

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

屈折率 n が $1.2 \sim 1.6$ の樹脂によって光入射面が覆われ、InP 基板、InGaAs 受光層又は InGaAsP 受光層、pn 接合、p 電極、n 電極を含む InP 系受光素子であって、光が入射する側の InP 層の上に SiON 膜を設けその上に TiO₂ 膜を設けた二層反射防止膜を有し、TiO₂ 膜厚を光波長 λ で割った値が $0.040 \sim 0.078$ 、SiON 膜厚を光波長 λ で割った値が $0.022 \sim 0.067$ であることを特徴とする InP 系受光素子。

【請求項 2】

入射する光の波長が 1550 nm であって、TiO₂ 膜厚が $121 \text{ nm} \sim 62 \text{ nm}$ であり、SiON 膜厚が $34 \text{ nm} \sim 104 \text{ nm}$ であることを特徴とする請求項 1 に記載の InP 系受光素子。 10

【請求項 3】

樹脂の屈折率が $n = 1.46$ であって、TiO₂ 膜厚を光の波長で割った値が $0.041 \sim 0.065$ であって、SiON 膜厚を光の波長 λ で割った値が $0.036 \sim 0.062$ であることを特徴とする請求項 1 に記載の InP 系受光素子。

【請求項 4】

樹脂の屈折率が $n = 1.46$ で、光の波長が 1550 nm であって、TiO₂ 膜厚が $64 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ であって、SiON 膜厚が $56 \text{ nm} \sim 96 \text{ nm}$ である事を特徴とする請求項 3 に記載の InP 系受光素子。 20

【請求項 5】

樹脂屈折率が $n = 1.46$ であり、光の波長が 1550 nm であって、TiO₂ 膜厚が 82 nm であって、SiON 膜厚が 76 nm である事を特徴とする請求項 4 に記載の InP 系受光素子。

【請求項 6】

屈折率 n が $1.2 \sim 1.6$ の樹脂によって光入射面が覆われ、InP 基板、InGaAs 受光層又は InGaAsP 受光層、pn 接合、p 電極、n 電極を含む InP 系受光素子であって、光が入射する側の InP 層の上に TiO₂ を設けその上に SiON を設けた二層反射防止膜を有し、SiON 膜厚を光波長 λ で割った値が $0.036 \sim 0.094$ 、TiO₂ 膜厚を光波長 λ で割った値が $0.057 \sim 0.094$ であることを特徴とする InP 系受光素子。 30

【請求項 7】

入射する光の波長が 1550 nm であって、SiON 膜厚が $146 \text{ nm} \sim 56 \text{ nm}$ であり、TiO₂ 膜厚が $88 \text{ nm} \sim 146 \text{ nm}$ であることを特徴とする請求項 6 に記載の InP 系受光素子。

【請求項 8】

樹脂の屈折率が $n = 1.46$ であって、SiON 膜厚を光の波長で割った値が $0.0627 \sim 0.0669$ であって、TiO₂ 膜厚を光の波長 λ で割った値が $0.0843 \sim 0.0862$ であることを特徴とする請求項 6 に記載の InP 系受光素子。

【請求項 9】

光の波長が 1550 nm であって、SiON 膜厚が $97 \text{ nm} \sim 103 \text{ nm}$ であって、TiO₂ 膜厚が $130 \text{ nm} \sim 134 \text{ nm}$ である事を特徴とする請求項 8 に記載の InP 系受光素子。 40

【請求項 10】

樹脂屈折率が $n = 1.46$ であり、光の波長が 1550 nm であって、SiON 膜厚が 100 nm であって、TiO₂ 膜厚が 132 nm である事を特徴とする請求項 9 に記載の InP 系受光素子。

【請求項 11】

屈折率 n が $1.2 \sim 1.6$ の樹脂によって光入射面が覆われ、InP 基板、InGaAs 受光層又は InGaAsP 受光層、pn 接合、p 電極、n 電極を含む InP 系受光素子の 50

製造方法であって、光が入射する側の InP 層の上にプラズマ CVD 法によって波長 λ の $0.022 \sim 0.067$ 倍の膜厚の SiON 層を形成し、その上にイオンアシスト電子ビーム法によって波長 λ の $0.078 \sim 0.040$ 倍の膜厚の TiO_2 層を形成することを特徴とする InP 系受光素子の製造方法。

【請求項 12】

屈折率 n が $1.2 \sim 1.6$ の樹脂によって光入射面が覆われ、InP 基板、InGaAs 受光層又は InGaAsP 受光層、pn 接合、p 電極、n 電極を含む InP 系受光素子の製造方法であって、光が入射する側の InP 層の上にイオンアシスト電子ビーム法によって波長 λ の $0.057 \sim 0.094$ 倍の膜厚の TiO_2 層を形成し、その上にプラズマ CVD 法によって波長 λ の $0.094 \sim 0.036$ 倍の膜厚の SiON 層を形成することを特徴とする InP 系受光素子の製造方法。 10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、樹脂封止する InP 系受光素子における反射防止膜の構造に関する。InP 系半導体受光素子は n 型 InP 基板の上に n-InP バッファ層、InGaAs (又は InGaAsP) 受光層 (光吸収層ともいう)、n-InP 窓層などをエピタキシャル成長させてマスクをして p 型不純物を拡散して素子の上方中央部に p 領域をつくり受光層の内部に pn 接合を形成し n 型基板に n 電極を、p 領域に p 電極を付けたものである。n 電極 (カソード) と p 電極 (アノード) の間に逆バイアスを掛けて受光層へ光を入射させるようにしている。光が受光層へ入ると電子正孔対ができてそれが pn 接合を越えるときに電流が流れて光を検出することができるようになっている。 20

【0002】

光が入る側の電極はリング状とかドット状になっており光ができるだけ効率よく入射するようになっている。波長によってすこし変わるが光通信の波長において、InP の屈折率は高く 3.3 程度もある。Si も屈折率は 3.4 程度である。大気の屈折率は 1 であり屈折率の差が大きい。そのため界面での光の反射が著しい。

【0003】

そこで反射防止膜を受光素子の入射側に付けることが多い。反射防止膜というのは素子と外界の境界面で光が反射するのを防ぐための薄膜である。本発明は樹脂で被覆される InP 系受光素子の反射防止膜に関する。 30

【背景技術】

【0004】

【特許文献 1】特開平 5-82827 反射防止膜形成

【0005】

【非特許文献 1】S. Sakai, M. Umeno, T. Aoki, M. Tobe, & Y. Amemiya, "InGaAsP/InP Photodiodes Antireflectively Coated with InP Native Oxide", IEEE J. of Quantum Electronics. Vol. 15, No. 10, p 1077 (1979) 40

【0006】

非特許文献 1 は InP そのものを陽極酸化しそれを反射防止膜とした InP 基板上の InGaAsP フォトダイオードを提案している。陽極酸化した $InPO_x$ はアニールの時間と温度によって屈折率と膜厚が変化するが、光通信波長での屈折率が 1.5 の程度であり、かなり反射損失を減少させることができたとして述べている。最少の反射損失は 6% であったと主張している。

【0007】

それは初期のものでありその後は透明の薄膜 (SiO_2 、 SiN 、 $SiON$) を付ける 50

ことによって反射防止膜とすることが多いようである。透明であって中間の屈折率をもっており膜として安定でInPとの密着性が良ければ反射防止膜として適しているといえる。

【0008】

SiO₂は屈折率が1.44の程度であるからこれも反射防止膜として使う事ができる。SiONは屈折率が1.8であるからより反射損失を減らすことができる。これらの膜はpn接合を保護し暗電流を減らすという作用もある。

【0009】

特許文献1は半絶縁性のInP基板の上にn⁺-InP層、n⁻-InGaAs光吸収層、n-InP窓層を設け、素子一単位の一部にp型不純物をInP窓層からマスクを通して拡散してp領域を形成し、素子の中間部においてn-InP窓層、InGaAs光吸収層、n-InP層までを除去して素子を二分し2つのメサをつくり、第1のメサにp領域の上に反射防止膜をつけ、p領域の一部に接合し第2のメサにいたるp電極を形成し、第1メサのn-InP窓層の上にn電極を形成したものである。これは第1メサのみがp領域をもちその上にSiNの反射防止膜が設けられる。このSiN(窒化シリコン)は反射防止膜であって同時にパッシベーション膜となっている。

【0010】

特許文献1はそのような2メサの素子はSiNが反射防止膜だけでなく2つのメサを覆うようになり面積が広いから、λ/4の厚さのSiN膜であると200nm程度の厚みしかなく薄すぎて静電容量が大きくなり応答動作が遅くなるということを問題にしている。それでSiN膜を1/4波長ではなくて、より厚く(2n+1)/4波長(nは整数)にしたというのが特許文献1の発明である。たとえばn=2とすれば1000nm厚みのSiN膜を反射防止膜兼用パッシベーション膜とすることができる、というわけである。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

金属カンパッケージの中にフォトダイオードを実装し窒素などを入れて封止したタイプの受光素子がよく使われてきた。金属パッケージは封止が完全で水分などの汚染がなく電磁ノイズにも強いという長所がある。その場合は受光素子の外界は気体(窒素、不活性ガス)であり、屈折率は1なので、反射防止膜はSiNの1/4波長膜でよい。ところが金属パッケージタイプのものは容積が大きくコスト高であるという欠点がある。そこで光通信デバイス分野では低コスト化、集積化を目的として、樹脂封止による表面実装やポリイミド導波路などの樹脂と受光素子との光学的な接続の試みが行われている。

【0012】

その場合はフォトダイオードの外界は空気ではなく樹脂となる。従来例として説明したInP陽極酸化膜、SiO₂、SiN、SiONの反射防止膜は空気(n=1)とInP(n=3.3)との界面を前提として設計・成膜されたものである。表面実装受光素子でもSiO₂、SiN、SiONなどInP系受光素子の反射防止膜として使うようである。それは反射防止膜として十分な実績もあって信頼性も高いからである。

【0013】

しかし実際には問題がある。それらSiO₂、SiN、SiONなどをそのまま表面実装型光受信モジュールの受光素子の反射防止膜に使用すると樹脂/半導体界面で反射がおり、信号光を十分に取込みえず光学的な損失を生じる。

【0014】

従来から広く使われている反射防止膜である、SiN、SiONは入射側の媒質が気体(空気、窒素、Arなどを含む)であり、樹脂中に封止する場合に適合する屈折率が得られない。

【0015】

図12によって外界が樹脂である場合の反射の問題を説明する。中間層の屈折率がm、厚みがdでありその下に半導体層がありその屈折率がnである。上部にあるのは気体でな

10

20

30

40

50

くて樹脂であって屈折率は1でない。樹脂によって屈折率は異なるが、封止に良く使われる透明樹脂の屈折率 h は大体1.4~1.9程度の値をもつ。本発明はどのような屈折率の樹脂にも適用できる。しかし一般の値で説明すると具体性を欠き直観性が乏しいので以後一つの例によって説明する。樹脂の屈折率はたとえば $h = 1.46$ であるとする。

【0016】

図12のように、垂直入射の場合、第1境界での反射振幅は、 $r_1 = (h - m) / (h + m)$ となる(左側の図)。第1境界を透過する光の振幅は $q_1 = 2h / (h + m)$ であり、第2境界での反射の振幅は $r_2 = (m - n) / (m + n)$ である。それが第1境界へ戻ったときの透過振幅は $q_3 = 2m / (h + m)$ である(右側の図)。中間層(反射防止膜)の厚み d による位相の変化がありこれに $\exp(2jkd)$ がかかる。第2境界で反射され中間層を通過してきた光と第1境界で反射された光が打ち消し合えば反射は完全に防止できる。その条件は、

【0017】

$$r_1 + q_1 r_2 q_3 \exp(2jkd) = 0 \quad (1)$$

【0018】

ということである。具体的に書き下すと、

【0019】

$$(h - m) / (h + m) + \{ 2h / (h + m) \} \{ (m - n) / (m + n) \} \{ 2m / (h + m) \} \exp(2jkd) = 0 \quad (2)$$

【0020】

ということである。 $4hm / (h + m)^2$ を1とみなす近似をすると、この式は

【0021】

$$(h - m) / (h + m) + (m - n) / (m + n) \exp(2jkd) = 0 \quad (2)$$

【0022】

図13はこの式の関係を表す。これは複素平面での点Oを中心とする円である。矢印OF、OSは第1境界、第2境界での反射である。第1境界での反射の長さは $(-h + m) / (h + m)$ でこれは正の値である。この例で反射振幅の値は大抵負であるが複素平面上に負数で表現すると直感性に欠ける。マイナスを掛けて正の数にして複素平面に表すことにする。

【0023】

Fは中間層を表す。 ϕ は第2境界での反射光の位相遅れであって $\phi = 2kd = 4\pi md / \lambda$ である。(2)は複素数の式なので実数部と虚数部がともに0になる。完全に反射光が打ち消すというのは第2境界での反射光OS(Sは半導体からの反射という意味)が、丁度180度($\phi = \pi$)の方向をむき長さ $(-m + n) / (m + n)$ が先ほどの $(-h + m) / (h + m)$ に等しければ良いということである。

【0024】

$\exp(2jkd) = -1$ というのは $dm = \lambda / 4$ という4分の1波長条件である。それは最適の厚み d を決定するものであるが材質を決めるものではない。反射防止膜と言えば4分の1波長という通念があり、材質に対する十分な省察がなされていないと本発明者は考える。

【0025】

4分の1波長条件を離れて材料を決定することができる。 $\exp(2jkd) = -1$ において(2)式は、

【0026】

$$(h^2 - m^2)(m + n) = 4hm(n - m) \quad (3)$$

【0027】

となる。 n を与えると厳密な m の値を求めることができる。3次方程式だから一般解を簡単に示すことはできない。先ほどと同じように(2)式において、 $4hm / (h + m)^2$ を1とみなす近似をすると、 $\exp(2jkd) = -1$ という4分の1波長($\lambda / 4$)条

10

20

30

40

50

件を仮定して、

【 0 0 2 8 】

$$(h - m) / (h + m) = (m - n) / (m + n) \quad (4)$$

【 0 0 2 9 】

ということになる。この解は

【 0 0 3 0 】

$$m = (h n)^{1/2} \quad (5)$$

【 0 0 3 1 】

である。下地の半導体屈折率 n と、包囲媒質である樹脂屈折率 h の積の平方根が m の最適解だということである。これが材料を決めるための式となる。従来の金属パッケージに封入された受光素子の場合は h が 1 になっていたのであるが、樹脂で囲まれた表面実装型の場合は 1 でなく樹脂の屈折率 h がはいる。 10

【 0 0 3 2 】

たとえば、InP の屈折率を 3.3 とし、樹脂の屈折率を 1.46 とすると、最適の中間層の屈折率は

【 0 0 3 3 】

$$m = 2.19 \quad (6)$$

【 0 0 3 4 】

となる。InP の陽極酸化膜は屈折率が 1.5 で、SiO₂ は 1.4 であった。これまで用いられた InP 系受光素子の反射防止膜材料で屈折率のもっとも大きい SiON でも 1.8 であった。いずれにしても 2 より小さくて不適当だということがわかる。 20

【 0 0 3 5 】

樹脂によって包囲された受光素子はこれまでの気体に接触する受光素子とは異なるもっと高い屈折率の反射防止膜を要求しているのである。ぴったり 2.19 の屈折率の材料があればよいのである。が、それが無い。最適屈折率でない材料で反射防止膜を作る必要がある。

【 0 0 3 6 】

m が最適の値からずれるとどのように最小反射損失 Q_b が生じるのか？それは (2) 式において、 $4hm / (h + m)^2$ を 1 とみなす近似をして、(4) 式の不平衡分となるので、 30

【 0 0 3 7 】

$$Q_b = | (h - m) / (h + m) - (m - n) / (m + n) |^2 \quad (7)$$

【 0 0 3 8 】

というようになる。図 14 はそのような損失を図示している。外側の円の半径は前項の $-(h - m) / (h + m)$ であり、内側の打点円の半径は後項の $-(m - n) / (m + n)$ ある。複素数 OK が合成の反射光である。 ϕ によって合成反射光 OK はいろいろな大きさ、位相をとる。位相差が π のときに反射損失は最小値をとる。半径の差 Q_b が反射損失の最小値であって、厚みが 4 分の 1 波長条件 ($d = \lambda / 4m$) を満足する厚みの場合の値である。厚みがそれからずれるともっと大きくなる。" b " というのは $dm = \lambda / 4$ 条件をみたしている最小値という意味である。 40

【 0 0 3 9 】

例えば $h = 1.46$ 、 $n = 3.31$ とし、SiON の場合の $m = 1.80$ を採用したとしても $(h - m) / (h + m) = -0.104$ 、 $(m - n) / (m + n) = -0.295$ だから、その差は 0.191 であり、二乗して、

【 0 0 4 0 】

$$Q_b (m = 1.8) = 0.036 \quad (8)$$

【 0 0 4 1 】

となって、3.6% 程度の反射損が残る。それは図 10 の反射率のグラフで SiN 膜の反射損失の最小値 (1550 nm) が 3% 強ということに対応する。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 4 2 】

樹脂接触 I n P 系受光素子の反射防止膜を作るためにはもっと高い屈折率の材料が必要である。先ほどの例で樹脂屈折率が $h = 1.46$ で m の最適値が 2.19 であると言うことを述べた。本発明は空気（窒素など）でなく樹脂によって覆われている受光素子の入射窓に最適の反射防止膜として、 $TiO_2 / SiON$ の 2 重膜を提案する。光通信用光の波長に対して TiO_2 は透明でありその屈折率は 2.32 である。それは最適値である 2.19 よりも大きい。そこで $SiON (1.80)$ と組み合わせれば実効的に 2.19 の屈折率を実現する可能性がある。 TiO_2 が反射防止膜として使用されたことはない。新規の材料である。

【 0 0 4 3 】

10

二つの中間層を設けると境界の数が増える。反射は 3 箇所で行われる。2 層にするので自由度が増える。その増えた自由度が本発明を成り立たせる。厚みと順序が自由度である。順序に関して甲型と乙型を区別することができる。上から並べると次のようになる。

【 0 0 4 4 】

甲型：樹脂 + TiO_2 + $SiON$ + I n P

乙型：樹脂 + $SiON$ + TiO_2 + I n P

【 0 0 4 5 】

乙型というのは屈折率が小さいものから順に大きいものへと変化して行くものである。甲型は屈折率の順序が途中で反転しているものである。

20

【 0 0 4 6 】

甲型：屈折率の順 1.46 、 2.32 、 1.80 、 3.3

乙型：屈折率の順 1.46 、 1.80 、 2.32 、 3.3

【 0 0 4 7 】

そのような具体的な話は後にして、ここではより一般的に述べる。図 15 のように中間層を 2 層にするので上の中間層を上層と呼び、下の中間層を下層と呼ぶことにする。環境は樹脂 R である。その屈折率を h と書く。上層 E は屈折率を g 、厚みを f とする。下層 F は屈折率を m 、厚みを d とする。一番下にある半導体 S は屈折率を n とする。樹脂 R と上層 E の境を第 1 境界という。上層 E と下層 F の境を第 2 境界という。下層 F と半導体 S の境を第 3 境界という。入射光の振幅を 1 とする。

30

【 0 0 4 8 】

第 1 境界での反射光の振幅は $(h - g) / (h + g)$ である。これは負の値であり位相が 180 度変わるということである。先述のように負数では直感性にかけから複素数図ではマイナス “ - ” をつけて正の値として考える。

【 0 0 4 9 】

第 1 境界を通り抜けるのに $2h / (h + g)$ の振幅変化があり、上から下へ上層 E を通り抜けるので $\exp(jk'f)$ の波動の変化があり、第 2 境界での反射によって $(g - m) / (g + m)$ の振幅変化があり、上層 E を下から上へ通り抜けるので $\exp(jk'f)$ の変化があり、第 1 境界を通過するとき $2g / (h + g)$ の変動がある。 $k' = 2\pi g / \lambda$ である。

40

【 0 0 5 0 】

だから第 2 境界の反射光振幅は $\{ 2h / (h + g) \} \{ (g - m) / (g + m) \} \{ 2g / (h + g) \} \exp(2jk'f)$ である。 $4hg / (h + g)^2$ を 1 とみなす近似をすると、第 2 境界の反射振幅は $\{ (g - m) / (g + m) \} \exp(2jk'f)$ と近似される。 $2k'f = 4\pi gf / \lambda = \theta$ と書くと、 $\{ (g - m) / (g + m) \} \exp(\theta)$ である。

【 0 0 5 1 】

同じようにして第 3 境界での反射光の振幅は、 $\{ 2h / (h + g) \} \{ (2g / (g + m)) \} \{ (m - n) / (m + n) \} \{ 2m / (g + m) \} \{ 2g / (h + g) \} \exp(2jk'f + 2jkd)$ である ($k = 2\pi m / \lambda$) である。 $2kd = 4\pi md / \lambda = \phi$ と

50

おく。これも $4hg/(h+g)^2$ 、 $4gm/(g+m)^2$ を 1 とみなす近似をすると、第 3 境界での反射振幅は $\{(m-n)/(m+n)\} \exp(\varphi + \theta)$ と近似される。ここまで説明したものはいずれも 1 回の反射で外部へ出て行くものである。

【0052】

その他にも上層での多重反射、下層での多重反射があるが、1 回反射の和が 0 であれば、多重反射の和も 0 である。だから第 1 境界での反射 E、第 2 境界での反射 F、第 3 境界での反射 S の和が 0 という条件を課すことにする。それは

【0053】

$$\begin{aligned} & (h-g)/(h+g) + \{2h/(h+g)\} \{(g-m)/(g+m)\} \{2g/(h+g)\} \exp(2jk'f) + \{2h/(h+g)\} \{(2g/(g+m))\} \{(m-n)/(m+n)\} \{2m/(g+m)\} \{2g/(h+g)\} \exp(2jk'd) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

【0054】

という式になる。これは自由度が先ほどのものより増えており、厚み f 、 d が自由パラメータとなる。これは厳密式であるが複雑で直観性に欠けるので先ほどの $4hg/(h+g)^2$ 、 $4gm/(g+m)^2$ を 1 とみなす近似をし、 $\varphi = 2k'f$ 、 $\theta = 2kd$ とすると、

【0055】

$$(h-g)/(h+g) + \{(g-m)/(g+m)\} \exp(\varphi) + \{(m-n)/(m+n)\} \exp(\varphi + \theta) = 0 \quad (10)$$

【0056】

となる。3 つの項は負の係数であるがそれでは表現しにくいので－をつけて正の値にして、図 16、図 17 に複素数として表している。1 項目を OE で、2 項目を OF で、3 項目を OS で表現している。図 16 は分かりやすく係数が全て等しくて位相角 θ 、 φ が 120 度 ($2\pi/3$) である例を図示している。これは理解を容易にするための架空の解である。それは

【0057】

$$\text{上層屈折率 } g \quad g = h^{2/3} n^{1/3} \quad (11)$$

$$\text{下層屈折率 } m \quad m = h^{1/3} n^{2/3} \quad (12)$$

【0058】

という屈折率の解をもつ。厚みは

【0059】

$$\text{上層厚み } f \quad f = \lambda/6 \quad g = \lambda h^{-2/3} n^{-1/3} / 6 \quad (13)$$

$$\text{下層厚み } d \quad d = \lambda/6 \quad m = \lambda h^{-1/3} n^{-2/3} / 6 \quad (14)$$

【0060】

ということである。 f 、 d とともに 6 分の 1 波長の実効厚みをもつことになる。

しかし (11)、(12) のような都合の良い屈折率の材料はなかなか存在しないものである。たとえば $h = 1.46$ (樹脂)、 $n = 3.3$ (InP) とすると、

【0061】

$$\text{上層屈折率 } g \quad g = 1.91 \quad (15)$$

$$\text{下層屈折率 } m \quad m = 2.50 \quad (16)$$

となる。これは机上の空論、架空の解である。そのような屈折率の材料がないからである。であるが、図 16 の複素数ダイアグラムを使って理解しやすい典型解であるのではじめに説明した。

【0062】

より一般的には図 17 のように成れば良いのである。OE が (16) の 1 項に当たり、第 1 境界での反射で $(-h+g)/(h+g)$ の大きさをもつ。OF が (16) の 2 項に当たり、第 2 境界での反射での大きさもち、位相角 θ は $4\pi gf/\lambda$ である。OS が (16) の 3 項に当たり、第 3 境界での反射で $(-m+n)/(m+n)$ の大きさをもつ。3 つの振幅 $(-h+g)/(h+g)$ 、 $(-g+m)/(g+m)$ 、 $(-m+n)/(m+n)$

10

20

30

40

50

+ n) の大小関係は h、g、m、n の値によってさまざまである。ここでは第 1 項を大きく書いているが実際には、2 項、3 項の方が大きいこともある。第 3 境界反射光の位相角は $\theta + \varphi$ で、 $\varphi = 4\pi m d / \lambda$ である。位相も含めてこれら 3 項の合計が 0 であればよいのだから、係数自体が全て等しくなくて良いのである。図 17 に示すように

【0063】

$$OF + OS = OW = -OE \quad (17)$$

【0064】

であればよいのである。W は基礎円 U の 180 度の点である。そのようになるにはどうすればよいのか？ というと、 φ 、 θ は自由変数だから、

【0065】

$$|OF| + |OS| = |OE| \quad (18)$$

【0066】

であればよいのである。 $|OF|$ と $|OS|$ の和に下限がある。 $|OF|$ 、 $|OS|$ に上限は存在しない。無限大であってもよい。その場合、 θ は $\pi/4$ に、 φ は π に収束する。下限を与える (18) 式は

【0067】

$$(-g+m)/(g+m) + (-m+n)/(m+n) = (-h+g)/(h+g) \quad (19)$$

【0068】

というように書くことができる。それは h (樹脂屈折率)、n (半導体屈折率) を既知として、上層、下層の屈折率 g、m に制限を与えるものである。

【0069】

$$-3mg^2 - ng^2 + hm^2 - gm^2 - mgh + ngh + 3mnh + mng = 0 \quad (20)$$

【0070】

ということである。パラメータが 4 つあるのでそれぞれに対する条件となっている。h、n を既知として、g、m に限定を与えるが、g、m も材料を決めるときまるのであるから、これは反射損失を 0 にできるかどうかの判別式と考えることもできる。甲型と乙型について具体的に計算をしてみよう。

【0071】

(乙型) たとえば、 $h = 1.46$ 、 $g = 1.80$ 、 $m = 2.32$ 、 $n = 3.31$ とすると

$$|OE| = (-h+g)/(h+g) = 0.104 \quad (21)$$

$$|OF| = (-g+m)/(g+m) = 0.126 \quad (22)$$

$$|OS| = (-m+n)/(m+n) = 0.175 \quad (23)$$

となるが、これは (24) 式 $|OF| + |OS| = |OE|$ を満足する。

【0072】

(甲型) あるいは、 $h = 1.46$ 、 $g = 2.32$ 、 $m = 1.80$ 、 $n = 3.31$ とすると

$$|OE| = (-h+g)/(h+g) = 0.228 \quad (24)$$

$$|OF| = -(-g+m)/(g+m) = 0.126 \quad (25)$$

$$|OS| = (-m+n)/(m+n) = 0.295 \quad (26)$$

となるが、これは (18) 式 $|OF| + |OS| = |OE|$ を満足する。 $g > m$ であるから $|OF|$ の式に負号がつく。

【0073】

(19)、(20) が 4 つの層の屈折率 h、g、m、n の選択が反射を完全に 0 にできるかどうかを判定する式であることがわかった。樹脂が 1.46、InP が 3.31 の屈折率を持つ場合、SiON (1.80) と TiO_2 (2.32) は、乙型 (屈折率が昇順：SiON が上層、 TiO_2 が下層) でくみあわせても、甲型 (屈折率順が途中反転：T

10

20

30

40

50

i O₂ が上層、S i O N が下層) でくみあわせても、反射を完全に 0 とすることができる。

【 0 0 7 4 】

屈折率が決まるから、反射損失が 0 という条件で位相角 θ 、 φ も一義的に決まる。乙型の場合と甲型の場合で位相角が異なる。

【 0 0 7 5 】

[甲型の場合 (樹脂 : T i O₂ : S i O N : I n P) の設計]

甲型の場合屈折率が一部反転してあるから、図 1 8 に示すように、 $\theta + \varphi$ が π を越えないようになる。つまり膜厚をより薄くできるということである。甲型の場合、上から順に樹脂 ; T i O₂ ; S i O N ; I n P というように並ぶということで図 2 0 のような層構造となる。屈折率の順は、1 . 4 6、2 . 3 2、1 . 8 0、3 . 3 1 ということである。図 1 9 から、

【 0 0 7 6 】

$$| O E | - | O F | \cos \theta + | O S | \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (2 7)$$

$$- | O F | \sin \theta + | O S | \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (2 8)$$

【 0 0 7 7 】

となる。 $| O F |$ に負号がついていることに注意すべきである。上層 ($g, f : T i O_2$) のほうが下層 ($m, d : S i O N$) より屈折率が高い ($g > m$) ので $(g - m) / (g + m)$ が負にならず正になる。それは θ の位相を 180° 進めたのと同じような作用がある。だから上のような式となるのである。 180° 位相を進めるので全体としての膜厚を減らすことができる。

【 0 0 7 8 】

甲 1 . [甲型の場合 (樹脂 : T i O₂ : S i O N : I n P) の近似解]

甲型の場合、近似値は (2 4) ~ (2 6) で、

$| O E | = 0 . 2 2 8$ 、 $| O F | = 0 . 1 2 6$ 、 $| O S | = 0 . 2 9 5$ であることが分かっているので、

【 0 0 7 9 】

$$0 . 2 2 8 - 0 . 1 2 6 \cos \theta + 0 . 2 9 5 \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (2 9)$$

$$- 0 . 1 2 6 \sin \theta + 0 . 2 9 5 \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (3 0)$$

【 0 0 8 0 】

となる。これらの式から

【 0 0 8 1 】

$$\theta = 109^\circ = 1 . 902 \quad (3 1)$$

$$\varphi = 47^\circ = 0 . 82 \quad (3 2)$$

【 0 0 8 2 】

と計算される。これは甲型の場合 (図 2 0) である。 $\theta + \varphi = 156^\circ$ であって、 180° を越えない。角度 θ 、 φ が決まると、上層 ($T i O_2$) の厚み f 、下層 ($S i O N$) の厚み d が決定される。

【 0 0 8 3 】

$$4 \pi g f / \lambda = 1 . 902 \quad (3 3)$$

$$4 \pi m d / \lambda = 0 . 82 \quad (3 4)$$

【 0 0 8 4 】

$g = 2 . 32$ 、 $m = 1 . 80$ であるから、

【 0 0 8 5 】

$$f / \lambda = 0 . 065 \quad (3 5)$$

$$d / \lambda = 0 . 036 \quad (3 6)$$

【 0 0 8 6 】

となる。これは上層の厚み / 波長の比が $0 . 065$ であり、下層の厚み / 波長比が $0 . 036$ だということである。どのような波長 λ でも反射光を 0 にする厚みを求めることができる。反対に波長 λ を決めなければ厚みが決まらない。例えば $\lambda = 1550 \text{ nm}$ とすれば

、上層厚み f , 下層厚み d は

【 0 0 8 7 】

$$f = 100 \text{ nm} \quad (37)$$

$$d = 56 \text{ nm} \quad (38)$$

【 0 0 8 8 】

というようになる。これは乙型 (図 19) の場合で InP の上に SiON (56 nm)、その上に TiO_2 (100 nm)、その上に樹脂があるという構造となっている。

【 0 0 8 9 】

甲 2 . [甲型 (樹脂 : TiO_2 : SiON : InP) の厳密解]

甲型に関する上の計算は、近似的な計算である。境界層における減衰を無視し透過率を 1 とみなす近似をしている。より厳密には境界層での透過減衰も考慮する必要がある。第 1 境界での透過減衰は $4hg / (h + g)^2 = 0.9482$ であり、第 2 境界での透過減衰は $4mg / (g + m)^2 = 0.9126$ となる。屈折率の順が逆転しているので透過減衰は乙型より大きくなる。甲型の場合、近似値を与える (24) ~ (26) のかわりに

【 0 0 9 0 】

$$|OE| = 0.228 \quad (39)$$

$$|OF| = 0.126 \times 0.9482 = 0.119 \quad (40)$$

$$|OS| = 0.295 \times 0.9482 \times 0.9126 = 0.255 \quad (41)$$

【 0 0 9 1 】

が厳密な値である。これを用いると前述の (27)、(28) 式は

【 0 0 9 2 】

$$0.228 - 0.119 \cos \theta + 0.255 \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (42)$$

$$-0.119 \sin \theta + 0.255 \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (43)$$

【 0 0 9 3 】

となる。これらの式から

【 0 0 9 4 】

$$\theta = 88.8^\circ = 1.550 \quad (44)$$

$$\varphi = 63.4^\circ = 1.106 \quad (45)$$

【 0 0 9 5 】

と計算される。これは甲型の場合 (図 21) である。図 23 に比率を正しく表現した複素平面での大きさをしめす。 $\theta + \varphi = 152^\circ$ であって 180° に満たない。図 23 に比率を正しく表現した複素平面での大きさをしめす。つまり膜厚が薄くなる。それは甲型の特長である。角度 θ 、 φ がきまると、上層 (TiO_2) の厚み g , 下層 (SiON) の厚み d が決定される。

【 0 0 9 6 】

$$4\pi g f / \lambda = 1.550 \quad (46)$$

$$4\pi m d / \lambda = 1.106 \quad (47)$$

【 0 0 9 7 】

$g = 2.32$ (TiO_2)、 $m = 1.80$ (SiON) であるから、最適厳密解が

【 0 0 9 8 】

$$f / \lambda = 0.053 \quad (48)$$

$$d / \lambda = 0.049 \quad (49)$$

【 0 0 9 9 】

となる。これは上層 (TiO_2) の厚み / 波長の比が 0.053 であり、下層 (SiON) の厚み / 波長比が 0.049 だということである。甲型においてもどのような波長 λ でも反射光を 0 にする厚みを求めることができる。反対に波長 λ を決めなければ厚みが決まらない。例えば $\lambda = 1550 \text{ nm}$ とすれば、上層厚み f , 下層厚み d の最適厳密解は

【 0 1 0 0 】

$$f = 82 \text{ nm} \text{ (上層 : } \text{TiO}_2 \text{)} \quad (50)$$

$$d = 76 \text{ nm} \text{ (下層 : } \text{SiON} \text{)} \quad (51)$$

【0101】

というようになる。これは甲型（図20）の場合でInPの上にSiON（76nm）、その上にTiO₂（82nm）、その上に樹脂（h = 1.46）があるという構造となっている。これは厳密解である。先ほどの近似解とは違う。

【0102】

実際の製造の際はやむをえない製造誤差もあるので、厳密解と先ほどの近似解の差を厳密解の両側に配分した領域にいれるようにすればよい。そうすればほぼ100%に近い無反射の反射防止膜を実現できる。

100%無反射に近い条件

【0103】

$$\begin{aligned} \text{(甲型)} \quad f / \lambda (\text{TiO}_2) &= 0.041 \sim 0.065 & (52) \\ d / \lambda (\text{SiON}) &= 0.036 \sim 0.062 & (53) \end{aligned}$$

【0104】

特にλ = 1550nmの場合では、厚みの100%無反射に近い条件

【0105】

$$\begin{aligned} f (\text{TiO}_2) &= 64 \sim 100 \text{ nm} & (54) \\ d (\text{SiON}) &= 56 \sim 96 \text{ nm} \end{aligned}$$

(55)

【0106】

甲3. [甲型（樹脂：TiO₂：SiON：InP）の樹脂屈折率を変えた場合]

全て材料が全部一義的に決まっているわけではない。SiON、TiO₂、InPは決まっているが、樹脂はさまざまである。透明の樹脂といっても屈折率が1.46以外の樹脂も存在する。本発明はそのような樹脂にも適用できる。乙型の場合と同様に、樹脂の屈折率は1.2から1.6に限定する。

【0107】

$$1.2 \leq h \leq 1.6 \quad (56)$$

【0108】

の透明樹脂を想定するということである。その場合にも、hが分かればf/λ、d/λを計算でき、λを決めるとf、dを計算することができる。ここではhが未知のパラメータとして計算をする。- (h - g) / (h + g) = sとおくことにする。g = 2.32 (TiO₂)、h = 1.46であればsは0.228であったが、hが未知であるから、sは決まらない。h → 1.2の極限でs → 0.3182となり、h → 1.6の極限でs → 0.184となる。だからsの範囲は

【0109】

$$0.184 \leq s \leq 0.318 \quad (57)$$

【0110】

である。透過減衰もわからないのであるが、厳密式の第2項以下は以前の透過減衰を採用して式は

【0111】

$$\begin{aligned} s - 0.119 \cos \theta + 0.255 \cos (\theta + \varphi) &= 0 & (58) \\ -0.119 \sin \theta + 0.255 \sin (\theta + \varphi) &= 0 & (59) \end{aligned}$$

【0112】

となる。この形からsが0.136以下で解がないことは明白である。

【0113】

$$\cos \theta = (0.0509 - s^2) / 0.238s \quad (60)$$

【0114】

である。θが求まるので

【0115】

$$\sin (\theta + \varphi) = +0.467 \sin \theta \quad (61)$$

【0116】

10

20

30

40

50

から $\theta + \varphi$ が計算され、 φ がわかる。例えば

【0 1 1 7】

(1) $h = 1.2$ ($s = 0.318$) では

$\theta = 131^\circ$ 、 $\varphi = 28^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.078$ 、 $d/\lambda = 0.022$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 121 \text{ nm}$ 、 $d = 34 \text{ nm}$

【0 1 1 8】

(2) $h = 1.3$ ($s = 0.282$) では

$\theta = 115^\circ$ 、 $\varphi = 40^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.069$ 、 $d/\lambda = 0.031$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 107 \text{ nm}$ 、 $d = 48 \text{ nm}$

【0 1 1 9】

(3) $h = 1.4$ ($s = 0.247$) では

$\theta = 100^\circ$ 、 $\varphi = 53^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.060$ 、 $d/\lambda = 0.041$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 93 \text{ nm}$ 、 $d = 64 \text{ nm}$

【0 1 2 0】

(4) $h = 1.5$ ($s = 0.215$) では

$\theta = 85^\circ$ 、 $\varphi = 68^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.051$ 、 $d/\lambda = 0.052$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 79 \text{ nm}$ 、 $d = 81 \text{ nm}$

【0 1 2 1】

(5) $h = 1.6$ ($s = 0.184$) では

$\theta = 67^\circ$ 、 $\varphi = 87^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.040$ 、 $d/\lambda = 0.067$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 62 \text{ nm}$ 、 $d = 104 \text{ nm}$

となる。これで 1.2 ~ 1.6 での厳密解がいくつかわかった。 h がわかれば厳密解はすぐに計算できる。

【0 1 2 2】

(1)	$h = 1.2$ ($s = 0.318$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 121 \text{ nm}$ 、 $d = 34 \text{ nm}$
(2)	$h = 1.3$ ($s = 0.282$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 107 \text{ nm}$ 、 $d = 48 \text{ nm}$
(3)	$h = 1.4$ ($s = 0.247$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 93 \text{ nm}$ 、 $d = 64 \text{ nm}$
(4)	$h = 1.5$ ($s = 0.215$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 79 \text{ nm}$ 、 $d = 81 \text{ nm}$
(5)	$h = 1.6$ ($s = 0.184$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 62 \text{ nm}$ 、 $d = 104 \text{ nm}$

【0 1 2 3】

範囲外についても計算しよう。範囲外の 1.1 と 1.7 の h について考える。

(6) $h = 1.1$ ($s = 0.356$) では

$\theta = 154^\circ$ 、 $\varphi = 15^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.092$ 、 $d/\lambda = 0.011$

$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 143 \text{ nm}$ 、 $d = 17 \text{ nm}$

SiON の厚み d が薄すぎて意味がない。

【0 1 2 4】

(7) $h = 1.7$ ($s = 0.1542$) では、 s が小さすぎて解がない。

【0 1 2 5】

これらの結果から完全無反射という条件を入れて、甲型 (樹脂 / TiO_2 / SiON / InP の組み合わせ) の場合、 $h = 1.2 \sim 1.6$ で、

【0 1 2 6】

$\theta = 131^\circ \sim 67^\circ$ 、

10

20

30

40

50

$\varphi = 28^\circ \sim 87^\circ$ 、
 $f / \lambda = 0.078 \sim 0.040$ (TiO_2)
 $d / \lambda = 0.022 \sim 0.067$ (SiON)
 【 0 1 2 7 】

であり、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の場合は、

【 0 1 2 8 】
 $f = 121 \text{ nm} \sim 62 \text{ nm}$ (TiO_2)
 $d = 34 \text{ nm} \sim 104 \text{ nm}$ (SiON)
 であることがわかる。

【 0 1 2 9 】

[乙型の場合 (樹脂 : SiON : TiO_2 : InP) の設計]

乙型の場合屈折率が昇順であるから、図 17 に示すように、 $\theta + \varphi$ がかならず π を越える。つまり膜厚がより厚くなる。屈折率が昇順ということは、上から順に樹脂 ; SiON ; TiO_2 ; InP というように並ぶということで図 19 のような層構造となる。屈折率の順は、1.46、1.80、2.32、3.3 ということである。図 17 から、

【 0 1 3 0 】

$$|OE| + |OF| \cos \theta + |OS| \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (62)$$

$$|OF| \sin \theta + |OS| \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (63)$$

【 0 1 3 1 】

となる。ここから θ 、 φ を計算できる。

【 0 1 3 2 】

乙 1 . [乙型 (樹脂 : SiON : TiO_2 : InP) の近似解]

乙型の場合、近似値を与える (21) ~ (23) で、 $|OE| = 0.104$ 、 $|OF| = 0.126$ 、 $|OS| = 0.175$ であることが分かっているので、

【 0 1 3 3 】

$$0.104 + 0.126 \cos \theta + 0.175 \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (64)$$

$$0.126 \sin \theta + 0.175 \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (65)$$

【 0 1 3 4 】

となる。これらの式から

【 0 1 3 5 】

$$\theta = 81.3^\circ = 1.419 \quad (66)$$

$$\varphi = 144.1^\circ = 2.515 \quad (67)$$

【 0 1 3 6 】

と計算される。これは乙型の場合 (図 20) である。 $\theta + \varphi = 225^\circ$ であって 180° を越える。つまり膜厚が大きくなる。角度 θ 、 φ がきまると、上層 (SiON) の厚み g 、下層 (TiO_2) の厚み d が決定される。

【 0 1 3 7 】

$$4\pi g f / \lambda = 1.419 \quad (68)$$

$$4\pi m d / \lambda = 2.515 \quad (69)$$

【 0 1 3 8 】

$g = 1.80$ 、 $m = 2.32$ であるから、

【 0 1 3 9 】

$$f / \lambda = 0.0627 \quad (70)$$

$$d / \lambda = 0.0862 \quad (71)$$

【 0 1 4 0 】

となる。これは上層の厚み / 波長の比が 0.0627 であり、下層の厚み / 波長比が 0.0862 だということである。どのような波長 λ でも反射光を 0 にする厚みをもとめることができる。反対に波長 λ を決めなければ厚みが決まらない。例えば $\lambda = 1550 \text{ nm}$ とすれば、上層厚み f 、下層厚み d は

【 0 1 4 1 】

10

20

30

40

50

$$f = 97 \text{ nm} \quad (72)$$

$$d = 134 \text{ nm} \quad (73)$$

【0142】

というようになる。これは乙型（図20）の場合でInPの上にTiO₂（134nm）、その上にSiON（97nm）、その上に樹脂があるという構造となっている。

【0143】

乙2．[乙型（樹脂：SiON：TiO₂：InP）の厳密解]

上の計算は、近似的な計算である。境界層における減衰を無視し透過率を1とみなす近似をしている。より厳密には境界層での透過減衰も考慮する必要がある。第1境界での透過減衰は $4hg / (h + g)^2 = 0.9891$ であり、第2境界での透過減衰は $4mg / (g + m)^2 = 0.9841$ となる。屈折率が昇順で滑らかに変化しているので透過減衰が僅かなのである。乙型の場合、近似値を与える（21）～（23）のかわりに

【0144】

$$|OE| = 0.104, \quad (74)$$

$$|OF| = 0.126 \times 0.9891 = 0.124 \quad (75)$$

$$|OS| = 0.175 \times 0.9891 \times 0.9841 = 0.170 \quad (76)$$

【0145】

が厳密な値である。これを用いると前述の（27）、（28）式は

【0146】

$$0.104 + 0.124 \cos \theta + 0.170 \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (77) \quad 20$$

$$0.124 \sin \theta + 0.170 \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (78)$$

【0147】

となる。これらの式から

【0148】

$$\theta = 84.0^\circ = 1.465 \quad (79)$$

$$\varphi = 142.6^\circ = 2.489 \quad (80)$$

【0149】

と計算される。これは乙型の場合（図19）である。図21に正確な比率を表している。 $\theta + \varphi = 226.6^\circ$ であって 180° を越える。つまり膜厚が大きくなる。角度 θ 、 φ がきまると、上層（SiON）の厚み g 、下層（TiO₂）の厚み d が決定される。

【0150】

$$4\pi gf / \lambda = 1.465 \quad (81)$$

$$4\pi md / \lambda = 2.489 \quad (82)$$

このような計算が以後なんどもでるが、ラジアンになおさず角度で計算するばあいは、 4π を720度として計算すれば良い。 $g = 1.80$ 、 $m = 2.32$ であるから、最適厳密解が

【0151】

$$f / \lambda = 0.0648 \quad (83)$$

$$d / \lambda = 0.0853 \quad (84)$$

【0152】

となる。これは上層の厚み／波長の比が0.0648であり、下層の厚み／波長比が0.0853だということである。どのような波長 λ でも反射光を0にする厚みをもとめることができる。反対に波長 λ をきめなければ厚みが決まらない。例えば $\lambda = 1550 \text{ nm}$ とすれば、上層厚み f 、下層厚み d の最適厳密解は

【0153】

$$f = 100 \text{ nm} \quad (85)$$

$$d = 132 \text{ nm} \quad (86)$$

【0154】

というようになる。これは乙型（図19）の場合でInPの上にTiO₂（132nm）、その上にSiON（100nm）、その上に樹脂があるという構造となっている。これ

は厳密解である。先ほどの近似解とは違う。

【 0 1 5 5 】

実際の製造の際はやむをえない製造誤差もあるので、厳密解と先ほどの近似解の差を厳密解の両側に配分した領域に入れるようにすればよい。そうなればほぼ 1 0 0 % に近い無反射の反射防止膜を実現できる。1 0 0 % 無反射に近い条件は

【 0 1 5 6 】

$$f / \lambda = 0 . 0 6 2 7 \sim 0 . 0 6 6 9 \quad (8 7)$$

$$d / \lambda = 0 . 0 8 4 3 \sim 0 . 0 8 6 2 \quad (8 8)$$

【 0 1 5 7 】

特に、光の波長が $\lambda = 1 5 5 0 \text{ nm}$ の場合。厚みの 1 0 0 % 無反射に近い条件は以下のようになる。 10

【 0 1 5 8 】

$$f = 9 7 \sim 1 0 3 \text{ nm} \quad (8 9)$$

$$d = 1 3 0 \sim 1 3 4 \text{ nm} \quad (9 0)$$

【 0 1 5 9 】

乙 3 . [乙型 (樹脂 : SiON : TiO_2 : InP) の樹脂屈折率を変えた場合]

全て材料が全部一義的に決まっているわけではない。 SiON 、 TiO_2 、 InP は決まっている。が、樹脂はさまざまである。透明の樹脂といっても屈折率が 1 . 4 6 以外の樹脂も存在する。本発明はそのような樹脂にも適用できる。屈折率が 1 . 8 0 の樹脂は存在するかもしれないが、 SiON の屈折率 1 . 8 0 と一致するから、 SiON を反射防止膜とすることに意味がなくなる。1 . 8 0 を越える屈折率の樹脂も存在するが、それより屈折率の小さい SiON は反射防止膜にならない。だから本発明の適用できる樹脂は屈折率が 1 . 8 0 未満である。 20

【 0 1 6 0 】

また屈折率が 1 の樹脂だとこれまでの気体封止 (真空、窒素) のものと変わらないので本発明が適用される余地がない。ということは屈折率 h が $1 < h < 1 . 8$ というのが前提となる。 h が 1 に近いとこれまでの SiN 単層を使えばよいし、 h が 1 . 8 に近いと SiON の使用は適切でない。

【 0 1 6 1 】

であるから要求される h の範囲としては 1 . 4 を中心として $h = 1 . 2 \sim 1 . 6$ 程度と考えられる。 30

【 0 1 6 2 】

$$1 . 2 \quad h \quad 1 . 6 \quad (9 1)$$

【 0 1 6 3 】

の透明樹脂を想定するということである。その場合にも、 h が分かれば f / λ 、 d / λ を計算でき、 λ を決めると f 、 d を計算することができる。ここでは h が未知のパラメータとして計算をする。- $(h - g) / (h + g) = s$ とおくことにする。 $g = 1 . 8 0$ 、 $h = 1 . 4 6$ であれば s は 0 . 1 0 4 であつたが、 h が未知であるから、 s は決まらない。 $h \rightarrow 1 . 2$ の極限で $s \rightarrow 0 . 2$ となり、 $h \rightarrow 1 . 6$ の極限で $s \rightarrow 0 . 0 5 8 8$ となる。だから s の範囲は 40

【 0 1 6 4 】

$$0 . 0 5 8 8 \quad s \quad 0 . 2 \quad (9 2)$$

【 0 1 6 5 】

である。透過減衰もわからないのであるが、厳密式の第 2 項以下は以前の透過減衰を採用して式は

【 0 1 6 6 】

$$s + 0 . 1 2 4 \cos \theta + 0 . 1 7 0 \cos (\theta + \varphi) = 0 \quad (9 3)$$

$$0 . 1 2 4 \sin \theta + 0 . 1 7 0 \sin (\theta + \varphi) = 0 \quad (9 4)$$

【 0 1 6 7 】

となる。この形から s が 0 . 0 4 6 以下で解がないことは明白である。 50

【0168】

$$\cos \theta = (0.0135 - s^2) / 0.248s \quad (95)$$

【0169】

である。 θ が求まるので

【0170】

$$\sin(\theta + \varphi) = -0.729 \sin \theta \quad (96)$$

【0171】

から $\theta + \varphi$ が計算され、 φ がわかる。例えば

【0172】

(1) $h = 1.2$ ($s = 0.20$) では $\theta = 122^\circ$ 、 $\varphi = 96^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.094$ 、 $d/\lambda = 0.0575$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 149 \text{ nm}$ 、 $d = 89 \text{ nm}$

【0173】

(2) $h = 1.3$ ($s = 0.1613$) では $\theta = 108^\circ$ 、 $\varphi = 116^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.083$ 、 $d/\lambda = 0.069$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 128 \text{ nm}$ 、 $d = 108 \text{ nm}$

【0174】

(3) $h = 1.4$ ($s = 0.125$) では $\theta = 93.9^\circ$ 、 $\varphi = 132^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.072$ 、 $d/\lambda = 0.079$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 112 \text{ nm}$ 、 $d = 122 \text{ nm}$

【0175】

(4) $h = 1.5$ ($s = 0.091$) では $\theta = 76.6^\circ$ 、 $\varphi = 148.5^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.059$ 、 $d/\lambda = 0.089$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 91 \text{ nm}$ 、 $d = 138 \text{ nm}$ (5) $h = 1.6$ ($s = 0.0588$) では $\theta = 46.5^\circ$ 、 $\varphi = 165^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.036$ 、 $d/\lambda = 0.098$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 56 \text{ nm}$ 、 $d = 153 \text{ nm}$

【0176】

(1)	$h = 1.2$ ($s = 0.20$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 149 \text{ nm}$ 、 $d = 89 \text{ nm}$
(2)	$h = 1.3$ ($s = 0.1613$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 128 \text{ nm}$ 、 $d = 108 \text{ nm}$
(3)	$h = 1.4$ ($s = 0.125$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 112 \text{ nm}$ 、 $d = 122 \text{ nm}$
(4)	$h = 1.5$ ($s = 0.091$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 91 \text{ nm}$ 、 $d = 138 \text{ nm}$
(5)	$h = 1.6$ ($s = 0.0588$)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 56 \text{ nm}$ 、 $d = 153 \text{ nm}$

【0177】

となる。これで $1.2 \sim 1.6$ での厳密解がいくつかわかった。 h がわかれば厳密解はすぐに計算できる。

範囲外についても計算しよう。範囲外の 1.1 と 1.7 の h について考える。

【0178】

(6) $h = 1.1$ ($s = 0.241$) では $\theta = 138^\circ$ 、 $\varphi = 71^\circ$ 、 $f/\lambda = 0.106$ 、 $d/\lambda = 0.043$ 特に $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の時 $f = 329 \text{ nm}$ 、 $d = 132 \text{ nm}$

【0179】

(7) $h = 1.7$ ($s = 0.0286$) では、 s が小さすぎて解がない。

10

20

30

40

50

【0180】

これらの結果から完全無反射という条件をいれて、乙型（樹脂 / SiON / TiO₂ / InP の組み合わせ）の場合、 $h = 1.2 \sim 1.6$ で、

【0181】

$$\theta = 122^\circ \sim 46.5^\circ、$$

$$\varphi = 96^\circ \sim 165^\circ、$$

$$f / \lambda (\text{SiON}) = 0.094 \sim 0.036、$$

$$d / \lambda (\text{TiO}_2) = 0.057 \sim 0.094$$

【0182】

であり、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ の場合は、

【0183】

$$f = 145 \text{ nm} \sim 55 \text{ nm}、$$

$$d = 89 \text{ nm} \sim 153 \text{ nm}$$

であることがわかる。

【発明の効果】

【0184】

これまで外界が空気（窒素）である場合の反射防止膜はよく知られていた。SiN、SiO₂ などの $\lambda / 4$ 膜である。

【0185】

表面実装型のモジュールは低コストであるからこれからの展開が期待され有望である。表面実装モジュールは、Siベンチの上に水平導波路を設け水平導波路の端にPDやLDを設け導波路の反対側に光ファイバを取り付けるものである。その場合PDの外界が、屈折率が1の物質（空気、窒素、Ar、真空など）ではなく、屈折率が1より大きい樹脂である。これまでのSiNなどの $\lambda / 4$ 膜が樹脂環境でも使えると思われてきた。

【0186】

反射防止膜が4分の一波長（ $\lambda / 4$ ）の厚みを持つものだ、という条件だけだと、外界の環境が真空であっても、樹脂であっても波長 λ は不変だから材料と厚みは同じでよいと漠然と考えられていたのであろう。だから表面実装モジュールの提案は多々あるが受光素子の反射防止膜は従来通りSiO₂、SiN、SiONの $\lambda / 4$ の単層膜が用いられてきた。

【0187】

本発明者はそうでないと思う。そうではなくて樹脂を伝搬してきた光を反射しないような特別の反射防止膜がPDの入射部に必要であると考えた。反射防止膜といえば $\lambda / 4$ と合点するが、反射防止膜にはもう一つの条件が必要である。それは簡単には表現できないが、これまでの説明でわかるように、ある近似のもとで、中間層の屈折率が、外界屈折率と半導体屈折率の積の平方根に等しくあるべきだというものである。樹脂包囲の受光素子の場合それを考慮しなければならない。

【0188】

本発明の樹脂で覆われたInP系受光素子の反射防止膜は、SiONとTiO₂の2層からなる。InPに接触する下層（第1層）を、SiONとし、樹脂に接触する上層（第2層）をTiO₂とすることができる（甲型）。あるいはその反対でInPに接触する下層（第1層）をTiO₂とし、樹脂に接触する上層（第2層）をSiONとすることもできる（乙型）。光学的な性質（屈折率）が適当な範囲にあるので、膜厚を適切に選ぶことによって反射を完全に0に下げることができる。完全に0にしなくてもよい場合もあるがその場合でも膜厚選択の自由度が高いという利点がある。理論的に反射を完全に0にできるの組み合わせであって、これ以外のものが見いだされていないのであるから、膜厚の公差（許容誤差）が大きくなる。だから反射防止膜の製造が容易になる。

【0189】

何れにしても、一方の層は、従来から広く使用されているPCVD法によるSiON膜を用いるので、表面再結合を抑制し、受光素子性能の指標である暗電流を低減することが

10

20

30

40

50

できる。電子ビーム蒸着（イオンアシスト電子ビーム蒸着）による TiO_2 層をもう一方の反射防止膜として被覆する。これが好適な屈折率を持っているので樹脂封止型の受光素子であっても高い反射率の反射防止膜とすることができる。甲型の場合は、下層（第1層）の $SiON$ は、 TiO_2 層電子ビーム蒸着で形成した場合に InP 結晶の表面が直接に損傷を受けるのを防ぐ作用もある。

【0190】

本発明は、従来から用いられる $SiON$ 膜と適当な屈折率と堅牢さをもつ TiO_2 層を重ねて反射防止膜を形成するようにし樹脂によって囲まれた受光素子に最適の反射防止膜を与えることができる。

【実施例1】

【0191】

[実施例1（甲型：樹脂/ TiO_2 / $SiON$ / InP ：上面入射型：図1～図7）]

図1～図7によって本発明の甲型に掛かる受光素子の製造工程の一例を述べる。図1は $n-InP$ 基板の上にエピ層を成長させたエピタキシャルウエハの素子1単位に相当する部分の断面を示す。 $n-InP$ 基板2の上に、 $n-InP$ バッファ層3、 $n-InGaAs$ 受光層（光吸収層）4、 $n-InP$ 窓層5がエピタキシャル成長によって形成されている。その状態のものをエピウエハという。

【0192】

図2は $n-InP$ 窓層5の上に SiN 膜6をCVD、スパッタリングなどで形成し、フォトリソグラフィによって中央の SiN 膜を除去し中央に開口部を開けた状態を示す。 SiN 膜6を選択マスクとして亜鉛を上方から熱拡散すると開口部から Zn が入り $n-InGaAs$ 受光層の半ばまで伸びる p 領域7ができる。 pn 接合20が $n-InGaAs$ 受光層4の中間にできる。受光層の中央部は $p-InGaAs$ 受光層7aとなり、窓層の中央部は $p-InP$ 窓層7bとなる。その両方を合わせ p 領域7と表現している。熱によって亜鉛を InP 、 $InGaAs$ 層へ拡散させるから pn 接合20はマスクの下側まで回り込み pn 接合の端22は SiN 膜6によって保護される。

【0193】

その上に $SiON$ 反射防止膜（第1層）8をPCVD（プラズマCVD）で形成する。これは光通信領域の波長 λ に対し屈折率が $n=1.80$ である。厚みは $d=60.46\mu m$ である。図3にその様子を示す。素子の周辺部では下から $n-InP$ 基板2、 $n-InP$ バッファ層3、 $n-InGaAs$ 受光層4、 $n-InP$ 窓層5、 SiN 膜6、 $SiON$ 膜8となっている。素子の中央部では $n-InP$ 基板2、 $n-InP$ バッファ層3、 $n-InGaAs$ 受光層4、 pn 接合20、 $p-InGaAs$ 受光層7a、 $p-InP$ 窓層7b、 $SiON$ 膜8となっている。

【0194】

$SiON$ 膜8は反射防止膜の第1層であって、さらにその上に第2層である TiO_2 膜9を電子ビーム蒸着（EB）によって形成する。融点の高い酸化物であるからWボートを使った抵抗加熱蒸着では TiO_2 膜9の光通信波長 λ に対する屈折率は $n=2.32$ である。ここでは厚みは $d=94.41nm$ としている。

【0195】

それを図4に示す。 $SiON/TiO_2$ の二重層が反射防止膜を構成する。それは外界が樹脂の場合に適する二重反射防止膜である。外界が空気（屈折率1）の場合は SiN あるいは SiO_2 の単層でよいのであるが、接触するものが樹脂の（屈折率が1より大きい）場合は本発明の二重反射防止膜がいっそう適している。

【0196】

p 電極をつけるための工程が続く。レジスト25を上面に塗布しベーキングする。マスクを使うリソグラフィによってレジスト25の p 電極を設けるべき部分を除去して開口部26を開ける。それが図5に示した状態である。

【0197】

バッファードフッ酸（Buffered HF）によってエッチングする。 TiO_2 層

10

20

30

40

50

9、SiON層8はバッファードフッ酸によって溶けるので、開口部26の部分に、p-InP窓層7bにいたる穴が開く。バッファードフッ酸というのはフッ酸(HF)にフッ化アンモニウム(NH₄F)を加えて作用を軽減した酸である。フッ化アンモニウムの比率を増やすとエッチングレートを遅くすることができる。たとえばHF:NH₄F:H₂O=1:10:30という比率のものを用いることができる。フッ化アンモニウムの比率は自在に加減することができる。フッ化アンモニウムを含まないフッ酸(HF)によっても、TiO₂/SiONを除去することはできる。しかしエッチング速度が速すぎ制御が難しいのでバッファードフッ酸のほうが使いやすい。

【0198】

開口部26にp-InPにオーミック接合するp電極を設ける。p電極になる材料で上面全体を被覆する。それにレジストを塗布してマスクを用いて露光しレジストの一部を残しp電極の材料をエッチングする。マスクで保護されたp-InP窓層7bに接触する部分のp電極27が残る。それが図6に示す状態である。p電極27はこの例ではドット状であるが、リング状(円環状)であることもできる。

10

【0199】

その後n-InP基板2の裏面にn電極30を形成する。図7に示すとおりである。上方のp領域側が入射側となる。光は、樹脂・TiO₂・SiONを通してp-InP窓層に入射する。TiO₂/SiONのため無反射でInP素子に入ってくる。

【実施例2】

【0200】

20

[実施例2(甲型:樹脂/TiO₂/SiON/InP:裏面入射型:図8~図9)]

上に示した実施例は甲型の上面入射型のものである。だから、p電極側に反射防止膜を設けている。反射防止膜は光が入射する側に設けるものであってp電極側とは限らない。

【0201】

裏面入射型の受光素子の場合は、2層のSiON/TiO₂二重反射防止膜をn-InP基板2の裏面に設ける。n電極はその外周にリング状のものを形成する。上面のp領域の全体に広いp電極を設ける。

【0202】

図8はそのような裏面入射型の受光素子の例を示す。n-InP基板2、n-InPバッファ層3、n-InGaAs受光層4、n-InP窓層5をもつエピタキシャル層にマスク6を介して亜鉛を拡散して中央部にp領域7を設ける。p領域7の上全面に広いp電極37を形成する。上面の加工はそれで終わりである。n-InP基板2の下面に、n電極40を全面被覆してリソグラフィによって中央部を選択的に除去する。n電極の除去された中央の開口部に、PCVD法によってSiON膜28を設けさらにイオンアシストEB蒸着でTiO₂膜29を形成する。そしてn電極の上に乗っている部分のSiON、TiO₂を除去する。そうして図9のような裏面入射型のInGaAs受光素子を得る。

30

【0203】

図10にSiON膜、TiO₂膜、TiO₂/SiON膜を反射防止膜として採用した場合の波長λに対する反射率変化のグラフを示す。

40

【0204】

図11はその概略の構成図であり、下層はInP窓層/InGaAs受光層/InPバッファ層/InP基板よりなる半導体Sである。反射防止膜Fがその上に形成され、さらに樹脂Rが上に乗っているというようなRFS構造をもつ。上面入射型の実施例1でも、裏面入射型の実施例2でも同様である。

【0205】

図10において、横軸は光の波長λである。縦軸は反射率(%)である。いずれも1550nmの波長で反射率が最少になるように膜厚が設計されている。

【0206】

50

(1) SiON 215 nm
 (2) TiO₂ 167 nm
 (3) TiO₂ / SiON 94.41 nm / 60.46 nm
 【0207】

そのうち(3)が本発明(甲型)の実施例1、2なのであるが、これは先述の膜厚の範囲に入っている。

【0208】

SiON一層の反射防止膜の場合は、1200 nmで反射率が5.7%あり、1300 nmで4.3%に下がる。しかし1550 nmでも反射率が0にならず3.3%程度である。1650 nmで3.4%である。これがSiON反射防止膜の最少の反射率である。 10

【0209】

TiO₂単層の場合はより小さくて1200 nmで3.4%、1300 nmで1.8%に下がる。1550 nmで0.5%の反射率がある。1650 nmで0.6%の反射率がある。

【0210】

本発明のTiO₂ / SiONの2層よりなる反射防止膜の場合は1200 nmで4%、1300 nmで1.7%である。1550 nmでは0%に落ちている。反射率が0であるから反射防止膜として好ましいものである。1650 nmでは0.2%である。本発明の二重膜反射防止膜が優れているということが分かる。 20

【0211】

これは1550 nmの光にしか使えないということではない。1550 nmを基準波長として厚みを設計するからそのようなグラフになるのであり、他の波長で反射率を極小にするように設計することもできる。たとえば1300 nmで反射率を0にするように厚みを決めることが可能である。また1650 nmで反射率を0にするように厚みを決めることもできる。本発明で決まるのは、完全無反射の条件を与える厚み波長比(f/λ 、 d/λ)である。これがきまるのでどのような波長に対しても一義的に反射防止膜2重膜の厚みを与えることができる。

【実施例3】

【0212】

[実施例3(乙型：樹脂/SiON/TiO₂/InP：上面入射型：図24)]

InP半導体層の上に屈折率の高いTiO₂を形成しその上に屈折率の低いSiONを形成するという乙型の反射防止膜を設けたInP系の受光素子も可能である。図24に乙型の反射防止膜を持つ上面入射型のInGaAs受光素子を示す。n-InP基板2、n-InPバッファ層3、n-InGaAs受光層4、n-InP窓層5をもつエピタキシャル層にSiNマスク6を介して亜鉛を拡散して中央部にp領域7を設ける。

【0213】

次にTiO₂膜9をEB蒸着法によって、InP窓層とSiN膜6の上につける。さらにTiO₂膜9の上にPCVDによってSiON8を形成する。レジストを塗布し一部に穴を開けてp電極27をつける。n-InP基板の底面全体にn電極30を形成する。それは上面入射型でSiON/TiO₂の二重反射防止膜をもった受光素子である。屈折率が順にならぶ乙型の反射防止膜である。実施例1、2とはSiONとTiO₂の順序が違う。 40

【実施例4】

【0214】

[実施例4(乙型：樹脂/SiON/TiO₂/InP：裏面入射型：図25)]

図25に乙型の反射防止膜を持つ裏面入射型のInGaAs受光素子をしめす。n-InP基板2、n-InPバッファ層3、n-InGaAs受光層4、n-InP窓層5をもつエピタキシャル層にSiNマスク6を介して亜鉛を拡散して中央部にp領域7を設 50

ける。p型領域7の上の全体にp電極37を設ける。 TiO_2 膜9をEB蒸着法によって、n-InP基板2の裏面につける。さらに TiO_2 膜9の上にPCVDによってSiON膜8を形成する。レジストを塗布し一部のSiON/ TiO_2 を除去しリング状のn電極40をn-InP基板2の底面に設ける。これは裏面入射型でSiON/ TiO_2 の二重反射防止膜をもった受光素子である。屈折率が順に並ぶ乙型の反射防止膜である。

【図面の簡単な説明】

【0215】

【図1】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させた状態の1素子分の断面図。

【0216】

【図2】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散している状態を示す1素子分の断面図。

【0217】

【図3】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りその上面を反射防止膜の第1層(下層)であるSiON層で被覆した状態を示す1素子分の断面図。

【0218】

【図4】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りその上面をSiON層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆した状態を示す(甲型)1素子分の断面図。

【0219】

【図5】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りその上面をSiON層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆しレジストを塗布しリソグラフィによって一部に穴を開けた状態を示す(甲型)1素子分の断面図。

【0220】

【図6】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りその上面をSiON層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆しレジストを塗布しリソグラフィによって一部に穴を開けその穴から TiO_2 とSiONをエッチングしてInP窓層にいたる穴を穿ちそこへp電極を形成した状態を示す(甲型)1素子分の断面図。

【0221】

【図7】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させその上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りその上面をSiON層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆しレジストを塗布しリソグラフィによって一部に穴を開けその穴から TiO_2 とSiONをエッチングしてInP窓層にいたる穴を穿ちそこへp電極を形成し、n-InP基板の裏面全面にn電極を形成した甲型上面入射型受光素子の1素子分の断面図。

【0222】

【図8】n-InP基板の上にn-InPバッファ層、 n^- -InGaAs受光層、n-InP窓層をエピタキシャル成長させInP窓層の上にSiN膜を設けSiN膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散してp型領域を作りp型領域の上面全面にp電極をもうけ、n-InP基板裏面をSiON層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆した状態を示す(甲型)1素子分の断面図。

10

20

30

40

50

【0223】

【図9】 n - InP 基板の上に n - InP バッファ層、 n - InGaAs 受光層、 n - InP 窓層をエピタキシャル成長させ InP 窓層の上に SiN 膜を設け SiN 膜中央部に開口部を穿ち開口部を通し亜鉛拡散して p 型領域を作り p 型領域の上面全面に p 電極を設け、 n - InP 基板裏面を SiON 層で被覆しさらに TiO_2 層で重ねて被覆し SiON/TiO_2 の一部をフォトリソグラフィによって去し除去した部分に n 電極を形成した甲型裏面入射型受光素子の1素子分の断面図。

【0224】

【図10】 InP 半導体の上に SiON 単層、 TiO_2 単層、 TiO_2/SiON 二重層を形成し屈折率1.46の樹脂で覆ったときの反射損失の波長依存性を示すグラフ。横軸は波長、縦軸は反射損失である。厚みは1550nmの光で損失が最小になるように決められている。 SiON 単層は反射防止膜として実績があるが、 TiO_2 単層は反射防止膜として用いられたことはない。 TiO_2/SiON 二重層反射防止膜をもつ素子(甲型)が本発明の実施例1、2にあたる。

10

【0225】

【図11】 InP 系半導体 S の上に反射防止膜 F がありその外側に樹脂 R が接触しているという本発明が対象にする構造を略示するための概略構成図。

【0226】

【図12】表面実装型モジュールの内部に設けられ樹脂 R で入射側が包囲された受光素子において、屈折率 n の半導体 S の上に屈折率 m 、厚み d の中間層が設けられ、1以上の屈折率 h をもつ樹脂 R に接触しているときにおいて、第1境界での反射振幅 $(h-m)/(h+m)$ 、第1境界での透過係数 $2h/(m+h)$ 、第2境界での反射 $(m-n)/(m+n)$ 、第1境界での透過係数 $2m/(m+h)$ を示すための光学系構成図。

20

【0227】

【図13】複素平面上に樹脂・中間層の第1境界での反射振幅 $(h-m)/(h+m)$ の絶対値を半径とする円を書き、実軸上に第1境界での反射振幅に負号をつけたものを取り、中間層・半導体の第2境界での反射と、第1境界での反射が丁度打ち消しあうためには、ある近似のもとで、第2境界での反射振幅 $(-m+n)/(m+n)$ が第1境界での反射振幅 $(-h+m)/(h+m)$ に等しく、厚み d を往復することにより位相の遅れ $4\pi md/\lambda$ が丁度180度(π)であるときに打ち消し合うということを示すための反射複素平面図。

30

【0228】

【図14】複素平面上に樹脂・中間層の第1境界での反射振幅 $(h-m)/(h+m)$ の絶対値を半径とする円を書き、実軸上に第1境界での反射振幅に負号をつけたものを取り、中間層の厚み d を往復することによる位相の遅れ $4\pi md/\lambda$ の方向に引いた中間層・半導体の第2境界での反射振幅の絶対値 $(-m+n)/(m+n)$ に等しい長さ矢印をひきその合計 OK が0でないかぎり反射は0でなく、位相角を $\lambda/4$ にしたところで、反射振幅の差の分だけ反射損失が残ることを説明するための反射複素平面図。

【0229】

【図15】中間層が上層と下層にわかれ、樹脂・上層・下層・半導体という構造をもち、表面実装型モジュールの内部に設けられ樹脂 R で入射側が包囲された受光素子において、屈折率 n の半導体 S の上に屈折率 m 、厚み d の下層 F が設けられ、その上に屈折率 g 、厚み f の上層 E が設けられ、上層 E が1以上の屈折率 h をもつ樹脂 R に接触しているときにおいて、第1境界での反射振幅 $(h-g)/(h+g)$ 、第1境界での透過係数 $2h/(h+g)$ 、第2境界での反射 $(g-m)/(g+m)$ 、戻り光の第1境界での透過係数 $2g/(h+g)$ 、第2境界での透過係数 $2g/(g+m)$ 、第3境界での反射 $(m-n)/(m+n)$ 、戻り光の第2境界での透過 $2m/(g+m)$ を示すための光学系構成図。

40

【0230】

【図16】中間層が上層と下層にわかれ、樹脂・上層・下層・半導体という構造をもち、表面実装型モジュールの内部に設けられ樹脂 R で入射側が包囲された受光素子において、

50

透過係数の積を 1 とみなす近似において、第 1 境界での反射振幅絶対値 $|OE| = (-h + g) / (h + g)$ と第 2 境界での反射振幅絶対値 $|OF| = (-g + m) / (g + m)$ と第 3 境界での反射振幅絶対値 $|OS| = (-m + n) / (m + n)$ が等しく、厚み g を往復するときの位相変化 θ 、厚み d を往復するときの位相変化 φ が 120 度であれば、3 つの反射損失が打ち消して反射損が 0 になることを説明する架空の反射関係を示す反射複素平面図。

【0231】

【図 17】中間層が上層と下層にわかれ、屈折率が昇順にならぶ（乙型）よう樹脂・上層・下層・半導体という構造をもち、表面実装型モジュールの内部に設けられ樹脂 R で入射側が包囲された受光素子において、透過係数の積を 1 とみなす近似において、第 1 境界での反射振幅絶対値 $OE = (-h + g) / (h + g)$ と、第 2 境界での反射振幅絶対値に位相角 θ の複素指数を掛けた $OF = (-g + m) / (g + m) \exp(j\theta)$ と、第 3 境界での反射振幅絶対値に位相角 φ の複素指数を掛けた $OS = (-m + n) / (m + n) \exp(j\theta + j\varphi)$ の和が 0 であれば、3 つの反射損失が打ち消して反射損が 0 になることを説明するための反射複素平面図。

10

【0232】

【図 18】中間層が上層と下層にわかれ、上層の屈折率 g が下層の屈折率 m よりも大きいように並ぶ（甲型）樹脂・上層・下層・半導体という構造をもち、表面実装型モジュールの内部に設けられ樹脂 R で入射側が包囲された受光素子において、透過係数の積を 1 とみなす近似において、第 1 境界での反射振幅絶対値 $OE = (-h + g) / (h + g)$ と、第 2 境界での反射振幅絶対値に位相角 θ の複素指数を掛けた $-OF = (-g + m) / (g + m) \exp(j\theta) = -(-g + m) / (g + m) \exp(j\theta + j\pi)$ と、第 3 境界での反射振幅絶対値に位相角 φ の複素指数を掛けた $OS = (-m + n) / (m + n) \exp(j\theta + j\varphi)$ の和が 0 であれば、3 つの反射損失が打ち消して反射損が 0 になることを説明するための反射複素平面図。

20

【0233】

【図 19】下層に屈折率 2.32 の TiO_2 が、上層に屈折率が 1.80 の $SiON$ が設けられ全体として屈折率が昇順で並ぶ本発明の乙型の反射防止膜構造を示す構成図。

【0234】

【図 20】下層に屈折率が 1.80 の $SiON$ が、上層に屈折率 2.32 の TiO_2 が設けられ屈折率順序が一部反転している本発明の甲型の反射防止膜構造を示す構成図。

30

【0235】

【図 21】樹脂・ $SiON$ ・ TiO_2 ・ InP というように屈折率が昇順に並ぶ乙型の反射防止膜において第 1、2、3 境界での反射振幅の大きさ 0.104、0.124、0.170 を動径成分としてもつ複素数の和が 0 になるように位相角 θ 、 φ をきめたときの乙型厳密解を図示した複素平面図。 $\theta = 84.0^\circ$ 、 $\varphi = 142.6^\circ$ である。

【0236】

【図 22】樹脂・ TiO_2 ・ $SiON$ ・ InP というように屈折率が一部逆転する甲型の反射防止膜において第 1、2、3 境界での反射振幅の大きさ 0.228、-0.119、0.255 を動径成分としてもつ複素数の和が 0 になるように位相角 θ 、 φ を決めたときの乙型厳密解を図示した複素平面図。 $\theta = 88.8^\circ$ 、 $\varphi = 63.4^\circ$ である。

40

【0237】

【図 23】樹脂・ $SiON$ ・ TiO_2 ・ InP というように屈折率が昇順に並ぶ乙型の反射防止膜を p 型領域の上にもつ上面入射型の InP 系受光素子を示す断面図。

【0238】

【図 24】樹脂・ $SiON$ ・ TiO_2 ・ InP というように屈折率が昇順にならぶ乙型の反射防止膜を n- InP 基板の裏面にもつ裏面入射型の InP 系受光素子を示す断面図。

【符号の説明】

【0239】

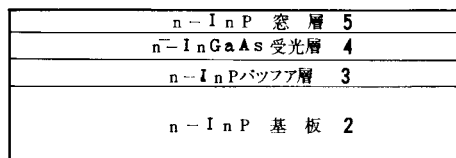
2 n- InP 基板

50

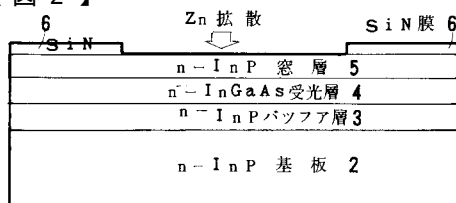
- 3 n-InP バッファ層
- 4 n-InGaAs 受光層
- 5 n-InP 窓層
- 6 SiN 膜
- 7 p 型領域
- 7a p-InGaAs 受光層
- 7b p-InP 窓層
- 8 SiON 膜
- 9 TiO₂ 膜
- 20 pn 接合
- 22 pn 接合の端部
- 25 レジスト
- 26 開口部
- 27 p 電極
- 28 SiON 膜
- 29 TiO₂ 膜
- 30 n 電極
- 37 p 電極
- 40 n 電極

10

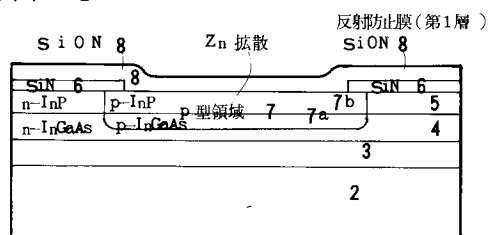
【図 1】



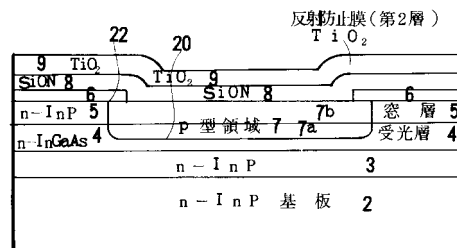
【図 2】



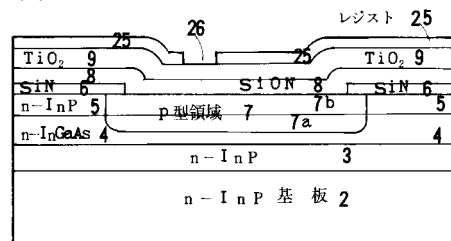
【図 3】



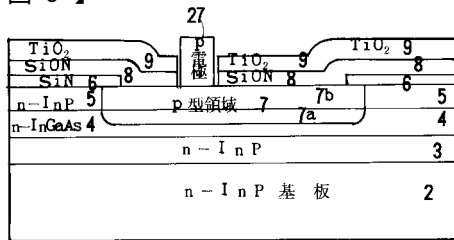
【図 4】



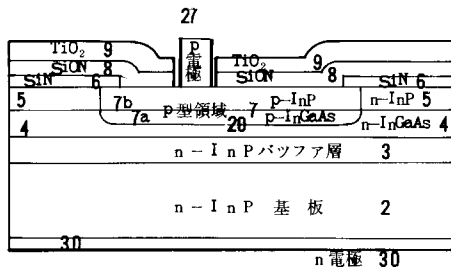
【図 5】



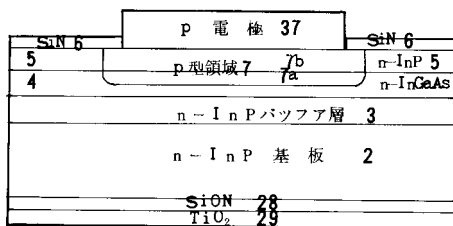
【図 6】



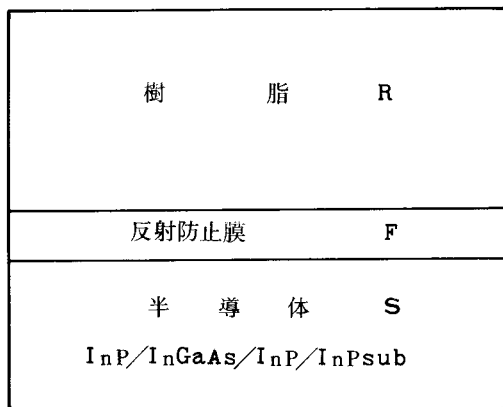
【図 7】



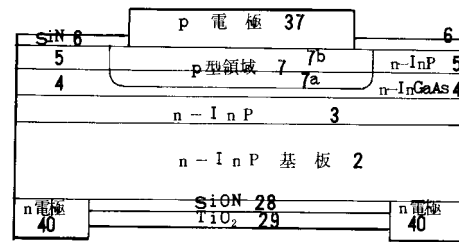
【図 8】



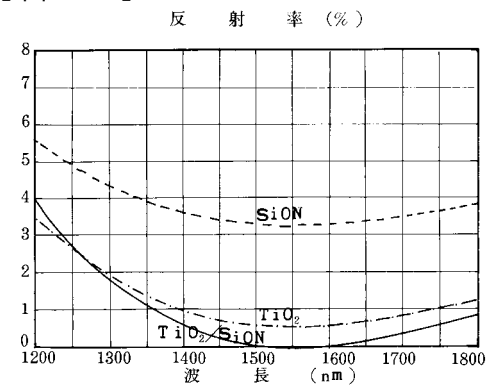
【図 11】



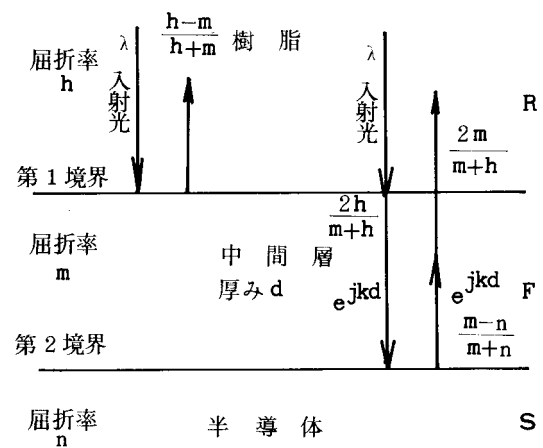
【図 9】



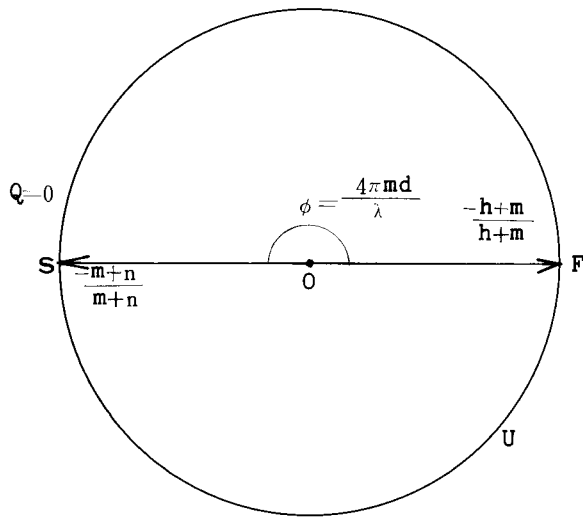
【図 10】



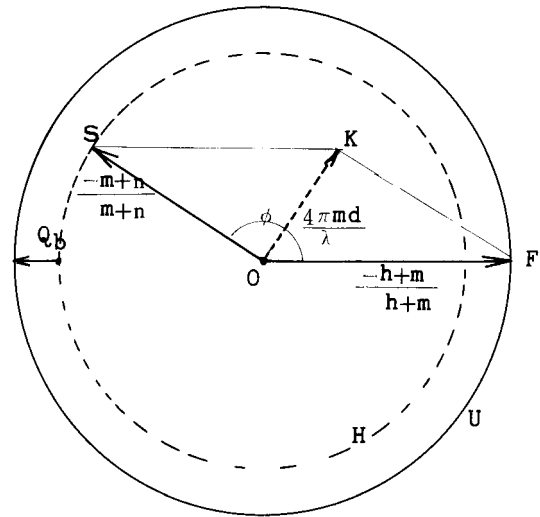
【図 12】



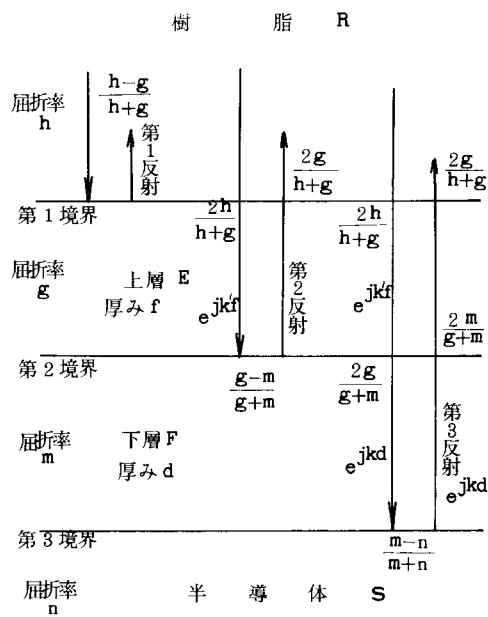
【図 1 3】



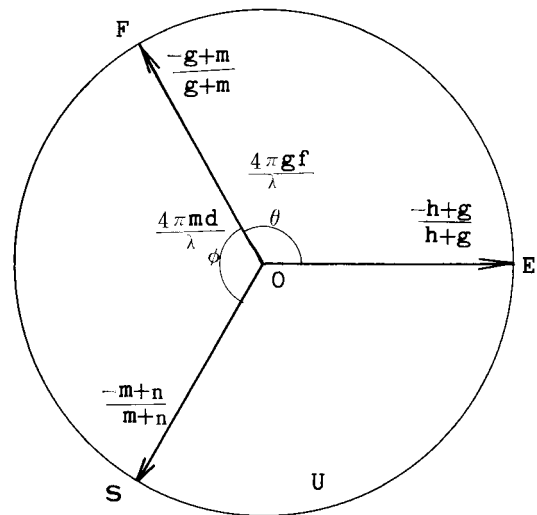
【図 1 4】



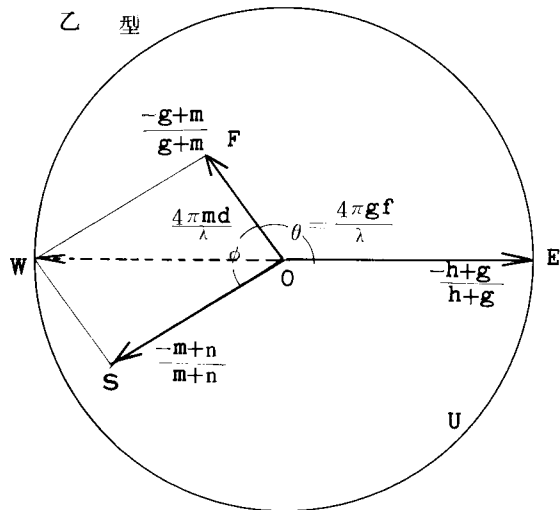
【図 1 5】



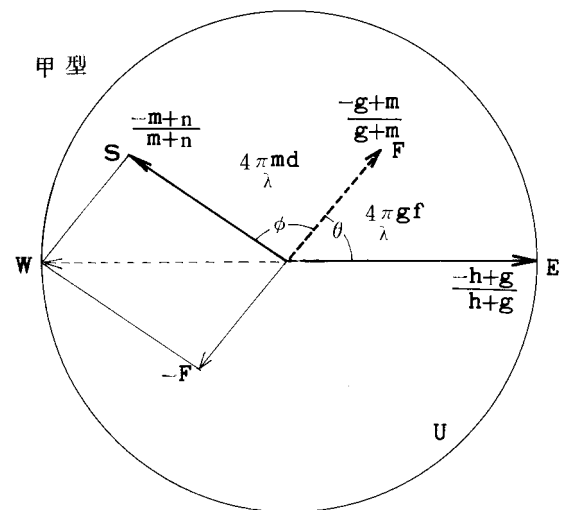
【図 1 6】



【図 17】



【図 18】



【図 19】

乙 型

樹 脂	1.46
S i O N	1.80
T i O ₂	2.32
I n P	3.3

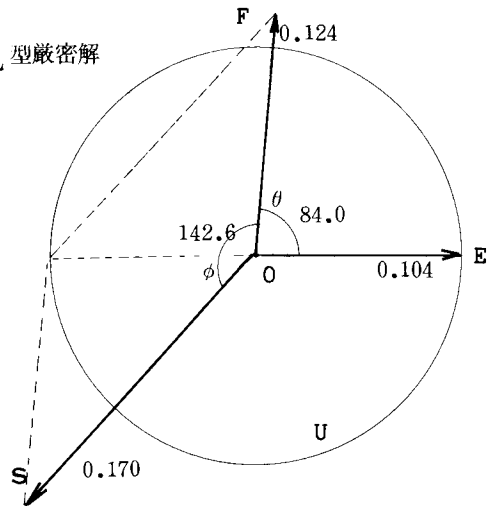
【図 20】

甲 型

樹 脂	1.46
T i O ₂	2.32
S i O N	1.80
I n P	3.3

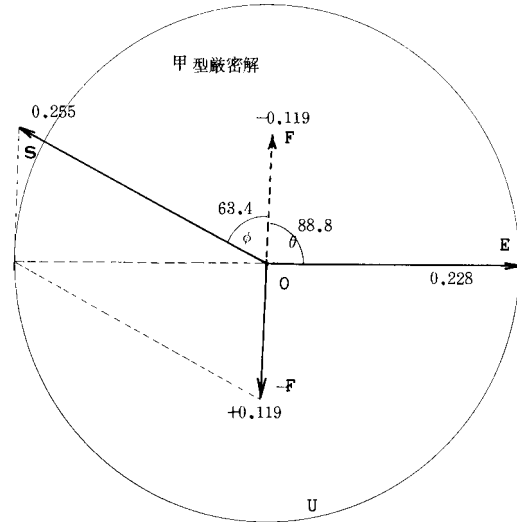
【図 2 1】

乙型厳密解



【図 2 2】

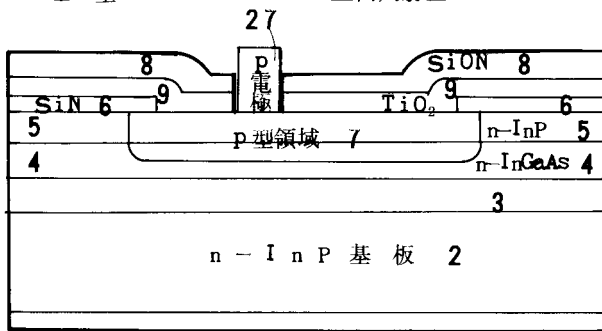
甲型厳密解



【図 2 3】

乙型

上面入射型



【図 2 4】

乙型

裏面入射型

