

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen sättigbaren Halbleiterabsorber, der zusammen mit dem Spiegel eines Laserresonators zu einer Einheit kombiniert ist, auf der Basis eines III/V-Halbleitermaterials, insbesondere Gallium-Arsenid oder Indium-Phosphid, mit einem oder mehreren Quantengraben und beidseitig anschließenden Barrieren, und der beispielsweise in Festkörperlasern ultrakurze Laserimpulse zu erzeugen vermag (semiconductor saturable absorber mirror – SESAM). Die Erfindung betrifft weiter einen optisch gepumpten Halbleiterlaser zur Erzeugung kurzer Pulse.

[0002] Halbleiterstrukturen mit sättigbaren optischen Verlusten und kurzen Rekombinationszeiten (einige 10 ps) sind Schlüsselbauelemente zur Erzeugung kurzer Laserpulse. Solche Bauelemente bestehen aus einem Spiegel für die interessierende Wellenlänge (üblicherweise ein Bragg-Spiegel aus alternierenden $\lambda/4$ – Schichten von Halbleitermaterialien mit unterschiedlichem Brechungsindex) und einem Medium mit sättigbarer optischer Absorption. ebenfalls bei der interessierenden Wellenlänge sowie Rekombinationszeiten, die anwendungsabhängig im Bereich von unterhalb von 1 ps bis zu einigen 10 ps liegen.

[0003] Es sind verschiedene Ansätze zur Realisierung der Absorberschicht bekannt.

a) Ionenimplantation in Volumenmaterial

Die radiativen Lebensdauern in Halbleitermaterial mit guter kristallographischer Perfektion liegen normalerweise im Bereich mehrerer 100 ps. Durch Beschuss mit hochenergetischen Ionen werden Störstellen im Halbleitermaterial erzeugt, die die radiative Lebensdauer stark herabsetzen. Eine solche Ausführung ist z.B. in J. Mangeney et al., Electronics Letters 34 (1998) 818 beschrieben.

b) Ionenimplantation in Quantengraben

Quantengraben erlauben eine größere Flexibilität bei der Auswahl der Wellenlänge, als dies bei Volumenmaterial der Fall ist. Der Mechanismus der Verkürzung der radiativen Lebensdauer durch den Beschuss mit Ionen ist identisch mit dem beim Volumenmaterial. Eine solche Ausführung ist z.B. in M. J. Lederer et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) 2455 beschrieben.

c) Halbleitermaterial mit Stöchiometrieabweichungen

Das Wachstum erfolgt sehr weit weg vom thermischen Gleichgewicht (d.h. bei sehr niedrigen Temperaturen) in der Molekularstrahlepitaxie und kann zu einer Abweichung von der idealen Stöchiometrie durch Einbau von überschüssigem Arsen auf einem Galliumplatz oder als Zwischengitteratom führen. Dieser Ansatz wurde für Gallium-Arsenid an vielen Stellen erfolgreich verfolgt (z.B. L.R. Brovelli et al., J. Opt. Soc. Am. B 12 (1995)

311), wobei teilweise auch noch eine gezielte Dotierung eingebracht wurde, siehe T. Okuno et al., Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 764. Auch Absorber bei längeren Wellenlängen auf der Basis von AlInAs/GaInAs wurden mit diesem Ansatz realisiert, siehe Y. Chen et al., Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 439.

d) Halbleitermaterial mit nanoskopischen Einschlüssen

Nanoskopische Einschlüsse in Halbleitermaterial können als Fangstellen für Ladungsträger dienen und damit ebenfalls die radiative Lebensdauer stark herabsetzen. Solche nanoskopischen Einschlüsse können aus den Gitterkonstituenten des Halbleitermaterials bestehen (z.B. Einschlüsse von Arsen) oder aus Fremdmaterialien, die mit dem Wirtsgitter keine Mischphase bilden, wie z.B. GaMnAs oder ErAs, so in M. Griebel et al., Nature Materials 2 (2003) 122.

e) Dotierung mit Elementen, die tiefe Störstellen bilden

Die Einbringung von Dotierstoffen, die tiefe Störstellen bilden, kann ebenfalls die radiative Lebensdauer stark reduzieren. So bildet z.B. Eisen (Fe) eine tiefe Störstelle in Indiumphosphid (InP) und Galliumindiumarsenid (GaInAs) und wird in der InP-Technologie routinemäßig zur Herstellung semiisolierender Schichten eingesetzt. Durch Dotierung eines GaInAs/InP-Quantengraben und/oder der angrenzenden Barrieren mit Eisen konnte die Lebensdauer von 300 ps in undotierten Quantengraben auf unter 1 ps bei dotierten Barrieren und dotiertem Quantengraben abgesenkt werden, wie von M. Guezo et al., Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 1670 berichtet wird.

[0004] Die bekannten Ansätze sind alle mit gewissen Begrenzungen verbunden.

[0005] Ansatz a) erlaubt nur Wellenlängen, für die dicke Schichten mit entsprechender Bandlücke gewachsen werden können. Außerdem müssen die Absorberstrukturen nahe der Oberfläche der Bauelemente liegen. Weiterhin erlaubt der Prozess der Implantation keine scharfe Grenze des geschädigten Gebiets in die Tiefe. Damit ist die Integration aktiver Schichten in einem Wachstumsschritt nicht möglich.

[0006] Ansatz b) erlaubt zwar eine größere Flexibilität hinsichtlich der erzielbaren Wellenlängen, ansonsten gelten aber die gleichen Einschränkungen wie bei Ansatz a).

[0007] Ansatz c) ist nur mit dem Molekularstrahl-Epitaxieverfahren (molecular-beam epitaxy – MBE) realisierbar. Die extremen Wachstumsbedingungen, die zur Herstellung des nichtstöchiometrischen Materials benötigt werden, und die Tatsache, dass dieses Material seine Eigenschaften bei Temperaturbehandlung ändert, lassen ein sequentielles

Wachstum der Absorberstruktur und anderer, perfekter Schichten z.B. für Lichtemitter als kaum möglich erscheinen.

[0008] Die Herstellung von Schichtstrukturen mit Einschlüssen wie z.B. ErAs nach Ansatz d) wurde bisher nur in für diese Zwecke reservierten Forschungsanlagen demonstriert. Auch hier erscheint die Integration solcher Absorberstrukturen mit anderen Schichten hoher Perfektion und hoher Reinheit nur schwer vorstellbar und in für die Herstellung von Bauelementen wie Laserdioden benutzten Anlagen unmöglich.

[0009] Der Ansatz e) ist nach derzeitigem Kenntnisstand noch am ehesten geeignet, mit aktiven Bauelementen wie z.B. Halbleiterlasern innerhalb einer Schichtenfolge integriert zu werden. Für Strukturen auf der Basis von Indium-Phosphid ist die Dotierung mit Eisen (Fe) zur Herstellung halbisolierender Schichten Stand der Technik. Dieses Verfahren könnte auch für sättigbare Absorber eingesetzt werden, wobei allerdings die Diffusion von Fe zu Problemen führen könnte. Für Strukturen auf der Basis von Gallium-Arsenid ist die Dotierung mit tiefen Störstellen allerdings bisher kein etabliertes Verfahren.

[0010] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen sättigbaren Absorber auf Halbleiterbasis anzugeben, der in seiner Wellenlänge an die jeweilige Anforderung anpassbar ist, bei dem die radiative Lebensdauer schon beim Herstellungsprozess der Schichtstrukturen gezielt eingestellt werden kann und bei dem der Wachstumsprozess und die eingesetzten Materialien mit dem Wachstumsprozess für perfekte, ungestörte Schichtstrukturen kompatibel ist.

[0011] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe gelöst durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 6. Zweckmäßige Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0012] Danach sind der oder die Quantengraben und/oder die Barriere oder die Barrieren mit flachen Donatoren und/oder flachen Akzeptoren dotiert. „Flach“ bedeutet dabei, dass der energetische Abstand der Zustände zur Leitungs- bzw. Valenzbandkante geringer als der zur Mitte der Bandlücke ist. Für Galliumarsenid sind flache Akzeptoren z.B. Kohlenstoff (C), Zink (Zn), Magnesium (Mg) und flache Donatoren z.B. Silizium (Si), Schwefel (S) Selen (Se) oder Tellur (Te).

[0013] Durch eine sehr hohe Dotierung (oberhalb $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) mit flachen Donatoren und/oder Akzeptoren in einem auf die gewünschte Wellenlänge angepassten Quantengraben und/oder den direkt daran angrenzenden Schichten wird die radiative Lebensdauer in den Schichtstrukturen mit sättigbarer Ab-

sorption eingestellt. Dadurch wird die Augerrekombination stark erhöht und die radiative Lebensdauer entsprechend reduziert. Die dabei eingesetzten Dotierstoffe und Wachstumsprozesse sind kompatibel mit den auch zur Herstellung von Bauelementen wie Halbleiterlasern eingesetzten Stoffen und Prozessen.

[0014] Bei Strukturen auf der Basis von Gallium-Arsenid erfolgt die Dotierung bevorzugt mit flachen Akzeptoren wie Zink, Beryllium, Magnesium oder Kohlenstoff, da sich damit eine sehr hohe Dotierung (höher als mit flachen Donatoren) erreichen lässt. Unter den Akzeptoren ist insbesondere Kohlenstoff von Interesse, da dieser Dotierstoff nur sehr wenig diffundiert und damit keine Beeinflussung von benachbarten Schichten mit anderen Funktionen stattfindet. Der Einsatz von flachen Donatoren ist ebenfalls geeignet, die gewünschte Verkürzung der radiativen Lebensdauer zu erreichen.

[0015] Bei Strukturen auf der Basis von Indiumphosphid lassen sich auch mit flachen Donatoren wie Silizium, Schwefel oder Selen (Si, S, Se) hohe Dotierkonzentrationen erreichen, so dass für solche Strukturen sowohl die Dotierung mit flachen Donatoren als auch mit flachen Akzeptoren aussichtsreich erscheint.

[0016] Für beide Materialklassen ist auch die gleichzeitige Dotierung mit Donatoren und Akzeptoren denkbar.

[0017] In bevorzugter Weise kann für die Quantengraben $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ($0 < x < 1$) oder $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_x\text{As}$ ($0 < x < 0,1$, $0 < y < 0,4$) und Barrieren Galliumarsenid, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 1$), Gallium-Indium-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Indium-phosphid und für die Akzeptoren ein Material aus der Gruppe Zink, Beryllium, Magnesium oder Kohlenstoff verwendet werden.

[0018] In ebenso bevorzugter Weise kann auch für die Quantengraben und Barrieren Arsenid-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Indium-Arsenid auf einem Indiumphosphid-Substrat und für die Donatoren ein Material aus der Gruppe Silizium, Zinn, Schwefel, Selen oder Tellur verwendet werden.

[0019] Bisher werden SESAMs als separates Bauelement hergestellt, finden. z.B. auf einen Reflektorspiegel aus alternierenden Halbleiterschichten mit unterschiedlichen Brechungsindices ein Schichtaufbau mit sättigbar absorbierender Wirkung und optional zusätzlich noch eine abschließende Antireflexbeschichtung aufgebracht wird. Es hat sich nun gezeigt, dass, insbesondere unter Verwendung des oben erklärten sättigbaren Absorbers, ein optisch gepumpter Laser auch als eine integrierte Baugruppe von Laser und sättigbarem Absorber hergestellt werden kann. Dazu wird oberhalb einer einen Spiegel bildenden

Halbleiterschicht oder Schichtenfolge eine Schichtstruktur mit sättigbarer Absorption und eine lichtemittierende Schichtstruktur in dieser oder umgekehrter Reihenfolge angeordnet. Das heißt, die Schichtstruktur mit sättigbarer Absorption kann oberhalb oder unterhalb der lichtemittierenden Schichtfolge liegen. Vorteilhaft können die beiden Bereiche – Schichtstruktur mit sättigbarer Absorption und lichtemittierende Schichtstruktur – in einem Wachstumsschritt aufeinander abgeschlossen sein. Es sind jedoch auch Fälle denkbar, in denen der Prozess in mehrere Wachstumsschritte aufgeteilt wird, insbesondere wenn zwischen den Wachstumsschritten weitere Prozessschritte durchgeführt werden sollen. Prozessschritte können z.B. Ionenimplantation oder die Aufbringung von Masken zur selektiven Epitaxie im zweiten Epitaxieschritt sein.

[0020] Die Erfindung soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Die aus den zugehörigen Zeichnungen ersichtlichen Schichtstrukturen zeigen in

[0021] Fig. 1 schematisch die allgemeine Struktur eines sättigbaren Absorbers mit einem dotierten Quantengraben und undotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel,

[0022] Fig. 2 schematisch die allgemeine Struktur eines sättigbaren Absorbers mit mehreren undotierten Quantengraben und dotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel,

[0023] Fig. 3 schematisch die allgemeine Struktur eines sättigbaren Absorbers mit einem dotierten Quantengraben und dotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel,

[0024] Fig. 4 schematisch eine spezielle Ausführung für eine Struktur eines sättigbaren Absorbers für eine Wellenlänge von 1060 nm mit einem dotierten Quantengraben aus InGaAs und dotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel und

[0025] Fig. 5 eine integrierte Ausführung eines optischen gepumpten Halbleiterscheibenlasers und eines sättigbaren Absorbers für eine Wellenlänge von 1060 nm mit einem dotierten Quantengraben und dotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel und darüber angeordneten optisch gepumpten lichtemittierenden Quantengraben.

[0026] Die Fig. 1 bis Fig. 3 zeigen die mögliche allgemeine Struktur eines sättigbaren Absorbers. Auf einem Substrat, z. B. aus GaAs, wird zunächst ein Bragg-Spiegel beispielsweise durch Aufwachsen von AlAs/GaAs-Schichten mit einer optischen Dicke von je einem Viertel der angestrebten Wellenlänge aufgebracht. Darauf wird eine Spacer-Schicht und eine Barriere, z.B. aus GaAs, AlGaAs, AlGaInP oder InP

aufgebracht, auf die ein Quantengraben, z.B. aus GaInAs, und eine weitere Barriere folgt. Die Schichtfolge aus Spacer-Schicht, Barriere, Quantengraben und weiterer Barriere kann dabei, wie Fig. 2 zeigt, mehrfach aufgebracht werden.

[0027] Nach Fig. 1 wurde nur der Quantengraben mit einem flachen Akzeptor dotiert, während nach der Variante gemäß Fig. 2 die Barrieren mit einem flachen Donator dotiert wurden. In der Variante nach Fig. 3 wurden sowohl die Barrieren als auch der Quantengraben mit flachen Donatoren bzw. flachen Akzeptoren dotiert.

[0028] Fig. 4 zeigt eine konkrete Ausführung für die Variante gemäß Fig. 3. Die Ausführung ist beispielsweise für einen Einsatz bei einem Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1060 nm gedacht. Dabei ist der Bragg-Spiegel aus 25 Schichtpaketen AlAs/GaAs (90 nm/76 nm) aufgebaut und weist im hochreflektierenden Bereich eine Mittenwellenlänge (Stoppband) von 1060 nm auf. Ein 10 nm dicker Quantengraben aus $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ($x=0.26$) mit einer Lumineszenz-Wellenlänge von 1065 nm ist oberhalb $1e19 \text{ cm}^{-3}$ p-dotiert durch den Einbau von Kohlenstoff aus einer Dotierstoffquelle CBr_4 . Er ist eingebettet in eine untere GaAs-Spacerschicht von 70 nm Dicke und je eine untere und obere GaAs-Barriere von 5 nm, die oberhalb $5e19 \text{ cm}^{-3}$ mit Kohlenstoff p-dotiert sind, und ist mit einer GaAs-Deckschicht von 60 nm versehen. Mit einem solchen Bauelement können Abklingzeiten der Lumineszenz von 30 ps und weniger erreicht werden.

[0029] Derartige Bauelemente können mit dem Verfahren der metallorganischen Gasphasenepitaxie unter Einsatz von CBr_4 als Quelle für den p-Dotand Kohlenstoff hergestellt werden. Zur Herstellung des Quantengrabens und der umgebenden Barrieren sind insbesondere niedrige Züchtungstemperaturen unterhalb von 550°C vorteilhaft.

[0030] Abb. 5 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer integrierten Struktur in Form eines Halbleiterscheibenlasers mit einer unterhalb der lichtemittierenden Schichtenfolge angebrachten Struktur mit sättigbarer Absorption für eine Emissionwellenlänge von 1060 nm, wobei die lichtemittierende Schicht durch optisches Pumpen angeregt wird. Die lichtemittierenden InGaAs-Quantengraben sind dabei so angeordnet, dass sie sich jeweils im Intensitätsmaximum der Lichtwelle befinden. Die kompressive Verspannung der Quantengraben wird durch tensil verspannte GaAsP-Barrieren kompensiert. Die Struktur des sättigbaren Absorbers mit einem dotierten Quantengraben und dotierten Barrieren auf einem Bragg-Spiegel entspricht der Variante nach Fig. 4.

Schutzansprüche

1. Sättigbarer Halbleiterabsorber, der zusammen

mit dem Spiegel eines Laserresonators zu einer Einheit kombiniert ist, auf der Basis eines III/V-Halbleitermaterials, insbesondere Gallium-Arsenid oder Indium-Phosphid, mit einem oder mehreren Quantengraben und beidseitig anschließenden Barrieren, **dadurch gekennzeichnet**, dass der oder die Quantengraben und/oder mindestens eine der Barrieren mit flachen Donatoren und/oder flachen Akzeptoren oberhalb $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dotiert sind.

2. Halbleiterabsorber nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung mehr als $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ beträgt.

3. Halbleiterabsorber nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ober- oder unterhalb der aus den Quantengraben und Barrieren gebildeten Schichtstruktur eine lichtemittierende Schichtstruktur abgeschieden ist.

4. Halbleiterabsorber nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für die Quantengraben $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ($0 < x < 1$) oder $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_x\text{As}$ ($0 < x < 0,1$, $0 < y < 0,4$) und Barrieren Galliumarsenid, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 1$), Gallium-Indium-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Indiumphosphid und für die Akzeptoren ein Material aus der Gruppe Zink, Beryllium, Magnesium oder Kohlenstoff verwendet ist.

5. Halbleiterabsorber nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für die Quantengraben und Barrieren Arsenid-Phosphid oder Aluminium-Gallium-Indium-Arsenid auf einem Indiumphosphid-Substrat und für die Donatoren ein Material aus der Gruppe Silizium, Zinn, Schwefel, Selen oder Tellur verwendet ist.

6. Optisch gepumpter Halbleiterlaser zur Erzeugung kurzer Pulse, dadurch gekennzeichnet, dass oberhalb einer einen Spiegel bildenden Halbleiterschicht oder Schichtenfolge eine Schichtstruktur mit sättigbarer Absorption und eine lichtemittierende Schichtstruktur in dieser oder umgekehrter Reihenfolge angeordnet sind.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Deckschicht (z.B. GaAs, AlGaAs, InP)	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	
QW (z.B. aus GaInAs)	dotiert
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	
Spacer-Schicht	
Bragg-Spiegel z.B. aus AlAs/GaAs-Schichten mit optischer Dicke von je einem Viertel der Wellenlänge	
Substrat (z.B. GaAs)	

Fig. 1

Deckschicht (z.B. GaAs, AlGaAs, InP)	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
QW (z.B. aus GaInAs)	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
Spacer-Schicht	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
QW (z.B. aus GaInAs)	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
Spacer-Schicht	
Bragg-Spiegel z.B. aus AlAs/GaAs-Schichten mit optischer Dicke von je einem Viertel der Wellenlänge	
Substrat (z.B. GaAs)	

Fig. 2

Deckschicht (z.B. GaAs, AlGaAs, InP)	
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
QW (z.B. aus GaInAs)	dotiert
Barriere (z.B. aus GaAs, AlGaAs, InP)	dotiert
Spacer-Schicht	
Bragg-Spiegel z.B. aus AlAs/GaAs-Schichten mit optischer Dicke von je einem Viertel der Wellenlänge	
Substrat (z.B. GaAs)	

Fig. 3

Deckschicht GaAs		60 nm	
Barriere p-GaAs		5 nm, C-dotiert $> 5e19 \text{ cm}^{-3}$	
QW p-Ga _{1-x} In _x As (x = 0.26)		10 nm, C-dotiert $> 1e19 \text{ cm}^{-3}$	
Barriere p-GaAs		5 nm, C-dotiert $> 5e19 \text{ cm}^{-3}$	
Spacer-Schicht		70 nm	
Bragg-Spiegel	25 x	GaAs	76 nm
		AlAs	90 nm
Substrat GaAs			

Fig. 4

Antireflexschicht SiN_x			130 nm
Cap GaAsP			10 nm
Licht-emittierender Bereich	12 x	Spacer GaAs	55 nm
		QW $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ($x = 0.25$)	10 nm
		Spacer GaAs	55 nm
		SC $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x=0.1$)	20 nm
Spacerschicht GaAs			65 nm
SESAM	Barriere p-GaAs		5 nm, C-dotiert $> 5e19 \text{ cm}^{-3}$
	QW $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ($x = 0.26$)		10 nm, C-dotiert $> 1e19 \text{ cm}^{-3}$
	Barriere GaAs,		5 nm, C-dotiert $> 5e19 \text{ cm}^{-3}$
	Spacer-Schicht GaAs		70 nm
Bragg-Spiegel	25 x	GaAs	76 nm
		AlAs	90 nm
Substrat (z.B. GaAs)			

Fig. 5