



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	SiO ₂ 光導波路とGaAs受光素子の分布結合方式における光結合長の解析 : 光・電子集積回路におけるO/E変換部の検討
Author(s)	松尾, 望; Matsuo, Nozomu; 大野, 英男 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 117, 39-48
Issue Date	1984-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41829
Type	departmental bulletin paper
File Information	117_39-48.pdf



SiO₂ 光導波路と GaAs 受光素子の分布結合方式 における光結合長の解析

——光・電子集積回路における O/E 変換部の検討——

松尾 望 大野 英男 長谷川 英機
(昭和58年9月30日受理)

Analysis of Coupling Length for Distributed Coupling between SiO₂ optical waveguides and GaAs photodetectors —— A Study of O/E Interface in Optoelectronic Integrated Circuits ——

Nozomu MATSUO, Hideo OHNO, Hideki HASEGAWA
(Received September 30 1983)

Abstract

Efficient optical coupling at the optical-electronic interface is important in monolithic OEICs. The coupling length needed for distributed optical coupling from SiO₂ waveguides to GaAs photodetectors is analyzed in this paper. The interface region is modeled as a slab waveguide, and the electromagnetic fields of the leaky-wave modes are numerically calculated in order to estimate the coupling length. Dispersion equations are derived using the transverse resonance method, and are numerically solved with the use of the Newton's method. It is shown that cladding layers must be thinner than the penetration depth of the optical waves into the cladding layers to realize a short coupling length. A new interface structure in which a buffer layer is inserted between the waveguides and the photodetector is proposed. This structure is shown to be effective to shorten the coupling length for TE mode-waves when its thickness and refractive index are selected properly.

1. 結 言

同一の半導体基板上にレーザダイオード、フォトダイオード等の発光、受光素子と、FET 等で構成された増幅回路、論理回路等の電子回路を集積化した光・電子集積回路(Optoelectronic Integrated Circuits: OEIC)¹⁾が注目を集め、最近盛んに研究がすすめられている。これは OEIC が次のような利点を有するためである。

- (1) 光ファイバ伝送系と超高速集積回路の組合せを可能にする。

高速、大容量の信号伝送を可能とする光ファイバ伝送系と、化合物半導体を用いた超高速集積回路との組合せによる、高速、大容量の情報処理システムの構成が期待されるが、OEIC は光の伝送系と電子系のインターフェースを構成するものとして重要である。

- (2) ハイブリッド方式で構成された光-電子系に比べ小形化が可能であり、また、信頼性の向

上、低価格化等にもつながる。

このようなOEICの構成要素としては、光源（レーザダイオード等）、受光素子（フォトダイオード等）、電子回路素子（FET等）の他に、光導波路があげられ、現在これらの個々の素子の研究とともに、これらの集積化に関する基本的な研究が行われている段階である。

本研究報告はこのうち、光導波路から受光素子への光結合部の構成について検討を行ったもので、光結合の方法として図1に示すような光導波路からの漏れ波による分布結合を考え、その結合長さについて数値解析を行い、結合長さの縮小化に関する検討を行ったものである。

特にここでは、光ファイバ伝送系との整合性を考慮し、光導波路としてSiO₂系のものを扱い、また、受光素子の材料としては、OEICの材料として将来有望なGaAsを考えた。また、光の波長帯は、GaAs/GaAlAsレーザの発振波長帯を考え、0.85μm帯とした。

光結合に必要とされる長さ、すなわち結合長の評価にあたっては、図1の結合部分を多層のスラブ導波路としてモデル化し、光導波路中の漏れ波モードの減衰定数をTEモード、TMモードのそれぞれについて求める解析を行った。すなわち、光導波路中の光波がしだいに受光素子中へ漏れ、その振幅が光の進行につれ減衰定数 α で指数関数的に減衰するような系を扱い、減衰定数 α の逆数により光の結合長さの評価を行なった。

解析の手法としては、マイクロ波伝送線路の電磁界解析に用いられる横共振法^{2,3)}を用いて電磁界の固有方程式を導き、仮定したモデルについてこれを数値的に解析した。

ここでは先ず解析法の詳細を述べた後、取り扱った各モデルについて結合長の解析結果をまとめる。

2. 多層スラブ導波路における固有方程式の導出

2.1 多層スラブ導波系

解析に用いた多層スラブ導波路モデルを図2に示す。解析した導波路は、 y 、 z 方向に無限の広がりをもつ均質等方性媒質が x 方向に層状に N 層重ねられた構造のもので、 y 、 z 方向には屈折率の変化はないものとし、屈折率の x 方向の分布は図に示すような階段形のものと考えた。光波の伝搬方向は z 方向とし、電磁界の各成分はいずれも y によらない($\partial/\partial y=0$)と仮定した。媒質はすべて無損失とし、また、第1層および第 N 層は半無限大の広がりをもつものとした。

電磁界の解析は、TEモード、TMモードの両方について行った。電磁界の形としては、次のようなものを扱った。

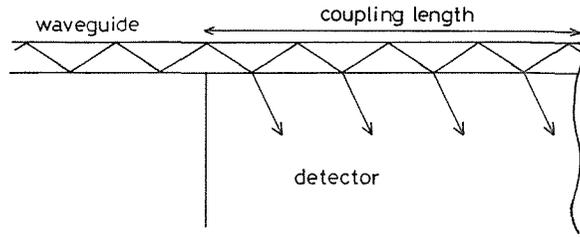


図1 分布結合方式

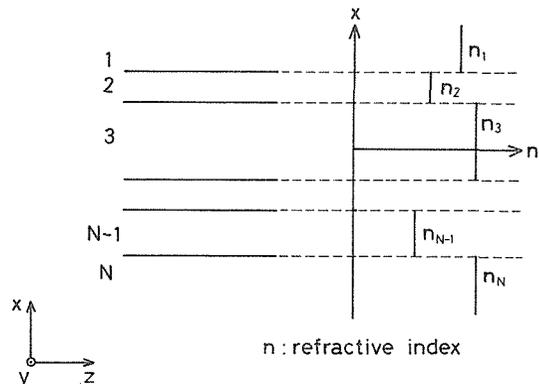


図2 多層スラブ導波路モデル

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x) \exp(j\omega t - \gamma_z z) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}(x) \exp(j\omega t - \gamma_z z) \quad (2.2)$$

ここで γ_z は媒質中の z 方向の伝搬定数で、一般に $\gamma_z = \alpha_z + j\beta_z$ の形で表わし、 β_z を位相定数、 α_z を減衰定数とする。特にここでは GaAs 中への放射を伴いながら SiO₂ 導波路中を進行する光波を扱い、 $\alpha_z > 0$ かつ $\beta_z > 0$ であるような漏れ波モードの解析を行った。これは導波路中を $+z$ 方向に伝搬しつつ指数関数的に減衰するような波であることは (2.1), (2.2) 式の電磁界の形から容易に理解できるであろう。

2.2 横共振法を用いた固有方程式の導出^{2),3)}

上の多層スラブ導波路の電磁界を TE モード、TM モードのそれぞれについて横共振法を用いて解析する。Maxwell の電磁方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (2.4)$$

$$(\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}) \quad (2.5)$$

ϵ は誘電率、 μ_0 は真空中の透磁率

に (2.1), (2.2) 式を代入し、これを電磁界の各成分について次のような条件で整理する。

$$\text{TE モード: 電界の } z \text{ 方向成分 } E_z = 0$$

$$\text{TM モード: 磁界の } z \text{ 長向成分 } H_z = 0$$

$$\partial / \partial y = 0$$

上のような条件のもとでは、各媒質中において次の関係式が成立する。ただし、 i は媒質の番号を表わす。

$$\text{TE モード: } \partial H_z / \partial x = -(\gamma_{xi}^2 / j\omega\mu_0) E_y, \quad \partial E_y / \partial x = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.6)$$

$$\text{TM モード: } \partial H_y / \partial x = j\omega\epsilon_i E_z, \quad \partial E_z / \partial x = (\gamma_{xi}^2 / j\omega\epsilon_i) H_y \quad (2.7)$$

ここで γ_{xi} は各媒質中の x 方向の伝搬定数であり、

$$\gamma_{xi}^2 + \gamma_z^2 = -\omega^2 \epsilon_i \mu_0 (\epsilon_i = \epsilon_0 n_i^2, \quad n_i \text{ は各層の屈折率}) \quad (2.8)$$

なる関係式が成立する。ここで次のような置き換えを行う。すると (2.6), (2.7) 式は次の伝送線路方程式と同形になる。

$$\partial I / \partial x = -YV, \quad \partial V / \partial x = -ZI$$

$$\text{TE モード: } H_z \rightarrow I, \quad E_y \rightarrow V, \quad \gamma_{xi}^2 / j\omega\mu_0 \rightarrow Y, \quad j\omega\mu_0 \rightarrow Z \quad (2.9)$$

$$\text{TM モード: } H_y \rightarrow I, \quad -E_z \rightarrow V, \quad j\omega\epsilon_i \rightarrow Y, \quad \gamma_{xi}^2 / j\omega\epsilon_i \rightarrow Z \quad (2.10)$$

次に異なる屈折率をもつ媒質における境界条件について考えてみる。電磁界では、電界、磁界の接線成分が連続であるが、これは上の置き換えでは境界において V, I が連続と等価であり、この点において伝送線路表示が有効である。従って E, H の x 依存性は V, I の x 依存性と同一になる。ここで伝送線路の特性インピーダンス $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$ と同様に、導波路各層の x 方向すなわち横方向の特性インピーダンスが次のように定義できる。

$$\text{TE モード } Z_{0i} = j\omega\mu_0 / \gamma_{xi} \quad (2.11)$$

$$\text{TM モード } Z_{0i} = \gamma_{xi} / j\omega\epsilon_i \quad (2.12)$$

この特性インピーダンスを用いることにより、図2の多層スラブ導波路は図3のような伝送線路と等価なものとして扱うことができ、多層スラブ導波路の固有方程式はこの伝送線路の共振条件により与えられる。すなわち、任意の点 x_0 から上を見た線路の入力インピーダンスを Z_u 、下を見た入力インピーダンスを Z_d とおくと、線路の共振条件は次式で与えられる。

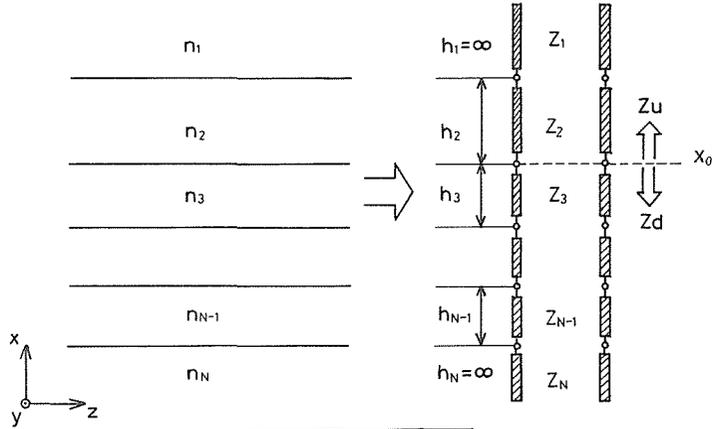


図 3 伝送線路表示

$$Z_u + Z_d = 0 \tag{2.13}$$

ここでは後に述べるように図 4 に示すような四層スラブ導波路，五層スラブ導波路を扱った。四層スラブ導波路の場合，図の Z_u ， Z_d は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} Z_u &= \frac{Z_1 + Z_2 \tanh(\gamma_{x2} h_2)}{Z_2 + Z_1 \tanh(\gamma_{x2} h_2)} Z_2 \\ Z_d &= \frac{Z_4 + Z_3 \tanh(\gamma_{x3} h_3)}{Z_3 + Z_4 \tanh(\gamma_{x3} h_3)} Z_3 \end{aligned} \tag{2.14}$$

また，五層スラブ導波路の Z_u ， Z_d は

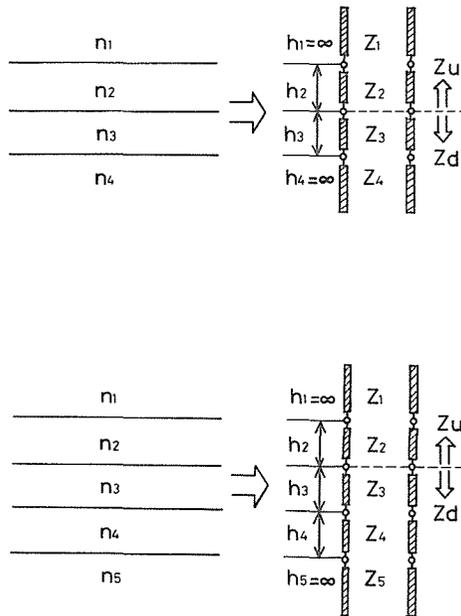


図 4 四層および五層スラブ導波路

$$Z_u = \frac{Z_1 + Z_2 \tanh(\gamma_{x2} h_2)}{Z_2 + Z_1 \tanh(\gamma_{x2} h_2)} Z_2$$

$$Z_d = \frac{\frac{Z_5 + Z_4 \tanh(\gamma_{x4} h_4)}{Z_4 + Z_5 \tanh(\gamma_{x4} h_4)} Z_4 + Z_3 \tanh(\gamma_{x3} h_3)}{Z_3 + \frac{Z_5 + Z_4 \tanh(\gamma_{x4} h_4)}{Z_4 + Z_5 \tanh(\gamma_{x4} h_4)} Z_4 \tanh(\gamma_{x3} h_3)} Z_3 \quad (2.15)$$

電磁界の解析は、(2.13) に (2.8) および (2.11), (2.12) を適用して得られる γ_z に関する複素方程式の解析に帰着する。ここではこの複素方程式を実部と虚部に分け、 γ_z の実部 α_z と虚部 β_z に関する連立非線形方程式として扱い、これを Newton 法⁴⁾ を用いて数値的に解析し、次節であげられるようなモデルについてこの数値解を求め、 γ_z の実部すなわち減衰定数 α_z から結合長を評価した。

3. 光結合部モデルとその解析結果

3.1 SiO₂ 系対称三層スラブ導波路の導波モードの解析⁵⁾

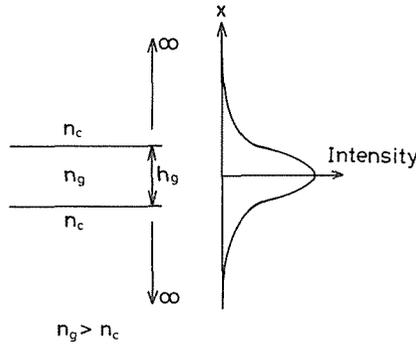


図 5 対称三層スラブ導波路

ここでは先ず、図 5 に示す SiO₂ 系の対称三層スラブ導波路の導波モードについて述べる。

一般に対称三層スラブ導波路における光の強度分布は図のように表わされる。図は基本モードを表すものである。光波は主に屈折率の高いガイド層に閉じ込められているが、クラッド内にも横方向に振幅が指数関数的に減衰する界が存在する。

三層スラブ導波路の電磁界は次の固有方程式を k_z について解くことにより求められる。

$$\frac{2 \sqrt{k_z^2 - k_0^2 n_c^2} \sqrt{k_0^2 n_g^2 - k_z^2}}{k_0^2 (n_c^2 + n_g^2) - 2 k_z^2} = \tan(\sqrt{k_0^2 n_g^2 - k_z^2} \cdot h_g) \quad (\text{TE モード}) \quad (3.1)$$

$$\frac{2 \sqrt{k_z^2 - k_0^2 n_c^2} \sqrt{k_0^2 n_g^2 - k_z^2}}{\left\{ \frac{n_g^2}{n_c^2} (k_0^2 n_c^2 - k_z^2) + \frac{n_c^2}{n_g^2} (k_0^2 n_g^2 - k_z^2) \right\}} = \tan(\sqrt{k_0^2 n_g^2 - k_z^2} \cdot h_g) \quad (\text{TM モード}) \quad (3.2)$$

表 1 SiO₂ 光導波路の
パラメータ

n_c	1.4485
n_g	1.452
h_g	6 μm , 10 μm

表 2 三層スラブ導波路のクラッド層への電磁界しみ出し深さ

TE ₀ , TM ₀	1.42 μm
TE ₁ , TM ₁	1.77 μm
TE ₂ , TM ₂	3.89 μm

ただし、ここで $\gamma_z = jk_z$ で、 $k_0 n_c < k_z < k_0 n_g$ の範囲で正の実根を求める。 k_0 は真空中における光波の波数で、 $k_0^2 n_i^2 = \omega^2 \epsilon_i \mu_0$ である。一般にこのような解は複数個存在し、 k_z の大きいものから順に TE モードについては TE_0, TE_1, TE_2, \dots と呼び、同様に TM モードについては TM_0, TM_1, TM_2, \dots と呼ぶ。 TE_0, TM_0 はそれぞれ TE モード、TM モードの基本モードである。

表 1 にここで扱った SiO_2 導波路のパラメータを示す。これらは石英系シングルモードファイバの値に準ずるものである。表 2 にガイド層の厚さ h_g を $10 \mu m$ としたときの TE モード、TM モードのクラッド層へのしみ出し深さを示す。これは (3.1), (3.2) 式および (2.8) 式から求めたクラッド層中での x 方向の減衰定数 α_x の逆数で評価したものである。表 2 に示すように、この条件のもとでは TE モード、TM モードとも導波モードが 3 つ存在し、いずれの場合も高次モードほどしみ出しの深さは深くなることわかる。

3.2 SiO_2 三層スラブ導波路 GaAs 受光素子との結合モデル

3.1 で述べたように、三層スラブ導波路ではクラッド層に電磁界のしみ出しがある。そこで図 5 の第三層のクラッド層を薄くして、このしみ出し深さ程度あるいはそれ以下にし、図 6 のような GaAs 層との結合部を構成すると、光は屈折率の高い GaAs 層へ漏れ、GaAs への光結合が行なわれるものと考えられる。さらにこれはクラッド層を薄くするほど容易になるものと考えられる。

そこでここでは、図 6 の四層スラブ導波路の解析を行い、クラッド層の厚さに対する光の結合長の変化を前章に述べた方法で計算した。実際には (2.13) 式を (2.8), (2.11), (2.12), (2.14) 式の条件で Newton 法を用いて解いた。Newton 法の初期値には、位相定数として 3.1 節で求めた TE_0 モード、 TM_0 モードの位相定数を用い、また、減衰定数としては、Arnaud の弱結合近似⁹⁾ による計算式により計算した近似値を用いた。弱結合近似は、導波路間の結合が弱く、導波路の導波モードの界分布は結合する媒質の存在によってあまり影響を受けないと仮定するもので、 TE_0 モードの減衰定数はこの近似により次式で表わされる。

$$\alpha_z = \frac{2[(n_s^2 - n_g^2)k_0^2 + (2u/h_g)^2]^{1/2} \cos^2 uw^2 \exp(-4wh_c/h_g)}{n_g(k_0 h_g/2)^3 (n_s^2 - n_c^2)(1 + 1/w)} \quad (3.3)$$

ただし、 u, w は、三層対称スラブ導波路のガイド層中における x 方向の位相定数を β_{xg} 、クラッド層中における x 方向の減衰定数を α_{xc} とおくと、 $u = \beta_{xg} h_g/2$ 、 $w = 2\alpha_{xc} h_g/2$ で表わされるものである。実際には GaAs 層の影響で位相定数は三層対称スラブ導波路の導波モードの値とは多少異なる値をとるため、ここでは上で求めたしみ出し深さに比べ h_c が十分大きい場合について上の初期値により計算を行い、得られた位相定数、減衰定数を初期値として h_c がさらに小さい場合の解を求めるという方法で逐次 h_c が小さい場合について計算をすすめた。

図 7 にガイド層厚さ h_g が $6 \mu m, 10 \mu m$ の場合について結合長の h_c による変化を計算した結果を示す。図よりクラッドの厚さが表 2 のしみ出し深さ程度の値以下になると急激に結合長が短くなることわかる。クラッドを薄くする効果は 1000 \AA 付近まで顕著であるが、それ以下では結合長の変化は非常に小さくなる。TE モードと TM モードを比べると、TM モードの方が結合長は短く、またガイド層の薄いほうが結合長をより短縮できる。結合長短縮の限界値は、 $h_g = 10 \mu m$ の

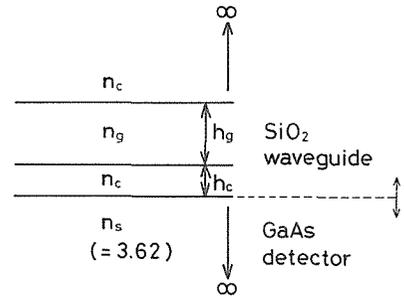


図 6 四層の結合部モデル

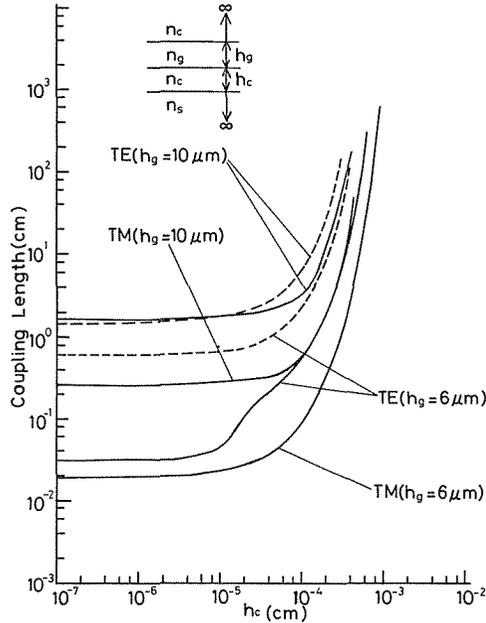


図 7 クラッド層の厚さに対する結合長の変化

場合 TE モードで 17 mm, TM モードで 2.7 mm で, $h_g=6 \mu\text{m}$ の場合 TE モードで 300 μm , TM モードで 200 μm である。

破線は $h_g=10 \mu\text{m}$, $6 \mu\text{m}$ のそれぞれの場合について TE モードの結合長を (3. 3) 式により計算した結果で, $h_g=10 \mu\text{m}$ の場合は上の電磁界解析の結果と比較的よく一致しているが, $h_g=6 \mu\text{m}$ の場合はかなり異なり, この場合 (3. 3) 式は定量的に正しい値を与えているとはいえない。これはガイド層がうすいため, 界のしみ出しが相対的に増加し, 弱結合近似が全く成立しないためと考えられる。

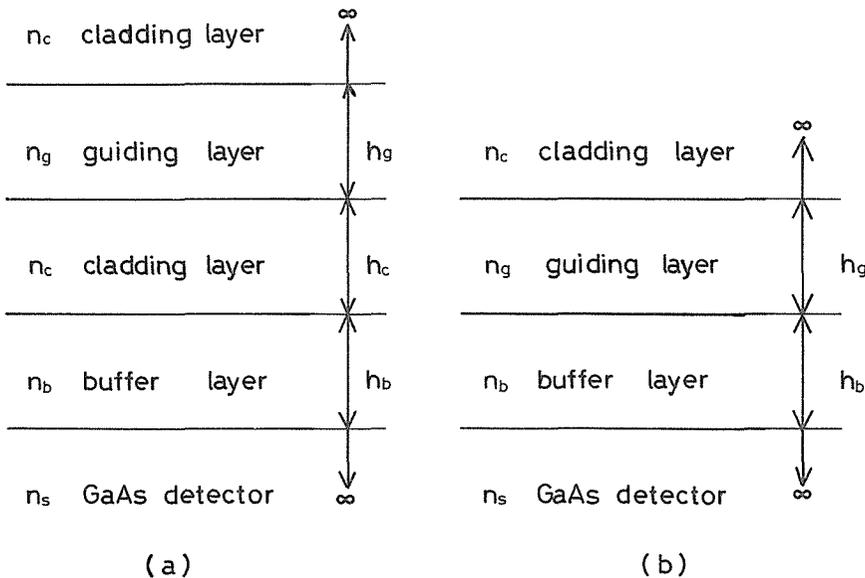


図 8 バッファ層をそう入した結合部モデル

3.3 バッファ層の導入

結合長をさらに短縮する方法として、図8に示すようなバッファ層を導波路とGaAs層の間にそう入した結合部の構造を考えた。

ここではバッファ層の屈折率として SiO_2 の屈折率とGaAsの屈折率の中間の値を選んだ。実際にこの範囲の屈折率を有する材料の例を表3に列挙する。図8(a)では第3層のクラッド層が 5000 \AA 存在する場合、図8(b)ではこれが存在しない場合を考え、バッファ層の厚さによる結合長の変化を調べた。ガイド層の厚さは $6 \mu\text{m}$ とした。

計算における初期値は、図8(a)の場合、3.2の計算でクラッド層が 5000 \AA の時の伝搬定数とし、バッファ層をすだいに0から厚くする方法で五層の固有方程式を解いた。図8(b)の場合は、同じ3.2の計算でクラッド層が0の時の伝搬定数を初期値とし、(a)と同様に四層の固有方程式でバッファ層を0から厚くした。

図9(a)にTEモードの五層の計算結果、(b)に四層の計算結果を示す。図から明らかなように、TEモードでは結合長短縮のための最適なバッファ層の厚さが各屈折率ごとに存在し、また、この最適な厚さは屈折率が1.62以上の場合、周期的に現われることが分かる。結合長はクラッド層を除くことによりさらに短縮可能であり、クラッド層の有無にかかわらずバッファ層の最適な厚さは各屈折率ごとに一定である。さらに、結合長は屈折率1.55、厚さ 5000 \AA のバッファ層を用いることにより最短とすることができる。

表3 各材料の屈折率

Al_2O_3	1.62
GaAs nativeoxide	1.82
Ta_2O_5	2.25
$\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$	3.40

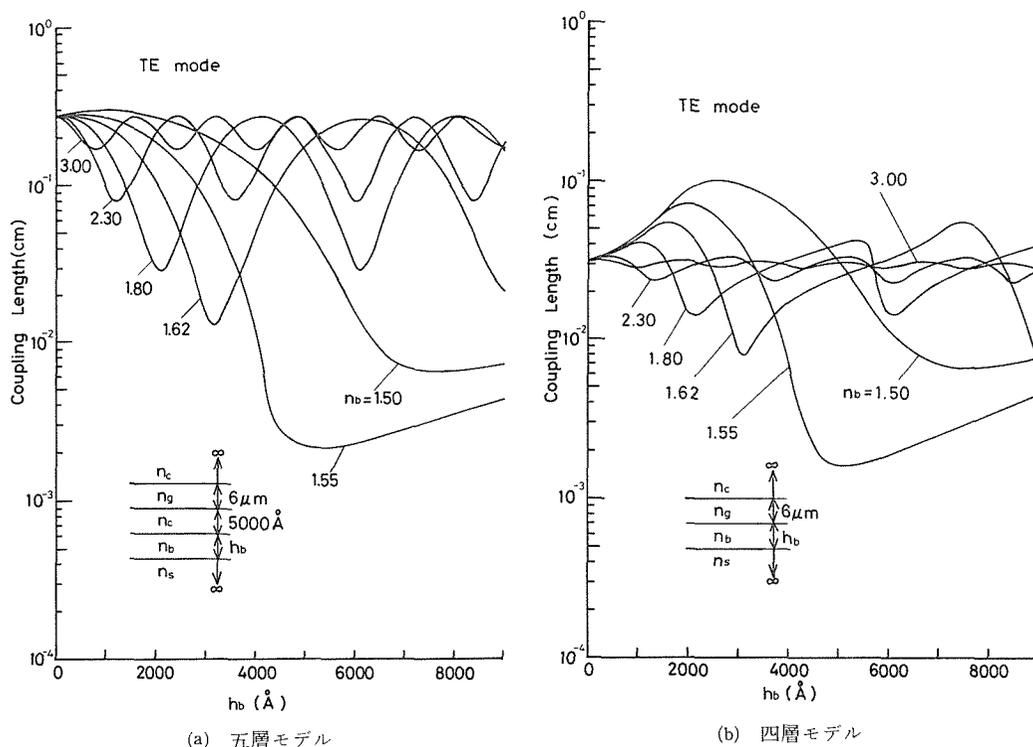


図9 バッファ層の厚さと層折率による結合長の変化 (TEモード)

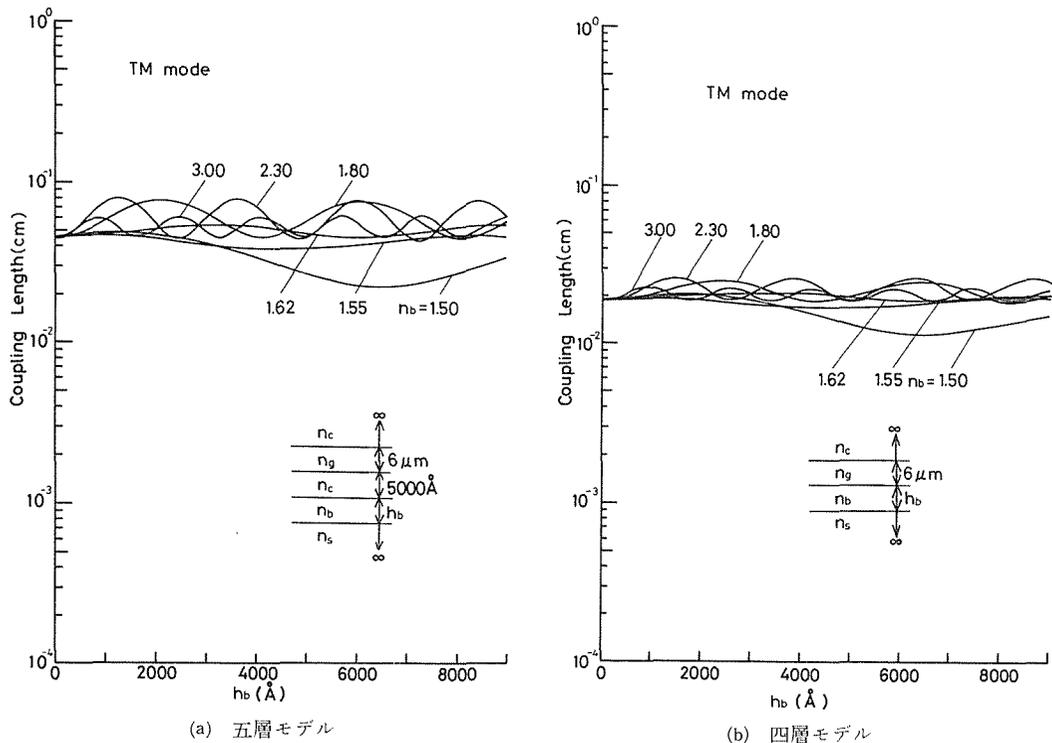


図10 バッファ層の厚さと屈折率による結合長の変化 (TM モード)

図 10(a)は TM モードに関する五層の計算結果, (b)は四層の計算結果を示すもので, TE モードと異なり, TM モードではバッファ層による結合長の短縮は顕著ではなく, 逆に厚さによっては結合長を増大させる結果となる。この最大値を与える厚さは, TE モードで最小値を与える厚さと各屈折率ごとに一致する。したがってバッファ層の設計に際しては, 取扱う光波のモードによりその屈折率と厚さを最適な値に選定することが必要である。

さらに TE モードと TM モードの結合長の違いを応用し, モードフィルタの設計も可能であろう。

4. 結 言

光・電子集積回路における導波系と受光素子の光結合部の一モデルとし, SiO₂ 系導波路から GaAs への漏れ波による光結合を, 多層スラブ導波モデルにより考察し, 光の結合長を電磁界の数値解析により求めた。電磁界の固有方程式は横共振法により導き, この根を Newton 法を用いて数値的に求めた。

計算結果より, 結合長短縮には先ず, クラッド層の厚さを三層対称スラブの導波光の界のしみ出し深さ以下の厚さにすることが必要であること, バッファ層の導入により, TE モードでは大幅に結合長を短縮することが可能であること, TM モードではバッファ層の効果が小さいこと等が明らかになった。

現在この漏れ波による光結合方式の応用として, シングルモードファイバと GaAs 受光素子の分布結合に関する実験, 検討⁷⁾を行っており, 後日報告の予定である。

参 考 文 献

- 1) I. Hayashi: IOOC '83 Technical Digest of Main Conference, (1983), p. 170
- 2) シェルクノフ (著), 森脇義雄 (訳): 電磁波論 (1954), p. 254, 岩波書店
- 3) T. Tamir: Optik, **37** (1973) p. 204
- 4) T. R. マッカーラ: 計算機のための数値計算法概論 (1972) p. 73
- 5) 川上彰二郎: 光導波路 (1980), p. 18, 朝倉書店
- 6) J. Arnaud: Bell Syst. Tech. J., **53** (1974), 4, p. 675
- 7) 松尾ら: 第 44 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1983), p. 154