

氏名	たに 谷	うち 内	てつ 哲	お 夫
授与学位	工 学 博 士			
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項			
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻			
学位論文題目	光波回路用分布結合素子に関する研究			
指導教官	東北大学教授 虫明 康人			
論文審査委員	東北大学教授 虫明 康人 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 安達 三郎 東北大学助教授 石曾根孝之			

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 言

近年，低損失光ファイバや長寿命半導体レーザーなどの開発が進み，従来のマイクロ波，ミリ波通信に比べ多くの利点をもつ光通信の実用化が近ずいている。従って，光通信システムを構成する各種の回路素子の開発が今後の重要な研究課題となっている。中でも特に導波路間の分布結合を利用した方向性結合器やそれを用いる変調器，あるいはモードフィルタなどの分布結合素子は，光集積回路への応用が広いと考えられるが，導波路幅や導波路間隔に対する製作精度が厳しいことから開発が遅れている。

本研究では光波回路用分布結合素子について実験と理論の両面から検討を加えた結果について述べており，まず，光導波路の形成にイオン交換法を用いて分布結合素子を製作し，その結合特性について理論的検討を加えることにより結合素子の設計法に関する基礎資料を得たものである。

## 第2章 屈折率分布形薄膜光導波路間の結合特性

光導波路の形成にイオン交換法などの拡散現象を利用する場合、その屈折率分布は横断面内で緩やかに変化する形状となる。このような導波路間の結合特性に関する知見を得るために、本章では薄膜光導波路の結合系をとりあげ、その屈折率分布形状と結合特性の関係について理論的検討を行っている。解析に当っては多層分割法を用いて結合系の2つの正規モードの位相定数 $\beta_e$ 、 $\beta_\theta$ を求め、2つの導波路間において全電力の移動に必要な結合長 $L_0$ を次式から求めている。

$$L_0 = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_\theta} \quad (1)$$

まず、導波路の中心に関して対称形屈折率分布をもつ例としてガウス形と二乗形をとりあげて、従来から知られているステップ形との結合特性の相違点を明らかにしている。大きな相違は、図1に示すように導波路が多モード状態になった場合に顕著になり、低次モード間 ( $m=0$ ) と高次モード間 ( $m=2$ ) の結合特性の差異がステップ形に比べかなり大きいことが分かった。すなわち、低次モード間の結合は弱く、高次モード間は強い。また、単一モード導波路間においては、比屈折率差が小さい場合分布形状による結合特性の差異は比較的小さいことが分かった。

次に、屈折率分布が一方方向だけに広がる補誤差関数形と直線形をとりあげた結果、従来知られていない新しい結合特性を見出すことができた。ステップ形と大きく異なる特性として、図2に示すように多モード導波路間の結合において、低次モード間と高次モード間の結合特性の差異が非常に小さいということが分かった。これは、ガウス形などの対称形分布の場合とは逆の特性である。

## 第3章 光波回路用分布結合素子の製作及び結合特性の測定

本章では、光導波路の製法の中で3次元パターン化が容易であることから、イオン交換法に着目して分布結合素子の製作を行い、その結合特性を測定した結果について述べている。製作に当たり、ガラス基板上にAlを真空蒸着し、これを半導体ICの製作に用いられているフォトリソ技術により導波路幅 $W_0 = 3.4 \mu m$ 、導波路間隔 $S_0 = 2.3 \sim 7.9 \mu m$ のパターンマスクを作成した。次にこれを $340^\circ C$ の $KNO_3$  熔融塩中でガラス基板中の $Na^+$ と $K^+$ の置換を行い、局部的に屈折率を増加させることにより光導波路を形成した。光源としてはHe-Neレーザ ( $\lambda = 0.6328 \mu m$ ) を用い、プリズムカップラにより導波モードを励振した。その結果、散乱ロスの小い良好な導波特性を示し、また、2つの導波路間において電力の周期的移動が生じていることを散乱光の拡大分析により確認することができた。 $S_0 = 2.3 \mu m$ のパターンにおいては、結合長 $L_0 = 0.95 mm$ ではほぼ完全に他方の導波路に電力が移動していることが分かった。更に、本結合素子は導波モードの偏波方向による結合特性の差異は比較的小さいことが分かった。

## 第4章 測定結果の検討及び結合素子の設計

本章では、第3章において得られた測定結果に対して理論的検討を加え、更に分布結合素子の設計法について述べている。まず、第2章で得られた結果から屈折率差が小さく、また単一モード領域では屈折率分布形状による結合特性の差異が比較的小さいことが推察されるので、イオン交換法によって形成される屈折率分布をパターンマスクの下への浸み出しを考慮して方形コアに近似を行っている。半導体への不純物拡散のデータから、導波路幅 $W_0$ 、導波路間隔 $S_0$ のパターンマスクの下には、近似的に次のような横幅 $W$ 、厚さ $H$ の方形コアが形成されていると考えることができる。

$$\left. \begin{aligned} W &= W_0 + 2 \Delta W \\ H &= 0.92 p \\ S &= S_0 - 2 \Delta W \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで $\Delta W = 0.35D$  ;  $D$ は拡散長である。

従って拡散の進行にともない導波路間隔は小さくなることが予想される。

図3は、等価屈折率法を用いて拡散の進行による結合特性の変化を計算したものであり、パターンマスクの下への浸み出しの影響がかなり大きいことが分かる。

図4は、同様な解析法による理論値と第3章で得られた実測値の比較例を示している。ただし、コアとガラス基板の屈折率を各々 $n_1$ 、 $n_2$ とし、比屈折率差 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_2$ とすると、理論値は $\Delta = 0.2\%$ と置いたものであり、実測値とはほぼ一致している。

次に、分布結合素子の設計に際し、イオン交換法を用いる場合、結合度 $c$ 、結合長 $l$ 、マスクの導波路幅 $W_0$ 、導波路間隔 $S_0$ 及び拡散時間 $t$ の間の関係を知る必要があり、これらを決定する設計チャートを示している。更にこれを用いて0 dB及び3 dB結合素子を試作した結果、ほぼ設計値に近い結合度が得られることを確認した。

## 第5章 薄膜装荷法による設計精度の向上に関する検討

光波回路用分布結合素子の製作に際し、技術上導波路幅あるいは導波路間隔に対して誤差が生じやすい。そこで、導波路の製作後に所定の結合特性が得られるように何らかの調整方法を検討しておく必要がある。

本章では、導波路の上に薄膜を装荷する方法をとりあげて検討を行っている。等価屈折率法を用いて解析を行った結果、薄膜の屈折率を導波路の屈折率に近く選ぶことにより、薄膜装荷による結合度の調整範囲が広がり、更に、図5に示すようにパターン作成時に製作誤差をとめないやすい導波路間隔及び導波路幅の製作精度を大きく緩和することができることが分かった。また、導波路の屈折率よりかなり大きな屈折率をもつ薄膜を装荷することにより、偏波方向により大き

く異なる結合特性を示すことが分かり、これを実験的に確認した。この特性は、 $E^X$ ,  $E^Y$  モードフィルタとしての応用が考えられる。

## 第 6 章 結 論

本論文では、まず薄膜導波路をとりあげ、その屈折率分布形状と結合特性の関係について理論的検討を加えた結果、従来知られていないステップ形と大きく異なる特性をいくつか見出すことができた。次いで、イオン交換法を用いてガラス基板中に分布結合素子を製作し、その結合特性について理論的検討を加えることにより設計資料を得ることができた。更に、導波路の上に薄膜を装荷することにより導波路間隔及び導波路幅の製作精度を緩和することができ、所定の結合度を精度よく設計するためには本方法が有効であることが分かった。

本研究で得られた結果は、現在開発が待たれている光波回路用分布結合素子の設計上、有用な基礎資料になるものと考えられる。

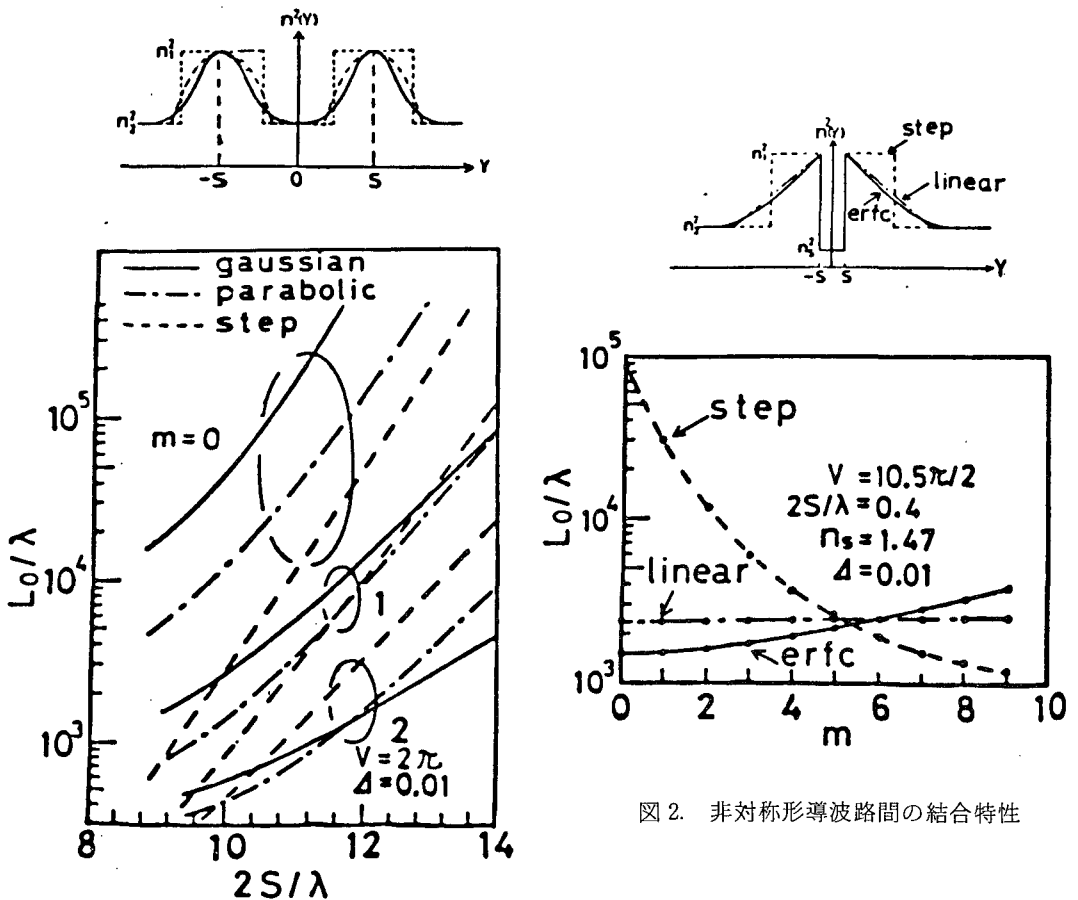


図 2. 非対称形導波路間の結合特性

図 1. 対称形導波路間の結合特性

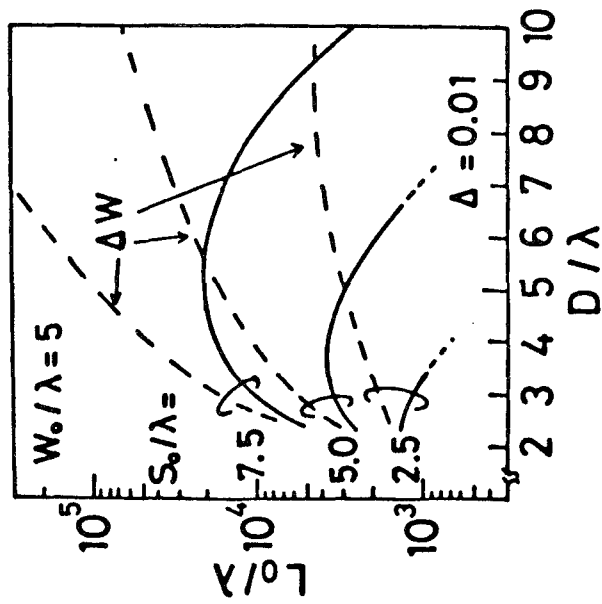


図3. 拡散長(D)と全電力の移動に必要な結合長( $L_0$ )の関係

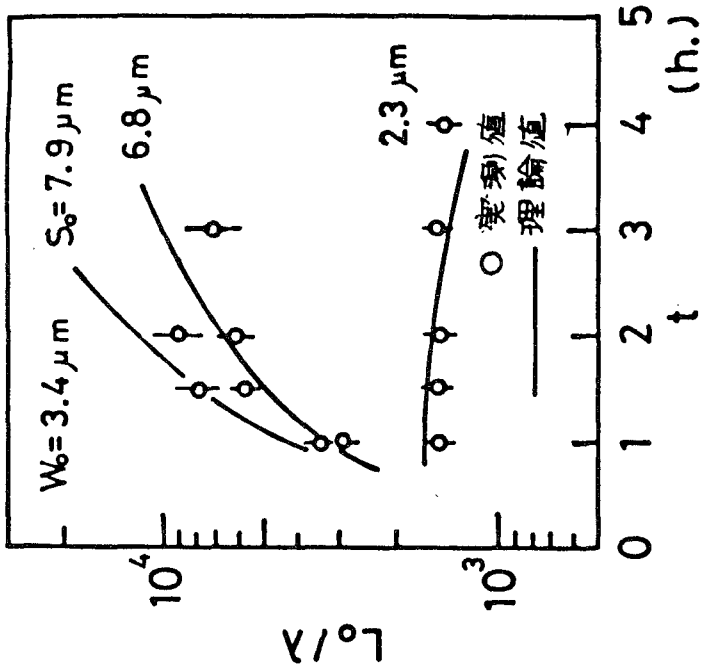


図4. 拡散時間(t)と全電力の移動に必要な結合長( $L_0$ )の関係

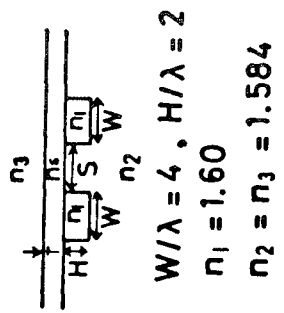
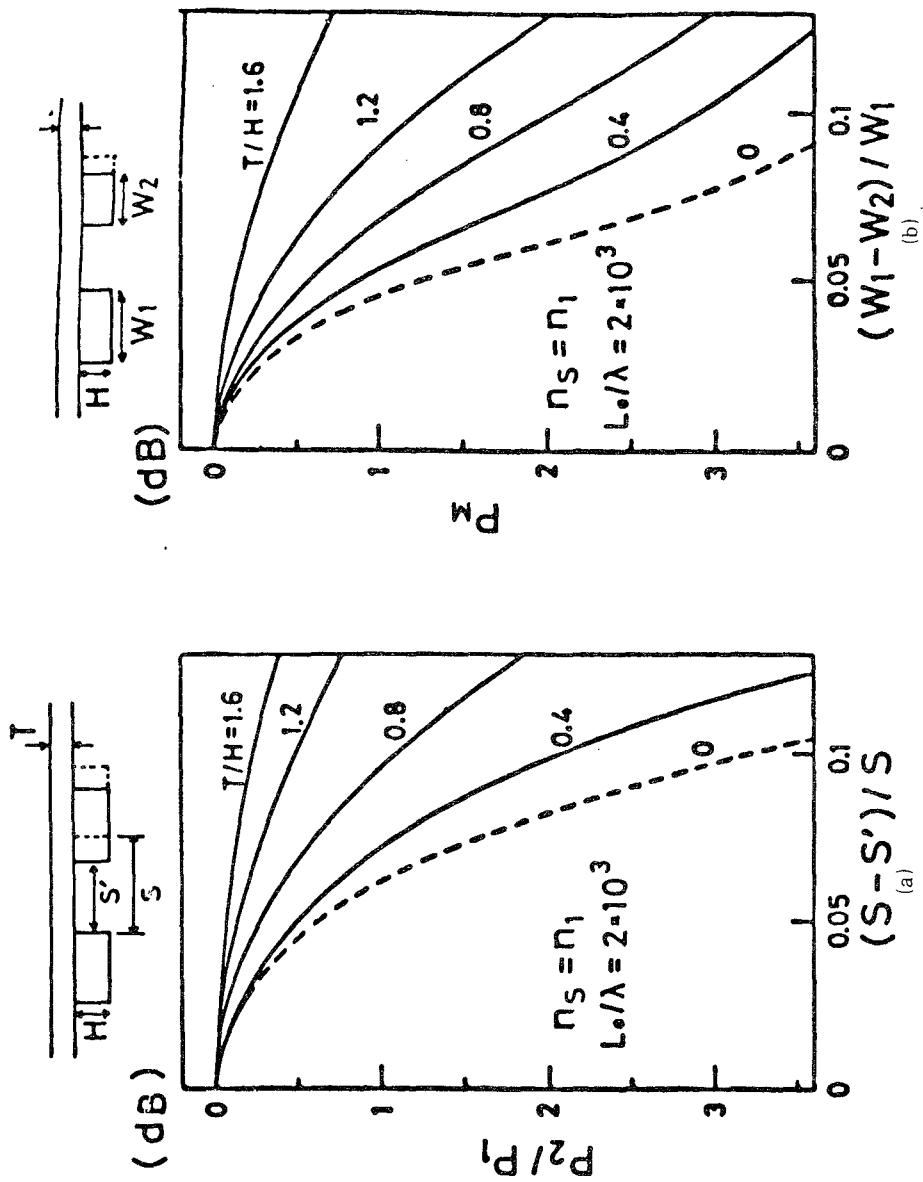


図 5. 薄膜装荷形分布結合素子の結合特性  
 (a) 導波路間隔の誤差と結合度の関係  
 (b) 導波路幅の誤差と最大結合度の関係

## 審査結果の要旨

低損失光伝送路および高性能光源が開発されたことによって、光波が通信に実用される可能性が強くなり、光波回路素子の研究が重要となってきた。著者は、その一つである分布結合素子を取りあげてその基礎的な研究を行うと共に、その製作にイオン交換法を初めて導入して試作研究を行い、理論的計算結果と比較検討して多くの設計資料を求めた。本論文はこれらの研究成果をまとめたもので全文6章からなる。

第1章は緒言である。

第2章は、薄膜導波路間の結合特性について、薄膜中の屈折率分布の形を考慮して理論的に検討した結果を述べたものである。著者は数種の分布形について、膜厚、間隔、比屈折率差、モード番号等による結合特性の変化を量的に明らかにしているが、これらは貴重な資料である。

第3章は、イオン交換法を導入して光波用分布結合素子を製作する方法について、試作研究を行った結果を述べたものである。著者は、試作した素子に光波を入射させて行った実測結果により、高精度で所期の結合特性が得られていることを示しているが、イオン交換法によって分布結合素子を試作したのは著者が最初であって、実用化の可能性を示した点は高く評価される。

第4章では、イオン交換法による試作素子についての測定結果を、理論的計算結果と比較して検討し、それに基づいて分布結合素子の設計法を導出している。さらに著者は、その方法による設計例により設計法の有効性を確かめている。

第5章は、分布結合素子の結合特性に対する設計精度の向上を目的として、薄膜装荷法を提案して種々検討した結果を述べたものである。ここで著者は、膜厚を適当な値にとれば同一特性精度に対する必要寸法精度がゆるくなることを示しているが、これは設計の立場で価値ある優れた成果である。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、光波回路用分布結合素子の諸パラメータがその結合特性に及ぼす影響を明らかにすると共に、イオン交換法によって高精度の結合素子が得られることを示し、さらに数値計算と実験に基づいて多くの設計資料を与えたもので、通信工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。