



(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2023/276909**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2022 003 309.6**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2022/025431**
(86) PCT-Anmeldetag: **27.06.2022**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **05.01.2023**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **11.04.2024**

(51) Int Cl.: **H01S 5/12 (2021.01)**
H01S 5/343 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2021-107383 29.06.2021 JP

(71) Anmelder:
Nichia Corporation, Anan-shi, Tokushima, JP

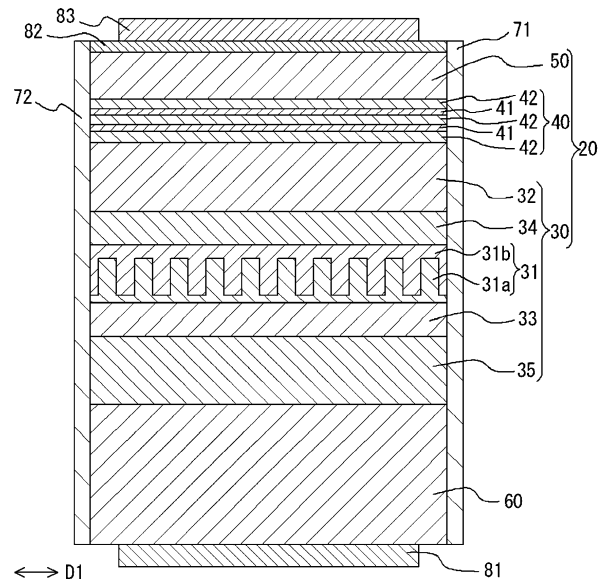
(74) Vertreter:
**Betten & Resch Patent- und Rechtsanwälte
PartGmbH, 80333 München, DE**

(72) Erfinder:
**Nakatsu, Yoshitaka, Anan-shi, Tokushima, JP;
Tsukayama, Kazutaka, Anan-shi, Tokushima, JP**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Halbleiterlaserelement**

(57) Zusammenfassung: Ein Halbleiterlaserelement mit einer periodischen Struktur vorzusehen, in der ein Schwellenstrom reduziert ist. Das Halbleiterlaserelement enthält einen Nitrid-Halbleiterschichtkörper, der einen optischen Wellenleiter enthält. Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper enthält eine erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht (31), die eine periodische Struktur mit einem Brechungsindex aufweist, der sich entlang einer Resonanzrichtung des optischen Wellenleiters periodisch ändert, eine zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht (32), eine aktive Schicht (40), die eine oder mehrere Well-Schichten und eine oder mehrere Barrierschichten enthält, und eine p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht (50) in dieser Reihenfolge. Die aktive Schicht (40) enthält eine n-seitige Well-Schicht, die von der einen oder den mehreren Well-Schichten am nächsten zur zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht (32) lokalisiert ist, und eine n-seitige Barrierschicht, die von der einen oder den mehreren Barrierschichten zwischen der n-seitigen Well-Schicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht (32) lokalisiert ist. Die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht (32) ist eine Nitrid-Halbleiterschicht, die In und Ga enthält. Eine Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht (32) ist größer als eine Dicke der n-seitigen Barrierschicht.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Halbleiterlaserelement.

Stand der Technik

[0002] Heutzutage kann ein Halbleiterlaserelement, das einen Nitrid-Halbleiter enthält, Licht in einer ultravioletten Region bis zu einer grünen Region emittieren und wird für verschiedene Anwendungen wie eine optische Platte, eine Lichtquelle für einen Projektor, eine medizinische Lichtquelle und einen Fahrzeugscheinwerfer verwendet. Bei Anwendungen wie einer Lichtquelle für die Spektroskopie und die Kommunikation mit sichtbarem Licht kann eine schmale spektrale Breite einer Wellenlänge oder eine hohe Steuerbarkeit einer Wellenlänge gewünscht sein. Es wird erwartet, dass Laserelemente mit verteilter Rückkopplung (DFB) für solche Anwendungen verwendet werden. PTL 1 offenbart zum Beispiel ein DFB-Laserelement, das ein Beugungsgitter enthält.

Zitationsliste

Patentliteratur

[0003] PTL 1: WO 2019/146321

Übersicht über die Erfindung

Technisches Problem

[0004] In einem Halbleiterlaserelement, das einen Nitrid-Halbleiter enthält, weist ein DFB-Laserelement, das mit einem Beugungsgitter versehen ist, tendenziell einen höheren Schwellenstrom auf als ein Fabry-Perot-Halbleiterlaserelement, das nicht mit einem Beugungsgitter versehen ist.

Lösung des Problems

[0005] Die vorliegende Offenbarung enthält die folgende Erfindung (1).

(1) Halbleiterlaserelement enthaltend:

einen Nitrid-Halbleiterschichtkörper, der einen optischen Wellenleiter enthält,

wobei der Nitrid-Halbleiterschichtkörper eine erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die eine periodische Struktur eines Brechungsindex aufweist, der sich entlang einer Resonanzrichtung des optischen Wellenleiters periodisch ändert,

eine zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht,

eine aktive Schicht, die eine oder mehrere Wellenschichten und eine oder mehrere Barrierschichten enthält, und

eine p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht in dieser Reihenfolge enthält,

wobei die aktive Schicht eine n-seitige Wellenschicht, die von der einen oder den mehreren Wellenschichten am nächsten zu der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht lokalisiert ist, und eine n-seitige Barrierschicht enthält, die von der einen oder den mehreren Barrierschichten zwischen der n-seitigen Wellenschicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht lokalisiert ist,

wobei die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht eine Nitrid-Halbleiterschicht ist, die In und Ga enthält, und

wobei eine Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der n-seitigen Barrierschicht.

Vorteilhafte Effekte der Erfindung

[0006] Gemäß der vorstehend beschriebenen Erfindung, kann ein Schwellenstrom in einem Halbleiterlaserelement, das eine periodische Struktur aufweist, reduziert werden.

Kurze Beschreibung von Zeichnungen

Fig. 1 ist eine schematische Draufsicht, die ein Halbleiterlaserelement einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt.

Fig. 2 ist eine Querschnittsansicht entlang der Linie II-II in **Fig. 1**.

Fig. 3 ist eine Querschnittsansicht entlang der Linie III-III in **Fig. 1**.

Fig. 4 ist ein Graph, der die Beziehung zwischen einer Dicke einer zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und einem Lichtintensitätsverhältnis Γ_{grating} eines Bereichs, der mit einem Beugungsgitter gekoppelt ist, in einem ersten Berechnungsbeispiel zeigt.

Fig. 5 ist ein Graph, der die Beziehung zwischen der Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und einer optischen Begrenzung Γ_{well} einer Wellenschicht in einem ersten Berechnungsbeispiel zeigt.

Fig. 6 ist ein Graph, der die Beziehung zwischen der Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und dem Verhältnis Γ_p eines Lichtaustritts zu einer p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht in dem ersten Berechnungsbeispiel zeigt.

Fig. 7 ist ein Graph, der ein Resultat der Berechnung eines normalisierten Kopplungskoeffizienten k_L im ersten Berechnungsbeispiel zeigt.

Fig. 8 ist ein Graph, der I-L Charakteristiken von Halbleiterlaserelementen eines ersten Beispiels und eines ersten Vergleichsbeispiels zeigt.

Fig. 9 ist ein Graph, der die Wellenlängenspektren der Halbleiterlaserelemente des ersten Beispiels und des ersten Vergleichsbeispiels zeigt.

Fig. 10 ist ein Graph, der ein Seitenmodenunterdrückungsverhältnis des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels zeigt.

Fig. 11 ist ein Graph, der I-L Charakteristiken von Halbleiterlaserelementen eines zweiten Beispiels und eines zweiten Vergleichsbeispiels zeigt.

Fig. 12 ist ein Graph, der ein Wellenlängenspektrum des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels zeigt.

Fig. 13 ist ein Graph, der ein Wellenlängenspektrum des Halbleiterlaserelements des zweiten Vergleichsbeispiels zeigt.

Fig. 14 ist ein Graph, der ein Seitenmodenunterdrückungsverhältnis des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels zeigt.

Fig. 15 ist eine Z-Kontrast Abbildung eines Teils des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels.

Beschreibung von Ausführungsformen

[0007] Eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben. In den Zeichnungen sind die gleichen Elemente mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

[0008] **Fig. 1** ist eine schematische Draufsicht, die ein Halbleiterlaserelement der vorliegenden Ausführungsform darstellt. **Fig. 2** ist eine Querschnittsansicht entlang der Linie II-II in **Fig. 1**. **Fig. 3** ist eine Querschnittsansicht entlang der Linie III-III in **Fig. 1**. Wie in den **Fig. 1** bis **3** dargestellt, enthält ein Halbleiterlaserelement 100 der vorliegenden Ausführungsform einen Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20, der einen optischen Wellenleiter 10 enthält. Das Halbleiterlaserelement 100 der vorliegenden Ausführungsform enthält ein Substrat 60, und der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 ist auf dem Substrat 60 angeordnet. Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 enthält eine n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30, eine aktive Schicht 40 und eine p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50. In dervorliegenden Ausführungsform wird eine Richtung von der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 in Richtung der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 als eine Aufwärtsrichtung beschrieben.

ben. Die Aufwärtsrichtung muss nicht notwendigerweise mit einer Aufwärtsrichtung einer lichtemittierenden Vorrichtung oder dergleichen übereinstimmen, an der das Halbleiterlaserelement 100 fixiert ist.

Substrat 60

[0009] Das Substrat 60 ist z.B. ein Halbleitersubstrat. Das Substrat 60 ist zum Beispiel ein Nitrid-Halbleitersubstrat wie ein GaN-Substrat. Als Substrat 60 kann zum Beispiel ein Nitrid-Halbleitersubstrat verwendet werden, und eine obere Oberfläche des Substrats 60 kann als +c-Ebene (d.h. als (0001)-Ebene) eingestellt werden. In der vorliegenden Ausführungsform ist eine c-Ebene nicht auf eine Ebene limitiert, die genau mit einer (0001)-Ebene übereinstimmt, sondern sie enthält auch eine Ebene mit einem Abweichungswinkel in einem Bereich von $\pm 0,03^\circ$ bis 1° . Das Halbleiterlaserelement 100 muss das Substrat 60 nicht enthalten. Als die obere Oberfläche des Substrats kann eine unpolare Ebene (M-Ebene oder A-Ebene) oder eine semipolare Ebene mit einem Abweichungswinkel in einem Bereich von $\pm 0,03^\circ$ bis 25° von der unpolaren Ebene verwendet werden.

Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20

[0010] Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 enthält eine Mehrzahl von Nitrid-Halbleiterschichten. Der Nitrid-Halbleiter, der den Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 bildet, ist zum Beispiel ein Nitrid-Halbleiter der Gruppe III. Beispiele für den Nitrid-Halbleiter der Gruppe III enthalten GaN, InGa_n, AlGa_n, InN, AlN und InAlGa_n. Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 enthält die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30, die aktive Schicht 40 und die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50. Die aktive Schicht 40 ist zwischen der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 und der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 angeordnet. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30, die aktive Schicht 40 und die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 können in direktem Kontakt miteinander sein, oder es kann eine andere Halbleiterschicht zwischen ihnen angeordnet sein. Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 enthält eine erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31, eine zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32, die aktive Schicht 40 und die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 in dieser Reihenfolge. Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 ist zum Beispiel epitaktisch auf dem Substrat 60 aufgewachsen. Eine Hauptoberfläche des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers 20 ist z.B. eine +c-Ebene (d.h. eine (0001)-Ebene).

[0011] In **Fig. 1** bis **3** ist eine Resonanzrichtung als Richtung D1 definiert und eine Richtung orthogonal zur Resonanzrichtung ist als Richtung D2 definiert. Eine Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 in der Richtung (Richtung D2) orthogonal zur Reso-

nanzrichtung beträgt zum Beispiel 1 μm oder mehr. Die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 beträgt vorzugsweise 10 μm oder mehr. Somit kann die optische Ausgabe des Halbleiterlaserelements 100 verbessert werden, und indem die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 eine periodische Struktur aufweist, kann eine longitudinale Mode einer Oszillationswellenlänge vereinheitlicht oder nahe der Einheit hergestellt werden. Wenn eine geringe Menge an spontan emittiertem Licht berücksichtigt wird, existiert ein Zustand, der als eine einzelne longitudinale Mode bezeichnet wird, nicht im strikten Sinne. In einem Fall, in dem eine Ausgabe einer bestimmten Mode ausreichend stärker ist als die Ausgabe einer anderen Mode, spricht man daher von einer einzelnen longitudinalen Mode oder einer nahezu einzelnen longitudinalen Mode. Die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 beträgt besonders bevorzugt 50 μm oder mehr und kann 80 μm oder mehr betragen. Die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 kann auf 400 μm oder weniger eingestellt werden.

[0012] Wenn der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 einen Grat 20c enthält, wie in den **Fig. 1** bis **3** dargestellt, kann eine Breite des Grats 20c als die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 angesehen werden. Wenn der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 eine andere Strombegrenzungsstruktur als den Grat 20c aufweist, kann alternativ eine Breite der Strombegrenzungsstruktur in Richtung D2 als die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 angesehen werden.

[0013] Eine Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 in der Resonanzrichtung (Richtung D1) kann zum Beispiel 100 μm oder mehr betragen. Mit zunehmender Distanz von der aktiven Schicht 40 zur periodischen Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 nimmt die Kopplungseffizienz zwischen Licht von der aktiven Schicht 40 und der periodischen Struktur ab, aber eine Abnahme der optischen Ausgabe des Halbleiterlaserelements 100 kann durch Vergrößern der Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 unterdrückt werden. Daher beträgt die Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 vorzugsweise 1000 μm oder mehr. Die Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 kann 1500 μm oder mehr betragen. Die Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 kann auf 3000 μm oder weniger eingestellt werden. Die Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 ist gleich einer Resonatorlänge.

[0014] Der Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 enthält eine lichtemittierende Endoberfläche 20a und eine lichtreflektierende Endoberfläche 20b. Die lichtemittierende Endoberfläche 20a und die lichtreflektierende Endoberfläche 20b sind Oberflächen, die nicht parallel zu einer Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 sind. Die lichtemittierende Endoberfläche 20a und die lichtreflektierende Endoberfläche 20b sind beispielsweise Oberflächen, die orthogonal zur

Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 verlaufen. Die lichtemittierende Endoberfläche 20a und die lichtreflektierende Endoberfläche 20b sind Oberflächen, die die Resonanzrichtung (Richtung D1) des optischen Wellenleiters 10 schneiden und sind beispielsweise Oberflächen, die orthogonal zur Richtung D1 stehen.

n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30

[0015] Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 enthält eine oder mehrere Nitrid-Halbleiterschichten, die jeweils eine n-Typ-Verunreinigung enthalten. Beispiele für die n-Typ Verunreinigung enthalten Si und Ge. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 kann eine undotierte Schicht enthalten, die nicht absichtlich mit Verunreinigungen dotiert ist. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 enthält die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 und die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 kann auch andere Schichten als diese Schichten enthalten. Das in den **Fig. 1** bis **3** dargestellte Halbleiterlaserelement 100 enthält eine dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33, eine vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 und eine fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 muss nicht alle diese Schichten enthalten. Die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 kann auch andere Schichten als diese Schichten enthalten.

Fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht

[0016] Die fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35 ist auf der der aktiven Schicht 40 gegenüberliegenden Seite der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 angeordnet. Die fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35 ist zwischen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 und dem Substrat 60 angeordnet. Die fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35 ist z.B. eine n-seitige Mantelschicht. Die fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35 ist zum Beispiel eine Schicht, die die größte Bandlückenenergie in der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 aufweist. Die fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35 ist zum Beispiel eine AlGaN-Schicht, die eine n-Typ-Verunreinigung enthält.

Dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33

[0017] Die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 ist zwischen der fünften n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 35 und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 angeordnet.

[0018] Die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 kann einen Brechungsindex aufweisen, der zwischen einem Brechungsindex der fünften n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 35 und einem durchschnittlichen Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-

Halbleiterschicht 31 liegt. Wenn beispielsweise in der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 das Volumenverhältnis eines ersten Halbleiterbereichs 31a und eines zweiten Halbleiterbereichs 31b 1:1 beträgt, kann der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 die Hälfte der Summe aus einem Brechungsindex des ersten Halbleiterbereichs 31a und einem Brechungsindex des zweiten Halbleiterbereichs 31b betragen. Alternativ kann gesagt werden, dass, wenn ein Brechungsindex der dritten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 33 niedriger ist als einer des Brechungsindex des ersten Halbleiterbereichs 31a und des Brechungsindex des zweiten Halbleiterbereichs 31b, der Brechungsindex der dritten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 33 niedriger ist als der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31. Der Brechungsindex von jedem Halbleiter kann aus der Zusammensetzung des Halbleiters abgeleitet werden.

[0019] Indem die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 vorgesehen wird, kann ein Lichtaustritt zu der fünften n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 35 und dem Substrat 60 reduziert werden. Wenn zum Beispiel die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 eine periodische Struktur aufweist, in der GaN und InGaN periodisch angeordnet sind, erhöht sich der Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 im Vergleich zu einem Fall, in dem die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 keine periodische Struktur aufweist und nur aus GaN hergestellt ist. Wenn der Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 auf diese Weise relativ groß ist, wird das Austreten von Licht besonders bevorzugt reduziert, indem die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 vorgesehen ist.

[0020] Die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 ist z.B. eine AlGaN-Schicht. Die dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33 kann eine n-Typ-Verunreinigung enthalten. Die Dicke der dritten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 33 kann in einem Bereich von 100 nm bis 1000 nm liegen.

Erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31

[0021] Die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 weist eine periodische Struktur auf, bei der sich der Brechungsindex entlang der Resonanzrichtung (Richtung D1) des optischen Wellenleiters 10 periodisch ändert. In dem Nitrid-Halbleiter ist die Aktivierungsrate einer n-Typ Verunreinigung (z.B. Si) tendenziell höher als die Aktivierungsrate einer p-Typ Verunreinigung (z.B. Mg). Daher kann die Konzentration der n-Typ-Verunreinigungen der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 niedriger hergestellt werden als die Konzentration der p-Typ-Verunreinigungen der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50. Die periodische Struktur wird z.B. gebildet, indem eine konkav-

konvexe Struktur in einer Halbleiterschicht gebildet wird und dann die konkav-konvexe Struktur mit einer anderen Halbleiterschicht aufgefüllt wird, aber je niedriger die Verunreinigungskonzentration ist, desto dichter wird die konkav-konvexe Struktur aufgefüllt. Folglich ist die periodische Struktur in der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 in geeigneter Weise vorgesehen. Die periodische Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 weist zum Beispiel einen Brechungsindex auf, der größer ist als der Brechungsindex der fünften n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 35. Alternativ kann die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 auch als n-seitige Mantelschicht dienen.

[0022] Wenn die periodische Struktur nahe an der aktiven Schicht 40 angeordnet ist, wird die elektrische Feldstärke der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 relativ hoch, was einen Anstieg des Absorptionsverlustes und/oder eine Abnahme der optischen Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verursachen kann. Dadurch kann der Schwellenstrom, bei dem das Halbleiterlaserelement 100 eine Laseroszillation durchführt, ansteigen. Daher ist die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31, die die periodische Struktur aufweist, an einer Position vorgesehen, die von der aktiven Schicht 40 entfernt ist. Wie in **Fig. 2** dargestellt, ist beispielsweise die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 zwischen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 und der aktiven Schicht 40 angeordnet. Mit dieser Struktur wird die elektrische Feldstärke der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 relativ gering, derart, dass der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden kann, und somit kann der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements 100 reduziert werden. Durch die Reduzierung des Schwellenstroms kann die Stromdichte zum Zeitpunkt der Laseroszillation reduziert werden, und die Wahrscheinlichkeit, dass eine Mode hoher Ordnung in der longitudinalen Mode auftritt, kann verringert werden. Außerdem kann die Steigungseffizienz des Halbleiterlaserelements 100 durch Verbesserung der optischen Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden. Die Berechnungsergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

[0023] Erstens wird in einem Laser mit verteilter Rückkopplung (DFB) oder einem Laser mit verteiltem Bragg-Reflektor (DBR) ein Beugungsgitter entlang eines optischen Wellenleiters gebildet und eine Vorwärtswelle und eine Rückwärtswelle werden in dem optischen Wellenleiter miteinander gekoppelt, derart, dass die Rückkopplung in der Nähe einer Bragg-Frequenz stark wird und eine Frequenzselektivität auftritt. Dies erlaubt eine Laseroszillation in einer einzelnen longitudinalen Mode oder einer nahezu einzelnen longitudinalen Mode. Wenn sich das Licht beispielsweise parallel zum Beugungsgitter ausbrei-

tet und eine Bragg-Reflexion auftritt, wird, da die Vorwärtswelle und die Rückwärtswelle in Phase zueinander sein müssen, eine Beugungsgitterperiode Λ durch die folgende Beziehung (1) unter Verwendung einer Modenordnung m , eines effektiven Brechungsindex n_{eff} und einer Wellenlänge λ ausgedrückt.

$$\Lambda = m \frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}} \quad (1)$$

[0024] Da sich die DFB-Mode jedoch in Abhängigkeit von der Phase des Beugungsgitters ändert, wenn eine Reflexion an einer Endfläche auftritt, kann eine Phasenverschiebung vorgesehen werden, indem der Abstand eines Teils des Beugungsgitters verändert wird. Zum Beispiel gibt es einen $\lambda/4$ -Verschiebungstyp, einen äquivalenten Phasenverschiebungstyp, der mit einem flachen Bereich versehen ist, einen Teilungsmodulationsverschiebungstyp, bei dem eine Teilungsperiode eines Beugungsgitters geändert wird, einen Mehrphasenverschiebungstyp und dergleichen. Darüber hinaus ist nicht nur der Fall denkbar, dass eine eindimensionale periodische Struktur in horizontaler Richtung vorliegt, sondern auch der Fall, dass eine zweidimensionale Periodizität vorliegt. Selbst in dem Fall, dass eine eindimensionale periodische Struktur vorliegt, ist eine Struktur ohne Periodizität oder eine Struktur denkbar, bei der die Periode in einer anderen Richtung innerhalb der Ebene in Bezug auf die Richtung, in der die periodische Struktur gebildet ist, verlagert ist.

[0025] Im DFB-Laser gibt ein Kopplungskoeffizient k den Grad der Kopplung pro Längeneinheit an, wenn sich ausbreitendes Licht durch das Beugungsgitter gebeugt wird, und ein Kopplungskoeffizient k einer transversalen elektrischen (TE) Mode in Bezug auf eine allgemeine Form wird durch die folgenden Beziehungen (2) und (3) ausgedrückt.

$$k = \frac{k_0^2}{2\beta N^2} \int \Delta n^2(x, z) E_y^2(x) dx \quad (2)$$

$$N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(x) dx \quad (3)$$

[0026] Dabei ist β eine Ausbreitungskonstante, E_y ein elektrisches Feld der TE-Mode, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ ist eine Wellenlänge und $n(x, z)$ ist ein Brechungsindex. Wenn das Beugungsgitter beispielsweise eine rechteckige Form und eine geringe Höhe aufweist und wenn die elektrische Feldstärke in einer Region des Beugungsgitters als konstant angesehen wird, wird der Kopplungskoeffizient k näherungsweise durch die folgende Beziehung (4) ausgedrückt

$$k \cong \frac{1}{\lambda} \times \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{n_{\text{eff}}} \times \Gamma_{\text{grating}} \sin \frac{\pi \Lambda_1}{\Lambda} \quad (4)$$

[0027] Dabei ist n_1 ein Brechungsindex eines hervorstehenden Bereichs des Beugungsgitters, n_2 ein Brechungsindex eines ausgesparten Bereichs des Beugungsgitters, n_{eff} ein effektiver Brechungsindex, Γ_{grating} ein Lichtintensitätsverhältnis eines an das Beugungsgitter gekoppelten Bereichs, und Λ_1 eine Breite des hervorstehenden Bereichs des Beugungsgitters. Aus diesen obigen Beziehungen geht hervor, dass sich der Kopplungskoeffizient erhöht, wenn die Brechungsindexdifferenz zwischen dem ausgesparten und dem hervorstehenden Bereich zunimmt und das Verhältnis des an das Beugungsgitter gekoppelten elektrischen Feldes zunimmt.

[0028] Γ_{grating} kann durch die Berechnung des äquivalenten Brechungsindexes berechnet werden. Bei der folgenden Berechnung wurde der Brechungsindex jeder Schicht basierend auf dem Zusammensetzungsverhältnis eines Nitrid-Halbleiters, der die Schicht bildet, unter Verwendung einer in M. J. Bergmann, et. Al., JOURNAL OF APPLIED PHYSICS vol. 84 (1998) pp. 1196 bis 1203 beschriebenen Beziehung berechnet. In einem ersten Berechnungsbeispiel wurden die jeweiligen in den Fig. 4 bis 6 dargestellten Gegenstände unter Verwendung der gleichen Struktur wie die des Halbleiterlaserelements eines ersten, weiter unten zu beschreibenden Beispiels berechnet, mit der Ausnahme, dass die Dicken der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 (undotierte $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ -Schicht) geändert wurden. Die Dicken der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 waren 15 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 300 nm und 400 nm. Das heißt, im ersten Berechnungsbeispiel betragen die Distanzen von der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 zur aktiven Schicht 40 215 nm, 250 nm, 300 nm, 350 nm, 400 nm, 500 nm und 600 nm.

[0029] In Bezug auf das erste Berechnungsbeispiel stellen die Fig. 4, 5 und 6 die Beziehung zwischen den Dicken der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und dem Lichtintensitätsverhältnis Γ_{grating} des Bereichs, der mit dem Beugungsgitter gekoppelt ist, die Beziehung zwischen den Dicken der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und der optischen Begrenzung Γ_{well} einer Well-Schicht 41 bzw. die Beziehung zwischen den Dicken der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und dem Verhältnis Γ_p des in die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 austretenden Lichts dar. Wie in Fig. 4 dargestellt, nimmt die Lichtintensität im Beugungsgitter umso mehr ab, je dicker die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist, und der Grad der Abnahme wird ab einer Dicke von etwa 400 nm milde. Da, wie oben beschrieben, der Kopplungskoeffizient k hoch ist, wenn das Verhältnis des an das Beugungsgitter gekoppelten elektrischen Feldes hoch ist, scheint es, dass die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorzugsweise dünn ist. Wie in Fig. 5 dargestellt, erreicht die optische Begrenzung Γ_{well} der Well-

Schicht 41 jedoch bei 300 nm ein Maximum und nimmt vor und nach 300 nm leicht ab. Ähnlich wie ein typischer Fabry-Perot-Laser weist der DFB-Laser einen größeren Schwellenstrom auf, wenn die optische Begrenzung Γ in der aktiven Schicht abnimmt. Wie in **Fig. 6** dargestellt, steigt das Verhältnis Γ_p von in die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 austretendem Licht, wenn die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 dünner hergestellt wird. Der Anstieg von Γ_p verursacht einen Anstieg eines Absorptionsverlustes freier Ladungsträger in der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 und einen Verlust innerhalb des Resonators steigt an, was einen Anstieg des Schwellenstroms und eine Abnahme der Steigungseffizienz verursacht.

[0030] Zum Beispiel kann in dem Fall einer p-Typ-Halbleiterschicht der Absorptionsverlust freier Ladungsträger näherungsweise durch das Produkt aus Austrittslicht Γ_p in die p-Typ-Halbleiterschicht, einer Verunreinigungskonzentration n der p-Typ-Halbleiterschicht und einem Koeffizienten σ_{fc} , der einen Absorptionsquerschnitt für freie Ladungsträger widerspiegelt, erklärt werden. Dies wird durch die Beziehung (5) angegeben.

$$\alpha_{fc} = n \times \sigma_{fc} \times \Gamma_p \quad (5)$$

[0031] Das heißt, auch wenn die Verunreinigungskonzentration der p-Typ-Halbleiterschicht gleich ist, steigt der Absorptionsverlust für freie Ladungsträger α_{fc} , wenn der Lichtaustritt in die p-Typ-Halbleiterschicht zunimmt. Beispiele für die p-Typ-Halbleiterschicht enthalten eine Schicht aus einem Nitrid-Halbleiter, der eine p-Typ-Verunreinigung wie Mg enthält. Da die Aktivierungsrate der p-Typ-Verunreinigung im Nitrid-Halbleiter niedriger ist als die Aktivierungsrate einer n-Typ-Verunreinigung wie Si, muss eine relativ große Menge an p-Typ-Verunreinigung in der p-Typ-Halbleiterschicht verwendet werden, und der Absorptionsverlust der freien Ladungsträger aufgrund der p-Typ-Verunreinigung steigt. Aus der obigen Beziehung geht hervor, dass mit zunehmendem Lichtaustritt in die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 der Absorptionsverlust der freien Ladungsträger zunimmt und somit der Verlust innerhalb des Resonators steigt, was zu einem Anstieg des Schwellenstroms führt. Auch wenn der Lichtaustritt in die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 derselbe ist, steigt mit zunehmender Verunreinigungskonzentration der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 der Absorptionsverlust freier Ladungsträger α_{fc} und der Verlust innerhalb des Resonators, was zu einem Anstieg des Schwellenstroms führt.

[0032] Aus den Berechnungsergebnissen von **Fig. 6** geht hervor, dass die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorzugsweise so groß wie möglich ist, um einen DFB-Laser mit niedrigem Schwellenstrom und hoher Steigungseffizienz zu

produzieren. Um andererseits einen stabilen DFB-Laser mit einer einzelnen longitudinalen Mode oder einer nahezu einzelnen longitudinalen Mode zu erhalten, ist der Kopplungskoeffizient k wichtig. Aus den Berechnungsergebnissen von **Fig. 4** geht hervor, dass der Kopplungskoeffizient k mit zunehmender Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 abnimmt. Betrachtet man also nur den Kopplungskoeffizienten k , so ist es denkbar, dass je größer die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist, desto ungünstiger ist es, einen stabilen DFB-Laser mit einer einzelnen longitudinalen Mode oder einer nahezu einzelnen longitudinalen Mode zu erhalten. Ein Parameter, der die Kopplung zwischen dem Beugungsgitter und dem sich ausbreitenden Licht tatsächlich beeinflusst, wird jedoch nicht nur durch den Kopplungskoeffizienten k repräsentiert, sondern auch durch das Produkt kL aus dem Kopplungskoeffizienten k und einer Regionslänge L des Beugungsgitters. kL wird auch als normalisierter Kopplungskoeffizient bezeichnet.

[0033] **Fig. 7** zeigt die Resultate der Berechnung des normalisierten Kopplungskoeffizienten kL . In **Fig. 7** ist der in der Berechnung verwendete Kopplungskoeffizient k derselbe wie in **Fig. 4**, und die Längen der Regionen L von \circ (Kreis), \square (Quadrat), Δ (Dreieck) und \times (Kreuz) betragen 300 μm , 600 μm , 1000 μm bzw. 2000 μm . Aus **Fig. 7** ist ersichtlich, dass ein gewünschter normalisierter Kopplungskoeffizient kL durch Anpassung der Resonatorlänge erhalten werden kann. Das heißt, die Reduzierung des Absorptionsverlustes freier Ladungsträger durch Erhöhung der Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und das Erhalten eines gewünschten normalisierten Kopplungskoeffizienten kL sind miteinander kompatibel.

[0034] In der vorliegenden Ausführungsform ist die periodische Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 ein Beugungsgitter. Durch Vorsehen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31, die die periodische Struktur aufweist, kann das Halbleiterlaserelement 100 als DFB-Laserelement verwendet werden. Die Größe der periodischen Struktur kann in Abhängigkeit von der Wellenlänge des zu erhaltenden Laserlichts, der Zusammensetzung eines zu verwendenden Halbleiters und dergleichen in geeigneter Weise angepasst werden.

[0035] Die Querschnittsform des Vorsprungs und der Aussparung, die die periodische Struktur entlang der Resonanzrichtung (Richtung D1) des optischen Wellenleiters 10 bilden, kann z.B. eine Sägezahnform, eine Sinusform, eine rechteckige Form, eine trapezförmige Form, eine umgekehrte trapezförmige Form oder dergleichen sein. Obwohl die Querschnittsform des hervorstehenden Bereichs aus dem Vorsprung und der Aussparung, die die periodische Struktur bilden, in **Fig. 2** eine rechteckige Form

ist, ist die Querschnittsform vorzugsweise eine Form, die eine geneigte Seite mit einer in Richtung der aktiven Schicht 40 schmaler werdenden Breite aufweist, wie z.B. eine trapezförmige Form. Somit kann eine Halbleiterschicht, die den Vorsprung und die Aussparung ausfüllt, leicht wachsen, und die Dicke der Halbleiterschicht kann reduziert werden. Jeder hervorstehende Bereich des Vorsprungs und der Aussparung kann eine obere Oberfläche aufweisen. Die obere Oberfläche ist zum Beispiel eine Oberfläche, die parallel zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 ist. Jeder ausgesparte Bereich des Vorsprungs und der Aussparung, der in **Fig. 2** dargestellt ist, weist eine Bodenoberfläche auf. Die Bodenoberfläche ist zum Beispiel eine Oberfläche, die parallel zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 ist. Jeder ausgesparte Bereich des Vorsprungs und der Aussparung kann eine Form ohne Bodenoberfläche aufweisen, wie zum Beispiel eine V-Form.

[0036] Die Periode (Teilung) des Vorsprungs und der Aussparung, die die periodische Struktur bilden, kann durch eine zu oszillierende Wellenlänge und einen effektiven Brechungsindex bestimmt werden. Die Teilung des Vorsprungs und der Aussparung (eine Periode des Vorsprungs und der Aussparung) kann z.B. in einem Bereich von 40 nm bis 140 nm liegen. Die Breite des hervorstehenden Bereichs und die Breite des ausgesparten Bereichs in der Richtung entlang der Resonanzrichtung (Richtung D1) des optischen Wellenleiters 10 können gleich oder unterschiedlich sein. Wenn eine Beugungsstruktur einer Mode höherer Ordnung vorgesehen ist, kann die Teilung in einem Bereich von 120 nm bis 420 nm bei der Beugung dritter Ordnung oder einem Bereich von 400 nm bis 2000 nm bei der Beugung zehnter Ordnung liegen. Eine der Breiten des hervorstehenden Bereichs und des ausgesparten Bereichs liegt vorzugsweise in einem Bereich von 1/2 bis 2 der Breite des anderen der Breite des hervorstehenden Bereichs und der Breite des ausgesparten Bereichs. Die Anzahl von ausgesparten Bereichen und die Anzahl von hervorstehenden Bereichen der periodischen Struktur bilden, können gleich oder unterschiedlich sein. Wenn die periodische Struktur beispielsweise von der lichtemittierenden Endoberfläche 20a bis zur lichtreflektierenden Endoberfläche 20b mit dem ausgesparten Bereich beginnt und mit dem ausgesparten Bereich endet, ist die Anzahl der ausgesparten Bereiche um eins größer als die Anzahl der hervorstehenden Bereiche. Obwohl **Fig. 2** schematisch 11 ausgesparte Bereiche und 10 hervorstehende Bereiche darstellt, sind die Anzahl der ausgesparten Bereiche und die Anzahl der hervorstehenden Bereiche nicht darauf beschränkt. Wenn zum Beispiel die Länge des Resonators 300 μm und die Periode 110 nm beträgt, beträgt die Anzahl der Perioden der Vorsprünge und Aussparungen, die die periodische Struktur bil-

den, etwa 2727. In diesem Fall beträgt die Anzahl der ausgesparten Bereiche und die Anzahl der hervorstehenden Bereiche, die die periodische Struktur eines Halbleiterlaserelements 100 bilden, 2727 bzw. 2728.

[0037] Die Höhe des Vorsprungs und der Aussparung, die die periodische Struktur bilden, kann auf 300 nm oder weniger eingestellt werden oder 200 nm oder weniger betragen. Da Γ_{grating} durch die Vergrößerung der Höhe des Vorsprungs und der Aussparung erhöht wird, kann der Kopplungskoeffizient k vergrößert werden. Daher beträgt die Höhe des Vorsprungs und der Aussparung vorzugsweise 50 nm oder mehr. In einem Querschnitt orthogonal zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 und parallel zur Resonanzrichtung des optischen Wellenleiters 10 ist die Höhe des Vorsprungs und der Aussparung, die die periodische Struktur bilden, beispielsweise die kürzeste Distanz zwischen einer Linie, die parallel zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 verläuft und durch einen Bereich des Vorsprungs und der Aussparung verläuft, der der aktiven Schicht 40 am nächsten ist, und einer Linie, die parallel zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 verläuft und durch einen Bereich des Vorsprungs und der Aussparung verläuft, der am weitesten von der aktiven Schicht 40 entfernt ist. Solch ein Querschnitt kann zum Beispiel mit einem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) beobachtet werden. Der Querschnitt kann mit einem Rastertransmissionselektronenmikroskop (STEM) beobachtet werden.

[0038] Der Vorsprung und die Aussparung, die die periodische Struktur bilden, können kontinuierlich von der lichtemittierenden Endoberfläche 20a bis zur reflektierenden Endoberfläche 20b gebildet werden. Wie in **Fig. 2** dargestellt, kann in der Nähe der lichtemittierenden Endoberfläche 20a und/oder der lichtreflektierenden Endoberfläche 20b kein Vorsprung und keine Aussparung gebildet werden. Wenn die periodische Struktur kontinuierlich von der lichtemittierenden Endoberfläche 20a bis zur lichtreflektierenden Endoberfläche 20b gebildet wird, ist die Regionslänge L der periodischen Struktur gleich der Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10. Alternativ kann die Regionslänge L der periodischen Struktur auch kleiner sein als die Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10. Die Regionslänge L der periodischen Struktur kann auf 80% oder mehr der Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 eingestellt werden und beträgt vorzugsweise 90% oder mehr. Die Regionslänge L der periodischen Struktur liegt vorzugsweise in einem Bereich von 200 μm bis 3000 μm und besonders bevorzugt in einem Bereich von 300 μm bis 1500 μm . Damit lässt sich die gewünschte Kopplungseffizienz leicht erhalten. Es kann auch sowohl eine Region einer periodischen Strukturschicht mit einem Beugungsgitter als auch eine Region ohne das Beugungsgitter vorgesehen

werden. In diesem Fall kann die Regionslänge L der periodischen Struktur auf 10% der Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 eingestellt werden und beträgt vorzugsweise 30% oder mehr. In einem solchen Fall kann eine verbleibende Region als Verstärkungsregion ohne das Beugungsgitter hergestellt werden und/oder als Phasenverschiebungsregion zum Verschieben einer Phase durch Anwenden einer Vorspannung dienen. Darüber hinaus kann auch eine Region einer periodischen Strukturschicht mit dem Beugungsgitter und eine Region mit einer komplizierten Funktion ohne das Beugungsgitter vorgesehen werden. In diesem Fall kann die Regionslänge L der periodischen Struktur auf 5% oder mehr der Länge L_{10} des optischen Wellenleiters 10 eingestellt werden und beträgt vorzugsweise 10% oder mehr. In einem solchen Fall kann ein optischer Verstärker (optischer Halbleiterverstärker (SOA)), ein Elektroabsorptionsmodulator (EAM), ein Intensitätsmodulator vom Typ Mach-Zehnder oder dergleichen in das Element integriert werden.

[0039] Die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 enthält eine Mehrzahl von ersten Bereichen und eine Mehrzahl von zweiten Bereichen, die jeweils einen Brechungsindex aufweisen, der größer ist als der Brechungsindex des ersten Bereichs. Die periodische Struktur wird gebildet, indem die Mehrzahl von ersten Bereichen und die Mehrzahl von zweiten Bereichen abwechselnd entlang der Resonanzrichtung angeordnet werden.

[0040] In der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31, die in den **Fig. 1 bis 3** dargestellt ist, ist die Mehrzahl von ersten Bereichen mit einem gemeinsamen Bereich verbunden, und die Mehrzahl von ersten Bereichen und der eine gemeinsame Bereich bilden einen ersten Halbleiterbereich 31a. In ähnlicher Weise sind die Mehrzahl von zweiten Bereichen mit einem gemeinsamen Bereich verbunden, und die Mehrzahl von zweiten Bereichen und der eine gemeinsame Bereich bilden einen zweiten Halbleiterbereich 31b. Mit anderen Worten, der erste Halbleiterbereich 31a enthält die Mehrzahl von ersten Bereichen, die von dem einen gemeinsamen Bereich nach oben hervorstehen, der zweite Halbleiterbereich 31b enthält die Mehrzahl von zweiten Bereichen, die von dem einen gemeinsamen Bereich nach unten hervorstehen, und die ersten Bereiche und die zweiten Bereiche sind alternierend entlang der Richtung D1 angeordnet. Die Zusammensetzung des gemeinsamen Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a ist die gleiche wie die Zusammensetzung des ersten Bereichs. Die Zusammensetzung des gemeinsamen Bereichs des zweiten Halbleiterbereichs 31b ist die gleiche wie die Zusammensetzung des zweiten Bereichs. Der Ausdruck „mit der gleichen Zusammensetzung“ bezieht sich darauf, erhalten zu werden, ohne dass die Zusammensetzung absichtlich anders hergestellt wird, und kann einen

Fehler enthalten, der bei der Herstellung verursacht wurde. Der erste Halbleiterbereich 31a enthält die Mehrzahl von ersten Bereichen und der zweite Halbleiterbereich 31b enthält die Mehrzahl von zweiten Bereichen in der obigen Beschreibung; der erste Halbleiterbereich 31a kann jedoch die Mehrzahl von zweiten Bereichen enthalten und der zweite Halbleiterbereich 31b kann die Mehrzahl von ersten Bereichen enthalten.

[0041] Der erste Halbleiterbereich 31a kann beispielsweise dadurch erhalten werden, dass eine erste Halbleiterschicht gebildet wird, die den ersten Halbleiterbereich 31a darstellt, und dann ein Teil der ersten Halbleiterschicht durch Trockenätzen oder dergleichen entfernt wird. Wenn die erste Halbleiterschicht während des teilweisen Entfernens bis zu einer unteren Oberfläche entfernt wird, kann ein erster Halbleiterbereich gebildet werden, der nur die Mehrzahl von ersten Bereichen ohne einen gemeinsamen Bereich enthält. Wenn das Entfernen in einer Tiefe durchgeführt wird, die die untere Oberfläche der ersten Halbleiterschicht unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Entfernungstiefe nicht erreicht, kann der erste Halbleiterbereich 31a gebildet werden, der den einen gemeinsamen Bereich und die Mehrzahl von ersten Bereichen enthält.

[0042] Der zweite Halbleiterbereich 31b kann zum Beispiel dadurch erhalten werden, dass der zweite Halbleiterbereich 31b auf dem ersten Halbleiterbereich 31a gebildet wird. Der zweite Halbleiterbereich 31b wird zwischen die Mehrzahl von ersten Bereichen des ersten Halbleiterbereichs 31a gefüllt. Der zweite Halbleiterbereich 31b kann z.B. unter Wachstumsbedingungen gebildet werden, bei denen das laterale Wachstum stärker gefördert wird als bei der ersten Halbleiterschicht. Wenn der zweite Halbleiterbereich 31b auf diese Weise gebildet wird, kann, je niedriger die Verunreinigungskonzentration des zweiten Halbleiterbereichs 31b ist, die Möglichkeit, einen Spalt zwischen dem zweiten Halbleiterbereich 31b und dem ersten Halbleiterbereich 31a zu generieren, stärker reduziert werden. Daher ist die n-Typ Verunreinigungskonzentration des zweiten Halbleiterbereichs 31b vorzugsweise $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ oder weniger. Die n-Typ-Verunreinigungskonzentration des ersten Halbleiterbereichs 31a kann in einem Bereich von $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ bis $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ liegen oder unterhalb einer Detektionsgrenze liegen. Die n-Typ-Verunreinigungskonzentration des ersten Halbleiterbereichs 31a kann höher sein als die n-Typ-Verunreinigungskonzentration des zweiten Halbleiterbereichs 31b. Die Konzentration einer anderen Verunreinigung als der n-Typ-Verunreinigung im zweiten Halbleiterbereich 31b kann unterhalb der Detektionsgrenze liegen. Der zweite Halbleiterbereich 31b ist vorzugsweise aus GaN hergestellt, was die Möglichkeit reduziert, einen Spalt zwischen

dem zweiten Halbleiterbereich 31b und dem ersten Halbleiterbereich 31a zu generieren.

[0043] Mindestens eines der beiden Enden entweder der Mehrzahl von ersten Bereichen oder der Mehrzahl von zweiten Bereichen in der Richtung orthogonal zur Resonanzrichtung kann innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers 20 lokalisiert sein. Beide Enden von entweder der Mehrzahl von ersten Bereichen oder der Mehrzahl von zweiten Bereichen können als beide Enden der periodischen Struktur bezeichnet werden. Wenn die periodische Struktur unter Verwendung eines Verfahrens gebildet wird, bei dem ein Entstehungsgebiet und eine Operationszeit proportional zueinander sind, wie z.B. der Elektronenstrahlolithographie, kann die Entstehungszeit der periodischen Struktur verkürzt werden, indem die Breite der periodischen Struktur schmaler als die Breite des Halbleiterlaserelements 100 gemacht wird.

[0044] In Fig. 2 und 3 weist der erste Halbleiterbereich 31a eine Mehrzahl von ausgesparten Formen auf, die in einer von der aktiven Schicht 40 wegführenden Richtung ausgespart sind. Bereiche des ersten Halbleiterbereichs 31a, die die Mehrzahl von entsprechenden ausgesparten Formen entlang der Resonanzrichtung (Richtung D1) einschließen, sind entweder die ersten Bereiche oder die zweiten Bereiche. Die Mehrzahl von ausgesparten Formen sind mit dem zweiten Halbleiterbereich 31b gefüllt, und die Bereiche, die die Mehrzahl von ausgesparten Formen füllen, sind der andere der ersten Bereiche oder der zweiten Bereiche. Der erste Halbleiterbereich 31a kann eine Mehrzahl hervorstehender Formen aufweisen, die in Richtung der aktiven Schicht 40 hervorstehen. In diesem Fall ist die Mehrzahl von hervorstehenden Formen des ersten Halbleiterbereichs 31a einer der ersten Bereiche oder der zweiten Bereiche, und Bereiche des zweiten Halbleiterbereichs 31b, die die Mehrzahl von entsprechenden hervorstehenden Formen entlang der Resonanzrichtung (Richtung D1) einschließen, sind die anderen der ersten Bereiche oder der zweiten Bereiche. Dadurch, dass mindestens eines der beiden Enden eines Bereichs der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form des ersten Halbleiterbereichs 31a in der Richtung (Richtung D2) orthogonal zur Resonanzrichtung innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers 20 angeordnet ist, wird die ausgesparte Form oder die hervorstehende Form wahrscheinlich stabil gebildet. Denn es ist zu erwarten, dass die Festigkeit des ersten Halbleiterbereichs 31a verbessert wird, wenn die Breite der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form in der Richtung D2 schmaler wird. Vorzugsweise ist die ausgesparte Form oder die hervorstehende Form eine Form, bei der beide Enden der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form in der Richtung D2 innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers

20 lokalisiert sind. Die Breite der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form in der Richtung D2 ist gleich oder größer als die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 und kann größer sein als die Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10. Die Breite der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form in Richtung D2 kann ein Wert sein, der durch Addition von 5 μm oder mehr auf jeder Seite und 10 μm oder mehr insgesamt zur Breite W_{10} des optischen Wellenleiters 10 erhalten wird. Die Breite der ausgesparten Form oder der hervorstehenden Form in der Richtung D2 kann schmaler sein als eine Breite einer Pad-Elektrode 83 in der Richtung D2. Wenn die periodische Struktur unter Verwendung eines Verfahrens gebildet wird, bei dem ein Entstehungsgebiet und eine Operationszeit proportional zueinander sind, wie z.B. bei der Elektronenstrahlolithographie, kann die Bildung des ersten Halbleiterbereichs 31a mit einer Mehrzahl von ausgesparten Formen die Bildungszeit der periodischen Struktur im Vergleich zur Bildung des ersten Halbleiterbereichs 31a mit einer Mehrzahl von hervorstehenden Formen verkürzen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Festigkeit des ersten Halbleiterbereichs 31a verbessert wird, wenn der erste Halbleiterbereich 31a mit einer Mehrzahl von ausgesparten Formen gebildet wird, verglichen mit der Bildung des ersten Halbleiterbereichs 31a mit einer Mehrzahl von hervorstehenden Formen.

[0045] Zum Beispiel ist der erste Bereich aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt, der Ga enthält, und der zweite Bereich ist aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt, der In und Ga enthält. Zum Beispiel besteht der erste Bereich aus GaN und der zweite Bereich aus $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$). Das In-Zusammensetzungsverhältnis des zweiten Bereichs kann auf $0,001 \leq x \leq 0,1$ eingestellt werden. In diesem Fall kann eine n-seitige Mantelschicht als eine von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 separierte Schicht vorgesehen werden, und die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 kann zwischen der n-seitigen Mantelschicht und der aktiven Schicht 40 angeordnet werden. Somit kann der Schwellenstrom reduziert und die optische Begrenzung verbessert werden. Wenn der erste Bereich aus GaN besteht, enthält der erste Halbleiterbereich 31a vorzugsweise eine Mehrzahl von zweiten Bereichen und der zweite Halbleiterbereich 31b enthält vorzugsweise eine Mehrzahl von ersten Bereichen. Da der Vorsprung und die Aussparung des ersten Halbleiterbereichs 31a mit dem zweiten Halbleiterbereich 31b aufgefüllt werden können, kann somit die Wahrscheinlichkeit, einen Spalt zwischen dem ersten Bereich und dem zweiten Bereich zu generieren, reduziert werden. In einem solchen ersten Halbleiterbereich 31a und einem zweiten Halbleiterbereich 31b ist beispielsweise in einer Z-Kontrast-Abbildung (ZC-Abbildung), die durch das STEM erhalten wird, wie in der nachfolgend zu beschreibenden Fig. 15 dargestellt, eine

Kontraständerung am Boden des ausgesparten Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a sanfter als an der lateralen Oberfläche des ausgesparten Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a. Eine solche Kontraständerung kann beispielsweise durch die Beobachtung eines Querschnitts orthogonal zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 und entlang der Resonanzrichtung des optischen Wellenleiters 10 bestätigt werden. Die Z-Kontrast-Abbildung ist eine Kontrastabbildung basierend auf dem Atomgewicht.

[0046] Zum Beispiel besteht der erste Bereich aus einem Nitrid-Halbleiter, der Al und Ga enthält, und der zweite Bereich besteht aus einem Nitrid-Halbleiter, der Ga enthält. Zum Beispiel besteht der erste Bereich aus $\text{Al}_Y\text{Ga}_{1-Y}\text{N}$ ($0 < Y < 1$), und der zweite Bereich aus GaN. Das Al-Zusammensetzungsverhältnis des ersten Bereichs kann auf $0,001 \leq Y \leq 0,2$ eingestellt werden. Wenn mindestens ein Teil der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 einen Nitrid-Halbleiter enthält, der Al und Ga enthält, kann die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 eine Schicht sein, die als n-seitige Mantelschicht dient.

[0047] Die periodische Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 weist einen Brechungsindex auf, der sich entlang einer Erstreckungsrichtung des Grats 20c periodisch ändert. In der periodischen Struktur ändert sich der Brechungsindex periodisch entlang einer Richtung, die die lichtemittierende Endoberfläche 20a und die lichtreflektierende Endoberfläche 20b in der kürzesten Distanz verbindet. Die periodische Struktur ist zumindest direkt unterhalb des Grats 20c angeordnet.

[0048] Die Distanz von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 zur Well-Schicht 41 ist vorzugsweise größer als 300 nm. Somit kann der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements 100 reduziert werden. Außerdem kann die Steigungseffizienz des Halbleiterlaserelements 100 verbessert werden. Wenn die Distanz von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 zur Well-Schicht 41 300 nm oder weniger beträgt, erhöht sich der Schwellenstrom, und eine Laseroszillation kann selbst dann nicht auftreten, wenn ein Strom von z.B. 400 mA eingeleitet wird. Die Distanz zwischen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 und der Well-Schicht 41 kann auf 800 nm oder weniger eingestellt werden und wird vorzugsweise auf 500 nm oder weniger eingestellt. So lässt sich die gewünschte Kopplungseffizienz leicht erhalten. Die Distanz von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 zur aktiven Schicht 40 kann ebenfalls innerhalb dieser numerischen Bereiche eingestellt werden. Die Distanz von der periodischen Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 zur Well-Schicht 41 kann ebenfalls innerhalb dieser numerischen Bereiche ein-

gestellt werden, und auch die Distanz von der periodischen Struktur zur aktiven Schicht 40 kann innerhalb dieser numerischen Bereiche eingestellt werden. Die Distanz von der periodischen Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 zu der Well-Schicht 41 (n-seitige Well-Schicht) kann auch in einem Bereich von 320 nm bis 800 nm oder auch in einem Bereich von 400 nm bis 800 nm liegen.

[0049] Die Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 beträgt vorzugsweise 50 nm oder mehr, noch bevorzugter 100 nm oder mehr. Dadurch lässt sich in der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 leicht eine periodische Struktur bilden. Die Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 kann auf 1000 nm oder weniger eingestellt werden und kann 500 nm oder weniger betragen.

[0050] Die Dicke der periodischen Struktur, d.h. die Länge der periodischen Struktur in einer Richtung orthogonal zur Hauptoberfläche der aktiven Schicht 40 ist gleich oder kleiner als die Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31. Die Differenz zwischen den Dicken der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 und den Dicken der periodischen Struktur kann in einem Bereich von 0 nm bis 1000 nm eingestellt werden.

Vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34

[0051] Die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 ist zwischen der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 angeordnet. Der Brechungsindex der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 34 kann niedriger als der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 und größer als der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 sein. Der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 kann aus dem Volumenverhältnis der Mehrzahl von Halbleiterbereichen berechnet werden, die die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 bilden. Alternativ kann gesagt werden, wenn der Brechungsindex der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 34 größer ist als jeder der Brechungsindizes der Mehrzahl von Halbleiterbereichen, dass der Brechungsindex der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 34 größer ist als der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31.

[0052] Die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 kann verbessert werden, indem die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 vorgesehen wird. Wenn die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 beispielsweise eine periodische Struktur aufweist, in der AlGa_N und GaN periodisch angeordnet sind, ist der Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 im Vergleich zu einem Fall, in

dem die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 keine periodische Struktur aufweist und nur aus GaN besteht, verringert. Wenn der Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 auf diese Weise relativ niedrig ist, wird die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 vorzugsweise dadurch verbessert, dass insbesondere die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 vorgesehen wird. Alternativ kann die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 auch nicht vorgesehen sein und stattdessen kann die Dicke des gemeinsamen Bereichs des zweiten Halbleiterbereichs 31b auf 50 nm oder mehr eingestellt werden. Somit kann die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden. Die Dicke des gemeinsamen Bereichs des zweiten Halbleiterbereichs 31b kann 300 nm oder weniger betragen.

[0053] Die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 ist z.B. eine InGaN-Schicht. Die vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 34 kann eine n-Typ Verunreinigung enthalten. Die Dicke der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 34 kann in einem Bereich von 1 nm bis 500 nm liegen.

Zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32

[0054] Die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist zwischen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 und der aktiven Schicht 40 angeordnet.

[0055] Wenn die Distanz zwischen der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 mit der periodischen Struktur und der aktiven Schicht 40 reduziert wird, erhöht sich die elektrische Feldstärke der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50, um den Absorptionsverlust zu erhöhen, und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 wird reduziert. Durch das Vorsehen der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann die elektrische Feldstärke der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 verringert werden, um den Absorptionsverlust zu reduzieren, und/oder die optische Begrenzung zur aktiven Schicht 40 kann verbessert werden. Folglich kann der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements 100 reduziert werden.

[0056] Die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist vorzugsweise eine Nitrid-Halbleiterschicht, die In und Ga enthält. Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist vorzugsweise größer als die Dicke einer n-seitigen Barrierschicht, die weiter unten beschrieben wird. Mit einer solchen Konfiguration kann der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden.

[0057] Der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist vorzugsweise größer als der durchschnittliche Brechungsindex der ersten

n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31. Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist vorzugsweise größer als die Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31. Mit einer solchen Konfiguration kann der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden.

[0058] Der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 kann aus dem Volumenverhältnis der Mehrzahl von Halbleiterbereichen, die die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 bilden, berechnet werden. Alternativ kann gesagt werden, wenn der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 größer ist als jeder der Brechungsindizes der Mehrzahl von Halbleiterbereichen, dass der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 größer ist als der durchschnittliche Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31. Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann mit der Dicke der periodischen Struktur der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 anstelle der Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 31 verglichen werden.

[0059] Der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 ist vorzugsweise größer als der Brechungsindex der n-seitigen Barrierschicht. Die n-seitige Barrierschicht weist eine Bandlückenenergie auf, die größer ist als die Bandlückenenergie einer Well-Schicht, um als Barrierschicht zu dienen, aber eine solche n-seitige Barrierschicht weist tendenziell einen relativ niedrigen Brechungsindex auf. Indem die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 einen Brechungsindex aufweist, der größer als der Brechungsindex der n-seitigen Barrierschicht ist, kann der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden. Wenn die n-seitige Barrierschicht eine Mehrzahl von Schichten enthält, ist der Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorzugsweise größer als ein durchschnittlicher Brechungsindex der n-seitigen Barrierschicht und kann größer sein als der Brechungsindex jeder der Mehrzahl von Schichten, die die n-seitige Barrierschicht bilden.

[0060] Die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 besteht z.B. aus $\text{In}_Z\text{Ga}_{1-Z}\text{N}$ ($0 < Z < 1$). Das In-Zusammensetzungsverhältnis der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann auf $0,001 \leq Z \leq 0,2$ eingestellt werden. Bei der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann es sich um eine Schicht mit einem Zusammensetzungsgradienten handeln. Die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 besteht z.B. insgesamt aus InGaN und kann eine Schicht mit einem Zusammensetzungsgradienten sein, bei der das In-Zusammensetzungsverhältnis in Richtung der aktiven Schicht 40 zunimmt. Eine solche Schicht

mit einem Zusammensetzungsgradienten kann auch als Nitrid-Halbleiterschicht bezeichnet werden, die In und Ga enthält. Wenn die Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten derart gebildet wird, dass ein Bereich, der am weitesten von der aktiven Schicht 40 entfernt ist, aus GaN besteht, ein Bereich, der der aktiven Schicht 40 am nächsten ist, aus InGaN besteht und das In-Zusammensetzungsverhältnis in Richtung der aktiven Schicht 40 zunimmt, kann der verbleibende Bereich der Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten mit Ausnahme des Bereichs, der am weitesten von der aktiven Schicht 40 entfernt ist, die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32 sein.

[0061] Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann auf 150 nm oder mehr eingestellt werden und beträgt vorzugsweise 200 nm oder mehr. Somit kann der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden. Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann größer sein als die Dicke der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 34. Die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 kann auf 500 nm oder weniger eingestellt werden. Aus der Beziehung der Lichtintensität im Beugungsgitter, der optischen Begrenzung in der Well-Schicht 41 bzw. dem Lichtaustritt in die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50, die in den Fig. 4, 5 bzw. 6 dargestellt ist, kann die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 in einem Bereich von 170 nm bis 500 nm, in einem Bereich von 230 nm bis 500 nm, oder in einem Bereich von 300 nm bis 500 nm liegen.

Aktive Schicht 40

[0062] Die aktive Schicht 40 ist zwischen der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30 und der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 angeordnet. Die aktive Schicht 40 kann eine mehrfache Quanten-Well-Struktur oder eine einzelne Quanten-Well-Struktur aufweisen. Die aktive Schicht 40 enthält eine oder mehrere Well-Schichten 41 und eine oder mehrere Barrierschichten 42.

[0063] Die aktive Schicht 40 enthält eine n-seitige Well-Schicht von der einen oder den mehreren Well-Schichten 41, die am nächsten zur zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 lokalisiert ist, und eine n-seitige Barrierschicht von der einen oder den mehreren Barrierschichten 42, die zwischen der n-seitigen Well-Schicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 lokalisiert ist.

[0064] Wenn eine Mehrzahl von Halbleiterschichten zwischen der n-seitigen Well-Schicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorhanden ist, ist die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorzugsweise größer als die Dicke der

dicksten Schicht von der Mehrzahl von Halbleiterschichten. Somit kann der Absorptionsverlust reduziert und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 verbessert werden. Außerdem ist die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 vorzugsweise größer als die Gesamtdicke der Mehrzahl von Halbleiterschichten, die zwischen der n-seitigen Well-Schicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 32 lokalisiert sind. Somit kann der Absorptionsverlust weiter reduziert werden und/oder die optische Begrenzung in der aktiven Schicht 40 weiter verbessert werden.

[0065] Die aktive Schicht 40 kann z.B. mit einer Zusammensetzung gebildet werden, in der Licht mit einer Wellenlänge in einem Bereich von 400 nm bis 600 nm emittiert werden kann. Die eine oder die mehreren Well-Schichten 41 bestehen jeweils aus z.B. InGaN. Das In-Zusammensetzungsverhältnis von InGaN, aus dem die eine oder die mehreren Well-Schichten 41 bestehen, kann z.B. in einem Bereich von 0,05 bis 0,50 eingestellt werden. Das In-Zusammensetzungsverhältnis von InGaN, das die eine oder die mehreren Well-Schichten 41 bildet, kann 0,15 oder mehr betragen.

p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50

[0066] Die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 enthält eine oder mehrere Nitrid-Halbleiterschichten, die jeweils eine p-Typ-Verunreinigung enthalten. Beispiele für die p-Typ-Verunreinigung enthalten Mg. Die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 kann eine undotierte Schicht enthalten, die nicht absichtlich mit Verunreinigungen dotiert ist. Die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 kann eine Kontaktschicht enthalten. Die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 kann eines oder mehrere von einer optischen Leitungsschicht, einer elektronensperrenden Schicht und einer Mantelschicht enthalten. Die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 kann alle diese Schichten oder auch andere Schichten als diese Schichten enthalten.

[0067] In dem Nitrid-Halbleiter ist die Aktivierungsrate der p-Typ-Verunreinigung niedriger als die Aktivierungsrate der n-Typ-Verunreinigung. Daher ist die p-Typ-Verunreinigungskonzentration der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 tendenziell höher als die n-Typ-Verunreinigungskonzentration der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30. Zum Beispiel ist der maximale Wert der p-Typ-Verunreinigungskonzentration in der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 höher als der maximale Wert der n-Typ-Verunreinigungskonzentration in der n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 30.

Erster Schutzfilm 71 und zweiter Schutzfilm 72

[0068] Das Halbleiterlaserelement 100 kann einen ersten Schutzfilm 71 und einen zweiten Schutzfilm

72 enthalten. Der erste Schutzfilm 71 ist auf der lichtemittierenden Endoberfläche 20a des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers 20 vorgesehen. Die zweite Schutzfolie 72 ist auf der lichtreflektierenden Endoberfläche 20b des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers 20 vorgesehen. Einer oder beide von dem ersten Schutzfilm 71 und dem zweiten Schutzfilm 72 brauchen nicht vorgesehen zu sein. Der erste Schutzfilm 71 und der zweite Schutzfilm 72 können jeweils einen oder mehrere dielektrische Filme enthalten.

[0069] Der erste Schutzfilm 71 kann eine AR-Beschichtung (antireflektierend) sein. In diesem Fall beträgt der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 vorzugsweise 1% oder weniger, noch bevorzugter 0,1% oder weniger, und ist auf 0,001% oder mehr eingestellt. Die AR-Beschichtung ist jedoch für den ersten Schutzfilm 71 geeignet, wenn die Verstärkung im Inneren des Resonators ausreichend hoch ist. Wenn die Verstärkung des Resonators nicht ausreichend hoch ist, ist vorzugsweise der erste Schutzfilm 71 mit einem höheren Reflexionsvermögen vorgesehen. Um einen Anstieg des Schwellenstroms zu unterdrücken, beträgt der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 vorzugsweise 0,1% oder mehr, besonders bevorzugt 5% oder mehr. In dem Halbleiterlaserelement 100, das Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von gleich oder mehr als 420 nm und weniger als 500 nm emittiert, kann die Verstärkung im Inneren des Resonators erhöht werden, und der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 beträgt vorzugsweise 25% oder weniger, besonders bevorzugt 18% oder weniger. Somit kann die Steigungseffizienz des Resonators erhöht werden und eine hohe Ausgabe erhalten werden.

[0070] Wenn es gewünscht ist, einen Anstieg des Schwellenstroms weiter zu unterdrücken, kann der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 18% oder mehr betragen, vorzugsweise 30% oder mehr. Das Halbleiterlaserelement 100, das Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von 500 nm oder mehr emittiert, weist in dem Resonator tendenziell eine geringere Verstärkung auf als in einem Fall, in dem die Peak-Wellenlänge weniger als 500 nm beträgt. Daher ist in dem Halbleiterlaserelement 100, das Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von 500 nm oder mehr emittiert, der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 vorzugsweise 30% oder mehr und geringer als der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72. Somit kann der Schwellenstrom reduziert werden. Wenn eine periodische Struktur in dem Nitrid-Halbleiterschichtkörper 20 vorgesehen ist und die longitudinale Mode einer Oszillationswellenlänge durch die periodische Struktur vereinheitlicht oder nahe an die Einheit gebracht wird, wird ein auf die Laseroszillation bezogener Begrenzungsfaktor im Vergleich zu einem Fall, in dem keine periodische Struktur vorgesehen ist, reduziert. Wenn der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 erhöht wird, kann der Begren-

zungsfaktor erhöht werden. Der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 kann 60 % oder mehr betragen und kann 80 % oder mehr betragen.

[0071] Der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 ist höher als der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71. Der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 kann z.B. auf 95% oder mehr eingestellt werden und kann 98% oder mehr betragen. Der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 kann z.B. auf 100% oder weniger eingestellt werden. Der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 kann 100% betragen. Der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 und der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 beziehen sich auf einen Reflexionsgrad bei der Peak-Wellenlänge von Laserlicht, das von dem Halbleiterlaserelement 100 emittiert wird.

Isolierender Film 73

[0072] Das Halbleiterlaserelement 100 kann einen isolierenden Film 73 enthalten, der auf einem Teil der Oberfläche der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 vorgesehen ist. Der isolierende Film 73 ist zum Beispiel ein Einzelschichtfilm oder ein Mehrschichtfilm aus Oxid oder Nitrid von Si, Al, Zr, Ti, Nb, Ta oder dergleichen.

n-Elektrode 81, p-Elektrode 82 und Pad-Elektrode 83

[0073] Das Halbleiterlaserelement 100 enthält eine n-Elektrode 81 und eine p-Elektrode 82. Die n-Elektrode 81 ist auf einer unteren Oberfläche des Substrats 60 vorgesehen. Die p-Elektrode 82 ist in Kontakt mit einem Teil der p-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 vorgesehen. Die p-Elektrode 82 ist zum Beispiel in Kontakt mit einer oberen Oberfläche des Grats 20c vorgesehen. Das Halbleiterlaserelement 100 kann die Pad-Elektrode 83 enthalten, die auf der p-Elektrode 82 vorgesehen ist. Die Pad-Elektrode 83 ist in Kontakt mit der p-Elektrode 82 vorgesehen. Beispiele für ein Material jeder Elektrode enthalten einen Einzelschichtfilm oder einen Mehrschichtfilm aus einem Metall wie Ni, Rh, Cr, Au, W, Pt, Ti und Al, einer Legierung davon, leitfähigem Oxid, das mindestens eines aus Zn, In und Sn enthält. Beispiele für das leitfähige Oxid enthalten Indium-Zinn-Oxid (ITO), Indium-Zink-Oxid (IZO), Gallium-dotiertes Zinkoxid (GZO). In der vorliegenden Beschreibung wird eine Seite, auf der die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50 lokalisiert ist, betrachtet von der aktiven Schicht 40 aus, als eine obere Seite definiert, und eine Seite, auf der die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30 lokalisiert ist, betrachtet von der aktiven Schicht 40 aus, als eine untere Seite definiert.

Halbleiterlaserelement 100

[0074] Das Halbleiterlaserelement 100 ist zum Beispiel ein DFB-Laserelement. Die Peak-Wellenlänge von Laserlicht, das von dem Halbleiterlaserelement 100 emittiert wird, kann z.B. in einem Bereich von 400 nm bis 600 nm eingestellt werden. Die Peak-Wellenlänge des von dem Halbleiterlaserelement 100 emittierten Laserlichts beträgt zum Beispiel 500 nm oder mehr. Das Halbleiterlaserelement 100, das die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 31 enthält, weist eine periodische Struktur auf und kann Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von 500 nm oder mehr emittieren.

[0075] Die Spektralbreite des von dem Halbleiterlaserelement 100 emittierten Laserlichts kann auf 10 pm oder weniger eingestellt werden und beträgt zum Beispiel 3 pm oder weniger. Die Spektralbreite des von dem Halbleiterlaserelement 100 emittierten Laserlichts beträgt beispielsweise 1 fm oder mehr, und kann 10 fm oder mehr betragen. Alternativ kann gesagt werden, dass die Wellenlänge eine einzelne Wellenlänge ist, wenn die Spektrallinienbreite gleich oder kleiner als eine Messauflösung ist. Die Messauflösung ist zum Beispiel eine Pikometerordnung.

[0076] Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis (SMSR) des von dem Halbleiterlaserelement 100 emittierten Laserlichts beträgt beispielsweise 10 dB oder mehr. Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis ist ein Intensitätsverhältnis zwischen einem Peak (Hauptmode), der die größte spektrale Intensität aufweist, und einem Peak (Seitenmode), der die zweitgrößte spektrale Intensität aufweist. Je niedriger das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis ist, desto höher ist die Monochromatizität des Spektrums von zu emittierendem Laserlicht, d.h. die Einheit in der longitudinalen Mode. Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis des von dem Halbleiterlaserelement 100 emittierten Laserlichts kann beispielsweise 60 dB oder weniger betragen. Alternativ kann gesagt werden, dass die longitudinale Mode einzeln ist, wenn das SMSR gleich oder höher als ein Hintergrundniveau ist. Das Hintergrundniveau beträgt zum Beispiel etwa 20 dB bis 40 dB.

Erstes Beispiel

[0077] In einem ersten Beispiel wurde das folgende Halbleiterlaserelement produziert. Ein MOCVD-Gerät wurde verwendet, um einen epitaktischen Wafer zu produzieren, der das Halbleiterlaserelement darstellt. Als Rohstoffe wurden Trimethylgallium (TMG), Triethylgallium (TEG), Trimethylaluminium (TMA), Trimethylindium (TMI), Ammoniak (NH₃), Silangas und Bis(cyclopentadienyl)magnesium (Cp₂Mg) nach Bedarf verwendet.

[0078] Eine Al_{0,016}Ga_{0,984}N Schicht, die Si enthält, wurde mit einer Dicke von 1,8 µm auf einem c-Ebene-GaN Substrat (Substrat 60) aufgewachsen.

[0079] Anschließend wurde eine Al_{0,08}Ga_{0,92}N Schicht, die Si enthält, mit einer Dicke von 200 nm aufgewachsen.

[0080] Anschließend wurde eine In_{0,04}Ga_{0,96}N Schicht, die Si enthält, mit einer Dicke von 150 nm aufgewachsen.

[0081] Anschließend wurde eine Al_{0,08}Ga_{0,92}N-Schicht, die Si enthält (erste Halbleiterschicht, die den ersten Halbleiterbereich 31a darstellt), mit einer Dicke von 650 nm aufgewachsen.

[0082] Der epitaktische Wafer, auf dem die oben genannten Schichten gebildet wurden, wurde aus dem MOCVD-Gerät herausgenommen und eine periodische konkav-konvexe Form (periodische Struktur) wurde unter Verwendung eines Elektronenstrahlolithographiegeräts, reaktiven Ionenätzens (RIE) und Sputterns gebildet. Die Tiefe des ausgesparten Bereichs betrug 200 nm, die Breite des ausgesparten Bereichs 80 nm und die Beugungsgitterperiode Λ (eine Periode eines Vorsprungs und einer Aussparung) betrug 110 nm.

[0083] Nachdem die konkav-konvexe Form gebildet wurde, wurde eine Si enthaltende GaN-Schicht (zweiter Halbleiterbereich 31b) mit einer Dicke von 200 nm mit dem MOCVD-Gerät aufgewachsen. 200 nm ist eine Dicke vom obersten Bereich des Vorsprungs der konkavkonvexen Form bis zu einer oberen Oberfläche der Si enthaltenden GaN-Schicht (zweiter Halbleiterbereich 31b).

[0084] Anschließend wurde eine undotierte In_{0,03}Ga_{0,97}N-Schicht (zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32) mit einer Dicke von 240 nm aufgewachsen. Von der Si enthaltenden Al_{0,016}Ga_{0,984}N-Schicht bis zur In_{0,03}Ga_{0,97}N-Schicht reicht die n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 30.

[0085] Anschließend wurde die aktive Schicht 40 aufgewachsen, die eine n-seitige Barrierschicht (Barrierschicht 42), die aus drei Schichten aus einer Si-dotierten GaN-Schicht mit einer Dicke von 1 nm, einer Si-dotierten In_{0,05}Ga_{0,95}N-Schicht mit einer Dicke von 8 nm und einer Si-dotierten GaN-Schicht mit einer Dicke von 1 nm besteht, eine undotierte In_{0,25}Ga_{0,75}N-Schicht (Well-Schicht 41) mit einer Dicke von 2,1 nm, eine undotierte GaN-Schicht (Barrierschicht 42) mit einer Dicke von 2,9 nm, eine undotierte In_{0,25}Ga_{0,75}N-Schicht (Well-Schicht 41) mit einer Dicke von 2,1 nm und eine undotierte GaN-Schicht (Barrierschicht 42) mit einer Dicke von 2,9 nm in dieser Reihenfolge enthält.

[0086] Anschließend wurde eine undotierte Schicht mit einem Zusammensetzungsgradienten mit einer Dicke von 150 nm aufgewachsen. Die Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten wurde mit $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ zu Beginn des Wachstums und GaN am Ende des Wachstums aufgewachsen, wobei die In-Zusammensetzung in 120 Schritten im Wesentlichen monoton abnahm, so dass der Zusammensetzungsgradient im Wesentlichen linear war.

[0087] Anschließend wurden eine $\text{Al}_{0,10}\text{Ga}_{0,90}\text{N}$ -Schicht und eine $\text{Al}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ -Schicht, die Mg enthält, mit Dicken von 3 nm bzw. 7 nm aufgewachsen.

[0088] Anschließend wurde eine $\text{Al}_{0,0,5}\text{Ga}_{0,985}\text{N}$ -Schicht, die Mg enthält, mit einer Dicke von 450 nm aufgewachsen.

[0089] Anschließend wurde eine GaN-Schicht, die Mg enthält, mit einer Dicke von 15 nm aufgewachsen. Von der undotierten Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten bis zur GaN-Schicht ist die p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 50.

[0090] Anschließend wurde der epitaktische Wafer, auf dem die oben genannten Schichten gebildet wurden, aus dem MOCVD-Gerät herausgenommen, und der Grat 20c, die p-Elektrode 82, die Pad-Elektrode 83, die n-Elektrode 81 und dergleichen wurden unter Verwendung von Photolithographie, RIE und Sputtern gebildet. Anschließend wurde eine Vereinzelung durchgeführt, und der erste Schutzfilm 71 und der zweite Schutzfilm 72 wurden auf Endoberflächen gebildet, um das Halbleiterlaserelement zu erhalten. Der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 betrug 80% und der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 betrug 98%. Das Halbleiterlaserelement weist eine Gratbreite von 2 μm , eine Resonatorlänge von 300 μm und eine Elementbreite von 200 μm auf.

Zweites Beispiel

[0091] Als Halbleiterlaserelement eines zweiten Beispiels wurde das folgende Halbleiterlaserelement produziert. Das Halbleiterlaserelement des zweiten Beispiels unterscheidet sich von dem Halbleiterlaserelement des ersten Beispiels hauptsächlich dadurch, dass eine Schicht, die eine periodische konkav-konvexe Form bildet (erste Halbleiterschicht, die den ersten Halbleiterbereich 31a darstellt), eine InGaN-Schicht ist und die Gratbreite 15 μm beträgt.

[0092] Eine $\text{Al}_{0,016}\text{Ga}_{0,984}\text{N}$ Schicht, die Si enthält, wurde mit einer Dicke von 1,25 μm auf dem c-Ebene-GaN Substrat (Substrat 60) aufgewachsen.

[0093] Anschließend wurde eine $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ Schicht, die Si enthält, mit einer Dicke von 250 nm aufgewachsen.

[0094] Anschließend wurde eine $\text{In}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$ Schicht, die Si enthält, mit einer Dicke von 150 nm aufgewachsen.

[0095] Anschließend wurde eine $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ -Schicht, die Si enthält (fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 35), mit einer Dicke von 650 nm aufgewachsen.

[0096] Anschließend wurde eine GaN-Schicht, die Si enthält (dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 33), mit einer Dicke von 100 nm aufgewachsen.

[0097] Anschließend wurde eine $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ -Schicht, die Si enthält (erste Halbleiterschicht, die den ersten Halbleiterbereich 31a darstellt), mit einer Dicke von 200 nm aufgewachsen.

[0098] Der epitaktische Wafer, auf dem die oben genannten Schichten gebildet wurden, wurde aus dem MOCVD-Gerät herausgenommen und eine periodische konkav-konvexe Form (periodische Struktur) wurde unter Verwendung eines Elektronenstrahlolithographiegeräts, reaktiven Ionenätzens (RIE) und Sputterns gebildet. Die Tiefe eines ausgesparten Bereichs betrug 150 nm, die Breite des ausgesparten Bereichs betrug 50 nm, und die Beugungsgitterperiode Λ (eine Periode von Vorsprung und Aussparung) betrug 115 nm.

[0099] Nachdem die konkav-konvexe Form gebildet wurde, wurde eine Si enthaltende GaN-Schicht (zweiter Halbleiterbereich 31b) mit einer Dicke von 100 nm mit dem MOCVD-Gerät aufgewachsen. 100 nm ist eine Dicke vom obersten Bereich des Vorsprungs der konkavkonvexen Form bis zu einer oberen Oberfläche der Si enthaltenden GaN-Schicht (zweiter Halbleiterbereich 31b).

[0100] Anschließend wurde eine undotierte $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ -Schicht (zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht 32) mit einer Dicke von 230 nm aufgewachsen.

[0101] Anschließend wurde die aktive Schicht 40 aufgewachsen, die eine n-seitige Barrierschicht (Barrierschicht 42), die aus drei Schichten aus einer Si-dotierten GaN-Schicht mit einer Dicke von 1 nm, einer Si-dotierten $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ -Schicht mit einer Dicke von 44 nm und einer Si-dotierten GaN-Schicht mit einer Dicke von 1 nm besteht, eine undotierte $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ -Schicht (Well-Schicht 41) mit einer Dicke von 2,1 nm, eine undotierte GaN-Schicht (Barrierschicht 42) mit einer Dicke von 3,3 nm, eine undotierte $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ -Schicht (Well-Schicht 41) mit einer Dicke von 2,1 nm und eine undotierte GaN-Schicht (Barrierschicht 42) mit einer Dicke von 2,2 nm in dieser Reihenfolge enthält.

[0102] Anschließend wurde eine undotierte Schicht mit einem Zusammensetzungsgradienten mit einer Dicke von 180 nm aufgewachsen. Die Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten wurde mit $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ zu Beginn des Wachstums und GaN am Ende des Wachstums aufgewachsen, wobei die In-Zusammensetzung in 120 Schritten im Wesentlichen monoton abnahm, so dass der Zusammensetzungsgradient im Wesentlichen linear war.

[0103] Anschließend wurde eine undotierte Schicht mit einem Zusammensetzungsgradienten mit einer Dicke von 150 nm aufgewachsen. Die Schicht mit dem Zusammensetzungsgradienten wurde mit GaN zu Beginn des Wachstums und $\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$ am Ende des Wachstums aufgewachsen, wobei die Al-Zusammensetzung in 70 Schritten im Wesentlichen monoton zunahm, so dass der Zusammensetzungsgradient im Wesentlichen linear war.

[0104] Anschließend wurde eine undotierte $\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$ -Schicht mit einer Dicke von 200 nm aufgewachsen.

[0105] Anschließend wurden eine $\text{Al}_{0,10}\text{Ga}_{0,90}\text{N}$ -Schicht und eine $\text{Al}_{0,19}\text{Ga}_{0,81}\text{N}$ -Schicht, die Mg enthält, mit einer Dicke von 3,9 nm bzw. 7 nm aufgewachsen.

[0106] Anschließend wurde eine $\text{Al}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{N}$ -Schicht, die Mg enthält, mit einer Dicke von 100 nm aufgewachsen.

[0107] Anschließend wurde eine GaN-Schicht, die Mg enthält, mit einer Dicke von 15 nm aufgewachsen.

[0108] Anschließend wurde der epitaktische Wafer, auf dem die oben genannten Schichten gebildet wurden, aus dem MOCVD-Gerät herausgenommen, und der Grat 20c, die p-Elektrode 82, die Pad-Elektrode 83, die n-Elektrode 81 und dergleichen wurden unter Verwendung von Photolithographie, RIE und Sputtern gebildet. Anschließend wurde eine Vereinzelung durchgeführt, und der erste Schutzfilm 71 und der zweite Schutzfilm 72 wurden auf Endoberflächen gebildet, um das Halbleiterlaserelement zu erhalten. Der Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 71 betrug 90% und der Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms 72 betrug 98%. Das Halbleiterlaserelement weist eine Gratsbreite von 15 μm , eine Resonatorlänge von 300 μm und eine Elementbreite von 200 μm auf.

Erstes Vergleichsbeispiel

[0109] Als Halbleiterlaserelement eines ersten Vergleichsbeispiels wurde ein Halbleiterlaserelement mit der gleichen Struktur wie die des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels produziert, mit der

Ausnahme, dass in der Si enthaltenden $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$ -Schicht (erste Halbleiterschicht) keine Vorsprünge und Aussparungen gebildet wurden.

Zweites Vergleichsbeispiel

[0110] Als Halbleiterlaserelement eines zweiten Vergleichsbeispiels wurde ein Halbleiterlaserelement mit der gleichen Struktur wie die des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels produziert, mit der Ausnahme, dass in der Si enthaltenden $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ -Schicht (erste Halbleiterschicht) keine Vorsprünge und Aussparungen gebildet wurden.

Evaluation

[0111] Fig. 8 zeigt die I-L Charakteristiken der Halbleiterlaserelemente des ersten Beispiels und des ersten Vergleichsbeispiels. In Fig. 8 repräsentiert die horizontale Achse den Strom und die vertikale Achse die optische Ausgabe. Fig. 9 zeigt die Wellenlängenspektren der Halbleiterlaserelemente des ersten Beispiels und des ersten Vergleichsbeispiels. In Fig. 9 repräsentiert eine horizontale Achse eine Wellenlänge und eine vertikale Achse eine Intensität, die auf ein Gebiet normalisiert ist. Fig. 10 zeigt das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis (SMSR) des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels. Das Halbleiterlaserelement des ersten Beispiels emittierte Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von etwa 512 nm. Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels betrug 23,4 dB. Die Spektralbreite des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels betrug 4 pm oder weniger. Das Halbleiterlaserelement gemäß dem ersten Vergleichsbeispiel führte eine Laseroszillation durch, wies aber viele Peaks eines Wellenlängenspektrums auf, d.h. es führte eine Laseroszillation in einer longitudinalen Multimode durch.

[0112] Der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements des ersten Beispiels betrug 34 mA. Der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements des ersten Vergleichsbeispiels betrug 28 mA. Die Differenz des Schwellenstroms zwischen dem ersten Beispiel und dem ersten Vergleichsbeispiel betrug 6 mA, und es kann gesagt werden, dass das Halbleiterlaserelement des ersten Beispiels in der Lage war, einen Anstieg des Schwellenstroms aufgrund der Bereitstellung der periodischen Struktur zu unterdrücken.

[0113] Fig. 11 zeigt die I-L Charakteristiken der Halbleiterlaserelemente des zweiten Beispiels und des zweiten Vergleichsbeispiels. In Fig. 11 repräsentiert die horizontale Achse den Strom und die vertikale Achse die optische Ausgabe. Fig. 12 und 13 zeigen die Wellenlängenspektren der Halbleiterlaserelemente des zweiten Beispiels bzw. des zweiten Vergleichsbeispiels. In den Fig. 12 und

13 repräsentiert eine horizontale Achse die Wellenlänge und eine vertikale Achse die Intensität, die auf ein Gebiet normalisiert ist. **Fig. 14** zeigt das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis (SMSR) des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels. Das Halbleiterlaserelement des zweiten Beispiels emittierte Laserlicht mit einer Peak-Wellenlänge von etwa 532 nm. Das Seitenmodenunterdrückungsverhältnis des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels betrug 15 dB. Die Spektralbreite des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels betrug 7 pm oder weniger. Das Halbleiterlaserelement gemäß dem zweiten Vergleichsbeispiel führte eine Laseroszillation durch, wies aber viele Peaks eines Wellenlängenspektrums auf, d.h. es führte eine Laseroszillation in einer longitudinalen Multimode durch.

[0114] Der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels betrug 65 mA. Der Schwellenstrom des Halbleiterlaserelements des zweiten Vergleichsbeispiels betrug 60 mA. Die Differenz des Schwellenstroms zwischen dem zweiten Beispiel und dem zweiten Vergleichsbeispiel betrug 5 mA, und es kann gesagt werden, dass das Halbleiterlaserelement des zweiten Beispiels in der Lage war, einen Anstieg des Schwellenstroms aufgrund der Bereitstellung der periodischen Struktur zu unterdrücken.

[0115] **Fig. 15** stellt eine durch das STEM erhaltene Z-Kontrast-Abbildung für einen Teil des Halbleiterlaserelements des zweiten Beispiels dar. **Fig. 15** ist eine Z-Kontrast-Abbildung eines Querschnitts eines Bereichs, der den ersten Halbleiterbereich 31a und den zweiten Halbleiterbereich 31b enthält. In der Z-Kontrast-Abbildung kann ein Unterschied in der Zusammensetzung als Unterschied in der Anzeigedichte in der Abbildung beobachtet werden. In **Fig. 15** sind der erste Halbleiterbereich 31a und der zweite Halbleiterbereich 31b mit unterschiedlichen Anzeigedichten dargestellt, und es ist zu erkennen, dass der erste Halbleiterbereich 31a und der zweite Halbleiterbereich 31b unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen. Aus **Fig. 15** ist ersichtlich, dass eine Kontraständerung vom ersten Halbleiterbereich 31a zum zweiten Halbleiterbereich 31b am Boden des ausgesparten Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a sanfter ist als an der lateralen Oberfläche des ausgesparten Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a. Da das STEM auch Informationen über die Tiefe einer Probe aufnimmt, ist eine Kontraständerung an der Grenze einer Halbleiterschicht oder eines Halbleiterbereichs tendenziell sanft, aber der Grund, warum der Kontrast am Boden des ausgesparten Bereichs des ersten Halbleiterbereichs 31a besonders sanft ist, liegt darin, dass die Tiefe des ausgesparten Bereichs in einer Tiefenrichtung variieren kann und sich die Zusammensetzung des ersten Halbleiterbereichs 31a gra-

duell in Richtung der Zusammensetzung des zweiten Halbleiterbereichs 31b ändern kann.

[0116] Diese Offenbarung enthält die folgenden Erfindungen.

(2) Halbleiterlaserelement nach (1),

wobei ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als ein durchschnittlicher Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht, und wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht.

(3) Halbleiterlaserelement nach (1) oder (2), wobei ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als ein Brechungsindex der n-seitigen Barrierschicht.

(4) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (3), wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 200 nm oder mehr beträgt.

(5) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (4), wobei eine Distanz von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht zu der Wellenschicht größer als 300 nm ist. (6) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (5), wobei eine Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 nm oder mehr beträgt.

(7) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (6), wobei mindestens eines von beiden Enden der periodischen Struktur in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers lokalisiert ist.

(8) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (7), wobei die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht eine Mehrzahl von ersten Bereichen und eine Mehrzahl von zweiten Bereichen umfasst, wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils einen Brechungsindex aufweist, der größer ist als ein Brechungsindex von jedem der Mehrzahl von ersten Bereichen, und wobei die periodische Struktur durch abwechselndes Anordnen der Mehrzahl von ersten Bereichen und der Mehrzahl von zweiten Bereichen entlang der Resonanzrichtung gebildet ist.

(9) Halbleiterlaserelement nach (8), wobei mindestens eines von beiden Enden von entweder der Mehrzahl von ersten Bereichen oder der Mehrzahl von zweiten Bereichen in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers lokalisiert ist.

(10) Halbleiterlaserelement nach (8) oder (9), wobei die Mehrzahl von ersten Bereichen

jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Ga umfasst, und wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der In und Ga umfasst.

(11) Halbleiterlaserelement nach (10), enthaltend:

eine n-seitige Mantelschicht, die auf der der aktiven Schicht gegenüberliegenden Seite der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist; und

eine dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die zwischen der n-seitigen Mantelschicht und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist und einen Brechungsindex aufweist, der zwischen einem Brechungsindex der n-seitigen Mantelschicht und einem durchschnittlichen Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht liegt.

(12) Halbleiterlaserelement nach (8) oder (9), wobei die Mehrzahl von ersten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Al und Ga umfasst, und wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Ga umfasst.

(13) Halbleiterlaserelement nach (12), enthaltend:

eine vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die zwischen der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist,

wobei ein Brechungsindex der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht niedriger als ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und größer als ein durchschnittlicher Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht ist.

(14) Halbleiterlaserelement nach (13), wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht.

(15) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (14), wobei eine Breite des optischen Wellenleiters in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung 10 μm oder mehr beträgt.

(16) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (15), wobei eine Länge des optischen Wellenleiters in der Resonanzrichtung 1000 μm oder mehr beträgt.

(17) Halbleiterlaserelement nach einem von (1) bis (16),

wobei der Nitrid-Halbleiterschichtkörper eine lichtemittierende Endoberfläche und eine licht-

reflektierende Endoberfläche umfasst, wobei das Halbleiterlaserelement einen ersten Schutzfilm, der auf der lichtemittierenden Endoberfläche vorgesehen ist, und einen zweiten Film umfasst, der auf der lichtreflektierenden Endoberfläche vorgesehen ist, und wobei ein Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 30 % oder mehr und weniger als ein Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms beträgt.

Bezugszeichenliste

10	Optischer Wellenleiter
20	Nitrid-Halbleiterschichtkörper
20a	Lichtemittierende Endoberfläche
20b	Lichtreflektierende Endoberfläche
20c	Grat
30	n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
31	Erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
31a	Erster Halbleiterbereich
31b	Zweiter Halbleiterbereich
32	Zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
33	Dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
34	Vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
35	Fünfte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
40	Aktive Schicht
41	Well-Schicht
42	Barrierschicht
50	p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht
60	Substrat
71	Erster Schutzfilm
72	Zweiter Schutzfilm
73	Isolierender Film
81	n-Elektrode
82	p-Elektrode
83	Pad-Elektrode
100	Halbleiterlaserelement

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- WO 2019146321 [0003]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- M. J. Bergmann, et. Al., JOURNAL OF APPLIED PHYSICS vol. 84 (1998) pp. 1196 bis 1203 [0028]

Patentansprüche

1. Halbleiterlaserelement umfassend:
 einen Nitrid-Halbleiterschichtkörper, der einen optischen Wellenleiter umfasst,
 wobei der Nitrid-Halbleiterschichtkörper umfasst
 eine erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die eine periodische Struktur eines Brechungsindexes aufweist, der sich entlang einer Resonanzrichtung des optischen Wellenleiters periodisch ändert,
 eine zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht,
 eine aktive Schicht, die eine oder mehrere Wellenschichten und eine oder mehrere Barrierschichten umfasst, und
 eine p-seitige Nitrid-Halbleiterschicht in dieser Reihenfolge,
 wobei die aktive Schicht eine n-seitige Well-Schicht, die von der einen oder den mehreren Well-Schichten am nächsten zu der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht lokalisiert ist, und eine n-seitige Barrierschicht umfasst, die von der einen oder den mehreren Barrierschichten zwischen der n-seitigen Well-Schicht und der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht lokalisiert ist,
 wobei die zweite n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht eine Nitrid-Halbleiterschicht ist, die In und Ga umfasst, und
 wobei eine Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der n-seitigen Barrierschicht.

2. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 1,
 wobei ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als ein durchschnittlicher Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht, und
 wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht.

3. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 1 oder 2, wobei ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als ein Brechungsindex der n-seitigen Barrierschicht.

4. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 200 nm oder mehr beträgt.

5. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei eine Distanz von der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht zu der Well-Schicht größer als 300 nm ist.

6. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei eine Dicke der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht 50 nm oder mehr beträgt.

7. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei mindestens eines von beiden Enden der periodischen Struktur in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers lokalisiert ist.

8. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
 wobei die erste n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht eine Mehrzahl von ersten Bereichen und eine Mehrzahl von zweiten Bereichen umfasst, wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils einen Brechungsindex aufweist, der größer ist als ein Brechungsindex von jedem der Mehrzahl von ersten Bereichen, und wobei die periodische Struktur durch abwechselndes Anordnen der Mehrzahl von ersten Bereichen und der Mehrzahl von zweiten Bereichen entlang der Resonanzrichtung gebildet ist.

9. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 8, wobei mindestens eines von beiden Enden von entweder der Mehrzahl von ersten Bereichen oder der Mehrzahl von zweiten Bereichen in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung innerhalb des Nitrid-Halbleiterschichtkörpers lokalisiert ist.

10. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 8 oder 9,
 wobei die Mehrzahl von ersten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Ga umfasst, und
 wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der In und Ga umfasst.

11. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 10, umfassend:
 eine n-seitige Mantelschicht, die auf der der aktiven Schicht gegenüberliegenden Seite der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist; und
 eine dritte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die zwischen der n-seitigen Mantelschicht und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist und einen Brechungsindex aufweist, der zwischen einem Brechungsindex der n-seitigen Mantelschicht und einem durchschnittlichen Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht liegt.

12. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 8 oder 9,
 wobei die Mehrzahl von ersten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Al und Ga umfasst, und
 wobei die Mehrzahl von zweiten Bereichen jeweils aus einem Nitrid-Halbleiter hergestellt ist, der Ga umfasst.

13. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 12, umfassend:
 eine vierte n-seitige Nitrid-Halbleiterschicht, die zwi-

schen der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht angeordnet ist,

wobei ein Brechungsindex der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht niedriger als ein Brechungsindex der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht und größer als ein durchschnittlicher Brechungsindex der ersten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht ist.

14. Halbleiterlaserelement nach Anspruch 13, wobei die Dicke der zweiten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht größer ist als eine Dicke der vierten n-seitigen Nitrid-Halbleiterschicht.

15. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei eine Breite des optischen Wellenleiters in einer Richtung orthogonal zu der Resonanzrichtung 10 μm oder mehr beträgt.

16. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei eine Länge des optischen Wellenleiters in der Resonanzrichtung 1000 μm oder mehr beträgt.

17. Halbleiterlaserelement nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei der Nitrid-Halbleiterschichtkörper eine lichtemittierende Endoberfläche und eine lichtreflektierende Endoberfläche umfasst, wobei das Halbleiterlaserelement einen ersten Schutzfilm, der auf der lichtemittierenden Endoberfläche vorgesehen ist, und einen zweiten Film umfasst, der auf der lichtreflektierenden Endoberfläche vorgesehen ist, und wobei ein Reflexionsgrad des ersten Schutzfilms 30 % oder mehr und weniger als ein Reflexionsgrad des zweiten Schutzfilms beträgt.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

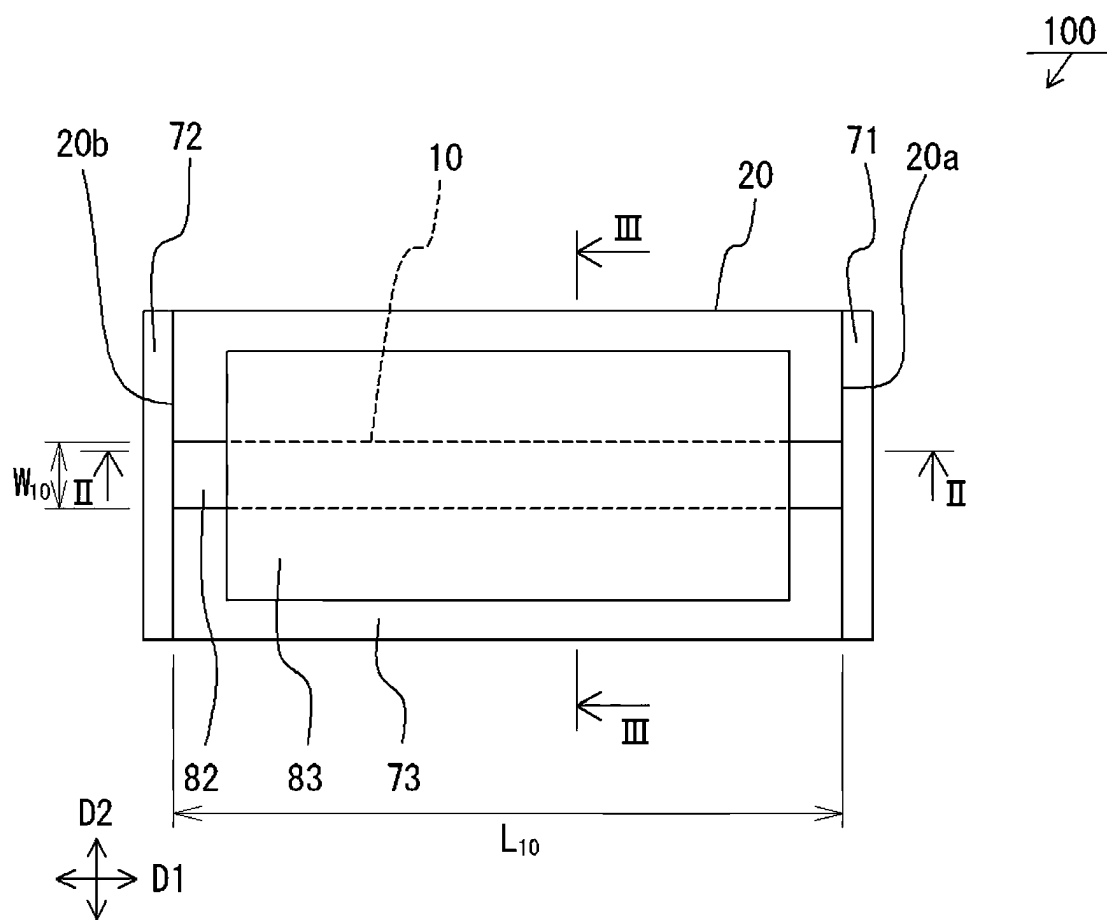


FIG. 2

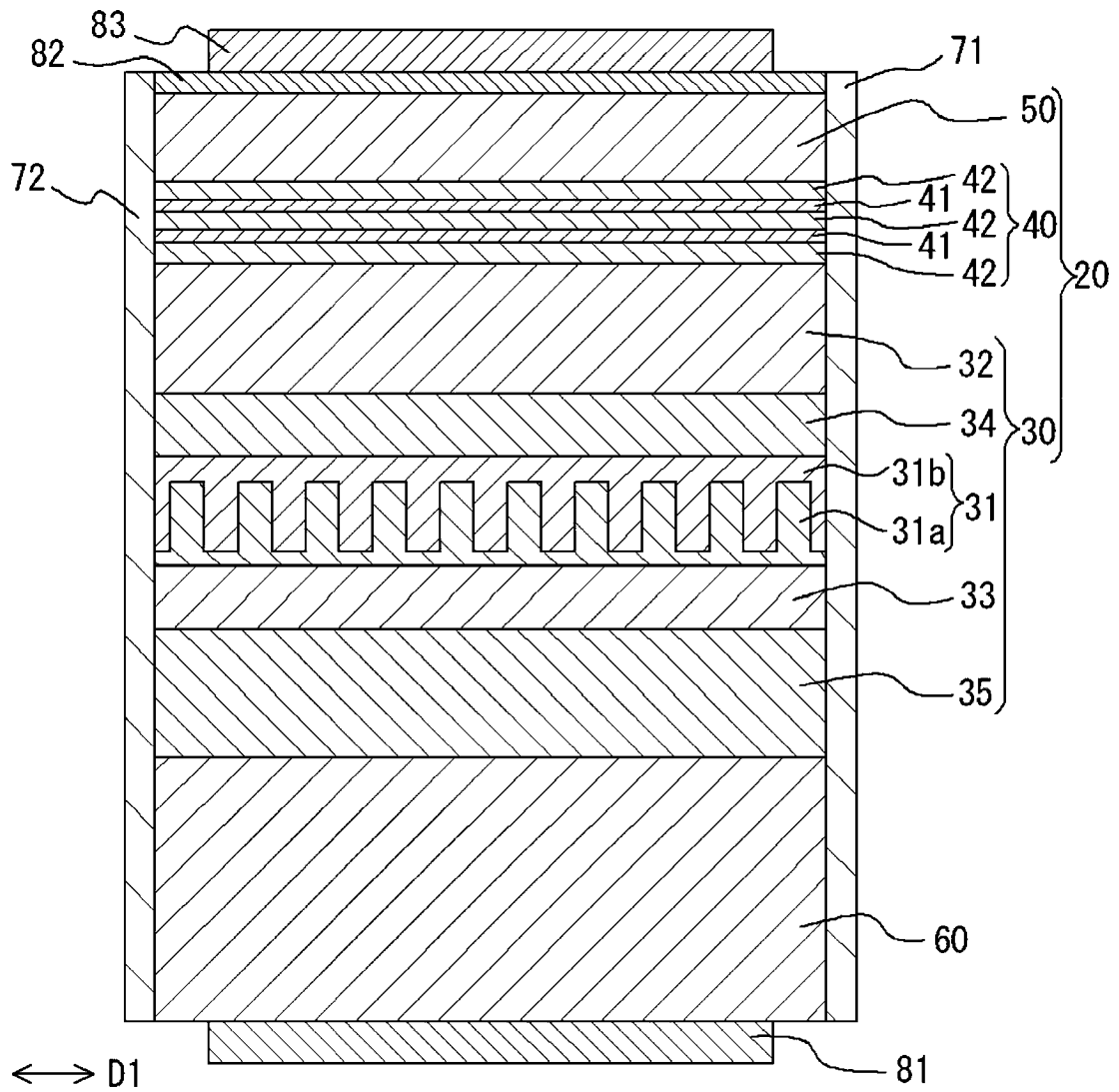


FIG. 3

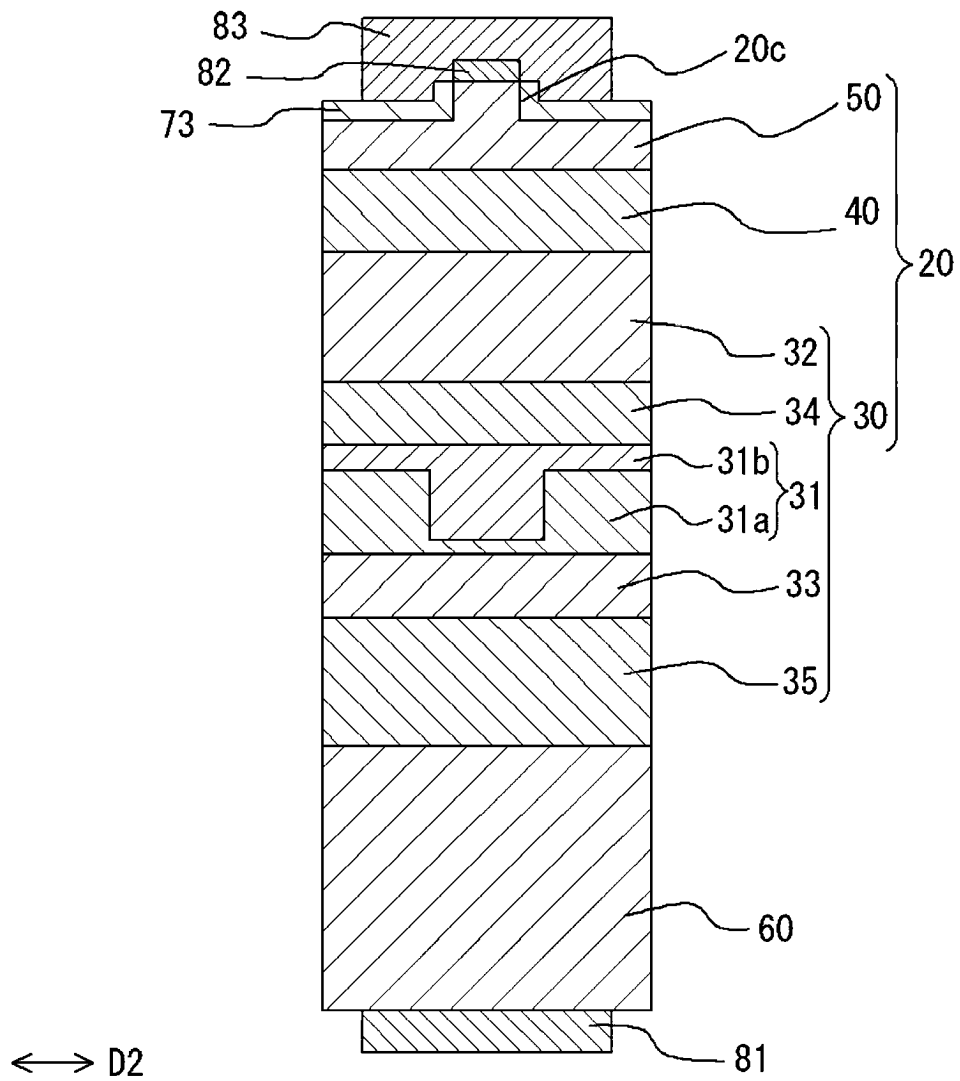


FIG. 4

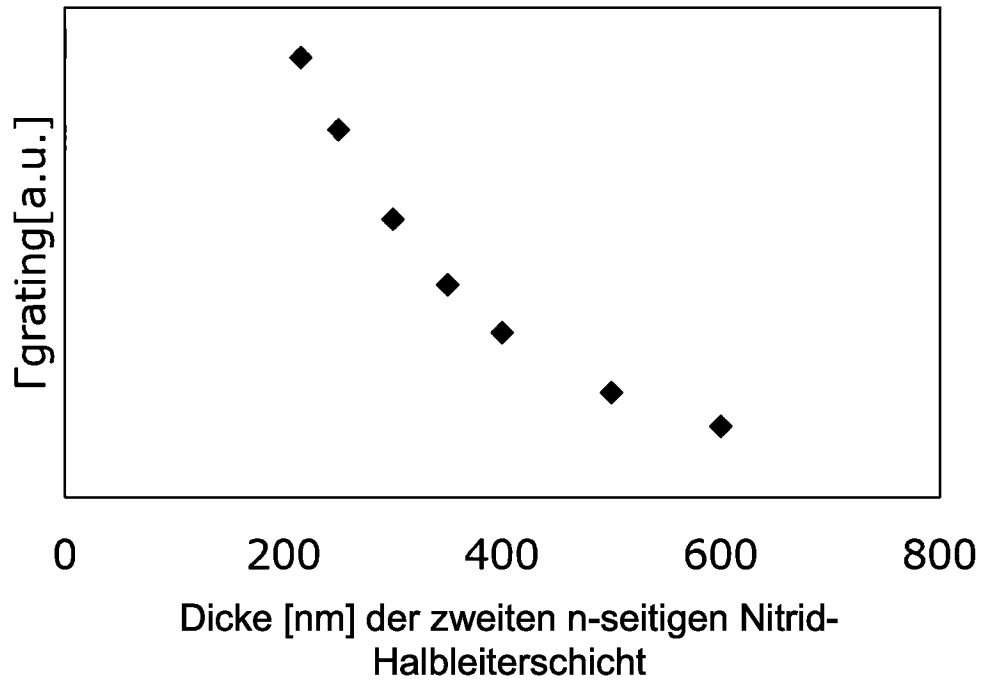


FIG. 5

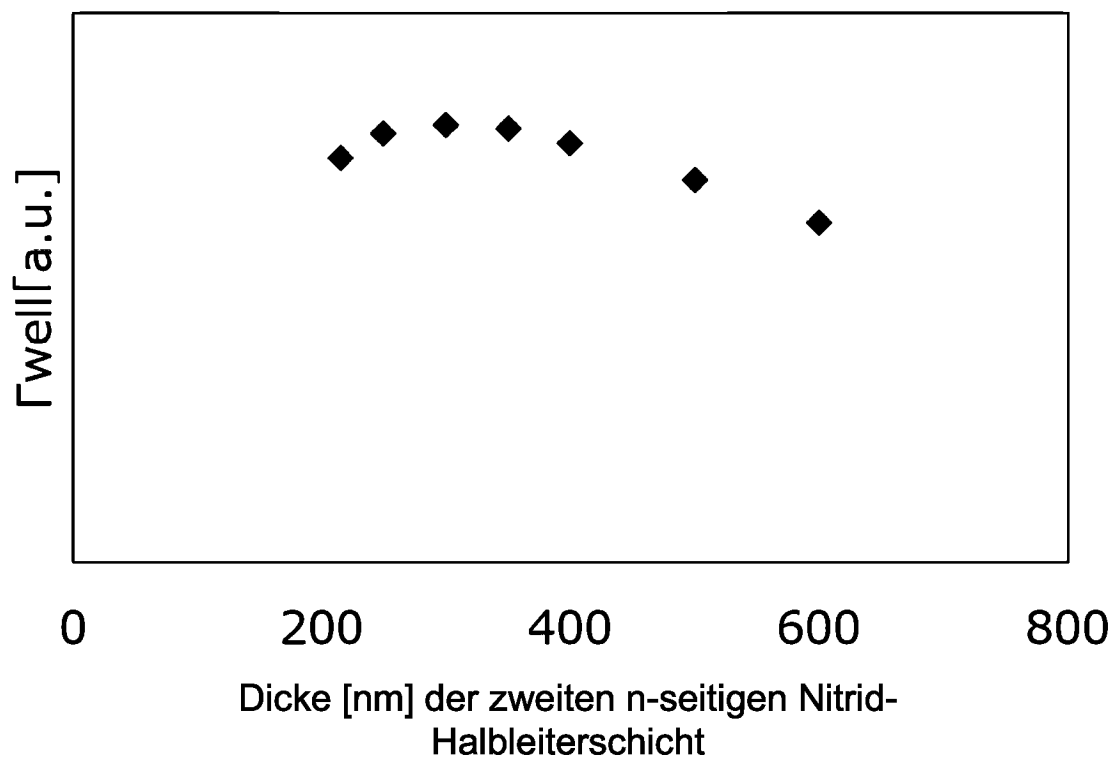


FIG. 6

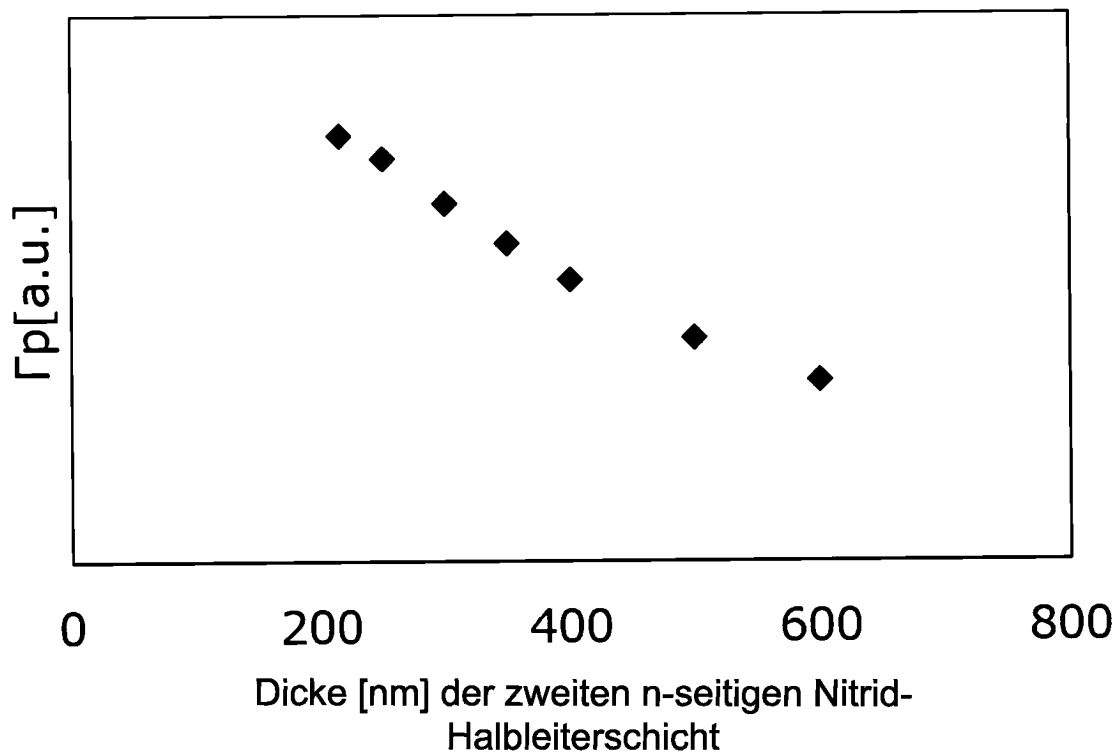


FIG. 7

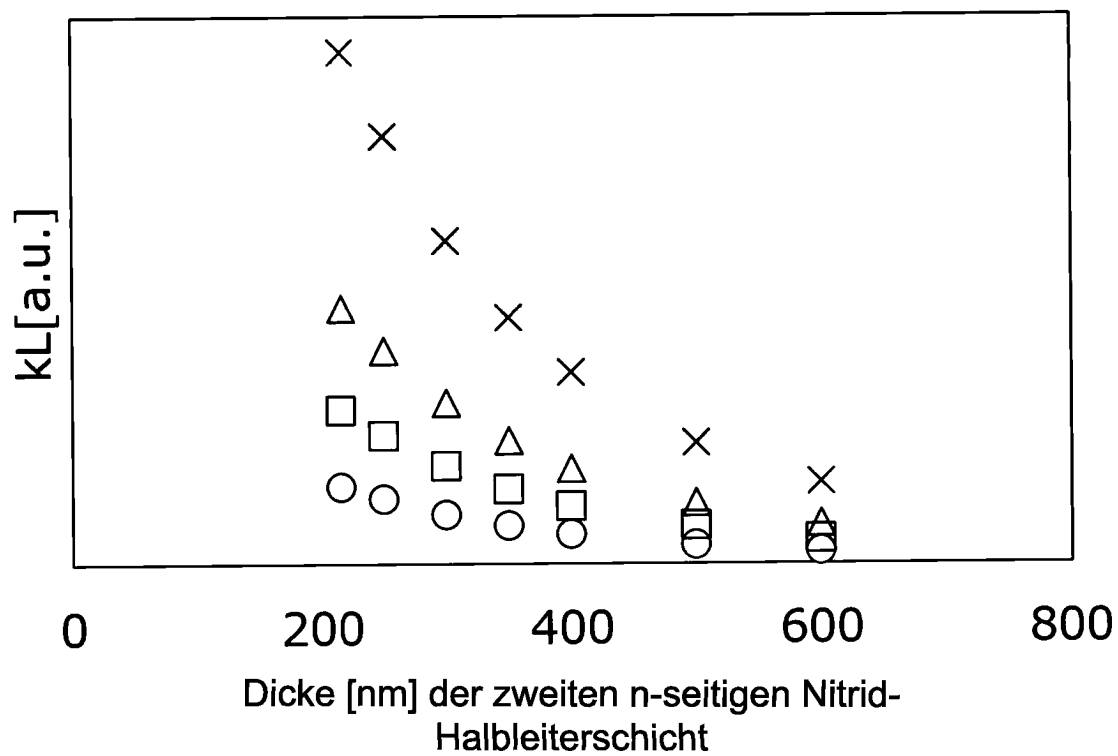


FIG. 8

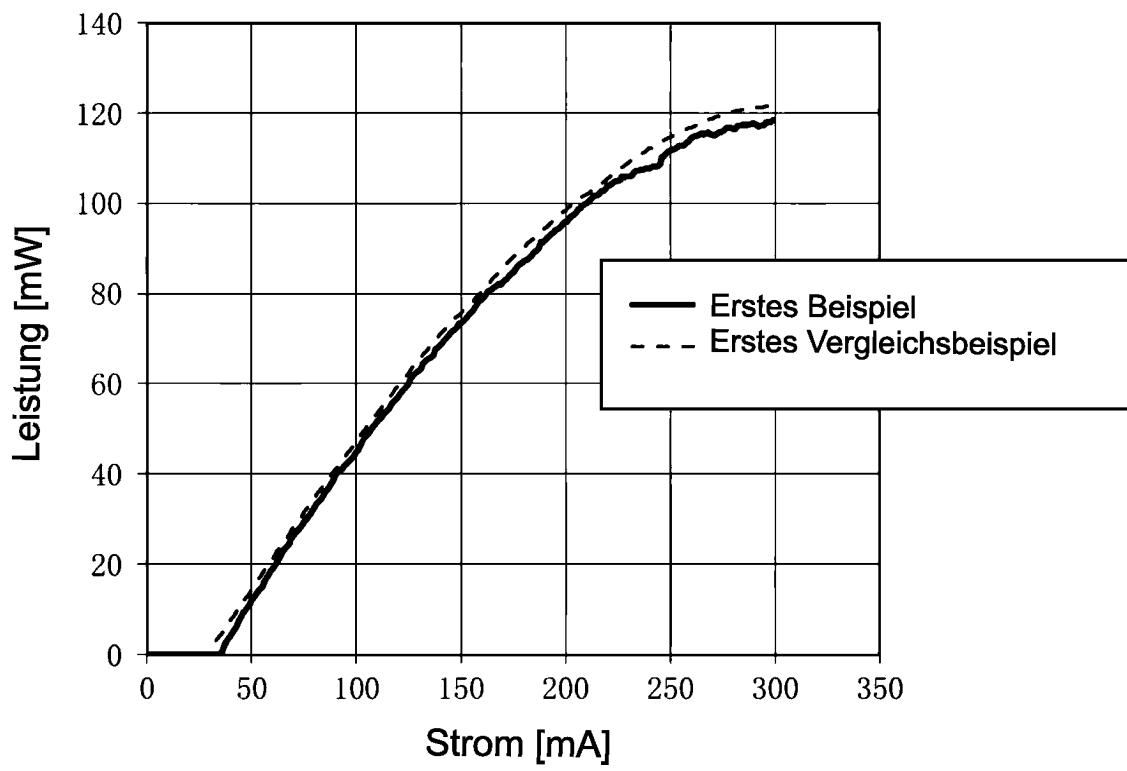


FIG. 9

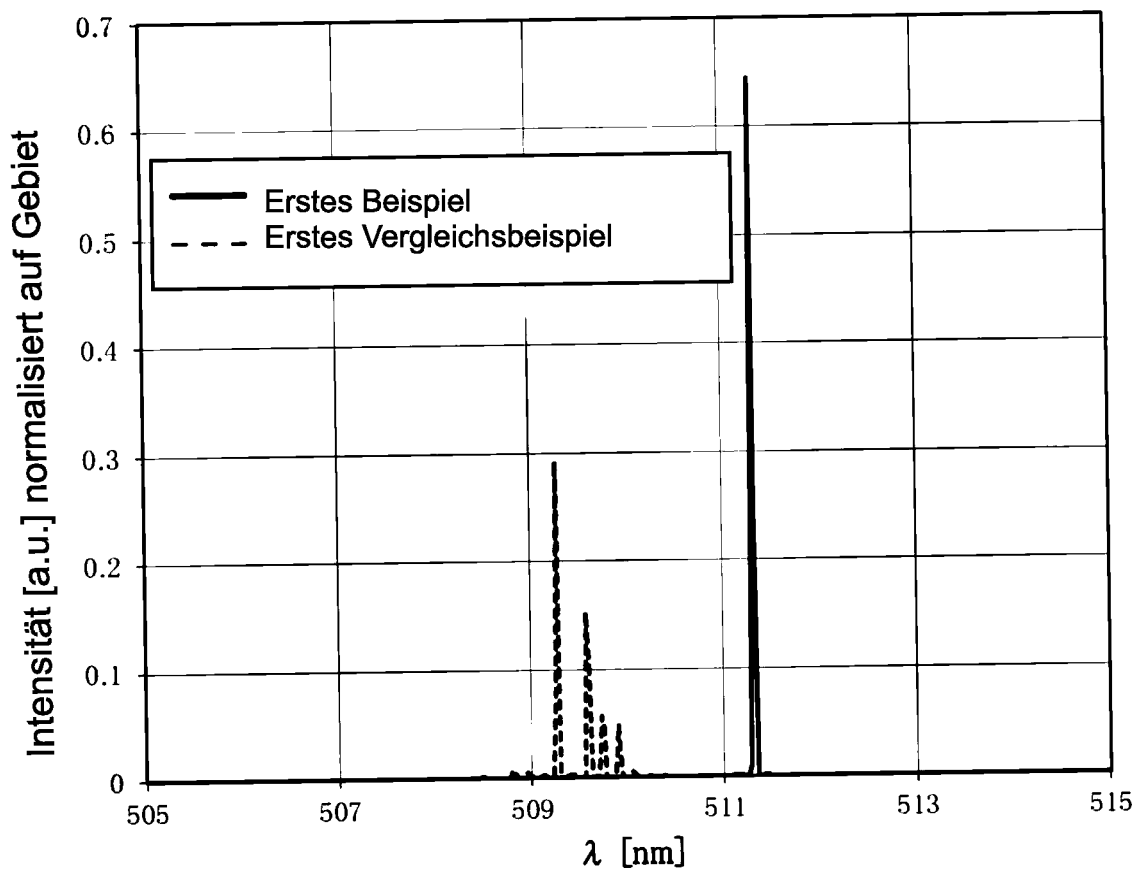


FIG. 10

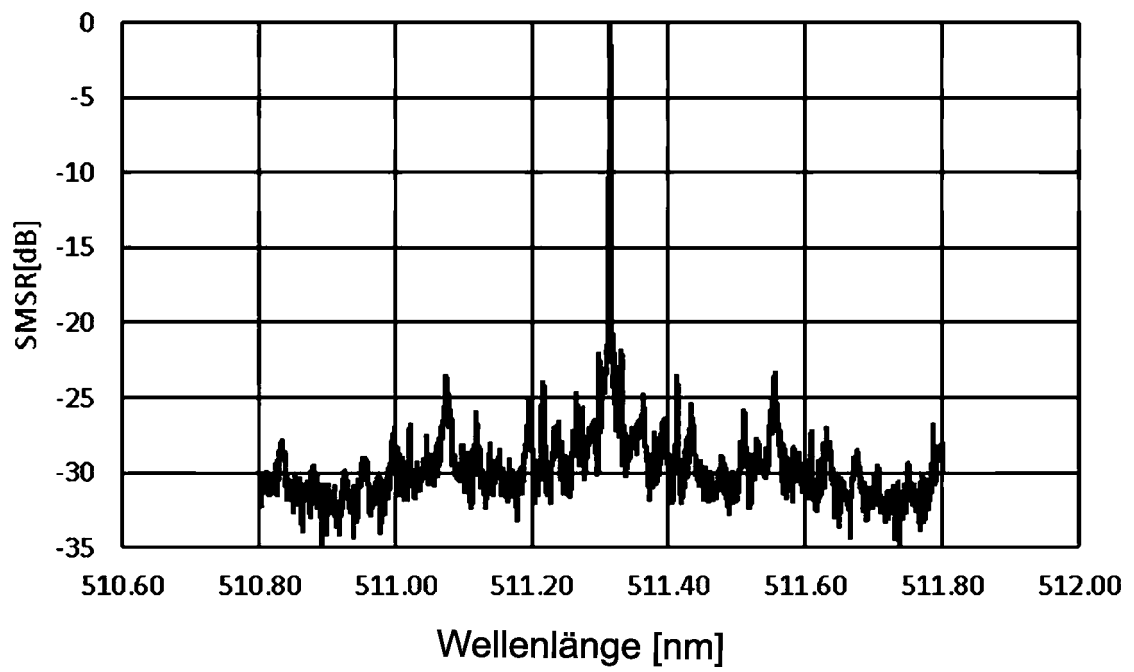


FIG. 11

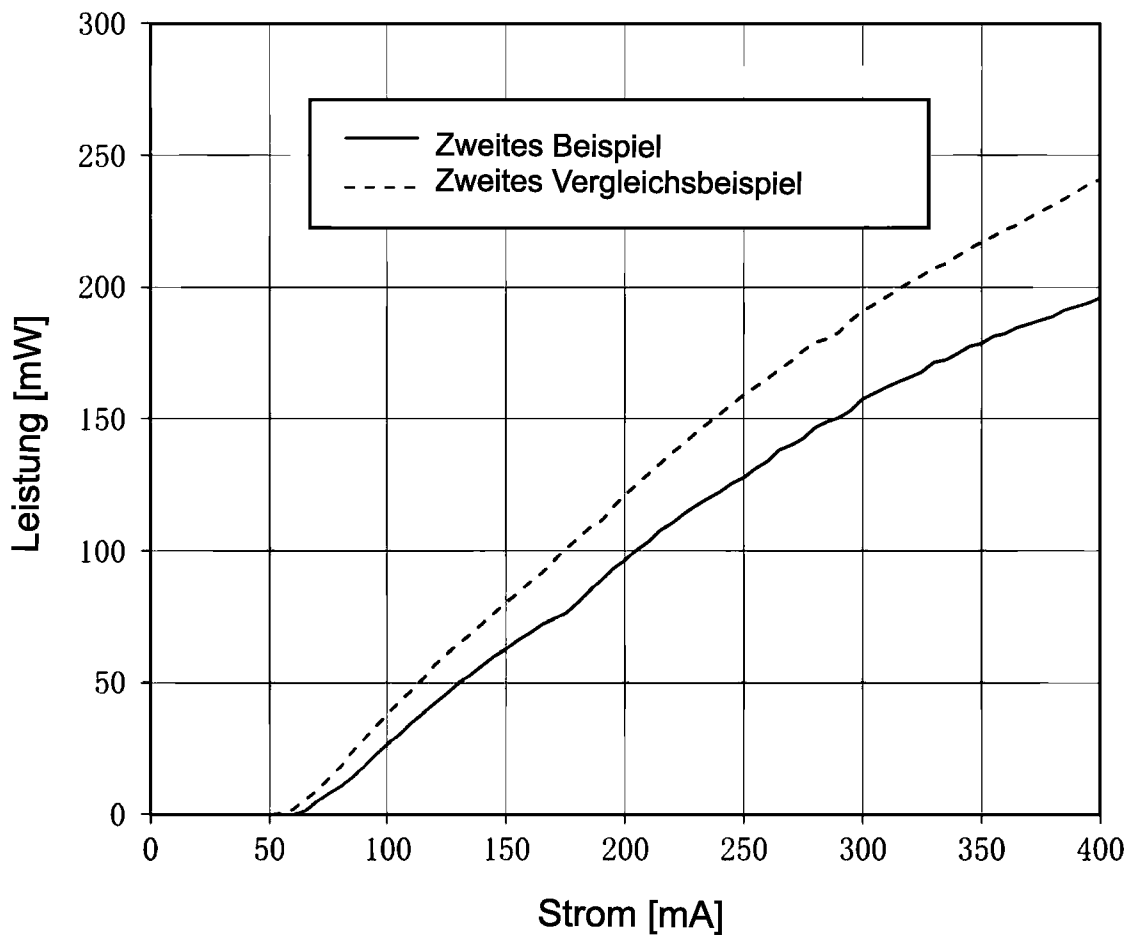


FIG. 12

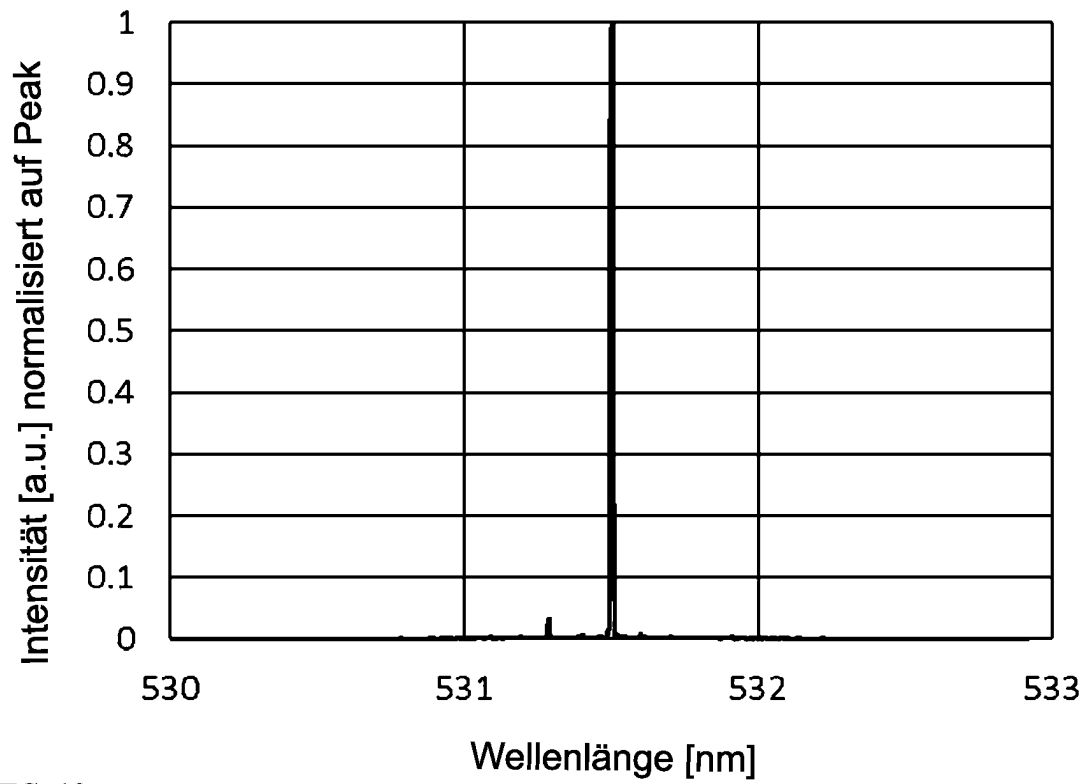


FIG. 13

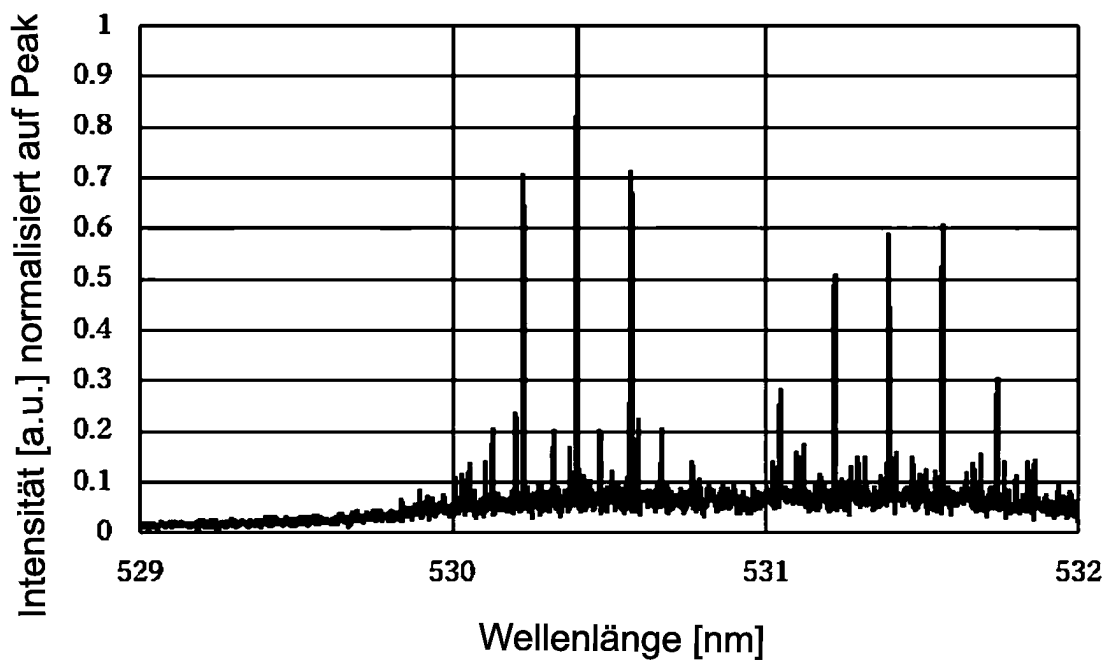


FIG. 14

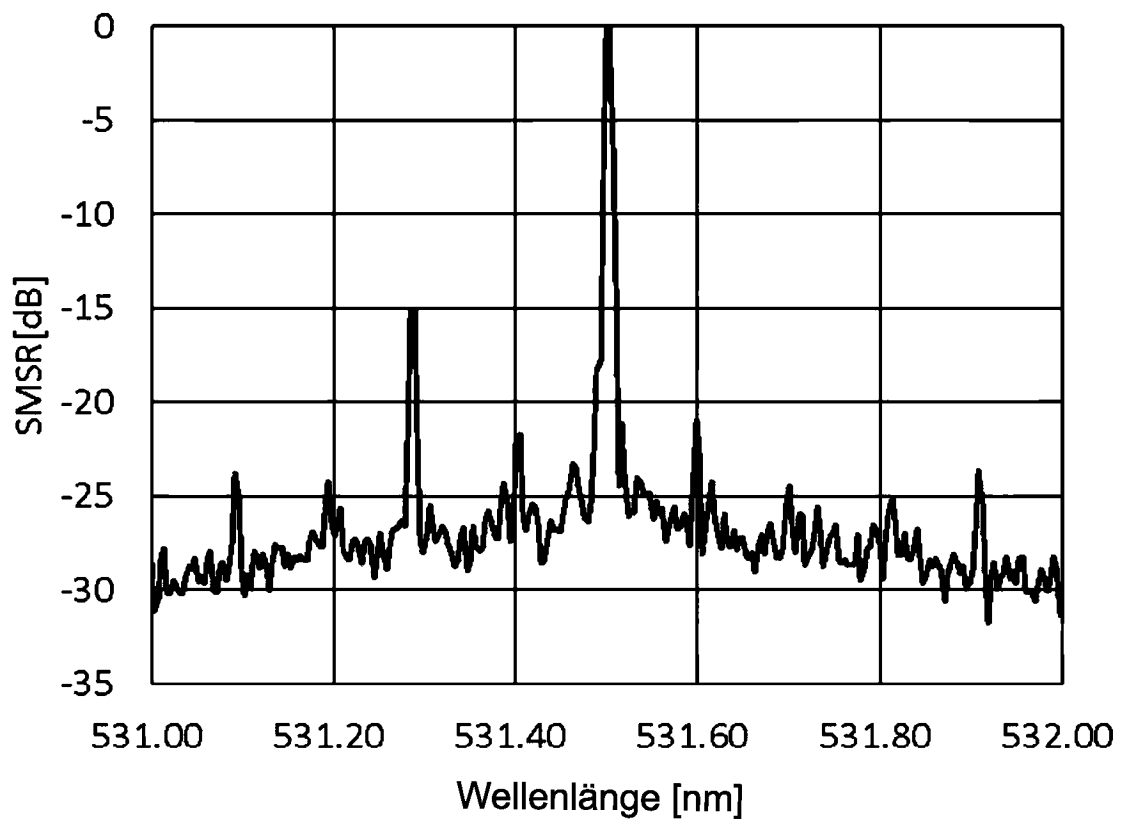


FIG. 15

