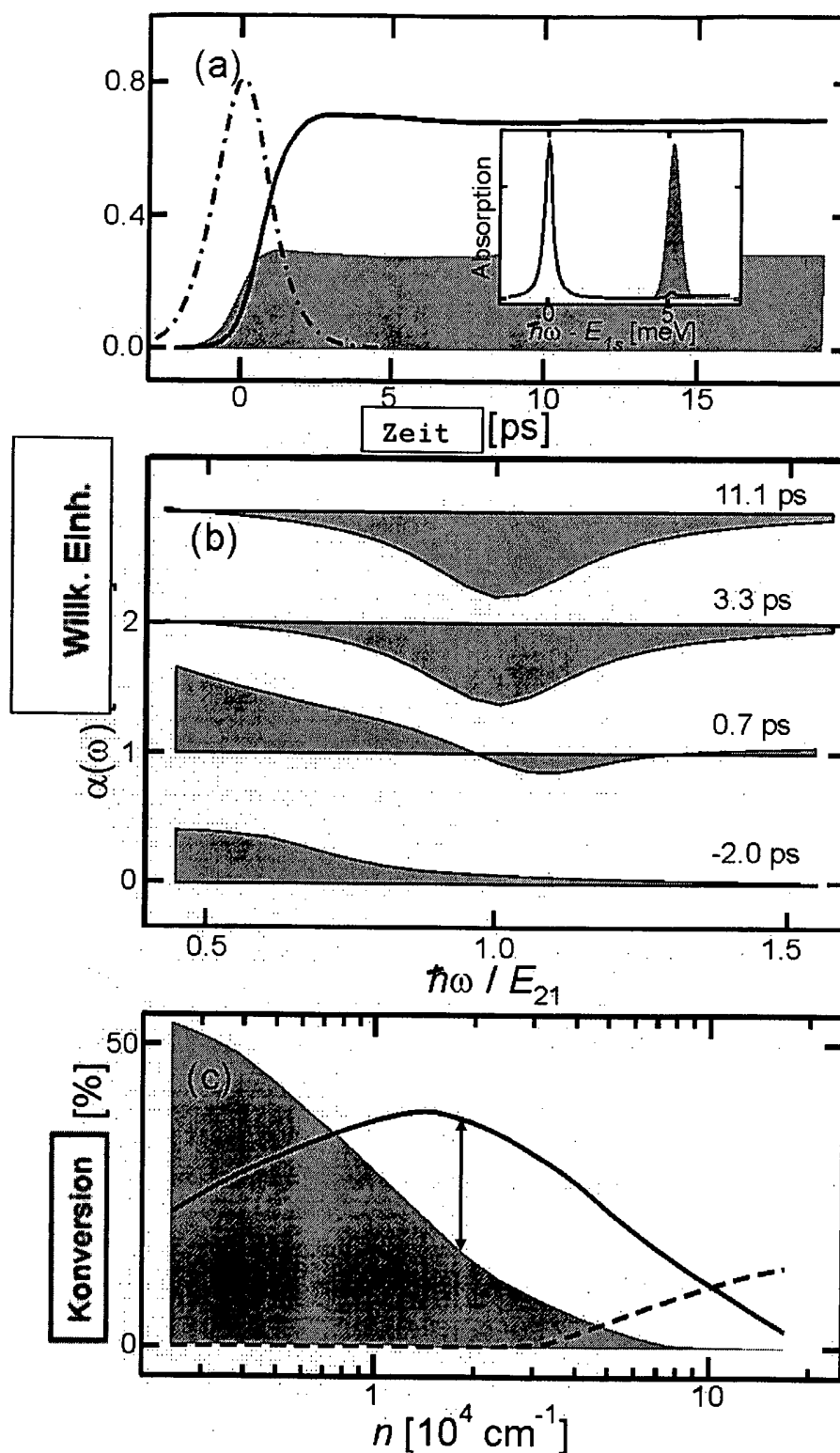


Fig. 4

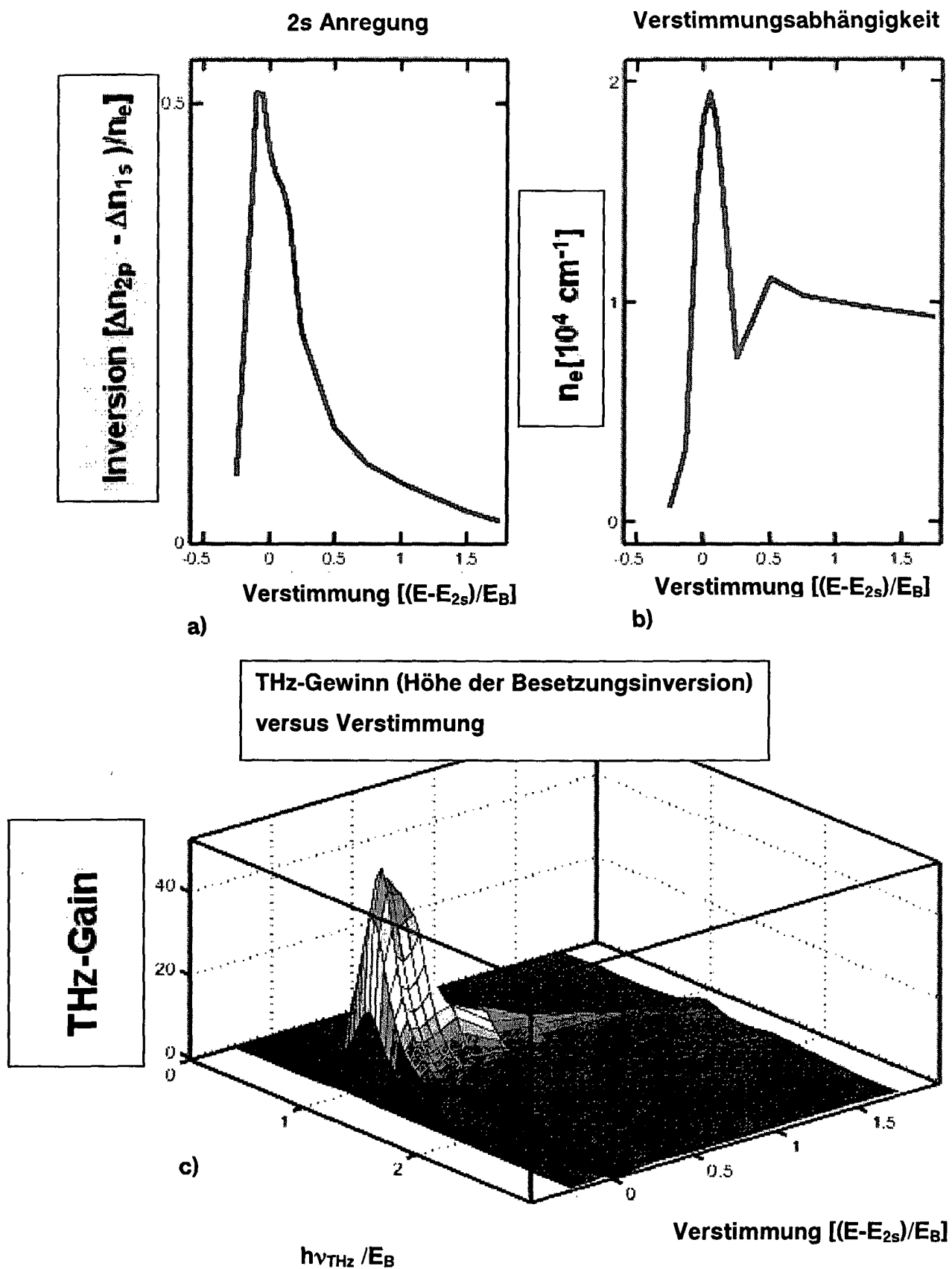


Fig.5 a, b, c

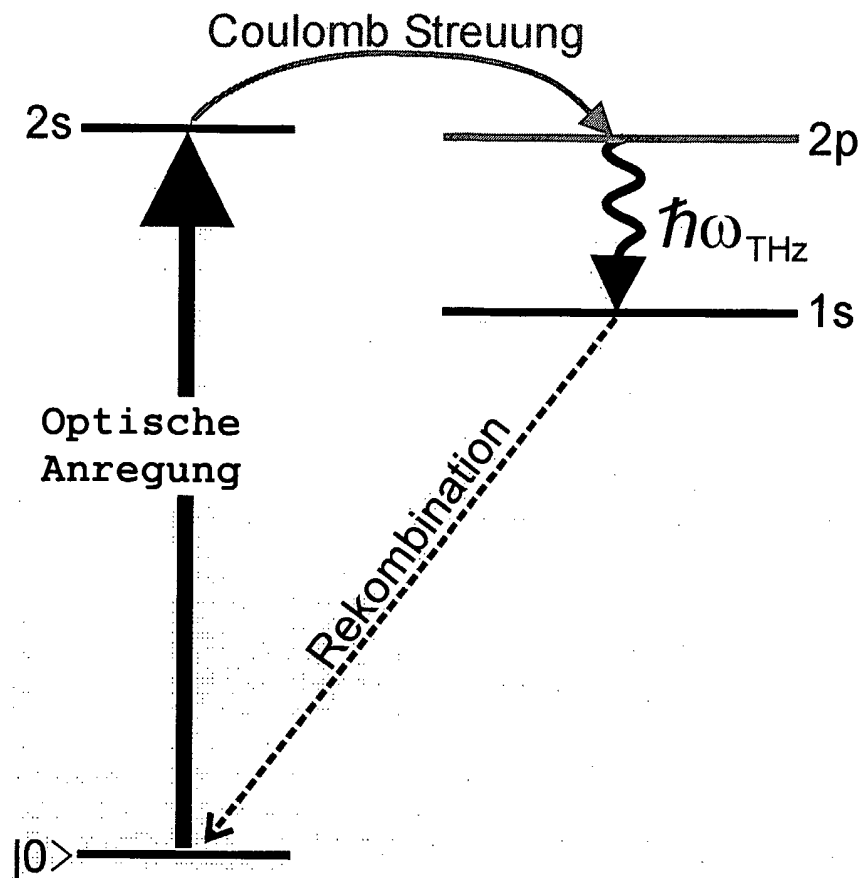


Fig. 6

Verstärker Konfiguration

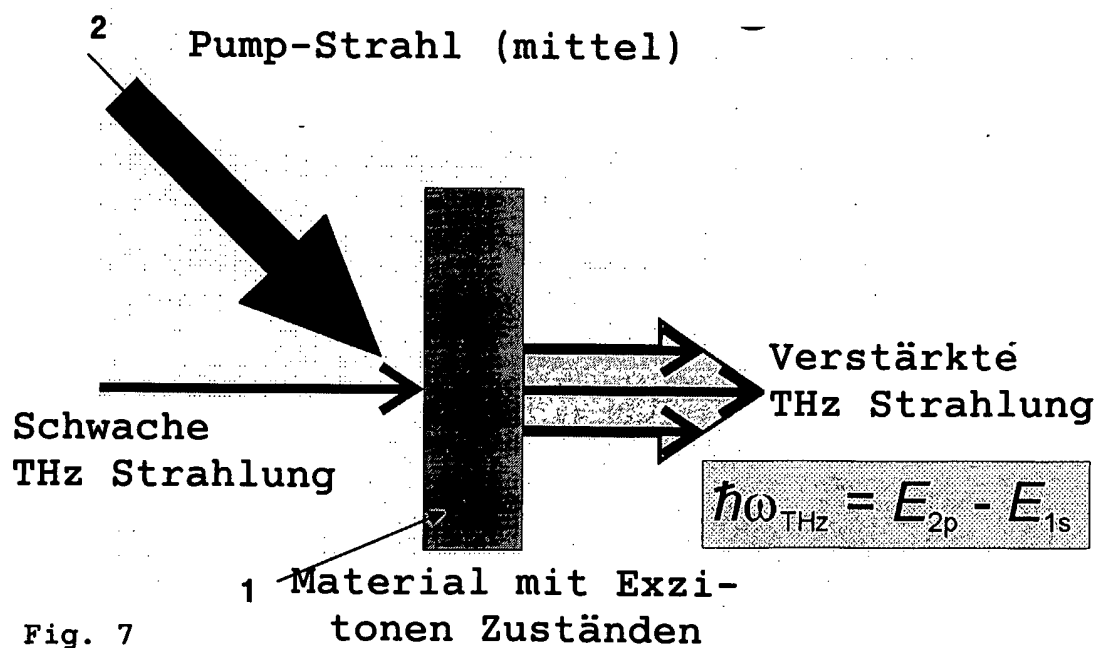


Fig. 7

Laser Konfiguration

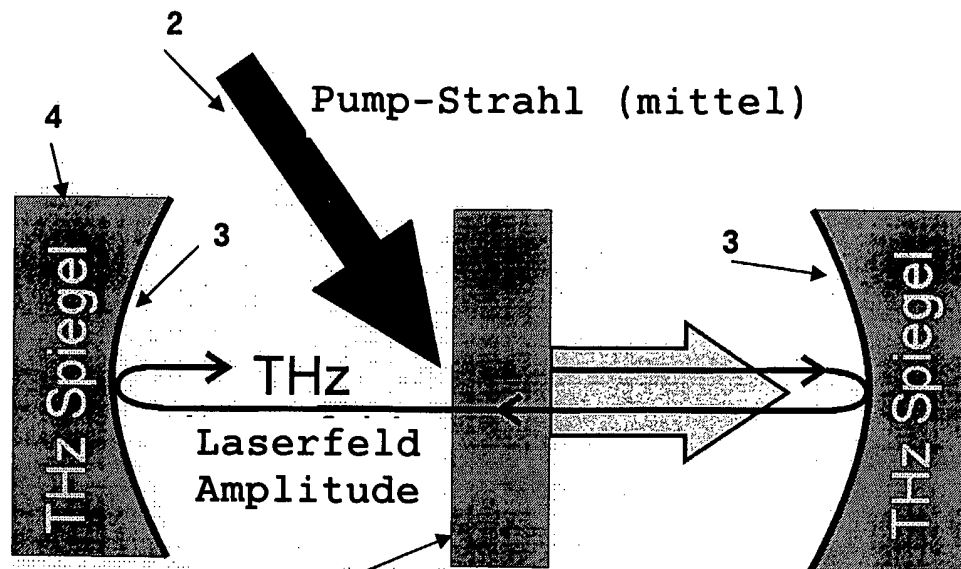


Fig. 8 (Laser)

1 Material mit Exzitonen Zuständen