

(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2010-103569

(P2010-103569A)

(43) 公開日 平成22年5月6日(2010.5.6)

(51) Int.Cl.

H01S 5/028 (2006.01)

F 1

H01S 5/028

テーマコード(参考)

5 F 173

審査請求 有 請求項の数 1 O L (全 98 頁)

(21) 出願番号 特願2010-24309 (P2010-24309)
 (22) 出願日 平成22年2月5日 (2010.2.5)
 (62) 分割の表示 特願2003-275554 (P2003-275554)
 分割
 原出願日 平成15年7月16日 (2003.7.16)
 (31) 優先権主張番号 特願2002-283438 (P2002-283438)
 (32) 優先日 平成14年9月27日 (2002.9.27)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)
 (31) 優先権主張番号 特願2003-57238 (P2003-57238)
 (32) 優先日 平成15年3月4日 (2003.3.4)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000006013
 三菱電機株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
 (74) 代理人 100101454
 弁理士 山田 卓二
 (74) 代理人 100081422
 弁理士 田中 光雄
 (72) 発明者 鳴原 君男
 東京都千代田区丸の内二丁目7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7番3号 三菱電機株式会社内
 F ターム(参考) 5F173 AL05 AL13 AL14 AP78 AR02
 AR70 AR72

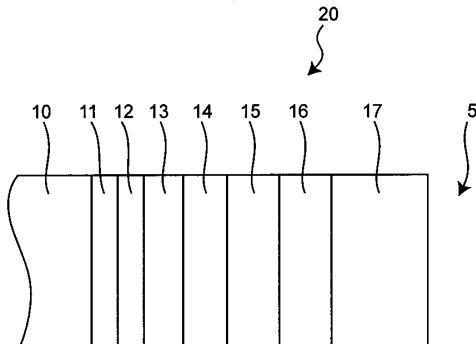
(54) 【発明の名称】半導体光素子

(57) 【要約】

【課題】広い波長帯域にわたって低反射率を有する反射膜を備えた半導体光素子を提供する。

【解決手段】半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜とを備え、前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長について、 $n_i d_i > / 4$ の関係を満足すると共に、前記多層反射膜は、反射率が前記波長の場合の反射率 R ()を基準として -1% から +2.0% の範囲内となる前記波長を含む連続する波長帯域幅を、前記波長で割った値 / が 0.062 以上である。

【選択図】図5



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜とを備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長について、 $n_i d_i > /4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長の場合の反射率 $R(λ)$ を基準として-1%から+2.0%の範囲内となる前記波長を含む連続する波長帯域幅を、前記波長で割った値が0.062以上であることを特徴とする半導体光素子。10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光情報処理用の光源、光通信の信号、及びファイバアンプの励起光源などとして用いられる半導体レーザ素子、及び光信号を增幅する半導体増幅器及び光信号を変調する光変調器等の半導体光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体レーザ素子や、光変調器等の半導体光素子の端面部の導波層には、通常、反射膜がコーティングされている。この半導体光素子の端面部に設けられた反射膜（コーティング膜：屈折率 n_1 ）の膜厚 d を $/ (4 n_1)$ の奇数倍とすると、反射膜の反射率は極小値をとる。さらに、端面部に導波層を含む積層構造体の屈折率 n_c の平方根の屈折率を有するコーティング膜を形成することによって無反射膜が得られる。例えば、半導体レーザの端面の反射膜を無反射膜とした例（例えば、非特許文献1を参照）が知られている。20

【0003】

半導体光素子の端面部の導波層を含む積層構造体（実効屈折率 $n_c = 3.37$ ）に膜厚を変えて形成された単層反射膜（屈折率 $n_1 = 1.449$ ）の反射率の波長依存性を考える。ここで、設定波長 $= 980 \text{ nm}$ で反射率が最小値をとるように設定する。反射率が最小値をとる場合とは、 $/ (4 n_1)$ の奇数倍の膜厚の場合である。そこで、膜厚 $/ (4 n_1)$ の単層反射膜の場合と、膜厚 $5 / (4 n_1)$ の単層反射膜のそれぞれの場合について検討すると、膜厚 $/ (4 n_1)$ の単層反射膜のほうが膜厚 $5 / (4 n_1)$ の単層反射膜より反射率の極小値近傍における平坦部分が広い。30

【0004】

具体的には以下の通りである。厚さ $d_1 = / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値4%となり、極小反射率値+2%の波長帯域は 848 nm から 1161 nm の 313 nm と広い。一方、厚さ $d_1 = 5 / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値4%は同じであるが、極小反射率値+2%の波長帯域は 951 nm から 1011 nm の 60 nm と極端に狭くなる。このとき、波長帯域を所定の波長で割った値は0.061となる。また、極小反射率値+2.5%の波長帯域は 949 nm から 1013 nm の 64 nm であり、この波長帯域を所定波長 980 nm で割った値は0.065となる。40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】I. Ladany, et al., "Scandium oxide antireflection coatings for superluminescent LEDs", Appl. Opt. Vol. 25, No. 4, pp.472-473, (1986)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

10

20

30

40

50

上記のように半導体光素子の端面部の反射膜の膜厚 d を $/ (4 n_i)$ の奇数倍で厚膜化した場合には、反射率の極小値近傍における低反射率領域の波長帯域が狭くなり、半導体レーザ特性が反射膜の反射率の波長依存性の影響を受けて大きく変化するという問題があつた。

【0007】

そこで、本発明の目的は、極小反射率近傍の波長帯域が広い反射膜を備えた半導体光素子を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、10

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と
を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$
 d_i が、前記導波層を導波する光の波長について、 $n_i d_i > / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、前記波長の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として、+2.0%以下となる前記波長を含む連続する波長帯域幅が、前記積層構造体の実効屈折率 n_c と前記波長の場合の反射率 $R'(\lambda)$ について、下記の関係式、20

$$R'(\lambda) = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$$

を満たす屈折率 n_f の仮想単層反射膜を厚さ $5 / (4 n_f)$ だけ前記端面部に形成した場合の反射率 R' を基準として、+2.0%以下となる前記波長を含む連続した波長帯域幅よりも広いことを特徴とする。

【0009】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と
を備え、30

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$
 d_i が、前記導波層を導波する光の波長について、 $n_i d_i > / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.0%から+2.0%の範囲内となる前記波長を含む連続する波長帯域幅を、前記波長で割った値が0.062以上であることを特徴とする。

【0010】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と
を備え、40

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$
 d_i が、前記導波層を導波する光の波長について、 $n_i d_i > / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.5%から+1.0%の範囲内となる前記波長を含む連続する波長帯域幅を、前記波長で割った値が0.066以上であることを特徴とする。

【0011】

なお、 $n_i d_i$ について、好ましくは $n_i d_i > 5 / 4$ の関係を満たすことであ50

る。これによりさらに厚い反射膜とすることができます。また、上記波長帯域幅 を、前記波長 で割った値 / は、好ましくは、0.070 以上であり、さらに好ましくは 0.090 以上、またさらには好ましくは 0.10 以上である。低反射率の波長帯域幅が広いと、反射率の波長依存性が小さいので、導波光の波長が変化した場合にも特性変化を抑制できる。

【発明の効果】

【0012】

本発明に係る半導体光素子によれば、多層反射膜のそれぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、導波層を導波する光の所定波長、例えば 980 nm の 1/4 波長より大きい。さらに、この多層反射膜の $n_i d_i$ は、導波光のおよそ 5/4 波長よりも大きく、非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。また、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長における反射率 -1% から +2% の範囲内となる連続する波長帯域幅 を、上記波長で割った値 / が 0.062 以上である。または、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長 における反射率 -1.5% から +1.0% の範囲内となる連続する波長帯域幅 ' を、上記波長 で割った値 / が 0.066 以上である。これにより、非常に厚い膜であるにもかかわらず、一定反射率の波長帯域 () が広くなる。

10

【図面の簡単な説明】

【0013】

20

【図 1】複素数表示による振幅反射率を示す複素平面図である。

【図 2】端面に仮想单層反射膜を有する半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図 3】図 2 の仮想单層反射膜を 2 層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図 4】図 2 の仮想单層反射膜を 4 層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図 5】本発明の実施の形態 1 に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図 6】本発明の実施の形態 1 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

30

【図 7】本発明の実施の形態 2 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 8】端面部に形成された仮想单層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 9】本発明の実施の形態 3 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

40

【図 10】本発明の実施の形態 4 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 11】本発明の実施の形態 5 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 12】本発明の実施の形態 6 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

40

【図 13】本発明の実施の形態 7 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 14】本発明の実施の形態 8 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 15】本発明の実施の形態 9 に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図 16】本発明の実施の形態 9 に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

50

【図17】本発明の実施の形態10に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図18】本発明の実施の形態11に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図19】本発明の実施の形態12に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図20】本発明の実施の形態13に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図21】本発明の実施の形態14に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図22】本発明の実施の形態15に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図23】本発明の実施の形態16に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図24】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図25】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図26】本発明の実施の形態18に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図27】本発明の実施の形態19に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図28】本発明の実施の形態20に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図29】本発明の実施の形態21に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図30】本発明の実施の形態22に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図31】本発明の実施の形態23に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図32】本発明の実施の形態24に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図33】本発明の実施の形態25に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図34】本発明の実施の形態25に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図35】本発明の実施の形態26に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図36】本発明の実施の形態27に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図37】本発明の実施の形態28に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図38】本発明の実施の形態29に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜

【図39】本発明の実施の形態30に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜

【図40】本発明の実施の形態31に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜

【図41】本発明の実施の形態32に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜

における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図117】本発明の実施の形態105に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図118】本発明の実施の形態106に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図119】本発明の実施の形態107に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図120】本発明の実施の形態108に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図121】本発明の実施の形態109に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。 10

【図122】本発明の実施の形態110に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明の実施の形態に係る半導体光素子について、添付図面を用いて説明する。なお、図面において、実質的に同一の部材には同一の符号を付している。

【0015】

まず、本発明の実施の形態に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜の反射率の算出について、図1から図5を用いて説明する。図1は、複素数表示された振幅反射率 r を示す複素平面図である。図2は、半導体光素子の端面部の単層反射膜を示す概略断面図である。図3は、図2の単層反射膜に代えて2層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図4は、図2の単層反射膜に代えて4層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図5は、単層反射膜に代えて7層反射膜を設けた場合の概略断面図である。波長 λ の光についての複素数表示された振幅反射率 r は、次式(1)で表され、図1の複素平面図上に表すことができる 20

$$r = r_r(\theta) + i r_i(\theta) \quad (1)$$

ここで、 i は虚数単位($i = (-1)^{1/2}$)であり、 $r_r(\theta)$ は、実数部であり、 $r_i(\theta)$ は、虚数部である。通常用いられる反射率は、上記の振幅反射率の2乗であって、この反射率がゼロとなる場合とは、下記式(2a)、(2b)のように振幅反射率の実数部及び虚数部とが共にゼロとなる場合である。これらの関係式を解くことによって反射率がゼロとなる条件を得ることができる。 30

$$r_r(\theta) = 0 \quad (2a)$$

$$r_i(\theta) = 0 \quad (2b)$$

【0016】

一方、ゼロでない反射率を求めようとする場合には、図1の複素平面上で円周上の各点の振幅反射率が該当することとなるため、上記のような条件式が一義的には定まらない。そこで、導波する光の波長 λ について所望の反射率が得られる仮想的な単層反射膜を考える。図2は、半導体光素子の導波層10の端面に単層反射膜1を設けた仮想単層反射膜の概略断面図である。反射膜1は大気等の自由空間5に面している。単層反射膜1の振幅反射率 r を最小にする条件は、半導体光素子の導波層10を導波する光の波長 λ 、単層反射膜1の屈折率 n_f 及び膜厚 d_f を用いて、下記式(3)で表される。 40

【数1】

$$d_f = \frac{\lambda}{4n_f} (2m+1) \quad (3)$$

ここで、 $m = 0, 1, 2, 3$ 等の負でない整数である。

【0017】

この仮想単層膜の振幅反射率 r の最小値は、下記式(4)で表される。

【数2】

$$r = \frac{n_c - n_f^2}{n_c + n_f^2} \quad (4)$$

【0018】

なお、反射率Rは、振幅反射率rについて、 $|r|^2$ で表される。つまり、 $R = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$ で表される。従って、反射率 $R = 4\%$ を得ようとすると、半導体光素子の導波層の実効屈折率 $n_c = 3.37$ の場合には、上記式を解いて、単層反射膜1の屈折率 n_f として、2.248又は1.499が得られる。しかし、通常、このような屈折率を有する単層膜は得られないことが多い。そこで、上記仮想単層反射膜を多層反射膜で置換することについて検討する。

10

【0019】

上記の単層反射膜に代えて、2層反射膜を設けた場合の反射率について検討する。図3は、仮想単層反射膜に代えて、端面部に2層反射膜を用いた場合の概略断面図である。この2層反射膜の反射率の極小値を所定値に設定する条件について、本発明者らによる検討結果を説明する。2層反射膜を構成する第1層膜1及び第2層膜2の位相変化をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、下記式(5)及び(6)のように定義される。

20

【数3】

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (5)$$

【数4】

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (6)$$

【0020】

この場合に、複素数表示による振幅反射率rは次式(7)で表される。

【数5】

$$r = \frac{\text{Re}1 + i\text{Im}1}{\text{Re}2 + i\text{Im}2} \quad (7)$$

30

ここで、iは虚数単位であり、Re1及びRe2はそれぞれ分子・分母の実数部であり、Im1、Im2はそれぞれ分子・分母の虚数部である。

【0021】

上記式(7)の分子・分母における実部部Re1、Re2と虚部部Im1、Im2は、それぞれ次式(8a)から式(8d)のように表される。

【数6】

$$\text{Re}1 = (n_c - 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \left(\frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2 n_c}{n_1} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8a)$$

40

【数7】

$$\text{Im}1 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} - n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} - n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8b)$$

【数8】

$$\text{Re}2 = (n_c + 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \left(\frac{n_2 n_c}{n_1} + \frac{n_1}{n_2} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8c)$$

【数9】

$$\text{Im } 2 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} + n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} + n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8 \text{ d})$$

【0022】

また、電力反射率 R は、上記振幅反射率 r を用いて $|r|^2$ で表される。この式(7)で表される振幅反射率が、式(4)で表される上記仮想単層反射膜の振幅反射率と等しくなるように厚さ d₁ 及び d₂ を決めればよい。

【0023】

図4は、単層反射膜に代えて、端面部に4層反射膜を設ける場合の概略断面図である。
この4層反射膜の反射率が設定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一になる条件について検討する。4層反射膜の場合には、振幅反射率は下記式(9)で表される。

【数10】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (9)$$

【0024】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式(10)で表される。

【数11】

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

なお、A, B は、第1層膜1の膜厚 A d₁、第2層膜2の膜厚 A d₂、第3層膜3の膜厚 B d₁、第4層膜4の膜厚 B d₂とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0025】

図5は、単層反射膜に代えて、導波層10の端面部に7層反射膜20を設けた場合の概略断面図である。この7層反射膜20の反射率が前記仮想単層膜の反射率と同一になるように設定する条件について検討する。7層反射膜20の場合には、振幅反射率は、4層反射膜と同様に下記式(11)で表される。

【数12】

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

【0026】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式(12)で表される。

10

20

30

40

【数13】

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

10

なお、O, A, B, Cは、第1層膜11の膜厚O d₂、第2層膜12の膜厚A d₁、第3層膜13の膜厚A d₂、第4層膜14の膜厚B d₁、第5層膜15の膜厚B d₂、第6層膜16の膜厚C d₁、第7層膜17の膜厚C d₂とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0027】

実施の形態1.

本発明の実施の形態1に係る半導体光素子について、図5及び図6を用いて説明する。図5は、単層反射膜に代えて7層反射膜を設けた場合の概略断面図である。この半導体光素子は、例えば、半導体レーザ素子、光変調器、光スイッチ等である。この半導体光素子は、光が導波する導波層の端面部に所定波長を中心とした広い波長帯域にわたって低反射率を有する多層反射膜を設けている。このように低反射率の多層反射膜を設けることにより、例えば、半導体レーザ素子の場合にはいわゆる戻り光によるノイズ等の発生を低減することができる。また、光変調器及び光スイッチの場合には、信号を低損失で透過させることができる。また、この多層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率を有するので、発振波長が変化した場合や、信号の中心波長が変化した場合にも反射特性の波長依存性を抑制できる。

【0028】

以下、半導体光素子の端面部に設けた7層反射膜20について図5を用いて説明する。図5は、半導体光素子の端面部に設けた7層反射膜20の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10(等価屈折率n_c=3.37)の端面部に、アルミナの第1層膜11(屈折率n₂=1.62、膜厚O d₂)、酸化タンタルの第2層膜12(屈折率n₁=2.057、膜厚A d₁)、アルミナの第3層膜13(屈折率n₂=1.62、膜厚A d₂)、酸化タンタルの第4層膜14(屈折率n₁=2.057、膜厚B d₁)、アルミナの第5層膜15(屈折率n₂=1.62、膜厚B d₂)、酸化タンタルの第6層膜16(屈折率n₁=2.057、膜厚C d₁)、アルミナの第7層膜17(屈折率n₂=1.62、膜厚C d₂)が順に積層されている。また、第7層膜17は大気等の自由空間5と接している。

【0029】

この半導体光素子の端面部に設けられた7層反射膜20の反射特性について説明する。まず、設定波長=980 nmで設定反射率R()を2%とする。各パラメータを、O=0.2、A=2.2、B=2.0、C=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化₁及び₂が、それぞれ₁=0.45844、₂=1.14932である場合に波長980 nmで反射率2%が得られる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、O d₂/A d₁/A d₂/B d₁/B d₂/C d₁/C d₂=22.13 nm/7

10

20

30

40

50

6.47 nm / 243.44 nm / 69.52 nm / 221.31 nm / 69.52 nm / 221.31 nmである。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は923.7 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1590.57 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.49倍と非常に厚い。即ち、導波する光の所定波長980 nmについて、その5/4波長よりも厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0030】

図6は、この7層反射膜20の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。ここで設定反射率のおよそ+1%が目標反射率である。この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって目標反射率の3%前後の平坦部分が得られている。即ち、波長968 nmから1210 nmにわたって反射率は極小値の1.3%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は242 nmである。この波長帯域幅を設定波長(=980 nm)で割った値は約0.246である。

10

【0031】

ここで、比較のために導波光の所定波長980 nmについて5/4波長の厚さの仮想单層反射膜を仮定する。設定条件は、波長980 nmで極小反射率4%をとるように、 $n_c = 3.37$ 、 $n_1 = 1.449$ である。この場合、極小反射率を基準として+2%、すなわち反射率4%~6%の波長範囲は951 nm~1011 nmであり、その波長帯域幅は60 nmである。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長980 nmで割ると0.061が得られる。

20

【0032】

そこで、この実施の形態1に係る7層反射膜について、上記仮想单層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率+2%となる波長帯域幅をその波長で割った商は、0.246であり、仮想单層反射膜の0.061よりはるかに大きい。したがって、この7層反射膜は上述のように導波光の所定波長980 nmについて5/4波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0033】

実施の形態2.

本発明の実施の形態2に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図7を用いて説明する。図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層膜の構成において共通するが、設定波長が879 nmで設定反射率R()を2.0%としている点で相違する。各パラメータを、O=0.2、A=2.2、B=2.0、C=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 χ_1 及び χ_2 が、それぞれ $\chi_1 = 0.45844$ 、 $\chi_2 = 1.14932$ である場合に波長879 nmで反射率2%が得られる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 19.85 \text{ nm} / 68.59 \text{ nm} / 218.35 \text{ nm} / 62.36 \text{ nm} / 198.50 \text{ nm} / 62.36 \text{ nm} / 198.50 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は828.51 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1426.66 nmであり、所定波長980 nmについて1/4波長(=245 nm)の約5.82倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

40

【0034】

図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長861 nmから1098 nmにわたって反射率は極小値の1.3%から4.0%の範囲内に収まっている。この場合、導波光の所定波長980 nmを略中心として平坦部分が得られる。また、設定波長879 nmの反

50

射率 2 . 0 % を基準として、 - 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、 1 . 0 % ~ 4 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 237 nm である。この波長帯域幅を設定波長 879 nm で割った値は約 0 . 270 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、上述のように導波光の所定波長 980 nm について 5 / 4 波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。なお、ここで「所定波長」とは、導波層を導波する光の波長であって、この場合には 980 nm の光としている。一方、「設定波長」とは、上記所定波長を低反射率の平坦部の略中心となるように設定する波長である。

【 0035 】

次に、極小反射率を基準として + 2 . 0 % となる波長帯域の広さについて、この 7 層反射膜と仮想単層反射膜とを比較検討する。この 7 層反射膜の極小反射率は 1 . 3 % である。10
そこで、極小反射率を基準として + 2 . 0 % となる波長範囲、つまり反射率 3 . 3 % 以下の範囲は波長 866 nm から 1089 nm である。即ち、波長帯域幅としては 223 nm である。一方、仮想単層反射膜によって同一の極小反射率を実現しようとする場合、実効屈折率 $n_c = 3 . 37$ であるので、単層膜の屈折率 n_f は 1 . 637 又は 2 . 058 とすればよい。例えば、図 8 に屈折率 $n_f = 1 . 637$ であって、膜厚 $d = 5 / (4 n_f)$ の仮想単層反射膜の波長依存性を示す。この仮想単層反射膜の極小反射率 1 . 3 % を基準として極小反射率 + 2 . 0 % 以内となる範囲は、波長 952 nm から 1009 nm である。即ち、波長帯域幅としては 57 nm である。したがって、7 層反射膜は、膜厚 $d = 5 / (4 n_f)$ の仮想単層反射膜に比べて低反射率の波長帯域が非常に広い。20

【 0036 】

実施の形態 3 .

本発明の実施の形態 3 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 9 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 $R()$ を 3 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0 . 2$ 、 $A = 2 . 4$ 、 $B = 2 . 0$ 、 $C = 2 . 0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 518834$ 、 $\varphi_2 = 0 . 789695$ とすることによって波長 980 nm で反射率 3 . 0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 15 . 21 \text{ nm} / 94 . 42 \text{ nm} / 182 . 47 \text{ nm} / 78 . 68 \text{ nm} / 152 . 06 \text{ nm} / 78 . 68 \text{ nm} / 152 . 06 \text{ nm}$ である。30
全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 753 . 58 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1330 . 83 nm であり、所定波長 980 nm の 1 / 4 波長 (= 245 nm) の約 5 . 43 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0037 】

図 9 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 3 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 841 nm から 1014 nm にわたって反射率は 2 . 5 % から 5 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 3 . 0 % を基準として、 - 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、 2 . 0 % ~ 5 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 173 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0 . 177 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 061 より大きい。40
そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0038 】

実施の形態 4 .

本発明の実施の形態 4 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 10 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 3 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1035 nm で設定反射率 $R()$ を 3 . 0 % としている点で相違する。また、50

パラメータは $O = 0.2$ 、 $A = 2.4$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.518834$ 、 $\varphi_2 = 0.789695$ とすることによって波長 1035nm で反射率 3.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 16.06\text{nm} / 99.72\text{nm} / 192.72\text{nm} / 83.10\text{nm} / 160.60\text{nm} / 83.10\text{nm} / 160.60\text{nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 795.9nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1405.57nm であり、所定波長 980nm の $1/4$ 波長 ($= 258.75\text{nm}$) の約 5.43 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0039】

図10は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の 3% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 888nm から 1071nm にわたって反射率は 2.5% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035nm の設定反射率 3.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 183nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035nm で割った値は約 0.177 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

20

【0040】

実施の形態5.

本発明の実施の形態5に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図11を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $= 980\text{nm}$ で設定反射率 $R()$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.52082$ 、 $\varphi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 980nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.08\text{nm} / 98.73\text{nm} / 184.70\text{nm} / 78.98\text{nm} / 147.76\text{nm} / 78.98\text{nm} / 147.76\text{nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 747.99nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1323.92nm であり、所定波長 980nm の $1/4$ 波長 ($= 245\text{nm}$) の約 5.40 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0041】

図11は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の 5% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 834nm から 10121nm にわたって反射率は 3.5% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 178nm である。この波長帯域幅を設定波長 980nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0042】

実施の形態6.

本発明の実施の形態6に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図12を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態5に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $= 1040\text{nm}$ で設定反射率 $R()$ を 4.0% としている点で相違する。また、

50

パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.52082$ 、 $\varphi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 1040 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.76\text{ nm} / 104.77\text{ nm} / 196.00\text{ nm} / 83.82\text{ nm} / 156.80\text{ nm} / 83.82\text{ nm} / 156.80\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 793.77 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1404.95 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 5.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0043】

図12は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 885 nm から 1074 nm にわたって反射率は 3.5% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1040 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 189 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1040 nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

20

【0044】

実施の形態7.

本発明の実施の形態7に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図13を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 980 nm で目標反射率 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.541022$ 、 $\varphi_2 = 0.741397$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.71\text{ nm} / 102.56\text{ nm} / 178.45\text{ nm} / 82.05\text{ nm} / 142.76\text{ nm} / 82.05\text{ nm} / 142.76\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 741.34 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1391.41 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 5.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0045】

図13は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 843 nm から 1013 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 170 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.173 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0046】

実施の形態8.

本発明の実施の形態8に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図14を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態7に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 1035 nm で設定反射率 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは O

50

$= 0.15$ 、 $A = 2.5$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.541022$ 、 $\chi_2 = 0.741397$ とすることによって波長 1035nm で反射率 5.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.31\text{nm} / 108.31\text{nm} / 188.47\text{nm} / 86.65\text{nm} / 150.77\text{nm} / 86.65\text{nm} / 150.77\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_t = d_{total} = d_i$)は 782.93nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1391.41nm であり、所定波長 980nm の $1/4$ 波長($= 245\text{nm}$)の約 5.68 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0047】

図14は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 890nm から 1070nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 170nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035nm で割った値は約 0.164 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

20

【0048】

実施の形態9.

本発明の実施の形態9に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図15及び図16を用いて説明する。図15は、この半導体光素子の端面部の反射膜として、第1層膜に酸化タンタル膜を用いた7層反射膜30を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、7層反射膜30が導波層10側から酸化タンタル21/アルミナ22/酸化タンタル23/アルミナ24/酸化タンタル25/アルミナ26/酸化タンタル27の順に積層されており、導波層10側の第1層膜21が酸化タンタルである点で相違する。具体的には、7層反射膜30は、導波層10側から順に、酸化タンタルの第1層膜21(屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 d_2)、アルミナの第2層膜22(屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $A d_1$)、酸化タンタルの第3層膜23(屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $A d_2$)、アルミナの第4層膜24(屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $B d_1$)、酸化タンタルの第5層膜25(屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $B d_2$)、アルミナの第6層膜26(屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $C d_1$)、酸化タンタルの第7層膜27(屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $C d_2$)とが積層されている。なお、アルミナと酸化タンタルとが交互に積層されている点で実施の形態1に係る半導体光素子と共通する。

30

【0049】

この半導体光素子の端面部の7層反射膜30において、設定波長 $= 980\text{nm}$ で設定反射率 R (λ)を 2.0% とする。この場合、各パラメータを $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ とすると、アルミナ及び酸化タンタルの位相変化 χ_1 及び χ_2 がそれぞれ $\chi_1 = 0.645821$ 、 $\chi_2 = 1.452041$ の場合に波長 980nm で反射率を 2% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 126.62\text{nm} / 113.17\text{nm} / 200.38\text{nm} / 122.49\text{nm} / 216.90\text{nm} / 128.09\text{nm} / 226.81\text{nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 1134.46nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 2174.63nm であり、所定波長 980nm の $1/4$ 波長($= 245\text{nm}$)の約 8.88 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

40

50

【0050】

図16は、この7層反射膜30の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長996nmから1119nmにわたって反射率は1.5%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は157nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.160であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0051】

実施の形態10.

本発明の実施の形態10に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図17を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=908nmで設定反射率R()を2.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.15、A=1.82、B=1.97、C=2.06としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.645821、₂=1.452041とすることによって波長908nmで反射率2.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=117.31nm/104.85nm/185.66nm/113.49nm/200.96nm/118.68nm/210.14nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1051.09nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iは、2014.81nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約8.22倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0052】

図17は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長924nmから1037nmにわたって反射率は1.5%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長908nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は145nmである。この波長帯域幅を設定波長908nmで割った値は約0.160であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0053】

実施の形態11.

本発明の実施の形態11に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図18を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜の構成において共通するが、設定波長=980nmで設定反射率R()を3.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.15、A=1.82、B=1.97、C=2.06としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.893399、₂=1.26984とすることによって波長980nmで反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=110.73nm/156.55nm/175.24nm/169.45nm/189.68nm/177.19nm/198.35nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1177.19nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2201.59nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約8.99倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度

40

50

の上昇を抑制できる。

【0054】

図18は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長962nmから1053nmにわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率3.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、2.0%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は91nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.093であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
10

【0055】

実施の形態12.

本発明の実施の形態12に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図19を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態11に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=953nmで設定反射率R()を3.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.15、A=1.82、B=1.97、C=2.06としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.893399、₂=1.26984とすることによって波長953nmで反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=103.16nm/145.85nm/163.26nm/157.87nm/176.72nm/165.08nm/184.79nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1096.73nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2140.93nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約8.74倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
20

【0056】

図19は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長962nmから1053nmにわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長953nmの設定反射率3.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、2.0%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は89nmである。この波長帯域幅を設定波長953nmで割った値は約0.093であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
30

【0057】

実施の形態13.

本発明の実施の形態13に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図20を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を4.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.09、A=1.80、B=1.98、C=2.05としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂は、₁=0.922613、₂=1.26872とすることによって波長980nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=104.86nm/159.89nm/173.16nm/175.88nm/190.48nm/182.99nm/198.17nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1185.43nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2211.73nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約9.03倍と非常に厚い。このた
40

10

20

30

40

50

め、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制することができる。

【0058】

図20は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は3.7%から6.0%の範囲内に収まっている。また、波長980nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%~6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は190nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.093であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0059】

実施の形態14.

本発明の実施の形態14に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図21を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態13に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=912nmで設定反射率R()を4.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.09、A=1.80、B=1.98、C=2.05としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.922613、₂=1.26872とすることによって波長912nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=97.58nm/148.80nm/161.15nm/163.68nm/177.26nm/170.29nm/184.42nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1103.18nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2059.26nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約8.41倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0060】

図21は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長891nmから1069nmにわたって反射率は3.7%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長912nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%~6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は178nmである。この波長帯域幅を設定波長912nmで割った値は約0.195であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0061】

実施の形態15.

本発明の実施の形態15に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図22を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を5.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=1.13、A=1.76、B=1.98、C=2.06としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=1.0252、₂=1.18958とすることによって波長980nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=101.93nm/173.72nm/158.75nm/195.44nm/178.60nm/203.33nm/185.81nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1103.18nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2213.24nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約9.03倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

40

50

【0062】

図22は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は4.7%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は190nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.194であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0063】

実施の形態16.

本発明の実施の形態16に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図23を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態15に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 910nmで設定反射率R()を5.0%としている点で相違する。また、パラメータはO = 1.13、A = 1.76、B = 1.98、C = 2.06としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 1.0252、₂ = 1.18958とすることによって波長910nmで反射率5.0%とすることができる。それに伴って、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂ = 94.65nm/161.31nm/147.41nm/181.48nm/165.84nm/188.81nm/172.54nmである。全体の膜厚(d_{total} = d_i)は1112.04nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2055.16nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約8.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0064】

図23は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長891nmから1068nmにわたって反射率は4.7%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長910nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は177nmである。この波長帯域幅を設定波長910nmで割った値は約0.195であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0065】

以下に、実施の形態1から実施の形態16に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表1に示した。表1には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長及び設定反射率R()、極小反射率、n_id_i及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、R()の-1.0~+2.0%の範囲となる波長帯域幅、/について示した。

【0066】

10

20

30

40

【表1】

表1

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) との対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
1	7層膜	980nm 2%	1.3%	1590.57nm 6.49倍	242nm	$242/980=0.246$
2	7層膜	879nm 2%	1.3%	1426.66nm 5.82倍	237nm	$237/879=0.270$
3	7層膜	980nm 3%	2.5%	1330.83nm 5.43倍	173nm	$173/980=0.177$
4	7層膜	1035nm 3%	2.5%	1405.57nm 5.74倍	183nm	$183/1035=0.177$
5	7層膜	980nm 4%	3.5%	1323.92nm 5.40倍	178nm	$178/980=0.182$
6	7層膜	1040nm 4%	3.5%	1405.95nm 5.73倍	189nm	$189/1040=0.182$
7	7層膜	980nm 5%	4.6%	1391.41nm 5.38倍	170nm	$170/980=0.173$
8	7層膜	1035nm 5%	4.6%	1391.41nm 5.68倍	170nm	$170/1035=0.164$
9	7層膜	980nm 2%	1.5%	2174.63nm 8.88倍	157nm	$157/980=0.160$
10	7層膜	908nm 2%	1.5%	2014.81nm 8.22倍	145nm	$145/908=0.160$
11	7層膜	980nm 3%	2.6%	2201.59nm 8.99倍	91nm	$91/980=0.093$
12	7層膜	953nm 3%	2.6%	2140.93nm 8.74倍	89nm	$89/953=0.093$
13	7層膜	980nm 4%	3.7%	2211.73nm 9.03倍	190nm	$190/980=0.194$
14	7層膜	912nm 4%	3.7%	2059.26nm 8.41倍	178nm	$178/912=0.195$
15	7層膜	980nm 5%	4.7%	2213.24nm 9.03倍	190nm	$190/980=0.194$
16	7層膜	910nm 5%	4.7%	2055.16nm 8.39倍	177nm	$177/910=0.195$

10

20

30

40

【0067】

実施の形態17.

本発明の実施の形態17に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について図24及び図25を用いて説明する。図24は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて6層反射膜40を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が6層反射膜40で構成されている点で相違する。この6層反射膜40の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と一緒に設定する条件について検討する。6層反射膜40の場合にも上記7層反射膜と同様に、振幅反射率は下記式(13)で表される。

【数14】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (13)$$

【0068】

ここで、 m_{ij} (i, j は 1 又は 2) は下記式(14)で表される。

【数15】

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (14) \end{aligned} \quad 10$$

なお、A, B, C は、第1層膜 3 1 の膜厚 $A d_1$ 、第2層膜 3 2 の膜厚 $A d_2$ 、第3層膜 3 3 の膜厚 $B d_1$ 、第4層膜 3 4 の膜厚 $B d_2$ 、第5層膜 3 5 の膜厚 $C d_1$ 、第6層膜 3 6 の膜厚 $C d_2$ とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。 20

【0069】

以下、半導体光素子の端面部に6層反射膜 4 0 を設けた場合について説明する。図24は、端面部に設けた6層反射膜 4 0 の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 1 0 (等価屈折率 $n_c = 3.37$) の端面部に順に、酸化タンタルの第1層膜 3 1 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$)、アルミナの第2層膜 3 2 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$)、酸化タンタルの第3層膜 3 3 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$)、アルミナの第4層膜 3 4 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$)、酸化タンタルの第5層膜 3 5 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$)、アルミナの第6層膜 3 6 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$)が積層されている。さらに、この6層反射膜 4 0 は、空気等の自由空間 5 に接している。 30

【0070】

この半導体光素子の端面部の6層反射膜 4 0 の反射特性について説明する。まず、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R (%) を 2 % とする。各パラメータを、 $A = 2.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.792828$ 、 $\phi_2 = 0.715471$ である場合に反射率 2 % が得られる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 774.0 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1411.50 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.76 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。 40

【0071】

図25は、この6層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の 3 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 877 nm から 1017 nm にわたって反射率は極小値の 1.4 % から 4.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 2.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、

1 . 0 % ~ 4 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 1 4 0 nm である。この波長帯域幅を所定波長 9 8 0 nm で割った値は約 0 . 1 4 3 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 1 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 0 7 2 】

実施の形態 1 8 .

本発明の実施の形態 1 8 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 2 6 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1 0 1 4 nm で設定反射率 R () を 2 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 2 . 0 、 B = 2 . 0 、 C = 2 . 0 としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 7 9 2 8 2 8$ 、 $\varphi_2 = 0 . 7 1 5 4 7 1$ とすることによって波長 1 0 1 4 nm で反射率 2 . 0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 2 4 . 4 0 \text{ nm} / 1 4 2 . 5 5 \text{ nm} / 1 2 4 . 4 0 \text{ nm} / 1 4 2 . 5 5 \text{ nm} / 1 2 4 . 4 0 \text{ nm} / 1 4 2 . 5 5 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 8 0 0 . 8 5 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 4 6 0 . 4 7 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 5 . 9 6 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 0 7 3 】

図 2 6 は、この 6 層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 3 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 9 0 7 nm から 1 0 5 3 nm にわたって反射率は 1 . 4 % から 4 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1 0 1 4 nm の設定反射率 2 . 0 % を基準として、- 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、1 . 0 % ~ 4 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 1 4 6 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1 0 1 4 nm で割った値は約 0 . 1 4 4 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 1 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 4 0 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 0 7 4 】

実施の形態 1 9 .

本発明の実施の形態 1 9 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 2 7 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 9 8 0 nm で設定反射率 R () を 3 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 1 . 9 4 、 B = 1 . 9 0 、 C = 2 . 2 としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 9 4 8 5 8 5$ 、 $\varphi_2 = 0 . 4 7 6 9 3 9$ とすることによって波長 9 8 0 nm で反射率 3 . 0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 3 9 . 5 4 \text{ nm} / 8 9 . 0 8 \text{ nm} / 1 3 6 . 6 6 \text{ nm} / 8 7 . 2 5 \text{ nm} / 1 5 8 . 2 4 \text{ nm} / 1 0 1 . 0 2 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 7 1 1 . 7 9 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 3 4 2 . 9 5 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 5 . 4 8 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 0 7 5 】

図 2 7 は、この 6 層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 8 0 6 nm から 1 0 0 9 nm にわたって反射率は 2 . 3 % から 5 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 9 8 0 nm の設定反射率 3 . 0 % を基準として、- 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、2

10

20

30

40

50

. 0 % ~ 5 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 2 0 3 nm である。この波長帯域幅を設定波長 9 8 0 nm で割った値は約 0 . 2 0 7 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 1 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 4 0 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 0 7 6 】

実施の形態 2 0 .

本発明の実施の形態 2 0 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 2 8 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 9 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1 0 5 2 nm で設定反射率 R () を 3 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 1 . 9 4 、 B = 1 . 9 0 、 C = 2 . 2 としている。さらに、アルミニウム及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 9 4 8 5 8 5$ 、 $\varphi_2 = 0 . 4 7 6 9 3 9$ とすることによって波長 1 0 5 2 nm で反射率 3 . 0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 5 0 . 6 4 \text{ nm} / 9 6 . 1 7 \text{ nm} / 1 4 7 . 5 4 \text{ nm} / 9 4 . 1 9 \text{ nm} / 1 7 0 . 8 3 \text{ nm} / 1 0 9 . 0 6 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = d_i$) は 7 6 8 . 4 3 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 4 4 9 . 8 1 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 5 . 9 2 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 0 7 7 】

図 2 8 は、この 6 層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は 2 . 3 % から 5 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1 0 5 2 nm の設定反射率 3 . 0 % を基準として、- 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、2 . 0 % ~ 5 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 2 1 8 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1 0 5 2 nm で割った値は約 0 . 2 0 7 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 1 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 4 0 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 0 7 8 】

実施の形態 2 1 .

本発明の実施の形態 2 1 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 2 9 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 9 8 0 nm で設定反射率 R () を 4 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 1 . 9 4 、 B = 1 . 9 0 、 C = 2 . 2 としている。さらに、アルミニウム及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 9 8 5 6 1$ 、 $\varphi_2 = 0 . 4 1 7 5 4 5$ とすることによって波長 9 8 0 nm で反射率 4 . 0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 4 4 . 9 8 \text{ nm} / 7 7 . 9 9 \text{ nm} / 1 4 1 . 9 9 \text{ nm} / 7 6 . 3 8 \text{ nm} / 1 6 4 . 4 1 \text{ nm} / 1 8 8 . 4 4 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{\text{total}} = d_i$) は 7 9 4 . 1 9 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 4 8 3 . 8 4 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 6 . 0 6 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 0 7 9 】

図 2 9 は、この 6 層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 5 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 7 9 1 nm から 1 0 2 0 nm にわたって反射率は 3 . 3 % から 6 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 9 8 0 nm の設定反射率 4 . 0 % を基準として、- 1 . 0 % から + 2 . 0 % の範囲、即ち、3 . 0 % ~ 6 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 2 2 9 nm である。この波長帯域幅を設

10

20

30

40

50

定波長 980 nm で割った値は約 0.234 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0080】

実施の形態 22.

本発明の実施の形態 22 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 30 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 21 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1075 nm で設定反射率 R() を 4.0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 1.94、B = 1.90、C = 2.2 としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.98561$ 、 $\varphi_2 = 0.417545$ とすることによって波長 1075 nm で反射率 4.0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 159.04 \text{ nm} / 85.55 \text{ nm} / 155.76 \text{ nm} / 83.79 \text{ nm} / 180.35 \text{ nm} / 97.02 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 761.51 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1450.03 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.92 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
10

【0081】

図 30 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 5 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 854 nm から 1105 nm にわたって反射率は 3.3 % から 6.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1075 nm の設定反射率 4.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、3.0 % ~ 6.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 251 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1075 nm で割った値は約 0.233 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
20

【0082】

実施の形態 23.

本発明の実施の形態 23 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 31 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 5.0 % としている点で相違する。また、パラメータは A = 2.04、B = 1.92、C = 2.2 としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.93793$ 、 $\varphi_2 = 0.433879$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 145.08 \text{ nm} / 85.22 \text{ nm} / 136.55 \text{ nm} / 80.21 \text{ nm} / 156.46 \text{ nm} / 91.90 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 695.42 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1318.03 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
30

【0083】

図 31 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 787 nm から 1009 nm にわたって反射率は 4.6 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、4.0 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 222 nm である。この波長帯域幅を設
40

定波長 980 nm で割った値は約 0.227 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0084】

実施の形態 24.

本発明の実施の形態 24 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 32 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 23 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1069 nm で設定反射率 R() を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは A = 2.04、B = 1.92、C = 2.2 としている。さらに、アルミニウム及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.93793$ 、 $\varphi_2 = 0.433879$ とすることによって波長 1069 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 158.26 \text{ nm} / 92.96 \text{ nm} / 148.95 \text{ nm} / 87.49 \text{ nm} / 170.67 \text{ nm} / 100.25 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 758.58 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1437.73 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.87 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。10

【0085】

図 32 は、この 6 層反射膜 40 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、目標反射率の約 6% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 858 nm から 1101 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1069 nm の設定反射率 5.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、4.0% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 243 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1069 nm で割った値は約 0.227 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 6 層反射膜 40 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。20

【0086】

以下に、実施の形態 17 から実施の形態 24 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 2 に示した。表 2 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 及び設定反射率 R()、極小反射率、 $n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との対比、R() の -1.0 ~ +2.0% の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ / λ_0 について示した。30

【0087】

【表2】

表2

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率R(λ)	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	R(λ)の-1.0~2.0%となる波長帯域Δλ	Δλ/λ
17	6層膜	980nm 2%	1.4%	1411.50nm 5.76倍	140nm	140/980=0.143
18	6層膜	1014nm 2%	1.4%	1460.47nm 5.96倍	146nm	146/1014=0.144
19	6層膜	980nm 3%	2.3%	1342.95nm 5.48倍	203nm	203/980=0.207
20	6層膜	1014nm 3%	2.3%	1449.81nm 5.92倍	218nm	218/1014=0.207
21	6層膜	980nm 4%	3.3%	1483.84nm 6.06倍	229nm	229/980=0.234
22	6層膜	1075nm 4%	3.3%	1450.03nm 5.92倍	251nm	251/1075=0.233
23	6層膜	980nm 5%	4.6%	1318.03nm 5.38倍	222nm	222/980=0.227
24	6層膜	1069nm 5%	4.6%	1437.73nm 5.87倍	243nm	243/1069=0.164

10

20

30

40

【0088】

実施の形態25.

本発明の実施の形態25に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について図33及び図34を用いて説明する。図33は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる7層反射膜50を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が3種類の膜からなる7層反射膜50で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層10に接する第1層膜が窒化アルミニウム膜41である点で相違する。なお、第2層膜から第7層膜にかけては酸化タンタル及びアルミナが交互に積層されている点で共通する。

【0089】

この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率が所定波長で上記仮想单層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層10に接する第1層膜に第3の種類の膜を用いた場合について検討する。この第3の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式(15)で表される。

【数16】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (15)$$

【0090】

そこで、この3種類の膜からなる7層反射膜50の振幅反射率は、上記7層反射膜、6層反射膜と同様に下記式(16)で表される。

【数17】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (16)$$

【0091】

ここで、 m_{ij} (i, j は 1 又は 2) は下記式 (17) で表される。

【数18】

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (17) \end{aligned} \quad 10 \quad 20$$

なお、A, B, C は、第2層膜 4 2 の膜厚 $A d_1$ 、第3層膜 4 3 の膜厚 $A d_2$ 、第4層膜 4 4 の膜厚 $B d_1$ 、第5層膜 4 5 の膜厚 $B d_2$ 、第6層膜 4 6 の膜厚 $C d_1$ 、第7層膜 4 7 の膜厚 $C d_2$ とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0092】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む7層反射膜 5 0 を設けた場合について説明する。図33は、端面部に設けた3種類の膜を含む7層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 1 0 (等価屈折率 $n_c = 3.37$) の端面部に順に、窒化アルミニウム(A1N)の第1層膜 4 1 (屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 50 \text{ nm}$)、酸化タンタルの第2層膜 4 2 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$)、アルミナの第3層膜 4 3 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$)、酸化タンタルの第4層膜 4 4 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$)、アルミナの第5層膜 4 5 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$)、酸化タンタルの第6層膜 4 6 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$)、アルミナの第7層膜 4 7 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$)が積層されている。さらに、この7層反射膜 5 0 は、空気等の自由空間 5 に接している。

【0093】

まず、窒化アルミニウム、酸化タンタル、アルミナの3種類の膜を含む7層反射膜の熱特性について説明する。この3種類の膜の熱伝導率は、順に、約 $1.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.1 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.2 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ なので、窒化アルミニウムが最も熱伝導率が高い。このため導波層 1 0 の熱を迅速に外部に放熱させることができる。

【0094】

次に、この半導体光素子の端面部の3種類の膜を含む7層反射膜 5 0 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 R () を 2.0% とする。各パラメータを、 $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 1.23574$ 、 $\phi_2 = 0.727856$ である場合に波長 980 nm で反射率 2% が得られる。なお、窒化アルミニウムの第1層膜 4 1 の厚み d_3 は予め 50 nm として、 ϕ_3 は既知の定数として用い、変数には ϕ_1 及び ϕ_2 のみを用いた。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_1 / A d_2$

$2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 \text{ nm} / 93.7 \text{ nm} / 70.08 \text{ nm} / 187.40 \text{ nm} / 140.15 \text{ nm} / 187.40 \text{ nm} / 140.15 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 868.88 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1634.92 nm であり、 $/ 4 (= 245 \text{ nm})$ の約 6.67 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0095】

図34は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 952 nm から 1194 nm にわたって反射率は極小値の 1.6% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 2.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $1.0\% \sim 4.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.247 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0096】

実施の形態26.

本発明の実施の形態26に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図35を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $= 897 \text{ nm}$ で設定反射率 $R()$ を 2.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.23574$ 、 $\varphi_2 = 0.727856$ とすることによって波長 897 nm で反射率 2.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 / 83.26 \text{ nm} / 65.10 \text{ nm} / 166.52 \text{ nm} / 130.20 \text{ nm} / 166.52 \text{ nm} / 130.20 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 791.8 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1487.24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0097】

図35は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1086 nm にわたって反射率は 1.5% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 897 nm の設定反射率 2.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $1.0\% \sim 4.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 214 nm である。この波長帯域幅を設定波長 897 nm で割った値は約 0.239 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0098】

実施の形態27.

本発明の実施の形態27に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図36を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $= 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R()$ を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.20275$ 、 $\varphi_2 = 0.765599$ とすることによって波長 980 nm で反射率 3.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 /$

40

50

$A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 91.20 \text{ nm} / 73.71 \text{ nm} / 182.40 \text{ nm} / 147.42 \text{ nm} / 182.40 \text{ nm} / 147.42 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 874.55 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1638.64 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.69 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0099】

図36は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 953 nm から 1195 nm にわたって反射率は 2.6% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 3.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.247 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0100】

実施の形態28.

本発明の実施の形態28に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図37を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態27と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $= 896 \text{ nm}$ で設定反射率R()を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.23574$ 、 $\varphi_2 = 0.727856$ とすることによって波長 896 nm で反射率 3.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 / 81.08 \text{ nm} / 68.15 \text{ nm} / 162.16 \text{ nm} / 136.31 \text{ nm} / 162.16 \text{ nm} / 136.31 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 796.17 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1489.56 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.08 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0101】

図37は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1089 nm にわたって反射率は 2.5% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 896 nm の設定反射率 3.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 217 nm である。この波長帯域幅を設定波長 896 nm で割った値は約 0.242 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0102】

実施の形態29.

本発明の実施の形態29に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図38を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $= 980 \text{ nm}$ で設定反射率R()を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.17459$ 、 $\varphi_2 = 0.798874$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 /$

40

50

$A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 89.06 \text{ nm} / 76.91 \text{ nm} / 178.13 \text{ nm} / 153.83 \text{ nm} / 178.13 \text{ nm} / 153.83 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 879.89 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1642.63 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.70 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0103】

図38は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 953 nm から 1198 nm にわたって反射率は 3.6% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 245 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.250 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0104】

実施の形態30.

本発明の実施の形態30に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図39を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態29に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 893 nm で設定反射率R()を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.14262$ 、 $\chi_2 = 0.805876$ とすることによって波長 893 nm で反射率 4.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 / 78.95 \text{ nm} / 70.70 \text{ nm} / 157.90 \text{ nm} / 141.40 \text{ nm} / 157.90 \text{ nm} / 141.40 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 798.25 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1488.27 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0105】

図39は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 870 nm から 1090 nm にわたって反射率は 3.4% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 893 nm の設定反射率 4.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 220 nm である。この波長帯域幅を設定波長 893 nm で割った値は約 0.246 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0106】

実施の形態31.

本発明の実施の形態31に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図40を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 980 nm で設定反射率R()を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.14888$ 、 $\chi_2 = 0.829916$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 /$

40

50

$A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 87.11 \text{ nm} / 79.90 \text{ nm} / 174.23 \text{ nm} / 159.81 \text{ nm} / 174.23 \text{ nm} / 159.81 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 885.09 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1646.79 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.72 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0107】

図40は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 952 nm から 1201 nm にわたって反射率は 4.6% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 249 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.254 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

10

【0108】

実施の形態32.

本発明の実施の形態32に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図41を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態31と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $= 890 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\quad)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.11792$ 、 $\varphi_2 = 0.835299$ とすることによって波長 890 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 76.98 \text{ nm} / 73.04 \text{ nm} / 153.96 \text{ nm} / 146.07 \text{ nm} / 153.96 \text{ nm} / 146.07 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 800.08 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1486.93 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245 \text{ nm}$)の約 6.07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0109】

図41は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 867 nm から 1093 nm にわたって反射率は 4.4% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 890 nm の設定反射率 5.0% を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 226 nm である。この波長帯域幅を設定波長 890 nm で割った値は約 0.254 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0110】

以下に、実施の形態25から実施の形態32に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表3に示した。表3には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長及び設定反射率 $R(\quad)$ 、極小反射率、 $n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長(245 nm)との対比、 $R(\quad)$ の $-1.0 \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $、\quad /$ について示した。

40

【0111】

【表3】

表3

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率R(λ)	極小反射率	Σn _i d _i 、 波長980nmの1/4波長 (245nm)との対比	R(λ)の -1.0~2.0%となる波長 帯域Δλ	Δλ/λ
25	7層膜 (3種類)	980nm 2%	1.6%	1634.92nm 6.67倍	242nm	242/980=0.247
26	7層膜 (3種類)	897nm 2%	1.5%	1487.24nm 6.07倍	214nm	214/897=0.239
27	7層膜 (3種類)	980nm 3%	2.6%	1638.64nm 6.69倍	242nm	242/980=0.247
28	7層膜 (3種類)	896nm 3%	2.5%	1489.56nm 6.08倍	217nm	217/896=0.242
29	7層膜 (3種類)	980nm 4%	3.6%	1642.63nm 6.70倍	245nm	245/980=0.250
30	7層膜 (3種類)	893nm 4%	3.4%	1488.27nm 6.07倍	220nm	220/893=0.246
31	7層膜 (3種類)	980nm 5%	4.6%	1646.79nm 6.72倍	249nm	249/980=0.254
32	7層膜 (3種類)	890nm 5%	4.4%	1486.93nm 6.07倍	226nm	226/890=0.254

10

20

30

【0112】

実施の形態33.

本発明の実施の形態33に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について図42及び43を用いて説明する。図42は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて9層反射膜60を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が9層反射膜60で構成されている点で相違する。この9層反射膜60の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一にする条件について検討する。9層反射膜60の振幅反射率は、上記4層反射膜及び7層反射膜と同様に下記式(18)で表される。

【数19】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (18)$$

【0113】

40

ここで、 $m_{i,j}$ (i,jは1又は2)は下記式(19)で表される。

【数20】

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} \cos O\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin O\phi_2 \\ -in_2 \sin O\phi_2 & \cos O\phi_2 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -in_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (19)
 \end{aligned}$$

10

なお、O, A, B, C, Dは、第1層膜51の膜厚O d₂、第2層膜52の膜厚A d₁、第3層膜63の膜厚A d₂、第4層膜54の膜厚B d₁、第5層膜55の膜厚B d₂、第6層膜56の膜厚C d₁、第7層膜57の膜厚C d₂、第8層膜58の膜厚D d₁、第9層膜59の膜厚D d₂において、第1層膜31を除き、それぞれの2層膜（ペア）の寄与率を表すパラメータである。

【0114】

以下、半導体光素子の端面部に9層反射膜60を設けた場合について説明する。図42は、端面部に設けた9層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率n_c=3.37）の端面部に順に、アルミナの第1層膜51（屈折率n₂=1.62、膜厚O d₂）、酸化タンタルの第2層膜52（屈折率n₁=2.057、膜厚A d₁）、アルミナの第3層膜53（屈折率n₂=1.62、膜厚A d₂）、酸化タンタルの第4層膜54（屈折率n₁=2.057、膜厚B d₁）、アルミナの第5層膜55（屈折率n₂=1.62、膜厚B d₂）、酸化タンタルの第6層膜56（屈折率n₁=2.057、膜厚C d₁）、アルミナの第7層膜57（屈折率n₂=1.62、膜厚C d₂）、酸化タンタルの第8層膜58（屈折率n₁=2.057、膜厚C d₁）、アルミナの第9層膜59（屈折率n₂=1.62、膜厚C d₂）が積層されている。さらに、この9層反射膜60は、空気等の自由空間5に接している。

【0115】

この半導体光素子の端面部の9層反射膜60の反射特性について説明する。まず、設定波長=980nmで設定反射率R()を2%とする。各パラメータを、O=0.2、A=2.7、B=2.0、C=2.0、D=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化₁及び₂が、それぞれ₁=0.35769、₂=0.958077である場合に波長980nmで反射率2%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、O d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂=18.45nm / 73.23nm / 249.06nm / 54.24nm / 184.49nm / 54.24nm / 184.49nm / 54.24nm / 184.49nmである。全体の膜厚(d_{tota1}=d_i)は1056.93nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iは、1815.34nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.41倍と非常に厚い。この

20

30

40

50

ため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0116】

図43は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1007nmにわたって反射率は極小値の1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長980nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は130nmである。この波長帯域幅を所定波長980nmで割った値は約0.133であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
10

【0117】

実施の形態34.

本発明の実施の形態34に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図44を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33と比較すると、その構成において共通するが、設定波長=1020nmで設定反射率R()を2.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.2, A=2.7, B=2.0, C=2.0, D=2.0としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.35769、₂=0.958077とすることによって波長1020nmで反射率2.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、O_{d₂}/A_{d₁}/A_{d₂}/B_{d₁}/B_{d₂}/C_{d₁}/C_{d₂}/D_{d₁}/D_{d₂}=19.20nm/76.22nm/259.22nm/56.46nm/192.02nm/56.46nm/192.02nm/56.46nm/192.02nm/56.46nm/192.02nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1100.08nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1889.46nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
20

【0118】

図44は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長912nmから1048nmにわたって反射率は1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1020nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は136nmである。この波長帯域幅を設定波長1020nmで割った値は約0.133であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
30

【0119】

実施の形態35.

本発明の実施の形態35に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図45を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長=980nmで設定反射率R()を3.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、O=0.2, A=2.7, B=2.0, C=2.0, D=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化₁及び₂が、それぞれ₁=0.377348、₂=0.935416である場合に波長980nmで反射率3%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、O_{d₂}/A_{d₁}/A_{d₂}/B_{d₁}/B_{d₂}/C_{d₁}/C_{d₂}/D_{d₁}/D_{d₂}=18.01nm/77.25nm/243.16nm/57.22nm/180.12nm/57.22nm/180.12nm/57.22nm/180.12nm/57.22nm/180.12nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は1050.44nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_i
40

50

$n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1810.49 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.49 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0120】

図 45 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 882 nm から 1007 nm にわたって反射率は極小値の 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 3.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 125 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜 60 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0121】

実施の形態 36 .

本発明の実施の形態 36 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 46 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 35 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 1017 nm で設定反射率 R() を 3.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.2、A = 2.7、B = 2.0、C = 2.0、D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 φ_1 及び φ_2 が、それぞれ $\varphi_1 = 0.377348$ 、 $\varphi_2 = 0.935416$ である場合に波長 1017 nm で反射率 3 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.69 \text{ nm} / 80.17 \text{ nm} / 252.35 \text{ nm} / 59.39 \text{ nm} / 186.92 \text{ nm} / 59.39 \text{ nm} / 186.92 \text{ nm} / 59.39 \text{ nm} / 186.92 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_t = d_{t,a} = d_i$) は 1090.14 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1878.92 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.67 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0122】

図 46 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 915 nm から 1045 nm にわたって反射率は極小値の 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 1017 nm の反射率 3.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 130 nm である。この波長帯域幅を所定波長 1017 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜 60 は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0123】

実施の形態 37 .

本発明の実施の形態 37 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 47 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 4.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.15、A = 2.8、B = 2.0、C = 2.0、D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 φ_1 及び φ_2 が、それぞれ $\varphi_1 = 0.38725$ 、 $\varphi_2 = 0.911369$ である場合に波長 980 nm で反射率 4 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.16 \text{ nm} / 82.22 \text{ nm} / 245.69 \text{ nm} / 58.73 \text{ nm} / 175.49 \text{ nm} / 58.73 \text{ nm}$

10

20

30

40

50

/ 175.49 nm / 58.73 nm / 175.49 nm である。全体の膜厚 ($d_{t_0 t_a}$ = d_i) は 1043.73 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1803.77 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.36 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0124】

図 47 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 5 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 883 nm から 1006 nm にわたって反射率は極小値の 3.6 % から 6.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 4.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、3.0 % ~ 6.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 123 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.126 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0125】

実施の形態 38 .

本発明の実施の形態 38 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 48 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 37 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 1017 nm で設定反射率 R() を 4.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.15、A = 2.8、B = 2.0、C = 2.0、D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 φ_1 及び φ_2 が、それぞれ $\varphi_1 = 0.38725$ 、 $\varphi_2 = 0.911369$ である場合に波長 1017 nm で反射率 4 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.66 \text{ nm} / 85.32 \text{ nm} / 245.96 \text{ nm} / 60.94 \text{ nm} / 182.12 \text{ nm} / 60.94 \text{ nm} / 182.12 \text{ nm} / 60.94 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{t_0 t_a}$ = d_i) は 1083.12 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1871.83 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.64 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0126】

図 48 は、この 9 層反射膜 60 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、目標反射率の 5 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 916 nm から 1044 nm にわたって反射率は極小値の 3.6 % から 6.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 1017 nm の反射率 4.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、3.0 % ~ 6.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 128 nm である。この波長帯域幅を所定波長 1017 nm で割った値は約 0.126 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0127】

実施の形態 39 .

本発明の実施の形態 39 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 49 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 5.0 % としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.10、A = 2.9、B = 2.0、C = 2.0、D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 φ_1 及び φ_2 が、それぞれ $\varphi_1 = 0.397519$ 、 $\varphi_2 = 0.886992$ である場合に波長 980 nm で反射率 5 % が得られる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 /$

10

20

30

40

50

$A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.54 \text{ nm} / 87.41 \text{ nm} / 247.66 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm} / 170.80 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm} / 170.80 \text{ nm} / 60.28 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,a_1} = d_i$) は 1036.85 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1801.04 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.35 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0128】

図49は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 890 nm から 1006 nm にわたって反射率は極小値の4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 116 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.118 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0129】

実施の形態40.

本発明の実施の形態40に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図50を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態39に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 = 1013 nm で設定反射率 $R(\)$ を5.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.10$ 、 $A = 2.9$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 χ_1 及び χ_2 が、それぞれ $\chi_1 = 0.397519$ 、 $\chi_2 = 0.886992$ である場合に波長 1013 nm で反射率5%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.83 \text{ nm} / 90.35 \text{ nm} / 256.00 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm} / 176.55 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm} / 176.55 \text{ nm} / 62.31 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,a_1} = d_i$) は 1071.76 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.58 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0130】

図50は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 920 nm から 1040 nm にわたって反射率は極小値の4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1013 nm の反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅 $\Delta\lambda$ は 120 nm である。この波長帯域幅を設定波長 = 1013 nm で割った値は約 0.118 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0131】

以下に、実施の形態33から実施の形態40に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表4に示した。表4には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 及び設定反射率 $R(\)$ 、極小反射率、 $n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\)$ の $-1.0\% \sim +2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda / \lambda_0$ について示した。

【0132】

10

20

30

40

50

【表4】

表4

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4波長 (245nm)との 対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
33	9層膜	980nm 2%	1.4%	1815.34nm 7.41倍	130nm	$130/980=0.133$
34	9層膜	1020nm 2%	1.4%	1889.46nm 7.71倍	136nm	$136/1020=0.133$
35	9層膜	980nm 3%	2.6%	1810.49nm 7.49倍	125nm	$125/980=0.128$
36	9層膜	1017nm 3%	2.6%	1878.92nm 7.67倍	130nm	$130/1017=0.128$
37	9層膜	980nm 4%	3.6%	1803.77nm 7.36倍	123nm	$123/980=0.126$
38	9層膜	1017nm 4%	3.6%	1871.83nm 7.64倍	128nm	$128/1017=0.126$
39	9層膜	980nm 5%	4.6%	1801.04nm 7.35倍	116nm	$116/980=0.118$
40	9層膜	1013nm 5%	4.6%	1857.42nm 7.58倍	120nm	$120/1013=0.118$

10

20

30

40

【0133】

実施の形態41.

本発明の実施の形態3に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図51を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 1.95$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.845348$ 、 $\phi_2 = 0.578286$ とすることによって波長980 nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.35 \text{ nm} / 124.99 \text{ nm} / 108.57 \text{ nm} / 128.20 \text{ nm} / 111.35 \text{ nm} / 128.20 \text{ nm} / 111.35 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は721.01 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1334.70 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.45倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0134】

図51は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長828 nmから1009 nmにわたって反射率は5.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率6.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、5.0%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は181 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.185であり、仮想単層反射膜の場合の0.062より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有しているこ

50

とがわかる。

【0135】

実施の形態42.

本発明の実施の形態42に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図52を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態41に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1045nmで設定反射率R()を6.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.15、A=1.95、B=2.0、C=2.0としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.541022、₂=0.741397とすることによって波長1045nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=8.91nm/133.28nm/115.77nm/136.70nm/118.74nm/136.70nm/118.74nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は768.84nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1423.24nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.81倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0136】

図52は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長883nmから1076nmにわたって反射率は5.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1045nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、反射率5.0%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は193nmである。この波長帯域幅を設定波長1045nmで割った値は約0.185であり、仮想単層反射膜の場合の0.062より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0137】

以下に、実施の形態41と実施の形態42とに係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表5に示した。表5には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長及び設定反射率R()、極小反射率、n_id_i及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、R()の-1.0~+2.0%の範囲となる波長帯域幅、/について示した。

【0138】

【表5】

表5

多層反射膜の特性					
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率R(λ)	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4波長 (245nm)との 対比	R(λ)の -1.0~2.0% となる波長 帯域Δλ
41	7層膜	980nm 6%	5.4%	1334.70nm 5.45倍	181nm 181/980=0.185
42	7層膜	1045nm 6%	5.4%	1423.24nm 5.81倍	193nm 193/1045=0.185

【0139】

実施の形態43.

10

20

30

40

50

本発明の実施の形態43に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図53を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率R()を6.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.20、A=1.97、B=2.35、C=2.10としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.79703、₂=0.528684とすることによって波長980 nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=10.18 nm/119.06 nm/100.28 nm/145.02 nm/119.62 nm/126.91 nm/106.89 nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は727.96 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iは、1350.16 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.51倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0140】

図53は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長813 nmから994 nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は181 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.185である。

【0141】

ここで、比較のために導波光の所定波長980 nmについて5/4波長の厚さの仮想単層反射膜を仮定する。設定条件は、波長980 nmで極小反射率4%をとるように、n_c=3.37、n₁=1.449である。この場合、極小反射率を基準として+2.5%、すなわち反射率4%~6.5%の波長範囲は949 nm~1013 nmであり、その波長帯域幅は64 nmである。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長980 nmで割ると0.065が得られる。

【0142】

そこで、この実施の形態43に係る7層反射膜について、上記仮想単層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率+2.5%となる波長帯域幅をその波長で割った商は、0.185であり、仮想単層反射膜の0.065よりはるかに大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0143】

実施の形態44.

本発明の実施の形態44に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図54を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態43に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1063 nmで設定反射率R()を6.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.20、A=1.97、B=2.35、C=2.10としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.79703、₂=0.528684とすることによって波長1063 nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=11.04 nm/129.14 nm/108.77 nm/154.05 nm/129.75 nm/137.66 nm/115.95 nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は786.36 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iは、1457.82 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.95倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0144】

図54は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は

10

20

30

40

50

波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長882nmから1078nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1063nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196nmである。この波長帯域幅を設定波長1063nmで割った値は約0.184であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0145】

実施の形態45.

本発明の実施の形態45に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図55を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を7.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.17、A=1.97、B=2.35、C=2.05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.80763、₂=0.525803とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=8.61nm/120.64nm/99.73nm/143.91nm/118.97nm/125.54nm/103.78nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は721.18nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1338.78nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.46倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

20

30

40

【0146】

図55は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長797nmから993nmにわたって反射率は5.9%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%~8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.200であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0147】

実施の形態46.

本発明の実施の形態46に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図56を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態45に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=1073nmで設定反射率R()を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.80763、₂=0.525803とすることによって波長1073nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=9.42nm/132.09nm/109.19nm/157.57nm/130.26nm/137.45nm/113.63nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は789.61nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1465.82nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.98倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0148】

図56は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分

50

が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1088 nm にわたって反射率は 5.9% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1073 nm の設定反射率 7.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 5.5% ~ 8.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 196 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1073 nm で割った値は約 0.183 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0149】

実施の形態 47.

本発明の実施の形態 47 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 57 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは O = 0.17, A = 1.97, B = 2.35, C = 2.0 としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.806965$, $\varphi_2 = 0.531203$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができます。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.69 \text{ nm} / 120.54 \text{ nm} / 100.75 \text{ nm} / 143.79 \text{ nm} / 120.19 \text{ nm} / 122.38 \text{ nm} / 102.29 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 718.63 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1333.17 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.44 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0150】

図 57 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 8% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 786 nm から 994 nm にわたって反射率は 7.0% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 6.5% ~ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 208 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.212 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0151】

実施の形態 48.

本発明の実施の形態 48 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 58 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 47 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1079 nm で設定反射率 R() を 8.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.806965$, $\varphi_2 = 0.531203$ とすることによって波長 1079 nm で反射率 8.0% とすることができます。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.57 \text{ nm} / 132.72 \text{ nm} / 110.93 \text{ nm} / 158.32 \text{ nm} / 132.33 \text{ nm} / 134.74 \text{ nm} / 112.62 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 791.23 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1467.86 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.99 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0152】

図 58 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 8% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 1094 nm にわた

10

20

30

40

50

って反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1079nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%～9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は228nmである。この波長帯域幅を設定波長1079nmで割った値は約0.211であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0153】

実施の形態49.

本発明の実施の形態49に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図59を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を9.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.20、A=2.05、B=2.40、C=1.95としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.734549、₂=0.580342とすることによって波長980nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=11.17nm/114.18nm/114.54nm/133.67nm/134.10nm/108.61nm/108.96nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は725.23nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1330.65nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0154】

図59は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長793nmから994nmにわたって反射率は8.1%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は202nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.206であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0155】

実施の形態50.

本発明の実施の形態50に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図60を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態49に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=1075nmで設定反射率R()を9.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.734549、₂=0.580342とすることによって波長1075nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=12.26nm/125.25nm/125.65nm/146.63nm/147.10nm/119.14nm/119.52nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は795.55nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1459.67nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0156】

図60は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長870nmから1090nmにわたって反射率は8.1%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1075

10

20

30

40

50

nmの設定反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%~10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は220nmである。この波長帯域幅を設定波長1075nmで割った値は約0.205であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0157】

実施の形態51.

本発明の実施の形態51に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図61を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を10.0%としている点で相違する。10また、パラメータはO=0.17、A=2.10、B=2.45、C=1.95としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.729549、₂=0.564265とすることによって波長980nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=9.24nm/116.17nm/114.09nm/135.53nm/133.10nm/107.87nm/105.94nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は721.94nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1326.67nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.41倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。20

【0158】

図61は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長773nmから994nmにわたって反射率は9.0%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%~11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.226であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。30

【0159】

実施の形態52.

本発明の実施の形態52に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図62を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態51に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=1087nmで設定反射率R()を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.729549、₂=0.564265とすることによって波長1087nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はOd₂/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=10.24nm/128.85nm/126.54nm/150.33nm/147.63nm/119.65nm/117.50nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は800.74nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1471.49nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。40

【0160】

図62は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長857nmから1102nmにわたって反射率は9.0%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1087nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、

10

20

30

40

50

反射率 8 . 5 % ~ 11 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 245 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1087 nm で割った値は約 0 . 225 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0161】

実施の形態 53 .

本発明の実施の形態 53 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 63 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 11 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは O = 0 . 20 、 A = 2 . 20 、 B = 2 . 55 、 C = 1 . 95 としている。
さらには、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 674425$ 、 $\varphi_2 = 0 . 572301$ とすることによって波長 980 nm で反射率 11 . 0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11 . 02 \text{ nm} / 112 . 50 \text{ nm} / 121 . 22 \text{ nm} / 130 . 40 \text{ nm} / 140 . 51 \text{ nm} / 99 . 72 \text{ nm} / 107 . 45 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 722 . 82 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1320 . 69 nm であり、所定波長 980 nm の 1 / 4 波長 (= 245 nm) の約 5 . 39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0162】

図 63 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 764 nm から 994 nm にわたって反射率は 10 . 2 % から 12 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 11 . 0 % を基準として、 -1 . 5 % から +1 . 0 % の範囲、即ち、反射率 9 . 5 % ~ 12 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 230 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0 . 235 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0163】

実施の形態 54 .

本発明の実施の形態 54 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 64 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 53 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1092 nm で設定反射率 R() を 11 . 0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0 . 674425$ 、 $\varphi_2 = 0 . 572301$ とすることによって波長 1092 nm で反射率 11 . 0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12 . 28 \text{ nm} / 125 . 36 \text{ nm} / 135 . 08 \text{ nm} / 145 . 31 \text{ nm} / 156 . 56 \text{ nm} / 111 . 12 \text{ nm} / 119 . 73 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 805 . 44 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1471 . 66 nm であり、所定波長 980 nm の 1 / 4 波長 (= 245 nm) の約 6 . 01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0164】

図 64 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 851 nm から 1108 nm にわたって反射率は 10 . 2 % から 12 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1092 nm の設定反射率 11 . 0 % を基準として、 -1 . 5 % から +1 . 0 % の範囲、即ち、反射率 9 . 5 % ~ 12 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 257 nm である。この波

10

20

30

40

50

長帯域幅を設定波長 1092 nm で割った値は約 0.235 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0165】

実施の形態 55.

本発明の実施の形態 55 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 65 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 12.0 % としている点で相違する。また、パラメータは O = 0.20、A = 2.35、B = 2.65、C = 1.95 としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.614143$ 、 $\varphi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 980 nm で反射率 12.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.21 \text{ nm} / 109.43 \text{ nm} / 131.68 \text{ nm} / 123.40 \text{ nm} / 148.49 \text{ nm} / 90.81 \text{ nm} / 109.26 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 724.28 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1314.76 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.37 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。10

【0166】

図 65 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 751 nm から 995 nm にわたって反射率は 10.9 % から 13.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 10.5 % ~ 13.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 244 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.249 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。20

【0167】

実施の形態 56.

本発明の実施の形態 56 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 66 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 47 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1100 nm で設定反射率 R() を 12.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.614143$ 、 $\varphi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 1100 nm で反射率 12.0 % とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12.58 \text{ nm} / 122.83 \text{ nm} / 147.80 \text{ nm} / 138.51 \text{ nm} / 166.67 \text{ nm} / 101.93 \text{ nm} / 122.64 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 812.96 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1475.74 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。3040

【0168】

図 66 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 842 nm から 1117 nm にわたって反射率は 10.9 % から 13.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1100 nm の設定反射率 12.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 10.5 % ~ 13.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 275 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1100 nm で割った値は約 0.250 であり、仮想単層反射膜の50

場合の 0 . 0 6 5 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 1 6 9 】

以下に、実施の形態 4 3 から実施の形態 5 6 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 6 に示した。表 6 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1 / 4 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0 % の範囲となる波長帯域幅 $\Delta \lambda$ について示した。

【 0 1 7 0 】

【 表 6 】

表 6

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との 対比	$R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0 % となる波長 帯域 $\Delta \lambda$	$\Delta \lambda / \lambda$
43	7 層膜	980nm 6 %	5.0%	1350.16nm 5.51 倍	181nm	181/980= 0.185
44	7 層膜	1063nm 6 %	5.0%	1457.82nm 5.95 倍	196nm	196/1063= 0.184
45	7 層膜	980nm 7 %	5.9%	1338.78nm 5.46 倍	196nm	196/980= 0.200
46	7 層膜	1073nm 7 %	5.9%	1465.82nm 5.98 倍	196nm	196/1073= 0.183
47	7 層膜	980nm 8 %	7.0%	1333.17nm 5.44 倍	208nm	208/980= 0.212
48	7 层膜	1079nm 8 %	7.0%	1467.86nm 5.99 倍	228nm	228/1079= 0.211
49	7 层膜	980nm 9 %	8.1%	1330.65nm 5.43 倍	202nm	202/980= 0.206
50	7 层膜	1075nm 9 %	8.1%	1459.67nm 5.96 倍	220nm	220/1075= 0.205
51	7 层膜	980nm 10 %	9.0%	1326.67nm 5.41 倍	221nm	221/980= 0.226
52	7 层膜	1087nm 10 %	9.0%	1471.49nm 6.01 倍	245nm	245/1087= 0.225
53	7 层膜	980nm 11 %	10.2%	1320.69nm 5.39 倍	230nm	230/980= 0.235
54	7 层膜	1092nm 11 %	10.2%	1471.66nm 6.01 倍	257nm	257/1092= 0.235
55	7 层膜	980nm 12 %	10.9%	1314.76nm 5.37 倍	244nm	244/980= 0.249
56	7 层膜	1100nm 12 %	10.9%	1475.74nm 6.02 倍	275nm	275/1100= 0.250

【 0 1 7 1 】

実施の形態 5 7 。

本発明の実施の形態 5 7 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 6 7 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、

設定波長 = 980 nmで設定反射率 R () を 6.0 % としており、パラメータは A = 1.50, B = 1.92, C = 2.2 としている点で相違する。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.16473$, $\chi_2 = 0.715823$ とすることによって波長 980 nm で反射率 6.0 % とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 132.47 \text{ nm} / 103.38 \text{ nm} / 169.57 \text{ nm} / 132.32 \text{ nm} / 194.30 \text{ nm} / 151.62 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 883.66 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1648.43 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0172】

図 67 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 966 nm から 1219 nm にわたって反射率は 5.0 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 253 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.258 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

20

【0173】

実施の形態 58.

本発明の実施の形態 58 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 68 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 57 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 879 nm で設定反射率 R () を 6.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.16473$, $\chi_2 = 0.715823$ とすることによって波長 879 nm で反射率 6.0 % とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 118.82 \text{ nm} / 92.72 \text{ nm} / 152.09 \text{ nm} / 118.69 \text{ nm} / 174.27 \text{ nm} / 136.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 792.59 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1478.54 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0174】

図 68 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 1093 nm にわたって反射率は 5.0 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 879 nm の設定反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 227 nm である。この波長帯域幅を設定波長 879 nm で割った値は約 0.258 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0175】

実施の形態 59.

本発明の実施の形態 59 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 69 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R () を 7.0 % としている点で相違する。また

50

、パラメータは $A = 1.50$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.13181$ 、 $\varphi_2 = 0.744018$ とすることによって波長 980 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 128.73\text{ nm} / 107.45\text{ nm} / 167.35\text{ nm} / 139.69\text{ nm} / 188.80\text{ nm} / 157.59\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 889.61 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1653.06 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0176】

図69は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1219 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 255 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.260 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

20

【0177】

実施の形態60.

本発明の実施の形態60に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図70を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態59に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 880 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.13181$ 、 $\varphi_2 = 0.744018$ とすることによって波長 880 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 115.59\text{ nm} / 96.49\text{ nm} / 150.27\text{ nm} / 125.43\text{ nm} / 169.54\text{ nm} / 141.51\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 798.83 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1484.37 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.06 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0178】

図70は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 1094 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 880 nm の設定反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 228 nm である。この波長帯域幅を設定波長 880 nm で割った値は約 0.259 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0179】

実施の形態61.

本発明の実施の形態61に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図71を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.52$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タ

50

ンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.09941$ 、 $\chi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0 % とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 126.71 \text{ nm} / 112.59 \text{ nm} / 162.56 \text{ nm} / 144.44 \text{ nm} / 183.40 \text{ nm} / 162.96 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 892.66 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1652.67 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0180】

10

図 71 は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1223 nm にわたって反射率は 7.4 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 259 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0181】

20

実施の形態 6 2 .

本発明の実施の形態 6 2 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 72 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 6 1 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 878 nm で設定反射率 R() を 8.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.09941$ 、 $\chi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 878 nm で反射率 8.0 % とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 113.52 \text{ nm} / 100.87 \text{ nm} / 145.64 \text{ nm} / 129.41 \text{ nm} / 164.31 \text{ nm} / 146.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 799.75 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1480.65 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.04 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0182】

図 72 は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 864 nm から 1096 nm にわたって反射率は 7.4 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 878 nm の設定反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 232 nm である。この波長帯域幅を設定波長 878 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0183】

実施の形態 6 3 .

本発明の実施の形態 6 3 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 73 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 17 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 9.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.55$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.25$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 1.0677$ 、 $\chi_2 =$

50

0 . 7 7 2 4 9 6 とすることによって波長 9 8 0 nm で反射率 8 . 0 % とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 2 5 . 4 9 \text{ nm} / 1 1 5 . 2 8 \text{ nm} / 1 5 9 . 4 9 \text{ nm} / 1 4 6 . 5 2 \text{ nm} / 1 8 2 . 1 6 \text{ nm} / 1 6 7 . 3 4 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 8 9 6 . 2 8 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 6 5 6 . 1 1 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 6 . 7 6 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 1 8 4 】

図 7 3 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 9 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 9 6 3 nm から 1 2 3 5 nm にわたって反射率は 8 . 4 % から 1 0 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 9 8 0 nm の反射率 9 . 0 % を基準として、- 1 . 5 % から + 1 . 0 % の範囲、即ち、反射率 7 . 5 % ~ 1 0 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 2 7 2 nm である。この波長帯域幅を設定波長 9 8 0 nm で割った値は約 0 . 2 7 8 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 5 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【 0 1 8 5 】

実施の形態 6 4 .

本発明の実施の形態 6 4 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 7 4 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 7 3 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 8 7 4 nm で設定反射率 R () を 9 . 0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1 . 0 6 7 7$ 、 $\varphi_2 = 0 . 7 7 2 4 9 6$ とすることによって波長 8 7 4 nm で反射率 9 . 0 % とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 1 1 1 . 9 1 \text{ nm} / 1 0 2 . 8 1 \text{ nm} / 1 4 2 . 2 4 \text{ nm} / 1 3 0 . 6 7 \text{ nm} / 1 6 2 . 4 5 \text{ nm} / 1 4 9 . 2 4 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 7 9 9 . 3 2 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1 4 7 6 . 9 5 nm であり、所定波長 9 8 0 nm の 1 / 4 波長 (= 2 4 5 nm) の約 6 . 0 3 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【 0 1 8 6 】

図 7 4 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 9 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 8 5 9 nm から 1 1 0 1 nm にわたって反射率は 8 . 4 % から 1 0 . 0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 8 7 4 nm の設定反射率 9 . 0 % を基準として、- 1 . 5 % から + 1 . 0 % の範囲、即ち、反射率 7 . 5 % ~ 1 0 . 0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 2 4 2 nm である。この波長帯域幅を設定波長 8 7 4 nm で割った値は約 0 . 2 4 4 であり、仮想単層反射膜の場合の 0 . 0 6 5 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【 0 1 8 7 】

実施の形態 6 5 .

本発明の実施の形態 6 5 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 7 5 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 9 8 0 nm で設定反射率 R () を 1 0 . 0 % としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1 . 6 0$ 、 $B = 2 . 0 2$ 、 $C = 2 . 2 5$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1 . 0 0 3 1 7$ 、 $\varphi_2 = 0 . 8 0 3 3 8 8$ とすることによって波長 9 8 0 nm で反射率 1 0 . 0 % とすること

10

20

30

40

50

ができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 121.70 \text{ nm} / 123.76 \text{ nm} / 153.64 \text{ nm} / 156.25 \text{ nm} / 171.14 \text{ nm} / 174.04 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 900.53 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1653.97 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0188】

図75は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1233 nm にわたって反射率は 9.5% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $8.5\% \sim 11.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 270 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.276 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0189】

実施の形態66.

本発明の実施の形態66に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図76を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態65に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 874 nm で設定反射率 $R()$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 1.0031$ 、 $\varphi_2 = 0.803388$ とすることによって波長 874 nm で反射率 10.0% とすることができます。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 108.53 \text{ nm} / 110.37 \text{ nm} / 137.02 \text{ nm} / 139.35 \text{ nm} / 152.63 \text{ nm} / 155.21 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 803.11 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1475.04 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0190】

図76は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 859 nm から 1100 nm にわたって反射率は 9.5% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 874 nm の設定反射率 10.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $8.5\% \sim 11.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 241 nm である。この波長帯域幅を設定波長 874 nm で割った値は約 0.276 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0191】

実施の形態67.

本発明の実施の形態67に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図77を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 $R()$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.65$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.931121$ 、 $\varphi_2 = 0.862397$ とすることによって波長 980 nm で反射率 11.0% とすることができます。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2$

10

20

30

40

50

$A / C d_1 / C d_2 = 116.49 \text{ nm} / 137.00 \text{ nm} / 144.73 \text{ nm} / 170.21 \text{ nm} / 155.33 \text{ nm} / 182.67 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 906.43 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1650.45 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0192】

図77は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1233 nm にわたって反射率は 10.4% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 11.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $9.5\% \sim 12.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 270 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.276 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

10

【0193】

実施の形態68.

本発明の実施の形態68に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図78を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態67に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 875 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.931121$ 、 $\varphi_2 = 0.862397$ とすることによって波長 875 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 104.01 \text{ nm} / 122.32 \text{ nm} / 129.23 \text{ nm} / 151.98 \text{ nm} / 138.68 \text{ nm} / 163.10 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 809.32 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1473.63 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0194】

図78は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 859 nm から 1100 nm にわたって反射率は 10.4% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 875 nm の設定反射率 11.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $9.5\% \sim 12.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 241 nm である。この波長帯域幅を設定波長 875 nm で割った値は約 0.275 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0195】

実施の形態69.

本発明の実施の形態69に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図79を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.70$ 、 $B = 2.07$ 、 $C = 2.15$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.853386$ 、 $\varphi_2 = 0.935812$ とすることによって波長 980 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 110.00 \text{ nm} / 153.17 \text{ nm} / 133.95 \text{ nm} / 186.50 \text{ nm}$

40

50

51 nm / 139.12 nm / 193.71 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 916.46 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1652.07 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0196】

図 79 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 12 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 961 nm から 1240 nm にわたって反射率は 11.5 % から 13.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 10.5 % ~ 13.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 279 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.285 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

10

【0197】

実施の形態 70 .

本発明の実施の形態 70 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 80 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 69 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 873 nm で設定反射率 R() を 12.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.853$ 386、 $\chi_2 = 0.935812$ とすることによって波長 873 nm で反射率 12.0 % とすることができます。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 97.99 \text{ nm} / 136.45 \text{ nm} / 119.32 \text{ nm} / 166.14 \text{ nm} / 123.93 \text{ nm} / 172.56 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 816.56 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1471.67 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.01 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0198】

図 80 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 12 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 856 nm から 1103 nm にわたって反射率は 11.5 % から 13.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 873 nm の設定反射率 12.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 10.5 % ~ 13.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 247 nm である。この波長帯域幅を設定波長 873 nm で割った値は約 0.283 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0199】

以下に、実施の形態 57 から実施の形態 70 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 7 に示した。表 7 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 及び設定反射率 R()、極小反射率、 $n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との対比、R() の -1.5 ~ +1.0 % の範囲となる波長帯域幅、/ について示した。

40

【0200】

【表7】

表7

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率 R(λ)	極小反射率	Σn _i d _i 、 波長980nmの 1/4波長 (245nm)との 対比	R(λ)の -1.5~1.0% となる波長 帯域Δλ	Δλ/λ
57	6層膜	980nm 6%	5.0%	1648.43nm 6.73倍	253nm	253/980=0.258
58	6層膜	879nm 6%	5.0%	1478.54nm 6.03倍	227nm	227/879=0.258
59	6層膜	980nm 7%	6.4%	1653.06nm 6.75倍	255nm	255/980=0.260
60	6層膜	880nm 7%	6.4%	1484.37nm 6.06倍	228nm	228/880=0.259
61	6層膜	980nm 8%	7.4%	1652.67nm 6.75倍	259nm	259/980=0.264
62	6層膜	878nm 8%	7.4%	1480.65nm 6.04倍	232nm	232/878=0.264
63	6層膜	980nm 9%	8.4%	1656.11nm 6.76倍	272nm	272/980=0.278
64	6層膜	874nm 9%	8.4%	1476.95nm 6.03倍	242nm	242/874=0.244
65	6層膜	980nm 10%	9.5%	1653.97nm 6.75倍	270nm	270/980=0.276
66	6層膜	874nm 10%	9.5%	1475.04nm 6.02倍	241nm	241/874=0.276
67	6層膜	980nm 11%	10.4%	1650.45nm 6.74倍	270nm	270/980=0.276
68	6層膜	875nm 11%	10.4%	1473.63nm 6.01倍	241nm	241/875=0.275
69	6層膜	980nm 12%	11.5%	1652.07nm 6.74倍	279nm	279/980=0.285
70	6層膜	873nm 12%	11.5%	1471.67nm 6.01倍	247nm	247/873=0.283

【0201】

実施の形態71.

本発明の実施の形態71に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図81を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率 R()を 6.0%としている点で相違する。また、パラメータは A = 1.05、B = 2.00, C = 2.00 としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ₁ 及び ₂ を、₁ = 1.09082、₂ = 0.85958 とすることによって波長 980 nmで反射率 6.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は d₃ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ = 50 nm / 86.85 nm / 86.90 nm / 165.42 nm / 165.52 nm / 165.42 nm / 165.52 nmである。全体の膜厚 (d_{total} = d₁) は 885.63 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 n_id_i の総和 n_id_i は、1639.85 nmであり、所定波長 980

10

20

30

40

50

nmの1/4波長(=245nm)の約6.69倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0202】

図81は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1186nmにわたって反射率は5.4%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.226であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

10

【0203】

実施の形態72.

本発明の実施の形態72に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図82を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態71に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=889nmで設定反射率R()を6.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=1.05881、₂=0.866436とすることによって波長889nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/76.47nm/79.46nm/145.66nm/151.35nm/145.66nm/151.35nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は799.95nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1479.24nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.04倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0204】

図82は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1081nmにわたって反射率は5.2%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長889nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%~7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は204nmである。この波長帯域幅を設定波長889nmで割った値は約0.229であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0205】

実施の形態73.

本発明の実施の形態73に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図83を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を7.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.10、B=2.05、C=2.00としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=1.01208、₂=0.896867とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/84.41nm/94.98nm/157.32nm/177.02nm/143.48nm/172.70nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は879.91nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1636.96nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.68倍と非常に厚い。このため、端面にお

40

50

ける放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0206】

図83は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1194nmにわたって反射率は6.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は229nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.234であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。10

【0207】

実施の形態74.

本発明の実施の形態74に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図84を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態73に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=886nmで設定反射率R()を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.97974、₂=0.904319とすることによって波長886nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/73.88nm/86.59nm/137.68nm/161.37nm/134.33nm/157.43nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は801.28nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1471.83nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。20

【0208】

図84は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長874nmから1085nmにわたって反射率は6.0%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長886nmの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は211nmである。この波長帯域幅を設定波長886nmで割った値は約0.238であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。30

【0209】

実施の形態75.

本発明の実施の形態75に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図85を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を8.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.10、B=2.05、C=2.00としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.991775、₂=0.923736とすることによって波長980nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/82.72nm/97.83nm/154.16nm/182.32nm/150.40nm/177.87nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は895.3nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1642.23nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.70倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。40

10

20

30

40

50

【0210】

図85は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長964nmから1204nmにわたって反射率は7.5%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は240nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.245であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

10

【0211】

実施の形態76.

本発明の実施の形態76に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図86を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態75に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=881nmで設定反射率R()を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.958992、₂=0.930306とすることによって波長881nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/71.91nm/88.57nm/134.01nm/165.07nm/130.74nm/161.04nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は801.34nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1467.89nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.99倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0212】

図86は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長869nmから1090nmにわたって反射率は7.1%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長881nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長881nmで割った値は約0.251であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0213】

実施の形態77.

本発明の実施の形態77に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図87を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を9.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.15、B=2.10、C=2.05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.934834、₂=0.927699とすることによって波長980nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/81.52nm/102.72nm/148.86nm/187.57nm/145.31nm/183.10nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は899.08nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1643.29nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

40

【0214】

50

図87は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1220nmにわたって反射率は8.4%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は255nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.260であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0215】

10

実施の形態78.

本発明の実施の形態78に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図88を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態77に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=874nmで設定反射率R()を9.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.900337、₂=0.935222とすることによって波長874nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/70.02nm/92.35nm/127.86nm/168.64nm/124.81nm/164.62nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は798.3nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1456.86nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.95倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

20

【0216】

図88は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長863nmから1096nmにわたって反射率は7.9%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長874nmの設定反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は233nmである。この波長帯域幅を設定波長874nmで割った値は約0.267であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

30

【0217】

実施の形態79.

本発明の実施の形態79に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図89を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を10.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.15、B=2.10、C=2.05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.914148、₂=0.95535とすることによって波長980nmで反射率10.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₁/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂=50nm/79.71nm/105.78nm/145.56nm/193.16nm/142.10nm/188.56nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は904.87nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1649.03nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.73倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

40

【0218】

図89は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は

50

波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963nmから1235nmにわたって反射率は9.6%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%~11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は272nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.278であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0219】

実施の形態80.

本発明の実施の形態80に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図90を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態79に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 868nmで設定反射率R()を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 0.879123、₂ = 0.96166とすることによって波長868nmで反射率10.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/A d₁/A d₂/B d₁/B d₂/C d₁/C d₂ = 50nm/67.90nm/94.31nm/123.99nm/172.21nm/121.03nm/168.11nmである。全体の膜厚(d_{total} = d_i)は797.55nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1451.38nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.92倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0220】

図90は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長856nmから1102nmにわたって反射率は8.7%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長868nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%~11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は246nmである。この波長帯域幅を設定波長868nmで割った値は約0.283であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0221】

実施の形態81.

本発明の実施の形態81に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図91を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980nmで設定反射率R()を11.0%としている点で相違する。また、パラメータはA = 1.17、B = 2.10, C = 2.05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 0.881444、₂ = 0.983957とすることによって波長980nmで反射率11.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/A d₁/A d₂/B d₁/B d₂/C d₁/C d₂ = 50nm/78.20nm/110.84nm/140.35nm/198.94nm/137.01nm/194.21nmである。全体の膜厚(d_{total} = d_i)は909.55nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1651.45nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.74倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0222】

図91は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部

10

20

30

40

50

分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1254 nm にわたって反射率は 10.4% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 11.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 291 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.297 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0223】

実施の形態 82.

本発明の実施の形態 82 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 92 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 91 に係る半導体光素子と比較すると、パラメータ A = 1.15、B = 2.10、C = 2.05 とし、設定波長 = 862 nm で設定反射率 R() を 11.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.856738$ 、 $\varphi_2 = 0.989623$ とすることによって波長 862 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 \text{ nm} / 65.71 \text{ nm} / 96.38 \text{ nm} / 119.99 \text{ nm} / 176.00 \text{ nm} / 117.14 \text{ nm} / 171.81 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,a1} = d_i$) は 797.03 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1446.13 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.90 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0224】

図 92 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 11% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 850 nm から 1110 nm にわたって反射率は 9.5% から 12.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 862 nm の設定反射率 11.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 9.5% ~ 12.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 260 nm である。この波長帯域幅を設定波長 862 nm で割った値は約 0.302 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0225】

実施の形態 83.

本発明の実施の形態 83 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 93 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 25 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは A = 1.22、B = 2.13、C = 2.05 としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.815005$ 、 $\varphi_2 = 1.02518$ とすることによって波長 980 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 \text{ nm} / 75.39 \text{ nm} / 120.42 \text{ nm} / 131.63 \text{ nm} / 210.24 \text{ nm} / 126.69 \text{ nm} / 202.34 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,a1} = d_i$) は 916.71 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1653.50 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0226】

図 93 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部

10

20

30

40

50

分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 962 nm から 1275 nm にわたって反射率は 10.7% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 313 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.319 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0227】

実施の形態 84.

本発明の実施の形態 84 に係る 3 種類の膜を含む 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 94 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 83 に係る半導体光素子と比較すると、パラメータは $A = 1.13$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ とし、設定波長 = 853 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.842465$ 、 $\phi_2 = 1.02038$ とすることによって波長 853 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 \text{ nm} / 62.83 \text{ nm} / 96.63 \text{ nm} / 116.76 \text{ nm} / 179.57 \text{ nm} / 113.98 \text{ nm} / 175.30 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_t = d_{total} = d_i$) は 795.07 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1438.90 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 5.87 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0228】

図 94 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、設定反射率の 12% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 838 nm から 1116 nm にわたって反射率は 10.6% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 853 nm の設定反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 278 nm である。この波長帯域幅を設定波長 853 nm で割った値は約 0.326 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0229】

以下に、実施の形態 71 から実施の形態 84 に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表 8 に示した。表 8 には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1.5 ~ +1.0% の範囲となる波長帯域幅、 d_t / d_i について示した。

【0230】

10

20

30

【表8】

表8

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率R(λ)	極小反射率	Σn _i d _i 、 波長980nmの 1/4波長 (245nm)との 対比	R(λ)の -1.5~1.0% となる波長 帯域Δλ	Δλ/λ
71	7層膜 (3種類)	980nm 6%	5.4%	1639.85nm 6.69倍	221nm	221/980=0.226
72	7層膜 (3種類)	889nm 6%	5.2%	1479.24nm 6.04倍	204nm	204/889=0.229
73	7層膜 (3種類)	980nm 7%	6.4%	1636.96nm 6.68倍	229nm	229/980=0.234
74	7層膜 (3種類)	886nm 7%	6.0%	1471.83nm 6.01倍	211nm	211/886=0.238
75	7層膜 (3種類)	980nm 8%	7.5%	1642.23nm 6.70倍	240nm	240/980=0.245
76	7層膜 (3種類)	881nm 8%	7.1%	1467.89nm 5.99倍	221nm	221/881=0.251
77	7層膜 (3種類)	980nm 9%	8.4%	1643.29nm 6.71倍	255nm	255/980=0.260
78	7層膜 (3種類)	874nm 9%	7.9%	1456.86nm 5.95倍	233nm	233/874=0.267
79	7層膜 (3種類)	980nm 10%	9.6%	1649.03nm 6.73倍	272nm	272/980=0.278
80	7層膜 (3種類)	868nm 10%	8.7%	1451.38nm 5.92倍	246nm	246/868=0.283
81	7層膜 (3種類)	980nm 11%	10.4%	1651.45nm 6.74倍	291nm	291/980=0.297
82	7層膜 (3種類)	862nm 11%	9.5%	1446.13nm 5.90倍	260nm	260/862=0.320
83	7層膜 (3種類)	980nm 12%	10.7%	1653.50nm 6.75倍	313nm	313/980=0.319
84	7層膜 (3種類)	853nm 12%	10.6%	1438.90nm 5.87倍	278nm	278/853=0.326

10

20

30

【0231】

実施の形態85.

本発明の実施の形態85に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図95を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率R()を6.0%としている点で相違する。また、パラメータはO = 0.10、A = 2.7、B = 2.1、C = 2.0、D = 2.0としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 0.429458、₂ = 0.889116とすることによって波長980 nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 8.56 nm / 87.92 nm / 231.13 nm / 68.38 nm / 179.77 nm / 65.13 nm / 171.21 nm / 65.13 nm / 171.21 nmである。全体の膜厚(d_{total}) = 50

d_i) は 1048.44 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1823.70 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.44 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0232】

図 95 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 893 nm から 993 nm にわたって反射率は 5.1 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 100 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.102 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0233】

実施の形態 86.

本発明の実施の形態 86 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 96 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 85 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1018 nm で設定反射率 R() を 6.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.429458$ 、 $\chi_2 = 0.889116$ とすることによって波長 1018 nm で反射率 6.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.89 \text{ nm} / 91.33 \text{ nm} / 240.09 \text{ nm} / 71.04 \text{ nm} / 186.74 \text{ nm} / 67.65 \text{ nm} / 177.85 \text{ nm} / 67.65 \text{ nm} / 177.85 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 1089.09 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0234】

図 96 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 928 nm から 1031 nm にわたって反射率は 5.1 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1018 nm の設定反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 103 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1018 nm で割った値は約 0.101 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0235】

実施の形態 87.

本発明の実施の形態 87 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 97 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 7.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.15$ 、 $C = 1.9$ 、 $D = 1.9$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.413831$ 、 $\chi_2 = 0.91752$ とすることによって波長 980 nm で反射率 7.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.83 \text{ nm} / 84.72 \text{ nm} / 238.51 \text{ nm} / 65.90 \text{ nm} / 185.51 \text{ nm} / 59.62 \text{ nm} / 16$

10

20

30

40

50

7.84 nm / 59.62 nm / 167.84 nmである。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は1038.39 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1800.12 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.35倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0236】

図97は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長898 nmから993 nmにわたって反射率は6.3%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は95 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.097であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0237】

実施の形態88.

本発明の実施の形態88に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図98を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態87に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1016 nmで設定反射率R()を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.413831$ 、 $\chi_2 = 0.91752$ とすることによって波長1016 nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.16 nm / 87.83 nm / 247.27 nm / 68.32 nm / 192.32 nm / 61.81 nm / 174.01 nm / 61.81 nm / 174.01 nm$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は1076.54 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1866.25 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.62倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0238】

図98は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長931 nmから1029 nmにわたって反射率は6.3%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1016 nmの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は98 nmである。この波長帯域幅を設定波長1016 nmで割った値は約0.096であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0239】

実施の形態89.

本発明の実施の形態89に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図99を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率R()を8.0%としている点で相違する。また、パラメータはO = 0.10、A = 2.70、B = 2.10、C = 2.05、D = 1.80としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.395103$ 、 $\chi_2 = 0.933593$ とすることによって波長980 nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.99 nm / 50$

80.89 nm / 242.69 nm / 62.91 nm / 188.76 nm / 61.42 nm / 184.27 nm / 53.93 nm / 161.79 nm である。全体の膜厚 ($d_{tota1} = d_i$) は 1045.65 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1807.20 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0240】

図 99 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 886 nm から 991 nm にわたって反射率は 7.0 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 105 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.107 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0241】

実施の形態 90 .

本発明の実施の形態 90 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 100 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 89 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1023 nm で設定反射率 R() を 8.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.395103$ 、 $\chi_2 = 0.933593$ とすることによって波長 1023 nm で反射率 8.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.38 \text{ nm} / 84.44 \text{ nm} / 253.34 \text{ nm} / 65.67 \text{ nm} / 197.04 \text{ nm} / 64.11 \text{ nm} / 192.35 \text{ nm} / 56.29 \text{ nm} / 168.89 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 1091.51 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、1886.46 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.70 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0242】

図 100 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 8 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 925 nm から 1034 nm にわたって反射率は 7.0 % から 9.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1023 nm の設定反射率 8.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 6.5 % ~ 9.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 109 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1023 nm で割った値は約 0.107 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0243】

実施の形態 91 .

本発明の実施の形態 91 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 101 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 33 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 R() を 9.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.70$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.15$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.392646$ 、 $\chi_2 = 0.930741$ とすることによって波長 980 nm で反射率 9.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.38 \text{ nm} / 84.44 \text{ nm} / 253.34 \text{ nm} / 65.67 \text{ nm} / 197.04 \text{ nm} / 64.11 \text{ nm} / 192.35 \text{ nm} / 56.29 \text{ nm} / 168.89 \text{ nm}$

10

20

30

40

50

$d_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 8.96 \text{ nm} / 80.39 \text{ nm} / 241.95 \text{ nm} / 62.52 \text{ nm} / 188.16 \text{ nm} / 64.01 \text{ nm} / 192.66 \text{ nm} / 52.10 \text{ nm} / 156.82 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,1} = d_i$) は 1047.59 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1810.29 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0244】

図101は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 990 nm にわたって反射率は 7.8% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $7.5\% \sim 10.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 118 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.120 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0245】

実施の形態92.

本発明の実施の形態92に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図102を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態91に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1031 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.392646$ 、 $\chi_2 = 0.930741$ とすることによって波長 1031 nm で反射率 9.0% とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 9.43 \text{ nm} / 84.57 \text{ nm} / 254.54 \text{ nm} / 65.78 \text{ nm} / 197.98 \text{ nm} / 67.34 \text{ nm} / 202.69 \text{ nm} / 54.81 \text{ nm} / 164.98 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot,1} = d_i$) は 1102.12 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1904.52 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 7.77 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0246】

図102は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 918 nm から 1041 nm にわたって反射率は 7.8% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1031 nm の設定反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $7.5\% \sim 10.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 123 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1031 nm で割った値は約 0.119 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0247】

実施の形態93.

本発明の実施の形態93に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図103を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.75$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.25$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.394052$ 、 $\chi_2 = 0.907302$ とすることによって波長 980

10

20

30

40

50

nmで反射率10.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 8.74 nm / 82.17 nm / 240.22 nm / 62.75 nm / 183.44 nm / 67.33 nm / 196.55 nm / 52.29 nm / 152.87 nmである。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は1046.36 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1810.50 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0248】

図103は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長866 nmから990 nmにわたって反射率は8.7%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は124 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.127であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0249】

実施の形態94.

本発明の実施の形態94に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図104を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態93に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 1035 nmで設定反射率R()を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 0.394052、₂ = 0.907302とすることによって波長1035 nmで反射率10.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 9.23 nm / 86.78 nm / 253.71 nm / 66.27 nm / 193.74 nm / 71.00 nm / 207.58 nm / 55.22 nm / 161.45 nmである。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は1104.98 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1912.11 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.80倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0250】

図104は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長914 nmから1045 nmにわたって反射率は8.7%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1035 nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は131 nmである。この波長帯域幅を設定波長1035 nmで割った値は約0.127であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0251】

実施の形態95.

本発明の実施の形態95に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図105を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 980 nmで設定反射率R()を11.0%としている点で相違する。また、パラメータはO = 0.10、A = 2.80、B = 2.10、C = 2.35、D = 1.75としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂

10

20

30

40

50

を、 $d_1 = 0.395641$ 、 $d_2 = 0.88414$ とすることによって波長980nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.51\text{ nm} / 84.00\text{ nm} / 238.35\text{ nm} / 63.00\text{ nm} / 178.76\text{ nm} / 70.50\text{ nm} / 200.04\text{ nm} / 52.50\text{ nm} / 148.97\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 1044.63 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1810.29 nm であり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0252】

10

図105は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長856nmから990nmにわたって反射率は9.7%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は134nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.137であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0253】

20

実施の形態96.

本発明の実施の形態96に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図106を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態95に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=1040nmで設定反射率R()を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.395641$ 、 $\varphi_2 = 0.88414$ とすることによって波長1040nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.03\text{ nm} / 89.14\text{ nm} / 252.94\text{ nm} / 66.86\text{ nm} / 189.71\text{ nm} / 74.81\text{ nm} / 212.29\text{ nm} / 55.71\text{ nm} / 158.09\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は 1108.58 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、 1921.11 nm であり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.84倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0254】

図106は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長909nmから1050nmにわたって反射率は9.7%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1040nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は141nmである。この波長帯域幅を設定波長1040nmで割った値は約0.136であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0255】

実施の形態97.

本発明の実施の形態97に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図107を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=980nmで設定反射率R()を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.85$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.42$ 、 $D = 1.50$

50

75としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.39697、₂=0.864124とすることによって波長980nmで反射率12.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO_{d₂}/A_{d₁}/A_{d₂}/B_{d₁}/B_{d₂}/C_{d₁}/C_{d₂}/D_{d₁}/D_{d₂}=8.32nm/85.79nm/237.11nm/63.21nm/174.71nm/72.84nm/201.34nm/52.68nm/145.60nmである。全体の膜厚(d_t)は1041.60nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1807.36nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.38倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

10

【0256】

図107は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長852nmから990nmにわたって反射率は10.8%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は138nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.141であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

20

【0257】

実施の形態98.

本発明の実施の形態98に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図108を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態97に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=1043nmで設定反射率R()を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁=0.39697、₂=0.864124とすることによって波長1043nmで反射率12.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO_{d₂}/A_{d₁}/A_{d₂}/B_{d₁}/B_{d₂}/C_{d₁}/C_{d₂}/D_{d₁}/D_{d₂}=8.85nm/91.30nm/252.35nm/67.27nm/185.95nm/77.53nm/214.28nm/56.06nm/154.95nmである。全体の膜厚(d_t)は1108.54nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1923.51nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.85倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

30

【0258】

図108は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長907nmから1053nmにわたって反射率は10.8%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1043nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は146nmである。この波長帯域幅を設定波長1043nmで割った値は約0.140であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

40

【0259】

以下に、実施の形態85から実施の形態98に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表9に示した。表9には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長及び設定反射率R()、極小反射率、n_id_i及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、R()の-1.5~+1.0%の範囲となる波長帯域幅

50

、 / について示した。

【0260】

【表9】

表9

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	R(λ)の-1.5~1.0%となる波長帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
85	9層膜	980nm 6 %	5.1%	1823.70nm 7.44倍	100nm	100/980=0.102
86	9層膜	1018nm 6 %	5.1%	1857.42nm 7.73倍	103nm	103/1018=0.101
87	9層膜	980nm 7 %	6.8%	1800.12nm 7.35倍	95nm	95/980=0.097
88	9層膜	1016nm 7 %	6.8%	1866.25nm 7.62倍	98nm	98/1016=0.096
89	9層膜	980nm 8 %	7.0%	1807.20nm 7.38倍	105nm	105/980=0.107
90	9層膜	1023nm 8 %	7.0%	1886.46nm 7.70倍	109nm	109/1023=0.107
91	9層膜	980nm 9 %	7.8%	1810.29nm 7.39倍	118nm	118/980=0.120
92	9層膜	1031nm 9 %	7.8%	1904.52nm 7.77倍	123nm	123/1031=0.119
93	9層膜	980nm 10 %	8.7%	1810.50nm 7.39倍	124nm	124/980=0.127
94	9層膜	1035nm 10 %	8.7%	1912.11nm 7.80倍	131nm	131/1035=0.127
95	9層膜	980nm 11 %	9.7%	181029nm 7.39倍	134nm	134/980=0.137
96	9層膜	1040nm 11 %	9.7%	1921.11nm 7.84倍	141nm	141/1040=0.136
97	9層膜	980nm 12 %	10.8%	1807.36nm 7.38倍	138nm	138/980=0.141
98	9層膜	1043nm 12 %	10.8%	1923.51nm 7.85倍	146nm	146/1043=0.140

【0261】

実施の形態99.

本発明の実施の形態99に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について図109及び図110を用いて説明する。図109は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜70を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が3種類の膜からなる8層反射膜70で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれアルミナ及び石英と、半導体レーザの等価屈折率より小さい屈折率である点で相違する。なお、第3層膜から第8層膜にかけては酸化タンタル及び石英が交互に積層されている。

【0262】

10

20

30

40

50

この3種類の膜を含む8層反射膜70の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層10に接する第1層膜に第3の種類の膜を用いた場合について検討する。この第3の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式(20)で表される。

【数21】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (20)$$

【0263】

そこで、この3種類の膜からなる8層反射膜70の振幅反射率は、上記7層反射膜と同様に下記式(21)で表される。 10

【数22】

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

【0264】

ここで、 m_{ij} (i, j は1又は2)は下記式(22)で表される。

【数23】

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -n_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -n_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -n_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -n_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (22) \end{aligned} \quad 20 \quad 30$$

【0265】

なお、A, B, C, Dは、第2層膜72の膜厚Ad₂、第3層膜73の膜厚Bd₁、第4層膜74の膜厚Bd₂、第5層膜75の膜厚Cd₁、第6層膜76の膜厚Cd₂、第7層膜77の膜厚Dd₁、第8層膜78の膜厚Dd₂とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。ただし、Aは第2層膜の寄与率のみを表す。

【0266】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜70を設けた場合について説明する。図109は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜70の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10(等価屈折率n_c=3.37)の端面部に順に、アルミナの第1層膜71(屈折率n₃=1.636、膜厚d₃=10nm)、石英の第2層膜72(屈折率n₂=1.457、膜厚Ad₂)、酸化タンタルの第3層膜73(屈折率n₁=2.072、膜厚Bd₁)、石英の第4層膜74(屈折率n₂=1.457、膜厚Bd₂)、酸化タンタルの第5層膜75(屈折率n₁=2.072、膜厚Cd₁)、石英の第6層膜76(屈折率n₂=1.457、膜厚Cd₂)、酸化タンタルの第7層膜77(屈折率n₁=2.072、膜厚Dd₁)、石英の第8層膜78(屈折率n₂=1.457、膜厚Dd₂)が積層されている。さらに、この8層反射膜70は、空気等の自由空間5に接している。 40 50

【0267】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜70の反射特性について説明する。まず、設定波長 = 808 nmで設定反射率R()を4.0%とする。各パラメータを、A = 0.32、B = 1.96、C = 1.85、D = 2.00とした場合、酸化タンタル及び石英の位相変化₁及び₂が、それぞれ₁ = 0.356684、₂ = 1.26875である場合に波長808 nmで反射率4.0%が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、d₃ / Ad₂ / Bd₁ / Bd₂ / Cd₁ / Cd₂ / Dd₁ / Dd₂ = 10 nm / 35.83 nm / 43.39 nm / 219.49 nm / 40.95 nm / 207.17 nm / 44.27 nm / 223.96 nmである。全体の膜厚(d_{total} = d_i)は825.06 nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2108.54 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長(=202 nm)の約10.44倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
10

【0268】

図110は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長802 nmから941 nmにわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808 nmの反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は139 nmである。この波長帯域幅を設定波長808 nmで割った値は約0.172であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
20

【0269】

実施の形態100.

本発明の実施の形態100に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図111を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 744 nmで設定反射率R()を4.0%としている点で相違する。また、パラメータはB = 1.95としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化₁及び₂を、₁ = 0.361744、₂ = 1.260933とすることによって波長744 nmで反射率4.0%とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃ / Ad₂ / Bd₁ / Bd₂ / Cd₁ / Cd₂ / Dd₁ / Dd₂ = 10 nm / 32.79 nm / 40.31 nm / 199.83 nm / 38.25 nm / 189.58 nm / 41.35 nm / 204.95 nmである。全体の膜厚(d_{total} = d_i)は757.06 nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、1949.67 nmであり、所定波長808 nmの1/4波長(=202 nm)の約9.65倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
30

【0270】

図111は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長738 nmから869 nmにわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長744 nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は131 nmである。この波長帯域幅を設定波長744 nmで割った値は約0.176であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜70は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。
40

【0271】

実施の形態101.

10

20

30

40

50

本発明の実施の形態 101 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 112 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 99 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 808 nm で設定反射率 R() を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは A = 0.20, B = 2.00, C = 2.00, D = 2.00 としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.374385$, $\varphi_2 = 1.26121$ とすることによって波長 808 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 10 \text{ nm} / 22.26 \text{ nm} / 46.47 \text{ nm} / 222.63 \text{ nm} / 46.47 \text{ nm} / 222.63 \text{ nm} / 46.47 \text{ nm} / 222.63 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 839.56 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2177.34 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 10.78 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
10

【0272】

図 112 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 801 nm から 946 nm にわたって反射率は 6.6% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、6.5% ~ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 145 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.179 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。
20

【0273】

実施の形態 102.

本発明の実施の形態 102 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 113 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 101 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 753 nm で設定反射率 R() を 8.0% として、パラメータは A = 0.19 としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.370822$, $\varphi_2 = 1.26896$ とすることによって波長 753 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 10 \text{ nm} / 19.83 \text{ nm} / 42.90 \text{ nm} / 208.75 \text{ nm} / 42.90 \text{ nm} / 208.75 \text{ nm} / 42.90 \text{ nm} / 208.75 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 784.78 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2024.36 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 10.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
30

【0274】

図 113 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 746 nm から 870 nm にわたって反射率は 6.7% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 753 nm の設定反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、6.5% ~ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 124 nm である。この波長帯域幅を設定波長 753 nm で割った値は約 0.165 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。
40

【0275】

10

20

30

40

50

実施の形態 103.

本発明の実施の形態 103 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 114 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 99 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 808 nm で設定反射率 R() を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは A = 0.14, B = 1.95, C = 1.80, D = 2.00 としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化₁ 及び₂ を、₁ = 0.403695, ₂ = 1.34024 とすることによって波長 808 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Cd_2 / Cd_1 / Dd_1 / Dd_2 = 10 \text{ nm} / 16.56 \text{ nm} / 48.86 \text{ nm} / 230.67 \text{ nm} / 45.10 \text{ nm} / 212.93 \text{ nm} / 50.11 \text{ nm} / 236.58 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 850.81 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2264.47 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 11.21 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
10

【0276】

図 113 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 801 nm から 1037 nm にわたって反射率は 10.7% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 236 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.292 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。
20

【0277】

実施の形態 104.

本発明の実施の形態 104 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 115 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 103 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 706 nm で設定反射率 R() を 12.0% として、パラメータは B = 1.93 としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化₁ 及び₂ を、₁ = 0.412469, ₂ = 1.3303 とすることによって波長 706 nm で反射率 12.0% とすることができる。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 10 \text{ nm} / 14.43 \text{ nm} / 43.49 \text{ nm} / 198.96 \text{ nm} / 40.56 \text{ nm} / 185.56 \text{ nm} / 45.06 \text{ nm} / 206.18 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = d_i$) は 744.24 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2005.83 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 9.93 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。
30

【0278】

図 115 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 707 nm から 908 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 706 nm の設定反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 201 nm である。この波長帯域幅を設定波長 706 nm で割った値は約 0.285 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。
40

10

20

30

40

50

【0279】

実施の形態105.

本発明の実施の形態105に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図116及び図117を用いて説明する。図116は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜80を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれ石英及びアルミナであり、第3層膜から第8層膜にかけて酸化タンタルおよびアルミナが積層されている点で相違する。

【0280】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜80を設けた場合について説明する。図116は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10(等価屈折率 $n_c = 3.37$)の端面部に順に、石英の第1層膜81(屈折率 $n_3 = 1.457$ 、膜厚 $d_3 = 5\text{ nm}$)、アルミナの第2層膜82(屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $A d_2$)、酸化タンタルの第3層膜83(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $B d_1$)、アルミナの第4層膜84(屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $C d_2$)、酸化タンタルの第5層膜85(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $C d_1$)、アルミナの第6層膜86(屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $C d_2$)、酸化タンタルの第7層膜87(屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $D d_1$)、アルミナの第8層膜88(屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $D d_2$)が積層されている。さらに、この8層膜80は、空気等の自由空間5に接している。

【0281】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜80の反射特性について説明する。まず、ここでは設定波長808nmで設定反射率R()を4.0%にする。各パラメータを、A=0.22、B=2.00、C=2.16、D=2.00とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 χ_1 及び χ_2 が、それぞれ $\chi_1 = 0.44218$ 、 $\chi_2 = 1.18776$ である場合に、波長808nmで反射率4.0%が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 20.54\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm} / 59.28\text{ nm} / 201.67\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は769.73nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2355.68nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約11.66倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0282】

図117は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長800nmから1032nmにわたって反射率は2.7%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%~5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は232nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.287であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0283】

実施の形態106.

本発明の実施の形態106に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図118を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長=716nmで設定反射率R()を4.0%として、パラメータをA=0.17、B=2.03、C=2.24、としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 χ_1 及び χ_2 を、 $\chi_1 = 0.455795$ 、 $\chi_2 =$

10

20

30

40

50

1.15938とすることによって波長716nmで反射率4.0%とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5\text{ nm} / 13.73\text{ nm} / 50.89\text{ nm} / 163.94\text{ nm} / 56.15\text{ nm} / 180.89\text{ nm} / 50.01\text{ nm} / 161.11\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は681.72nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2115.46nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約10.47倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0284】

図118は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長709nmから906nmにわたって反射率は3.0%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長716nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%~5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は197nmである。この波長帯域幅を設定波長716nmで割った値は約0.275であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0285】

実施の形態107.

本発明の実施の形態107に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図119を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 808nmで設定反射率R()を8.0%としている点で相違する。また、パラメータはA = 0.20、B = 2.00、C = 2.60、D = 2.00としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.703895$ 、 $\varphi_2 = 0.563728$ とすることによって波長808nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5\text{ nm} / 8.86\text{ nm} / 87.37\text{ nm} / 88.62\text{ nm} / 113.59\text{ nm} / 115.21\text{ nm} / 87.37\text{ nm} / 88.62\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は594.64nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2726.92nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約13.50倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0286】

図119は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長647nmから819nmにわたって反射率は7.1%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は172nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.213であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0287】

実施の形態108.

本発明の実施の形態108に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図120を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態107に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 = 891nmで設定反射率R()を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 φ_1 及び φ_2 を、 $\varphi_1 = 0.7$

07082、 $\alpha_2 = 0.56214$ とすることによって波長891nmで反射率8.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5\text{ nm} / 9.75\text{ nm} / 96.79\text{ nm} / 97.45\text{ nm} / 125.82\text{ nm} / 126.69\text{ nm} / 96.79\text{ nm} / 97.45\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は655.74nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、3016.09nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約14.93倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0288】

図120は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長712nmから903nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長891nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、6.5%~9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は191nmである。この波長帯域幅を設定波長891nmで割った値は約0.214であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0289】

実施の形態109。

本発明の実施の形態109に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図121を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $= 808\text{ nm}$ で設定反射率R()を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.10$ 、 $B = 2.53$ 、 $C = 2.75$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 α_1 及び α_2 を、 $\alpha_1 = 0.549712$ 、 $\alpha_2 = 0.58774$ とすることによって波長808nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5\text{ nm} / 4.62\text{ nm} / 86.32\text{ nm} / 116.88\text{ nm} / 93.82\text{ nm} / 127.05\text{ nm} / 68.24\text{ nm} / 92.40\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = d_i$)は594.33nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $n_i d_i$ は、2352.26nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約11.64倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0290】

図121は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の12.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長617nmから821nmにわたって反射率は10.6%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、10.5%~13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は204nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.252であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0291】

実施の形態110。

本発明の実施の形態110に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図122を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態109に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $= 909\text{ nm}$ で設定反射率R()を12.0%として、パラメータB $= 2.57$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相

10

20

30

40

50

変化₁及び₂を、₁=0.53932、₂=0.592482とすることによつて波長909nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚はd₃/Ad₂/Bd₁/Bd₂/Cd₁/Cd₂/Dd₁/Dd₂=5nm/5.24nm/96.78nm/134.65nm/103.56nm/144.08nm/75.31nm/104.79nmである。全体の膜厚(d_{total}=d_i)は669.41nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和n_id_iは、2618.82nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約12.96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0292】

10

図122は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の12.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長693nmから923nmにわたって反射率は10.5%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長909nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は230nmである。この波長帯域幅を設定波長909nmで割った値は約0.253であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0293】

20

以下に、実施の形態85から実施の形態98に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表10に示した。表10には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長及び設定反射率R()、極小反射率、n_id_i及び所定波長808nmの1/4波長(202nm)との対比、R()の-1.5～+1.0%の範囲となる波長帯域幅、/について示した。

【0294】

【表10】

表10

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長λ 設定反射率R(λ)	極小反射率	Σn _i d _i 、 波長808nmの 1/4波長 (202nm)との 対比	R(λ)の -1.5~1.0% となる波長 帯域Δλ	Δλ/λ
99	8層膜	808nm 4%	2.6%	2108.54nm 10.44倍	139nm	139/808=0.172
100	8層膜	744nm 4%	2.5%	1949.67nm 9.65倍	131nm	131/744=0.101
101	8層膜	808nm 8%	6.6%	2177.34nm 10.78倍	145nm	145/808=0.179
102	8層膜	753nm 8%	6.7%	2024.36nm 10.02倍	124nm	124/753=0.165
103	8層膜	808nm 12%	10.7%	2264.47nm 11.21倍	236nm	236/808=0.292
104	8層膜	706nm 12%	10.9%	2005.83nm 9.93倍	201nm	201/706=0.285
105	8層膜	808nm 4%	2.7%	2355.68nm 11.66倍	232nm	232/808=0.287
106	8層膜	716nm 4%	3.0%	2115.46nm 10.47倍	197nm	197/716=0.275
107	8層膜	808nm 8%	7.1%	2726.92nm 13.50倍	172nm	172/808=0.213
108	8層膜	891nm 8%	7.0%	3016.09nm 14.93倍	191nm	191/891=0.214
109	8層膜	808nm 12%	10.6%	2352.26nm 11.64倍	204nm	204/808=0.252
110	9層膜	909nm 10%	10.5%	2618.82nm 12.96倍	230nm	230/909=0.253

【0295】

以上、本発明を説明する実施の形態において、7層反射膜、6層反射膜、9層反射膜及び8層反射膜をその一例として挙げて説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。多層反射膜はこれ以外の複数層であってもよい。3種類の材料を用いる場合を示したが、4種類以上の材料の場合も予め位相条件を与えることで同様に取り扱える。なお、3種類の材料の一例として窒化アルミニウム(A1N)を厚さ50nm、とした例、アルミナ(A1₂O₃)を10nm、あるいは石英(SiO₂)を5nm設けた場合をそれぞれ示したが材料及び膜厚はこれに限るものではない。また、一対のアルミナ及び酸化タンタルの2層膜、酸化タンタル及び石英の2層膜等の寄与を示すO,A,B,C,D等のパラメータの値は上記実施の形態に示した値に限定されるものではない。さらに、半導体光素子として半導体レーザ素子の場合を例に挙げたが、これに限られず、本発明は半導体光増幅器、スーパーラミネセント・ダイオード、光変調器、光スイッチ等の光デバイスにも適用することができる。また、波長として980nm近傍及び808nm近傍に限定されるものではなく、可視光領域、遠赤外領域、赤外領域においても適用できる。さらに、反射率として約2~12%の反射率の場合について説明したがその他の反射率でも適用できる。

【符号の説明】

10

20

30

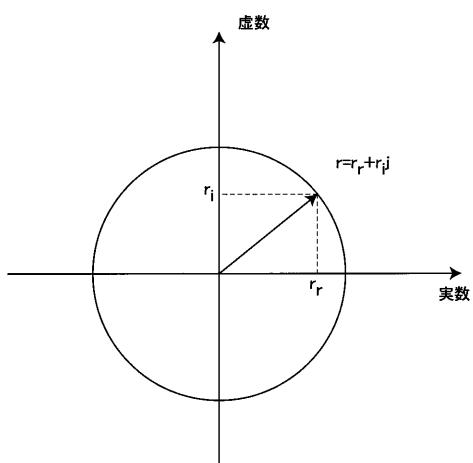
40

50

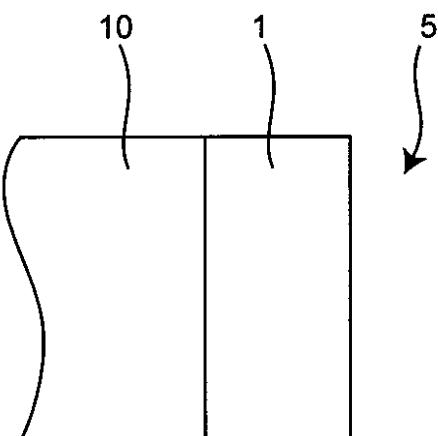
【0296】

1 第1層膜、2 第2層膜、3 第3層膜、4 第4層膜、5 自由空間(空気)、10
 0 導波層、11、21、31、41、51 第1層膜、12、22、32、42、52
 第2層膜、13、23、33、43、53 第3層膜、14、24、34、44、54
 第4層膜、15、25、35、45、55 第5層膜、16、26、36、46、56
 第6層膜、17、27、47、57 第7層膜、20、7層反射膜(第1層膜:アルミナ)、30
 7層反射膜(第1層膜:酸化タンタル)、40 6層反射膜、50 7層反射膜、70、80
 8層反射膜、71、81 第1層膜、72、82 第2層膜、73、83
 第3層膜、74、84 第4層膜、75、85 第5層膜、76、86 第6層膜
 、77、87 第7層膜、78、88 第8層膜、100 導波層、101 反射膜、103
 単層反射膜(膜厚 $d = / (4n_1)$)、104 単層反射膜(膜厚 $d = 5 / (4n_1)$)) 10

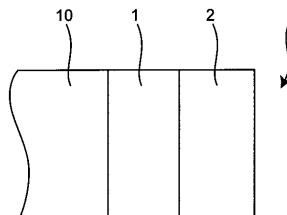
【図1】



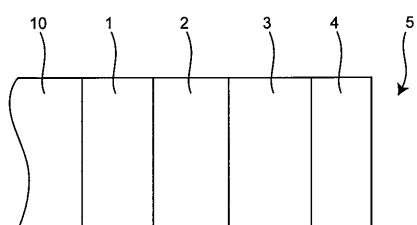
【図2】



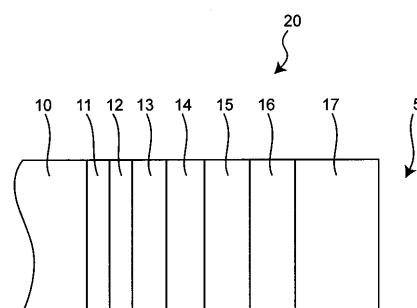
【図3】



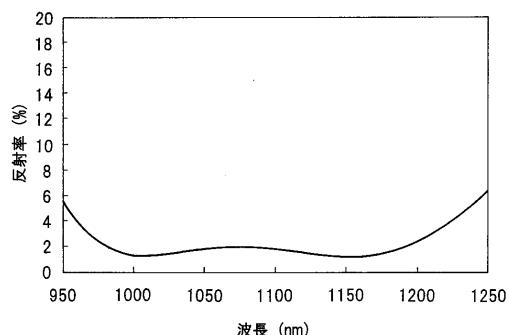
【図4】



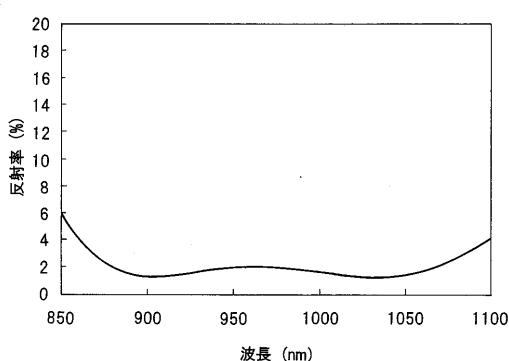
【図5】



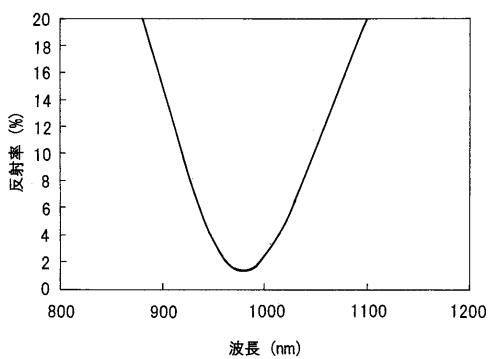
【図6】



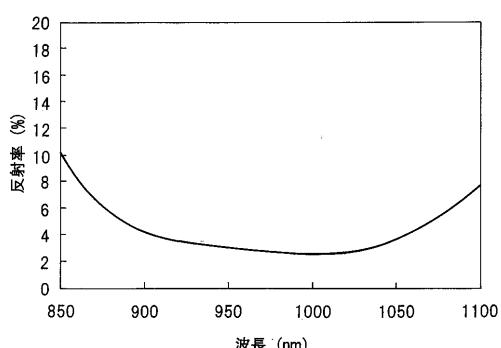
【図7】



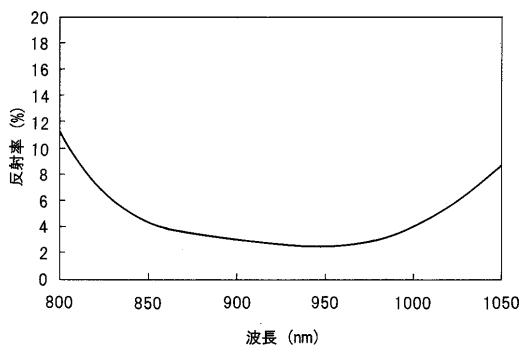
【図8】



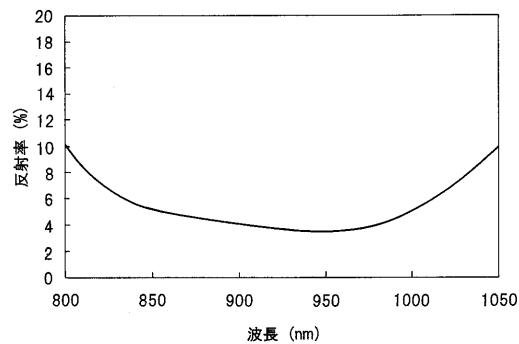
【図10】



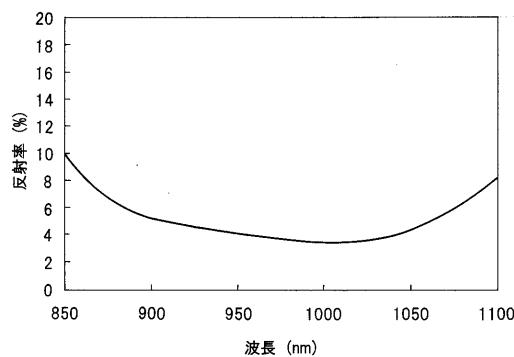
【図9】



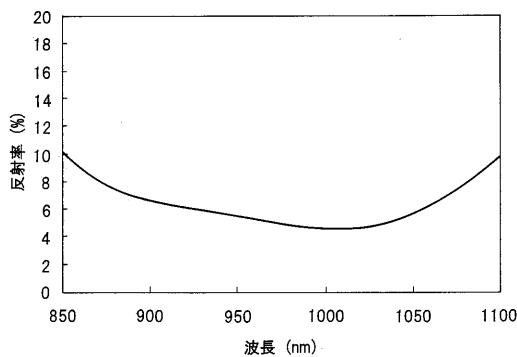
【図11】



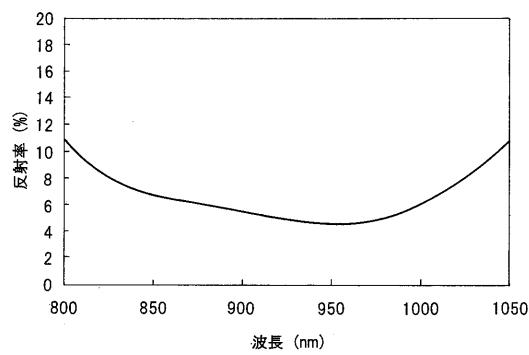
【図 1 2】



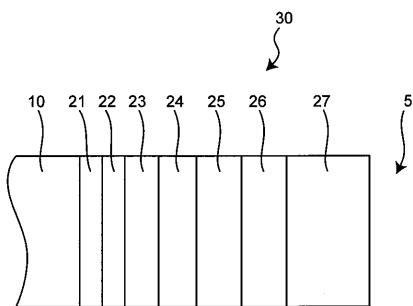
【図 1 4】



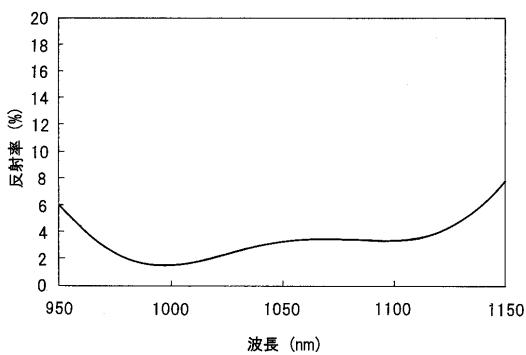
【図 1 3】



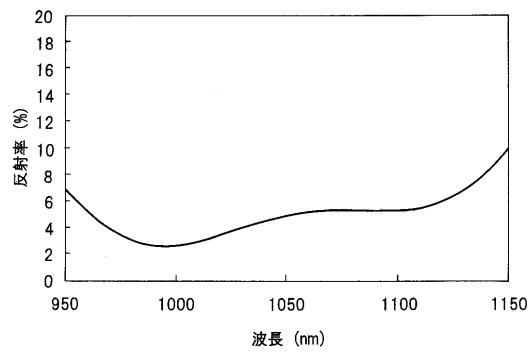
【図 1 5】



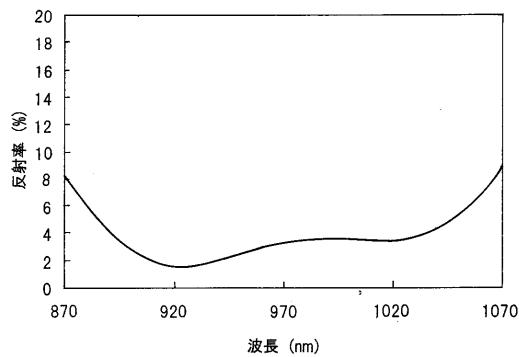
【図 1 6】



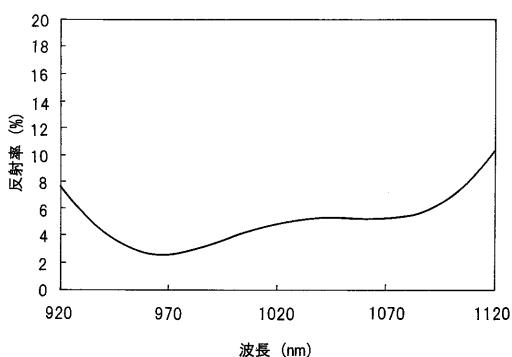
【図 1 8】



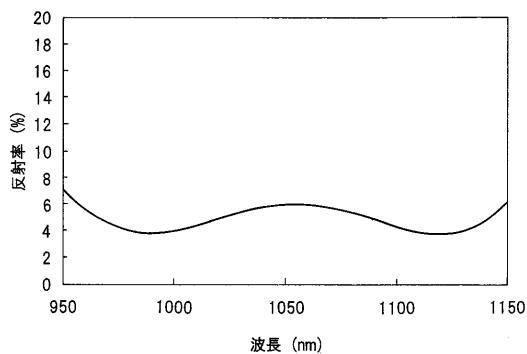
【図 1 7】



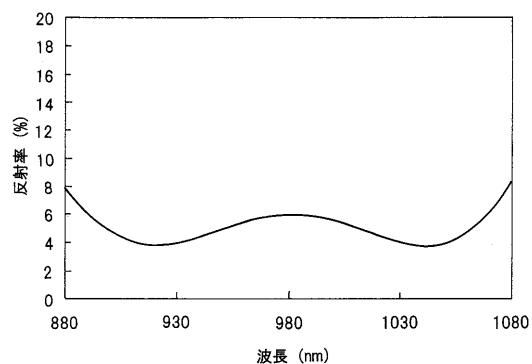
【図 1 9】



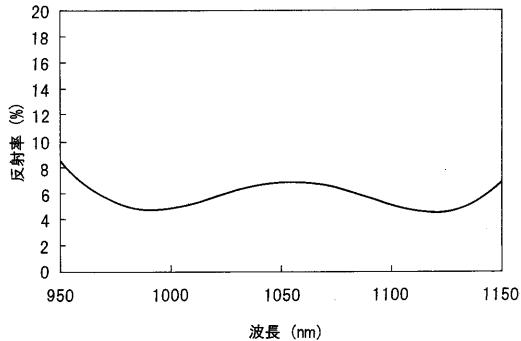
【図 2 0】



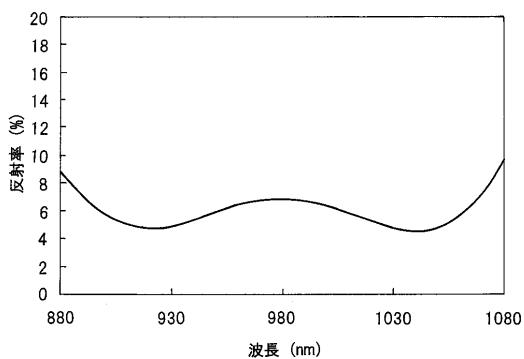
【図 2 1】



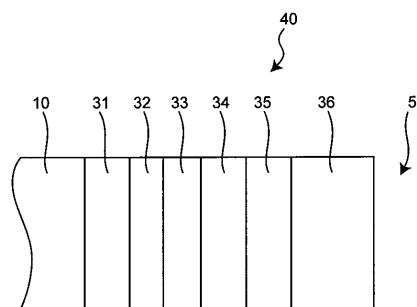
【図 2 2】



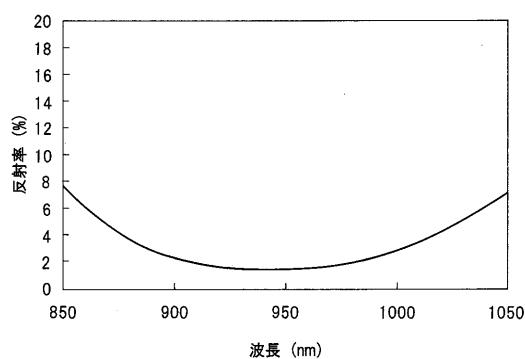
【図 2 3】



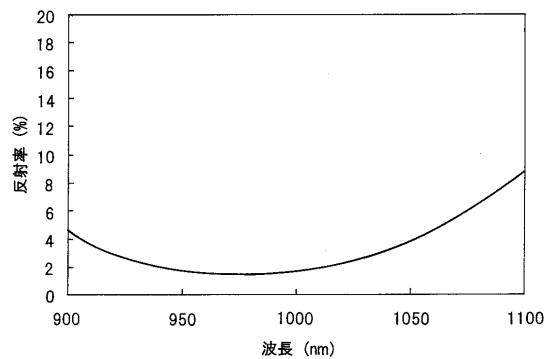
【図 2 4】



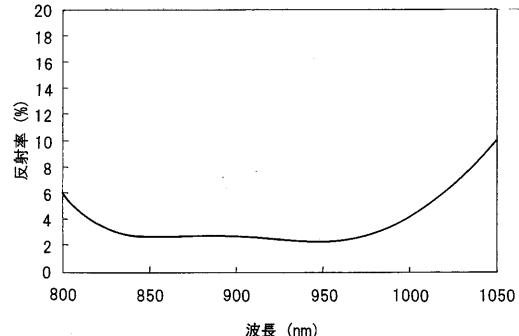
【図 2 5】



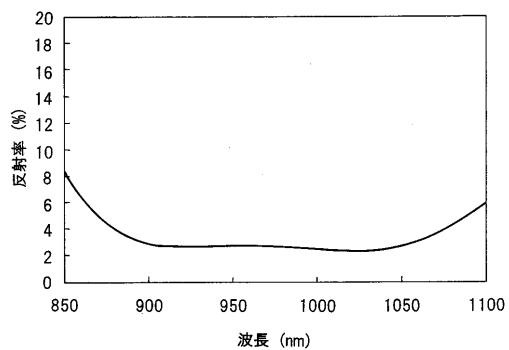
【図 2 6】



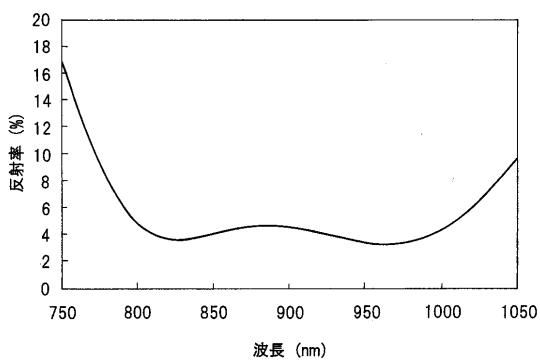
【図 2 7】



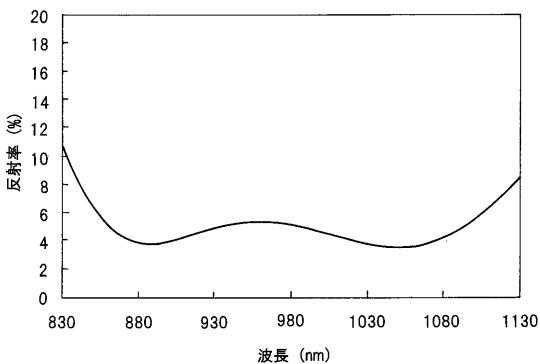
【図 2 8】



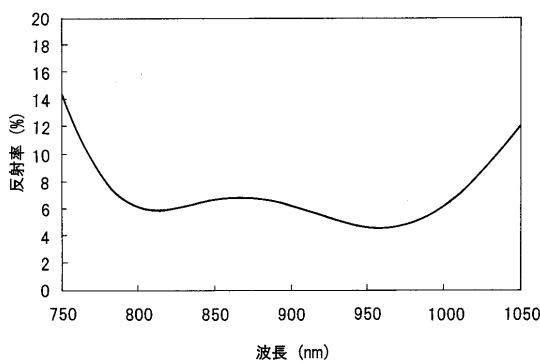
【図 2 9】



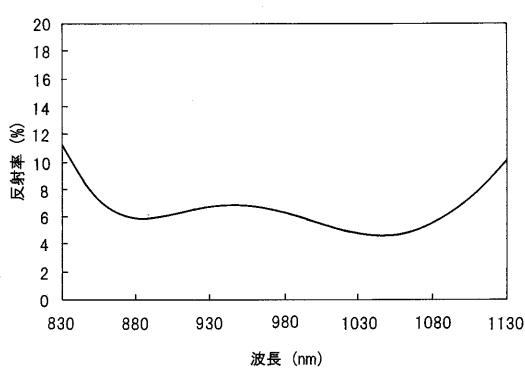
【図 3 0】



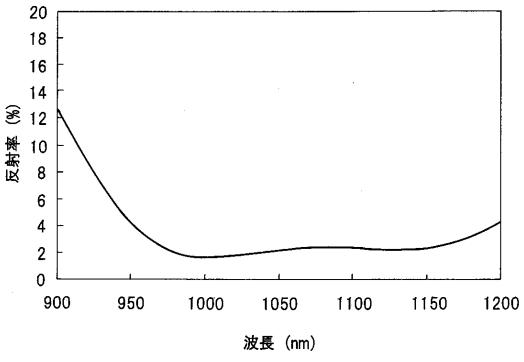
【図 3 1】



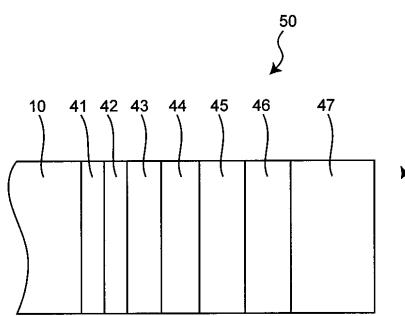
【図 3 2】



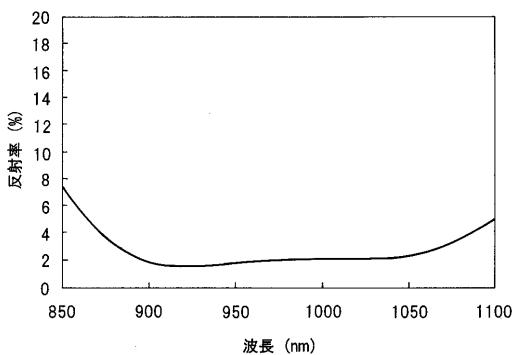
【図 3 4】



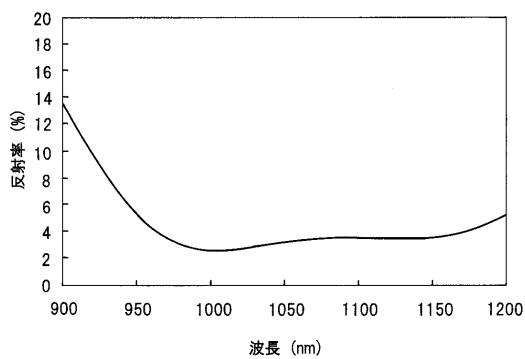
【図 3 3】



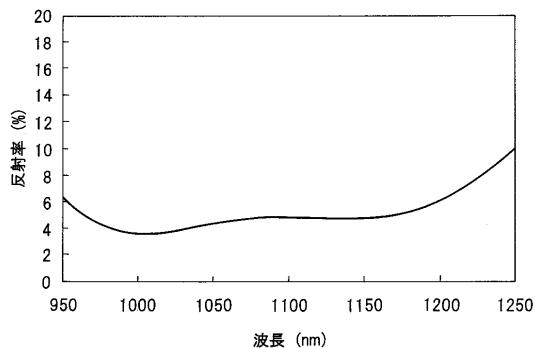
【図 3 5】



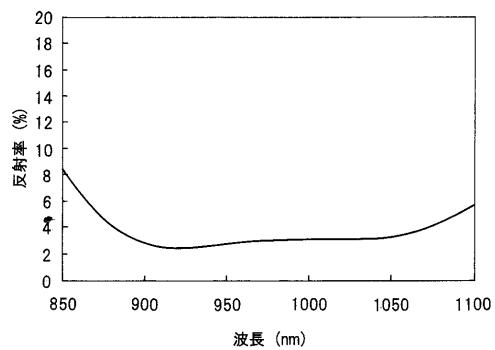
【図 3 6】



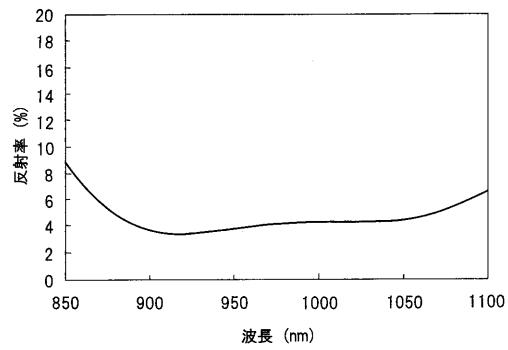
【図 3 8】



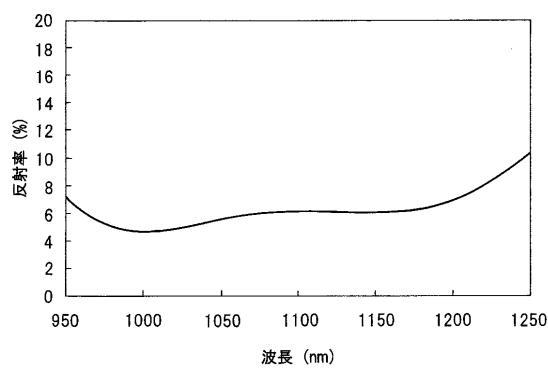
【図 3 7】



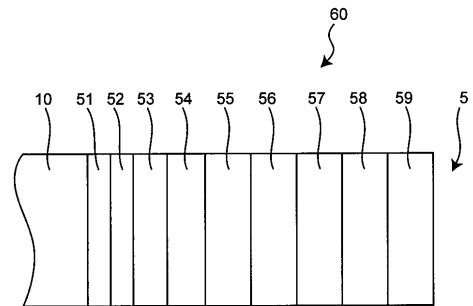
【図 3 9】



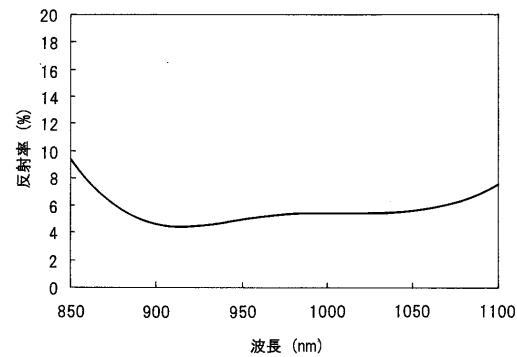
【図 4 0】



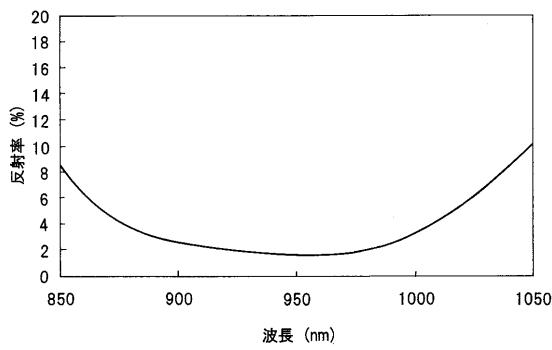
【図 4 2】



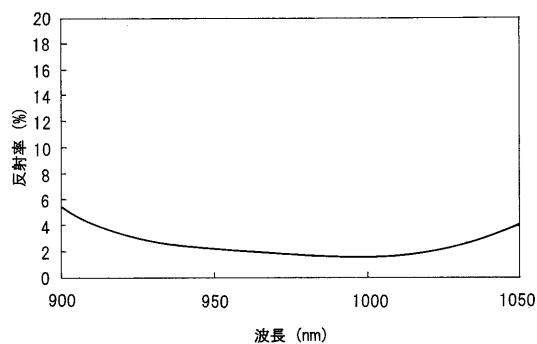
【図 4 1】



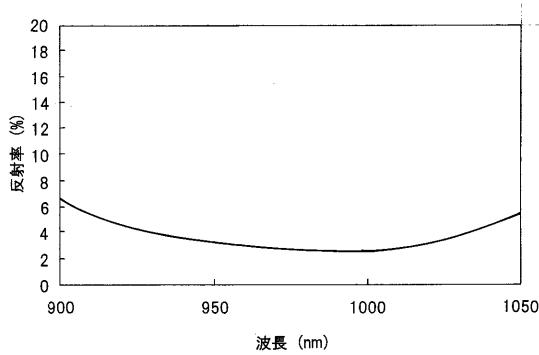
【図 4 3】



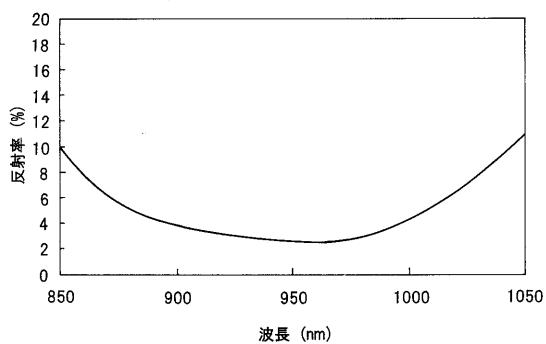
【図 4 4】



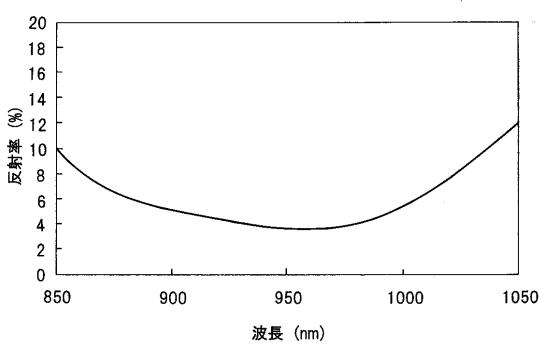
【図 4 6】



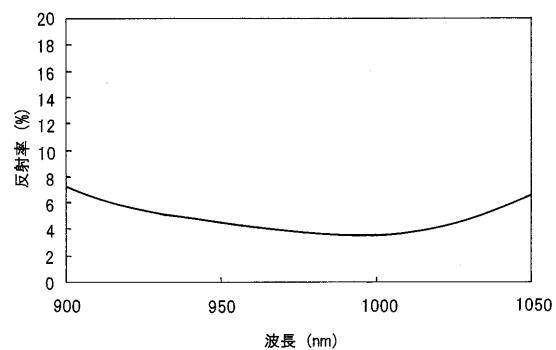
【図 4 5】



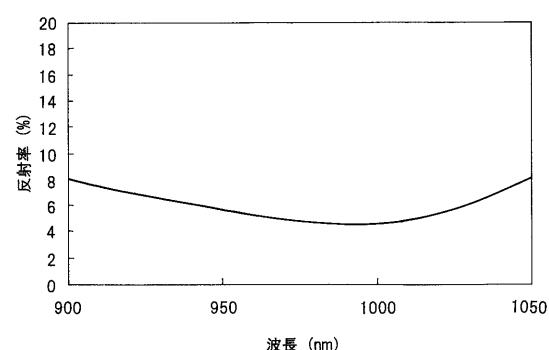
【図 4 7】



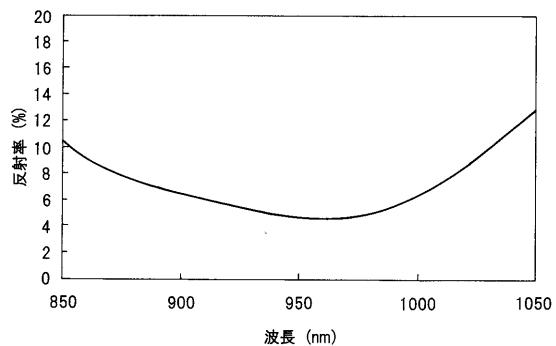
【図 4 8】



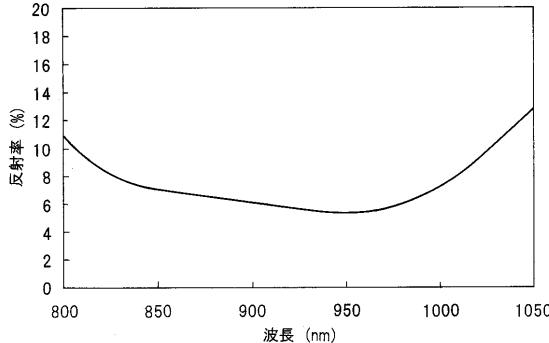
【図 5 0】



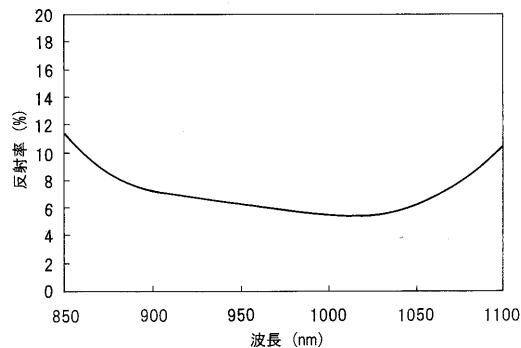
【図 4 9】



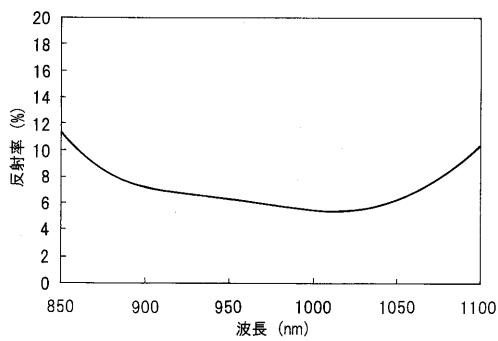
【図 5 1】



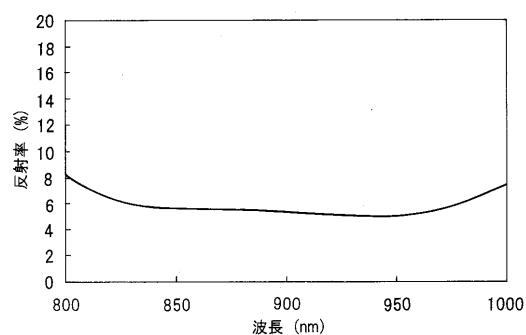
【図 5 2】



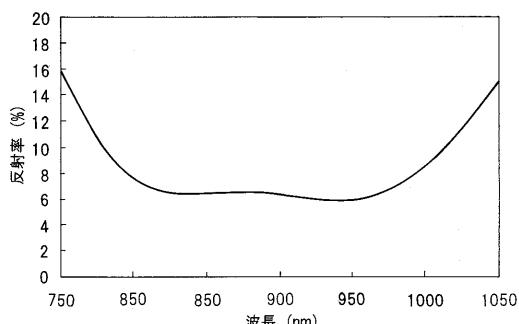
【図 5 4】



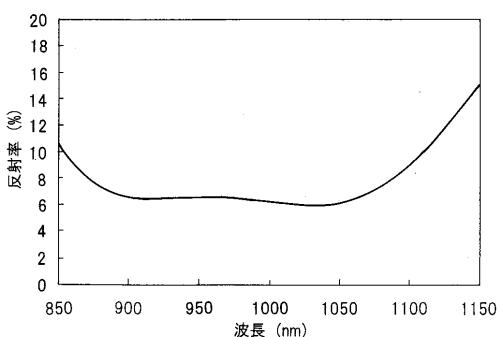
【図 5 3】



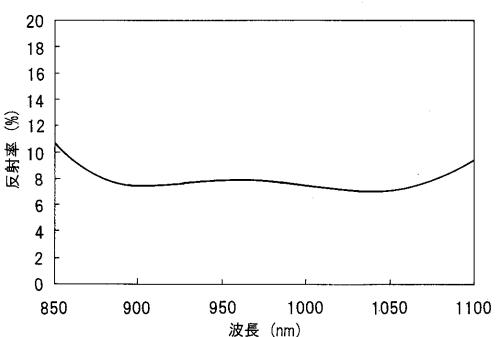
【図 5 5】



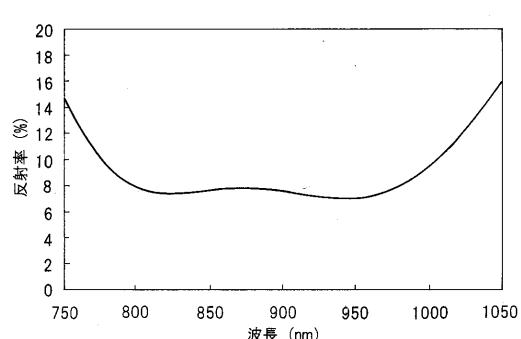
【図 5 6】



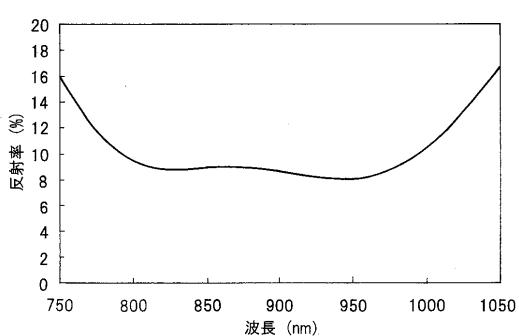
【図 5 8】



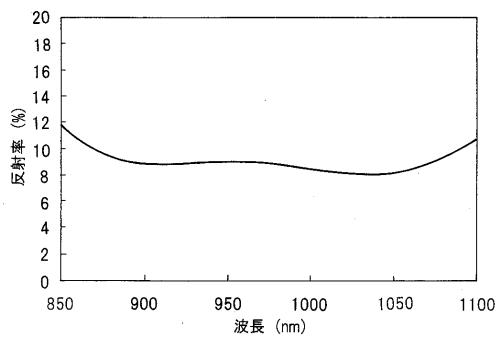
【図 5 7】



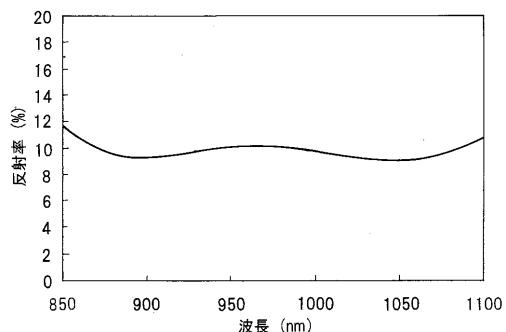
【図 5 9】



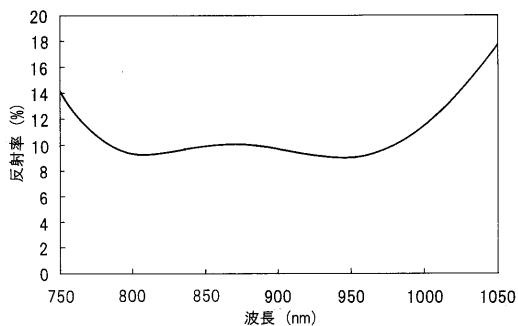
【図 6 0】



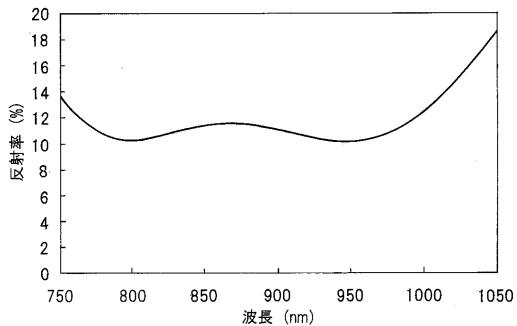
【図 6 2】



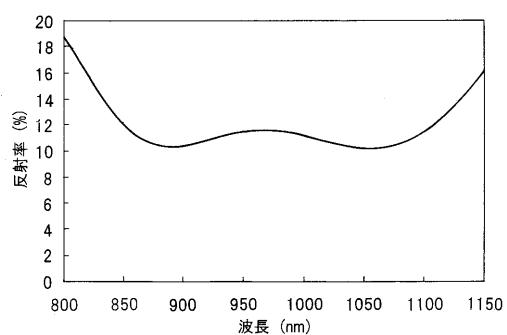
【図 6 1】



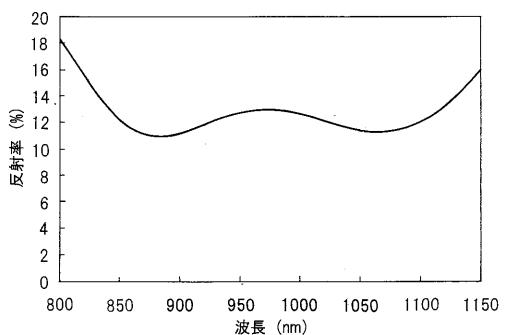
【図 6 3】



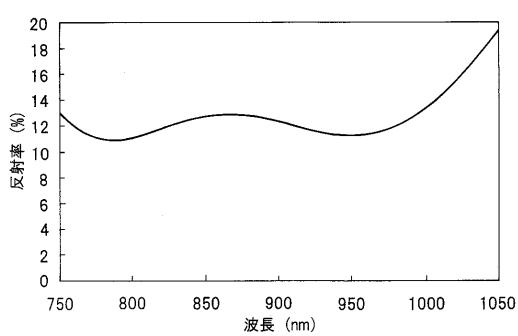
【図 6 4】



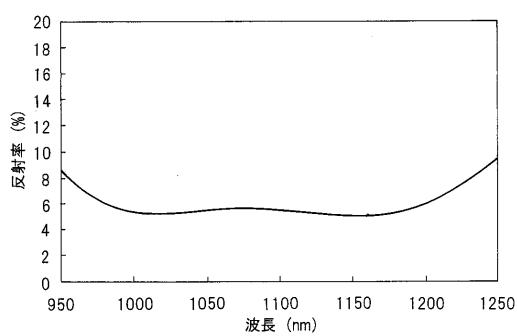
【図 6 6】



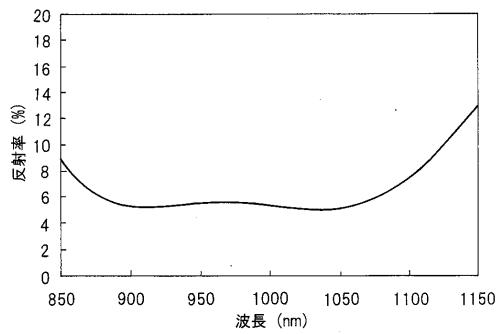
【図 6 5】



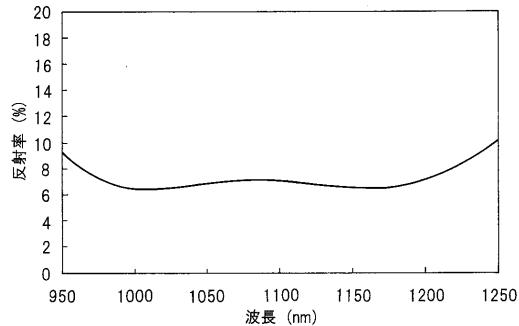
【図 6 7】



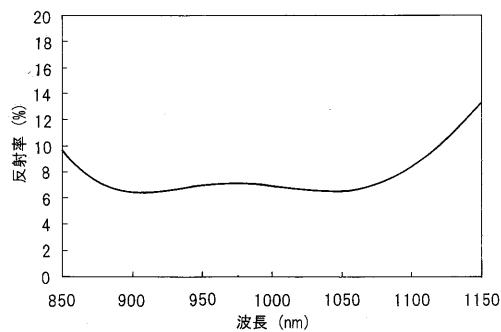
【図 6 8】



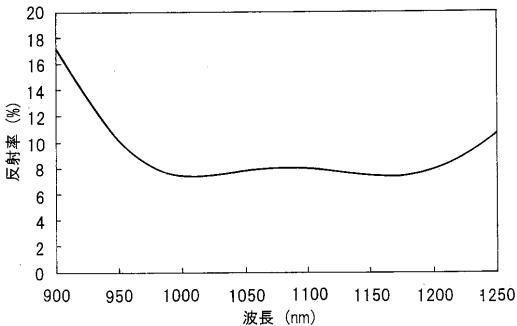
【図 6 9】



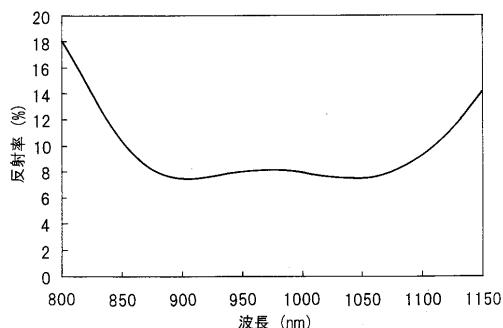
【図 7 0】



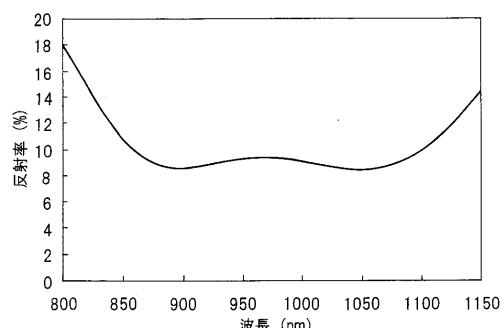
【図 7 1】



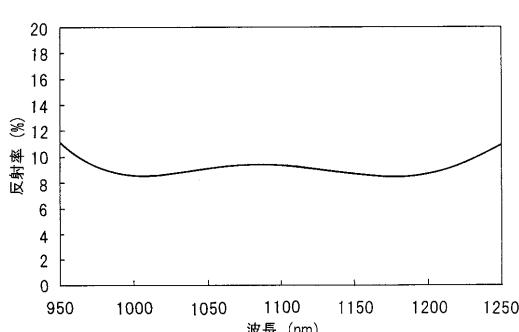
【図 7 2】



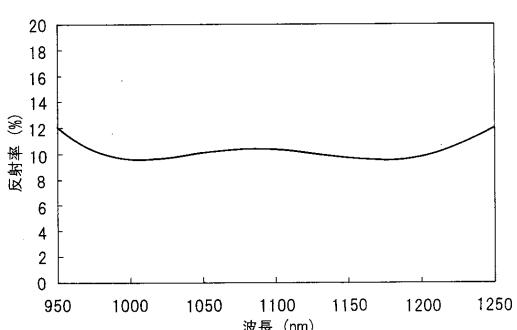
【図 7 4】



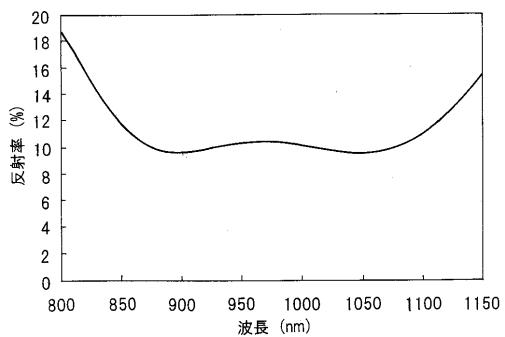
【図 7 3】



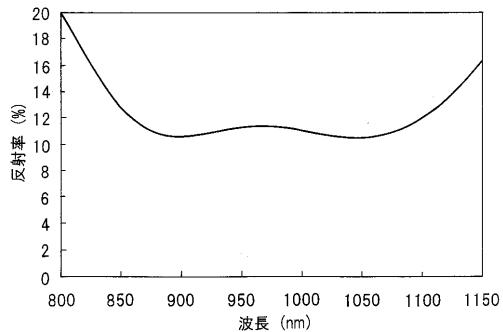
【図 7 5】



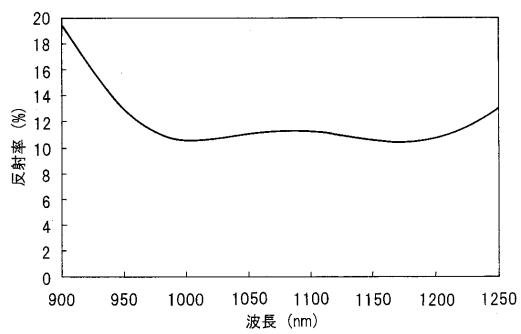
【図 7 6】



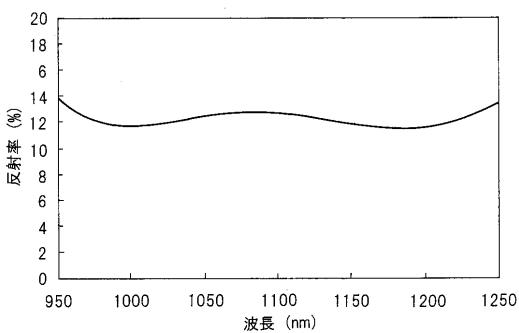
【図 7 8】



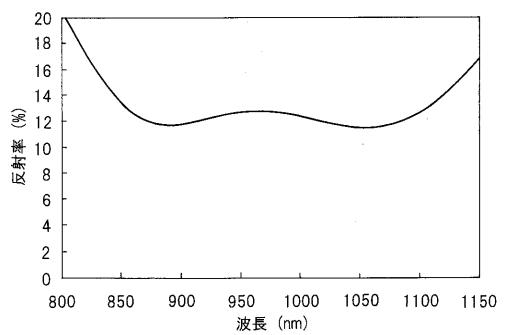
【図 7 7】



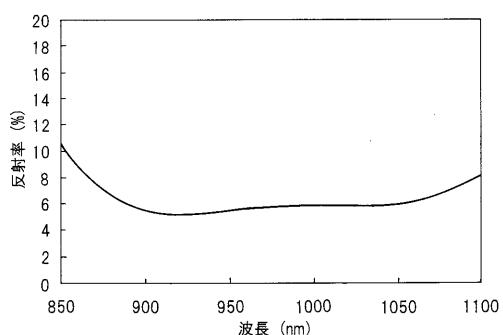
【図 7 9】



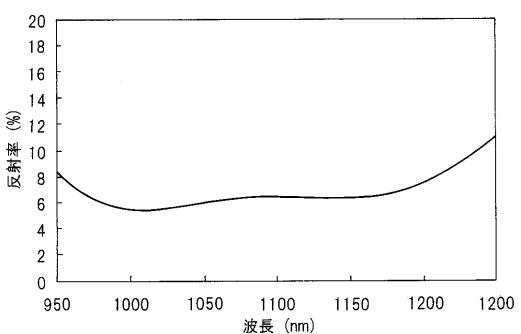
【図 8 0】



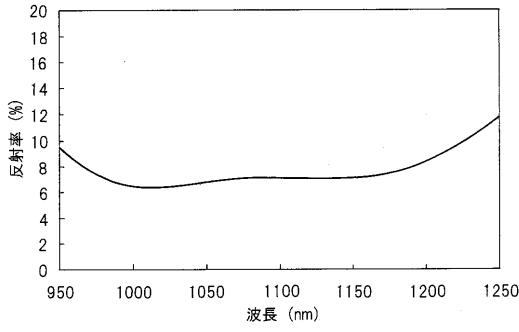
【図 8 2】



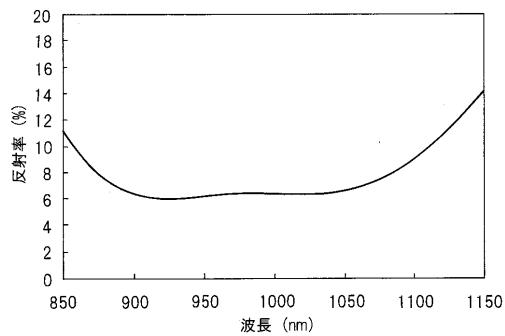
【図 8 1】



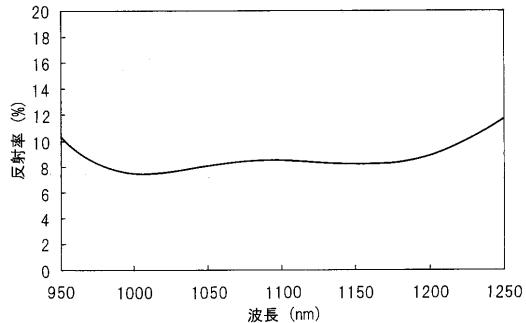
【図 8 3】



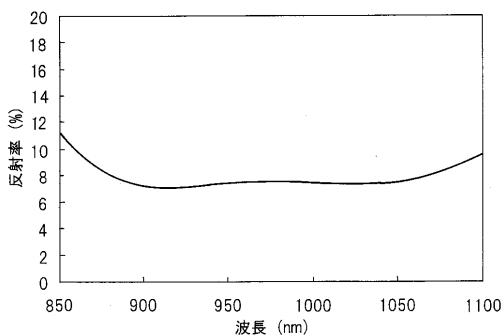
【図 8 4】



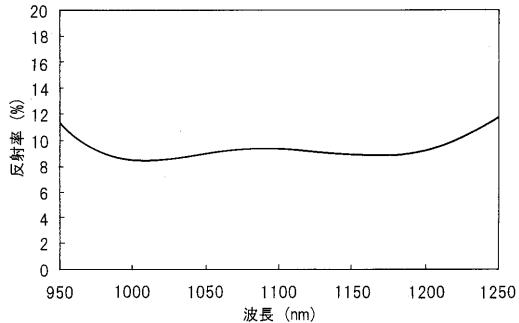
【図 8 5】



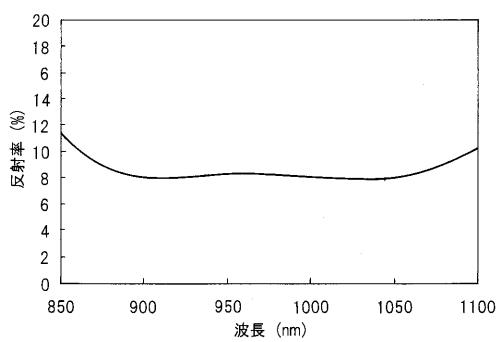
【図 8 6】



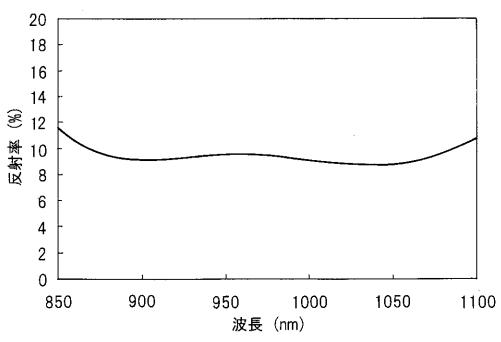
【図 8 7】



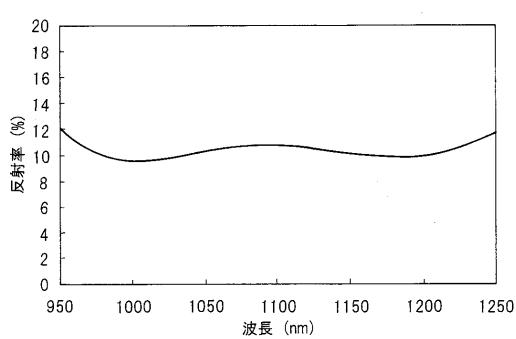
【図 8 8】



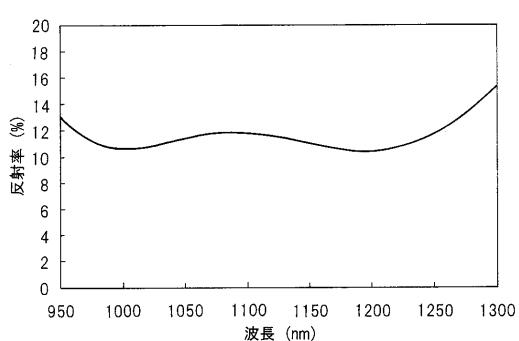
【図 9 0】



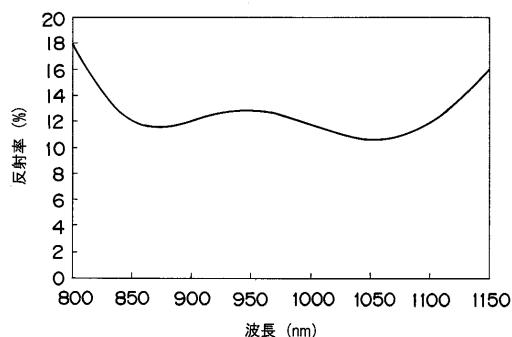
【図 8 9】



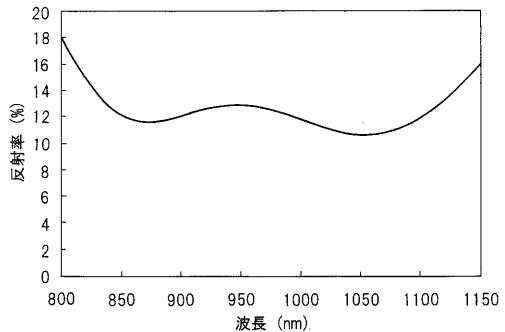
【図 9 1】



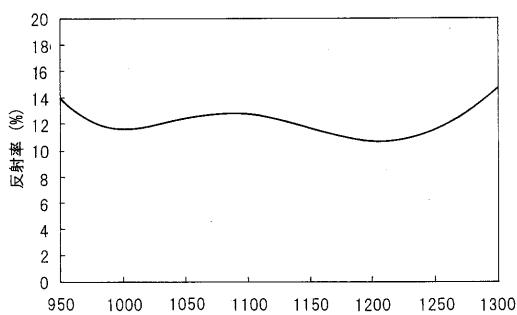
【図 9 2】



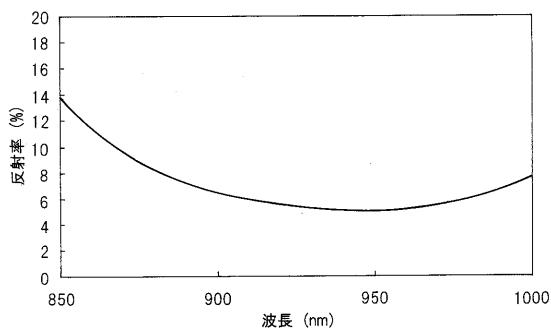
【図 9 4】



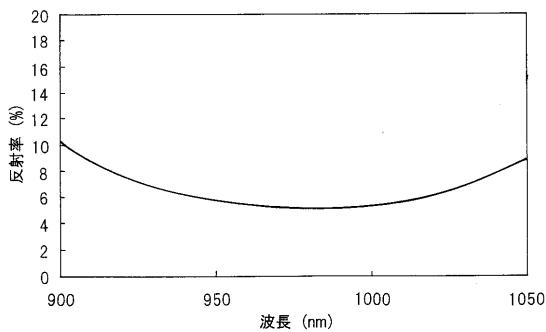
【図 9 3】



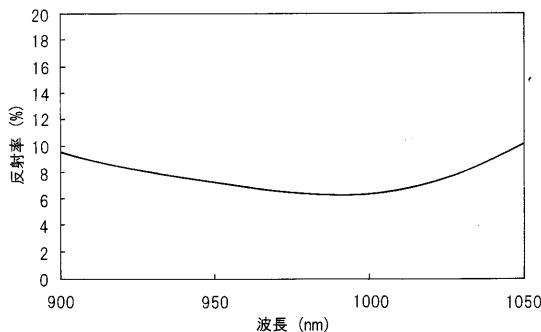
【図 9 5】



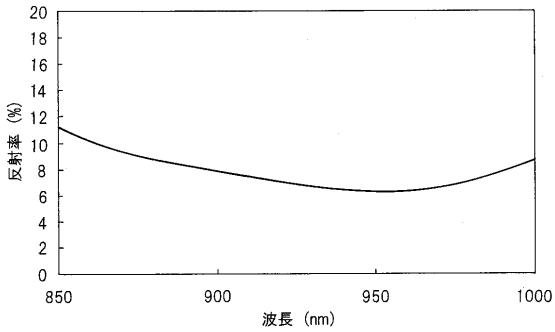
【図 9 6】



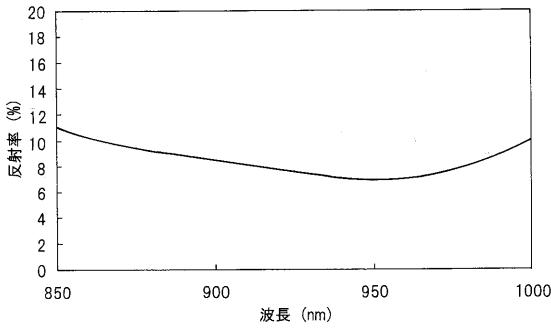
【図 9 8】



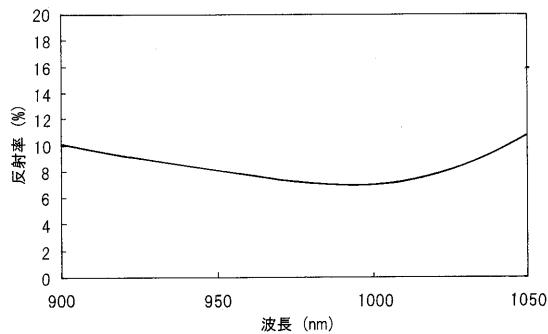
【図 9 7】



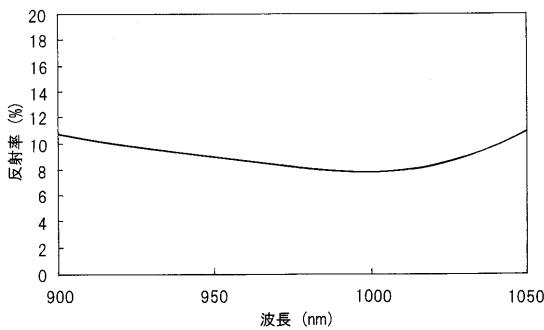
【図 9 9】



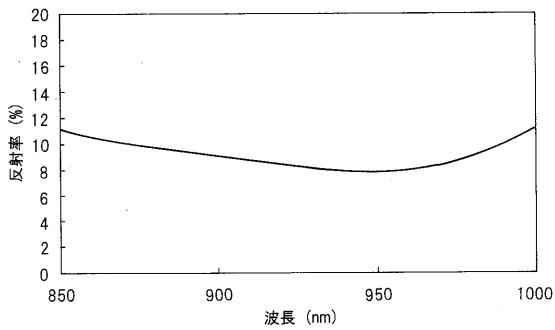
【図 100】



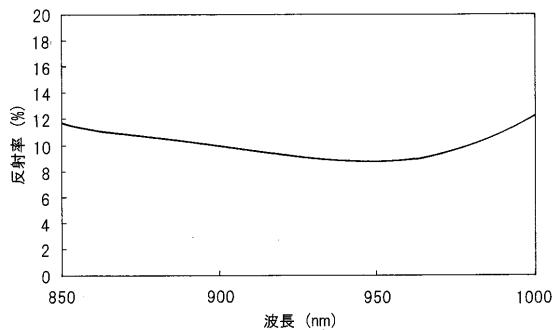
【図 102】



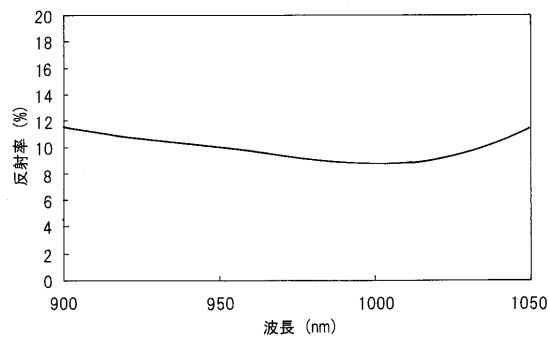
【図 101】



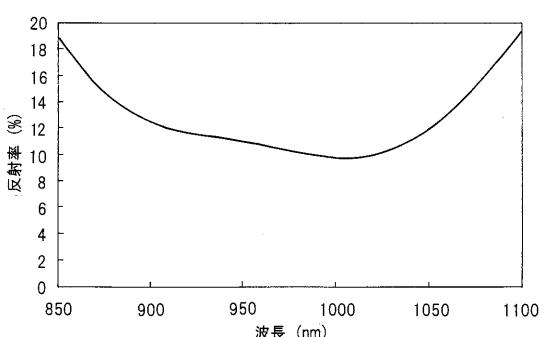
【図 103】



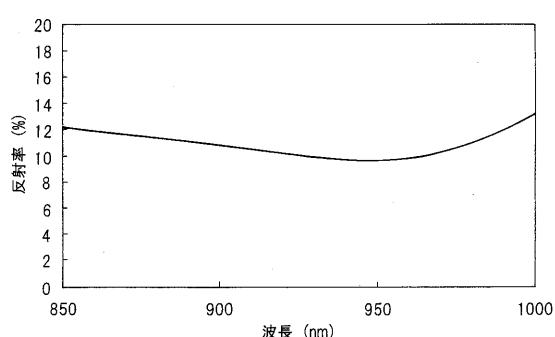
【図 104】



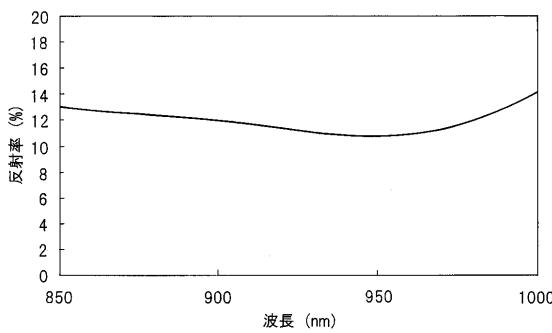
【図 106】



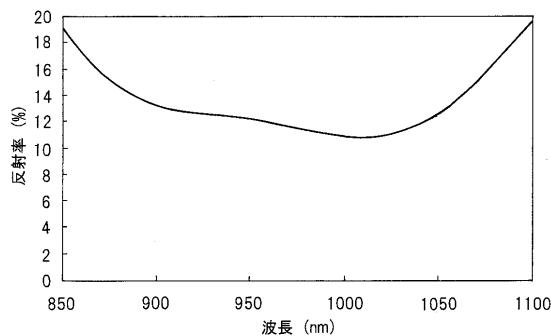
【図 105】



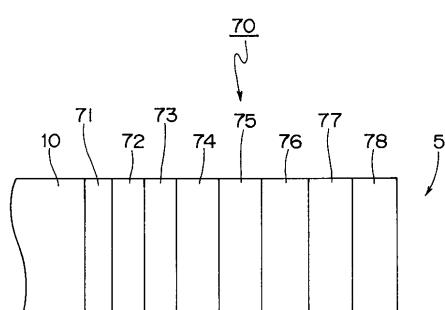
【図 107】



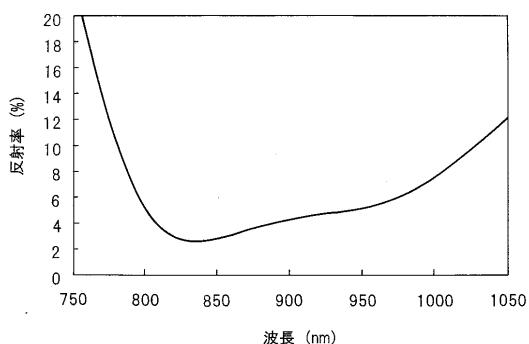
【図 108】



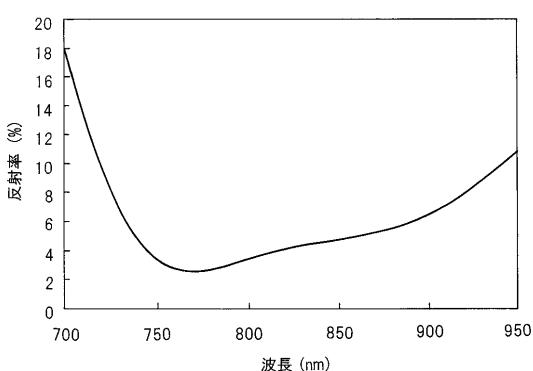
【図 109】



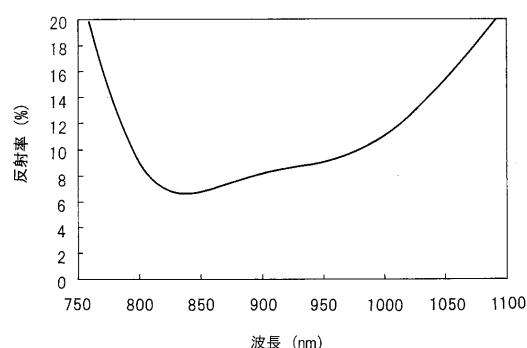
【図 110】



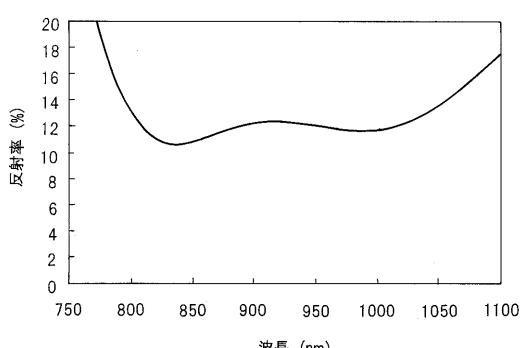
【図 111】



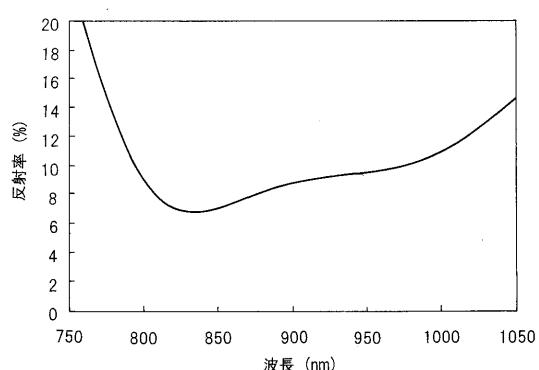
【図 112】



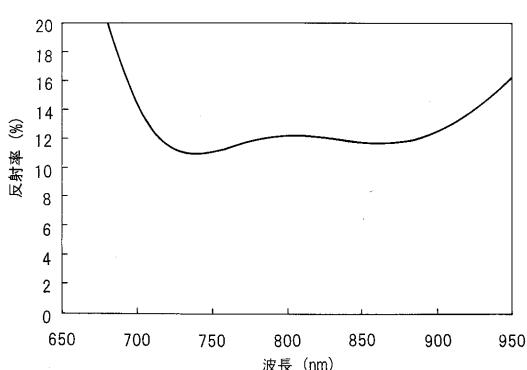
【図 114】



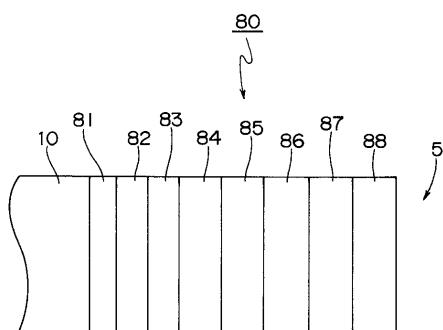
【図 113】



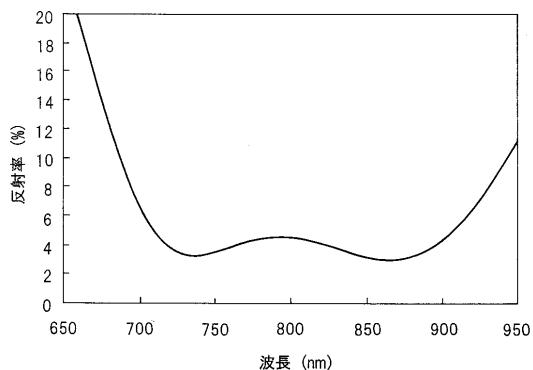
【図 115】



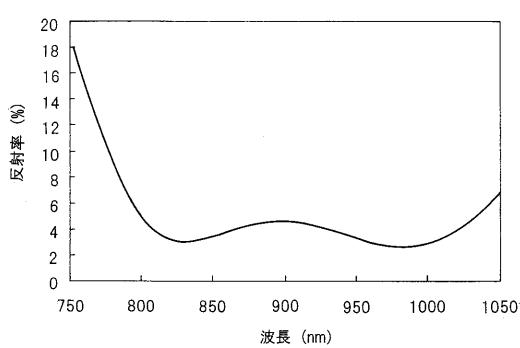
【図 1 1 6】



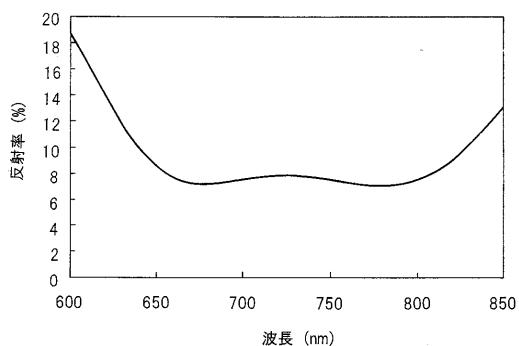
【図 1 1 8】



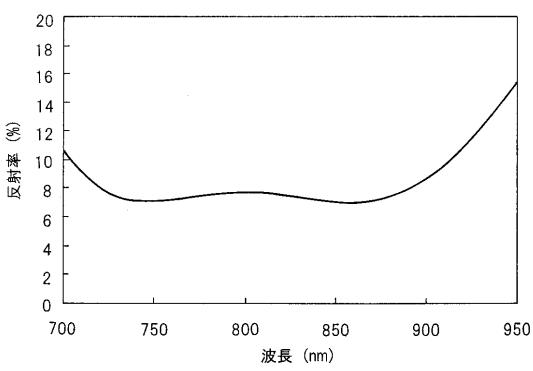
【図 1 1 7】



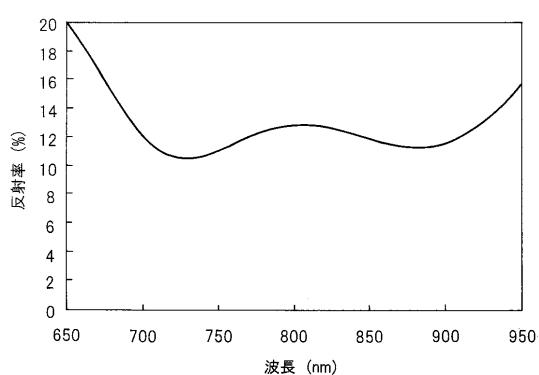
【図 1 1 9】



【図 1 2 0】



【図 1 2 2】



【図 1 2 1】

