



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 100 09 309 B4 2004.05.19

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **100 09 309.4**  
(22) Anmeldetag: **26.02.2000**  
(43) Offenlegungstag: **30.08.2001**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **19.05.2004**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G02F 1/35**  
**H01S 5/125**

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:  
**Richter, Wolfgang, Dr., 99425 Weimar, DE**

(72) Erfinder:  
**gleich Patentinhaber**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
**US 52 37 577**  
**J. Appl. Phys., Vol.85, No.9,(1990), Seiten 6259**  
**bis 6289;**

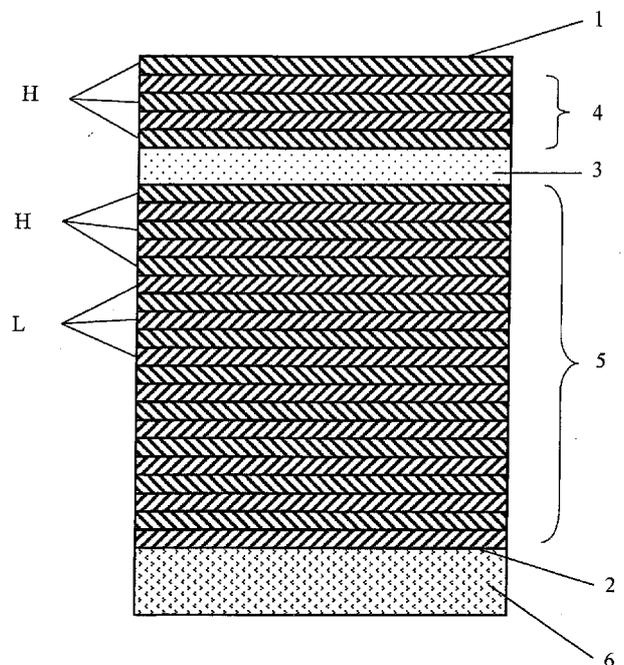
(54) Bezeichnung: **Sättigbarer Halbleiterabsorber**

(57) Hauptanspruch: Sättigbarer Halbleiterabsorber in der Form einer Fabry-Perot Anordnung mit der Frontseite (1) zum Laser mit der Wellenlänge  $\lambda$ , dadurch gekennzeichnet,

a) dass eine sättigbare Absorberschicht (3) der optischen Dicke einer halben Wellenlänge oder eines ganzzahligen Vielfachen davon zwischen zwei Bragg-Spiegeln (4, 5) mit wesentlich unterschiedlicher Anzahl von niedrigbrechenden  $\lambda$ -Viertel Schichten (L) und hochbrechenden  $\lambda$ -Viertel Schichten (H) angeordnet ist, wobei die Fabry-Perot Anordnung bei der Wellenlänge  $\lambda$  in Resonanz ist,

b) dass der Bragg-Spiegel (4) mit der vergleichsweise geringen Schichtzahl die Frontseite (1) der Fabry-Perot-Anordnung bildet und der Bragg-Spiegel (5) mit der vergleichsweise großen Schichtzahl die Rückseite (2) der Fabry-Perot Anordnung bildet

c) und dass der Bragg-Spiegel (4) auf der Frontseite (1) mit einer hochbrechenden  $\lambda$ -Viertel Schicht (H) abschließt.



## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen sättigbaren Halbleiterabsorber nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

### Stand der Technik

[0002] Kurze Laserpulse, die im modelocking Regime eines Festkörperlasers erzeugt werden, sind für die Frequenzkonversion von Licht und für hohe optische Übertragungsraten in der Technik von Bedeutung. Es hat sich gezeigt, dass Festkörperlaser durch passives modelocking mittels sättigbarer Halbleiterabsorber sehr kurze Pulse im Sub-Nanosekundenbereich erzeugen können (Journal of Applied Physics Vol. 85, 1999 Seite 6259). Zweckmäßig wird dazu der sättigbare Absorber mit dem 100% -Spiegel des Laseresonators zu einer Einheit kombiniert. Die englische Bezeichnung solcher Bauelemente ist „semiconductor saturable absorber mirror – SESAM“. Mit solchen Bauelementen kann ein sehr einfacher Gesamtaufbau eines gepulsten Festkörperlasers realisiert werden.

[0003] Ein sättigbarer Absorber besitzt eine intensitätsabhängige, nichtlineare Absorption und – kombiniert mit einem Reflektor – auch eine intensitätsabhängige, nichtlineare Reflexion. Eine geringe Strahlungsintensität des Lasers wird absorbiert, was zu einer geringen Reflexion der Gesamtanordnung führt. Eine hohe Strahlungsintensität sättigt die Absorption und führt so zu einer erhöhten Reflexion der Anordnung.

[0004] Sättigbare Halbleiterabsorber können aus einer homogenen Halbleiterschicht mit einer großen Defektdichte bestehen, die durch Ionenimplantation (Applied Physics Letters Vol. 72, 1998, Seite 759) oder durch Niedrigtemperatur-Molekularstrahlepitaxie (MBE) realisiert wird (Applied Physics Letters Vol. 68, 1996, Seite 2544). Es werden auch Halbleiterschichten verwendet, die ein oder mehrere Quantum Wells (QWs) besitzen, welche das Licht der Laserwellenlänge absorbieren und aus Material mit einer hohen Defektdichte bestehen (Applied Physics Letters Vol. 76, 2000, Seite 921). Bei der Kombination der sättigbaren Absorberschicht mit dem Reflektorspiegel des Lasers spielt die elektrische Feldstärke in der Absorberschicht eine wesentliche Rolle, weil die absorbierte Energie mit der Feldstärke anwächst. Die Feldstärkeverteilung wird wiederum durch die Interferenzeigenschaften der Kombination von Absorberschicht und dem Spiegelschichtsystem bestimmt.

[0005] Bekannt ist eine Anordnung (US 5 627 854, EP 0 732 613), bei der die sättigbare Absorberschicht in der Form eines Quantum Wells (QWs) direkt in einen Bragg-Reflektorspiegel eingebaut ist. Diese Anordnung besitzt den Nachteil, dass die elektrische Feldstärke am QW geringer ist als vor dem Bragg-Spiegel. Dies führt zu einer geringeren sättigbaren Absorption. Die Ursache für die geringere elek-

trische Feldstärke am QW liegt einerseits darin, dass generell die Feldstärke im Bragg-Spiegel geringer ist als im Außenraum vor dem Spiegel und andererseits darin, dass die Feldstärke innerhalb des Lambda-Viertel-Schichtsystems des Bragg-Spiegels gerade an den Schichtgrenzen zwischen benachbarten Lambda-Viertel-Schichten maximal ist und nicht an der Position des QWs innerhalb einer Lambda-Viertel-Schicht.

[0006] Weiterhin ist ein sättigbarer Halbleiterabsorber bekannt (US 5 701 327, EP 0 805 529), der aus einer sättigbaren Absorberschicht (mit QW) der optischen Dicke einer halben Wellenlänge oder einem ungeraden Vielfachen davon besteht, wobei die Absorberschicht auf einem Bragg-Spiegel aufgebracht ist. Diese Anordnung ist bezüglich der elektrischen Feldstärke am QW günstiger als die oben beschriebene Anordnung, jedoch ist das Feld am QW maximal ebenso groß wie im Raum vor der Anordnung.

[0007] Es ist auch ein sättigbarer Halbleiterabsorber in der Anordnung eines antiresonanten Fabry-Perots bekannt (US 5 237 577, EP 0 541 304). Bei dieser Anordnung befindet sich die sättigbare Absorberschicht mit einer optischen Dicke von Lambda-Viertel oder Lambda-Viertel plus einem Vielfachen von Lambda-Halbe als Abstandsschicht in einem Fabry-Perot Resonator mit zwei Bragg-Spiegeln. Bei dieser Anordnung ist zwar die erreichbare Reflexion sehr hoch, jedoch ist die elektrische Feldstärke in der sättigbaren Absorberschicht wesentlich geringer als im Raum vor der Anordnung. Das führt zu einem verhältnismäßig geringen Effekt der sättigbaren Absorption.

[0008] Damit ein sättigbarer Halbleiterabsorber auch weniger leistungsstarke Festkörperlaser zum Pulsieren durch modelocking bringt, muss die sättigbare Absorption möglichst groß und die nicht sättigbaren Verluste möglichst gering sein. Die nicht sättigbaren Verluste entstehen durch zu geringe Reflektivität des Reflektorspiegels und durch optische Absorption in den Schichten des Bragg-Spiegels. Die sättigbare Absorption ist proportional zur Feldstärke in der sättigbaren Absorberschicht.

### Aufgabenstellung

[0009] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine verbesserte Schichtstruktur eines sättigbaren Halbleiterabsorbers zum Erzeugen kurzer Pulse von Festkörperlasern durch modelocking anzugeben. Neben einer hohen Reflexion der Anordnung soll die sättigbare Absorption bereits bei geringen mittleren Laserleistungsdichten ausreichen, um ein stabiles Pulsieren mittels modelocking zu erreichen.

[0010] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Bei einer detaillierten Analyse der Feldverteilung in Bragg-Spiegeln und Fabry-Perot-Anordnungen kann man feststellen, dass generell ein gegenläufiges Verhalten zwischen der Reflexion der Anordnung und der Feld-

stärke in der sättigbaren Absorberschicht existiert. So ist die Feldstärke in einer Schicht eines Bragg-Spiegels immer geringer als im Außenraum vor dem Spiegel und die Feldstärke in der Abstandsschicht einer anti-resonanten Fabry-Perot-Anordnung ist ebenfalls wesentlich geringer als im Außenraum. Andererseits besitzen beide Anordnungen gute Reflexionseigenschaften bei der Designwellenlänge und demzufolge auch geringe nichtsättigbare Verluste.

[0011] Der Grundgedanke der vorliegenden Erfindung besteht nun darin, die sättigbare Absorberschicht mit der optischen Dicke von Lambda-Halbe als Abstandsschicht in ein stark unsymmetrisches, aber resonantes Fabry-Perot einzusetzen. Dadurch, dass das Fabry-Perot bei der Laserwellenlänge in Resonanz ist, ist die Feldstärke in der sättigbaren Absorberschicht gegenüber dem Außenraum erhöht, was wiederum zu einer starken sättigbaren Absorption führt. Um jedoch bei Resonanz des Fabry-Perots die für den Laserbetrieb erforderliche hohe Reflexion und die damit verbundenen geringen nicht sättigbaren Verluste zu gewährleisten, muss dieses stark unsymmetrisch sein. Das bedeutet, dass der vordere, dem Laser zugewandte Bragg-Spiegel eine wesentlich geringere Zahl von Lambda-Viertel-Schichten und damit auch eine geringere Reflexion als der hintere, dem Laser abgewandte Bragg-Spiegel besitzen muss.

[0012] Die erfindungsgemäße Anordnung ermöglicht die Realisierung sättigbarer Halbleiterabsorber mit großer sättigbarer Absorption und geringen nicht sättigbaren Verlusten. Solche sättigbaren Halbleiterabsorber können in den Resonator von Festkörperlasern anstelle des 100% Spiegels eingebaut werden, um kurze Laserpulse durch modelocking zu erzeugen.

[0013] Der erfindungsgemäße Aufbau eines sättigbaren Absorbers soll im folgenden an Hand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. In der zugehörigen Zeichnung zeigt die

[0014] **Fig. 1** den Querschnitt durch einen sättigbaren Halbleiterabsorber in der Form einer resonanten Fabry-Perot Anordnung für eine Laserwellenlänge von 1,064  $\mu\text{m}$ .

#### Ausführungsbeispiel

[0015] Der sättigbare Halbleiterabsorber besteht aus einem Schichtsystem, das auf einem Halbleitersubstrat **1** aus einem GaAs-Wafer angeordnet ist (**Fig. 1**). Das Schichtsystem bildet ein stark unsymmetrisches, resonantes Fabry-Perot, dessen Abstandsschicht von der sättigbaren Absorberschicht **3** gebildet wird. Die sättigbare Absorberschicht **3** besitzt eine optische Dicke von Lambda-Halbe der Laserwellenlänge. Sie besteht aus einer 144,7 nm dicken GaAs-Schicht mit einem in der Mitte der Schicht angeordneten QW aus  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,29$ ) der Dicke von 8,7 nm, das bei niedriger Temperatur von

300 °C in einer MBE-Anlage gewachsen wurde. Die beiden Resonatorspiegel des Fabry-Perots bestehen jeweils aus Schichtpaaren der Substanzen GaAs und AlAs, deren Brechungsindex bei der Laserwellenlänge 3,482 beziehungsweise 2,939 beträgt. Die optische Dicke dieser Schichten H, L beträgt jeweils Lambda-Viertel, also 266nm. Die geometrische Dicke der GaAs-Schichten H beträgt demzufolge jeweils 76,4 nm und die der AlAs-Schichten L beträgt 90,5 nm. Auf dem Substrat **6** befindet sich der Bragg-Spiegel **5** mit einer großen Zahl von insgesamt 29 Paaren aus AlAs- und GaAs-Lambda-Viertel Schichten. Er bildet die Rückseite **2** des sättigbaren Absorbers. Auf der dem Laser zugewandten Frontseite **1** des sättigbaren Halbleiterabsorbers ist der Bragg-Spiegel **4** mit einer geringeren Zahl von insgesamt drei Paaren von AlAs- und GaAs-Lambda-Viertel Schichten L, H angeordnet. Zusätzlich ist noch eine hochbrechende Lambda-Viertel Schicht H aus GaAs als oberste Schicht auf dem Bragg-Spiegel **4** angebracht. In **Fig. 1** sind nicht alle Schichten dieses Ausführungsbeispiels eingezeichnet.

[0016] Die Reflexion dieses sättigbaren Halbleiterabsorbers beträgt bei der Laserwellenlänge 99,5% und ist damit hinreichend groß, um die nicht-sättigbaren Verluste genügend klein zu halten. Die Feldstärke in der Mitte der sättigbaren Absorberschicht (**3**) an der Position des QWs ist um den Faktor 1,6 höher als im Raum vor der Anordnung. Im Vergleich zu einer antiresonanten Fabry-Perot Anordnung ist die Feldstärke etwa um einen Faktor 5 höher. Damit sind bei der erfindungsgemäßen Anordnung die sättigbaren Verluste der Anordnung besonders hoch und die nichtsättigbaren Verluste hinreichend klein.

#### Bezugszeichenliste

- |          |   |
|----------|---|
| <b>1</b> | Frontseite                                      |
| <b>2</b> | Rückseite                                       |
| <b>3</b> | sättigbare Absorberschicht                      |
| <b>4</b> | Bragg-Spiegel geringer Schichtzahl              |
| <b>5</b> | Bragg-Spiegel mit großer Schichtzahl            |
| <b>6</b> | Substrat  |
| <b>L</b> | optisch niedrigbrechende Lambda-Viertel Schicht |
| <b>H</b> | optisch hochbrechende Lambda-Viertel Schicht    |

#### Patentansprüche

1. Sättigbarer Halbleiterabsorber in der Form einer Fabry-Perot Anordnung mit der Frontseite (**1**) zum Laser mit der Wellenlänge Lambda, **dadurch gekennzeichnet**,
  - a) dass eine sättigbare Absorberschicht (**3**) der optischen Dicke einer halben Wellenlänge oder eines ganzzahligen Vielfachen davon zwischen zwei Bragg-Spiegeln (**4**, **5**) mit wesentlich unterschiedlicher Anzahl von niedrigbrechenden Lambda-Viertel Schichten (L) und hochbrechenden Lambda-Viertel Schichten (H) angeordnet ist, wobei die Fabry-Perot

Anordnung bei der Wellenlänge  $\lambda$  in Resonanz ist,

b) dass der Bragg-Spiegel (4) mit der vergleichsweise geringen Schichtzahl die Frontseite (1) der Fabry-Perot-Anordnung bildet und der Bragg-Spiegel (5) mit der vergleichsweise großen Schichtzahl die Rückseite (2) der Fabry-Perot Anordnung bildet

c) und dass der Bragg-Spiegel (4) auf der Frontseite (1) mit einer hochbrechenden  $\lambda/4$ -Schicht (H) abschließt.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass in der sättigbaren Absorberschicht (3) ein oder mehrere Quantum Wells angeordnet sind, deren Absorptionswellenlänge mit der Wellenlänge  $\lambda$  übereinstimmt.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die  $\lambda/4$ -Schichten (L, H) der beiden Bragg-Spiegel (4, 5) aus Aluminiumarsenid beziehungsweise Galliumarsenid bestehen und dass die sättigbare Absorberschicht (3) aus Galliumarsenid mit einem oder mehreren Quantum Wells aus Indium-Galliumarsenid besteht.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Fig. 1

