

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-363534

(P2004-363534A)

(43) 公開日 平成16年12月24日(2004.12.24)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
HO 1 S 5/028	HO 1 S 5/028	2HO37
GO 2 B 1/11	GO 2 B 6/42	2K009
GO 2 B 6/42	GO 2 B 1/10	5F073

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 34 頁)

(21) 出願番号	特願2003-275437 (P2003-275437)	(71) 出願人	000006013 三菱電機株式会社
(22) 出願日	平成15年7月16日 (2003.7.16)		東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
(31) 優先権主張番号	特願2002-259983 (P2002-259983)	(74) 代理人	100064746 弁理士 深見 久郎
(32) 優先日	平成14年9月5日 (2002.9.5)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100085132 弁理士 森田 俊雄
(31) 優先権主張番号	特願2003-135986 (P2003-135986)	(74) 代理人	100083703 弁理士 仲村 義平
(32) 優先日	平成15年5月14日 (2003.5.14)	(74) 代理人	100096781 弁理士 堀井 豊
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100098316 弁理士 野田 久登
		(74) 代理人	100109162 弁理士 酒井 将行

最終頁に続く

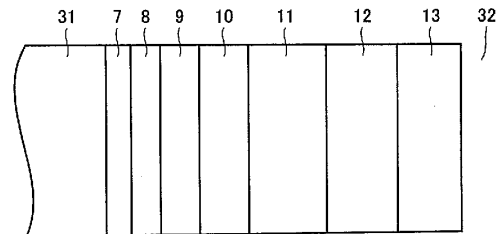
(54) 【発明の名称】 半導体光素子装置およびそれが用いられた半導体レーザモジュール

(57) 【要約】

【課題】 複数の膜のトータル膜厚が $n/4$ とは異なる値の場合においても、無反射膜の設計の自由度を向上させることができる半導体光素子装置を提供する。

【解決手段】 無反射膜を、それぞれ屈折率が1よりも大きな値を有する複数の膜であって、半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも高い値の屈折率を有する高反射率膜（第1の膜7、第3の膜9、第5の膜11）と、半導体レーザ31の実効屈折率の平方根の値よりも低い値の屈折率を有する低屈折率膜（第2の膜8、第4の膜10、第6の膜12、第7の膜13）とを用いて構成された複数の膜により構成する。この複数の膜は、複数の膜それぞれが単一の組成からなるとともに、複数の膜の組成の種類が3以上であり、かつ、全体として振幅反射率の実部と虚部とがともにゼロとなるように構成されている。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

半導体光素子と、

該半導体光素子が出射した出射光が入射されるとともに、特定の波長の光に対して、入射光と該入射光が反射された反射光とを干渉させて、光の反射率を実質的にゼロにする無反射膜とを備え、

該無反射膜は、

それぞれ屈折率が 1 よりも大きな値を有する複数の膜であって、前記半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも高い値の屈折率を有する高屈折率膜と、前記半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも低い値の屈折率を有する低屈折率膜とを用いて構成された複数の膜からなり、

10

該複数の膜は、該複数の膜それぞれが単一の組成からなるとともに、複数の膜の組成の種類が 3 以上であり、かつ、全体として振幅反射率の実部と虚部とがともにゼロとなるように構成された、半導体光素子装置。

【請求項 2】

前記複数の膜は、それぞれの膜厚と屈折率との積の総和が、前記半導体光素子が出射する光の $1/4$ 波長よりも大きい、請求項 1 に記載の半導体光素子装置。

【請求項 3】

前記複数の膜のうち前記半導体光素子に隣接するように設けられた隣接膜は、他の膜よりも熱伝導率が大きい、請求項 1 または 2 に記載の半導体光素子装置。

20

【請求項 4】

前記隣接膜が、窒化アルミニウムである、請求項 3 に記載の半導体光素子装置。

【請求項 5】

前記無反射膜が 1 % 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 100 nm 以上である、請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の半導体光素子装置。

【請求項 6】

前記半導体光素子に隣接する第 1 層膜は、前記半導体光素子の実効屈折率の平方根より小さい屈折率を有する材料により構成された、請求項 1 または 2 に記載の半導体光素子装置。

【請求項 7】

前記半導体光素子に接する第 1 層膜および該第 1 層膜に接する第 2 層膜それぞれは、前記半導体光素子の実効屈折率の平方根より小さい屈折率を有する材料により構成された、請求項 1 または 2 に記載の半導体光素子装置。

30

【請求項 8】

前記半導体光素子は、半導体レーザ、半導体増幅器、スーパーluminescentダイオード、および半導体光変調器のうちのいずれかである、請求項 1 ~ 7 のいずれかに記載の半導体光素子装置。

【請求項 9】

前記半導体光素子が半導体レーザである請求項 1 ~ 7 のいずれかに記載の半導体光素子装置と、

40

前記半導体素子装置の外部に設けられた前記無反射膜の反射率よりも高い反射率を有する第 1 反射膜と、

前記半導体素子装置の前記無反射膜が設けられている端面とは異なる端面に設けられ、所定の波長の光に対して前記無反射膜の反射率よりも高い反射率を有する第 2 反射膜とを備え、

前記第 1 反射膜および前記第 2 反射膜それぞれで反射された特定の波長の光は、前記無反射膜を透過するとともに、前記第 1 反射膜と前記第 2 反射膜との間で発振する、半導体レーザモジュール。

【請求項 10】

前記第 1 反射膜は、光ファイバ内に設けられたファイバグレーティングまたはフィルタ

50

である、請求項 9 に記載の半導体レーザモジュール。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光を出射する半導体光素子を備えた半導体光素子装置およびそれが用いられた半導体レーザモジュールに関するものである。

【背景技術】

【0002】

まず、図 19 を用いて、特開 2001 - 196685 号公報に開示された従来の半導体光素子装置の構成を説明する。従来の半導体光素子装置は、図 19 に示すように、半導体光素子の一例の実効屈折率が n_c の半導体レーザ 101 と半導体レーザ 101 の光の出射面に接して設けられた無反射膜とを備えている。

10

【0003】

また、無反射膜は、半導体レーザ 101 の端面に接して設けられ、屈折率が n_1 でありかつ膜厚が d_1 である第 1 の膜 102、第 1 の膜 102 の端面に接して設けられ、屈折率が n_2 でありかつ膜厚が d_2 である第 2 の膜 103、および、第 2 の膜 103 の端面に接して設けられ、屈折率が n_3 でありかつ膜厚が d_3 である第 3 の膜 104 とを備えている。

【特許文献 1】特開 2001 - 196685 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

20

【0004】

図 20 には、実効屈折率が $n_c = 3.2$ である半導体レーザに用いられた無反射膜の反射率の波長依存性のデータが示されている。図 20 に示すデータは、波長 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ の光を半導体レーザが出射したときの無反射膜の反射率の波長依存性のデータである。

【0005】

図 20 のデータ 105 は、屈折率が $n_1 = 1.6$ でありかつ膜厚 $d_1 = 106.2 \text{ nm}$ のアルミナ、屈折率 $n_2 = 3.2$ でありかつ膜厚 $d_2 = 10.6 \text{ nm}$ のアモルファスシリコン、および、屈折率 $n_3 = 1.45$ でありかつ膜厚 $d_3 = 73.9 \text{ nm}$ の石英により構成された無反射膜の反射率の波長依存性を示すデータである。

【0006】

30

また、図 20 のデータ 106 は、屈折率 $n_1 = 1.6$ でありかつ膜厚 $d_1 = 512.5 \text{ nm}$ のアルミナ、屈折率 $n_2 = 3.2$ でありかつ膜厚 $d_2 = 10.6 \text{ nm}$ のアモルファスシリコン、および、屈折率 $n_3 = 1.45$ および膜厚 $d_3 = 73.9 \text{ nm}$ の石英により構成された無反射膜の反射率の波長依存性を示すデータである。

【0007】

半導体レーザ 101 の実効屈折率 $n_c = 3.2$ の場合、その平方根の屈折率は $n_f = 1.78885$ である。また、波長 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ の光においては、波長 λ の $1/4$ は 325 nm となる。

【0008】

前述の 3 種類の膜のトータル膜厚 $(d_1 \times n_1 + d_2 \times n_2 + d_3 \times n_3)$ が λ の $1/4$ とほぼ等しい場合には、波長依存性を示すデータ 105 に示すように、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は 257 nm となる。

40

【0009】

一方、無反射膜の熱伝導率を高めるため、3 種類の膜のトータル膜厚 $(d_1 \times n_1 + d_2 \times n_2 + d_3 \times n_3)$ を約 961 nm にすると、波長依存性を示すデータ 106 に示すように、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 78 nm になる。

【0010】

従来の半導体光素子装置は、半導体光素子の一例の半導体レーザの無反射膜に、前述の 3 種類の膜が用いられている。しかしながら、その 3 種類の膜のトータル膜厚 (各層ごとに膜厚と屈折率とを掛けたものの総和) を $\lambda/4$ 以外の $\lambda/4$ の整数倍の値にすると、無

50

反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が極端に狭くなる。より具体的に言うと、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲を100nm以上にすることが困難であるという問題がある。したがって、特開2001-196685号公報に開示された従来の半導体光素子装置では、トータル膜厚を $\lambda/4$ とは異なる値にすることができない。

【0011】

そこで、上述の特開2001-196685号公報に開示された従来の半導体光素子装置に生じる問題を解決する手段として、本願の発明者らは、本願の出願時において非公開の技術として、組成が異なる2種類の膜の振幅反射率の実部と虚部とをそれぞれゼロにするという設計手法により無反射膜を形成することを検討している。この設計手法によれば、組成が異なる2種類の膜のトータル膜厚を $\lambda/4$ とは異なる値にすることが可能になる。

10

【0012】

しかしながら、この設計手法では、無反射膜を構成する膜が2種類のみであるため、半導体光素子装置の無反射膜の設計の自由度を向上させることができない。この設計手法では、たとえば、振幅反射率の実部と虚部とがそれぞれゼロになる2種類の膜以外に、3種類目の膜として、半導体レーザの熱を効率よく放射することを可能にする膜を設けることができない。

【0013】

本発明は、上述の問題に鑑みてなされたものであり、その目的は、複数の膜のトータル膜厚が $\lambda/4$ とは異なる値の場合においても、無反射膜の設計の自由度を向上させることができる半導体光素子装置およびそれが用いられた半導体レーザモジュールを提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明の半導体光素子装置は、半導体光素子と、半導体光素子が出射した出射光が入射されるとともに、特定の波長の光に対して、入射光と入射光が反射された反射光とを干渉させて、光の反射率を実質的にゼロにする無反射膜とを備えている。

【0015】

また、無反射膜は、それぞれ屈折率が1よりも大きな値を有する複数の膜であって、半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも高い値の屈折率を有する高屈折率膜と、半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも低い値の屈折率を有する低屈折率膜とを用いて構成された複数の膜により構成されている。

30

【0016】

また、複数の膜は、複数の膜それぞれが単一の組成からなるとともに、複数の膜の組成の種類が3以上であり、かつ、全体として振幅反射率の実部と虚部とがともにゼロとなるように構成されている。

【0017】

上記の構成によれば、膜の組成の種類が3以上で構成された複数の膜のうち屈折率のみが既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜と、膜厚および屈折率がともに既知の膜とを用いて、複数の膜の全体の振幅反射率の実部と虚部とがともにゼロになるように、前述の特定の2種類の膜それぞれの膜厚を決定する設計手法を用いることができる。

40

【0018】

この設計手法によれば、無反射膜が2種類の膜で構成され、その2種類の膜の振幅反射率の実部と虚部とがともにゼロになるように設計する本願の発明者らが以前から検討している手法と比較して、無反射膜の設計の自由度が向上する。

【0019】

複数の膜は、それぞれの膜厚と屈折率との積の総和が、半導体光素子が出射する光の $\lambda/4$ 波長よりも大きいことが望ましい。

【0020】

50

このように、複数の膜それぞれの膜厚と屈折率との積の総和が、半導体光素子が出射する光の1/4波長よりも大きい場合に、上述の無反射膜の設計手法を用いれば、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲を、容易に、従来の無反射膜よりも広くすることができる。

【0021】

また、複数の膜のうち半導体光素子に隣接するように設けられた隣接膜は、他の膜よりも熱伝導率が大きいことが望ましい。また、隣接膜としては、窒化アルミニウムが適している。

【0022】

上記の構成によれば、半導体光素子の熱を効率的に放出することが実現された半導体光素子装置を、上記設計手法を用いて容易に設計することができる。

【0023】

また、複数の膜のうち半導体光素子に隣接するように設けられた隣接膜である第1層膜を半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも小さい屈折率を有する材料により構成することが望ましい。

【0024】

さらに、前述の第1層膜および第1層膜に隣接するように設けられた第2層膜のそれぞれを、前述の半導体光素子の実効屈折率の平方根の値よりも小さい屈折率を有する材料により構成することが望ましい。

【0025】

上記の構成によれば、第1層膜および第2層膜それぞれ内での光の吸収、ならびに第1層膜と第2層膜との界面での光の吸収を抑制することができる。そのため、第1層膜～第2層膜の間での光の吸収に起因する劣化が生じ難い半導体光素子を、上記設計方法を用いて容易に設計することができる。

【0026】

また、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は100nm以上である。

【0027】

上記の構成によれば、通常の状態における半導体光素子が出射する光の波長の変化に柔軟に適應することができる。

【0028】

また、前述の半導体光素子は、半導体レーザ、半導体増幅器、スーパーluminescentダイオード、および半導体光変調器のうちのいずれであってもよい。

【0029】

本発明の半導体レーザモジュールは、前述の半導体光素子が半導体レーザである半導体光素子装置を用いた半導体レーザモジュールである。半導体レーザモジュールは、半導体素子装置の外部に設けられた無反射膜の反射率よりも高い反射率を有する第1反射膜と、半導体素子装置の無反射膜が設けられている端面とは異なる側の端面に設けられた、所定の波長の光に対して無反射膜の反射率よりも高い反射率を有する第2反射膜とを備えている。

【0030】

また、第1反射膜および第2反射膜それぞれで反射された特定の波長の光は無反射膜を透過する。それにより、第1反射膜と第2反射膜との間で光が発振する。

【0031】

上記の構成によれば、前述の1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が従来の無反射膜よりも広がった無反射膜を利用して、半導体レーザ自身の利得と無反射膜の反射率とにより決定される発振を抑制することができる。

【0032】

本発明の半導体レーザモジュールは、第1反射膜は、光ファイバ内に設けられたファイバグレーティングまたはフィルタであることが望ましい。

【発明の効果】

10

20

30

40

50

【0033】

本発明によれば、複数の膜のトータル膜厚が $\lambda/4$ とは異なる値の場合においても、無反射膜の設計の自由度を向上させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0034】

以下、図に基づいて本発明の実施の形態の半導体光素子装置を説明する。

【0035】

実施の形態1.

以下、本実施の形態の半導体光素子装置の基本となる「特定の波長 λ で無反射になる2層構造の無反射膜」について説明する。

10

【0036】

図1に示す2層構造の無反射膜は、屈折率が n_1 でありかつ膜厚が d_1 である第1の膜1と屈折率が n_2 でありかつ膜厚が d_2 である第2の膜2とからなる2層構造膜、および、実効屈折率が n_c である半導体レーザ31が、屈折率が1である空気または窒素等の空間32内に設けられている。

【0037】

光の波長を λ 、未知数である第1の膜1および第2の膜2それぞれの位相を ϕ_1 および ϕ_2 とすると、次式(1a)、(1b)が成立する。

【0038】

【数1】

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (1a)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (1b)$$

20

【0039】

このとき、振幅反射率 r は次式(2)で表わされる。

【0040】

【数2】

$$r = \frac{(n_c - 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \left(\frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2 n_c}{n_1} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 - i \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} - n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} - n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\}}{(n_c + 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \left(\frac{n_2 n_c}{n_1} + \frac{n_1}{n_2} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 - i \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} + n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} + n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\}} \quad (2)$$

30

【0041】

この振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロとなるときの、未知数である第1の膜1および第2の膜2それぞれの膜厚 d_1 および膜厚 d_2 を算出する。逆に言うと、算出された第1の膜1および第2の膜2それぞれの膜厚 d_1 および膜厚 d_2 を有する2層構造の膜は、振幅反射率がゼロの無反射膜となる。

40

【0042】

また、電力反射率 R は、 $|r|^2$ で表わされる。このとき、次式(3a)(3b)を満たす場合に電力反射率 R はゼロとなる。

【0043】

【数 3】

$$n_c - 1 + (n_1/n_2 - n_2 n_c/n_1) \tan \phi_1 \tan \phi_2 = 0 \quad (3a)$$

$$(n_c/n_1 - n_1) \tan \phi_1 + (n_c/n_2 - n_2) \tan \phi_2 = 0 \quad (3b)$$

【0044】

たとえば、半導体レーザ 31 の実効屈折率 n_c を $n_c = 3.37$ とし、第 1 の膜 1 を Ta_2O_5 ($n_2 = 2.057$)、第 2 の膜 2 を Al_2O_3 ($n_1 = 1.62$)、および、光の波長を 980 nm とすると、第 1 の膜 1 の膜厚 d_1 および第 2 の膜の膜厚 d_2 がそれぞれ 71.34 nm および 86.20 nm のとき、第 1 の膜 1 および第 2 の膜 2 からなる 2 層構造の膜は、振幅反射率の実部と虚部とがそれぞれゼロになる。

【0045】

次に、前述の第 1 の膜 1 および第 2 の膜 2 からなる 2 層構造の無反射膜をさらに 2 段重ねた 4 層構造の無反射膜について説明する。図 2 に示すように、実効屈折率が n_c である半導体レーザ 31 と、4 層構造の無反射膜とが、屈折率が 1 である空気または窒素等の空間 32 内に設けられている。

【0046】

4 層構造の無反射膜は、屈折率が n_1 でありかつ膜厚が $A d_1$ である第 1 の膜 3、屈折率が n_2 でありかつ膜厚が $A d_2$ である第 2 の膜 4、屈折率が n_1 でありかつ膜厚が $B d_1$ である第 3 の膜 5、および、屈折率が n_2 でありかつ膜厚が $B d_2$ である第 4 の膜 6 により構成されている。

【0047】

前述の A および B は、所定のパラメータである。4 層構造の無反射膜の振幅反射率の実部と虚部とがそれぞれゼロとなるときの、4 層構造の無反射膜の各膜の膜厚の算出手法には、上記 2 層構造の無反射膜の場合と同様の手法を用いることが可能である。つまり、次式 (3c) (3d) を用いて、振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロとなるときの、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 を算出する。

【0048】

【数 4】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (3c)$$

但し、

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \quad (3d)$$

【0049】

たとえば、半導体レーザの実効屈折率 n_c は、 $n_c = 3.37$ であるものとする。また、第 1 の膜 3 および第 3 の膜 5 は、それぞれ Al_2O_3 ($n_1 = 1.62$) により構成されているものとする。また、第 2 の膜 4 および第 4 の膜 6 は、それぞれ Ta_2O_5 ($n_2 = 2.057$) により構成されているものとする。

【0050】

また、光の波長は 980 nm であるものとする。さらに、たとえば、パラメータは、 $A = 1.2$ および $B = 0.8$ であるものとする。未知数である第 1 の膜および第 3 の膜の膜厚 d_1 ならびに第 2 の膜および第 4 の膜の膜厚 d_2 が、それぞれ 36.20 nm および 27.17 nm のとき、4 層構造の無反射膜は、振幅反射率 r がゼロとなる。

10

20

30

40

50

【0051】

さらに、屈折率 n_3 でありかつ膜厚 d_3 の他の材料が、上記2層構造にさらに付け加えられた無反射膜について説明する。この無反射膜の設計においては、他の膜の膜厚 d_3 の値が予め与えられている。つまり、この無反射膜の設計においては、次式(4)および(5)で表わす他の材料の位相 ϕ_3 は既知であるとして取扱われる。

【0052】

また、第1の膜および第2の膜それぞれの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 は未知数である。2層構造に他の材料が付加された無反射膜においても、前述の2層構造の無反射膜の設計手法と同様の手法、すなわち、振幅反射率 r の実部と虚部とをそれぞれゼロにする手法を用いることにより、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

10

【0053】

それにより、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜に、屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の1種類の他の膜が付加され、特定の波長 λ に対して振幅反射率 r がほぼゼロになる無反射膜を構成する特定の2種類の膜の膜厚が決定される。

【0054】

【数5】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (4)$$

20

【0055】

【数6】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

30

【0056】

また、5層構造の無反射膜の設計手法では、式(6)が用いられる。この式(6)を用いた場合にも、式(3c)で示す振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロになるように、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0057】

それにより、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜が2段重ねされた4層構造に、屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の1種類の膜が付加され、特定の波長 λ に対して振幅反射率がほぼゼロになる無反射膜を構成する特定の2種類の膜の膜厚が決定される。

【0058】

40

【数 7】

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

10

【0059】

また、7層構造の無反射膜の設計手法では、式(7)が用いられる。この式(7)を用いた場合にも、式(3c)で示す振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロになるように、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0060】

それにより、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜が3段重ねされた6層構造に、屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の1種類の膜が付加され、特定の波長に対して振幅反射率がほぼゼロになる無反射膜を構成する特定の2種類の膜の膜厚が決定される。

20

【0061】

【数 8】

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

30

【0062】

以下、本実施の形態の7層構造の無反射膜を有する半導体光素子装置を説明する。

【0063】

図3に示すように、本実施の形態の7層構造の半導体光素子装置は、半導体レーザ31と、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜が3段重ねされた6層構造に、屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の1種類の膜が付加された無反射膜とが、屈折率が1である空気または窒素等の空間32内に設けられるように構成されている。

40

【0064】

無反射膜は、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第1の膜7 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Ad_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第2の膜8 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Ad_2)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第3の膜9 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Bd_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第4の膜10 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Bd_2)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第5の膜11 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Cd_1)、および、アルミナ (Al_2O_3) の第6の膜12 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Cd_2) の6層構造と、

50

石英 (SiO_2) の第 7 の膜 13 (屈折率 $n_3 = 1.45$ および膜厚 $d_3 = 50 \text{ nm}$) とから構成されている。なお、膜厚を示す式の中の代数 A、B および C は、前述した所定のパラメータである。

【0065】

前述の 7 層構造の無反射膜によれば、 $A = 2.85$ 、 $B = 2.0$ および $C = 2.0$ で、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.485352 および 0.872841 であるとき、波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で、無反射膜の振幅反射率 r の実部と虚部とをそれぞれゼロにすることができる。

【0066】

また、このとき、各層の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 = $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / d_3 = 104.89 \text{ nm} / 239.50 \text{ nm} / 73.60 \text{ nm} / 168.07 \text{ nm} / 73.60 \text{ nm} / 168.07 \text{ nm} / 50 \text{ nm}$ となる。

【0067】

したがって、各層の膜厚と屈折率とを掛け合わせたものの総和であるトータル膜厚は 1523.59 nm である。この値は、光の波長 λ の $1/4$ である膜厚 245 nm の約 6.2 倍である。したがって、トータル膜厚は、従来に比較して非常に厚いものとなっている。

【0068】

このとき、無反射膜の反射率の波長依存性は、図 4 に示すように、バスタブ形状に近くなっている。また、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、 177 nm になっている。したがって、本実施の形態の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、従来の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して、非常に広がっている。

【0069】

後述するように、半導体レーザとファイバグレーティングとを組み合わせる場合には、所望の波長 (たとえば 980 nm) をバスタブ形状の反射率分布の中心にすることが望ましい。

【0070】

この場合には、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.488994 および 0.859283 とし、波長 $\lambda = 940 \text{ nm}$ で反射率がゼロになるように無反射膜を設計すればよい。

【0071】

なお、このとき各膜の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 = $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / d_3 = 101.36 \text{ nm} / 226.16 \text{ nm} / 71.13 \text{ nm} / 158.71 \text{ nm} / 71.13 \text{ nm} / 158.71 \text{ nm} / 50 \text{ nm}$ である。

【0072】

前述の所望の波長 (たとえば 980 nm) をバスタブ形状の反射率分布の中心にした無反射膜の反射率の波長依存性を図 5 に示す。無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は 166 nm である。したがって、この無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、従来の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して、非常に広がっている。

【0073】

実施の形態 2.

次に、実施の形態 2 の半導体光素子装置を図 6 ~ 図 8 を用いて説明する。

【0074】

本実施の形態の半導体光素子装置は、半導体レーザ 31 と、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の 2 種類の膜が 3 段重ねされた 6 層構造に、屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の 1 種類の膜が付加された無反射膜とが、屈折率が 1 である空気または窒素

等の空間 3 2 内に設けられるように構成されている。

【0075】

また、図 6 に示すように、無反射膜は、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 1 の膜 1 4 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Ad_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第 2 の膜 1 5 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Ad_2)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 3 の膜 1 6 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Bd_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第 4 の膜 1 7 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Bd_2)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 5 の膜 1 8 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Cd_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第 6 の膜 1 9 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Cd_2)、および、窒化アルミニウム (AlN) の第 7 の膜 2 0 (屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 50 \text{ nm}$) を備えている。なお、膜厚を示す式の中の代数 A、B および C は、所定のパラメータである。 10

【0076】

上記の構成によれば、 $A = 2.7$ 、 $B = 3.0$ および $C = 2.0$ で、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.671597 および 0.482534 であるとき、波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で、無反射膜の振幅反射率の実部と虚部とをそれぞれゼロにすることができる。

【0077】

また、このとき、各層の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 = $Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / d_3 = 137.49 \text{ nm} / 125.44 \text{ nm} / 152.77 \text{ nm} / 139.37 \text{ nm} / 101.85 \text{ nm} / 92.92 \text{ nm} / 50 \text{ nm}$ である。したがって、トータル膜厚は 1489.7 nm である。この値は、 $\lambda / 4$ に相当する値 245 nm の約 6.1 倍である。従来の半導体光素子装置と比較して非常に膜厚が厚いものとなっている。 20

【0078】

このとき、無反射膜の反射率の波長依存性は、図 7 に示すように、バスタブ形状に近くなる。また、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は 145 nm である。したがって、本実施の形態の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、従来の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲と比較して、非常に広がっている。 30

【0079】

また、所望の波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.685788 および 0.470145 とし、波長 λ の 938 nm で反射率をゼロにするように無反射膜を設計すればよい。 30

【0080】

なお、このとき、各膜の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 = $Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / d_3 = 134.38 \text{ nm} / 116.98 \text{ nm} / 149.31 \text{ nm} / 129.88 \text{ nm} / 99.54 \text{ nm} / 86.65 / 50 \text{ nm}$ である。 40

【0081】

前述の無反射膜の反射率の波長依存性を図 8 に示す。この無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は 141 nm である。したがって、この無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、従来の無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲と比較して、非常に広がっている。 40

【0082】

実施の形態 3.

次に、実施の形態 3 の半導体光素子装置を図 9 ~ 図 14 を用いて説明する。

【0083】

図 9 に示すように、本実施の形態の半導体光素子装置は、半導体レーザ 3 1 と、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の 2 種類の膜が 3 段重ねされた 6 層構造に、屈折率が 50

既知でありかつ膜厚が既知の特定の1種類の膜が付加された無反射膜とが、屈折率が1である空気または窒素等の空間32内に設けられている。

【0084】

また、無反射膜は、窒化アルミニウム (AlN) の第1の膜21 (屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 50\text{ nm}$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第2の膜22 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = $A d_1$)、アルミナ (Al_2O_3) の第3の膜23 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = $A d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第4の膜24 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = $B d_1$)、アルミナ (Al_2O_3) の第5の膜25 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = $B d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第6の膜26 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = $C d_1$)、および、アルミナ (Al_2O_3) の第7の膜27 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = $C d_2$) を備えている。また、第1の膜21を構成する窒化アルミニウム (AlN) の膜厚は、 50 nm である。

【0085】

本実施の形態の無反射膜には、窒化アルミニウム、酸化タンタルおよびアルミナの3種類の材料が用いられている。窒化アルミニウムの熱伝導率は、約 1.8 W/cm である。酸化タンタルの熱伝導率は、約 0.1 W/cm である。アルミナの熱伝導率は、約 0.2 W/cm である。したがって、3つの材料のうちで窒化アルミニウムの熱伝導率が最も高い。

【0086】

また、 $A = 2.0$ 、 $B = 2.0$ および $C = 2.0$ で、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.449531 および 0.991758 であるとき、波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で、無反射膜は振幅反射率の実部と虚部とがゼロになる。また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 = $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50\text{ nm} / 68.17\text{ nm} / 190.97\text{ nm} / 68.17\text{ nm} / 190.97\text{ nm} / 68.17\text{ nm} / 190.97\text{ nm}$ である。

【0087】

そのため、トータル膜厚は 1452.26 nm である。トータル膜厚は、波長 λ の $1/4$ の値である 245 nm の約 5.9 倍である。この無反射膜の反射率の波長依存性は、図10に示すようにバスタブ形状に近くなる。また、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は 152 nm である。

【0088】

所望の波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.449325 および 1.00016 とし、波長 $\lambda = 962\text{ nm}$ で、無反射膜の振幅反射率の実部と虚部とをそれぞれゼロにするように無反射膜を設計すればよい。

【0089】

なお、このとき、各膜の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 = $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50\text{ nm} / 55.89\text{ nm} / 189.05\text{ nm} / 66.89\text{ nm} / 189.05\text{ nm} / 66.89\text{ nm} / 189.05\text{ nm}$ である。この無反射膜の反射率の波長依存性を図11に示す。この無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は 151 nm となる。

【0090】

次に、第1の膜である窒化アルミニウム (AlN) が 120 nm である無反射膜を図12に示す。

【0091】

図12において、無反射膜は、窒化アルミニウム (AlN) の第1の膜28 (屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 120\text{ nm}$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第2の膜29 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = $A d_1$)、アルミナ (Al_2O_3) の第3の膜30 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = $A d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第4の膜41 (屈折率 $n_1 =$

2.057、膜厚 = Bd_1)、アルミナ (Al_2O_3) の第5の膜42 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Bd_2)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第6の膜43 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 = Cd_1)、および、アルミナ (Al_2O_3) の第7の膜44 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 = Cd_2) を備えている。

【0092】

また、 $A = 0.9$ 、 $B = 2.0$ および $C = 2.0$ で、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.726468 および 0.860316 であるとき、波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で、無反射膜は、振幅反射率の実部と虚部とがそれぞれゼロになる。

【0093】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 = $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 120 \text{ nm} / 49.58 \text{ nm} / 74.55 \text{ nm} / 110.17 \text{ nm} / 165.66 \text{ nm} / 110.17 \text{ nm} / 165.66 \text{ nm}$ である。したがって、前述の無反射膜のトータル膜厚は 1461.38 nm である。すなわち、トータル膜厚は、 $\lambda / 4$ である 245 nm の約 6.0 倍である。したがって、従来の無反射膜に比較して、トータル膜厚が非常に厚い無反射膜となっている。

【0094】

この無反射膜の反射率の波長依存性は、図13に示すように、バスタブ形状に近くなっている。また、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する範囲は 150 nm である。したがって、従来の無反射膜に比較して無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する範囲が非常に広がっている。

【0095】

所望の波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合には、酸化タンタルおよびアルミナの位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 それぞれを 0.700522 および 0.891134 とし、波長 $\lambda = 947 \text{ nm}$ で無反射膜の反射率をゼロにするように、無反射膜を設計すればよい。

【0096】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 = $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 120 \text{ nm} / 46.20 \text{ nm} / 74.62 \text{ nm} / 102.66 \text{ nm} / 165.82 \text{ nm} / 102.66 \text{ nm} / 165.82 \text{ nm}$ である。この無反射膜の反射率の波長依存性を図14に示す。無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する範囲は 153 nm となる。

【0097】

なお、本実施の形態の無反射膜では第1膜の窒化アルミニウム膜の膜厚が 50 nm および 120 nm の場合を示したが、第1膜の窒化アルミニウム膜の膜厚は、この値に限られるものではなく、他の値であっても同様の効果を得ることができる。

【0098】

なお、上記実施の形態1~3の無反射膜を構成する複数の膜は、それぞれの膜厚と屈折率との積の総和が、半導体光レーザが出射する光の $1/4$ 波長よりも大きい場合に、上述の無反射膜の設計手法を用いれば、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲を、容易に、従来の無反射膜よりも広くすることができる。

【0099】

また、上述したように、複数の膜のうち半導体光素子に隣接するように設けられた隣接膜は、他の膜よりも熱伝導率が大きいことが望ましい。本実施の形態の半導体素子装置では、隣接膜として、窒化アルミニウムが用いられる例を示したが、これに限定されるものではない。このようにすれば、半導体レーザの熱を効率的に放出することが実現された半導体光素子装置を、上記設計手法を用いて容易に設計することができる。

【0100】

また、無反射膜が 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲は 100 nm 以上であることが望ましい。このようにすれば、通常の状態における半導体光素子が出射する光の波長

の変化に柔軟に適應することができる。

【0101】

実施の形態4.

次に、本発明の実施の形態の半導体レーザモジュールを、図15～図18を用いて説明する。図15には、半導体レーザとファイバグレーティングとを備えた半導体レーザモジュールが示されている。

【0102】

本実施の形態の半導体レーザモジュールは、図15に示すように、半導体レーザ201と、反射率が R_r であり、半導体レーザ201の前端面側に設けられた無反射膜203および半導体レーザ201の光導波路領域204からなる半導体素子装置200と、反射率

10

が R_r であり、半導体レーザ201の後端面側に設けられた反射膜202と、光導波路領域204から出射した光が通過するレンズ205と、レンズ205が通過した光が導かれる光ファイバ206と、光ファイバ206の光通路に設けられた反射率が R_{fg} であるファイバグレーティング207とを備えている。

【0103】

本実施の形態の半導体レーザモジュールは、半導体レーザ201の発振波長を安定化させるため、光ファイバ206内にファイバグレーティング207が設けられている。そのため、光ファイバ206内に導かれた特定の波長の光がファイバグレーティング207において反射される。

【0104】

また、無反射膜203が実施の形態1～3のうちのいずれかの無反射膜で構成されている。また、反射膜202が無反射膜203よりも高い反射率の膜で構成されている。また、ファイバグレーティング207が、無反射膜203よりも高い反射率の膜で構成されている。それにより、ファイバグレーティング207と反射膜202との間で光が共振するように、ファイバグレーティング207と反射膜202とにより共振器が構成されている。また、レンズ205は、半導体レーザ201から出射した光を効率よく光ファイバ206の光通路内に導くためのものである。

20

【0105】

図16には、ファイバグレーティング207が設けられた本実施の形態の半導体レーザモジュールの、半導体レーザの利得と損失との関係が示されている。ファイバグレーティング207は、特定の波長 f_g に対しては反射率 R_{fg} である。しかしながら、ファイバグレーティング207は、特定の波長 f_g 以外の波長に対しては反射率はほぼゼロである。このため、図16に示すように、特定の波長 f_g で半導体レーザの損失が局所的に極端に小さくなる。図16に示す利得のデータと損失のデータのうち局所的に小さくなっている部分とが交わる。その結果、通常では、特定の波長 f_g のとき半導体レーザモジュールは発振する。

30

【0106】

しかしながら、たとえば、周囲温度が低いときは、半導体レーザの利得の分布が波長の小さい側に移動する。そのため、図17に示すように、ファイバグレーティング207で決まる半導体レーザの損失よりも、無反射膜203によって決まる半導体レーザの損失の

40

ほうが小さくなる場合がある。このとき、図17に示す利得のデータと損失のデータのうち局所的に小さくなっている部分以外の部分とが交わる。そのため、半導体レーザモジュールは、波長 f_g ではなく波長 L_D で発振する。その結果、波長 f_g の光の強度に対する波長 L_D の光の強度の比であるサイドモード抑圧比が小さくなってしまふという不都合、または、前述したようなファイバグレーティング207の損失で決まる波長以外の波長で半導体レーザが発振してしまふという不都合が生じる。

【0107】

本実施の形態の半導体レーザモジュールは、図18に示すように、1%以下の低反射率で機能する範囲が100nm以上である無反射膜203が半導体レーザ201の前端面側に設けられている。そのため、図18に示す損失のデータは、図16および図17の損失

50

のデータのように急峻な反り部を有する曲線ではなく、なだらかな陸り状の曲線になっている。その結果、広い範囲の波長においてファイバグレーティング 207 で決まる半導体レーザの損失を無反射膜 203 の反射率で決まる半導体レーザの損失よりも小さくすることができる。すなわち、利得の分布が多少波長が小さい側に移動しようが、多少波長が大きい側に移動しようが、利得のデータと損失のデータのうち局所的に小さくなっている部分とが交わる。したがって、図 17 に示す波長 λ_D で発振することを抑制することができるとともに、半導体レーザ 201 のサイドモード抑圧比が小さくなることを防止することができる。

【0108】

なお、上記実施の形態 1 ~ 4 それぞれの半導体光素子装置としては、無反射膜が 7 層構造であるものを例にして説明した。しかしながら、本発明の無反射膜の構造は、7 層構造に限られるわけではなく、3 種類以上の屈折率を有する複数の膜が設けられている構造であれば、9 層構造または 11 層構造等、何層構造であってもよい。

10

【0109】

また、実施の形態 1 ~ 4 それぞれの無反射膜のパラメータである A、B および C は、各実施の形態の無反射膜それぞれにおいて一例の所定の数値が示されている。しかしながら、本発明の無反射膜のパラメータは、各実施の形態の無反射膜に用いた所定の数値に限定されるものではない。無反射膜のパラメータが他の数値であっても、振幅反射率の実部と虚部とをそれぞれゼロにすることができる値であれば、実施の形態 1 ~ 4 の無反射膜と同様な効果を得ることができる。

20

【0110】

なお、実施の形態 1 ~ 4 それぞれの半導体光素子装置は、無反射膜を構成する複数の膜の屈折率が 3 種類である場合を例にして説明された。しかしながら、複数の膜のうちの特定の 2 種類の膜以外の膜の位相条件、すなわち膜厚を予めを設定しておけば、無反射膜を構成する複数の膜の屈折率が 4 種類以上の場合であっても、特定の 2 種類の膜を上述の手法、すなわち、複数の膜の振幅反射率の実部と虚部とをゼロにする手法により膜厚が決定された無反射膜であれば、実施の形態 1 ~ 4 の無反射膜と同様の効果を得ることができる。

【0111】

さらに、実施の形態 1 ~ 3 の半導体光素子装置それぞれは、半導体光素子の一例として半導体レーザが用いられている例が示されたが、半導体光素子としては半導体増幅器、スーパーミネソントダイオードまたは光変調器等の半導体光素子であっても、半導体レーザの場合と同様の効果を得ることができる。

30

【0112】

また、実施の形態 1 ~ 4 の半導体光素子装置においては、半導体光素子が出射する光の波長としては、980 nm 近傍の値を用いたが、半導体光素子が出射する光の波長は、この値に限定されるものではなく、可視光、遠赤外線、および赤外線等であっても、実施の形態 1 ~ 4 それぞれの半導体光素子装置と同様の効果を得ることができる。

【0113】

前述のような実施の形態 1 ~ 3 では、EB (Electron Beam) 蒸着法により成膜された膜を用いて半導体光素子装置が構成されていた。しかしながら、EB 蒸着法では膜厚の制御性が良好ではない場合がある。したがって、以下の実施の形態 5 ~ 7 では、ECR (Electron Cyclotron Resonance) スパッタ法を用いることにより膜厚等の制御性が向上した半導体光素子装置が説明される。

40

【0114】

ただし、ECR スパッタ法を用いる場合には、原因は不明であるが、アルミナ (Al_2O_3) と酸化タンタル (Ta_2O_5) との接合性が良好ではない。したがって、実施の形態 5 ~ 7 では、石英 (SiO_2) と酸化タンタル (Ta_2O_5) との接合が利用された半導体光素子装置が用いられる。

【0115】

50

なお、実施の形態 5 ~ 7 の半導体光素子装置が実施の形態 4 において説明された半導体レーザに用いられた場合には、実施の形態 1 ~ 3 の半導体光素子装置が実施の形態 4 の半導体レーザにより得られる効果と同様の効果を得ることができる。

【0116】

また、以下の実施の形態 5 ~ 7 のそれぞれにおいては、実施の形態 1 ~ 3 において説明した 2 層構造の他に 2 種類の膜が付加された無反射膜であるが、この無反射膜についても同様に実施の形態 1 ~ 3 において説明した 2 層構造の無反射膜の設計手法と同様の手法、すなわち、振幅反射率 r の実部と虚部とをそれぞれゼロにする手法を用いることにより、後述する膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0117】

実施の形態 5 .

次に、実施の形態 5 の半導体光素子装置を図 2 1 ~ 図 2 7 を用いて説明する。

【0118】

図 2 1 に示すように、本実施の形態の半導体光素子装置は、半導体レーザ 3 1 と無反射膜とが、屈折率が 1 である空気または窒素等の空間 3 2 内に設けられている。無反射膜は、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の 2 種類の膜が 2 段重ねされた 4 層構造に屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の 2 種類の膜が付加されている。

【0119】

より具体的には、無反射膜は、図 2 1 に示すように、アルミナ (Al_2O_3) の第 1 の膜 4 5 (屈折率 $n_3 = 1.629$ 、膜厚 d_3)、石英 (SiO_2) の第 2 の膜 4 6 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $A d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 3 の膜 4 7 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $B d_1$)、石英 (SiO_2) の第 4 の膜 4 8 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $B d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 5 の膜 4 9 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $C d_1$)、および石英 (SiO_2) の第 6 の膜 5 0 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $C d_2$) から構成されている。なお、膜厚を示す式の中の代数 A、B および C は、上述した実施の形態 1 ~ 3 と同様に、所定のパラメータである。

【0120】

まず、第 1 の膜 4 5 であるアルミナ (Al_2O_3) の膜厚 d_3 が 10 nm の場合の無反射膜が説明される。なお、本実施の形態およびこれ以降の実施の形態においては、ECR スパッタ法による成膜が行われた場合における各層の屈折率の一例が示されている。

【0121】

本実施の形態の無反射膜によれば、 $A = 0.18$ 、 $B = 1.99$ および $C = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.581355 および 0.899203 であるとき、波長 $\lambda = 980$ nm で、無反射膜の振幅反射率の実部と虚部とをともにゼロにすることができる。

【0122】

また、このとき、各層の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10 / 17.01 / 87.08 / 188.07 / 87.52 / 189.02$ nm となる。

【0123】

したがって、トータル膜厚は 962.91 nm である。この値は、光の波長 λ の $1/4$ である膜厚 245 nm の約 3.9 倍である。このとき、無反射膜の反射率の波長依存性は、図 2 2 に示すようにバスタブ形状に近くなっている。したがって、前述の無反射膜が 1 % 以下の低反射率で機能する波長の範囲は、217 nm であり、従来の無反射膜が 1 % 以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して非常に広がっている。

【0124】

また、所望の波長 $\lambda = 980$ nm をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.580136 および 0.908343 とし、波長 $\lambda = 945$ nm で反射率をゼロにするように無反射膜を設計すればよい。

10

20

30

40

50

【0125】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10 / 16.57 / 83.80 / 183.20 / 84.22 / 184.12$ nmである。

【0126】

前述の無反射膜の反射率の波長依存性を図23に示す。この無反射膜が、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は213 nmである。

【0127】

次に、第1の膜45であるアルミナ (Al_2O_3) の膜厚 d_3 が20 nmである無反射膜について説明する。前述の無反射膜によれば、 $A = 0.12$ 、 $B = 1.90$ および $C = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.601513 および 0.911814 であるとき、波長 $\lambda = 980$ nmで、反射率がゼロになる。

【0128】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 20 / 11.50 / 86.03 / 182.08 / 90.56 / 191.67$ nmとなる。トータル膜厚は、 970.19 nmであり、波長 λ の1/4の値である245 nmの約4.0倍である。

【0129】

したがって、前述の無反射膜は、従来の無反射膜に比較して、トータル膜厚が非常に厚いものとなっている。このとき、無反射膜の反射率の波長依存性は、図24に示すように、バスタブ形状に近くなっている。また、前述の無反射膜が1%以下の低反射率で機能する範囲は220 nmである。したがって、前述の無反射膜は、従来の無反射膜に比較して、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する範囲は非常に広がっている。

【0130】

所望の波長 $\lambda = 980$ nmをバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.596734 および 0.925211 とし、波長 $\lambda = 935$ nmで無反射膜の反射率をゼロにするように、無反射膜を設計すればよい。

【0131】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 20 / 11.13 / 81.43 / 176.28 / 85.71 / 185.55$ nmである。前述の無反射膜の反射率の波長依存性を図25に示す。無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は215 nmとなる。

【0132】

さらに、第1の膜45であるアルミナ (Al_2O_3) の膜厚 d_3 が40 nmである無反射膜について説明する。無反射膜は、 $A = 0.02$ 、 $B = 1.50$ および $C = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.789974 および 0.884697 であるとき、波長 $\lambda = 980$ nmで反射率がゼロになる。

【0133】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 40 / 1.86 / 89.20 / 139.48 / 118.93 / 185.97$ nmとなる。この無反射膜のトータル膜厚は、 982.13 nmであり、波長 λ の1/4である245 nmの約4.0倍となる。したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に厚いものとなっている。

【0134】

このときの無反射膜の反射率の波長依存性は、図26に示すように、バスタブ形状に近くなっている。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲は218 nmであり、この範囲は、従来の無反射膜の1%以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較

して非常に広い。

【0135】

所望の波長 = 980 nm をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.774569 および 0.901877 とし、波長 = 927 nm で無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0136】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 40 / 1.79 / 82.73 / 134.50 / 110.31 / 179.33$ nm である。無反射膜の反射率の波長依存性を図27に示す。無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が208 nm となる。

【0137】

なお、前述の6層構造の無反射膜の設計手法では、次に示す式(8)が用いられる。この式(8)を用いた場合にも、式(3c)で示す振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロになるように、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0138】

【数9】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

【0139】

実施の形態6

次に、実施の形態6の半導体光素子装置を図28～図34を用いて説明する。

【0140】

図28に示すように、本実施の形態の半導体光素子装置は、半導体レーザ31と無反射膜とが、屈折率が1である空気または窒素等の空間32内に設けられている。無反射膜は、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の2種類の膜が3段重ねされた6層構造に屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の2種類の膜が付加されている。

【0141】

図28に示すように、本実施の形態の無反射膜は、アルミナ (Al_2O_3) の第1の膜51 (屈折率 $n_3 = 1.629$ 、膜厚 d_3)、石英 (SiO_2) の第2の膜52 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $A d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第3の膜53 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $B d_1$)、石英 (SiO_2) の第4の膜54 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $B d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第5の膜55 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $C d_1$)、石英 (SiO_2) の第6の膜56 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $C d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第7の膜57 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $D d_1$)、および石英 (SiO_2) の第8の膜58 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $D d_2$) により構成されている。

【0142】

まず、第1の膜51であるアルミナ (Al_2O_3) の膜厚 d_3 が10 nm である無反射膜について説明する。

【0143】

10

20

30

40

50

前述の無反射膜は、 $A = 0.50$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ および $D = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.356965 および 1.03993 であるとき、波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で反射率をゼロにすることができる。

【0144】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 10 / 54.65 / 53.74 / 218.60 / 53.74 / 218.60 / 53.74 / 218.60 \text{ nm}$ となる。この無反射膜のトータル膜厚は、 1404.65 nm であり、波長 λ の $1/4$ である 245 nm の約 5.7 倍である。

【0145】

したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に厚い。このとき、無反射膜の反射率の波長依存性は、図29に示すように、バスタブ形状に近くなっている。また、無反射膜は、 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 116 nm であり、その範囲は従来の無反射膜の 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲と比較して非常に広いものである。

【0146】

所望の波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.357013 および 1.0386 とし、波長 $\lambda = 971 \text{ nm}$ で無反射膜の反射率をゼロにすればよい。

【0147】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 10 / 54.08 / 53.26 / 216.31 / 53.26 / 216.31 / 53.26 / 216.31 \text{ nm}$ である。前述の無反射膜の反射率の波長依存性を図30に示す。この無反射膜は、 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 115 nm である。

【0148】

次に、第1の膜51であるアルミナ(Al_2O_3)の膜厚 d_3 が 20 nm である無反射膜について説明する。無反射膜は、 $A = 0.42$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ および $D = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.355425 および 1.03088 であるとき、波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で反射率がゼロになる。

【0149】

また、このときの各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 20 / 45.51 / 53.51 / 216.70 / 53.51 / 216.70 / 53.51 / 216.70 \text{ nm}$ となる。トータル膜厚は、 1397.48 nm であり、波長 λ の $1/4$ である 245 nm の約 5.7 倍である。

【0150】

したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較してと非常に大きい値である。このときの無反射膜の反射率の波長依存性は、図31に示すように、バスタブ形状に近くなっている。この無反射膜は、 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 116 nm であり、この値は、従来の無反射膜の 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して非常に大きい値である。

【0151】

所望の波長 $\lambda = 98 \text{ nm}$ をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.35537 および 1.02959 とし、波長 $\lambda = 975 \text{ nm}$ で無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0152】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 20 / 45.22 / 53.23 / 215.32 / 53.23 / 215.32 / 53.23 / 215.32 \text{ nm}$

10

20

30

40

50

3.23 / 2.15.32 nmである。前述の無反射膜の反射率の波長依存性を図32に示す。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が115 nmである。

【0153】

さらに、第1の膜51であるアルミナ(Al_2O_3)の膜厚 d_3 が40 nmである無反射膜について説明する。無反射膜は、 $A = 0.30$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.00$ および $D = 2.00$ であり、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.356112 および 1.00038 であるとき、波長 $\lambda = 980$ nmで反射率がゼロになる。

【0154】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 / 第8の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 40 / 31.54 / 52.27 / 205.03 / 53.61 / 210.28 / 53.61 / 210.28$ nmとなる。トータル膜厚は、1370.80 nmであり、波長の1/4である245 nmの約5.6倍になる。

【0155】

したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に厚い。このとき無反射膜の反射率の波長依存性は、図33に示すように、バスタブ形状に近くなっている。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が110 nmであり、その範囲は従来の無反射膜の1%以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して非常に広い。

【0156】

所望の波長 $\lambda = 980$ nmをバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.356344 および 1.0013 とし、波長 $\lambda = 983$ nmで、無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0157】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 / 第8の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 40 / 31.67 / 52.47 / 205.85 / 53.81 / 211.12 / 53.81 / 211.12$ nmである。無反射膜の反射率の波長依存性を図34に示す。無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が111 nmである。

【0158】

また、前述の8層構造の無反射膜の設計手法では、次に示す式(9)が用いられる。この式(9)を用いた場合にも、式(3c)で示す振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロになるように、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0159】

【数10】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -in_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

10

20

30

40

50

【0160】

実施の形態 7 .

次に、実施の形態 7 の半導体光素子装置を図 35 ~ 図 41 を用いて説明する。

【0161】

図 35 に示すように、本実施の形態の半導体光素子装置は、半導体レーザ 31 と無反射膜とが、屈折率が 1 である空気または窒素等の空間 32 内に設けられている。無反射膜は、屈折率が既知でありかつ膜厚が未知の特定の 2 種類の膜が 4 段重ねされた 8 層構造に屈折率が既知でありかつ膜厚が既知の特定の 2 種類の膜が付加されている。

【0162】

図 35 に示すように、アルミナ (Al_2O_3) の第 1 の膜 59 (屈折率 $n_3 = 1.629$ 、膜厚 d_3)、石英 (SiO_2) の第 2 の膜 60 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $A d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 3 の膜 61 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $B d_1$)、石英 (SiO_2) の第 4 の膜 62 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $B d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 5 の膜 63 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $C d_1$)、石英 (SiO_2) の第 6 の膜 64 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $C d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 7 の膜 65 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $D d_1$)、石英 (SiO_2) の第 8 の膜 66 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $D d_2$)、酸化タンタル (Ta_2O_5) の第 9 の膜 67 (屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 = $E d_1$)、および石英 (SiO_2) の第 10 の膜 68 (屈折率 $n_2 = 1.484$ 、膜厚 = $E d_2$) から構成されている。

【0163】

まず、第 1 の膜 59 であるアルミナ (Al_2O_3) の膜厚 d_3 が 10 nm である無反射膜について説明する。

【0164】

前述の無反射膜は、 $A = 0.62$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ 、 $D = 2.00$ および $E = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ 0.276571 および 1.1374 であるとき、波長 $\lambda = 980$ nm で反射率がゼロになる。

【0165】

また、このとき、各層の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 / 第 8 の膜 / 第 9 の膜 / 第 10 の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 10 / 74.12 / 41.64 / 239.09 / 41.64 / 239.09 / 51.64 / 239.09 / 41.64 / 239.09$ nm となる。トータル膜厚は、1890.63 nm であり、波長 λ の $1/4$ である 245 nm の約 7.7 倍である。したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に大きな値となっている。

【0166】

このときの無反射膜の反射率の波長依存性は、図 36 に示すように、バスタブ形状に近くなっている。この無反射膜は、1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲が 79 nm であり、その値は従来の無反射膜の 1% 以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して大きな値となっている。

【0167】

所望の波長 $\lambda = 980$ nm をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.276804 および 1.13636 とし、波長 $\lambda = 971$ nm で無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0168】

なお、このときの各膜の膜厚は、第 1 の膜 / 第 2 の膜 / 第 3 の膜 / 第 4 の膜 / 第 5 の膜 / 第 6 の膜 / 第 7 の膜 / 第 8 の膜 / 第 9 の膜 / 第 10 の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 10 / 73.37 / 41.29 / 236.67 / 41.29 / 236.67 / 41.29 / 236.67 / 41.29 / 236.67$ nm である。無反射膜の反射率の波長依存性を図 37 に示す。この無反射膜は、1% 以

10

20

30

40

50

下の低反射率で機能する波長の範囲が77nmである。

【0169】

次に、第1の膜59であるアルミナ(Al_2O_3)の膜厚 d_3 が20nmである無反射膜について説明する。前述の無反射膜は、 $A = 0.54$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ 、 $D = 2.00$ および $E = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ0.2754045および1.1399であるとき、波長 $\lambda = 980$ nmで反射率がゼロになる。

【0170】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜/第9の膜/第10の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 20 / 64.70 / 41.41 / 239.61 / 41.41 / 239.61 / 41.41 / 239.61 / 41.41 / 239.61$ nmとなる。トータル膜厚は、1894.13nmであり、波長の1/4である245nmの約7.7倍になる。したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に大きい値になっている。

【0171】

このときの無反射膜の反射率の波長依存性は、図38に示すように、バスタブ形状に近くなる。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が80nmであり、この値は従来の無反射膜の1%以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して大きな値である。

【0172】

所望の波長 $\lambda = 980$ nmをバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ0.275567および1.13754とし、波長 $\lambda = 971$ nmで、無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0173】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜/第9の膜/第10の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 20 / 63.97 / 41.11 / 236.92 / 41.11 / 236.92 / 41.11 / 236.92 / 41.11 / 236.92$ nmである。この無反射膜の反射率の波長依存性を図39に示す。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が79nmである。

【0174】

次に、第1の膜59であるアルミナ(Al_2O_3)の膜厚 d_3 が40nmである無反射膜について説明する。前述の無反射膜は、 $A = 0.40$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ 、 $D = 2.00$ および $E = 2.00$ で、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 がそれぞれ0.275565および1.11479であるとき、波長 $\lambda = 980$ nmで反射率がゼロになる。

【0175】

また、このとき、各層の膜厚は、第1の膜/第2の膜/第3の膜/第4の膜/第5の膜/第6の膜/第7の膜/第8の膜/第9の膜/第10の膜 $= d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 40 / 46.87 / 41.49 / 234.34 / 41.49 / 234.34 / 41.49 / 234.34 / 41.49 / 234.34$ nmとなる。トータル膜厚は、1869.63nmであり、波長の1/4である245nmの約7.6倍になる。したがって、このトータル膜厚は、従来の無反射膜のトータル膜厚に比較して非常に大きい値になっている。

【0176】

このときの無反射膜の反射率の波長依存性は、図40に示すように、バスタブ形状に近くなる。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が79nmであり、この値は従来の無反射膜の1%以下の低反射率で機能する波長の範囲に比較して大きな値

である。

【0177】

所望の波長 = 980 nm をバスタブ形状の反射率分布の中心にする場合は、酸化タンタルおよび石英の位相 ϕ_1 および位相 ϕ_2 をそれぞれ 0.275663 および 1.11367 とし、波長 = 977 nm で、無反射膜の反射率をゼロにするように無反射膜を設計する。

【0178】

なお、このときの各膜の膜厚は、第1の膜 / 第2の膜 / 第3の膜 / 第4の膜 / 第5の膜 / 第6の膜 / 第7の膜 / 第8の膜 / 第9の膜 / 第10の膜 = $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 / E d_1 / E d_2 = 40 / 46.68 / 41.37 / 233.38 / 41.37 / 233.38 / 41.37 / 233.38 / 41.37 / 233.38$ nm である。この無反射膜の反射率の波長依存性を図41に示す。この無反射膜は、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が78 nm である。

【0179】

また、前述の10層構造の無反射膜の設計手法では、次に示す式(10)が用いられる。この式(10)を用いた場合にも、式(3c)で示す振幅反射率 r の実部と虚部とがそれぞれゼロになるように、膜厚 d_1 および膜厚 d_2 が算出される。

【0180】

【数11】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -in_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos E\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin E\phi_1 \\ -in_1 \sin E\phi_1 & \cos E\phi_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos E\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin E\phi_2 \\ -in_2 \sin E\phi_2 & \cos E\phi_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

【0181】

また、実施の形態5~7それぞれの無反射膜のパラメータであるA、B、C、DおよびEは、各実施の形態の無反射膜それぞれにおいて一例の所定の数値が示されている。しかしながら、本発明の無反射膜のパラメータは、各実施の形態の無反射膜に用いた所定の数値に限定されるものではない。無反射膜のパラメータが他の数値であっても、振幅反射率の実部と虚部とをそれぞれゼロにすることができる値であれば、実施の形態5~7の無反射膜と同様な効果を得ることができる。

【0182】

また、実施の形態5~7それぞれの半導体光素子装置は、無反射膜を構成する複数の膜の屈折率が3種類である場合を例にして説明された。しかしながら、複数の膜のうちの特定の2種類の膜以外の膜の位相条件、すなわち膜厚を予めを設定しておけば、無反射膜を構成する複数の膜の屈折率が4種類以上の場合であっても、特定の2種類の膜を上述の手法、すなわち、複数の膜の振幅反射率の実部と虚部とをゼロにする手法により膜厚が決定された無反射膜であれば、実施の形態5~7の無反射膜と同様な効果を得ることができる。

。

【0183】

また、実施の形態5～7においては、第1の膜のアルミナの膜厚が10nm、20nmおよび40nmの場合の無反射膜を示したが、アルミナの膜厚はこれら値に限定されるものではない。

【0184】

また、実施の形態5～7においては、無反射膜が6層構造、8層構造および10層構造であるものを示したが、12層構造以上の偶数層であっても、実施の形態5～7の無反射膜により得られる効果と同様の効果を得ることができる。

【0185】

また、実施の形態5～7の半導体光素子装置においては、半導体光素子が出射する光の波長としては、980nm近傍の値を用いたが、半導体光素子が出射する光の波長は、この値に限定されるものではなく、可視光、遠赤外線、および赤外線等であっても、実施の形態5～7それぞれの半導体光素子装置と同様の効果を得ることができる。

【0186】

さらに、実施の形態5～7の半導体光素子装置それぞれは、半導体光素子の一例として半導体レーザが用いられている例が示されたが、半導体光素子としては半導体増幅器、スーパーリミットダイオードまたは光変調器等の半導体光素子であっても、半導体レーザの場合と同様の効果を得ることができる。

【0187】

なお、今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなく特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【図面の簡単な説明】

【0188】

【図1】本発明に関する波長で反射率がゼロとなる2層構造の無反射膜について説明するための図である。

【図2】本発明に関する波長で反射率がゼロとなる4層構造の無反射膜について説明するための図である。

【図3】実施の形態1の半導体レーザの無反射膜を説明するための図である。

【図4】実施の形態1の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図5】実施の形態1の他の例の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図6】実施の形態2の半導体レーザの無反射膜を説明するための図である。

【図7】実施の形態2の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図8】実施の形態2の他の例の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図9】実施の形態3の半導体レーザの無反射膜を説明するための図である。

【図10】実施の形態3の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である

。

【図11】実施の形態3の他の例の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図12】実施の形態3のさらに他の例の半導体レーザの無反射膜を説明するための図である。

【図13】実施の形態3のさらに他の例の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図14】実施の形態3の別の半導体レーザの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図15】実施の形態4の無反射膜を有する半導体レーザとファイバグレーティングと備

10

20

30

40

50

えた半導体レーザーモジュールを示す図である。

【図16】実施の形態4の半導体レーザーモジュールにおける、半導体レーザーの利得と損失との関係を示す図である。

【図17】実施の形態4の半導体レーザーモジュールにおいて、1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が狭い無反射膜を使用した場合に、利得の分布が波長が小さい側に移動したときの、半導体レーザーの利得と損失との関係を示した図である。

【図18】実施の形態4の半導体レーザーモジュールにおいて、無反射膜が1%以下の低反射率で機能する波長の範囲が広い場合の、半導体レーザーの利得と損失との関係を示した図である。

【図19】従来の半導体光素子の無反射膜を説明するための図である。

【図20】従来の半導体光素子の無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図21】実施の形態5の半導体レーザーの無反射膜を説明するための図である。

【図22】実施の形態5の第1の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図23】実施の形態5の第2の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図24】実施の形態5の第3の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図25】実施の形態5の第4の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図26】実施の形態5の第5の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図27】実施の形態5の第6の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図28】実施の形態6の半導体レーザーの無反射膜を説明するための図である。

【図29】実施の形態6の第1の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図30】実施の形態6の第2の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図31】実施の形態6の第3の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図32】実施の形態6の第4の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図33】実施の形態6の第5の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図34】実施の形態6の第6の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図35】実施の形態7の半導体レーザーの無反射膜を説明するための図である。

【図36】実施の形態7の第1の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図37】実施の形態7の第2の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図38】実施の形態7の第3の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図39】実施の形態7の第4の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図40】実施の形態7の第5の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

【図41】実施の形態7の第6の例の半導体レーザーの無反射膜の反射率の波長依存性を示す図である。

10

20

30

40

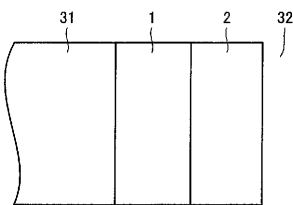
50

【符号の説明】

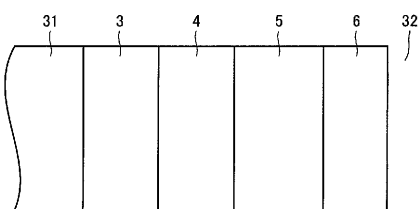
【0189】

1, 3, 7, 14, 21, 28 第1の膜、2, 4, 8, 15, 22, 29 第2の膜、5, 9, 16, 23, 30 第3の膜、6, 10, 17, 24 第4の膜、11, 18, 25, 42 第5の膜、12, 19, 26, 43 第6の膜、13, 20, 27, 44 第7の膜、31 半導体レーザ、32 空間、200 半導体素子装置、201 半導体レーザ、202 反射膜、203 無反射膜、204 光導波路領域、205 レンズ、206 光ファイバ、207 ファイバグレーティング。

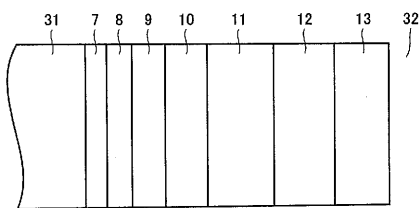
【図1】



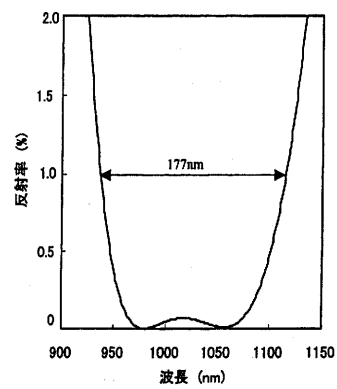
【図2】



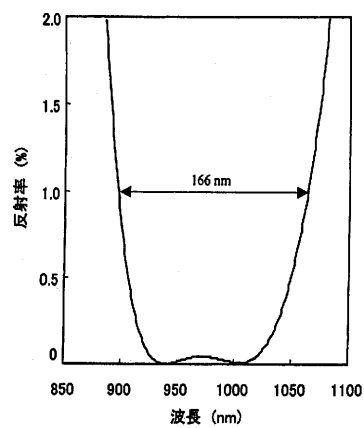
【図3】



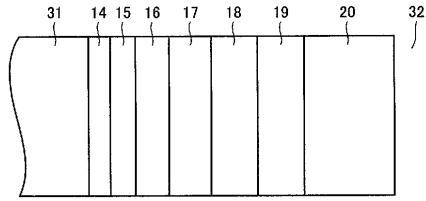
【図4】



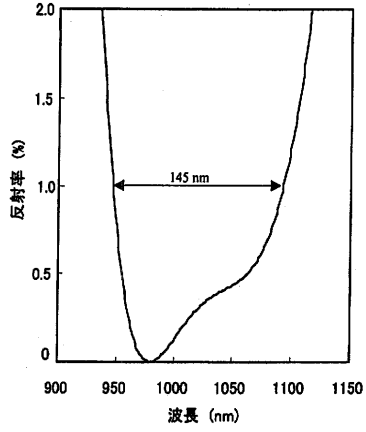
【図5】



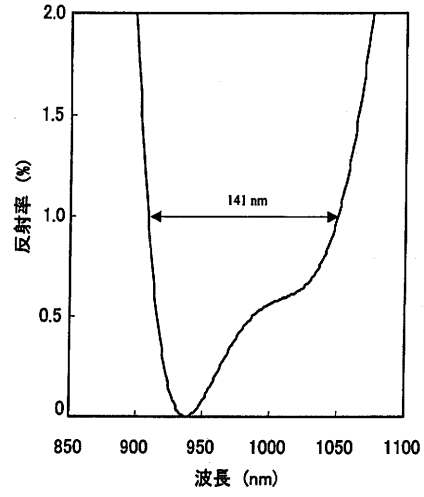
【 図 6 】



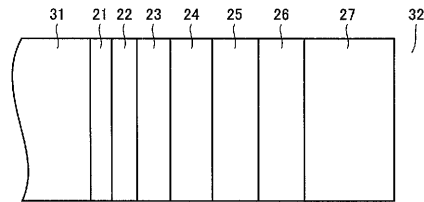
【 図 7 】



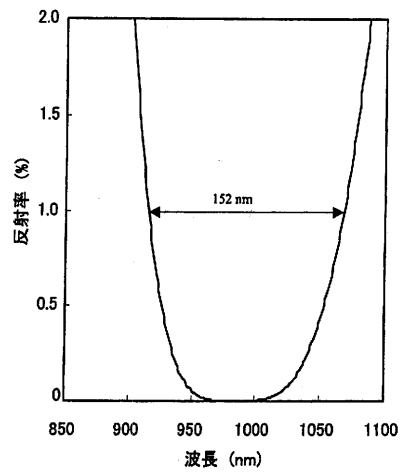
【 図 8 】



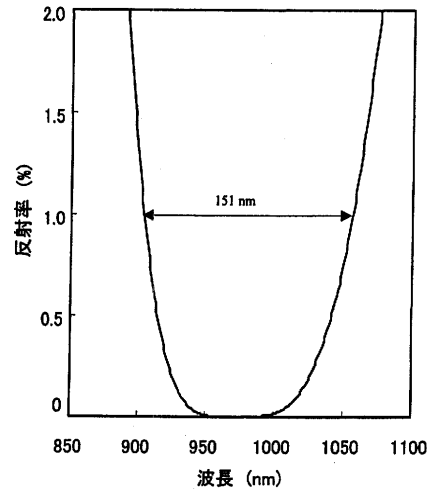
【 図 9 】



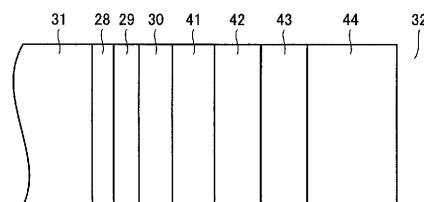
【 図 1 0 】



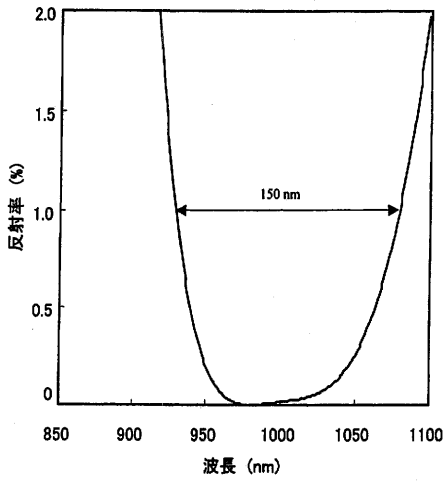
【 図 1 1 】



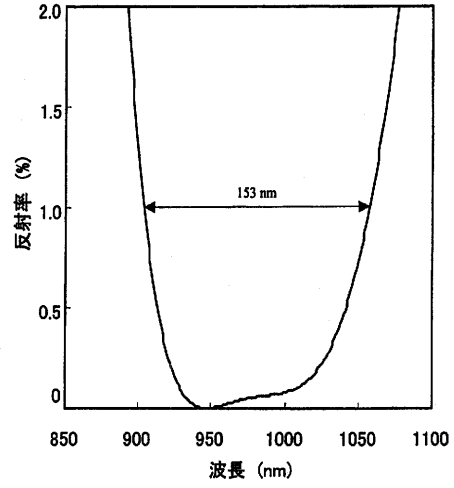
【 図 1 2 】



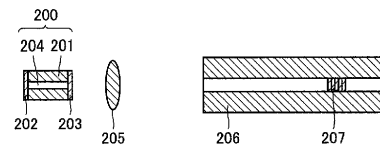
【 図 1 3 】



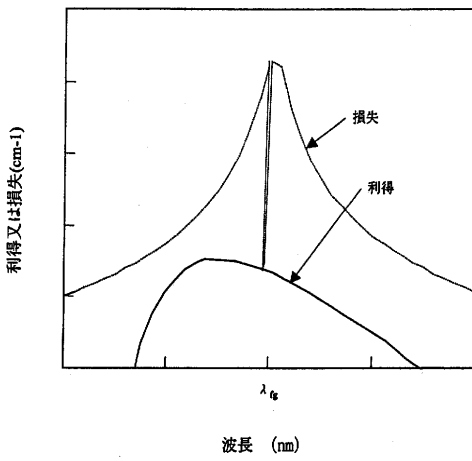
【 図 1 4 】



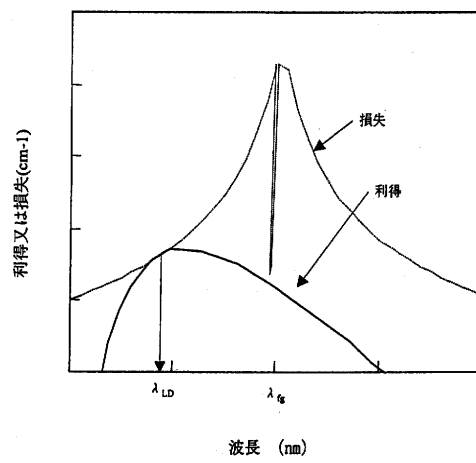
【 図 1 5 】



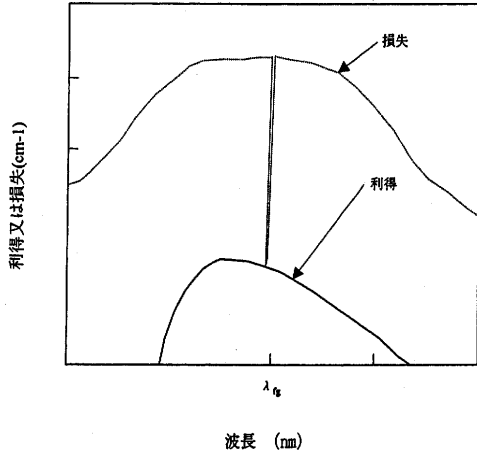
【 図 1 6 】



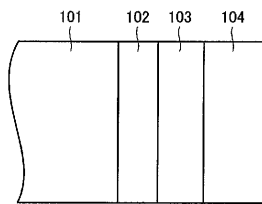
【 図 1 7 】



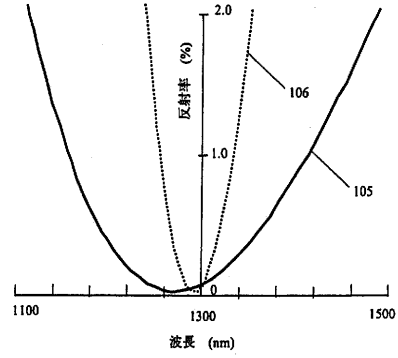
【 図 1 8 】



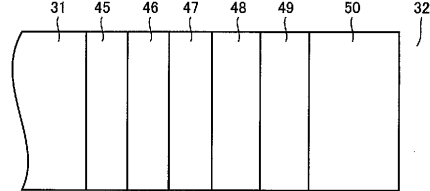
【 図 1 9 】



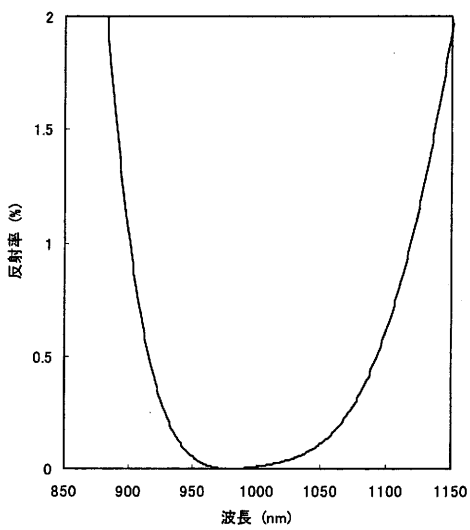
【 図 2 0 】



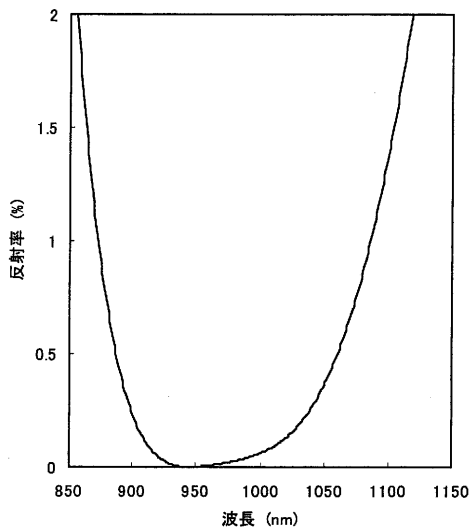
【 図 2 1 】



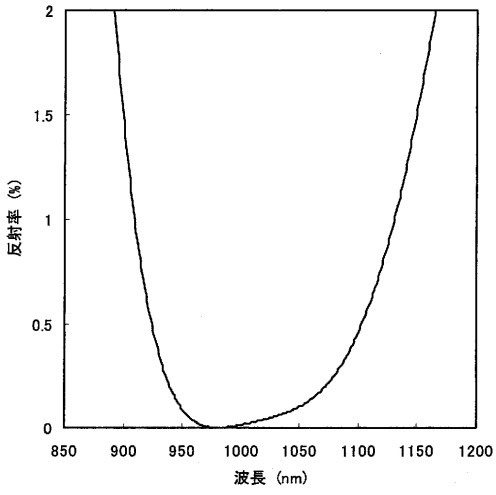
【 図 2 2 】



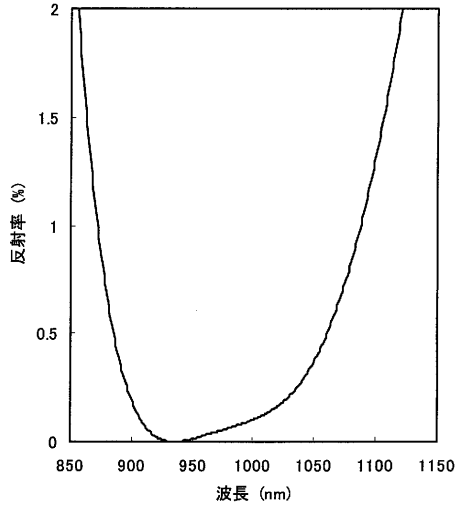
【 図 2 3 】



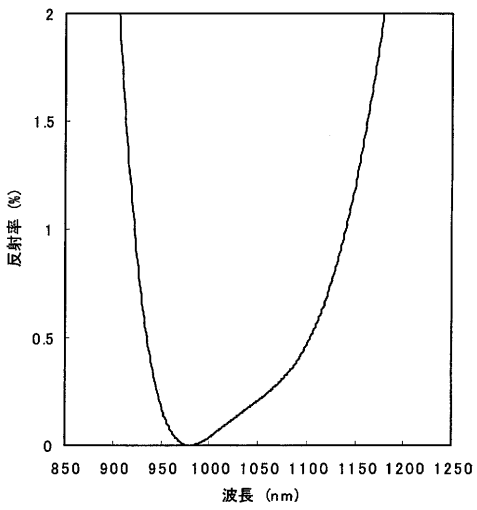
【図 2 4】



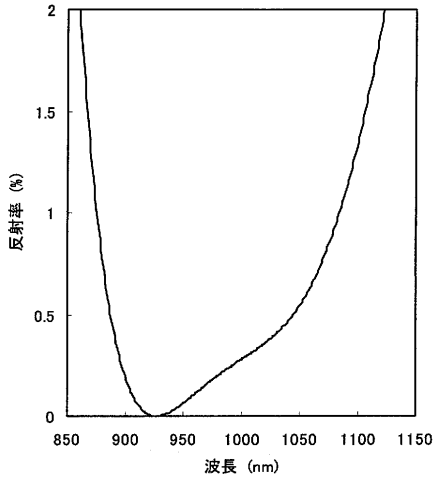
【図 2 5】



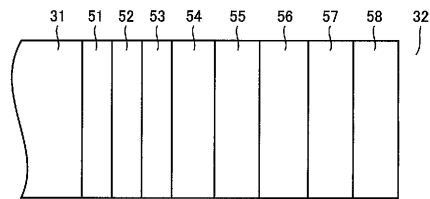
【図 2 6】




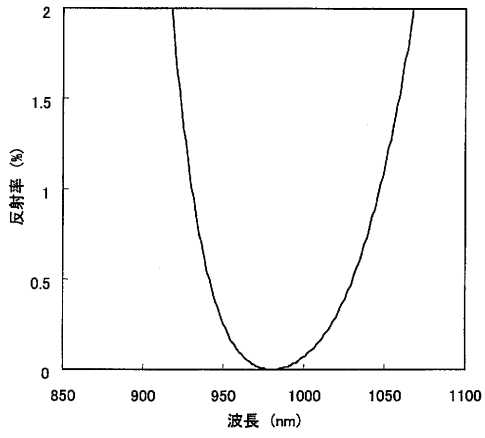
【図 2 7】




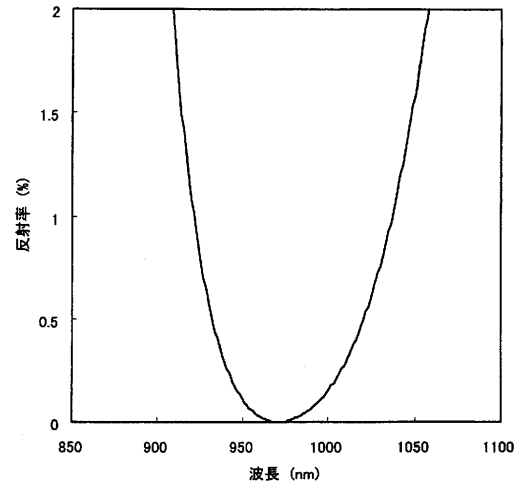
【図 2 8】




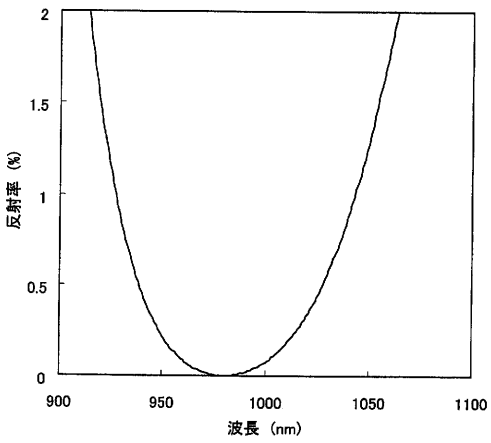
【 2 9】




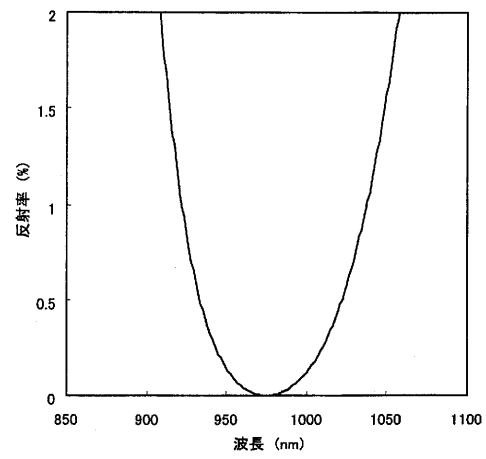
【 3 0】



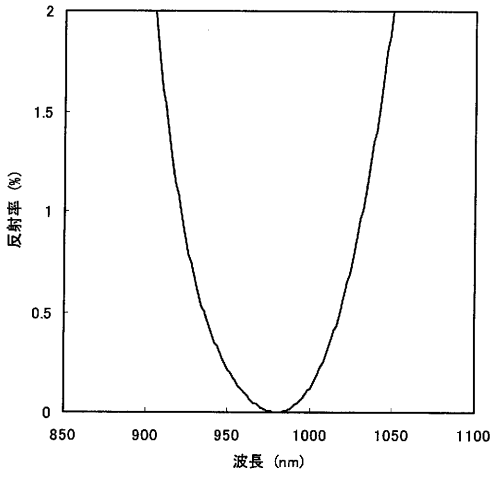
【 3 1】



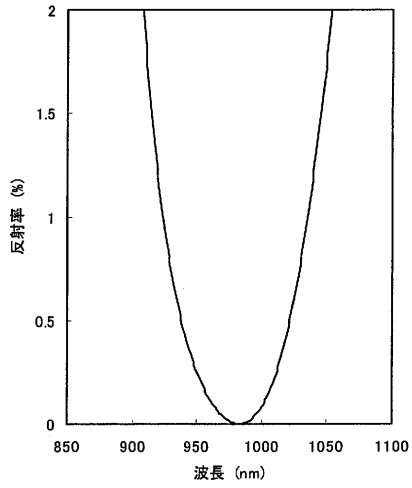
【 3 2】



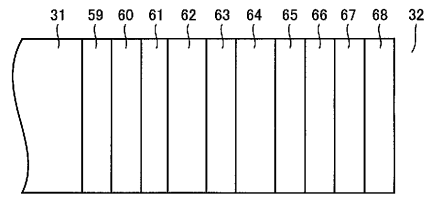
【 3 3 】



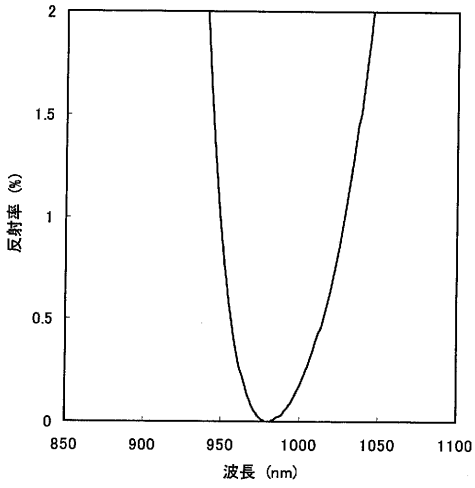
【 3 4 】



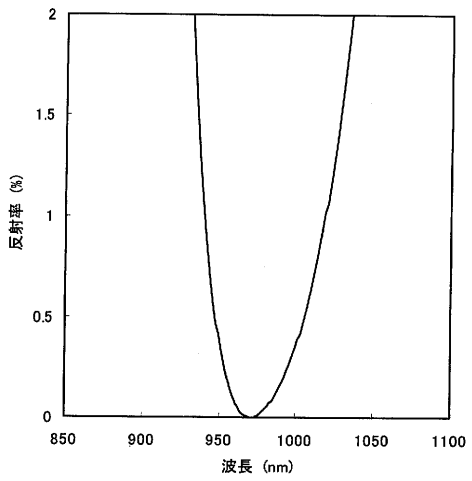
【 3 5 】



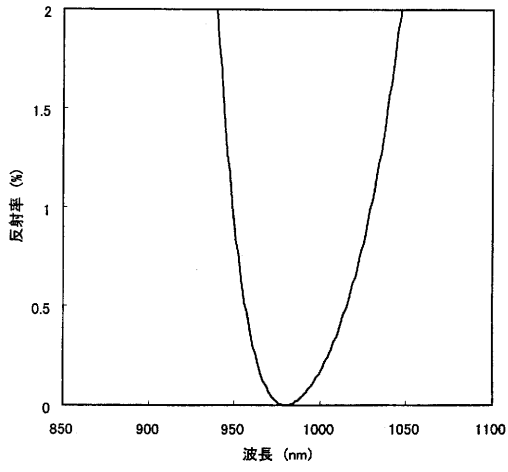
【 3 6 】



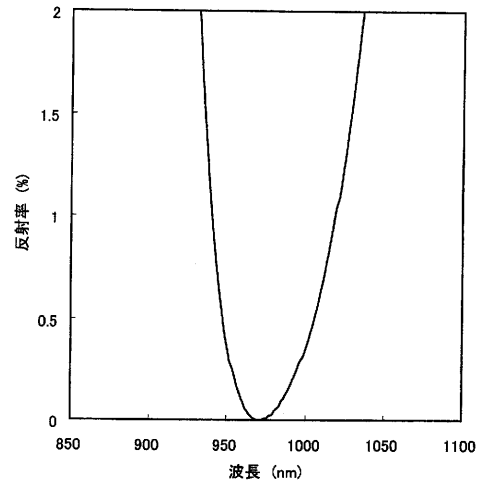
【 3 7 】



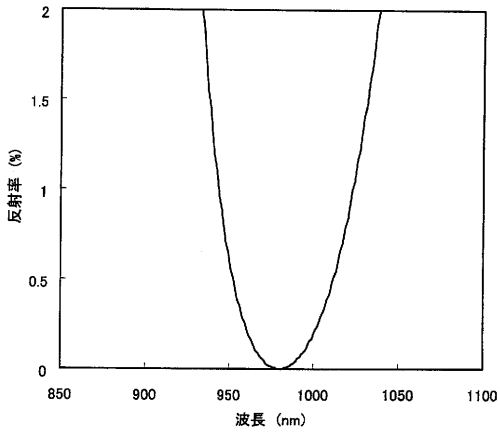
【 図 3 8 】



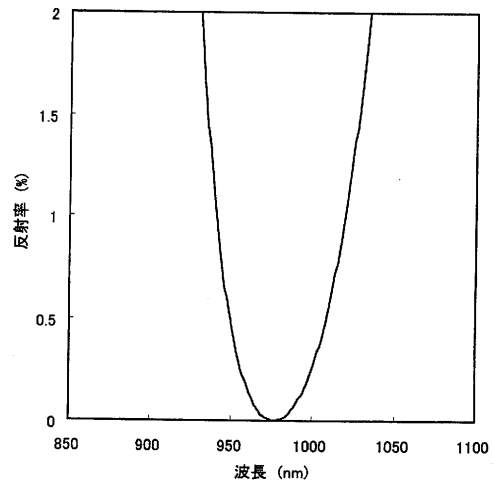
【 図 3 9 】



【 図 4 0 】



【 図 4 1 】



フロントページの続き

(72)発明者 鳴原 君男

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)発明者 川崎 和重

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)発明者 松岡 裕益

兵庫県伊丹市瑞原4丁目1番地 株式会社ルネサスセミコンダクタエンジニアリング内

Fターム(参考) 2H037 BA03 BA13 BA32 CA13 CA37 DA03 DA04 DA05

2K009 AA05 AA07 AA09 BB02 CC02 CC03

5F073 AA83 AB27 AB28 CB20 FA06