

外文

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

半導体光導波路とモノリシック
光集積回路への応用に関する研究

申請者

竹内 博昭

Hiroaki Takeuchi

平成 3 年 6 月

理 1492 (1740)

集積光学 (Integrated Optics) の概念は、1969年に米国ベル研のS. E. Millerによって提唱されたことに始まる。それ以後の約20年間に、光ファイバーを用いた光通信用の半導体レーザやフォトダイオードの発達にはめざましいものがあった。これらの単体の半導体光デバイスの特性を十分に活用して、より高性能でかつ多機能な光デバイスを実現する有力な方法として、半導体モノリシック光集積回路が考えられる。しかしながら、この半導体モノリシック光集積回路の実現のためには、III-V族化合物半導体光導波路の低損失化の遅れに代表されるような数多くの課題が残されていた。そのために、モノリシック光集積回路の多くは、アイデアの領域から出ることがなかった。

このような背景のもとで、本研究ではモノリシック光集積回路の実現のための技術的課題を明確にし、それらの課題を解決してモノリシック光集積回路を実現することを目的とした。まず、主要な技術的課題の一つであるIII-V族化合物半導体光導波路の低損失化を達成した。併せて、モノリシック光集積回路の重要な要素となる導波路型光制御デバイスに関しても、厳密な設計にもとづいた具体的なデバイス化を実現した。このような要素技術の確立を基礎として、モノリシック光集積回路の具体例として、コヒーレント光通信用のモノリシックヘテロダイイン受信器を実現するに至った。そこで本論文では、前半部で低損失半導体光導波路と導波路型光制御デバイスに代表される半導体モノリシック光集積回路の要素技術について記述した。後半部では、本研究で実現した半導体モノリシック光集積回路の具体例である分岐干渉型（マッハツェンダ型）光変調器、およびモノリシックヘテロダイイン受信器について記述した。本論文は、全8章により構成されている。以下に各章の概要について整理する。

第1章では、序論として光集積回路の概要について説明した。そして、モノリシック光集積回路の必要性と、過去の研究経緯について整理することによって、本研究の意義を明確にした。

第2章では、まず光導波路の基本的な概念を述べた。次に、モノリシック光集積回路の重要な要素である半導体光導波路の理解のために、ステップ屈折率分布光導波路の導波モード解析について整理した。具体的には、波動方程式から出発して、導波モードの分散までの解析手順について説明した。

第3章では、まず半導体光導波路に関して、屈折率差の形成による光閉じ込め方法を中心に基本概念について整理した。次に、半導体光導波路の材料として、III-V族化合物半導体が最適であることを指摘した上で、III-V族化合物半導体光導波路に関する一般論について記述した。その中で、III-V族化合物半導体光導波路の材料としてGaAs/AlGaAs系とInGaAsP/InP系が、結晶成長技術とプロセス技術、およびファイバーを用いた光通信用のモノリシック光集積回路への応用技術の観点から、最も有力な候補であることを指摘した。

第4章では、III-V族化合物半導体光導波路の代表例であるGaAs/AlGaAsヘテロ接合型光導波路の低損失化について、本研究で得られた成果を中心に記述した。まず、AlGaAsにおけるAl組成変化による屈折率制御について説明し、それを利用したGaAs/AlGaAsヘテロ接合型光導波路の基本構成について記述した。その後、低損失化のための最適構造と考えられるストリップ装荷型GaAs/AlGaAs光導波路について、導波特性の構造パラメータ依存性について解析結果を中心に記述した。具体的には、各層の厚み、Al組成、および光閉じ込めのためのストリップ装荷構造の寸法等の構造パラメータと、光導波路の導波特性との相関関係に関する系統的な数値解析を行うことによって、ストリップ装荷型GaAs/AlGaAs光導波路の構造最適化のための条件を明らかにした。次に、この解析結果にもとづいて製作したストリップ装荷型GaAs/AlGaAs光導波路の伝搬特性、および伝搬損失の測定結果について記述した。本研究では、シングルモード伝搬で、伝搬損失が0.6dB/cmというモノリシック光集積回路への応用に十分適合するような実験結果を得た。また、光集積回路に不可欠な微小曲率半径をもつ曲線光導波路に関しても、低損失化のための条件を明らかにした。ここでは、半導体光導波路の伝搬損失を測定するために、ファブリペロー共振法を採用した。この方法に関しては、従来の技術に比べていくつかの長所をもつことが既に指摘されているが、本章では特長ばかりではなく、その適用限界についても詳しく記述した。

第5章では、InGaAsP/InPヘテロ接合型光導波路に関する研究成果について記述した。InGaAsP/InP系は、光ファイバー通信で用いられる波長1.30μm～1.55μm帯の発光・受光素子の材料として盛んに利用されている。したがって低損失InGaAsP/InP光導波路を用いて、レーザやフォトダイオード等の発光・受光素子を光学的に接続することによって、InP基板上のモノリシック光集積回路を容易に構成することができる。まず、ストリップ装荷型InGaAsP/InP光導波路の低損失化に関する実験結果について記述した。直線光導波路の伝搬損失として、波長1.55μmの光に対して0.6dB/cmという値を得た。この結果から、本光導波路が光集積回路の構成要素として十分適用可能であることを確認した。ところで、光集積回路における半導体光導波路の役割は、単なる光信号の伝搬だけではなく、導波路型の機能デバイスを構成することにも重要な意義がある。本研究では、このような導波路型機能デバイスとして、極めて応用範囲の広いpin構造をもつInGaAsP/InP光導波路型位相変調器を取り上げた。この位相変調器の位相変調効率と伝搬損失の構造パラメータ依存性について、InGaAsP/InPヘテロ構造に固有の物性定数を考慮した詳細な解析を行った。本章では、この数値解析結果について詳しく記述した。本解析結果と従来の近似解析結果とを比較することによって、今回の解析法にもとづいた位相変調器の構造設計の重要性を明らかにした。

第6章では、本研究で初めてInGaAsP/InP系光導波路を用いて製作した分岐干渉型

(マッハツェンダ型)光変調器に関して、本研究で試作した素子の測定結果を中心に記述した。この変調器は、互いに平行な2本の導波路型位相変調器と一对のY分岐光導波路から構成される一つの光集積回路であり、波長チャーピングのない高速強度変調光源という光通信方式への応用面からも重要なものである。まず、試作した分岐干渉型(マッハツェンダ型)光変調器の構造と基本的な動作原理について説明した。次に、製作プロセスについて記述した。その後、導波路型位相変調器部分の電気的特性と、逆バイアス電圧印加時の伝搬光の位相変調特性について述べた。最後に、分岐干渉型光変調器からの出射光の強度変調特性について記述した。本研究では、最小スイッチング電圧として4.5V、消光比14dBという良好な結果を得た。特に、光強度変化と出射光のニアフィールドパターンを対応させながら観測したことにより、分岐干渉型光変調器の動作原理に関する数値計算結果を実験的に確認した。

第7章では、コヒーレント光通信用モノリシックヘテロダイイン受信器について記述した。このモノリシックヘテロダイイン受信器は、本研究によって世界で初めてその試作と機能動作の確認に成功したものである。この光集積回路は、ヘテロダイイン受信のための基本要素である局部発振光源としての多電極DFBレーザ、信号光と局発光との混合のための方向性結合器型3dBカプラー、および中間周波数領域にあるビット信号検出のための導波路型フォトダイオードの3要素全てをInP基板上にモノリシック集積化した構造をもつ。本章では、このモノリシックヘテロダイイン受信器の構造、動作原理について記述した後、実際の製作方法について説明した。構成要素間の光結合方法としてバットジョイント法を採用したが、試作の結果から、この方法がモノリシック光集積化技術において非常に有効なものであることを明らかにした。次に、各構成要素の特性について記述した。具体的には、局部発振光源である多電極DFBレーザの発振特性、方向性結合器の3dBカプラーとしての光等分配機能、そして導波路型フォトダイオードの受光特性について詳しく記述した。その後、本ヘテロダイイン受信器に外部から信号光を入射させた場合に観測されたヘテロダイインビットスペクトルを示し、本モノリシック光集積回路のヘテロダイイン受信器としての優れた機能を実際に確認したことについて記述した。

最後に、第8章では本研究で得られた成果を総括した。そして、本研究によって蓄積された半導体モノリシック集積化技術を基にした今後の展望について述べた。