

学位論文題名

Silica-Based Waveguide-Type Single-Mode Broadband
Optical Directional Couplers

(石英系導波路形単一モード広帯域光カプラに関する研究)

学位論文内容の要旨

1985年に全国縦断光ファイバ幹線システムが完成し、光通信技術は実用段階に入った。しかし、今後電話だけでなく、ファクシミリ、映像、データ等を含めたマルチメディア通信を実現するためには、光がもっている高速広帯域性を十分発揮させることが重要である。それには光分配器(カプラ)、光フィルタ、光スイッチ、光変調器、光増幅器等の各種機能光部品の開発が不可欠である。

光方向性結合器は、2本の光ファイバ(または光導波路)の一部を互いに近接させ、その中を伝搬する光信号をモード結合させることによって、分岐・合流器(カプラ)、波長合・分波器(フィルタ)、スイッチ、変調器等の様々な機能を実現することができる。この光方向性結合器は、構造が極めて簡単であること、動作原理がマイクロ波やミリ波の分野でよく用いられる導波管と類似しているためその解析がある程度容易なこと、などの理由から光集積回路の有力なデバイス構成要素の一つとしてきわめて重要である。

しかし、一般に光方向性結合器は、出力光分岐比が導波光の波長によって異なる、いわゆる波長依存性を持つ。これは導波する光の波長が長いほどモード結合しやすいという性質から生じるものである。例えば、波長 $1.3\mu\text{m}$ の信号光で分岐比が0.5対0.5であっても波長 $1.55\mu\text{m}$ の信号光では分岐比が0.1対0.9などに変化してしまう。方向性結合器形光フィルタはこの性質を積極的に利用して光の合分波機能を実現している。しかしながら、使用する信号光の波長によって分岐比変動があっては困る光分配器では、この波長依存性は好ましくない。このように、光方向性結合器には光システムを構築する際の構成要素として“一長一短”があり、その波長依存性を解消する方法が探索されはじめていた。

一方、波長依存性のない光分配器すなわち導波路形広帯域カプラとしては、Y分岐素子あるいはファイバ形カプラが研究されてきた。しかし、前者は任意の分岐比の設計がむずかしく素子損失が比較的大きいこと、後者はハイブリッ

ド化や集積化に限界があることから、将来の光信号処理技術のキーデバイスとは考えにくい。これらの問題点を解決するには、どうしても汎用性のある導波路形広帯域カブラの開発が不可欠と考えられる。

本論文は、石英系光導波路作製技術を用いて、 $1.3\mu\text{m}$ から $1.55\mu\text{m}$ 程度までの広い波長域にわたって光方向性結合器の分岐比の波長依存性を解消することができる、光集積回路に適した実用性の高い導波路形広帯域カブラを提案し、その設計・作製法についてまとめたものである。具体的には、方向性結合器の結合領域における導波路構造を非対称構造、テーパ構造、マッハツェンダ干渉計構造、あるいはセグメント構造とすることを提案し、かつそれらについて最適設計することによって、低損失な導波路形広帯域カブラが実現できることを示している。さらにカブラ構造の幾何学的対称性（線対称，点対称）と分岐比の波長依存性との間に一定の相関関係があることを初めて明らかにしている。

全体は8章からなる。以下に、各章の要旨を述べる。

第1章は、本論文の歴史的背景と目的を述べるとともに、各章の概要を述べている。まず、本研究を開始するにいたる、光部品形態（バルク形，ファイバ形，導波路形）の変遷と光方向性結合器の特徴について述べ、さらに本研究の目的と意義が明らかにされている。

第2章では、導波路形単一モード広帯域カブラの原理を $\{2 \times 2\}$ および $\{3 \times 3\}$ 方向性結合器について述べている。光導波路内を伝搬する光波のふるまいを大ざっぱに理解するにはモード結合方程式による解析が有効であることを示し、 $\{2 \times 2\}$ 方向性結合器の光結合特性は3つの基本的な伝送行列で表されること、 $\{3 \times 3\}$ 方向性結合器については中央導波路入射および外側導波路入射の場合で波長特性が異なることを示した。また、直線結合部の直前・直後の曲がり導波路部分での結合も含めた素子全体の解析を行なうにはビーム伝搬法が適していることを示した。最後に第4章から第7章で提案する各広帯域カブラについて紹介している。具体的には、(i) Y分岐形，(ii) 結合領域の導波路を一様に非対称構造とした非対称形，(iii) テーパ導波路を連結したテーパ形，(iv) 2つの結合領域をもつマッハツェンダ干渉計形，(v) 導波路の一部をいくつかに分断したセグメント形である。(ii)～(v)はいずれも方向性結合器内に位相差を生じさせるために工夫した構造である。

第3章では、主に導波路形広帯域カブラ作製の基礎となる石英系光導波路の作製技術とその諸特性について述べている。石英系光導波路は光ファイバと同様なガラス材料で作製できるため、広い波長範囲にわたって伝搬損失が小さいこと、光ファイバとの接続損失が極めて小さいこと、寸法精度の高い埋め込み型導波路を実現できること、長期信頼性が高い等の他の作製法に無い優れた特長をもっている。この作製法は実用的な導波路形光部品を実現する上で極めて

有望であることを述べている。

第4章では、方向性結合器内の直線導波路を一様に非対称構造とした非対称形広帯域カプラについて述べている。非対称形(2×2)広帯域カプラでは、各導波路幅が結合部断面において一様に異なる非対称構造をなす。結合部での各導波路の伝搬定数が異なるためモードのミスマッチ(不整合)が起こり、出力光分岐比の波長依存性に平坦化が生じることを示した。波長域1.3μm~1.55μmの広い範囲にわたって、それぞれ結合分岐比が50%, 25%, 5%となるように作製でき、ほぼ設計通りに非対称形(2×2)広帯域カプラを実現できることを示した。さらにこの非対称形(2×2)広帯域カプラを(3×3)広帯域カプラに拡張できることを明らかにした。

第5章では、方向性結合器内の直線導波路を、連結したテーパ導波路で置き換えたテーパ形広帯域カプラについて述べている。この分岐比の波長特性は第3章で得られた伝送行列の組み合わせおよびそれらの積によって概ね予測でき、極めて平坦な波長特性を取り得ることを示した。また、その波長特性がカプラの平面形状の対称性(線対称, 点対称等)により特徴づけられることを初めて明らかにした。得られた分岐比の測定結果はビーム伝搬法で設計した波長特性とよく一致した。

第6章では、方向性結合器内の直線導波路を、2つの結合領域をもつマッハウイング干渉計型回路で置き換えたマッハウイング干渉計形広帯域カプラについて述べている。2個の完全対称形方向性結合器の間に長さの異なる2本の導波路が連結されている構造をなす。この分岐比の波長特性も、第3章で得られた伝送行列の組み合わせおよびそれらの積によって概ね予測でき、極めて平坦な波長特性を取り得ることを示した。また、その波長特性がカプラの平面形状の対称性(線対称, 点対称等)により特徴づけられることを初めて明らかにした。得られた分岐比の測定結果はビーム伝搬法で設計した波長特性とよく一致した。

第7章では、方向性結合器内の直線導波路の一部をいくつかに分断したセグメント形広帯域カプラについて述べている。第6章のMZI形広帯域カプラでは、一方の導波路よりも他方の導波路を長く設定して光路長差を付与していたのに対し、逆に一方の導波路より他方の導波路を短く設定して、同様な広帯域特性を実現している。この分岐比の波長特性も、第3章で得られた伝送行列の組み合わせおよびそれらの積によって概ね予測でき、極めて平坦な波長特性を取り得ることを示した。また、その波長特性がカプラの平面形状の対称性(線対称, 点対称等)により特徴づけられることを初めて明らかにした。

第8章では本論文の結論を述べている。これまでに得られた結果から、上記の広帯域カプラの構造対称性と分岐比の波長依存性との間には相関関係が存在し、系統的に表にまとめられることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 英 機
副 査 教 授 田 頭 博 昭
副 査 教 授 本 間 利 久
副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

Silica-Based Waveguide-Type Single-Mode Broadband Optical Directional Couplers
(石英系導波路形単一モード広帯域カプラに関する研究)

全国縦断光ファイバ幹線システムが1985年に完成して以来、光通信は我国の基幹実用技術として発展を続けている。その次の技術課題は、光のもつ高速広帯域性を活かし、電話のみならず、ファクシミリ、映像、データ等を含めたマルチメディア通信を実現することにある。このためには光結合器（カプラ）、光フィルタ、光スイッチ、光変調器、光増幅器等の各種機能光部品を集積化可能な形態で開発することが不可欠であるが、現在、これは研究開発の端緒についたばかりである。ことに、光集積回路を実現する上で重要な基本構成要素となる導波路形光結合器は、従来、その光パワー分岐比が強い波長依存性を持ち光のもつ広帯域性を活かさないという重大な難点があった。

このような背景のもとに、本論文は、広帯域化の諸条件を基礎的かつ系統的に検討し、それにもとづき、 $1.3\mu\text{m}$ 帯から $1.55\mu\text{m}$ 帯までの広い波長域にわたって波長依存性を解消できる導波路形単一モード広帯域カプラをいくつか提案・実証するとともに、広帯域カプラの設計に関しいくつかの有益な新知見を得たものである。全体は8章からなる。

第1章は、本論文の技術的背景と目的、意義、章構成を述べている。

第2章では、広帯域カプラの原理と解析手法、構造について述べている。まず、伝送行列を含むモード結合方程式解析により、カプラの原理を説明している。次に、結合部の直前・直後の曲がり導波路部分も含めた素子全体の定量解析はビーム伝搬法が適することを示している。最後に、本論文で提案・検討しているY分岐形、非対称形、テーパ形、マッハツェング干渉計形、セグメント形カプラについて、その構造と基本的着想を説明している。

第3章では、本論文の導波路形広帯域カプラの製作に使用した石英系光導波路の作製技術とその特徴について述べている。石英系導波路技術は、広波長範囲で伝搬損失が小さい、ファイバとの接続損失が小さい、寸法精度の高い埋め込み型導波路を実現できる、長期信頼性が高いなど他に無い優れた特長をもっていることが指摘されている。

第4章では、結合部分を意図的に非対称構造とした非対称形カプラについて検討した結果を述べている。まず、 $\{2 \times 2\}$ カプラにおいて、各導波路幅が結合部断面で連続的に変化する非対称構造とすると、各導波路の伝搬定数が異なることによるモード不整合が起

こり、出力光分岐比の波長依存性が平坦化することを理論的および実験的に示している。次にこれが $\{3 \times 3\}$ 広帯域カプラに拡張できることを明らかにしている。

第5章では、結合分をテーパ導波路としたテーパ形カプラについての検討結果を述べている。まず、分岐比の波長依存性を、伝送行列を用いて近似解析し、極めて平坦な波長特性を得ている。さらに、波長依存性の挙動が、カプラの平面形状がもつ対称性（線対称、点対称等）と強い相関をもつという新知見を得ている。最後に、カプラを試作・測定した結果、特性がビーム伝搬法で設計した波長特性と定量的に一致することを示している。

第6章では、方向性結合器の直線導波路部分を、2つの結合部をもつマッハツエンダ干渉計構造としたマッハツエンダ干渉計形カプラについての検討結果を述べている。まず、分岐比の波長依存性を伝送行列を用いて近似解析し、極めて平坦な波長特性が得られることを示している。また、このカプラについても、その波長特性がカプラの平面形状の対称性（線対称、点対称等）と対応関係をもつことを指摘している。さらに、カプラを試作・測定した結果は、ビーム伝搬法で設計した波長特性とよく一致することが示されている。

第7章では、結合直線導波路部分をいくつかセグメントに分断したセグメント形カプラについて述べている。マッハツエンダ干渉計形カプラでは、一方の導波路を他方より長く設定し光路長差を付与するのに対し、このカプラでは、セグメントにより光路長差を実現する。伝送行列を用いた詳細な解析により、極めて平坦な波長特性が期待できること、また、波長特性と平面形状の対称性とに相関があることが明らかにされている。

第8章では本論文の結論を述べ、カプラの断面構造と波長特性の相関を系統的な表にまとめることに成功している。

これを要するに、著者は、単一モード広帯域を実現するいくつかの新しい導波路形光方向性結合器を提案・実証すると共に、広帯域カプラの設計に関しいくつかの有益な新知見を得ており、光集積回路・光通信工学の進歩に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。