

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889002

研究課題名(和文)大容量LAN系光通信用モード分割多重光送信機的设计基盤に関する研究

研究課題名(英文)A research on the design method of optical transmitters for large capacity, mode-division multiplexed LAN optical communication system

研究代表者

藤澤 剛 (Fujisawa, Takeshi)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：70557660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：LAN系光通信の大容量化のためのモード分割多重技術を用いた光送信機的设计基盤に関する研究を行った。LAN系光通信で主力となる電界吸収型変調器によって変調された光信号の数モードファイバ中での伝送特性解析技術を確立した。具体的に、IV族系材料を用いた場合の電界吸収型変調器量子構造設計技術、数モードファイバ中でのモード間結合を考慮することのできる伝送特性解析技術を開発した。さらに、モード分割多重システムで必須となる、モード合分波器のための、波面整合法を用いた光波回路最適設計技術を開発した。それを用いて、低損失、超広帯域モード合分波器構造、また、小型、低損失、円弧形状を有するモード回転子を発明した。

研究成果の概要(英文)：The design methods of optical transmitters for large capacity, mode-division multiplexed LAN optical communication system are investigated. The analysis method for transmission characteristics of optical signals generated by electroabsorption modulators in few-mode fibers is developed: the design method of quantum structures for electroabsorption modulators using group IV materials and the transmission analysis method in few-mode fibers taking into account mode-mixing due to various perturbations. Furthermore, optical circuit optimization method based on wavefront matching method is newly developed for mode multi/demultiplexers. Ultralow loss and ultrabroadband 2 mode multi/demultiplexers, and small and low-loss mode rotators having arc geometry are devised

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光通信 光ファイバ 光デバイス 計算機科学

1. 研究開始当初の背景

近年のクラウドサービスの普及などに伴い、データセンタ内、センタ間などの LAN 系通信の光化が急速に進んでおり、その伝送容量拡大が強く求められている。2010 年に標準化が完了した 100 ギガビットイーサネットでは、もはや 1 波で必要な伝送容量を賅うことができず、25G × 4 波の波長分割多重システムを採用した。今後、400G、1T のシステムへと拡大していくためには、波長軸だけではなく、別の軸での多重化が必要となっている。

モード分割多重技術は、伝送路に数モードファイバを用い、伝送路の各モードに情報を載せる技術であり、主に長距離通信への適用を念頭に研究が進められている。モード分割多重技術を用いることで、波長数を増やすことなく、伝送容量を拡大することが可能であり、その LAN 系光通信への適用が期待される。しかし、LAN 系光通信では、長距離幹線系のシステムでは用いられない、安価な光送信機を用いており、その送信器で作り出した光信号の数モードファイバ上での伝送特性は未知であった。また、送信器では、各モードを多重・分離するモード合分波器が必要となるが、集積型の導波路デバイスを用いた合分波器では波長依存性が大きいことが問題になっていた。

2. 研究の目的

本研究では、LAN 系光通信へのモード分割多重技術導入のために、特に光送信機の設計基盤を構築することを目的とした。具体的に、(1) LAN 系光通信において広く用いられる電界吸収型変調器を用いた場合の、数モードファイバ上での伝送特性解析法、及び、(2) 高性能モード制御光波回路設計技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

前项目的(1)については、研究代表者が独自開発してきた、電界吸収型変調器設計理論、及び、ベクトル有限要素法を用いた高精度ファイバ設計技術を融合し、伝送路中でのモード結合が存在する中での、伝送特性解析技術を確立する。前项目的(2)については、光波回路最適設計技術の一つである波面整合法を用いた、モード制御光波回路最適設計技術を新規開発する。

4. 研究成果

(1) LAN 系光通信において広く用いられる電界吸収型変調器を用いた場合の、数モードファイバ上での伝送特性解析法

数モードファイバ上での、モード間結合が存在する場合の光信号伝搬解析技術と、電界吸収型変調器量子構造設計技術の開発を行った。

数モードファイバ上の伝送特性解析に関しては、モード間結合を生じさせるファイバ中の摂動としてマイクロバンドを想定した

ファイバモデルを構築し、その中でのモード間群遅延差による群遅延広がり算出技術、及び、信号伝搬解析技術を開発した。図 1 上段に結合型 3 コアファイバの構造図を示す。3 コアファイバは 3 つのコアから形成される 3 個のスーパーモードを有するが、ファイバ中でのモード結合が無ければ、それぞれ別々の群速度で伝搬する。しかし、ファイバ中での各種摂動によるモード結合が生じると、摂動が大きい場合には強く結合し、出力では同時に一つのガウス型パルスとして出力される。図 1 下段に 60 キロ伝搬後の 3 つのモードのインパルス応答、及び、引用文献の実測結果を示す。図に示すように、本研究で開発した伝送特性解析結果と、引用文献 1 における実験結果とは良く一致しており、開発した手法の妥当性が確認できる。

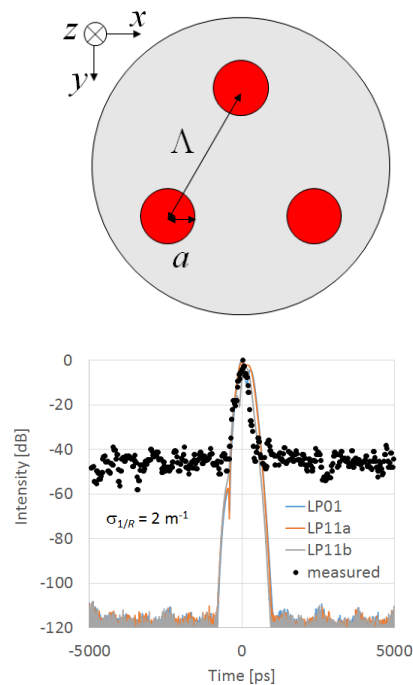


図 1 結合型 3 コアファイバの構造図と 60 キロ伝搬後のインパルス応答

電界吸収型変調器量子構造設計技術については、光部品の低コスト化が必須な LAN 系光通信において重要となる、Si 基板上において、IV 族系元素を用いて構成した量子構造解析技術を開発した。多粒子系の量子力学により光と物質の相互作用を定式化することで、緩和時間などのフィッティングパラメータを用いずに、基礎的な材料パラメータのみで光学特性を算出する手法を開発した。図 2 に、Si 基板上に形成した、Ge/SiGe 量子井戸の電圧依存吸収特性を示す。なお、実験値は引用文献 2 のものである。図からわかる通り、本研究で開発した手法を用いた計算値と実験値は良く一致しており、開発した手法の妥当性が確認できる。

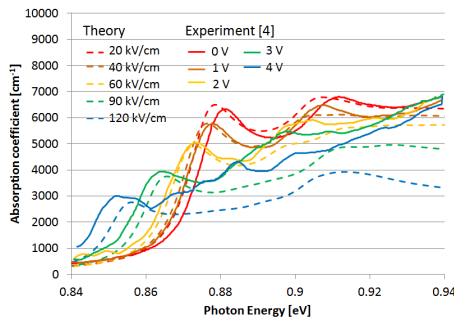


図 2 Ge/SiGe 量子井戸の吸収特性

開発した 2 つの手法を組み合わせることで、LAN 系光通信において広く用いられる電界吸収型変調器を用いた場合の、数モードファイバ上での伝送特性を把握することが可能となる。

(2) 高性能モード制御光波回路設計技術の開発

実用に耐えうるより高性能なモード合分波器などのモード制御光波回路の実現を目指し、光波回路最適設計技術の一つである波面整合法を用いた、モード制御光波回路最適設計技術を新規開発した。

波面整合法は研究代表者が所属していた研究グループにおいて開発された光波回路最適設計手法の一つであり、これまで、Y 分岐導波路、導波路交差などの、基本的な平面光波回路要素に適用されてきた(引用文献 3)。本研究では、モード制御光波回路用波面整合法を新たに開発し、LP01/LP11 モード合分波器へと適用し、低損失・広帯域モード合分波器が構成可能であることを見出した。

図 3 上段に、波面整合法によって設計された、非対称型方向性結合器を用いた、LP01/LP11 モード合分波器の上面図を示す。非対称方向性結合型モード合分波器では、下側の細い導波路(Waveguide2)の LP01 モードと上側の太い導波路(Waveguide1)の LP11 モードが位相整合しており、Waveguide2 に入社された光は、結合部で Waveguide1 の LP11 モードへと結合し、2 モード合分波器として動作する。通常の構造では、2 つの導波路ともに、一定の導波路幅を有しているが、波面整合法による最適設計を行うことで、図のように、導波路幅が伝搬方向に変化した構造が得られる。図 3 下段に、通常構造、及び、波面整合法によって最適化された構造の、Waveguide2 から Waveguide1 への透過スペクトルを示す。図中、赤線は通常構造、緑線が波面整合法によって設計されたものの透過スペクトルである。図から明らかなように、本研究で考案したモード合分波器の透過スペクトルは、通常構造に比べ、広い帯域で低損失であることがわかる。

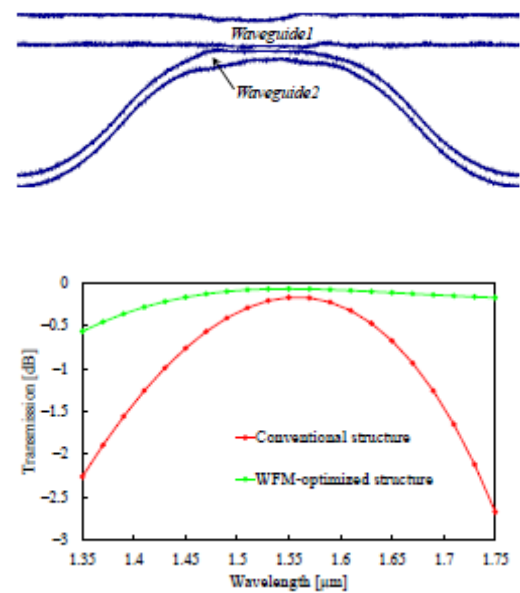


図 3 波面整合法によって設計された 2 モード合分波器の構造図と透過スペクトル

< 引用文献 >

- R. Ryf et al., "Space-division multiplexed transmission over 4200-km 3-core microstructured fiber" in Proc. of OFC, PDP5C2, (2011).
- Y.H Kuo et al., "Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon," Nature, **437**, 1334-1336, (2005)
- Y. Sakamaki, et al., "New optical waveguide design based on wavefront matching method," J. Lightw. Technol. **25**, 3511-3518 (2007).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

- W. Kobayashi, M. Arai, **T. Fujisawa**, T. Sato, T. Itoh, K. Hasebe, S. Kanazawa, Y. Ueda, T. Yamanaka, and H. Sanjoh, "Novel approach for chirp and output power compensation of 40-Gbit/s EADFB laser by integrating short SOA," Optics Express, vol.23, no.7, pp.9533-9542, Apr. 2015 (査読有).
- T. Fujisawa**, and K. Saitoh, "Material gain analysis of GeSn/SiGeSn quantum wells for mid-infrared Si-based light sources based on many-body theory," IEEE Journal of Quantum Electronics,

vol.51, no.5, pp.7100108, May 2015 (査読有).
T. Fujisawa, and K. Saitoh, "Quantum-confined Stark effect analysis of GeSn/SiGeSn quantum wells for mid-infrared Si-based electroabsorption devices based on many-body theory," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.51, no.11, pp.8400207, Nov. 2015 (査読有).

〔学会発表〕(計 31 件)

T. Fujisawa, and K. Saitoh, "Microscopic analysis of quantum-confined Stark effect of group IV quantum wells for mid-infrared Si-based electroabsorption modulators," 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2015), Stu41.6, San Jose, USA, May 12, 2015.

T. Fujisawa, and K. Saitoh, "A principal mode analysis of strongly-coupled 3-core fibres," 41th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2015), We.1.4.6, Valencia, Spain, Sep. 30, 2015.

T. Fujisawa, and K. Saitoh, "Impulse response analysis of strongly-coupled three-core fibers," Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS 2015), FM1E.3, San Jose, USA, Oct. 19, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 3 件)

名称：マルチコアファイバ及び光ケーブル
発明者：齊藤翔太、竹永勝宏、齊藤晋聖、**藤澤剛**
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2015-30082
出願年月日：2015 年 2 月 18 日
国内外の別： 国内

名称：モード合分波器
発明者：坂本泰志、半澤信智、松井隆、辻川恭三、**藤澤剛**、齊藤晋聖
権利者：同上
種類：特許
番号：P2014-107-JP01
出願年月日：2015 年 2 月 4 日
国内外の別： 国内

名称：マルチコアファイバ及び光ケーブル
発明者：齊藤翔太、竹永勝宏、齊藤晋聖、**藤澤剛**
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2015-163985
出願年月日：2015 年 8 月 21 日
国内外の別： 国内

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://icp.ist.hokudai.ac.jp>

6. 研究組織
(1) 研究代表者
藤澤剛 (Fujisawa Takeshi)
北海道大学大学院・情報科学研究科・准教授
研究者番号：70557660

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：