

論文の内容の要旨

論文題目 : 大容量光ファイバ伝送にむけた石英系平面型光波回路による
超高速差動位相変調信号用復調器の研究

氏名 : 那 須 悠 介

光通信システムは現代社会を支える重要なインフラであり、増加を続けているデータトラフィックを支えるためには、基幹ネットワークの更なる容量拡大が急務である。そこで、従来の強度変調方式に変わる新たな変調方式として、差動位相変調方式の導入が検討されている。差動位相変調方式はその光雑音耐力や PMD 耐力に優れ、次世代超高速 40Gbit/s 光伝送システムの有望な変調方式となっている。一方で、差動位相変調方式の実現には復調器が必要である。受光素子は光信号の強度信号に対して感度を持つため、位相情報を直接検波できない。そこで差動位相変調を強度変調信号に変換した後に受光素子により受信する必要がある。本論文では、石英系ガラスによる平面型光波回路を用いて、このような差動位相変調信号用の復調器の実現を目指す。

第2章では、DQPSK 復調器の製造時に必須である、高精度な屈折率および複屈折独立調整技術を検討した。従来の屈折率調整技術では、屈折率と複屈折の両方が変化するため、両者を所望の値に高精度に調整することは困難であった。そこで、波長 193nm の ArF エキシマレーザと波長 244nm の倍周波 Ar レーザを用い、複屈折の発生しない屈折率調整技術をそれぞれ確立した。これにより、従来の技術と組み合わせることで、屈折率と複屈折の独立制御を可能とした。更に、波長 193nm の ArF エキシマレーザと波長 244nm の倍周波 Ar レーザの比較を行い、これらのレーザによる屈折率変化過程と複屈折発生原因を詳細に検討した結果、193nm の ArF エキシマレーザの場合、コアの緻密化過程に発生する応力が複屈折を変化させ、応力開放溝による解消が可能であることを示した。また、波長 244nm の倍周波 Ar レーザでは、コア上部のオーバークラッド層における変質が複屈折変化に影響を与え、レーザのビーム径により複屈折の発生量を制御できることを示した。更に、将来的なレーザ照射技術として、フェムト秒レーザによる導波路描画技術を検討し、PLC 内への

導波路描画を始めて実現した。一方、PLC 導波路の屈折率調整技術への応用を検討したが、PLC を構成する各ガラス層がフェムト秒レーザに対し異なる損傷閾値を持つため、屈折率調整時にコア以外の部分に欠陥損傷が発生することを明らかにした。欠陥損傷は導波路に損失を発生させるため、導波路の屈折率調整としては紫外光レーザが最適であることを確認した。

第3章では、DQPSK 復調器を構成する遅延干渉計の偏波依存性の発生メカニズムに関して議論し、モデル化を行った。遅延干渉計の PDF を一般化し定式化を行うことで、PDF の簡便な導出方法を導いた。これにより、遅延干渉回路に PDF が発生する条件は、複屈折によるアーム導波路間の光路長差の偏波依存性が存在する場合か、遅延干渉計内に偏波クロストークが存在する場合のどちらかであることを示した。前者の原因により発生する PDF は従来の技術により解消できるため、ここでは、後者の偏波クロストークにより劣化する PDF を更に深く議論した。偏波クロストークの発生原因として、MMI カップラと 45 度半波長板を仮定し、それらによる PDF の劣化量を求めた。結果、MMI カップラの偏波クロストークは波長依存性の無い PDF 劣化を発生させ、45 度半波長板は大きな波長依存性を持つ PDF 劣化をもたらすことを示した。加えて、これらの偏波クロストークの低減限界について、実験結果を交えながら説明し、偏波クロストーク自体を低減する以外の別の PDF 手減方法の必要性を述べた。

第4章では、DQPSK 復調器用の遅延干渉回路の PDF 低減方法の提案および検証を行った。MMI カップラの偏波クロストークにより劣化する PDF は、45 度半波長板を非対称に配置することで解消可能なことを示した。非対称配置により、偏波を 90 度回転させる旋光子を実現することで、カップラにおける偏波回転を補償し、低 PDF 化を実現した。理論および実験によりその効果を確認し、有効性を示した。更に、45 度半波長板の波長依存性や製造誤差により発生する偏波クロストークが劣化させる PDF を、45 度半波長板の配置方法および複屈折調整により低減できる方法を提案し、実証した。これらの低 PDF 化手法を共に用い、DQPSK 復調器を作製した。作製した復調器の PDF は FSR の 0.5% 以下と、非常に小さな PDF を実現した。また、この復調器を用いて DQPSK 信号の復調特性評価を行ったところ、入力偏波による OSNR ペナルティは 0.2dB と非常に小さく、良好な復調特性を得た。

第5章では、DQPSK 復調器のアサーマル化による低消費電力化と、DQPSK 復調器の小型化に関して述べた。アサーマル化に関しては、透過スペクトルおよび偏波依存性の温度無依存化した。前者は、樹脂によるガラス屈折率の温度依存性の補償により実現した。損失増加による消光比劣化を防ぎ、且つ、透過スペクトルを温度無依存化することに成功した。後者は、オーバークラッドガラスの膜応力調整により導波路複屈折

の温度無依存化を実現することで、偏波依存性の温度無依存化に成功した。これらの方法により、温度無依存な DQPSK 復調器を実現でき、消費電力の大部分を占めていた温度調整用ペルチェを取り除くことが可能となり、DQPSK 復調器の低消費電力化を実現した。また、DQPSK 復調器の小型化に関して、編みこみ型の回路構成を提案し、回路の小型化と位相シフタ駆動時の偏波依存性劣化抑制を実現した。実際に小型アサーマル DQPSK 復調モジュールを作成し、特性評価を行った。従来の温調型 DQPSK 復調モジュールに比べ消費電力を 60% 低減し、モジュールサイズも $40 \times 12 \times 5.6\text{mm}$ と世界最小の DQPSK 復調器を実現した。また、信号の復調特性や温度安定性、応答特性、長期信頼性等も評価し、良好な復調特性と安定性、信頼性を有していることを確認した。これにより、石英系平面光波回路によるアサーマル DQPSK 復調器を初めて実現した。

本研究では、大容量光ファイバ伝送にむけ、石英系平面型光波回路による超高速差動位相変調信号の復調器を実現した。従来の伝送方式に比べ、より複雑な送信機や受信機が必要であるため、これらで使用される光デバイスはその光学性能のみならず、小型性・低消費電力性・経済性などが強く求められている。本研究により実現した DQPSK 復調器は、これら要求を満たすものであり、次世代基幹通信システムの 40Gbit/s 化において、差動位相変調方式の実現を加速させるものと期待できる。更に、最先端研究では次々世代通信システムである 100Gbit/s の超大容量光通信システムの議論もされ始めている。このような 100Gbit/s システムにおいても位相変調システムが採用される方向であり、受信装置には偏波分離装置や 90 度ハイブリッド等の光回路が必要となる。本研究の成果である高精度屈折率・複屈折制御技術や DQPSK 復調器設計技術は、このような光回路の実現に応用でき、この後も大容量光ファイバ伝送用に石英系平面型光波回路の応用範囲拡大が期待される。